



تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة متعددة المصادر (الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح،

والكتلة الحيوية، والهيدروجين) لتحقيق الاستدامة

*مصطفى عبدالقادر النظيف¹، ياسر فتحي نصّار²، مصباح سليم³، سعيد عبدالوهاب¹

¹كلية الهندسة، جامعة فزان، ليبيا .

²قسم الهندسة الميكانيكية وهندسة الطاقات المتجددة، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ، ليبيا.

³الأكاديمية الليبية، سبها، ليبيا.

الملخص

تتناول هذه الدراسة تصميم وتقييم منظومة هجينة متعددة المصادر متكاملة تضم الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية والهيدروجين، بهدف تحقيق إمداد طاقة آمن ومستدام لمنطقة تقع في الجنوب الليبي؛ حيث تم تطوير نموذج المنظومة وتحسينه اعتماداً على تحليل ساعي على مدار عام كامل (8,760 h) لضمان التوازن بين الإنتاج والاستهلاك، وتحقيق أعلى موثوقية تشغيلية وتغطية الحمل الكهربائي بالكامل بأدنى تكلفة مستوية لإنتاج الكهرباء (LCOE) والهيدروجين (LCOH) والميثان (LCOCH4)، وقد تم تحديد السعات المثلى لمكونات النظام من خلال عملية التحسين دون افتراض قدرات مسبقة، فبلغت القدرة المركبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية MW925 ، وطاقة الرياح MW1400 ، ومنظومة الكتلة الحيوية MW195 ، ومنظومة الهيدروجين 1000 MW تشمل وحدات التحليل الكهربائي والتخزين وخلايا الوقود، وأظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المقترح قادر على تلبية كامل الطلب الكهربائي دون انقطاع (LPSP = 0) ، مع مساهمة الطاقة الشمسية بنحو 37% من إجمالي الطاقة المنتجة، وطاقة الرياح بنحو 48%، والكتلة الحيوية بنسبة 10%، في حين تمت تغطية نحو 5% من إجمالي الأحمال الكهربائية عبر منظومة الهيدروجين، مما يبرز الدور المحوري لهذا المورد في تعزيز استقرارية المنظومة وتكاملها، وبلغ إجمالي رأس المال الاستثماري للمنظومة نحو 20 مليار دولار، في حين بلغت التكلفة المستوية للكهرباء حوالي 0.2401 \$/kWh، وتكلفة إنتاج الهيدروجين نحو 2.84 \$/kg، بينما بلغت تكلفة إنتاج الميثان حوالي 0.283 \$/kg، وقدرت فترة استرداد رأس المال الاستثماري بنحو 15 سنة، بينما ساهمت المنظومة المقترحة في تجنب انبعاثات غازية تقارب نحو 8.4M ton سنوياً من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون. ومن شأن هذه النتائج تعزيز دور الطاقات المتجددة في تحقيق الاستراتيجية الليبية لجعل نصيب الطاقات المتجددة يتعدى 50% من مزيج الطاقة المنتجة في ليبيا بحلول عام 2050.

الكلمات المفتاحية: منظومات الطاقات المتجددة الهجينة؛ الطاقة الشمسية الكهروضوئية؛ طاقة الرياح؛ الكتلة الحيوية؛ الهيدروجين؛ ليبيا.

Design of a Multi-Source Hybrid Renewable Energy System (Solar, Wind, Biomass, and Hydrogen) for Achieving Sustainability

*Mostafa A. Alnadhif¹ and Yasser F. Nassar² and Mesbah Salem³ and Said Abdulwahab⁴,

¹ Faculty of Engineering, University of Fezzan, Libya.

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

³ The Libyan Academic, Sebha, Libya

¹ Faculty of Engineering, University of Fezzan, Libya.

Abstract

This study investigates the design and evaluation of an integrated multi-source hybrid renewable energy system combining solar photovoltaic (PV), wind energy, biomass, and hydrogen to provide a secure and sustainable energy supply for a region located in southern Libya. The system was developed and optimized based on an hourly analysis over a full year (8,760 h) to ensure a balance between energy generation and consumption while achieving high operational reliability and full coverage of the electrical load at minimized levelized costs of electricity (LCOE), hydrogen (LCOH), and methane (LCOCH₄). The optimal capacities of the system components were determined through an optimization process without assuming predefined sizes. The results indicate that the installed capacities reach 925 MW for solar PV, 1,400 MW for wind energy, 195 MW for the biomass energy system, and 1,000 MW for the hydrogen system, including electrolyzers, storage units, and fuel cells. Simulation results demonstrate that the proposed system is capable of meeting the entire electrical demand without any loss of power supply probability (LPSP = 0). The energy contribution shares are approximately 37% from solar PV, 48% from wind energy, and 10% from biomass, while about 5% of the total demand is supplied by the hydrogen system, highlighting its crucial role in enhancing system stability and integration. The total capital investment is estimated at approximately USD 20 billion. The results show a levelized cost of electricity of about 0.2401 USD/kWh, a hydrogen production cost of approximately 2.84 USD/kg, and a methane production cost of around 0.283 USD/kg, with an estimated payback period of about 15 years. From an environmental perspective, the system enables the avoidance of approximately 8.4 million tons of CO₂ emissions annually, indicating a substantial reduction in carbon emissions. Overall, these findings demonstrate the strong potential of hybrid renewable energy systems in supporting Libya's energy strategy toward achieving more than 50% renewable energy penetration in the national energy mix by 2050. Keywords: Hybrid renewable energy systems (HRES); solar photovoltaics (PV); wind energy; biomass; hydrogen; Libya.

المقدمة

يشهد العالم تزايداً سريعاً في الطلب على الطاقة، وفي ظل التحديات المتزايدة التي تواجه منظومة الطاقة العالمية، تتجه الأنظار نحو حلول مبتكرة ومستدامة قادرة على تلبية الطلب المتنامي على الكهرباء، مع تقليل الانبعاثات الكربونية وتحقيق كفاءة بيئية واقتصادية؛ فقد شهد العالم خلال السنوات الأخيرة نمواً في استغلال الطاقة المتجددة، حيث تجاوز إجمالي القدرات المركبة 4.4 TWh في عام 2024، مسجلةً بذلك زيادة بنسبة

140% مقارنة بعام 2015، وأصبحت تمثل ما يقارب 46.4% من إجمالي القدرة الكهربائية العالمية، ويعكس هذا النمو تحولاً استراتيجياً في سياسات الدول نحو اعتماد مصادر نظيفة ومستدامة [1]. تُعد الطاقة الشمسية إحدى الركائز الأساسية في هذا التحول، حيث تخطت القدرة العالمية للطاقة الشمسية 2.2 TWh في نهاية عام 2024، بزيادة سنوية تجاوزت 600 GWh، لتغطي أكثر من 10% من إجمالي الاستهلاك الكهربائي العالمي، كما سجلت طاقة الرياح قدرة تراكمية تقارب 1,136 GWh، مشكلةً ما يزيد عن 8% من إنتاج الكهرباء عالمياً [2,3]. كما تبرز الكتلة الحيوية كمصدر حيوي لإنتاج الطاقة، حيث بلغت القدرة التراكمية للطاقة الحيوية نحو 151 GWh في عام 2024، مع توقعات بزيادة الطلب على البيوغاز والبيوميثان خلال السنوات المقبلة، ويشهد الهيدروجين في السنوات الأخيرة اهتماماً عالمياً متزايداً حيث بلغ الانتاج العالمي على الهيدروجين نحو 97 مليون طن في عام 2024 بزيادة تقارب 2.5% مقارنة بعام 2023، كما ارتفعت القدرة العالمية للمحطات الكهربائية (Electrolyzers) إلى نحو 1.4 GW بنهاية عام 2024، وتمثل الصين وحدها ما يقارب 70% من هذه الزيادة [4-6].

نظراً لكون ليبيا دولة موقّعة على الاتفاقيات الدولية المتعلقة بالتغير المناخي، وباعتبارها أكبر منتج للنفط في شمال أفريقيا، وتعتمد اعتماداً رئيسياً على النفط والغاز في توليد الكهرباء والإيرادات، أصبحت الحاجة إلى تبني أنظمة طاقة متجددة هجينة أمراً ملحاً للحد من البصمة الكربونية. كما تمتلك ليبيا إمكانات كبيرة ومتنوعة من مصادر الطاقة المتجددة، تؤهلها للقيام بدور أساسي في دعم وتطوير منظومة الطاقة في البلاد [7]. وعليه، يتعين على ليبيا استثمار مواردها الطبيعية مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وطاقة الكتلة الحيوية، لمواجهة الزيادة المستمرة في الطلب على الطاقة، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتوجيه جزء أكبر منه للصناعات البتروكيميائية بدلاً من حرقه في إنتاج الكهرباء. وتكمن أهمية هذه الدراسة في توافيقها مع تطلعات ليبيا لزيادة مساهمة الطاقة المتجددة في مزيج الكهرباء إلى 30% بحلول عام 2030، وإلى أكثر من 50% بحلول عام 2050 [8].

أثبتت أنظمة الطاقة الهجينة جدارتها ونجاحها على نطاق واسع، سواء على المستوى المحلي أو الدولي، وذلك استناداً إلى عدد كبير من الدراسات والأبحاث العلمية المنشورة في هذا المجال [7-19]. ويقدم عرض الدراسات السابقة في هذه الورقة رؤية شاملة لأهم التطورات التي شهدتها هذا القطاع، كما يبرز القيمة العلمية للبحث الحالي والفجوات البحثية في الدراسات السابقة.

قدم [20] Nabi et al دراسة في Palm Island – Australia لتقييم الجدوى التقنية والاقتصادية والبيئية لتصميم منظومة طاقة متجددة هجينة خارج الشبكة، بالاعتماد على المحاكاة باستخدام برنامج HOMER. تمت مقارنة أربع تكوينات رئيسية، كان أبرزها النظام المتجدد بالكامل (System D: PV/Bio/W/FC/BDG) الذي يستبعد مولد الديزل التقليدي. أظهرت النتائج أن الساعات المثلى للمنظومة كانت للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 2266 kW، وخلية وقود بسعة 600 kW، ومولد حيوي بسعة 500 kW، إضافة إلى أربع توربينات رياح بقدرة 330 kW لكل توربين، وأربع وحدات بطارية بسعة 100 kW لكل وحدة. وبلغت مساهمات مصادر الطاقة 43.1% للطاقة الشمسية، و41.6% لطاقة الرياح، و13.4% لخلية الوقود، و1.8% للديزل الحيوي. اقتصادياً، حقق النظام أفضل أداء بصافي تكلفة حالية قدرها 9.46 million AUD وتكلفة طاقة LCOE = 0.183 AUD/kWh، مع تكلفة تشغيل وصيانة تقارب 0.24 million AUD. بيئياً، سجل النظام انبعاثات صفرية من CO₂ و SO₂ مقارنة بالنظام المرجعي الذي بلغت فيه انبعاثات CO₂ نحو 2,359,997 kg/year. وقام [21] Alharthi بتحليل تقني واقتصادي وبيئي

لمنظومة طاقة متجددة هجينة معزولة عن الشبكة ومخصصة لإنتاج الكهرباء والهيدروجين في الساحل الشمالي الغربي للمملكة العربية السعودية، باستخدام برنامج HOMER. تتكون المنظومة من الألواح الشمسية الكهروضوئية، وتوربينات الرياح، ومنظومة تخزين بالبطاريات، ومحل كهربائي، وخزان هيدروجين، وخلية وقود. تم تحليل سيناريوين رئيسيين هما المنظومة A المزود ببطاريات والمنظومة B بدون بطاريات، حيث بلغ متوسط الحمل اليومي 321 kWh/day و 452 kWh/day على التوالي، مع قدرة اسمية 64 kW، وبلغ الإنتاج السنوي للطاقة 153,615 kWh/year في المنظومة A و 220,245 kWh/year في المنظومة B، بينما بلغ إنتاج الهيدروجين 868 kg/year و 1905 kg/year على التوالي. اقتصاديًا، سجلت المنظومة A صافي تكلفة حالية $\$ 746,500 \approx NPC$ مقارنة بـ $\$ 879,219$ للمنظومة B، في حين بلغت تكلفة الطاقة 0.61 و $\$ /kWh 0.72$ ، مع تكلفة إنتاج للهيدروجين تراوحت بين 4.5–5 $\$/kg H_2$. وأظهرت النتائج أن دمج البطاريات يقلل ساعات تشغيل خلية الوقود ويحسن الأداء الاقتصادي والعمر التشغيلي للمنظومة. وقدم Boutagane et al. [22] دراسة لتقييم الجدوى التقنية والاقتصادية والبيئية لتصميم منظومة طاقة هجينة مستقلة تعتمد على الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح مدمجة مع الهيدروجين لتزويد المواقع اللامركزية في Algeria بالكهرباء والهيدروجين. شملت المنظومة ألواح PV، وتوربينات رياح، ومحلًا كهربائيًا، وخزان هيدروجين، وخلية وقود، ومحول طاقة، مع إدراج حمل مؤجل لاستخراج وتنقية المياه اللازمة للتحويل الكهربائي. أُجري التحليل باستخدام برنامج HOMER لخمس أقاليم جزائرية. وأظهرت النتائج أن ساعات PV تراوحت بين 1845–3520 kW، وساعات الرياح بين 218–1002 kW، في حين بلغت سعة خلية الوقود 600 kW وسعة المحل الكهربائي 1000–1500 Kw. اقتصاديًا، تراوحت LCOE بين 0.514–0.868 $\$/kWh$ ، وتكلفة الهيدروجين LCOH بين 8.31–12.4 $\$/kg$ ، مع NPC بلغ 10.28–17.7 M\$. وأظهرت تحليلات الحساسية تأثير الأداء الاقتصادي بتغير الموارد وتكاليف الاستثمار. أجرى Youssef et al. [23] دراسة في Egypt لتقييم تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة مستقلة لتغذية موقع معزول في Sinai Peninsula، تعتمد على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وإنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي دون استخدام البطاريات. تألفت المنظومة من محل PV بقدرة 120 kW، وتوربينات رياح بقدرة إجمالية 60 kW، ومحل كهربائي بقدرة 50 kW، وخزان هيدروجين بسعة 200 kg، وخلية وقود بقدرة 40 kW. أظهرت النتائج قدرة النظام على تلبية حمل يومي بلغ 120 kWh/day بموثوقية عالية، مع $LCOE \approx 0.19 \$/kWh$ وتكلفة هيدروجين تراوحت بين 4.8–6.1 $\$/kg$ ، إضافة إلى خفض ملحوظ في انبعاثات CO_2 . وقام Choukri et al. [24] بتقييم تقني واقتصادي وبيئي لمنظومات طاقة متجددة هجينة مستقلة لتغذية قرية ريفية في منطقة Ain Beni Mathar – Morocco باستخدام برنامج HOMER. تم تحليل 15 سيناريو مختلف دمجت الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والطاقة الشمسية المركزة (Eurodish)، مع البطاريات ومولدات الكتلة الحيوية. أظهرت النتائج أن النظام الأمثل يتكوّن من محطة PV بقدرة 48.8 kW، وعدد 213 بطارية، ومحول بقدرة 43.8 kW، محققًا إنتاجًا سنويًا قدره 117.5 MWh مع فائض طاقة بنسبة 8.8%. وبلغت $LCOE \approx 0.184 \$/kWh$ و $\$ 262,810 \approx NPC$ ، مع خفض انبعاثات CO_2 بنحو 81.7 طن/سنة. وقدم Dinçer and Özer [25] دراسة لتصميم وتحسين منظومة طاقة متجددة هجينة متكاملة مع إنتاج الهيدروجين الأخضر لتلبية الطلب الكهربائي واحتياجات النقل في مدينة Kahramanmaraş – Turkey، باستخدام برنامج HOMER. شملت المنظومة ألواح PV بسعة 13.26 GW، و 280 توربين رياح بقدرة 7.5 MW لكل توربين، ومولد غاز حيوي بقدرة 4 MW، ومحل كهربائي بقدرة 1 MW، وبطاريات Li-ion بسعة 1 MWh

بعدد 20,096 وحدة، ووزان هيدروجين بسعة 120 kg. بلغ $LCOE \approx 0.3959$ \$/kWh و $NPC \approx 52.3$ billion \$، مع خفض انبعاثات CO_2 في قطاع الكهرباء بنحو 9,398 طن/سنة و 325,215 طن/سنة في قطاع النقل. استعرض [26] Elnaggar et al. الجدوى التقنية والاقتصادية والبيئية لاستغلال طاقة الرياح في توليد الكهرباء وإنتاج الهيدروجين الأخضر في Gaza Strip. تم تحليل بيانات الرياح عند ارتفاعي 65 و 80 m بسرعات سنوية 5.51–5.68 m/s، وتقييم 10 نماذج توربينات بقدرات 2300–600 kW. بلغ أعلى إنتاج سنوي للطاقة 3910 MWh باستخدام توربين Siemens SWT-2.3-93، بينما تراوح معامل السعة بين 14.6–20.5%. وسُجّلت أقل $LCOE \approx 0.0696$ \$/kWh، في حين تراوحت LCOH بين 4.8–7.4 \$/kg، مع خفض سنوي لانبعاثات CO_2 بلغ 1071.8 طن/سنة مقارنة بمحطات الوقود الثقيل. استناداً إلى ما تم سرده من مراجعة للأبحاث السابقة في هذا المجال، فإن هذه الدراسة لها قيمة علمية وعملية لما أضافت من تحليل على المستوى المحلي والدولي. ويعتقد الباحثون أن هذه الدراسة تقدم المساهمات العلمية التالية:

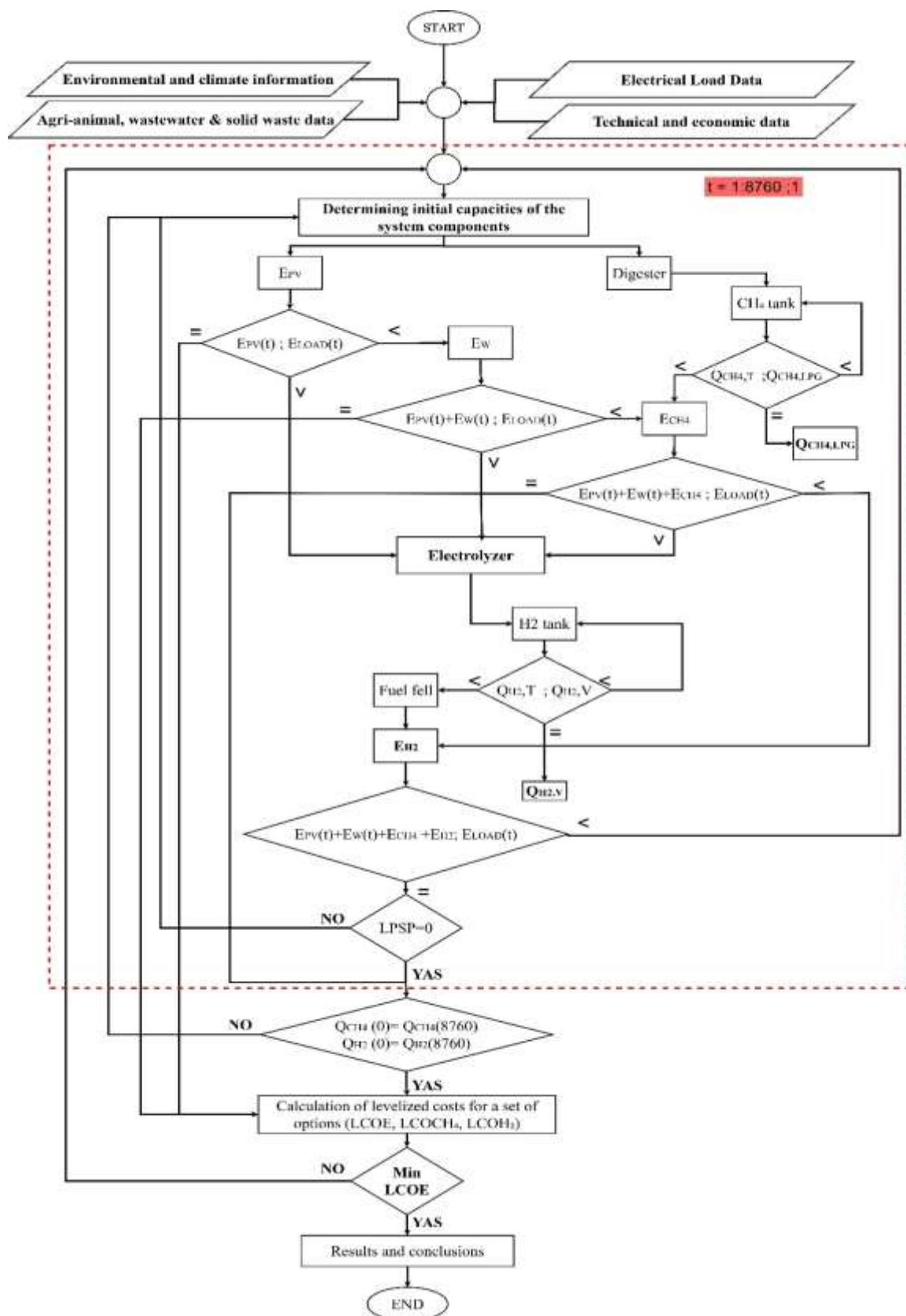
- تسليط الضوء على إمكانات الطاقات المتجددة المتاحة في المنطقة الجنوبية لليبيا.
- تقديم تصميم متكامل على أساس استخدام المخلفات العضوية والاستفادة منها في توليد الطاقة.
- تصميم منظومة هجينة متجددة لتغطية 100% من أحمال الكهرباء ووقود السيارات وغاز الطهي في المنطقة المدروسة.
- تقديم نموذج رياضي لتقدير التكلفة المستوية لإنتاج الكهرباء والهيدروجين وغاز الطهي للمنظومة يراعى فيه وجود أكثر من مصدر لتزويد أكثر من مستهلك واحد وهو مالم يدرس من قبل (على حسب علم الباحثين).
- تقييم الأثر البيئي للمنظومة المقترحة من حيث خفض الانبعاثات، وتقدير العائد البيئي الناتج عن استبدال الوقود الأحفوري بالوقود الحيوي والهيدروجين.
- المساهمة في دعم أهداف التنمية المستدامة (SDGs)، وخاصة الهدفين السابع ("طاقة نظيفة وبأسعار معقولة") والثالث عشر ("العمل المناخي")، من خلال تعزيز استقلال الطاقة وتقليل البصمة الكربونية [28،27].

قسم ما تبقى من البحث إلى الأجزاء التالية: ركّز القسم الثاني على المنهجية وطرق العمل، موضحاً الإطار التحليلي المستخدم في تصميم وتشغيل المنظومة الهجينة المقترحة كما قدم وصفاً تفصيلياً لمكونات النظام من حيث التصميم، والنمذجة الرياضية، ومعدلات الأداء. بينما خصّص القسم الثالث لعرض النتائج ومناقشتها، متضمناً الأداء الفني والاقتصادي والبيئي للمنظومة، إضافةً إلى تقييم التكلفة المستوية لكل من الكهرباء، والهيدروجين، والميثان ($LCOE$, $LCOH_2$, $LCOCH_4$)، وكذلك تحليل أوزان الطاقة التي أظهرت بوضوح نجاعة تطبيق المنظومة المقترحة في الجنوب الليبي، وإسهامها في تحقيق أمن واستدامة الطاقة وخفض البصمة الكربونية، وأدرجت الاستنتاجات والتوصيات المستخلصة من الدراسة في القسم الرابع، وختمت الدراسة بقائمة المراجع المستخدمة في الدراسة والتي تضمنت 115 عنواناً وبحثاً.

المنهجية وطرق العمل

تخطيط منظومة الطاقة الهجينة المقترحة ومخطط التشغيل

يبين الشكل 1 مخططاً لمكونات منظومة الطاقة الهجينة المقترحة التي تتكون من مزرعة رياح وحقل ألواح شمسية ومفاعل حيوي متصل مع محلل كهربائي لإنتاج الهيدروجين من مياه الصرف الصحي المعالجة، يتم تخزين الهيدروجين لاستخدامه لإنتاج الكهرباء عن طريق خلايا الوقود، وأيضاً لتزويد المركبات بالوقود عوضاً



الشكل 2: المنهجية المتبعة للمنظومة

ويوضح الشكل 3 سحابة كلمات تمثل تركيبات منظومات الطاقة المتجددة الهجينة (HRESS) الأكثر شيوعاً في الدراسات العلمية؛ حيث يبين حجم الخط لكل تركيبة مدى تكرار استخدامها في الدراسات، في حين تشير



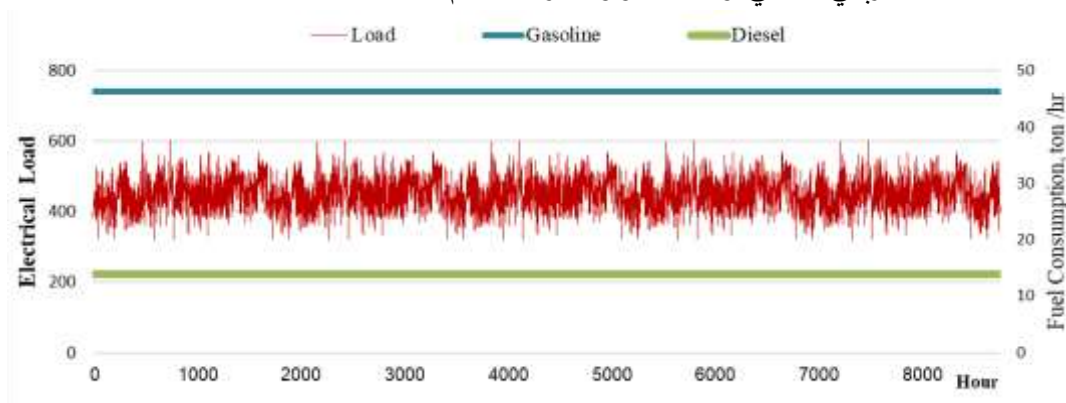
الشكل 4: الخريطة الجغرافية لليبيا <https://www.worldatlas.com/webimage/countrys/africa/ly.htm>

متطلبات الطاقة

الحمل الكهربائي والوقود والغاز

يعاني الجنوب الغربي من ليبيا من أزمة في إمداد الطاقة تتجلى في العجز الكبير بين الطلب المحلي المتزايد على الكهرباء والإمدادات المحدودة من الشبكة العامة؛ إذ تُقدَّر القدرة التوليدية الفعلية للشبكة الوطنية بحوالي 5-6 GW فقط من أصل أكثر من 8 GW قدرة إسمية، أي بعجز يتجاوز 25 % من الطلب الكلي على مستوى البلاد، ما يؤدي إلى انقطاعات متكررة تمتد في بعض مناطق الجنوب لمدد تتجاوز 10-12 ساعة يوميًا بسبب ضعف خطوط النقل وطول المسافات عن محطات التوليد الرئيسية في الشمال [38,37].

أما فيما يتعلق بالوقود (البنزين والديزل)، فتشير بيانات صندوق النقد الدولي إلى أن ليبيا تستورد نحو 90% من احتياجاتها من البنزين و70% من الديزل نتيجة محدودية قدرات التكرير المحلية، الأمر الذي يجعل الإمداد في المناطق الداخلية، وخاصة الجنوب، عرضةً للتأخير والانقطاع المتكرر [39]. وتؤكد تقارير المؤسسة الوطنية للنفط وشركة البريقة لتسويق النفط أن الكميات المخصصة للجنوب لا تغطي سوى 60-70% من الطلب الفعلي. كما يشمل العجز غاز الطهي، حيث تُسجَل فترات انقطاع طويلة ونقص في أسطوانات الغاز. تُبرز هذه المؤشرات بوضوح هشاشة المنظومة في الجنوب الغربي الليبي، واعتمادها الكامل على الإمداد المركزي من الشمال، الأمر الذي يجعلها أكثر عرضةً للأزمات. ومن ثم، فإن تطوير منظومات محلية لتوليد الطاقة المتجددة (كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية والهيدروجين) يمثل خيارًا استراتيجيًا لضمان أمن الطاقة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتحقيق الاستدامة الاقتصادية والبيئية للمنطقة. ويوضح الشكل 5 الحمل الكهربائي الساعي واستهلاك وقود المركبات لعام 2024.



الشكل 5: الحمل الساعي للطاقة الكهربائية واستهلاك وقود المركبات

متطلبات المياه

يعتمد الجنوب الغربي من ليبيا اعتماداً كاملاً على المياه الجوفية لتلبية احتياجاته المنزلية والزراعية والصناعية، وذلك بسبب غياب الموارد السطحية مثل الأنهار وندرة الأمطار الموسمية. ويُعدّ الخزان الجوفي النوبي المصدر الرئيسي لتوفير المياه في المنطقة، في ظل عدم وجود مشاريع للتطية أو شبكات ربط مائي وطنية. ويُقدّر متوسط الاستهلاك اليومي للفرد من المياه بما يتراوح بين 100–300 L/person-day، بينما يُقدّر إجمالي الطلب اليومي على المياه في المنطقة بنحو 60,000–180,000 m³/day تبعاً للأنشطة السكانية والاقتصادية [40–42].

استهلاك الوقود

يعتمد الجنوب الغربي من ليبيا اعتماداً كبيراً على الوقود التقليدي لتلبية احتياجاته من الطاقة في قطاعات النقل والاستهلاك المنزلي والخدمات العامة. ويُعدّ غاز النفط المسال (LPG) المصدر الرئيس لغاز الطهي، بينما يُشكّل الديزل والبنزين الوقود الأساسي المستخدم في المركبات والمعدات الزراعية ومولدات الطاقة الصغيرة المنتشرة في المنطقة للعمل خلال ساعات انقطاع التيار الكهربائي. ووفقاً لبيانات التشغيل المحلية، يُقدّر متوسط الاستهلاك اليومي للمحروقات في المنطقة كما يلي [43]:

• الديزل: 200,000 – 250,000 L/day

• البنزين: 1,000,000 – 1,400,000 L/day

• غاز الطهي: 10,000 – 15,000 Ton/year

ويُعدّ ارتفاع الطلب على المحروقات إلى توسع الأنشطة الاقتصادية وتزايد عدد المركبات في المنطقة، إذ يُقدّر عددها بما يزيد عن 200,000 مركبة، بمتوسط استهلاك يتراوح بين 150–200 L/month per vehicle [44].

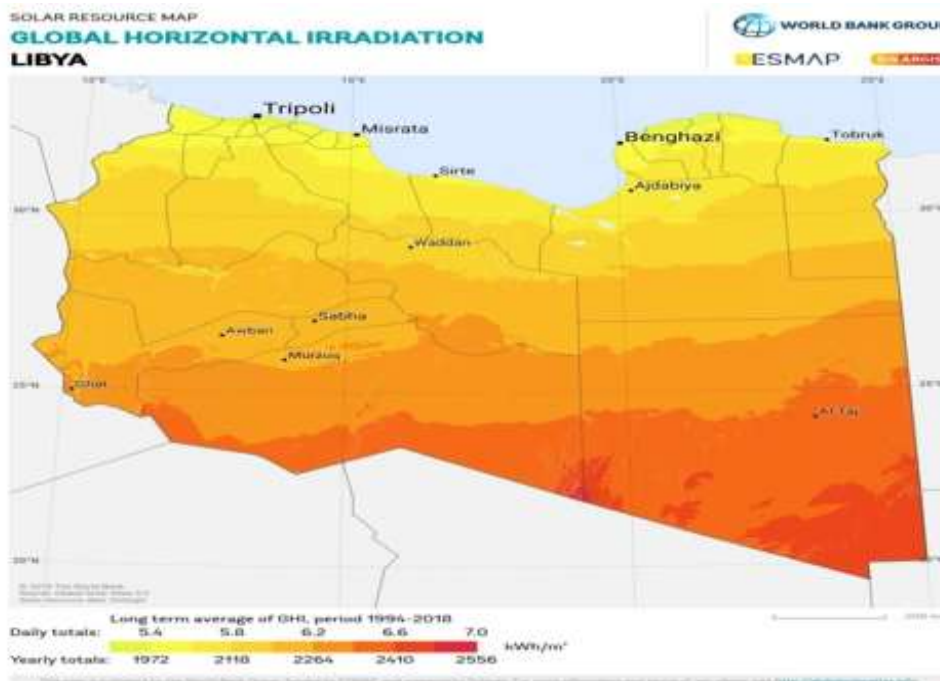
أما من حيث الأسعار المحلية، فيخضع الوقود في ليبيا لدعم حكومي كبير؛ إذ يبلغ سعر اللتر من البنزين أو الديزل نحو 0.15 LYD/L، بينما لا يتجاوز سعر أسطوانة غاز الطهي 2 LYD (15 kg) غير أن هذا الدعم لا يضمن توافر الإمدادات بشكل مستمر، حيث تواجه المنطقة الجنوبية أزمات متكررة في التوريد نتيجة القيود اللوجستية والظروف السياسية. ونظراً لهذه التحديات، يُعدّ استبدال الطلب الحالي بوقود متجدد مثل الميثان الحيوي (CH₄) أو الهيدروجين (H₂) خياراً استراتيجياً لتعزيز أمن الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية [45].

المؤشرات الرئيسية للموارد المتجددة

تشير الدراسات المحلية [46–63] إلى أن الجنوب الليبي يمتلك إمكانات كبيرة في كلٍ من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، مما يجعله من أكثر المناطق الواعدة لتطبيقات الطاقة المتجددة في ليبيا. ويمكن استغلال هذه الإمكانيات ليس فقط في إنتاج الكهرباء عبر الخلايا الكهروضوئية أو أنظمة الطاقة الشمسية المركزة، بل أيضاً في تطوير مشاريع إنتاج الهيدروجين كبديل مستقبلي للنفط الذي يُعدّ المصدر الأساسي للدخل القومي في ليبيا. الطاقة الشمسية

تُعدّ الطاقة الشمسية المورد الأكثر وفرة في الجنوب الليبي؛ حيث تتميز المنطقة بمستويات مرتفعة من الإشعاع الشمسي على مدار العام، الأمر الذي يجعلها مناسبة بشكل كبير لتقنيات الخلايا الكهروضوئية (Photovoltaic – PV) والطاقة الشمسية المركزة (Concentrated Solar Power – CSP) [64]. وتُظهر القياسات المناخية الموضحة في الشكل 6 أن متوسط الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي (GHI) يتراوح

بين 2200–2500 kWh/m²·year، بينما يمكن أن يصل الإشعاع الشمسي المائل الكلي (GTI) إلى 7.8 kWh/m²·day عند تطبيق زاوية الميل المثلى للألواح الشمسية بهدف تحقيق أعلى كفاءة تحويل ممكنة، وتعكس هذه المستويات من الإشعاع قدرة إنتاجية محتملة قد تتجاوز 1100 kWh/day، مما يجعل الاستثمار في الأنظمة الكهروضوئية خيارًا اقتصاديًا مجزيًا [65].



الشكل 6: خريطة موارد الطاقة الشمسية (Global Horizontal Irradiation) و/أو (Direct Normal Irradiance)

<https://globalsolaratlas.info>

يمكن تقدير الطاقة الكهربائية المنتجة من لوح كهروضوئي شمسي محدد (P_{PV}) من المعادلة التالية: [67,66]

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

حيث β_p هو معامل القدرة لدرجة الحرارة (°/%)، و H_t و H_{STC} يمثلان الإشعاع الشمسي القياسي والإشعاع الشمسي الفعلي الساقط على سطح اللوح الكهروضوئي. T_{STC} و T_{cell} تمثلان درجة حرارة سطح الخلية عند ظروف التشغيل الفعلية (°م) تحت ظروف الاختبار القياسية على التوالي، ويعتبر تقدير T_{cell} تحديًا حيث تعتمد على موقع الدراسة والخصائص الجوية له وكذلك الاحمال الكهربائية المسلطة على اللوح الشمسي، Nassar et al [68] قاموا بتجربة لقياس درجة حرارة سطح الخلية تحت الظروف الجوية والتشغيلية وقدموا العلاقة التالية [69]:

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

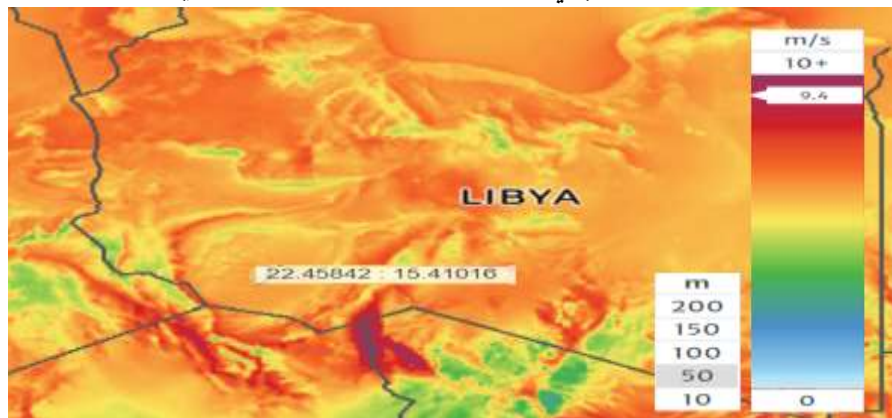
استنادًا على توصيات باحث محبين تم اختيار لوح شمسي من نوع Thin-Film PV يستعرض الجدول 1 الخصائص الكهربائية والاقتصادية والبيئية للوح الكهربي المختار [70].

الجدول 1: الخصائص الكهربائية والتقنية للوح الشمسي

المؤشر (Metric)	القيمة (Value)
الشركة المصنعة	Sharp
نوع التقنية	أغشية رقيقة CdTe – (Thin-Film) أو a-Si
العمر التشغيلي	20 – 25 years
القدرة العظمى (Pmax)	100 – 150 W
الكفاءة	10 – 13 %
معامل درجة الحرارة للقدرة العظمى (βP)	-0.25 / °C
أبعاد اللوح	1200 × 600 × 6 mm
تكلفة الاستثمار	500 – 900 \$/kWp
تكلفة التشغيل والصيانة السنوية	10 – 50 \$/kWp
معامل انبعاث CO ₂ خلال دورة الحياة (LCA)	20 – 30 gCO ₂ /kWh

طاقة الرياح

تشير الدراسات والخرائط المناخية إلى أن متوسط سرعة الرياح في بعض مناطق يتراوح بين 5-6.5 m/s ، وقد تصل إلى سرعات تتجاوز 9 m/s عند ارتفاع 50 m ، وهو الحد الأدنى لارتفاع محور التوربينات الهوائية الكبيرة، مما يجعل هذه السرعات مناسبة لتشغيل توربينات الرياح بكفاءة. وعلى الرغم من أن ليبيا لم تشهد حتى الآن تنفيذ مشاريع واسعة النطاق في مجال طاقة الرياح، إلا أن هناك اهتمامًا متزايدًا من قبل المؤسسات الأكاديمية والبحثية لدراسة جدوى هذا النوع من المشاريع والعمل على تطويره [71-73]. ويوضح الشكل 7 متوسط سرعة الرياح في مختلف مناطق ليبيا، حيث يمكن لاستغلال طاقة الرياح أن يسهم بشكل كبير في تعزيز إنتاج الطاقة المتجددة، لا سيما عند دمجها مع الطاقة الشمسية أو أنظمة تخزين الطاقة، الأمر الذي يساعد على تحسين موثوقية الإمداد الكهربائي وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري [74].



الشكل 7: متوسط سرعة الرياح [https://globalwindatlas.info/en]

يمكن تقدير الطاقة المنتجة $P_w(t)$ من توربين رياح محدد بخصائص معينة، باستخدام المعادلة التالية [75-78]:

$$P_w(t) = \begin{cases} P_{rated} & u_{rated} \leq u(t) < u_{cut-off} \\ P_{rated} \left(\frac{u(t) - u_{cut-in}}{u_{rat} - u_{cut-in}} \right) & u_{cut-in} < u(t) < u_{rated} \\ 0 & u(t) \leq u_{cut-in} \quad OR \quad u(t) \geq u_{cut-off} \end{cases} \quad (3)$$

حيث P_{rat} : هي القدرة الاسمية للتوربين (KW)، u_{cut-in} ، u_{rat} و $u_{cut-off}$ هي سرعات الرياح عند بداية التشغيل، والسرعة الاسمية، وسرعة الإيقاف m/s، و $u_t(t)$ هي سرعة الرياح عند ارتفاع محور التوربين (h_t) m/s.

نظرًا لأن سرعات الرياح $(u_0(t))$ المقدمة من المحطات المناخية أو منصات البيانات المناخية تُقاس عادة عند ارتفاع (h_0) مختلف عن ارتفاع محور توربين الرياح (عادةً 10 أمتار)، فمن الضروري تحويلها إلى ارتفاع محور التوربين. في هذه الدراسة، تم اعتماد قانون أُسي بناءً على توصيات الباحثين المحليين وبالتالي، يتم حساب سرعة الرياح عند ارتفاع برج التوربين باستخدام المعادلة التالية [78]:

$$u(t) = u_0(t) \left(\frac{h_t}{h_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

حيث (α) هو معامل الاس لسرعة الرياح (wind shear coefficient)، والذي يعتمد على استقرار الغلاف الجوي وطبيعة التضاريس. في هذا العمل تم اعتماد $\alpha = \frac{1}{7}$

وفقًا لتوصيات الباحثين المحليين [79-81]، اعتمد البحث الحالي توربين الرياح من نوع Gamesa G80 2MW. وأدرجت المواصفات الفنية والاقتصادية والبيئية في الجدول 2.

الجدول 2: خصائص التصميم والتشغيل لتوربينة الرياح

Gamesa G80 2MW	نوع تربينة الرياح
2000	P_{rat}, kW
80	H, m
2.0	$u_{cut-in}; m/s$
12.5	$u_{rat}; m/s$
25.0	$u_{cut-off}; m/s$
year 25	العمر التشغيلي
kW/\$1300	التكلفة الرأسمالية
kW/\$60	تكلفة التشغيل والصيانة
70g CO2/kWh	التقييم البيئي لدورة الحياة (LCA)

الكتلة الحيوية

يمتحن معظم سكان المنطقة الجنوبية الزراعة وتربية المواشي، وبالتالي يمكن أن ينتج عن ذلك كميات كبيرة من المخلفات الزراعية والحيوانية، بالإضافة إلى النفايات الصلبة المنزلية ومياه الصرف الصحي التي تمثل بدورها مصدرًا لطاقة الكتلة الحيوية. ووفقًا للإحصائيات، فإن إجمالي النفايات المتولدة في المنطقة يصل إلى حوالي 1.10 million tons/year كما هو موضح في الجدول 3، موزعة بين المخلفات الزراعية 868,211 tons/year، والنفايات البلدية الصلبة 134,980 tons/year، بالإضافة إلى الحمأة الناتجة عن مياه الصرف الصحي والتي تُقدَّر بحوالي 4,882 tons/year [82,83].

يمكن تقدير كمية غاز الميثان Q_{CH_4} السنوية الناتجة من هذه المصادر باستخدام العلاقة التالية [84]:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n MCF_i \times MW_i \times WCR_i, \text{ ton } CH_4/\text{year} \quad (5)$$

حيث: MCF: معامل تحويل الميثان (ton CH₄/ton waste) ، MW : الكتلة السنوية للنفايات (ton/year) ،
WCR: معدل جمع النفايات. وبناءً عليه، فإن الطاقة الكهربائية الناتجة عن محطة توليد طاقة تعمل CH₄
تُحسب من العلاقة [84]:

$$P_{BG} = \dot{m}_{CH_4} \times LHV_{CH_4} \times \eta_{Gpp} \quad (6)$$

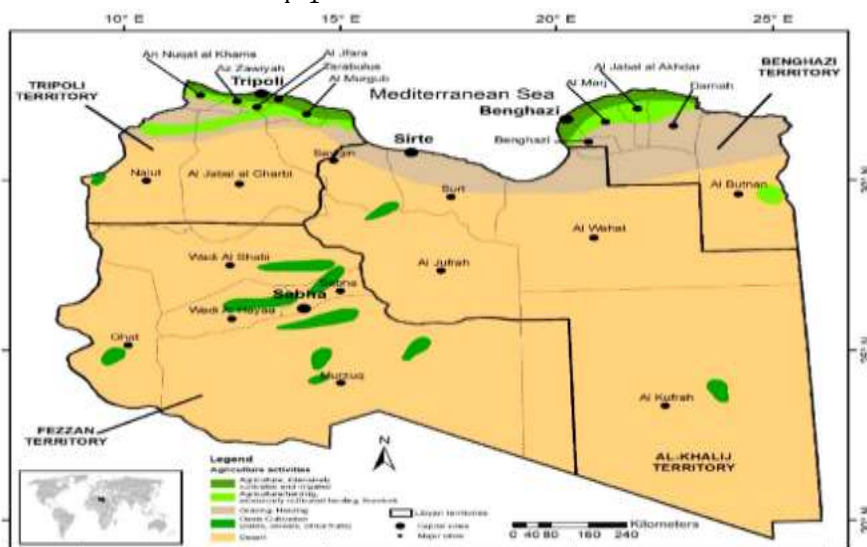
حيث تمثل P_{BG} القدرة الكهربائية (MW) ، \dot{m}_{CH_4} معدل التدفق الكلي للميثان (kg/s) ، LHV_{CH_4} القيمة الحرارية الدنيا للميثان (13.78 kWh/kg) ، بينما تشير η_{Gpp} إلى كفاءة التحويل الكهربائي (40%).

الجدول 3: الكمية ومعاملات التحويل والتجميع للميثان لكل نوع من المخلفات [10]

نوع المخلفات	الكمية ton/year	معامل التجميع (CF)	معامل الميثان CH ₄ m3/ton
المخلفات الزراعية (Agricultural residues)	868,211	0.40 – 0.50	419
المخلفات الحيوانية (Animal manure)	96,827	0.70 – 0.90	573
مياه الصرف الصحي (Sewage sludge)	4,882	0.10 – 0.20	244
النفايات الصلبة البلدية (Municipal solid waste - MSW)	134,980	0.60 – 0.80	456

كما أن تحديد حجم الهاضم الحيوي يُعد أمرًا مهمًا لضمان هضم الكميات الكبيرة من النفايات وإنتاج الغاز الحيوي بشكل فعال، والشكل 8 يوضح توزيع الأراضي والنشاط الزراعي والتربة. ويمكن حساب الحجم اللازم للهاضم الحيوي كما يلي [85]:

$$V_{Bio} = 0.221 \times \sum_{i=1}^n MW_i (\text{ton/year}) \times WCR_i \quad (7)$$



الشكل 8: توزيع الأراضي والنشاط الزراعي والتربة (JGIS) .
Journal of Geographic Information System (JGIS) .
الهيدروجين

يمكن تقدير كمية غاز الهيدروجين H₂ السنوية الناتجة من هذه المصادر باستخدام العلاقة التالية [86]:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{E_{EL} \times \eta_{EL}}{LHV_{H_2}} \quad (8)$$

حيث أن معدل إنتاج الهيدروجين (\dot{m}_{H_2} (ton/h)، E_{EL} الطاقة الكهربائية الداخلة للمحل LHV_{H_2} . MW. القيمة الحرارية الدنيا للهيدروجين. η_{EL} : كفاءة جهاز التحليل الكهربائي (80%) [87]. أما القدرة الكهربائية الناتجة من خلية الوقود P_{FC} (MW) فيتم حسابها بالمعادلة التالية [88]:

$$E_{FC} = \dot{m}_{H_2} \times LHV_{H_2} \times \eta_{FC} \quad (9)$$

حيث أن η_{FC} : كفاءة خلية الوقود. (60%)

يتم تحديد حجم كل من جهاز التحليل الكهربائي (Electrolyzer) وخلايا الوقود (Fuel Cell) بناءً على أقصى قيمة متحصل عليها خلال عملية المحاكاة على طول السنة

$$P_{EL} = \max [E_{EL}(t)]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (10)$$

$$P_{FC} = \max [E_{FC}(t)]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (11)$$

تقدير كمية الوقود البديل عن الوقود التقليدي

يمكن الحصول على الوزن المكافئ من الوقود البديل الذي سيحل محل الوقود التقليدي وفق معادلة ائزان الطاقة التالية:

$$Q_{RF} = Q_{Fuel} \times \frac{LHV_{Fuel}}{LHV_{RF}} \quad (12)$$

حيث Q_{RF} تمثل كمية الوقود البديل، و Q_{Fuel} كمية الوقود التقليدي، في حين يشير LHV إلى القيمة الحرارية الدنيا لكل نوع من أنواع الوقود. LHV_{Fuel} و LHV_{RF} تمثلان القيم الحرارية الدنيا لكل من الوقود التقليدي والوقود البديل، على التوالي. وأدرجت القيم الحرارية الدنيا (LHV) في الجدول 4:

الجدول 4: القيم الحرارية الدنيا والكثافة لكل من الوقود التقليدي والوقود البديل [89].

نوع الوقود	القيمة الحرارية الدنيا kWh/kg	الكثافة Kg/m^3
غاز النفط المسال	12.78	540
الديزل	12.06	850
البنزين	11.8	750
الميثان	13.78	22.4 عند ضغط 25MPa
الهيدروجين	33.33	71.59 عند ضغط 100MPa

دالة الهدف وقيود التصميم المثالي

عند التصميم المثالي لأي منظومة هندسية، يجب تحديد دالة الهدف وقيود التصميم والتي كانت كالتالي:

- تزويد كامل المنطقة بالكهرباء من المنظومة الهجين، أي أن احتمال فقدان تزويد القدرة يساوي صفر

$$(LPSP=0).$$

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [E_{Load}(t) - E_{HRES}(t)]}{\sum_{t=1}^{8760} E_{Load}(t)} = 0 \quad (13)$$

حيث $E_{Load}(t)$ هو الحمل و $E_{HRES}(t)$ هو إنتاج النظام الهجين للطاقة المتجددة في الموقع.

- التخلص من جميع المخلفات في المنطقة.
 - أن يكون الهيدروجين هو المصدر الوحيد لتزويد المركبات بالوقود في المنطقة.
 - أن يكون الميثان هو المصدر الوحيد لغاز الطهي.
- وكما تم تحديد اقل سعر لتكلفة انتاج وحدة الطاقة (LCOE) كدالة هدف التصميم المثالي لعدة خيارات من أحجام مكونات المنظومة المقترحة:

$$OBJ = \min(LCOE) \quad (14)$$

تحديد حجم مكونات المنظومة الهجينة المقترحة

يجب أن تكون مكونات المنظومة الهجينة المقترحة ذات أحجام مناسبة بحيث تغطي احتياجات الطاقة والوقود للمركبات بنسبة 100%. يتم استهلاك جزء من الميثان المنتج من الهاضم الحيوي $Q_{CH_4,C}(t)$ كبديل لغاز الطهي، والباقي يُحرق في المحطة الكهربائية لإنتاج الطاقة الكهربائية E_{CH_4} . وإذا كان هناك فائض يتم توجيهه إلى المثل الكهربائي.

تصميم وتحديد حجم منظومة الكتلة الحيوية

تقدر كمية غاز الميثان $Q_{CH_4,LPG}(t)$ التي ستحل محل غاز الطهي $Q_{LPG}(t)$ من المعادلة التالية:

$$Q_{CH_4,C}(t) = Q_{LPG}(t) \times \frac{LHV_{LPG}}{LHV_{CH_4}} \quad (15)$$

وتقدر كمية CH4 التي ستذهب الى محطة توليد الطاقة الكهربائية من المعادلة التالية:

$$Q_{CH_4,E}(t) = (Q_{CH_4}(t) - Q_{CH_4,C}(t)) \quad (16)$$

وتقدر الطاقة الكهربائية التي يمكن توليدها باستخدام غاز الميثان من المعادلة التالية:

$$E_{CH_4}(t) = Q_{CH_4,E}(t) \times LHV_{CH_4} \times \eta_{GPP} \quad (17)$$

يتم تحديد حجم خزان الميثان كالتالي:

$$V_{CH_4}(t) = \frac{1}{\rho_{CH_4}} (Q_{CH_4}(t) - Q_{CH_4,C}(t) - Q_{CH_4,E}(t)) \quad (18)$$

$$-SV_{CH_4} = \max[V_{CH_4}(t)]_{t=1 \rightarrow 8760}$$

حيث: ρ_{CH_4} كثافة الميثان المضغوط، SV_{CH_4} السعة المطلوبة للخزان (m^3). ولضمان استقرار المنظومة يجب أن تتحقق الشرط التالي:

$$V_{CH_4}(0) = V_{CH_4}(8760) \quad (19)$$

تصميم وتحديد حجم منظومة الهيدروجين

تصميم نظام الهيدروجين يختلف قليلاً عن تصميم نظام الغاز الحيوي، حيث أن الغاز الحيوي يمثل قيداً، بينما يجب تصميم نظام الهيدروجين بدقة لتغطية أي عجز في الطاقة. يتم إنتاج الهيدروجين من المحل الكهربائي Q_{H_2} بحيث يغطي وقود السيارات $Q_{H_2,V}$ كبديل للديزل $Q_D(t)$ والبنزين $Q_G(t)$. وكذلك يعتبر خزان للطاقة لتغطية العجز في الطاقة الكهربائية عن طريق خلايا الوقود $Q_{H_2,FC}(t)$.
تستخدم المعادلة 19 لتقدير كمية الهيدروجين اللازمة لتزويد المركبات بالوقود:

$$Q_{H_2,V}(t) = \frac{Q_D(t) \times LHV_D + Q_G(t) \times LHV_G}{LHV_{H_2}} \quad (20)$$

ويمكن تقدير كمية الهيدروجين اللازمة لتغطية العجز في الطاقة الكهربائية من المعادلة التالية:

$$Q_{H_2,FC}(t) = \frac{E_{Load}(t) - E_{CH_4}(t) - E_{PV}(t) - E_W(t)}{LHV_{H_2} \times \eta_{FC}} \quad (21)$$

وبالتالي فإن كمية الهيدروجين اللازمة لتغطية الحمل الكهربائي ووقود السيارات تعطى بالمعادلة التالية:

$$Q_{H_2}(t) = SF \times (Q_{H_2,V}(t) + Q_{H_2,FC}(t)) \quad (22)$$

حيث SF: معامل الأمان (1.2).

وبالتالي فإن المستوى اللحظي لحجم الهيدروجين في الخزان يحدد من العلاقة التالية:

$$V_{H_2}(t) = \frac{Q_{H_2}(t)}{\rho_{H_2}} \quad (23)$$

استهلاك الضواغط للطاقة

تستخدم الضواغط في منظومتي إنتاج الميثان والهيدروجين لضغطهما إلى 25 و 100 MPa على التوالي وذلك لتقليل حجم الخزان، وتقدر القدرة المستهلكة بواسطة الضواغط $P_{Comp}(t)$ بوحدة MWh.

$$P_{Comp}(t) = \sum_{n=1}^2 \frac{Q_i(t)}{\eta_{comp} \times \rho_i} \Delta P_i \quad (24)$$

حيث: (i) تشير إلى الغازين H_2 و CH_4 . ΔP_i فرق الضغط بين مدخل ومخرج الضاغط (MPa).

η_{comp} تمثل كفاءة الضاغط (95%).

الآفاق الاقتصادية والبيئية

إن تضمين التكلفة البيئية للبصمة الكربونية في التحليلات الاقتصادية يعزز من المكانية التنافسية لمصادر الطاقة المتجددة في سوق الطاقة. من السهل تقدير التكلفة المستوية لإنتاج الميثان (LCO_{CH_4}) عندما يكون هناك مصدر واحد أو عدة مصادر تنتج منتجًا واحدًا [90]. أما في حالة وجود عدة مصادر للطاقة تنتج أشكالًا متعددة من الطاقة النهائية (كما في الحالة الحالية) الكهرياء والهيدروجين H_2 ، والميثان CH_4 يصبح من الصعب تحديد التكلفة المستوية للكهرياء ($LCOE$) والتكلفة المستوية للهيدروجين (LCO_{H_2}). تم تطوير علاقة رياضية لإيجاد كل من LCO_{H_2} و LCO_{CH_4} بالاعتماد على مساهمة كل مصدر في إنتاج الطاقة النهائية. وبناءً عليه، سيتم التعبير عن LCO_{CH_4} ، وكذلك الشكل المعدل لكل من $LCOE$ و LCO_{H_2} كما يلي:

$$LCO_{CH_4} = \frac{\left\{ \left[\frac{r(1+r)^{n_{BE}}}{(1+r)^{n_{BE}} - 1} CC_{BE} + COM_{BE} + NC_{CO_2, BE} \right] + \left[\frac{r(1+r)^{n_{St, CH_4}}}{(1+r)^{n_{St, CH_4}} - 1} CC_{St, CH_4} + COM_{St, CH_4} \right] \right\}}{Q_{CH_4}}$$

$$LCO_{H_2} = \frac{\left\{ f_{BE, H_2} \left[\frac{r(1+r)^{n_{BE}}}{(1+r)^{n_{BE}} - 1} CC_{BE} + COM_{BE} + NC_{CO_2, BE} \right] + f_{PV, H_2} \left[\frac{r(1+r)^{n_{PV}}}{(1+r)^{n_{PV}} - 1} CC_{PV} + COM_{PV} + NC_{CO_2, PV} \right] + f_{W, H_2} \left[\frac{r(1+r)^{n_W}}{(1+r)^{n_W} - 1} CC_W + COM_W + NC_{CO_2, W} \right] + \left[\frac{r(1+r)^{n_{El}}}{(1+r)^{n_{El}} - 1} CC_{El} + COM_{El} + NC_{CO_2, H_2} \right] + \left[\frac{r(1+r)^{n_{St, H_2}}}{(1+r)^{n_{St, H_2}} - 1} CC_{St, H_2} + COM_{St, H_2} \right] \right\}}{Q_{H_2}}$$

$$LCOE = \frac{\left\{ f_{BE, E} \left[\frac{r(1+r)^{n_{BE}}}{(1+r)^{n_{BE}} - 1} CC_{BE} + COM_{BE} \right] + f_{PV, E} \left[\frac{r(1+r)^{n_{PV}}}{(1+r)^{n_{PV}} - 1} CC_{PV} + COM_{PV} \right] + f_{W, E} \left[\frac{r(1+r)^{n_W}}{(1+r)^{n_W} - 1} CC_W + COM_W \right] + \left[\frac{r(1+r)^{n_{El}}}{(1+r)^{n_{El}} - 1} (CC_{El} + CC_{FC}) + COM_{El} + COM_{FC} \right] + \left[\frac{r(1+r)^{n_{St}}}{(1+r)^{n_{St}} - 1} (f_{PV, E} CC_{St, H_2} + f_{BE, E} CC_{St, H_2} + f_{W, E} CC_{St, H_2}) + f_{BE, E} COM_{St, H_2} + f_{PV, E} COM_{St, H_2} + f_{W, E} COM_{St, H_2} \right] + NC_{CO_2, E} \right\}}{E}$$

حيث تشير الحروف السفلية (FC, El, W, PV, BE) إلى: طاقة الكتلة الحيوية، الطاقة الشمسية الفوتوفولطية، طاقة الرياح، الإلكترولايزر، وخلايا الوقود على التوالي. و η هو معدل الفائدة الحقيقي (2.4%) [91]، و n هو عمر التقنية، و (COM, CC) هما تكلفة رأس المال (\$) وتكلفة التشغيل والصيانة السنوية (\$/year) للتقنية على التوالي. و NC يمثل التكلفة السنوية الصافية للكربون (\$/year)، أما الحروف السفلية CH_4 ، H_2 ، E فهي تشير إلى: الميثان، الهيدروجين، والكهرياء المنتجة على التوالي، ويمكن تقديرها من خلال:

$$NC_{CO_2, BE} = SC_{CO_2} \times Q_{CH_4} \times \left[LCA_{BE} - f_{BE, LPG} \times EF_{CO_2, LPG} - f_{BE, E} \times LH_{CH_4} \times \eta \times EF_{CO_2, E} \right] \quad (28)$$

$$NC_{CO_2,H_2} = SC_{CO_2} \times Q_{H_2} \times LH_{H_2} \times \eta_{El} \quad (29)$$

$$\times [f_{BE,H_2} \times LCA_{BE} + f_{PV,E} \times LCA_{PV} + LCA_{EL} + LCA_W + LCA_W - (EF_{CO_2,E} + EF_{CO_2,V})]$$

$$NC_{CO_2,E} = SC_{CO_2} \times E \quad (30)$$

$$\times [f_{BE,E} \times LCA_{BE} + f_{PV,E} \times (LCA_{PV} + LCA_{EL} + LCA_{FC}) + f_{W,E} \times (LCA_W + LCA_{EL} + LCA_{FC}) - (EF_{CO_2,E} - f_{BE,E} \times EF_{CO_2,CH_4})]$$

حيث يشير الرمز SC_{CO_2} إلى التكلفة الاجتماعية للكربون والتي تُقدّر بنحو 70 \$/ton CO₂ [53]. أما معاملات انبعاثات الكربون فهي تُمثل كمية ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراق كل نوع من أنواع الوقود موضحة في الجدول 5.

الجدول 5: معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون [17].

معامل الانبعاث	نوع الوقود / مصدر الطاقة
3.144 kg CO ₂ /kg LPG	غاز النفط المسال (LPG)
3.221 kg CO ₂ /kg diesel	الديزل
3.175 kg CO ₂ /kg gasoline	البنزين
2.75 kg CO ₂ /kg CH ₄	الميثان (CH ₄)
1.154 kg CO ₂ /kWh	الكهرباء [53]

وتُدرج جميع المعلومات اللازمة لإجراء التحليل الاقتصادي والبيئي في الجدول 6.

الجدول 6: يوضح البيانات الأساسية المرتبطة بالجوانب الاقتصادية والبيئية لمكونات منظومة الطاقة الهجينة (HRES).

المرجع	العمر التشغيلي (سنة)	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون طوال دورة الحياة	التشغيل والصيانة	التكلفة الرأسمالية	التقنية
[92]	25	1.97 kg CO ₂ /kg CH ₄	3-5% من التكلفة الرأسمالية	10-30 MWh/\$	الكتلة الحيوية/الميثان
[93]	10	1-4 kg CO ₂ /kg H ₂	10-175 \$/kW	1800-2450 kW/\$	محلل كهربائي (Electrolyzer)
[94]	10	405.5 kg CO ₂ /kW	49-170 \$/kW	1200-2900 kW/\$	خلية الوقود (Fuel Cell)
[96:95]	10	3.5 kg CO ₂ /kg H ₂	0.0162 \$/kg H ₂	30-50 \$/kg H ₂	خزان تخزين الهيدروجين

ولتقييم الأداء العام للمنظومة الهجينة المقترحة (HRES)، تم حساب الكفاءة الكلية من خلال المقارنة بين إجمالي الطاقة المنتجة وفوائد الطاقة خلال فترة المحاكاة السنوية. ويُعد هذا المؤشر مقياساً لقدرة المنظومة على تحويل الموارد المتجددة المتاحة إلى طاقة مفيدة (كهرباء، حرارة، ووقود) مع تقليل نسبة الفاقد أو الطاقة غير المستغلة إلى أدنى حد ممكن. وبناءً على ذلك، يمكن تقدير الكفاءة الكلية للمنظومة وفق المعادلة الآتية:

$$\eta = 1 - \frac{\sum_1^{8760} Losses(t)}{\sum_1^{8760} E_{HRES}(t)} \quad (31)$$

حيث η تمثل الكفاءة الكلية للمنظومة، و $Losses(t)$ الفواقد الطاقية في الساعة، و $E_{HRES}(t)$ الطاقة المنتجة من المنظومة، بينما يُشير مجموع القيم من 1 إلى 8760 إلى الحساب على مدار عام كامل (8760 ساعة تشغيلية). ويتم حساب فترة استرداد رأس المال باستخدام المعادلة الآتية:

$$PBP = \frac{C_{capital}}{S_{annual}} \quad (32)$$

حيث $C_{capital}$ هو رأس المال الكلي للاستثمار، و S_{annual} هو العائد السنوي

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالاقين في النتائج

تم في هذه الدراسة اعتماد مجموعة من الفرضيات لتبسيط التحليل، إذ افترض أن خزاني الهيدروجين والميثان ممثلان عند بداية التشغيل لضمان استقرار عمل المنظومة المقترحة، كما اعتُبر الغازان الميثان والهيدروجين غازات مثالية تخضع لقانون الغاز المثالي دون الأخذ في الاعتبار تأثيرات الضغط ودرجة الحرارة. كذلك تم افتراض ثبات معدل إنتاج الميثان طوال العام، إلى جانب إهمال الانحدار في الأداء لجميع منظومات التوليد مثل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح. كما لم تُحتسب قيمة الخردة للمعدات عند نهاية عمرها التشغيلي في التحليل الاقتصادي، وافترض عدم وجود أي فقد أو تسرب للطاقة في خطوط النقل أو وحدات التخزين، مع ثبات استهلاك وقود الطهي ووقود المركبات طوال فترة التشغيل.

بينما تتمثل حدود الدراسة في إجراء تحليل حساسية لتقييم تأثير التغير في بعض المعاملات الرئيسية مثل أسعار المعدات، وتسعيرة الكربون، وتغير الموقع، وتغير الكفاءات على النتائج النهائية، وهو ما سيُخصص له عمل بحثي لاحق لتقدير تأثير تلك التغيرات على الأداء الاقتصادي والبيئي للمنظومة.

تعتبر البيانات (المناخية والبيئية والاقتصادية) مصدرا من مصادر الالاقين في النتائج، حيث رصد Nassar & Alsadi تفاوتاً في أسعار معدات الطاقات المتجددة يتجاوز 360% [97]. وكذلك استخدام القيم الفيزيائية (الكثافة) ومعدلات تحويل الكتلة الحيوية إلى غاز ميثان مصدرا إضافيا من مصادر الالاقين.

النتائج والمناقشة

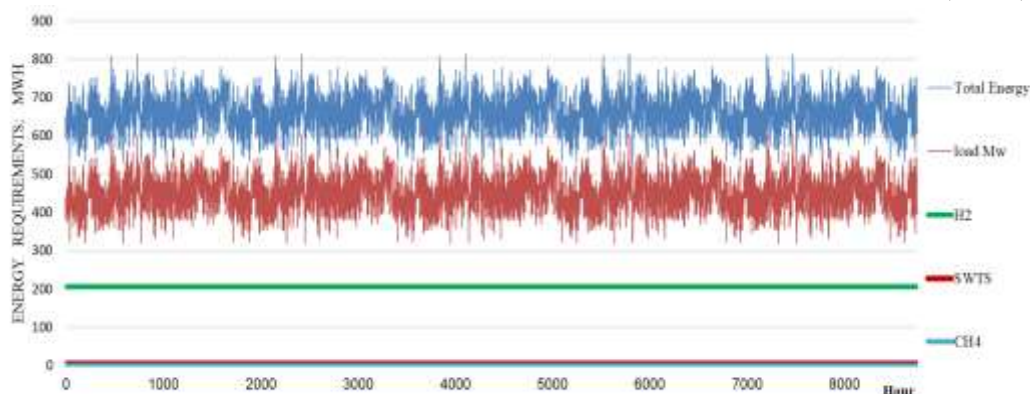
تحليل الأحمال والطلب على الطاقة

يعرض الجدول 7 متطلبات الطاقة اللازمة في صورتها النهائية (وقود وكهرباء) لتغطية كافة الطاقة الكهربائية والتي تشمل: الأحمال الكهربائية، وتشغيل محطة معالجة وتحلية مياه الصرف، والمحل الكهربائي، ومنظومة الكتلة الحيوية، والضواغط. وكذلك يتضمن الجدول الطاقة الحرارية (في صورة وقود) لكلٍ من الهيدروجين والميثان اللذان سيحلان محل وقود المركبات وغاز الطهي على التوالي. ويبيّن كميات الوقود التقليدي المستخدمة حالياً في القطاعات المختلفة مثل وقود المركبات (ديزل وبنزين) وغاز الطهي (LPG).

الجدول 7: متطلبات الطاقة لتغطية كامل الأحمال الكهربائية وتشغيل محطة المعالجة وإنتاج الهيدروجين

نوع الطاقة	الحمل الكهربائي (MWh)	وقود المركبات		غاز الطهي	محطة معالجة مياه الصرف (SWTS)
		ديزل (ton/year)	بنزين (ton/year)		
الوحدة	(MWh)	(ton/year)	(ton/year)	LPG; (ton/year)	$\times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$
الكمية	3,926,282	121,472	405,150	10,990	43.936
الطاقة النهائية	3,926,282	(H ₂) 43,272		(CH ₄): 10,192	كهرباء: 35,200 MWh
الطاقة الكهربائية المكافئة	3,926,282	1,802,814		5,096	35,200
إجمالي متطلبات الطاقة الكهربائية (MWh)					
5,769,392					

يتبين من الجدول 7 متطلبات الطاقة في المنطقة المدروسة (وقود وطاقة كهربائية) بلغت حوالي 5,770 GWh/year. وعلى هذه القيمة سيتم تصميم احجام مكونات المنظومة. ويمثل الشكل 9 التحليل الساعي لمتطلبات الطاقة في المنطقة المدروسة خلال عام كامل (8760 ساعة). حيث يمثل الخط السماوي استهلاك منظومة الكتلة الحيوية، بينما يمثل الخط الأحمر استهلاك الطاقة الكهربائية في محطة معالجة وتنقية مياه الصرف الصحي، ويمثل الخط الأخضر استهلاك منظومة انتاج (H_2) من الطاقة الكهربائية، وأما المنحنى باللون الأحمر فيمثل الحمل الكهربائي، وأخيرا يمثل المنحنى بالأزرق الطاقة الكلية المطلوبة بوحدة ميغاواط ساعة (MWh).



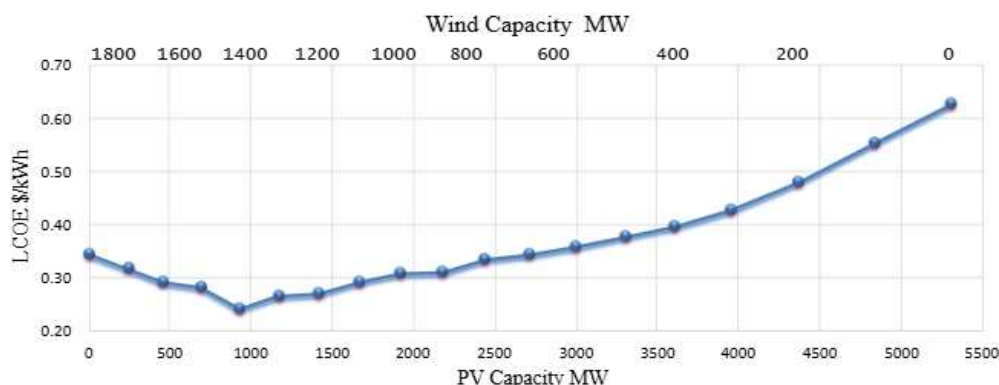
الشكل 9: الطلب الكلي على الطاقة لكل ساعة

إمكانات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية في المنطقة المدروسة تتمتع المنطقة المدروسة بإمكانات جيدة لتطوير مشاريع طاقة متجددة بقدرة اسمية تبلغ 100 MW لكل من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية. إذ تتيح المستويات المرتفعة من الإشعاع الشمسي إنشاء محطة كهروضوئية بقدرة 100 MW وإنتاج سنوي يقارب 200 GWh؛ مما يجعلها مناسبة لتغطية الأحمال الكهربائية. كما تسمح سرعات الرياح المتوسطة في المنطقة، بتشغيل مزارع رياح بقدرة 100 MW وإنتاج سنوي في يبلغ 300 GWh، مع مساهمة فعالة خلال فترات الليل. أما طاقة الكتلة الحيوية، وبالاعتماد على المخلفات الزراعية والحيوانية والنفايات العضوية والصرف الصحي، فيمكن لمحطة بقدرة 100 MW أن تعمل محققة إنتاجاً سنوياً يقارب 700 GWh، مع حاجتها إلى كميات كبيرة من الوقود الحيوي (CH_4). ويُظهر هذا التقسيم أن الدمج بين هذه المصادر الثلاثة يوفر مزيجاً متوازناً يجمع بين الاستدامة والاستمرارية وتحسين موثوقية إمدادات الطاقة في المنطقة المدروسة.

تحديد الحجم المثالي لمكونات المنظومة المقترحة

يستعرض الشكل 10 العلاقة بين التكلفة المستوية للطاقة (Levelized Cost of Energy – LCOE) وساعات منظومتي الطاقة الشمسية والرياح. وتشير النتائج إلى أن قيمة الـ LCOE تتخفض تدريجياً مع زيادة سعة طاقة الرياح، حيث تُسجّل أدنى قيمة عند 0.2401 \$/kWh. وبعد هذا الحد، تبدأ التكلفة بالارتفاع مجدداً عند الاعتماد الكبير على الطاقة الشمسية نتيجة زيادة متطلبات التخزين وتعقيد عمليات التكامل بين مكونات المنظومة. كما يُظهر التحليل أن المزيج المتوازن بين طاقة الرياح والطاقة الشمسية بنسبة تقريبية 40% طاقة شمسية مقابل 60% طاقة رياح يحقق أفضل جدوى اقتصادية وأعلى كفاءة تشغيلية، نظراً لتكامل أنماط الإنتاج على مدار العام وتقليل فترات العجز أو الفائض. ويجدر التنويه إلى أن طاقة الكتلة الحيوية لم تُدرج ضمن ائزان الطاقة المتغير في هذا التحليل، نظراً لكونها مصدراً ذا إنتاج ثابت ومستقر، وقد اعتُبرت قدرة

داعمة مستقلة لا تتأثر بتغير الساعات النسبية لكل من الطاقة الشمسية والرياح، وهو ما يتوافق مع منهجيات تحليل مشابهة ودراسات سابقة في دول شمال إفريقيا ومنطقة الخليج [98-104]



الشكل 10: تباين التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE) مع اختلاف قدرات الطاقة الشمسية والرياح

ويوضح الجدول 8 النتائج الاقتصادية والبيئية للمنظومة الهجينة المقترحة، حيث يبلغ إجمالي رأس المال الاستثماري (CCT) نحو 20 billion \$، وهو المبلغ المطلوب لتأسيس وتشغيل منظومة الطاقة بكامل مكوناتها. وتمثل النسب الموضحة في الجدول مساهمة كل مصدر طاقة من إجمالي طاقته المنتجة في مختلف التطبيقات، وليس من إجمالي الكهرباء الكلية للنظام. فمثلاً، تُمثل الكتلة الحيوية نسبة 22.5% من طاقتها في توليد الكهرباء، في حين تساهم بنسبة 76% من نفس طاقتها في إنتاج الهيدروجين. أما الطاقة الشمسية (PV) فتُخصَّص حوالي 77.6% من قدرتها لإنتاج الكهرباء، مقابل 12.4% فقط لإنتاج الهيدروجين. وبالنسبة إلى طاقة الرياح، فتُوجَّه بنحو 28.3% من إجمالي طاقتها لتوليد الكهرباء، و 71.7% نحو إنتاج الهيدروجين، مما يعكس مرونة توزيع الأدوار التشغيلية تبعاً للتغيرات الموسمية والزمنية في الإشعاع وسرعة الرياح. كما تُستخدم خلايا الوقود (Fuel Cells) لتوليد الكهرباء اعتماداً على الهيدروجين بنسبة 10.4% من طاقتها، في حين تُخصَّص 89.6% من الهيدروجين المنتج لتزويد المركبات بالوقود. كما تُقدَّر فترة استرداد رأس المال البسيطة بحوالي 15 سنة اعتماداً على إجمالي الوفورات الاقتصادية والبيئية للنظام، وتُظهر النتائج أن المنظومة أسهمت في منع انبعاث نحو 8,402,069.624 ton CO₂ نتيجة استبدال الوقود الأحفوري بمصادر طاقة متجددة، وهو ما يعزز الأثر البيئي الإيجابي للمنظومة ويؤكد دورها في خفض البصمة الكربونية وتحقيق التنمية المستدامة في المنطقة.

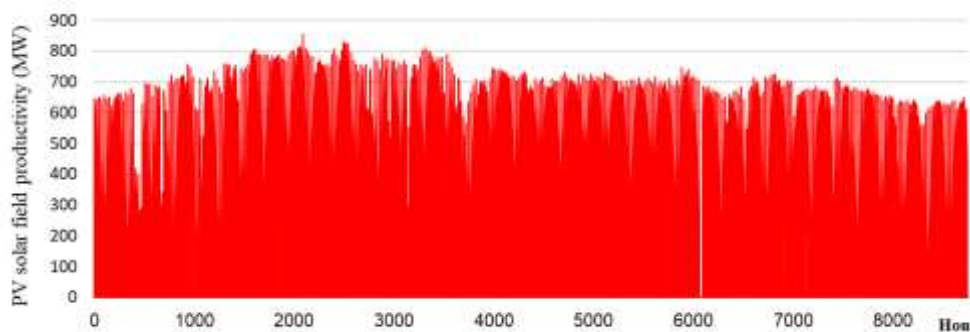
الجدول 8: النتائج الاقتصادية والبيئية الرئيسة ونسب المشاركة

القيمة	الرمز	البند
20 billion \$	CC_T	إجمالي تكلفة رأس المال للمنظومة
1.5%	$f_{BE,LPG}$	مساهمة الكتلة الحيوية في استبدال غاز البترول المسال (LPG)
22.5%	$f_{BE,E}$	مساهمة الكتلة الحيوية في توليد الكهرباء
77.6%	$f_{PV,E}$	مساهمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في توليد الكهرباء
22.4%	f_{PV,H_2}	مساهمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في إنتاج الهيدروجين

القيمة	الرمز	البند
28.3%	$f_{w,E}$	مساهمة طاقة الرياح في توليد الكهرباء
71.7%	f_{w,H_2}	مساهمة طاقة الرياح في إنتاج الهيدروجين
76%	f_{BE,H_2}	مساهمة الكتلة الحيوية في إنتاج الهيدروجين
10.4%	$f_{H_2,E}$	مساهمة الهيدروجين في توليد الكهرباء
89.6%	$f_{H_2,V}$	مساهمة الهيدروجين في تشغيل المركبات
207.34 M\$/y	$NC_{CO_2,BE}$	صافي تكلفة الكربون من استخدام الكتلة الحيوية
117.7 M\$/y	$NC_{CO_2,PV}$	صافي تكلفة الكربون من استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية
151.1 M\$/y	$NC_{CO_2,wi}$	صافي تكلفة الكربون من استخدام طاقة الرياح
181.1 M\$/y	$NC_{CO_2,H_2,E}$	صافي تكلفة الكربون من استخدام الهيدروجين
-117.5 M\$/y	$NC_{CO_2,H_2,V}$	تكلفة الأضرار البيئية لوقود البنزين والديزل في المركبات
658 M\$/y	$NC_{CO_2,E}$	صافي تكلفة الكربون من توليد الكهرباء
\$0.283/kg CH ₄	$LCoCH_4$	التكلفة المستوية للميثان
\$2.84/kg H ₂	$LCoH_2$	التكلفة المستوية للهيدروجين
\$0.2401/kWh	$LCoE$	التكلفة المستوية للكهرباء

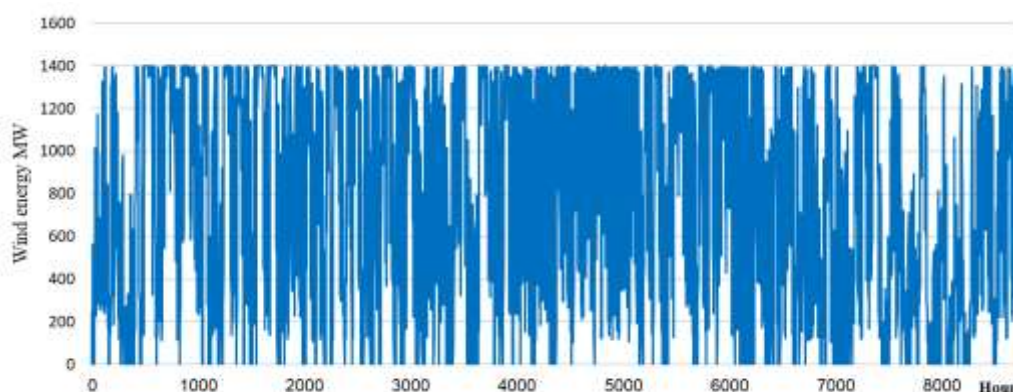
إنتاج الطاقة الشمسية والرياح والكتلة الحيوية

يستعرض الشكل 11 التغير الساعي في إنتاجية حقل الألواح الشمسية (PV) بقدرة مركبة تبلغ 925 MW على مدار سنة تشغيلية كاملة (حوالي 8760 ساعة)، حيث يوضح المحور الرأسي (PV solar field productivity – MW) الإنتاجية الساعية للمركبة الشمسية المنتجة من المنظومة الشمسية في كل ساعة. إذ تصل الذروة بين الساعة 11:00 و14:00 نهارًا لتتجاوز 800 MWh خلال أشهر الصيف، بينما تنخفض إلى الصفر أثناء الليل.



الشكل 11: الإنتاجية الساعية للطاقة لحقل شمسي كهروضوئي بقدرة 925 MW

كما يوضح الشكل 11 السلوك الزمني لإنتاج الكهرباء من المنظومة الشمسية، حيث يتغير الإنتاج بشكل ملحوظ فينعدم تقريباً أثناء الليل ويصل إلى قيم مرتفعة خلال النهار مع توفر الإشعاع الشمسي. وبصورة عامة، يؤكد المخطط أن الطاقة الشمسية تمثل مصدرًا فعالاً لتغطية الأحمال النهارية. هذا السلوك يوضح الطبيعة الدورية للطاقة الشمسية وضرورة وجود تقنيات تخزين أو مصادر مكملة لتغطية فترات الانقطاع الليلي. يستعرض الشكل 12 التغير الزمني في إنتاج طاقة الرياح على مدار عام كامل (8760 ساعة)، حيث يمثل المحور الأفقي الزمن بالساعات، بينما يوضح المحور العمودي القدرة المنتجة من التوربينات بقدرة 1400MW. ويتضح من الشكل أن إنتاج الطاقة من الرياح يتسم بتذبذب كبير وعدم انتظام نتيجة لتغير سرعة الرياح من ساعة إلى أخرى على مدار السنة. فهناك فترات تظهر فيها القدرة 1400MW وهو الحد الأقصى للتوربينات، وأخرى تنخفض فيها الإنتاجية إلى مستويات متدنية أو صفرية، مما يعكس الطبيعة المتغيرة للموارد الرياح.



الشكل 12: الإنتاجية الساعية للطاقة من طاقة الرياح بقدرة 1400 MW

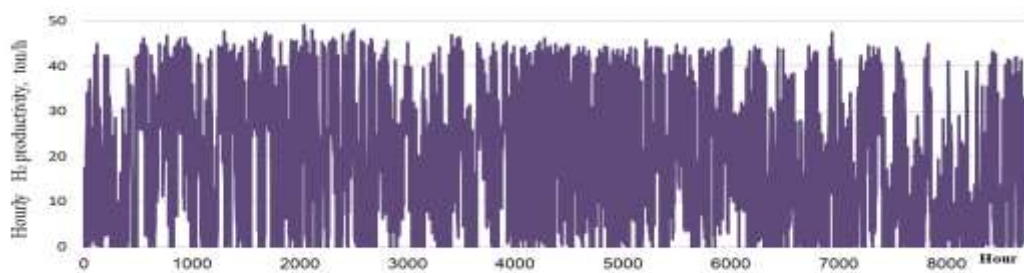
كما يُلاحظ من الشكل 12 أن طاقة الرياح تصل إلى قيم مرتفعة خلال فترات متعددة، مما يشير إلى توفر سرعات رياح عالية في معظم أوقات السنة، وتشير الانخفاضات الحادة إلى فترات ضعف الرياح أو توقف التوربينات عن العمل عند سرعات أقل من سرعة التشغيل الدنيا (Cut-in speed)، أو عند تجاوز السرعات الحدية في بعض الحالات. وهو ما يجعل الرياح مصدرًا أساسيًا في المنظومة الهجينة المقترح، لكنه يحتاج إلى تكامل مع مصادر أخرى مثل الطاقة الشمسية والكتلة الحيوية لتحقيق استقرار الإمداد الكهربائي. بين التحليل الكمي لموارد الكتلة الحيوية وجود إمكانات واعدة لإنتاج الطاقة، اعتمادًا على استغلال المخلفات المختلفة وتحويلها إلى مصادر طاقة مفيدة تسهم في تعزيز أمن الطاقة وتنوع مزيجها. وتُظهر النتائج أن إجمالي كمية المخلفات المتاحة يبلغ نحو 1,104,900 ton/year، مع إمكانية إنتاج كلية تُقدَّر بحوالي 474 $\times 10^6$ m³ CH₄، وهو ما ينتج طاقة حرارية إجمالية تبلغ 15,380 Tj، يمكن تحويلها إلى قدرة كهربائية محتملة تبلغ 195 MW. وتعكس هذه المؤشرات الدور المهم للكتلة الحيوية كمصدر طاقة مستقر وقابل للتشغيل المستمر، بما يدعم اتزان منظومة الطاقة المتكاملة.

إنتاج الهيدروجين

يوضح الشكل 13 الإنتاج الساعي للهيدروجين من الإلكترولايزر خلال سنة كاملة (حوالي 8760 ساعة)، حيث يمثل المحور الأفقي ساعات السنة، بينما يوضح المحور الرأسي معدل إنتاج الهيدروجين (Hourly H₂ productivity, ton/h)

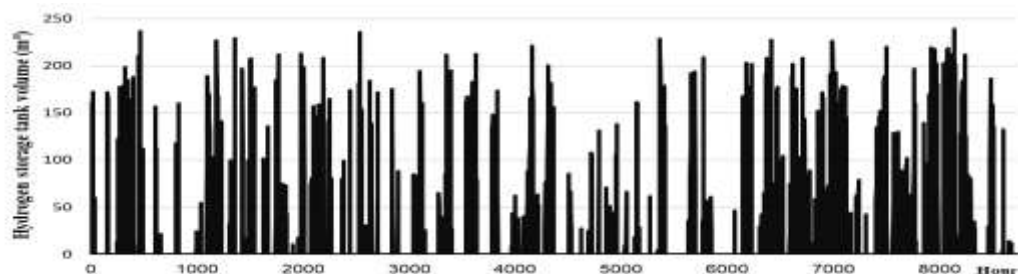
يوضح الشكل 13 الإنتاج الساعي للهيدروجين من الإلكترولايزر خلال سنة كاملة (حوالي 8760 ساعة)، حيث

الشكل 13: الإنتاجية الساعية للهيدروجين من محلل كهربائي بقدره 50 ton/2045 MW



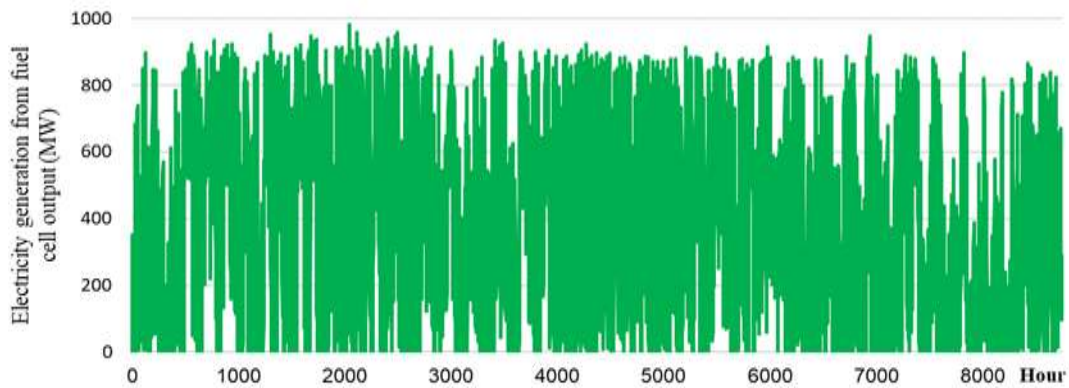
ويُتَّسَم منحى إنتاج الهيدروجين بتذبذب واضح بين قيم منخفضة وأخرى مرتفعة، وهو ما يبين طبيعة تشغيل الإلكترولايزر كحمل كهربائي يعتمد مباشرة على توافر القدرة الكهربائية من مصادر الطاقة المتجددة. فعند انخفاض القدرة المتاحة أو إعطاء أولوية لتغطية الأحمال الأساسية ينخفض إنتاج الهيدروجين، بينما يرتفع ويقترب من الحد الأقصى عند توفر فائض كهربائي، خاصة خلال فترات ذروة الرياح أو ارتفاع إنتاج الطاقة الشمسية. ويُشغَّل المحل الكهربائي بسعة اسمية تبلغ 50 ton/h وبقدرة كهربائية في حدود 2045 MW. كما يظهر التشغيل المتقطع كآلية فعالة لاستيعاب الفائض وتقليل الفقد، مما يبرز دور الإلكترولايزر كعنصر تكاملي داعم لاستقرار المنظومة على مدار العام.

ويستعرض الشكل 14 التغير الساعي في حجم الهيدروجين المخزن داخل خزان التخزين على مدار سنة تشغيلية كاملة، حيث يتذبذب الحجم بين قيم منخفضة وقيم مرتفعة تبعاً لمعدلات الشحن والتفريغ. ويُبيِّن السلوك المتقطع للخزان آلية امتصاص فائض إنتاج الهيدروجين الناتج عن تشغيل الإلكترولايزر خلال فترات توفر الطاقة المتجددة.

الشكل 14: الكتلة اللحظية للهيدروجين في خزان بسعة 250m³ عند ضغط 100 MPa

كما تبين الانخفاضات الحادة فترات سحب الهيدروجين لتغطية الطلب أو عند انخفاض الإنتاج. ويبلغ حجم خزان تخزين الهيدروجين 250m³. وبوجه عام، يبرز الشكل الدور الحيوي للخزان في موازنة تقلبات إنتاج الهيدروجين وتعزيز استقرار المنظومة على مدار العام.

وأيضاً يستعرض الشكل 15 الإنتاج الساعي للكهرباء من خلية الوقود على مدار سنة تشغيلية كاملة، حيث يتغير مستوى القدرة المنتجة تبعاً لظروف التشغيل وتوفر الهيدروجين. ويبين المخطط تذبذباً واضحاً في الإنتاج بين قيم منخفضة وأخرى مرتفعة، ما يعكس تشغيل خلية الوقود كمصدر مرن قابل للتحكم. ترتفع القدرة المنتجة عند انخفاض مساهمة مصادر الطاقة المتجددة أو عند الحاجة لتغطية العجز في الحمل الكهربائي، بينما تنخفض خلال فترات كفاية الإنتاج المتجدد أو محدودية الوقود.



الشكل 15: التوليد الكهربائي الساعي من خلية الوقود بسعة 1000MW

وتشغيل خلية الوقود يساعد في تعزيز استقرار الإمداد الكهربائي والحد من فترات الانقطاع، لا سيما في ظل تذبذب إنتاج مصادر الطاقة المتجددة. كما تُظهر القيم القصوى للإنتاج اقتراب القدرة المنتجة إلى 1000 MW، مما يشير إلى أن السعة الاسمية لخلية الوقود تقع ضمن هذا النطاق. وبصورة عامة، تؤكد النتائج الدور التكميلي والمحوري لخلية الوقود في رفع موثوقية وكفاءة منظومة الطاقة الهجينة. تدفق الطاقة في المنظومة المقترحة

يستعرض الشكل 16 مخطط تدفق الطاقة (Sankey Diagram) لمنظومة طاقة هجينة، حيث يبين مسارات تحويل وتوزيع الطاقة من مصادرها المتجددة حتى الاستخدامات النهائية، مع الحفاظ على توازن الطاقة الكلي. تبلغ إجمالي الطاقة المتجددة الداخلة إلى المنظومة 12,726,777 MWh، وهي مساوية تمامًا لإجمالي الطاقة الخارجة، ما يؤكد سلامة ميزان الطاقة. حيث تساهم طاقة الرياح بالحصة الأكبر بقيمة 8,113,606 MWh، تليها الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) بقيمة 2,525,834 MWh، ثم طاقة الكتلة الحيوية بقيمة



2,087,338 MWh

About this diagram

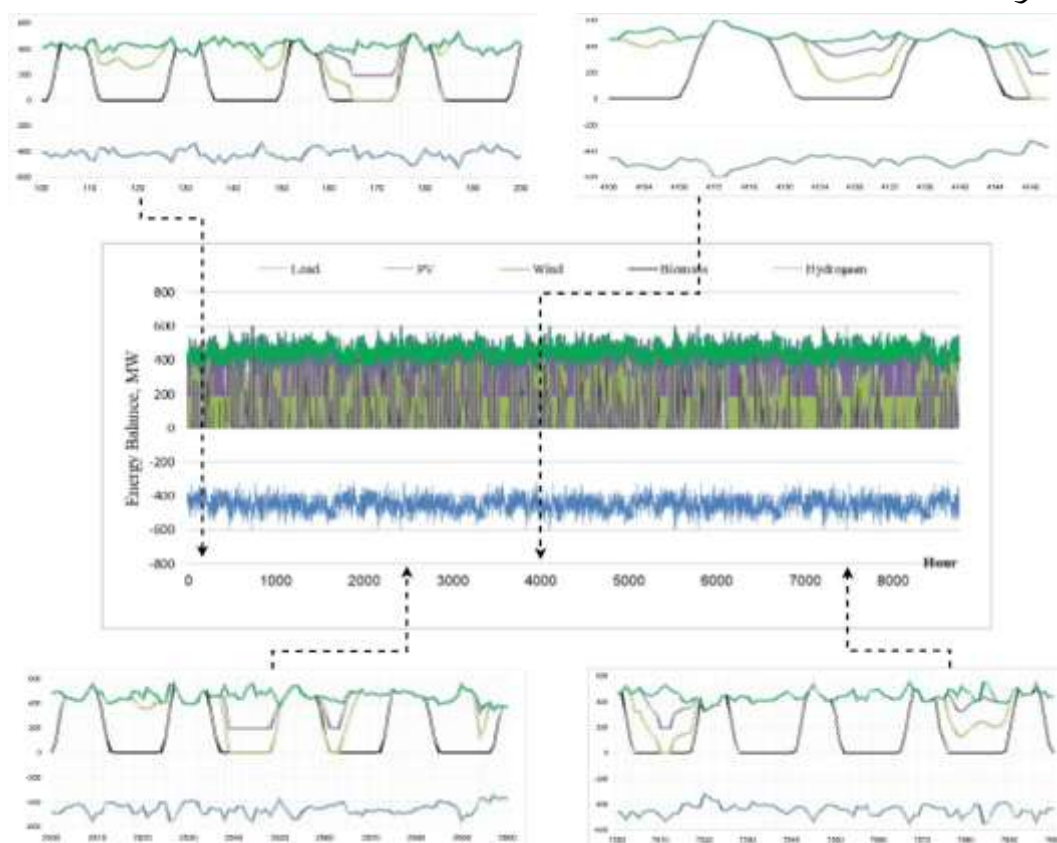
34 Flows between 21 Nodes. Total Inputs = Total Outputs = 12,726,777MWh

الشكل 16: مخطط يوضح تدفق الطاقة عبر مكونات المنظومة الهجينة المقترحة (HRES)

ويوضح الشكل 16 تحول هذه الطاقات إلى عدة أشكال، أهمها الهيدروجين (H_2) بطاقة إجمالية قدرها 6,476,579 MWh، والذي يمثل مساراً رئيسياً لتخزين الطاقة وتحويلها لاحقاً. كما يتم إنتاج الطاقة الكهربائية مباشرة بقيمة 2,517,784 MWh لتغذية الأحمال المختلفة.

ويُستهلك جزء كبير من الطاقة في الأحمال الكهربائية بقيمة 3,926,282 MWh. كما يظهر استهلاك الضواغط بقيمة 923,641 MWh، وأنظمة SWTS بقيمة 1,385,462 MWh، إضافة إلى قطاع النقل (Vehicles) الذي يستهلك نحو 1,804,434 MWh، وهو ما يبرز دور الهيدروجين والكهرباء في دعم النقل النظيف. وتُسجّل خسائر الطاقة عند قيمة بلغت 4,635,711 MWh، وهي ناتجة عن عمليات التحويل والتخزين والنقل. كما يظهر استخدام غاز البترول المسال (LPG) بقيمة محدودة نسبياً تبلغ 51,247 MWh، ما يشير إلى دور تكميلي ثانوي مقارنة بمصادر الطاقة المتجددة.

ويبين الشكل 17 ميزان الطاقة بالساعة لمنظومة طاقة هجينة على مدار سنة تشغيلية كاملة، حيث يمثل المحور الأفقي الزمن، بينما يمثل المحور الرأسي صافي ميزان الطاقة ضمن مجال موجب وسالب يعكس حالات الإنتاج والحمل المطوب. تمثل المناطق الواقعة فوق خط الصفر مساهمات مصادر التوليد المختلفة، وتشمل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية، إضافة إلى الهيدروجين بوصفه مصدرًا داعمًا.



الشكل 17: ميزان الطاقة الكهربائية للمنظومة الهجينة المقترحة

ويلاحظ من الشكل 17 أن إنتاج الطاقة الشمسية يتبع نمطاً يومياً واضحاً، إذ ينعدم تقريباً خلال ساعات الليل ثم يرتفع خلال النهار قبل أن ينخفض مجدداً. أما طاقة الرياح فتتسم بتذبذب ملحوظ خلال اليوم وعلى مدار السنة تبعاً لتغير الظروف المناخية، ما يؤدي إلى تفاوت مساهمتها في ميزان الطاقة. وتظهر طاقة الكتلة الحيوية بسلوك أكثر استقراراً نسبياً، مع مساهمة شبه ثابتة تجعلها أحد عناصر الداعم لاستقرار المنظومة. ويبرز الهيدروجين بوصفه أكثر مكونات المنظومة استقراراً على مدار العام، حيث يؤدي دوراً محورياً في موازنة الفرق بين التوليد المتجدد المتغير والحمل الكهربائي، ويسهم في تعزيز موثوقية الإمداد. ويبين المخطط السنوي في الجزء الأوسط أن مجموع مصادر التوليد يبقى في فترات التشغيل مساوياً لمستوى الحمل، ما يشير إلى

تحقيق توازن طاقي تشغيلي فعال. كما توضح المقاطع المكبرة المختارة من فترات مختلفة من السنة أن المنظومة قادرة على الحفاظ على هذا التوازن حتى عند انخفاض إنتاج الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، وذلك من خلال الاعتماد على طاقة الكتلة الحيوية والهيدروجين.

يوضح الجدول (9) مقارنةً فنية واقتصادية لمنظومات طاقة هجينة مطبقة في عدة دول، بالاعتماد على مؤشري تكلفة الكهرباء المستوية (LCOE) وتكلفة الهيدروجين المستوية (LCOH₂) وتُظهر النتائج أن منظومة الدراسة الحالية تحقق أداءً متميزاً مقارنةً بمعظم الدراسات الأخرى، حيث سجلت قيمة LCOE مقدارها 0.2401\$/kWh مع قيمة منخفضة نسبياً لـ LCOH₂ بلغت 2.84\$/kg ويُعد هذا المستوى من تكلفة الهيدروجين أقل بكثير من القيم المسجلة في عدد من الدول التي تجاوزت فيها LCOH₂ حاجز 13، ما يعكس كفاءة أعلى في استغلال فائض الطاقة المتجددة. كما أن التوازن بين تكلفة الكهرباء وتكلفة الهيدروجين في منظومتنا يشير إلى قدرة المنظومة على تحقيق جدوى اقتصادية مزدوجة لكلٍ من الإمداد الكهربائي وإنتاج الهيدروجين. وبشكل عام، تؤكد هذه النتائج أن المنظومة المقترحة في هذه الدراسة تُعد من بين الأكثر توازناً وكفاءة اقتصادياً ضمن الدراسات المقارنة، خاصة في سياق الأنظمة الهجينة متعددة المخرجات.

الجدول 9: المقارنة الفنية والاقتصادية لبعض منظومات الطاقة الهجينة حول العالم

الدولة	تركيبية المنظومة	LCOE \$/kWh	LCOH ₂ \$/kg	المراجع
الدراسة الحالية	PV+Wind+Biomass+H ₂	0.2401	2.84	-
الأردن	PV+Wind+Battery	0.112	-	[105]
نيجيريا	PV+Wind+Biomass+H ₂ +BT	0.94	-	[106]
إسبانيا	PV+Wind+HP+BT	0.18	-	[107]
بنغلادش	PV+Wind+Biogas+H ₂	0.36	13.4	[108]
الصين	PV+Wind+H ₂ +BT	0.26	13.16	[109]
مصر	PV+Wind+H ₂	0.30	4.69	[110]
عمان	PV+Wind+H ₂	0.19	1.15	[110]
كندا	PV+Wind+H ₂	0.13	4.32	[112]
اندونيسيا	PV+Wind+H ₂	0.281	7.546	[113]
الكويت	PV+Wind+H ₂ +Inv	0.539	6.85	[114]

الاستنتاجات

تُظهر نتائج هذا العمل أن النظام الهجين المقترح (HRES)، الذي يجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية والهيدروجين، يمثل حلاً فعالاً لتحقيق استدامة الطاقة والمحافظة البيئة في الجنوب الليبي. فقد أثبتت المحاكاة السنوية على مدار 8,760 ساعة قدرة المنظومة على تلبية كامل الطلب الكهربائي دون انقطاع (LPSP = 0)، وبمساهمات نسبية بلغت حوالي 37% من الطاقة الشمسية و48% من طاقة الرياح و10% من الكتلة الحيوية، بينما شكّل الهيدروجين نسبة 5% من الكهرباء المُولدة عبر خلايا الوقود. وقد تم تحديد السعات المثلى لمكونات المنظومة، حيث بلغت القدرة المركبة لحقل الألواح الشمسية الكهروضوئية 925 MW، في حين وصلت القدرة المركبة لطاقة الرياح إلى 1400 MW، بينما بلغت سعة منظومة الكتلة الحيوية 195 MW، وسعة منظومة الهيدروجين (المحل الكهربائي وخلية الوقود) 1000 MW.

يضم النظام هاضماً بسعة $244,183 \text{ m}^3$ لمعالجة نحو $1,104,900 \text{ ton/year}$ من المخلفات العضوية، منتجاً ما يقارب $345,115 \text{ ton/year}$ من غاز الميثان الذي يُستخدم كوقود للطهي بديلاً للغاز المسال (LPG)، بينما تُستغل 22% من إنتاجه في توليد الكهرباء، كما يضم النظام وحدة تحليل كهربائي بقدرة $2,045 \text{ MW}$ لإنتاج نحو 49 ton/hour من الهيدروجين، ليتم تخزينه في خزان بسعة 250 m^3 عند ضغط 100 Mpa .

اقتصادياً، حققت المنظومة أقل تكلفة مستوية للكهرباء بلغت $0.2401 \text{ \$/kWh}$ ، وتكلفة هيدروجين $2.84 \text{ \$/kg H}_2$ وميثان $0.283 \text{ \$/kg CH}_4$ ، كما بلغت فترة استرداد رأس المال حوالي 15 سنة. بيئياً، تمكن النظام من منع انبعاث ما يعادل $658 \text{ M\$/year}$ من التكلفة البيئية المكافئة للكربون، مما يعكس انخفاضاً كبيراً في البصمة الكربونية وتحولاً نحو اقتصاد منخفض الانبعاثات. وتؤكد هذه النتائج أن المنظومة الهجينة المقترحة قادرة على تحقيق أمن طاقي مستدام، وتنوع في مخرجات الطاقة (كهرباء - هيدروجين - ميثان)، وخفض كبير للانبعاثات، وخدمة قطاعات الطاقة والنقل بصورة متكاملة. وعليه، يمكن اعتماد هذا النموذج كخيار استراتيجي قابل للتطبيق في المناطق داخل ليبيا وشمال أفريقيا، مع التوصية بتنفيذ دراسات مستقبلية تشمل تحليل الحساسية وتطوير حلول تخزين إضافية لرفع الكفاءة وتقليل التكلفة بشكل أكبر.

References

- [1] Salim, E., Abubaker, A., Ahmed, B., and Nassar, Y. 2025. *A brief overview of hybrid renewable energy systems and analysis of integration of isolated hybrid PV solar system with pumped hydropower storage for Brack city-Libya*. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(1): 152-167.
- [2] IEA. 2024. *Analysis Renewables and Forecast to 2029*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
- [3] IRENA. 2024. *Renewable Capacity Statistics 2024*. <https://www.irena.org/Publications>.
- [4] IRENA. 2024. *Bioenergy for Energy Transition: Global Status 2024*.
- [5] IEA. 2024. *Global Hydrogen Review 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review>, Paris.
- [6] IEA. 2024. *Electrolyzers – Tracking Clean Hydrogen 2024*. <https://www.iea.org/reports/electrolyzers>, Paris.
- [7] Aqila, A., 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(2): 168-181.
- [8] Aqila, A., et al. 2025. *Design and analysis of a PV/wind/battery hybrid renewable energy system for residential buildings under real-time conditions*. In Proceedings of the Engineering for Palestine Conference.
- [9] Mohammed, S., et al. 2023. *Carbon and energy life cycle analysis of wind energy industry in Libya*. Journal of Solar Energy and Sustainable Development. 12(1): 50-69
- [10] Hilmy, A., et al. 2023. *Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study*. Cleaner Engineering and Technology. 14: 100650.

- [11] 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.
- [12] Obileke, K., and Mukumba, P. 2023. *Techno-Economic Evaluation of Wind and Bio-Energy Systems for Sustainable Development: A Systematic Review*. Energy Science & Engineering. 13(4): 2179-2202.
- [13] Gerloff, N. 2023. *Levelized and environmental costs of power-to-gas generation in Germany*. International Journal of Hydrogen Energy. 48: 18541-18556.
- [14] Hassan, Q., Tabar, V., Sameen, A., Salman, H., and Jaszczur, M. 2024. *A review of green hydrogen production based on solar energy; techniques and methods*. Energy Harvesting and Systems. 11(1): 20220134.
- [15] Ayed, S., Elmnifi, M., Moria, H., and Habeeb, L. 2022. *Economic and technical feasibility analysis of hybrid renewable energy (PV/wind) grid-connected in Libya*. International Journal of Mechanical Engineering. 7(1): 930-943.
- [16] Rekik, S., and El Alimi, S. 2024. *Unlocking renewable energy potential: A case study of solar and wind site selection in the Kasserine region, central-western Tunisia*. Energy Science & Engineering. 12 (3): 771-792.
- [17] Rekik, S., Khabbouchi, I., and El Alimi, S. 2025. *A spatial analysis for optimal wind site selection from a sustainable supply-chain-management perspective*. Sustainability. 17(4): 1571.
- [18] Alkout, A., Rekik, S., and El Alimi, S. 2024. *Strategies Assessment for Accelerating Renewable Energies Development using MCDM Approach: A case of Libya*. The 4th International Conference on Renewable & Sustainable Energies and Green Processes, Sousse, Tunisia.
- [19] Rekik, S., Khabbouchi, I., Eladeb, A., Alshammari, B., and Kolsi, L. 2025. *A spatio-techno-economic analysis for wind-powered hydrogen production in Tunisia*. Alexandria Engineering Journal. 128: 833-851.
- [20] Shetwan, A., Rekik, S., and Ghlaio, Y. 2025. *A hybrid failure mode and effects analysis with decision-making trial and evaluation laboratory approach for enhanced fault assessment in power plants*. Energy Exploration & Exploitation. 43 (6): 2604-2636.
- [21] Rekik, S., Mensah, J., and Shetwan, A. 2026. *Towards a Sustainable Energy Future: Evaluating Renewable Energy Options in Tunisia*. Unconventional Resources. 100322.
- [22] Kumar, B., Rekik, S., Richards, D., and Yabar, H. 2025. *Solar-Assisted Thermochemical Valorization of Agro-Waste to Biofuels: Performance Assessment and Artificial Intelligence Application Review*. Waste. 4 (1): 2.
- [23] 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. Unpublished.
- [24] Aqila, A., and Fathi, N. 2026. *Design and analysis of a hybrid renewable energy system to cover part of the residential sector loads in Libya*. Fezzan University scientific Journal. Under press.
- [25] Elnaggar, M., et al. 2026. *Leveraging wind energy for electricity and hydrogen production: A sustainable solution to power shortages and eco-friendly alternative fuel*. Advanced Energy and Sustainability Research. 7 (1), e202500049.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Aqila , A. H., 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.
- [29] Latiwash, I., et al. 2026. *Energy, Economic and Environmental Analysis of a Solar Photovoltaic Energy System Integrated with a Hydrogen System to Supply the Electrical Load of an Urban Area*. Fezzan University scientific Journal. Under press.
- [30] Wikipedia. Sabha District – Population. https://en.wikipedia.org/wiki/Sabha_District, Sabha , 2024.
- [31] Wikipedia. Climate of Sabha. https://en.wikipedia.org/wiki/Sabha_Libya, 2024.
- [32] Fathi, H., et al. 2023. *Regression model for optimum solar collectors' tilt angles in Libya*. in Proceedings of the 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability, 1-6.
- [33] Miskeen, G., et al. 2022. *Mapping of PV solar module technologies across Libyan territory*. In Proceedings of the 2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT), pp. 227-232.
- [34] Eteriki, A., and El-Osta, W. 2023. *Effect of implementation of energy efficiency in residential sector in Libya*. In Proceedings of the 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), pp. 1-6.
- [35] Lagili, H., Kiraz, A., Kassem, K., and Gökçekuş, H. 2023. *Wind and solar energy for sustainable energy production for family farms in coastal agricultural regions of Libya using measured and multiple satellite datasets*. Energies. 6(18), 6725.
- [36] U.S, Energy Information Administration (EIA), Country Analysis Brief: Libya," Dec 2024. https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Libya/pdf/libya.pdf.
- [37] Wikipedia. 2025. Energy in Libya. https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Libya.
- [38] Abodwair, A., et al. 2024. *Feasibility Assessment of Hybrid Renewable Energy Based EV Charging Station in Libya*. Solar Energy and Sustainable Development Journal. 13(2): 311–349.
- [39] Wheida, E., and Verhoeven, R. 2007. *An alternative solution of the water shortage problem in Libya*. *Water Resources Management*. 21(6): 961–982.
- [40] Hosseini, Z., Raeisi, E., Abdollahifard, I., and Teatini, P. 2024. *Comprehensive hydrogeological study of the Nubian aquifer system, northeast Africa*. *Journal of Hydrology*. 636: 131237.
- [41] Brika, B. 2022. *Evaluating the reuse and recycling options of end-of-life reverse osmosis membranes in Tajoura desalination plant*. *Desalination and Water Treatment*. 263: 45-51.
- [42] Libya Observer, 2024. *Libya ranked sixth highest daily fuel consumption in Africa*. <https://libyaobserver.ly/economy/libya-ranked-sixth-highest-daily-fuel-consumption-africa>.

- [43] Brega Petroleum Marketing Company. Company profile and petroleum products marketing in Libya. Brega Petroleum Marketing Company Tripoli, Libya, 2024. <https://brega.ly/>.
- [44] Eurasia Review. Libya energy profile: Despite large oil reserves, political conflicts and militia attacks have limited investments in the sector. Eurasia Review, Dec 2024. https://www.eurasiareview.com/04122024-libya-energy-profile-despite-large-oil-reserves-political-conflicts-and-militia-attacks-have-limited-investments-in-sector-analysis/?utm_source=chatgpt.com.
- [45] Mohammed, S., et al. 2023. *Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya*. Solar Energy and Sustainable Development Journal. 12(1): 50-69.
- [46] Nassar, F., et al. 2024. *Carbon footprint and energy life cycle assessment of wind energy industry in Libya*. Energy Conversion and Management. 300: 117846.
- [47] Ibrahim, M., 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.
- [48] Elzer, R., et al. 2023. *Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: A case study of Gharyan city–Libya*. Acta Innovations. 50: 46–56.
- [49] Nassar, F., and Salem, A. 2007. *The reliability of the photovoltaic utilization in southern cities of Libya*. Desalination. 209(1–3): 86–90.
- [50] Elmnifi, M., et al. 2025. Design of an Innovative Wastewater Treatment System Using Photovoltaic-Hydro System Coupled with Reverse Osmosis Technology: Sustainability and Continuous Improvement. Proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management. Cham, Switzerland: Springer Nature. 137–157.
- [51] El-Khozondar, H., et al. 2024. *Assessing the Viability of Solar and Wind Energy Technologies in Semi-Arid and Arid Regions: A Case Study of Libya's Climatic Conditions*. Appl. Sol. Energy. 60: 149–170.
- [52] Andeef, M., et al. 2023. *Transitioning to solar fuel instead of fossil fuel in the electricity industry*. Int. J. Electr. Eng. Sustain. 1(4):32–46.
- [53] Andeef, M., et al. 2023. *The role of renewable energies in achieving a more secure and stable future*. International Journal of Electrical Engineering and Sustainability. 1(3): 11–20.
- [54] Maka, O., Salem, S., and Mehmood, M. 2021. *Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: Challenges, potential, opportunities and future perspectives*. Cleaner Engineering and Technology. 5: 100267.
- [55] Kassem, Y., Camur, H., and Abughinda, O. 2020. *Solar Energy Potential and Feasibility Study of a 10MW Grid-connected Solar Plant in Libya*. Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 10(4): 5358–5366.
- [56] Alweheshi, S., Abdelali, A., Rajab, Z., Khalil, A., and Mohamed, F. 2019. *Photovoltaic solar energy applications in Libya: A survey*. In Proceedings of the 2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC). 1–6.
- [57] Badi, I., Pamucar, D., Gigović, L., and Tatomirović, S. 2021. *Optimal site selection for siting a solar park using a novel GIS-SWA 'TEL model: A case study in Libya*. International Journal of Green Energy, 18(4): 336–350.
- [58] Yahya, W., Nassar, F., Mansur, A., Al-Nehari, M., and Alnakhilani, M. 2020. *Future study of renewable energy in Libya*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). 7(10): 1–6.

- [59] Assalai, N., Ajaj, M., and Othman, F. 2025. *Using solar energy in remote Libyan areas and establishing model farms (Al-Saddada area)*. The Open European Journal of Applied Sciences (OEJAS). 1(2): 34–45.
- [60] Imbayah, I., et al. 2026. *Modeling A 600 MW Floating Photovoltaic System in Al-Khums city, Libya: Performance Analysis and Implementation Using PV Syst.* Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 4(1): 223-237.
- [61] Zahloul, H. 2024. *Feasibility of solar energy and its ability to support the Libyan grid in facing its energy crisis*. Ph.D. dissertation, Durham Univ., Durham, U.K.
- [62] Abdulwahab, S., et al. *Meeting solar energy demands: Significance of transposition models for solar irradiance*. Int. J. Electr. Eng. and Sustain. 1(3): 90–105.
- [63] IRENA. 2020. *Renewable Energy Outlook: Libya*.
<https://www.irena.org/Publications>, Abu Dhabi.
- [64] Solargis. *Global Solar Atlas*, 2nd ed. <https://globalsolaratlas.info/>, 2023.
- [65] Ali, F., et al. 2019. *Numerical Analysis and Optimization of Area Contribution of The PV Cells in the PV/T Flat-Plate Solar Air Heating Collector*. Solar Energy Research Update. 6: 43-50.
- [66] Fathi, N., et al. 2023. *Thermoelectrical Analysis of a New Hybrid PV-Thermal Flat Plate Solar Collector*. 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), Gaza, Palestine, State of, 2023, 1-5.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Miskeen, G., et al. 2022. *Atlas of PV solar systems across Libyan territory*. International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Istanbul, Turkey.
- [70] Mohamed, O., and Masood, S. 2018. *A brief overview of solar and wind energy in Libya: Current trends and the future development*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 377: 2018.
- [71] Global Wind Atlas. *Libya – Wind resource maps and data*. accessed , 13 Dec 2025.
- [72] Engineering, "Wind Turbine Technology – Overview," accessed, 13 Dec 2025.
- [73] Abdelkarim, A., Danardono, D., Himawanto, D., and Atia, H. 2014. *Analysis of wind speed data in east of Libya*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 3(12): 800–805.
- [74] Elnaggar, M., et al. 2024. *Assessing the techno-enviro-economic viability of wind farms to address electricity shortages and Foster sustainability in Palestine*. Results in Engineering. 24(12): 103111.
- [75] Salem, M., Elmabruk, A., Irhouma, M., and Mangir, I. 2025. *Assessment of Wind Energy Potential in Western Mountain: Nahut and Yefren as case study*. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(1): 35-42.
- [76] Elmabruk, A., Salem, M., 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.

- [77] Fathi, N., et al. 2021. *Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study*. Energy Conversion and Management. 229:113744.
- [78] 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.
- [79] Elmariami, A., et al. 2023. *Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya*. Applied Solar Energy. 59(1): 64–78.
- [80] Abdalla, A., et al. 2023. *Estimation of dynamic wind shear coefficient to characterize best fit of wind speed profiles under different conditions of atmospheric stability and terrains for the assessment of height-dependent wind energy in Libya*. Applied Solar Energy. 59(3): 343–359.
- [81] Elmnifi, M., et al. 2024. *Agricultural waste in Libya as a resource for biochar and methane production: An analytical study*. Ecological Questions. 35(2): 117–128.
- [82] Eissa, M., Gürdil, G., Ghanem, L., and Demirel, B. 2024. *Biomass energy potential from agricultural production in Libya*. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi. 20(2): 61–71.
- [83] Khozondar, R. 2024. *A new design for a built-in hybrid energy system, parabolic dish solar concentrator and bioenergy (PDSC/BG): A case study–Libya*. Journal of Cleaner Production. 441: 140944.
- [84] Oibileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N., Meyer, E., and Mukumba, P. 2022. *Economic Analysis of Biogas Production via Biogas Digester Made from Composite Material*. Chemengineering. 7:67.
- [85] Mohamed, A. 2025. *High-Pressure Compression, Liquefaction and Metal Hydrides for Hydrogen Storage*. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(2): 75-84.
- [86] Hydrogen density at different temperatures and pressures. H2Tools – Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC), 1 Jan 2026. <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-density-different-temperatures-and-pressures>.
- [87] Puig-Samper, G., Bargiacchi, E., Iribarren, D., and Dufour, J. 2024. *Life-cycle assessment of hydrogen systems: A systematic review and meta-regression analysis*. Journal of Cleaner Production. 470: 143330.
- [88] World. Heat values of various fuels. 18 Nov 2024. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels>.
- [89] Al-Maghalseh, M. 2025. *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.
- [90] International Renewable Energy Agency, "Renewable Power Generation Costs in 2023," (IRENA), Abu Dhabi United Arab Emirates, 2024.
- [91] Cho, H., Strezov, V. and Evans, T. 2024. *Life cycle assessment of power-to-methane and renewable methane production technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 206: 114856.
- [92] Khan, A., Haider, M., Han, Z., Hablutzel, N., Haque, N., and MacGill, I. 2021. *Designing optimal integrated electricity supply configurations for renewable hydrogen generation in Australia*. iScience. 24(6): 102539.
- [93] Mori, M., et al. 2023. *Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes*. International Journal of Hydrogen Energy. 48(9): 39673–39689.

- [94] Mori, M., et al. 2023. *Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes*. International Journal of Hydrogen Energy. 48(9): 39673–39689.
- [95] Bionaz, D., Marocco, D., Ferrero, K., and Santarelli, M. 2022. *Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications*. Energy Reports. 8: 5080-5092.
- [96] Nassar, Y., and Alsadi, S. 2019. *Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine*. Sustainable energy technologies and assessments. 31: 318-328.
- [97] International Renewable Energy Agency , "Renewable Energy Markets," Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec, 2023. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Rnewable_energy_markets_GCC_2023.pdf.
- [98] Abdelhady, S., Borello, D., and Shaban, A. 2017. *Assessment of levelized cost of electricity of offshore wind energy in Egypt*. Wind Engineering. 41(4): 160–173.
- [99] Timmerberg, S., Sanna, A., Kaltschmitt, M., and Finkbeiner, M. 2019. *Renewable electricity targets in selected MENA countries: Assessment of available resources, generation costs and GHG emissions*. Energy Reports. 5: 1470–1487.
- [100] Hereher, M., and El Kenawy, A. 2020. *Exploring the potential of solar, tidal, and wind energy resources in Oman using an integrated climatic–socioeconomic approach*. Renewable Energy. 161: 662–675.
- [101] Alhijazi, A., Almasri, R., and Aloush, A. 2023. *A hybrid renewable energy (solar/wind/biomass) and multi-use system principles, types, and applications: A review*. Sustainability. 15(24): 16803.
- [102] Alqahtani, M., et al. 2025. *Comprehensive techno-environmental evaluation of an isolated PV/wind/biomass hybrid microgrid employing various battery technologies: A comparative analysis*. PLOS ONE. 20(2): e0317757.
- [103] Hassan, Q., et al. 2024. *RETRACTED: GIS-based multi-criteria analysis for solar, wind, and biomass energy potential: A case study of Iraq with implications for climate goals*. Results in Engineering. 22(6): 102212.
- [104] Dahani, A., Benqliou, C., Benabadji, A., Holz, M., Scottm C., and Fakhaikh, N. 2023. *Assessment of wind-to-hydrogen production via electrolysis: A case study in Morocco*. Journal of Harbin Engineering University. 44(12).
- [105] Badran, O., Alahmer, A., Alkhazaleh, R., Masalha, I., El-Tous, Y., and Abdel-Hafith, S. 2025. *Integrating hybrid wind–PV system for reliable electricity generation in remote villages of Jordan*. International Journal of Ambient Energy. 46(1): 2483921.
- [106] Modu, B., Abdullah, M., Bukar, A., Hamza, M., and Adewolu, M. 2023 *Energy management and capacity planning of photovoltaic–wind–biomass energy system considering hydrogen–battery storage*. Journal of Energy Storage. 73: 109294.
- [107] Costoya, X., et al. 2022. *Combining offshore wind and solar photovoltaic energy to stabilize energy supply under climate change scenarios: A case study on the western Iberian Peninsula*. Renew. Sustain. Energy Rev. 157: 112037.
- [108] Saha, S., et al. 2025. *Techno-economic analysis of integrated PV/biogas/wind/hydrogen polygeneration energy systems for green transportation in Bangladesh context*. Renew. Energy Focus. 54: 100707.
- [109] Li, R., et al. 2023. *Techno-economic analysis of a wind–photovoltaic–electrolysis–battery hybrid energy system for power and hydrogen generation*. Energy Convers. Manage. 281: 116854.

- [110] Nasser, M., et al. 2022. *Techno-economic assessment of clean hydrogen production and storage using hybrid PV/wind renewable energy system under different climatic conditions*. Sustain. Energy Technol. Assess. 52: 102195.
- [111] Al Saadi, K., and Ghosh, A. 2024. *Investigating the integration of floating photovoltaics (FPV) technology with hydrogen (H₂) energy for electricity production for domestic application in Oman*. International Journal of Hydrogen Energy. 80: 1151–1163.
- [112] Temiz, M., and Dincer, I. 2022. *Development of solar and wind based hydrogen energy systems for sustainable communities*. Energy Convers. Manage. 269: 116090.
- [113] Ginanjar, S., and Halimi, B. 2024. *Solar PV–wind turbine integration in hydrogen production and electricity generation for electric charging and hydrogen fueling stations in Indonesia*. In AIP Conf. Proc. 1(11): 110001.
- [114] Remamany, K., et al. 2024. *Biohydrogen fuel cell as an alternative to battery storage in solar/wind hybrid systems*. In Proc. ICIESTR. 1–6.