



التحليل الطاقى والاقتصادي والبيئي لمنظومة طاقة الخلايا الشمسية متصلة مع منظومة هيدروجين لتغطية الحمل الكهربائي لمنطقة حضرية

* إبراهيم المبروك لطيوش¹، علي رمضان الخازمي¹، سليمان محمود أحمد¹، عبد الله أبوبكر عبد الله¹، مختار عبد السلام إرحومة¹، الصادق سالم¹، مسعود علي فاخر¹، ياسر فتحي نصار¹.
¹قسم الهندسة الميكانيكية وهندسة الطاقات المتجددة، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ، ليبيا

الخلاصة:

يعد التحول إلى مصادر الطاقات المتجددة أمراً بالغ الأهمية في الحد من التدهور البيئي؛ جراء استخدام الوقود الأحفوري في إنتاج الطاقة. وقد برز الهيدروجين الأخضر كحل واعد لتخزين الطاقة واستخدامها لضمان موثوقية الطاقة واستقرار النظام. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تصميم وتحليل نظام طاقة شمسية كهروضوئية معزول عن الشبكة العامة للكهرباء متصل بمنظومة هيدروجين كمصدر لتخزين الطاقة؛ لإمداد منطقة وادي الشاطئ في ليبيا بالطاقة الكهربائية كبديل لاستخدام الطاقة المتولدة من الوقود الأحفوري. تتكون المنظومة المقترحة من حقل للألواح الشمسية كهروضوئية بقدرة 625.5 ميغاوات، وخلية وقود بقدرة 177 ميغاوات، ومحل كهربائي بقدرة 337 ميغاوات، وخزان هيدروجين بسعة 24,285 متر مكعب. وكما ألحق بمنظومة الهيدروجين محطة تحلية مياه بقدرة إنتاجية 186,000 متر مكعب في الساعة وبقدرة 400 كيلووات، وكذلك محطة ضغط الهيدروجين بقدرة 4.1 ميغاوات. وأظهرت النتائج أن النظام المقترح قادر على تغطية الحمل بالكامل بتكلفة استثمارية قدرها 1,742 مليون دولار، وقدرت التكلفة المستوية للطاقة بحوالي 338 دولار/ميغاوات ساعة، وإن فترة استرداد رأس المال 16.64 سنة، وأن النظام يسهم في خفض الانبعاثات الكربونية بحوالي 611,849 طن CO₂ سنوياً. تعكس هذه الدراسة الضوء على إمكانات أنظمة الطاقة الشمسية كهروضوئية في ليبيا الذي يتماشى مع تطلعات الدولة الليبية في التحول نحو الطاقات المتجددة وتلطيف الضرر البيئي، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.
الكلمات المفتاحية: تكلفة الطاقة المستوية (LCOE)، الطاقة الشمسية كهروضوئية، الهيدروجين الأخضر، ليبيا

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

* Ibrahim Almabrouk Latiwash¹ and Ali Ramadan Al-Khazmi¹ and Suliman Mahmoud Ahmad¹ and Abdallah Abubaker Abdallah¹ and Abdulhakeem Bin Miskeen¹ and Mukhtar Abdulsalam Irhouma¹ and Elsadik Salim¹ and Massoud Ali Fakher¹ and Yasser Fathi Nassar¹.

¹Mechanical and Renewable Energy Engineering Department, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Libya

Abstract:

The transition to renewable energy sources is crucial for reducing environmental

degradation caused by the use of fossil fuels in energy production. Green hydrogen has emerged as a promising solution for energy storage, ensuring energy reliability and system stability. This study aims to design and analyze an off-grid solar photovoltaic (PV) system integrated with a hydrogen system as an energy storage solution to supply the Wadi Al-Shati region in Libya with electrical power as an alternative to fossil fuel-based energy generation. The proposed system consists of a 625.5 MW solar PV field, a 177 MW fuel cell, a 337 MW electrolyzer, and a hydrogen storage tank with a capacity of 24,285 m³. In addition, a desalination plant with a production capacity of 186,000 cubic meters per hour and a power rating of 400 kW, as well as a hydrogen compression station rated at 4.1 MW, are integrated into the hydrogen system. The results indicate that the proposed system is capable of fully covering the electrical load at an investment cost of \$1,742 million. The levelized cost of energy is estimated at approximately \$338/MWh, with a capital payback period of 16.64 years. The system also contributes to reducing carbon emissions by approximately 611,849 tons of CO₂ annually. This study highlights the potential of solar photovoltaic systems in Libya, aligning with the country's aspirations to transition toward renewable energy, mitigate environmental impacts, and achieve sustainable development goals.

Keywords: Levelized cost of energy (LCOE), solar photovoltaics, green hydrogen, Libya.

المقدمة

في السنوات الأخيرة، شهد قطاع الطاقة العالمي ارتفاعاً ملحوظاً في الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، مدفوعاً بضغط ناتجة تنامي المخاوف البيئية، فقد أصبح الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة من ضمن أولويات العديد من دول العالم، الأمر الذي دفع العديد من دول العالم للتحوّل نحو الطاقات المتجددة. تعتمد الدولة الليبية بشكل شبه كامل على إنتاج الطاقة من الوقود الأحفوري، وتؤكد هذه الاتجاهات على الأهمية الاستراتيجية للهيدروجين في السياق الأوسع للتحوّل العالمي في مجال الطاقة، لا سيما في مناطق مثل الشرق الأوسط وشمال أفريقيا التي تزخر بموارد متجددة [1]. بالرغم من أنها تمتلك مواردًا وفيرةً ومتعددة من الطاقات المتجددة، فعلى صعيد الطاقة الشمسية يتراوح المتوسط السنوي ما بين 1753 كيلواط ساعة/كيلواط في بعض المناطق الساحلية، ويبلغ 2045 كيلواط ساعة/كيلواط في المناطق الجنوبية، وتصل فترة سطوع الشمس السنوية ما بين 3100 و3900 ساعة، وتعكس هذه الأرقام إمكانات الدولة الليبية من الطاقات المتجددة التي يمكن تسخيرها لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، والحد من انبعاثات الكربون [2-30].

يحظى إنتاج الهيدروجين باستخدام أنظمة الطاقة الكهروضوئية خصوصاً عندما يتم توليده عن طريق تحليل الماء بالكهرباء، كحل محوري لأنظمة الطاقة المستدامة [31]. يساهم الهيدروجين الأخضر بفاعلية في برامج التحوّل العالمي نحو أنظمة طاقة مستدامة خالية من الانبعاثات الكربونية، ويعالج مشكلة تقطع الطاقة المتجددة من خلال تمكين تخزين الطاقة على نطاق واسع، واكساب مرونة في الشبكة [32-43].

في الكويت أجرى Hussam وآخرون [44] دراسة تقنية اقتصادية لإنتاج الهيدروجين، باستخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، وخلايا الوقود، والبطاريات، ووجد أن دمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع طاقة الرياح المتصلة بشبكة الكهرباء يحقق أقل تكلفة طاقة تبلغ 0.539 دولار/كيلووات، وتكلفة هيدروجين تبلغ حوالي 6.85 دولار/كيلوغرام، وأما بالنسبة للنظام المستقل فترتفع تكلفة الهيدروجين إلى أكثر من 8.0 دولار/كجم بسبب ارتفاع التكلفة

الرأسمالية للنظام المستقل عن الشبكة، ويثبت تحليل الحساسية أن تكلفة الطاقة المستوية انخفضت إلى 0.365 دولار/كيلووات ساعة إذا انخفضت أسعار معدات الطاقة الشمسية بنسبة 50%. وفي باكستان، أجرى Rasool وآخرون [45] تحليلاً شاملاً لأنظمة الطاقة المتجددة في خمس مناطق جغرافية لتحديد إنتاجية الهيدروجين لتوليد الطاقة الكهربائية لتلبية احتياجات المجتمع، وتزويد المركبات التي تعمل بخلايا الوقود، وتوصلت الدراسة إلى أن أقل تكلفة طاقة مستوية (LCOE) للكهرباء وأقل تكلفة هيدروجين متوسطة (LCOH) لإنتاج الهيدروجين، من خلال الجمع بين الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح والمطل الكهربائي ومجموعة البطاريات وخزان الهيدروجين بتكلفة طاقة مستوية بلغت 0.30 دولار/كيلوواط ساعة وتكلفة هيدروجين تبلغ 9.52 دولار/كيلوغرام.

وفي عُمان قام A. Al Makky وآخرون [46] باستكشاف إمكانات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لإنتاج الطاقة والهيدروجين، وحددوا التكوين الأمثل للنظام بعد أدنى من تكلفة الطاقة الكهربائية (LCOE) يبلغ 0.708 دولار/كيلوواط ساعة وتكلفة الهيدروجين (COH) تبلغ 10.2 دولار/كيلوغرام. تساهم هذه الدراسات مجتمعة في تكوين مجموعة متزايدة من الأدلة التي تدعم جدوى وإمكانات الهيدروجين الأخضر كعنصر رئيسي في الانتقال نحو مستقبل أكثر استدامة للطاقة. ركزت الدراسات الحديثة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (MENA) على تحسين كفاءة إنتاج الهيدروجين، وتقييم التحديات الخاصة بالمنطقة. في الإمارات قام Ghenai وآخرون [47] بتصميم وتطوير منظومة طاقة هجينة تعمل خارج الشبكة لتلبية الحمل الكهربائي في منطقة صحراوية، واستخدمت في المحاكاة منهجية متكاملة من أجل تحسين وتطوير استراتيجية التحكم في توزيع الطاقة، وأظهرت النتائج أن أفضل أداء تحقق عن طريق تكامل منظومة طاقة هجينة تعمل خارج وخلايا الوقود المدمجة مع محل كهربائي، وأن مزيج الطاقة بلغ 50% و48% للطاقة الشمسية وخلايا الوقود على التوالي، وبتكلفة مستوية 145 دولار/ميغاوات ساعة، وفي الإمارات كذلك أجرى Rahul وآخرون [48] تصميمًا لمنظومة صغيرة من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وخلايا الوقود لتغطية حمل لمبنى في الإمارات، وقد توصلت المحاكاة إلى أن النظام قادر على تلبية ثلاثة أرباع الطلب على الحمل بشكل مستقل عن الشبكة الرئيسية، وأن الكهرباء تبلغ 0.248 دولار/كيلوواط ساعة، وفي بنغلاديش قام Mohtasim وآخرون [49] أحدث الدراسات المتطورة حول تلبية احتياجات الكهرباء والتدفئة والتبريد والهيدروجين والمركبات الكهربائية والمياه العذبة بمختلف التركيبات. بالإضافة إلى ذلك مراجعة أحدث الدراسات حول تحسين الحجم وتحليل الموثوقية وتحليل الحساسية وتقنيات التحكم والنمذجة التفصيلية والخصائص التقنية والبيئية والاقتصادية. كما قدم تبريرًا لاختيار التكوينات المناسبة لمواقع جغرافية محددة، إلى جانب تحليل لاختيار الخوارزميات وأنظمة إدارة الطاقة اللازمة لتلبية متطلبات الأحمال المختلفة، وأظهرت الدراسة أن أكثر أنظمة الطاقة المتجددة جاذبية القائمة على الطاقة الكهروضوئية / الرياح / البطاريات / خلايا الوقود تولد الكهرباء والهيدروجين وتلبي الطلب على المياه العذبة بتكلفة مستوية للطاقة (LCOE) تبلغ 0.69 دولار/كيلوواط ساعة وتكلفة للهيدروجين (LCOH) تبلغ 6.85 دولار/كيلوغرام، وفي تركيا قام Turkdogan وآخرون [50] بتصميم نظام هجين يتكون من توربين رياح بقدرة 4 كيلوواط، وحقل خلايا شمسية بقدرة 11.7 كيلوواط، ومحل كهربائي بقدرة 7 كيلوواط، وبطارية ليثيوم أيون بسعة 6 كيلوواط ساعة، وخزان هيدروجين بسعة 3 كيلوغرامات، ومحول بقدرة 4.08 كيلوواط. من أجل تغطية أحمال وتوفير الهيدروجين للسيارات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود في مقاطعة أيفاليك في تركيا، وأشارت الدراسة أن النظام المقترح المحسن سيقوم بتوفير الكهرباء والهيدروجين بتكلفة متوسطة تبلغ 0.685 دولار/كيلوواط ساعة و6.85 دولار/كيلوغرام هيدروجين. إن هذا الاستثمار يحتاج إلى رأس مال قدره 43,776 دولارًا، وفي هولندا قدم Lopez وآخرون [51] خوارزمية تحسين لإيجاد

أفضل تكوين لمحطة طاقة كهروضوئية والتي تشغل جهاز التحليل الكهربائي، واستخدم ثلاثة مؤشرات وهي: التكلفة والكفاءة والطاقة المهدورة، وقد أظهرت النتائج أنه يجب أن تكون محطة الطاقة الكهروضوئية أكبر حجماً بمقدار 2.63 مرة من المحلل الكهربائي للحصول على أقل تكلفة، بينما بالنسبة للكفاءة العالية، يزداد هذا الرقم بنسبة 2%. بالرغم من التقدم الكبير الذي أحرزته تقنيات الطاقة المتجددة والهيدروجين، لا تزال هناك فجوات معرفية كبيرة فيما يتعلق بالتصميم والتقييم التقني والاقتصادي والبيئي لأنظمة الطاقة الكهروضوئية والهيدروجين المستقلة عن الشبكة.

في حين ركزت اغلب الدراسة على إيجاد أفضل مزيج لتكامل الطاقات المتجددة مع الهيدروجين، بالإضافة الي استخدام الهيدروجين كوقود، ولكن اغلب الدراسات لم تعتبر الموثوقية اساسية في التكوين، علاوة على ذلك ان اغلب الدراسات لا تعتبر تغطية الحمل هدفا اساسيا في التصميم ولأخذ في الاعتبار سعة خزان الهيدروجين كعامل أساسي في ضمان موثوقية الامدادات. من ناحية أخرى، ركزت الدراسات في ليبيا على التقييم الاقتصادي والحراري لمنظومة إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام اللوح الكهروضوئي والمحلل الكهروكيميائية ذو الغشاء التبادلي للبروتون في منطقة الجفرة بالجنوب الليبي [52] ، ودراسة أخرى عن فرص إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا والاستفادة من الطاقة الشمسية لتحقيق التنمية المستدامة وتنويع الاقتصاد [53]؛ مما يشير إلى النقص في الدراسات المحلية التصميمية والتحليلية. وعلى الرغم، من تعدد الدراسات حول إنتاجية الهيدروجين، إلا أن هناك نقص في الأبحاث التي تعالج تزويد الحمل الكهربائي المعزول عن الشبكة بالطاقة بشكل ساعي وموثوقية، وبالأخص في ليبيا.

لذلك، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل اقتصادي تقني ببنئ لمنظومة طاقة شمسية متصلة مع منظومة هيدروجين تكميلية لتغطية الحمل الكهربائي لمنطقة وادي الشاطئ بالجنوب الليبي كبديل عن الوقود الأحفوري، والاستفادة من موارد الطاقة الشمسية المتوفرة في المنطقة.

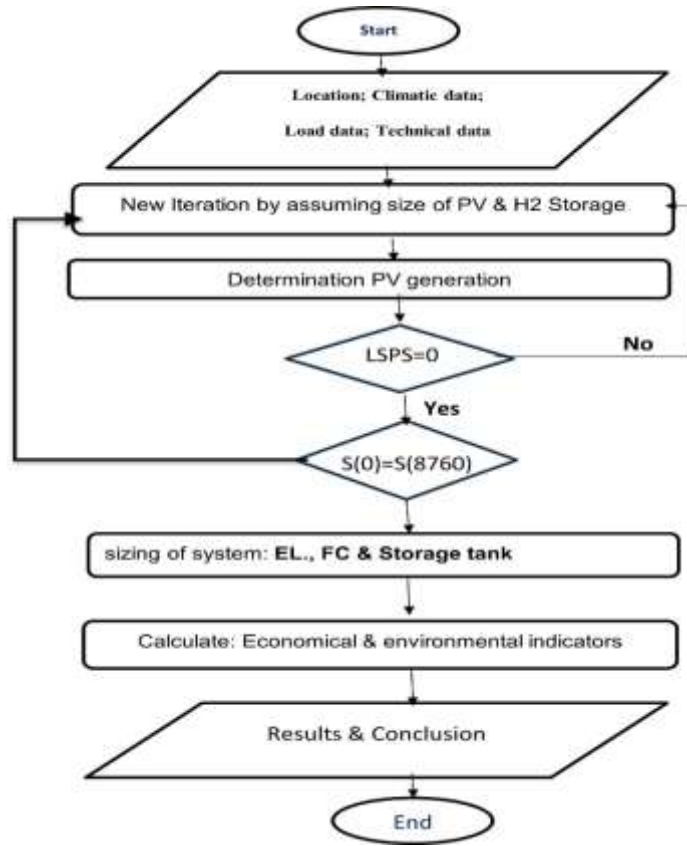
منهجية البحث

يبين الشكل (1) المنهجية المتبعة في الدراسة التي تبدأ بتحديد موقع الدراسة والحصول على البيانات المناخية للموقع والمتمثلة في: بيانات الأشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة، وسرعة الرياح، وكذلك الأحمال الكهربائية. كذلك يتطلب لإجراء المحاكاة بيانات فنية واقتصادية لمكونات المنظومة المقترحة وأيضاً البيانات البيئية المتعلمة بمعامل انبعاث الكربون من منظومة توليد الكهرباء في ليبيا.

في الجزء الأول: سيتم تحديد البيانات الفنية لإنتاج الطاقة السنوية والشهرية واليومية والساعية لكل الألواح الذي سيساهم في التقييم البيئي المحتمل للانخفاض في الانبعاثات من ثاني أكسيد الكربون إذا قُرنَت بالطاقة المتولدة من الوقود الأحفوري، وستقوم الدراسة بإجراء تقييم لبعض المؤشرات الاقتصادية ومنها التكلفة المستوية للطاقة وفترة استرداد رأس المال والقيمة الحالية للاستثمار.

الجزء الثاني: ستحدد فيه الدراسة كمية الهيدروجين التي يمكن إنتاجها وتخزينها في خزانات الطاقة.

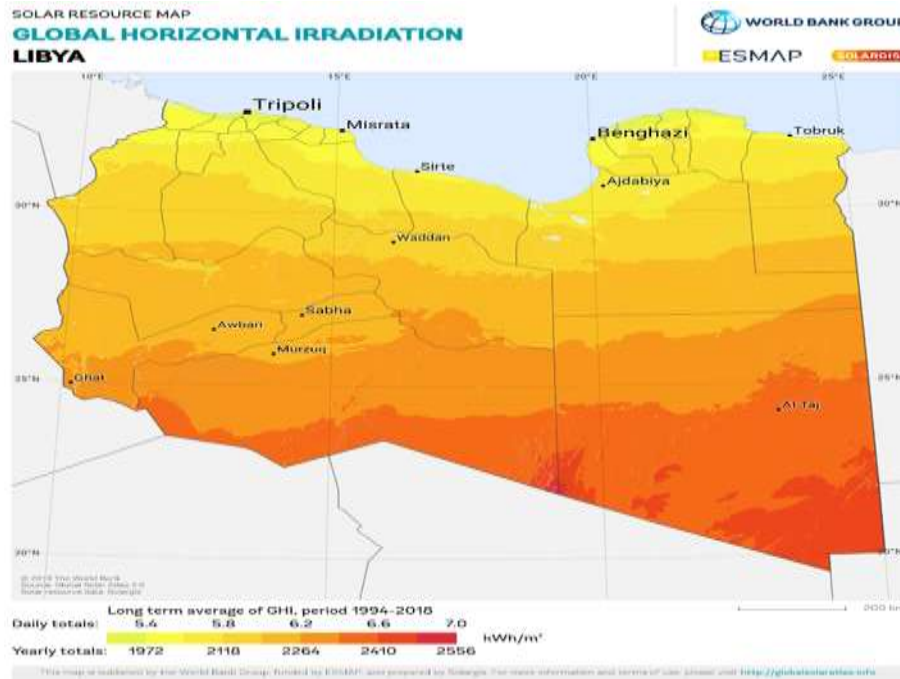
تعتمد المنهجية على المحاكاة التكرارية العددية بطريقة المحاولة والخطأ التي من خلالها سيتم تحديد الحجم الذي يحقق اتزان المنظومة ضمن الشروط والقيود المحددة سلفاً لمكونات المنظومة.



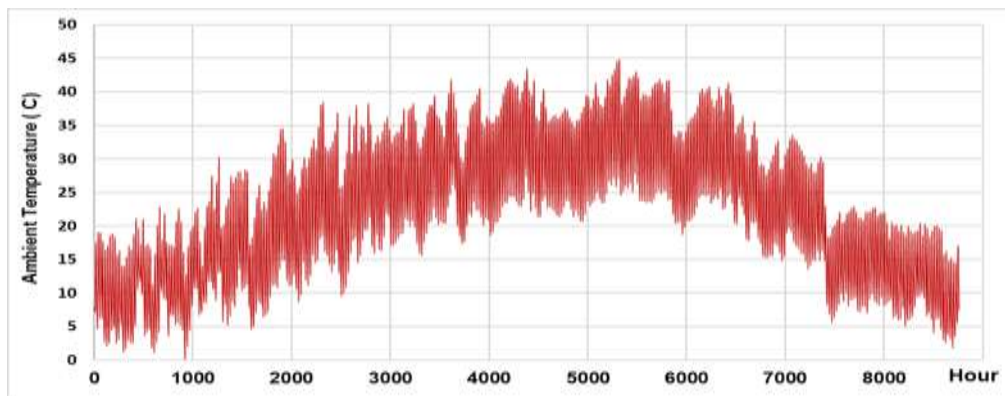
الشكل 1: مخطط انسيابي للمنهجية المتبعة في الدراسة.

معلومات منطقة الدراسة

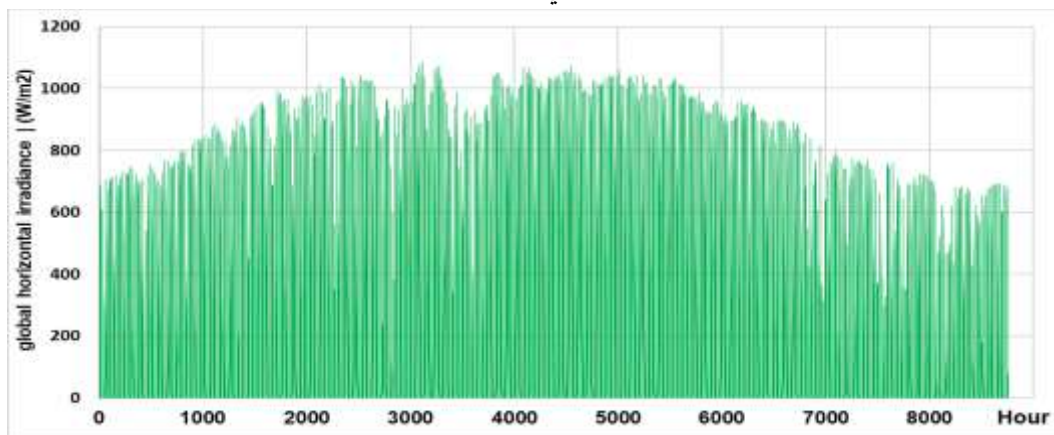
تركز هذه الدراسة على منطقة وادي الشاطئ، وهي منطقة تقع في الجنوب الليبي عند الإحداثيات 27.7351° شمالاً و 12.4381° شرقاً، على بعد حوالي 700 كم جنوب العاصمة طرابلس. وتتميز هذه المنطقة بطبيعتها الصحراوية، يبلغ عدد سكانها حوالي 78,563 نسمة حسب إحصائيات (2021)، وهي منطقة واسعة النطاق مما يجعلها مناسبة لمشاريع الطاقة الشمسية. يوضح الشكل (2) خريطة الإشعاع الشمسي، والموقع الجغرافي المحتملة لمشاريع الطاقة الشمسية. تم جمع البيانات الجوية، بما في ذلك الإشعاع الأفقي (GHI) الشكل (3) ودرجة حرارة الهواء المحيط للسنوات (2023-2024) من محطة الأرصاد التابعة لمركز دراسات الطاقة المتجددة والتنمية المستدامة (RCRESDS) بجامعة وادي الشاطئ الشكل (4). وتستخدم هذه البيانات، كمدخلات أساسية في محاكاة أداء الطاقة الشمسية الكهروضوئية.



الشكل 2: خريطة الإشعاع الشمسي لليبيا وموقع وادي الشاطئ.



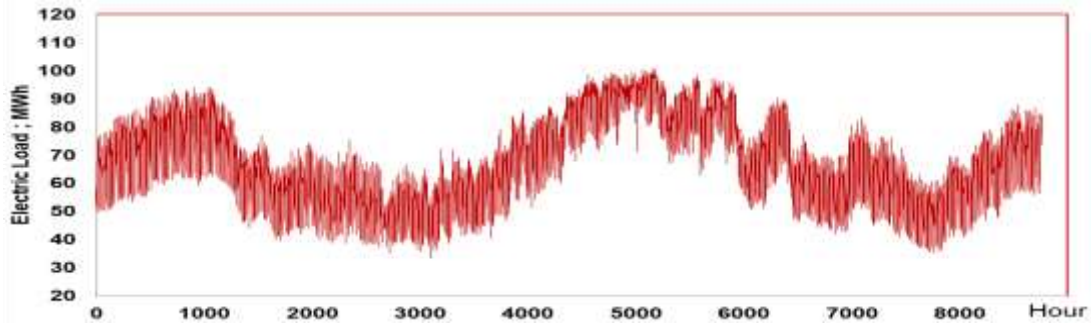
الشكل 3: المتوسط الساعي لدرجة حرارة الهواء المحيط.



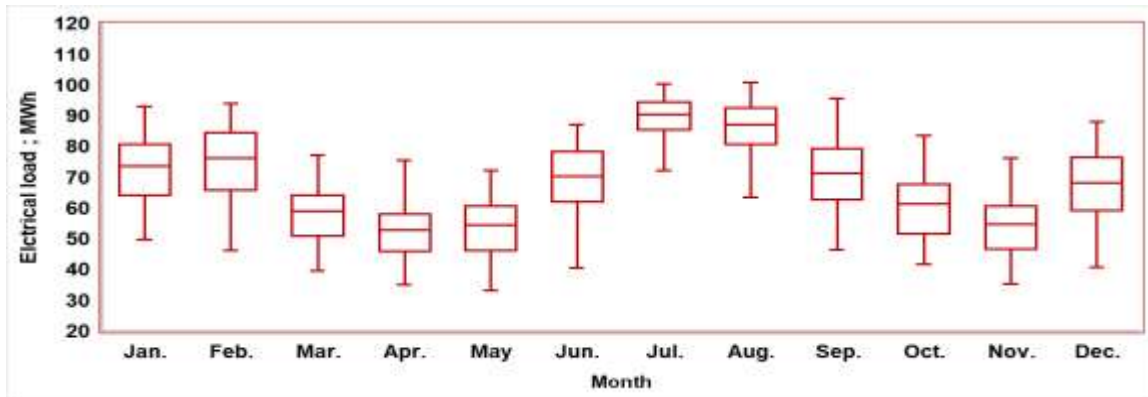
الشكل 4: متوسط الإشعاع الشمسي الأفقي (GHI) الساعي.

الحمل الكهربائي

يشير الشكل (5) إلى الحمل الساعي لمنطقة وادي الشاطئ على مدار عام كامل (8760 ساعة)، والشكل (6) يشير إلى تباين توزيع الأحمال، ويلاحظ أن أعلى حمل شهري يقع في شهر يوليو وأقل حمل في شهر أبريل، المتوسط الحمل الشهري (49168 ميجاوات /شهر)، ويبلغ أعلى حمل ساعي (100.8 ميجاوات ساعة)، وأن متوسط الحمل الساعي بلغ (67.4 ميجاوات ساعة)، وأن إجمالي الحمل السنوي (590 ميجاوات ساعة /سنة).



الشكل 5: الحمل الكهربائي الساعي للمنطقة



الشكل 6: تحليل تباين الحمل الكهربائي لكل شهر.

إنتاجية الخلايا الشمسية

يتم تقدير إنتاجية الخلايا الشمسية $E_{PV}(t)$ في ظروف التشغيل الفعلية والظروف المناخية بواسطة [54-59].

$$E_{PV}(t) = P_{STC} \times DF_{PV} \times \frac{H_g(t)}{H_{STC}} \times [1 + \beta_{p,T}(T_{cell}(t) - T_{STC})] \quad (1)$$

حيث P_{STC} هي ظروف الاختبار القياسية STC ؛ DF_{PV} يشير إلى عامل تخفيض قدرة الألواح الشمسية الكهروضوئية (80%) $\beta_{p,T}$ يشير إلى معامل الطاقة-درجة الحرارة ($^{\circ}C$ /%) ؛ T_{STC} و H_{STC} يشيران إلى ظروف الاختبار القياسية لدرجة الحرارة (25 درجة مئوية) والإشعاع الشمسي (1000 واط/م²) على التوالي. يتم التعبير عن درجة حرارة الخلية $(T_{cell}(t))$ على النحو التالي [60,63]:

$$T_{cell}(t) = T_{\infty}(t) + 0.078H_g(t)$$

T_{∞} و $H_g(t)$ هما درجة حرارة الهواء المحيط بالساعة ($^{\circ}\text{C}$) والإشعاع الشمسي الكلي (W/m^2).

كما تم حساب الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح الألواح الشمسية استناداً على توصيات الباحثين [64-69] الخصائص الفنية للوح الشمسي من نوع Stion SN-115 PV مدرجة في الجدول 1 يبين وحدة (تقنية الأغشية الرقيقة) التي تم استخدامها في هذه الدراسة وفقاً لتوصيات الباحثين [70-72]

Table 1: Technical characteristics of the PV

Metric	Value
PV modules type	Stion SN-115
Technology	Thin Film
Country of Origin	USA
Maximum Power; W	125
Temperature coefficient of power; % / $^{\circ}\text{C}$	-0.4
Efficiency; %	11.4

2 محول التردد

تتكون وحدة محول الطاقة من محول تيار مستمر/تيار متردد/تيار مستمر ومحول تيار متردد/تيار مستمر. 95% تمثل كفاءة التحويل الثابتة لجميع المحولات المستخدمة. يتم وصف طاقة المحول أدناه [73-75].

$$E_{con} = \frac{E_{PV}}{\eta_{inv}} \quad (2)$$

$$P_{con} = \max [E_{con}(t)]_{t=1,8760} \quad (3)$$

حيث: η_{inv} تمثل كفاءة محول التردد الكهربائي (95%)، و P_{con} هي قدرة المحول الكهربائي

منظومة الهيدروجين

يتكون نظام الهيدروجين من المحل الكهربائي لإنتاج H_2 ، وخزان، وخلايا الوقود لإنتاج الكهرباء، بالإضافة إلى الضاغط ومحطة تحلية مياه لتزويد المحل بالمياه العذبة. يمكن تقدير كمية الهيدروجين $\dot{m}_{\text{H}_2}(t)$ المنتجة في المحل الكهربائي بكفاءة η_{El} وفق المعادلة التالية [76,77]:

$$\dot{m}_{\text{H}_2}(t) = \left[\frac{P_{pv}(t) \times \eta_{El}}{LHV_{\text{H}_2}} \right]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (4)$$

وبالتالي يمكن تحديد قدرة المحل الكهربائي من المعادلة التالية:

$$E_{El}(t) = \left[\frac{\dot{m}_{\text{H}_2}(t) \times LHV_{\text{H}_2}}{\eta_{El}} \right]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (5)$$

$$P_{El} = \max [E_{El}(t)]_{t=1,8760} \quad (6)$$

حيث، $\dot{m}_{H_2}(t)$ هي إنتاجية الهيدروجين (كيلوجرام/النتيجة من تغذية المحل الكهربائي بطاقة من الخلايا الشمسية قدرها $E_{pv}(t)$ (ميجاوات ساعة)، LHV_{H_2} - القيمة الحرارية الدنيا للهيدروجين ($33.33 \text{ kWh/kg } H_2$)، η_{El} تمثل كفاءة المحل الكهربائي (80%). بينما يتم تحديد سعة خلية الوقود (MW) P_{FC} وفق المعادلة التالية [78]:

$$E_{FC}(t) = [\dot{m}_{H_2}(t) \times LHV_{H_2} \times \eta_{FC}]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (7)$$

$$P_{FC} = \max [E_{FC}(t)]_{t=1,8760} \quad (8)$$

حيث: η_{FC} تمثل كفاءة خلية الوقود (60%). سيتم تخزين الهيدروجين المنتج عند ضغط يعادل 1000 بار، في خزان غاز مضغوط عالي الضغط مصنوع من مواد مركبة [79]. يمكن استخدام المعادلة التالية لحساب حجم التخزين (m^3):

$$m_{H_2} = \sum_{t=1}^{8760} m_{H_2,P}(t) - m_{H_2,C}(t) \quad (9)$$

حيث $m_{H_2,P}(t)$ تمثل كمية الهيدروجين المنتجة في المحل الكهربائي طن/ساعة، بينما $m_{H_2,C}(t)$ تمثل كمية الهيدروجين المستهلكة في نفس الوقت. وبالتالي فإن حجم الخزان بالمترا المكعب يحدد بالعلاقة التالية:

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2}} \quad (10)$$

حيث ρ_{H_2} تمثل كثافة الهيدروجين المضغوط عند 100 ميغا باسكال، وتبلغ 71.59 كجم/م³ [80]. تم تحديد الطاقة التي تستهلكها الضواغط $P_{Comp}(t)$ بالميجاوات ساعة هي:

$$E_{Comp}(t) = \frac{m_{H_2}(t)}{\eta_{comp} \times \rho_{H_2}} \Delta p \quad (11)$$

وبناء على ذلك ستكون قدرة الضاغط وفق التالي:

$$P_{comp} = \max [E_{Comp}(t)]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (12)$$

حيث: η_{comp} تشير الي كفاءة الضاغط (95%)

تطية ومعالجة المياه

يلزم حوالي 11 كجم من الماء النقي لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين [81]، ويتراوح استهلاك الطاقة لمحطة تطية المياه بين 2.5-4 كيلواط ساعة/كجم من الهيدروجين [82]. تبلغ تكلفة تطية المياه حوالي 0.5-1.5 دولار/م³ [83-87]، مما يضيف حوالي 0.0075 دولار/كجم إلى تكلفة إنتاج الهيدروجين [88]

$$E_{water}(t) = \left[\frac{\dot{m}_{H_2}(t) \times Q_{H_2O}}{1000} \times E_{H_2O} \right]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (13)$$

$$P_{water} = \max[E_{water}(t)]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (14)$$

حيث: Q_{H_2O} تمثل كمية المياه النقية اللازمة لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين، و E_{H_2O} هي استهلاك الطاقة لمحطة التحلية 3 كيلوات/متر مكعب من المياه [89].
قيود وشروط التصميم

الهدف الرئيسي من النظام المقترح هو تزويد منطقة وادي الشاطئ بالطاقة الكهربائية مع ضمان أن تكون احتمالية فقدان إمدادات الطاقة (LPSP) صفر، ويتم حساب احتمال فقدان إمدادات الطاقة (LPSP) على النحو التالي [90-95]:

$$SP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [E_{Load}(t) - E_{PV/H_2}(t)]}{\sum_{t=1}^{8760} E_{Load}(t)} = 0 \quad (15)$$

حيث: $E_{Load}(t)$ و $E_{PV/H_2}(t)$ تمثلان الحمل الكهربائي ونظام الطاقة المقترح للموقع المحدد. كما يشترط لتحقيق استقرار النظام ان يكون مستوى الطاقة في الخزان في بداية التشغيل (S_0) مساويا لمستوى الطاقة في نهاية السنة (S_{8760}) وفق التالي:

$$S_0(0) = S(8760) \quad (16)$$

التحليل الاقتصادي والبيئي

يعزز تضمين تكلفة الأضرار البيئية في التحليل الاقتصادي القدرة التنافسية للطاقة المتجددة والصدقية للبيئة في سوق الطاقة حتى في البلدان التي تدعم أسعار الطاقة [96]. تعتبر التكلفة المستوية للطاقة أهم مؤشر اقتصادي وبيئي للمقارنة بين بدائل الطاقة. ويمكن تقدير (LCOE) من المعادلة التالية [97]:

$$LCOE = \frac{r(1+r)^n (CC_{pv} + CC_{H_2}) + (OM_{pv} + OM_{H_2}) - C_{CO_2,E}}{E_{Load}} \quad (17)$$

حيث CC_{H_2} و CC_{pv} هما التكلفة الرأسمالية لمعدات نظام الطاقة الكهروضوئية والهيدروجين بالدولار الأمريكي OM_{H_2} و OM_{pv} هما التكلفة التشغيلية والصيانة السنوية لمعدات نظام الطاقة الكهروضوئية والهيدروجين بالدولار الأمريكي/السنة. $C_{CO_2,E}$ هي التكلفة والبيئية لانبعاثات الكربون بالدولار/سنة E_{Load} . هي الإنتاجية السنوية للكهرباء بالكيلوواط/ساعة/سنة، و n هي العمر الافتراضي لمعدات نظام الطاقة الكهروضوئية والهيدروجين، على التوالي؛ حيث r هو معدل الخصم الحقيقي الذي يساوي 3.4% وقد تم تقييمه على أساس معدل الخصم الاسمي (i) الذي يساوي 6% ومعدل التضخم (f) البالغ 2.5% على النحو التالي:

$$r = \frac{i - f}{1 + f} \quad (18)$$

يتم تقدير صافي القيم الحالية NPV وفترة استرداد رأس المال وفق التالي [98,99]:

$$NPV = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (CC_{pv} + CC_{H_2}) + (OM_{pv} + OM_{H_2}) - C_{CO_2,E} \quad (19)$$

$$\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

$$PBTM = \frac{CC_{pv} + CC_{H_2}}{Income} \quad (20)$$

حيث CC_{H_2} و CC_{Wpv} هما التكلفة الرأسمالية لمعدات نظام طاقة الشمسية الكهروضوئية والهيدروجين بالدولار الأمريكي .
 OM_{H_2} و OM_{pv} هما التكلفة التشغيلية والصيانة السنوية لمعدات نظام طاقة الشمسية الكهروضوئية والهيدروجين بالدولار
الأمريكي/السنة $C_{CO_2,E}$. هي التكلفة البيئية لانبعاثات الكربون بالدولار/سنة.
الجدول 2: تفاصيل المعلمات المطلوبة لتقييم تكلفة الطاقة المولدة (LCOE) وتكلفة الطاقة المولدة من الطاقة الحرارية
(LCOH) للنظام الهجين [100-102].

PV	Value
Capital cost /kW	876
OPEX \$/kW/year	20
Project life time year	25
Converter/inverter	
Capital cost \$/kW	500
OPEX \$/kW	39
Eff.	95%
Project life time	15
Electrolyser (PEM)	
Capital cost \$/kW	1800
OPEX \$/kW	328
Eff.	80%
Project life time	25
Hydrogen storage	
Capital cost \$/kg_H2	800
OPEX \$/kg/year	3
Project life time	25
Fuel cell	
CAPEX \$/kW	3000
OPEX	59
Project life time	25

inflation	2.5%
Discount rate	6%

يتم تحديد تكلفة الكربون الناتجة عن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من توليد الكهرباء وفق التالي:

$$C_{CO_2,E} = SC_{CO_2} \times EF_{CO_2,E} \times E_{Load} \quad (21)$$

حيث $SC_{CO_2,E}$: هو التكلفة الاجتماعية للكربون 70 دولاراً/طن كما حددها صندوق النقد الدولي [103]، و Q_E هو الكمية السنوية للطاقة، $EF_{CO_2,E}$ هي معامل الانبعاث الكربون لمنظومة توليد الكهرباء في ليبيا (1.037kgCO₂/kWh) [104]-[106].

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالاقين في النتائج

تم وضع الافتراضات التالية لتسهيل التحليل:

- الحمل الكهربائي لا يتغير على طول فترة الدراسة.

- يعتبر الهيدروجين (H₂) غازاً مثالياً.

- لا يشمل التقييم الاقتصادي القيمة المتبقية للمعدات التي وصلت إلى نهاية عمرها التشغيلي.

- إهمال خسائر النقل والتسريبات.

- كفاءة ثابتة لأنظمة التحليل الكهربائي وخلايا الوقود.

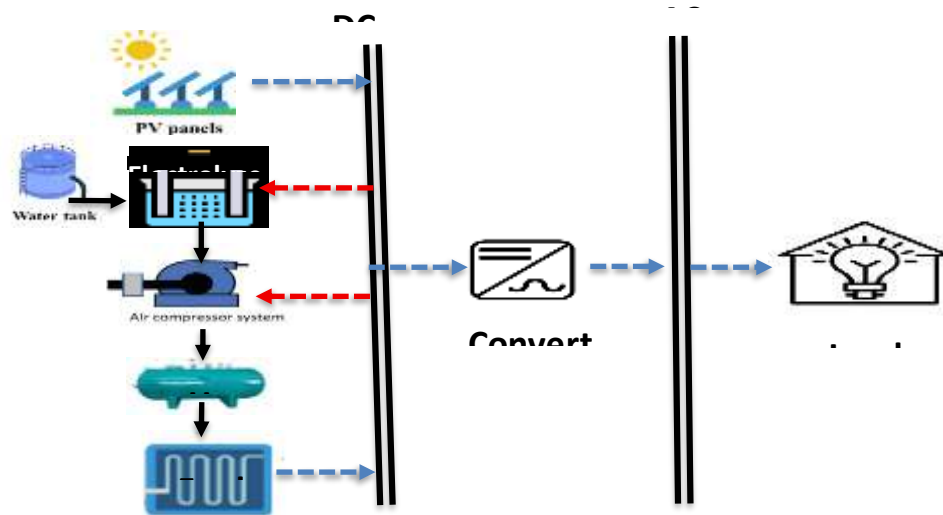
- أحد الحدود الرئيسية لهذه الدراسة هو عدم دراسة تأثير تغيير المعلمات على تصميم وأداء النظام المقترح.

تعتبر البيانات المناخية والخصائص الفيزيائية مثل الكثافة والقيمة الحرارية المنخفضة من أهم مصادر الالاقين في النتائج؛ كذلك يوجد تفاوت كبير في أسعار معدات الطاقة الشمسية في السوق العالمية يتجاوز 390% [98].

النتائج والمناقشة

مكونات المنظومة المقترحة

يبين الشكل (7) مكونات نظام الطاقة المتجدد المقترح لضمان الوصول الآمن والمستدام، للكهرباء الذي يتألف من حقل شمسي كهروضوئي يزود الحمل الكهربائي بالطاقة أولاً، ثم الفائض من الطاقة تشغيل المحل ومحطة التحلية بتيار مستمر،



ويعمل على تزويد الضاغط بالطاقة الكافية لضغط الهيدروجين المنتج في خزانات ضغط عالي التي توفر الهيدروجين لخلايا الوقود عندما لا تتوفر طاقة شمسية تغطي الحمل، ويعمل المحول الكهربائي على تحويل التيار من مستمر الي متردد. وللحفاظ على استقرار الشبكة من حيث الجهد والتردد يخصص الحقل الشمسي الكهروضوئي حصرياً لإنتاج الهيدروجين؛ لزيادة الكفاءة الكلية للنظام.

الشكل 7: نظام الطاقة المقترح

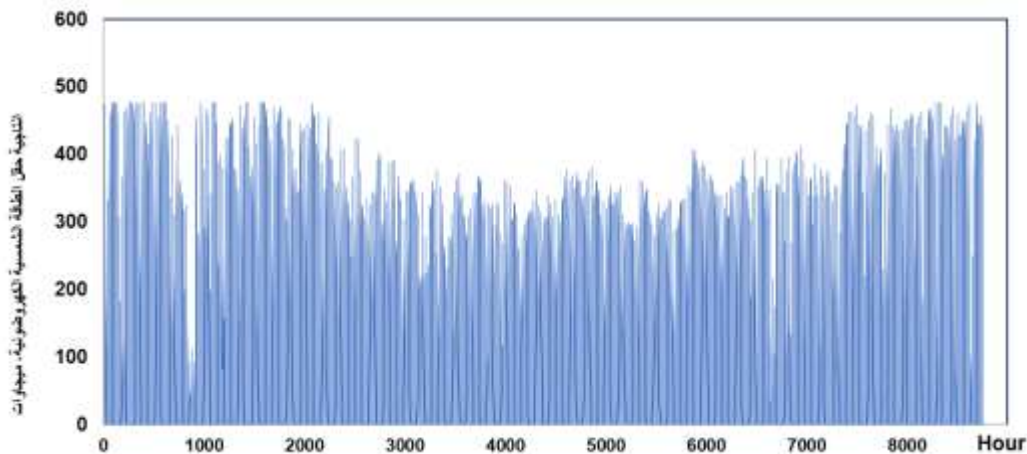
تحديد حجم مكونات نظام

تم التمثيل والمحاكاة وتطبيق القيد والشروط المحددة مسبقاً باستخدام برنامج Microsoft Excel، وأظهرت النتائج أن توازن الطاقة في النظام وشرط استقرار النظام قد تحققا لحقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة تبلغ 625.5 ميغاوات ومطل كهربائي بقدرة تبلغ 337 ميغاوات وسعة خلايا الوقود حوالي 177 ميغاوات. كما تم حساب سعة خزان الهيدروجين حوالي 24285 متر مكعب عند ضغط 100 ميغا باسكال، وكما يتطلب محطة ضغط بقدرة 4.1 ميغاوات، وكذلك محطة تحلية مياه بسعة 111.4 متر مكعب.

السلوك الديناميكي للطاقة في نظام HRES

إنتاجية الطاقة في حقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية

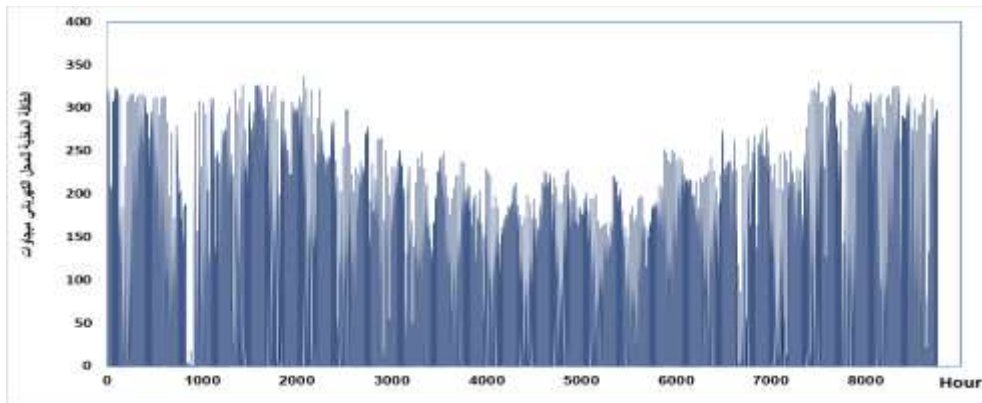
يبين الشكل (8) إنتاج الطاقة بالساعة في حقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الذي تبلغ قدرته 625.5 ميغاوات، والذي بلغ إنتاجه السنوي للطاقة يبلغ 987,168 ميغاوات ساعة. يبلغ متوسط إنتاجية الطاقة الكهروضوئية حوالي 112.7 ميغاوات ساعة، بينما تبلغ ذروة الإنتاجية حوالي 477 ميغاوات ساعة في الظروف المناخية الحقيقية. يلاحظ من خلال الشكل انخفاض في إنتاجية الطاقة خلال فصل الصيف التي يمكن أن تعزى إلى ارتفاع درجات الحرارة؛ مما يؤثر سلباً على أداء الألواح الشمسية كما هو واضح من المعادلة (1). توضح هذه النتائج الطبيعة المتقطعة لإنتاج الطاقة الشمسية؛ مما يؤكد على أهمية أنظمة تخزين الطاقة المتكاملة لضمان موثوقية الطاقة واستقرار النظام. يلاحظ كذلك من الشكل أن هناك فترات زمنية تغيب فيها إنتاجية الطاقة الشمسية أو تكون غير كافية لتزويد مكونات النظام بالطاقة الكهربائية؛ مما يستدعي تغطية الحمل عن طريق خلايا الوقود من خلال تحويل الهيدروجين المخزن في خزانات الضغط العالي إلى طاقة كهربائية. تدعم هذه النتائج الحجة الداعية إلى إضافة توليد الهيدروجين وتقنيات التخزين إلى بنية الطاقة الهجينة المقترحة، وهو ما سيتم التطرق إليه في الأقسام التالية.



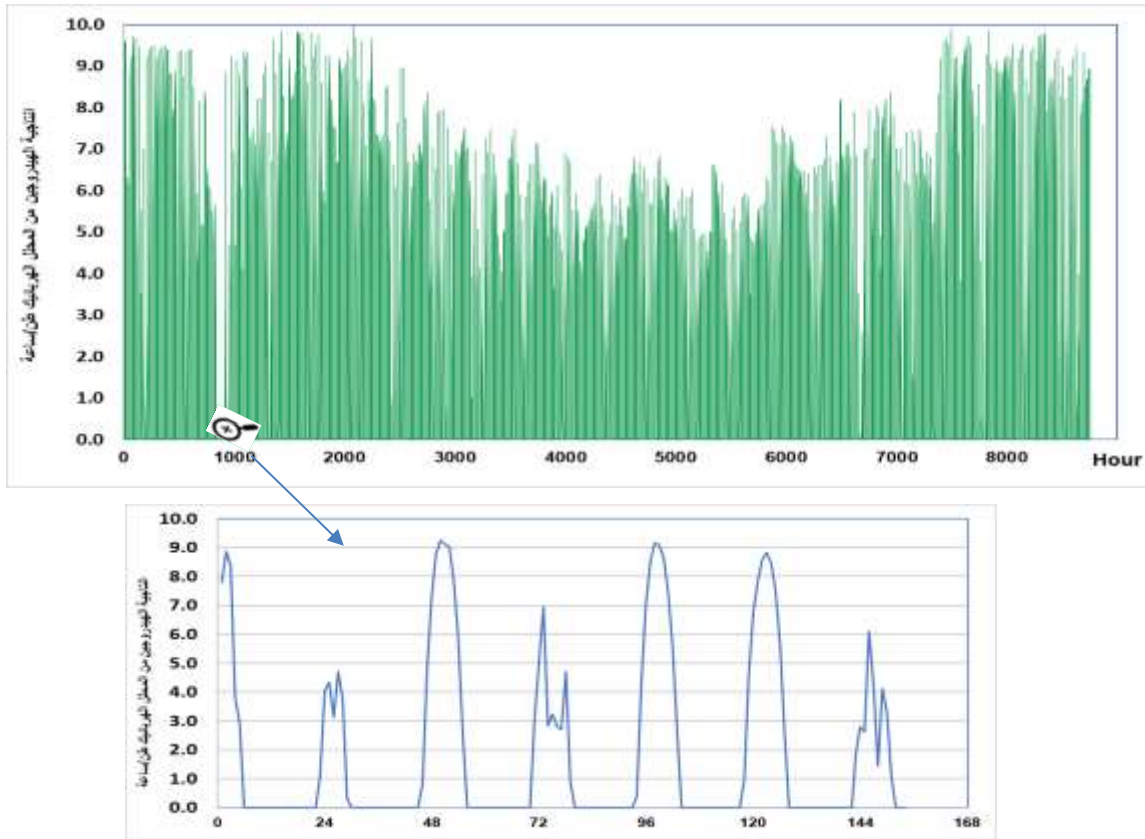
الشكل 8: إنتاجية الطاقة الساعية لحقل شمسي بسعة 625.5 ميغاوات

إنتاجية الهيدروجين من التحليل الكهربائي

يبين الشكل (9) كمية الهيدروجين المنتجة بالساعة من نظام تحليل كهربائي بقدرة 337 ميغاوات، والقادرة على إنتاج 10.1 طنًا من الهيدروجين في الساعة. يعمل جهاز التحليل الكهربائي في ظروف إمداد طاقة متغيرة ويرتبط ارتباطًا مباشرًا بحقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية الموصوف في القسم السابق. يشير الشكل كذلك إلى التغيرات الكبيرة في إنتاج الهيدروجين في الساعة بسبب طبيعة الطاقة الشمسية المتقطعة والمبين في الشكل (10) لإنتاجية اسبوع واحد، وخلال فترات الإشعاع الشمسي العالي والإنتاج الكهروضوئي الأقصى، يصل جهاز التحليل الكهربائي إلى ذروة إنتاجيته التي تبلغ حوالي 10.1 طنًا في الساعة؛ مما يشير إلى أن سعته المقدرة مستخدمة بالكامل. من جهة أخرى، وخلال الليل ينخفض الإشعاع الشمسي وبالتالي إنتاج الهيدروجين بشكل كبير أو يتوقف تمامًا، مما يدل على أن إنتاجية جهاز التحليل الكهربائي يعتمد بشكل أساسي على وجود فائض مصدر الطاقة الشمسية بعد تغذية الحمل حسب المنهجية المتبعة شكل رقم (1)، وهو ما يمكن ملاحظته مع نمط إنتاجية الطاقة الكهروضوئية المغذية لمحلل الكهربائي الشكل (9). تدعم هذه النتائج حجة الحاجة إلى تخزين الهيدروجين كحل مناسب للإمدادات الموثوقة والطويلة خصوصًا للأنظمة المعزولة عن الشبكة [107].



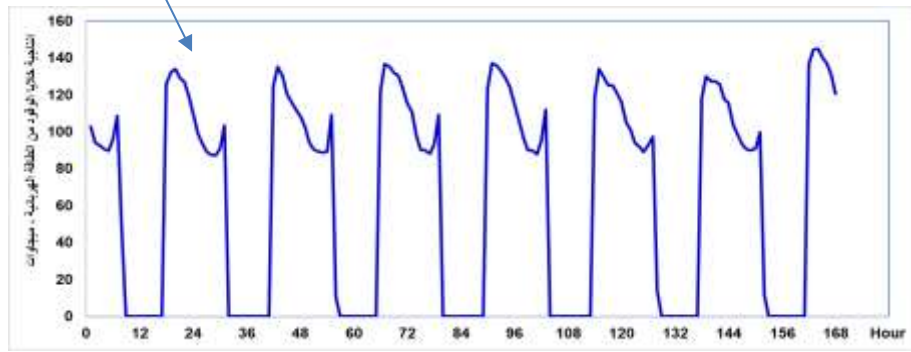
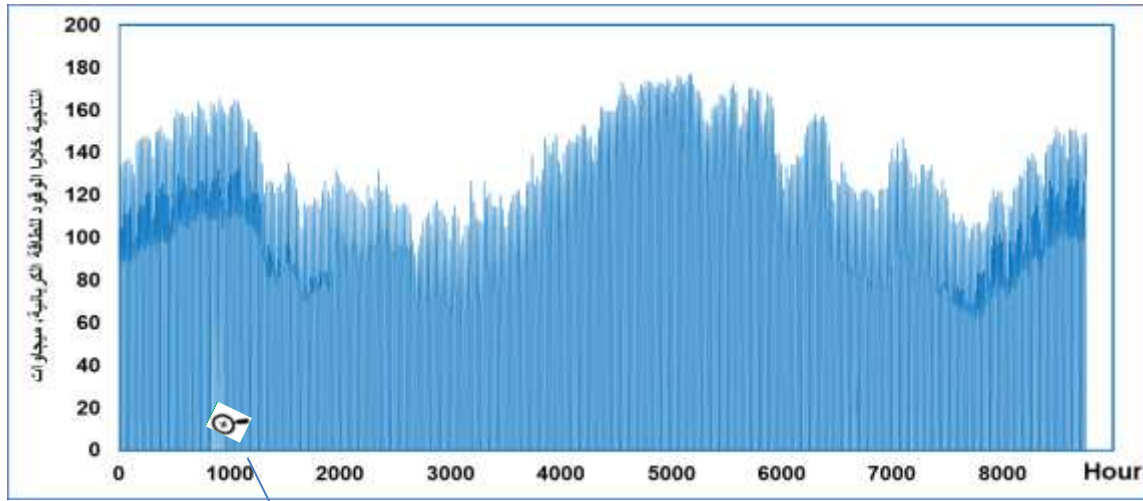
الشكل 9: الطاقة الكهربائية المغذية للمحلل الكهربائي.



الشكل 10: إنتاجية الهيدروجين من المحلل الكهربائي سعة 337 ميغاوات (10طن).

توليد الكهرباء من خلايا الوقود

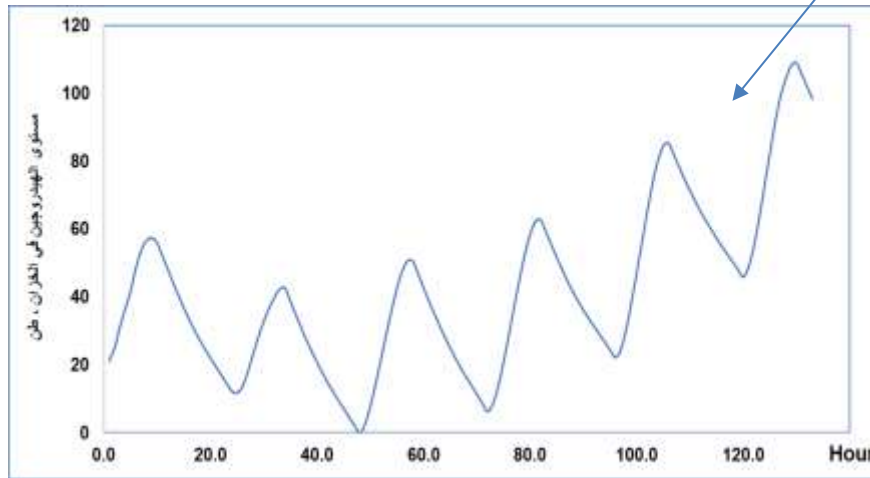
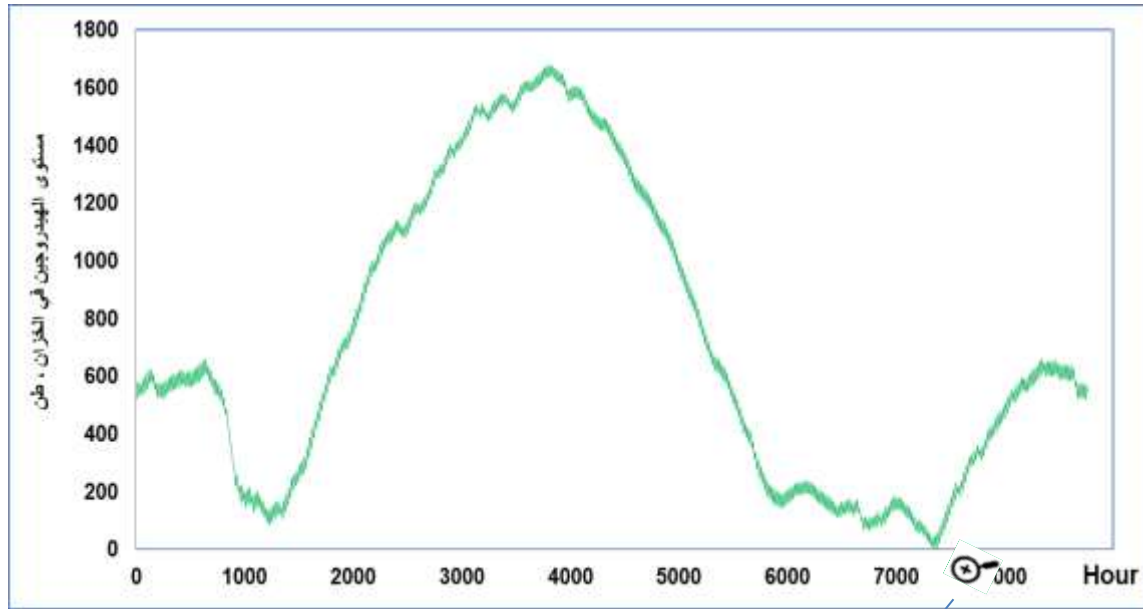
يشير الشكل (11) لمنحنى توليد الطاقة بواسطة خلايا وقود بقدرة 177 ميغاوات، واستهلاك هيدروجين يبلغ 5.3 طنًا في الساعة. تشير بيانات التوليد بالساعة ليوم واحد في الشكل (10) إلى أن إنتاج خلايا الوقود تعمل خلال ساعات الليل بسبب غياب إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الأمر الذي يعزز دور خلايا الوقود كمصدر طاقة لضمان الاستمرارية والموثوقية لأن خلايا الوقود تعتمد في إنتاجها على كمية الهيدروجين المضغوط في خزانات؛ مما يسمح باستقرار الإمدادات، ويسمح لخلايا الوقود أن تنتج طاقة ثابتة إلى حد ما على مدار العام [108]. تبرز هذه النتائج الأهمية الحاسمة لأنظمة خلايا الوقود وتخزين الهيدروجين المدمجة في تسريع الانتقال إلى البنى التحتية للطاقة المتجددة [109،110].



الشكل 11: الإنتاج للطاقة الكهربائية الساعي لخلايا الوقود سعة 177 ميغاوات.

مستوى الطاقة الديناميكي في خزان الهيدروجين

يوضح الشكل (11) السلوك الديناميكي لخزان الهيدروجين استجابةً لإنتاج الطاقة الشمسية المتقطع، مما يدعم النتائج الواردة في الأقسام 1.3.3, 2.3.3, 3.3.3. كما هو موضح في الشكل (8)، فإن حل الطاقة الشمسية الكهروضوئية في منطقة وادي الشاطي يتسم بتقلبات يومية وموسمية كبيرة، مما يؤدي إلى تغيرات في توليد الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي الشكل (9). تظهر هذه التقلبات بوضوح في الشكل (12)؛ حيث تنخفض مستويات تخزين الهيدروجين أولاً ثم تنمو بشكل مطرد خلال فترات طويلة من الإشعاع الشمسي العالي - لتصل إلى ذروتها قبل أن تتناقص تدريجياً. كذلك تنخفض مستويات التخزين وفقاً للطلب على الطاقة حيث يزداد مستوى الهيدروجين في الفترات التي تستطيع الألواح الشمسية تغطية الحمل، وتتناقص مع عدم قدرتها على تغطية الحمل وهو ما سيتم توضيحه لاحقاً. تسلط هذه النتائج الضوء على الحاجة إلى بنية تحتية قوية لتخزين الهيدروجين للحد من الطبيعة المتقطعة والمتأصلة في الأنظمة القائمة على الطاقة الكهروضوئية والحفاظ على توفر الكهرباء بشكل مستمر. يؤدي دمج تقنيات التخزين هذه إلى تحسين مرونة النظام وموثوقيته؛ مما يسمح للتطبيقات النهائية بالعمل بشكل مستمر حتى عندما يكون توليد الطاقة الشمسية محدوداً. تدعم هذه النتائج مجتمعة نهج الطاقة المتجددة وتقنيات التخزين سريعة الاستجابة لإنشاء شبكة كهرباء متوازنة ومرنة.

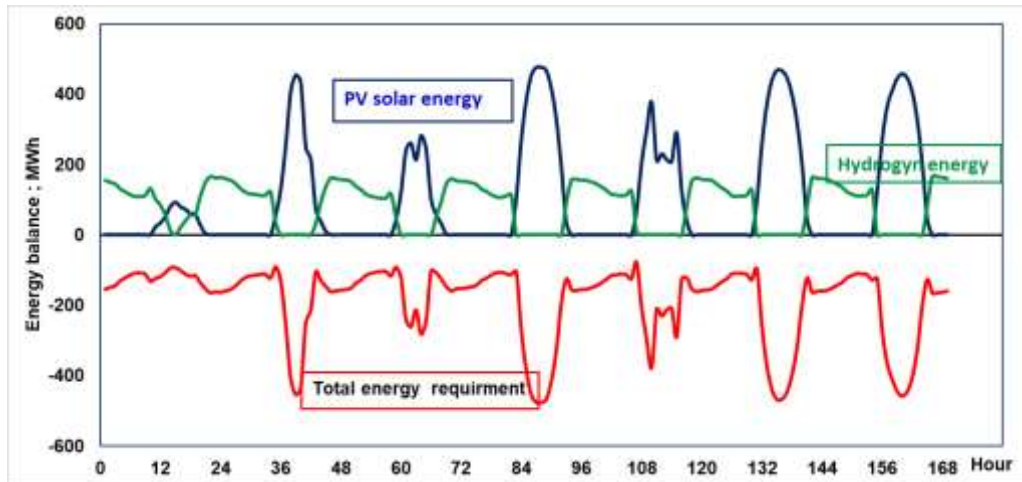
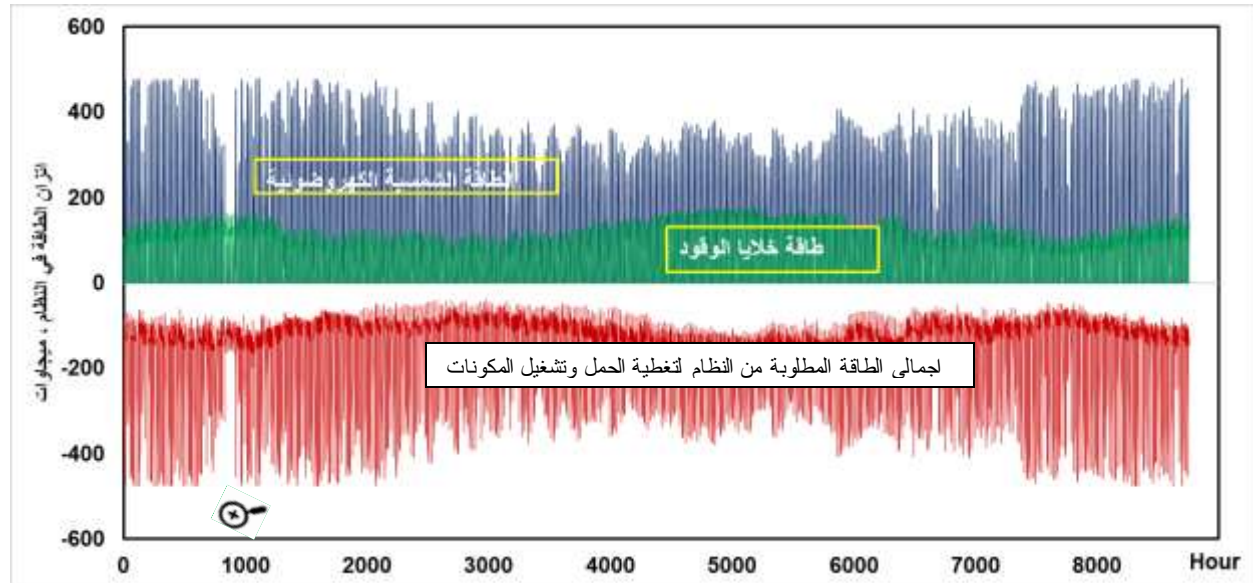


شكل 12: السلوك الديناميكي لخزان الهيدروجين ساعة 24285 متر مكعب عند ضغط 100 ميغا باسكال.

التوازن الكلي للطاقة في نظام الطاقة المتجددة المقترح

يظهر الشكل (13) رؤية شاملة للتوازن الكلي للطاقة في نظام الطاقة المتجددة المقترح على مدار عام كامل (حوالي 8760 ساعة). تستند هذه الأشكال إلى التحليلات السابقة (حقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية، جهاز التحليل الكهربائي، خلية الوقود) لتوضيح أداء النظام المتكامل واستقراره. كذلك يوضح الشكل التوازن الكلي للطاقة الدور المهيمن لحقل الطاقة الشمسية الكهروضوئية (المنطقة الزرقاء الفاتحة) باعتباره المدخل الرئيسي للطاقة، حيث يصل إلى ذروة مساهمته التي تصل إلى 477 ميغاوات خلال ساعات النهار. تمثل إجمالي متطلبات الطاقة (المنطقة الحمراء، القيم السالبة) الطلب على

الطاقة الذي يهدف النظام إلى تلبيةه. والجدير بالذكر أن هناك فائضًا ثابتًا في الطاقة الكهروضوئية خلال ساعات الذروة الشمسية، وهو أمر بالغ الأهمية لتخزين الطاقة.



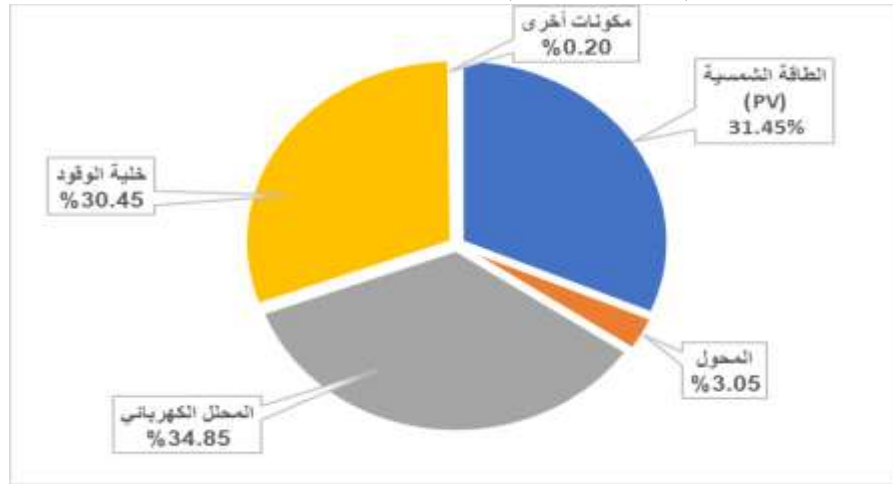
الشكل 13: التوازن الكلي للطاقة للنظام المقترح

ساهمت الطاقة الشمسية الكهروضوئية بنسبة 48% (283137 ميجاوات ساعة)، بينما ساهم خلايا الوقود في إنتاج 52% (306,836 ميجاوات ساعة) من الطاقة الكهربائية لتغطية الحمل المطلوب والبالغ 590,000 ميجاوات ساعة، وبلغ الفاقد (389,757 ميجاوات ساعة).

يتم تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية من خلال مزيج من الطاقة الكهروضوئية المباشرة، والكهرباء المولدة من خلايا الوقود، وتعكس التغيرات في الطلب على الطاقة الكهربائية أنماط الاستهلاك المتقلبة على مدار العام. وتؤكد قدرة مكونات طاقة الهيدروجين على تعويض العجز مما يعزز فعالية النظام على تحقيق إمدادات كهربائية أكثر موثوقية واستقرارًا، والتغلب

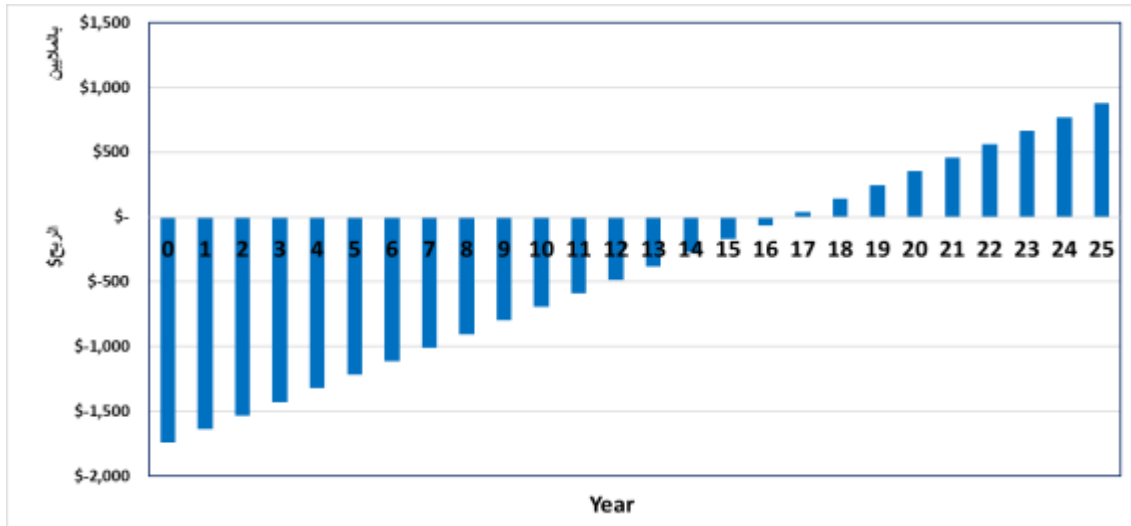
على التقطع المتأصل في الموارد الشمسية. وتوضح هذه الأرقام مجتمعة كيف يستفيد النظام من تحقيق التوازن بين العرض والطلب على مدار دورة سنوية. الجوانب الاقتصادية والبيئية

تظهر نتائج التحليل الاقتصادي ان النظام المقترح ممكن وفعال مع تكلفة مستوية (LCOE) 338 دولار/ميغاوات وفترة استرداد 16.64 سنة، والمساهمة في منع انبعاث 611,849 طن ثاني أكسيد كربون في السنة، وهو ما يتفق مع أغلب الدراسات الواردة في المقدمة، والشكل (13) يظهر أن مكونات نظام الهيدروجين تشكل النسب الأكبر من التكاليف الرأسمالية للنظام التي تقترب من 65% من إجمالي التكاليف الرأسمالية للنظام، الأمر الذي يشير إلى أهمية تكاليف مكونات نظام الهيدروجين وبالخص المحل الكهربائي وخلايا الوقود في تحديد سعر الطاقة.



شكل 13 النسبة المئوية لتكاليف الرأسمالية لمكونات النظام المقترح

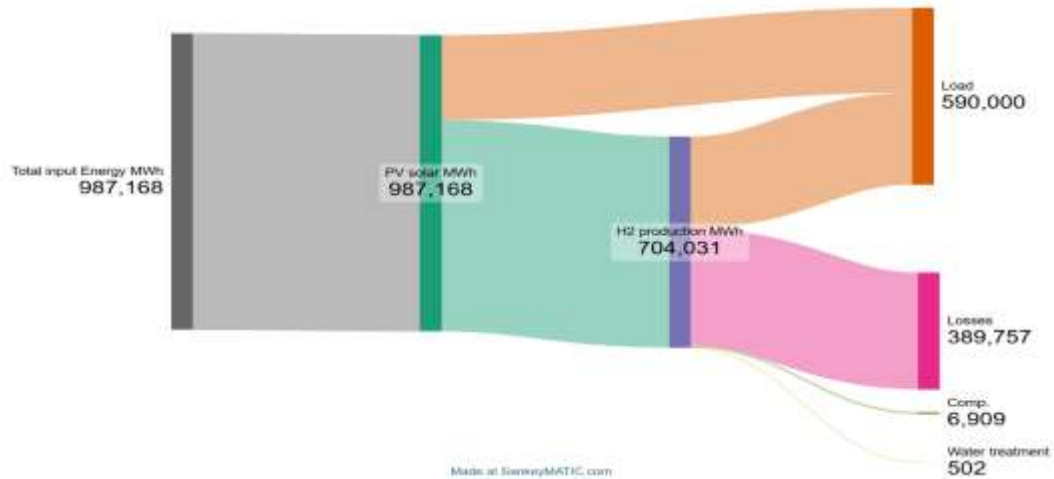
يظهر الشكل (14) مخطط التدفقات النقدية الصافية للنظام المقترح التي تظهر التحول من الخسارة إلى الربح عبر فترة استرداد رأس المال المخصص بعد 16.64 سنة، ونلاحظ من الشكل أن صافي القيمة الحالية (NPV) صفر عند أخذ معدل الفائدة الحقيقي في الاعتبار، ويلاحظ أن حجم الألواح الشمسية أكبر ب 1.9 مرة من حجم المحل ربما يكون أحد أسباب ارتفاع التكلفة المستوية للطاقة (LCOE)، وفي هذه الدراسة توصل البحث إلى أن حجم منظومة الألواح الشمسية يجب أن يكون أكبر من 2.63 مرة من حجم المحل الكهربائي للحصول على أقل تكلفة مستوية.



شكل 14 مخطط التدفقات النقدية الصافي للنظام المقترح عند سعر بيع 337 دولار/ميجاوات

تحليل تدفق الطاقة

يقدم الشكل 14 توازن الطاقة للنظام بأكمله من خلال مخطط سانكي، الذي يرسم خريطة بصرية لتدفق الطاقة لمكونات النظام على أساس سنوي. يبين هذا المخطط بشكل فعال الترابطات وتحويلات الطاقة داخل النظام، من مدخلات الطاقة المتجددة إلى مختلف المخرجات والخسائر. يوضح المخطط بوضوح أن الطاقة المتجددة هي المدخلات الأولية، بإجمالي 9871683 ميجاوات ساعة. من مصدرها الأساسي الطاقة الشمسية الكهروضوئية، يتم توجيه 283137 من الطاقة الشمسية الكهروضوئية مباشرة إلى تغذية الحمل، وتوجيه 704,031 ميجاوات ساعة الي منظومة توليد الهيدروجين التي تذهب لتغطية الحمل المتبقي نتيجة الطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية كما تم ذكره في السابق ويبلغ الحمل حوالي 590,000 ميجاوات ساعة، وقد بلغ الفقد من النظام 389,757 ميجاوات ساعة.



شكل 14: تحليل تدفق الطاقة للنظام المقترح

الاستنتاجات

بينت هذه الدراسة الدور الحيوي الذي يمكن أن تلعبه موارد الطاقة الشمسية المتوفرة في المنطقة، والمدمجة مع تقنيات إنتاج الهيدروجين في تغطية الاحمال الكهربائية خارج الشبكة، وبشكل فعال وموثوق، وقد بينت النتائج أن النظام المقترح يتكون من حقل للألواح الشمسية الكهروضوئية بقدرة 625.5 ميغاوات، وخلية وقود بقدرة 177 ميغاوات، ومحلل كهربائي بقدرة 337 ميغاوات، وخزان هيدروجين بسعة 24,285 متر مكعب. ومحطة تحلية مياه بقدرة إنتاجية 186,000 متر مكعب في الساعة وبقدرة 400 كيلووات، وكذلك محطة ضغط الهيدروجين بقدرة 4.1 ميغاوات، وأظهرت النتائج أن استخدام أنظمة تخزين الهيدروجين ساهمت بفاعلية في معالجة النقص والتذبذب في إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية، والاستفادة القصوى من فائض الطاقة الشمسية. كما وأظهرت النتائج أن النظام المقترح قادر على تغطية الحمل بالكامل بتكلفة مستوية (LCOE) 338 دولار/ميغاوات، وأن هذه القيمة تقع ضمن حدود القيم المتعارف عليها في الأبحاث العلمية والغير متصلة بالشبكة العامة، بتكلفة استثمارية قدرها 1,742 مليون دولار، وأن فترة استرداد رأس المال (PBP) 16.64 سنة، ومن الناحية البيئية ينبت النتائج أن هذا النظام يساهم في الحد من الانبعاثات، ويمنع سنويا 611849 طن من ثاني أكسيد الكربون. تعكس هذه الدراسة الضوء على إمكانات أنظمة الطاقة شمسية كهروضوئية في ليبيا وشمال إفريقيا، والذي يتماشى مع الخطط الاستراتيجية للدولة في التحول الي الطاقات المتجددة وخفض التلوث، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، وفي ضوء هذه النتائج نوصي بإجراء المزيد من الدراسات حول إمكانية دمج مصادر طاقات متجددة أخرى، وإجراء تحليل حساسية لمعاملات المنظومة خصوصا الكفاءة والتكاليف الرأسمالية بما يساهم في تعزيز الجدوى الفنية الاقتصادية والبيئية.

References

- [1] Moumani, K. 2023. Management of sustainable development in the light of Arab and international cooperation, a case study of the Arab vision of management of sustainable development. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 1(1):1-8.
- [2] Nassar, Y., et al. 2024. Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability. Renewable Energy Focus. 49: 1–10.
- [3] 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. 2: 22–27.
- [4] Ali, A. et al. 2024. A Comparative Study of Gamma Radiation Shielding Parameters for Sodium Silicate Glass Containing Bismuth, Barium and Lead Oxide in the Energy Range (0.6–1.5 MeV). Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3: 15–22.
- [5] El-Khozondar, H. J. 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.
- [6] Al-Maghalseh, M. 2025. The Environmental Impact and Societal Conditions of PV Power Plants: A Case Study of Jericho Gate-Palestine. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(2): 16–31.
- [7] Abdullah, A. et al. 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.

- [8] Ben Dalla, L. O. et al. 2026. An IoT-Enabled, THD-Based Fault Detection and Predictive Maintenance Framework for Solar PV Systems in Harsh Climates. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1): 41–55.
- [9] Salem, M., et al. 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.
- [10] Mohammed, S. et al. 2025. Exploring Promised Sites for Establishing Hydropower Energy Storage Stations in Libya Using GIS. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1): 85–94.
- [11] Amer, K. et al. 2025. Economic-Environmental-Energetic (3E) Analysis of Photovoltaic Solar Energy Systems: Case Study of Mechanical & Renewable Energy Engineering Departments at Wadi AlShatti University. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1): 51–58.
- [12] Aqila, A. et al. 2025. Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Battery) Under Real Climatic Conditions: Case Study of Samno Village–Southern Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1): 168–181.
- [13] 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*.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Abuqila, M. et al. 2025. Estimation of the Storage Capacity of Electric Vehicle Batteries under Real Weather and Drive-mode Conditions. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1): 58–71.
- [17] Salim, E. et al. 2025. A Brief Overview of Hybrid Renewable Energy Systems and 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.
- [18] 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.
- [19] Inweer, M. et al. 2025. Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(2): 162–173.
- [20] Almhdi, E. et al. 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.

- [21] Ahmed, B. et al. 2026. Optimal Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/PHS) Under Multiple Grid Connection Constraints. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1): 83–93.
- [22] Ahmad, S. et al. 2025. The Impact of Loss of Power Supply Probability on Design and Performance of Wind/Pumped Hydropower Hybrid System. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(2): 52–62.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Elmariami, A., et al. 2023. Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya. *Applied Solar Energy*. 59(1): 64–78.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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
- [31] Beswick, R. et al. 2021. Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem? *ACS Energy Letters*. 6(9): 3167–3169.
- [32] Affandi, N. et al. 2024. Green Hydrogen-Solar Photovoltaic System Hybrid: Life Cycle Assessment and Potential Application in Malaysia and Thailand. *International Journal of Hydrogen Energy*. 110: 32–43.
- [33] Algburi, S. et al. 2025. The Green Hydrogen Role in the Global Energy Transformations. *Renewable and Sustainable Energy Transition*. 8: 100118.
- [34] Rekik, S., and El Alimi, S. 2024. A spatial ranking of optimal sites for solar-driven green hydrogen production using GIS and multi-criteria decision-making approach: A case of Tunisia. *Energy Exploration & Exploitation* 42 (6): 2150-2190.
- [35] Rekik, S. 2024. Optimizing green hydrogen strategies in Tunisia: A combined SWOT-MCDM approach. *Scientific African* 26: e02438.
- [36] M Khaleel, Z Yusupov, S Rekik. 2025. Advancing hydrogen as a key driver for decarbonized power systems. *Unconventional Resources*, 100278.

- [37] Rekik, S., and El Alimi, S. 2024. Solar-powered hydrogen potential in Tunisia: A spatio-techno-economic analysis. 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence & Green Energy.
- [38] 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
- [39] Abdulllah, 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.
- [40] Elnaggar, M., Salah, W., El-Khozondar, H., Fathi, N., and Bashir, M. 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.
- [41] Khaleel, M., et al. 2024. Towards Hydrogen Sector Investments for Achieving Sustainable Electricity Generation. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 13 (1): 71-96.
- [42] Alnadhif, M., et al. 2026. Technical-Economic-Energetic-Environmental Analysis of a PV-Wind-Biomass-Hydrogen Hybrid Energy System for Urban Zones. Unpublished.
- [43] 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*. Unpublished.
- [44] Hussam, W. et al. 2024. Techno-economic Analysis and Optimization of Hydrogen Production from Renewable Hybrid Energy Systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 58: 56–68.
- [45] Rasool, M. et al. 2024. Comprehensive Techno-economic Analysis of a Standalone Renewable Energy System for Hydrogen Generation and Electrical Load Management. *Energy Reports*. 11: 6255–6274.
- [46] Al Makky, A. et al. 2025. Techno-economic Feasibility of Green Hydrogen Production Using Hybrid Solar-Wind Systems in Oman. *International Journal of Thermofluids*. 28: 101302.
- [47] Ghenai, C. et al. 2020. Technico-economic Analysis of Off-Grid Solar PV/Fuel Cell Energy System for Residential Community in Desert Region. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(20): 11460–11470.
- [48] Rahul, U., et al. 2023. Techno-economic Analysis of Green Hydrogen as an Energy-Storage Medium for Commercial Buildings. *Clean Energy*. 7(1): 84–98.
- [49] Mohtasim, M. et al. 2025. Hybrid Renewable Multi-generation System Optimization: Attaining Sustainable Development Goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 212: 115415.
- [50] Turkdogan, S. 2021. Design and Optimization of a Renewable Based Hybrid Energy System for Residential Electrical Load and Fuel Cell Electric Vehicle. *Engineering Science and Technology*. 24(2): 397–404.

- [51] Lopez, V., et al. 2023. Maximization of PV Energy Use and Performance Analysis of a Stand-Alone PV-Hydrogen System. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48(99): 39298–39314.
- [52] Yosaf, S. et al. 2024. Thermo-economic Assessment of Green Hydrogen Production via PV-PEM Electrolyzer: Case Study of Al-Jufra Region, Libya. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 13(1): 57–70.
- [53] Bassam, A. et al. 2025. Green Hydrogen Production in Libya: Opportunities for Harnessing Solar Energy. *Journal of Scientific and Human Dimensions*. 1(2): 161–172.
- [54] 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.
- [55] El-Khozondar, 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): 142-151.
- [56] Imbah, I., et al. 2025. Design of a PV solar-covered parking system for the college of renewable energy Tajoura, Libya: A PV-syst-based performance analysis. *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*. 3(2): 288-307.
- [57] El-Khozondar, H., et al. 2025. Sustainable street lighting in Gaza: Solar energy solutions for main street. *Energy* 360. 4(12): 100042.
- [58] Fathi, Y. 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
- [59] Latiwash, I. et al. 2025. Performance Analysis and Sizing Optimization of Utility-Scale PV/Battery Storage System for Urban Zones. *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*. 3(2): 261–275.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Alsadi, S., El-Khozondar, H., and Refaat, S. 2022. Determination of the Most Accurate Horizontal to Tilted Sky-Diffuse Solar Irradiance Transposition Model for the Capital Cities in MENA Region. *2022 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, Doha, Qatar, 1-6.
- [65] 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.

- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] Aqila, A., Fathi, Y., and Hala, J. 2025. Determining the Least Risky Solar Radiation Transposition Model for Estimating Global Inclined Solar Irradiation. *Solar Energy and Sustainable Development Journal* 14 ((FICTS-2024)). 1-16.
- [69] Fathi, N., et al. 2022. Investigating the Applicability of Horizontal to Tilted Sky-Diffuse Solar Irradiation Transposition Models for Key Libyan Cities. 2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA), Sabratha, Libya, 2022, pp. 9-14.
- [70] Fathi, N., et al. 2023. Atlas of Solar (PV and CSP) and Wind Energy Technologies in Libya. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*. 1(3): 27-43.
- [71] Fathi, N. et al. 2022. Mapping of PV Solar Module Technologies Across Libyan Territory. *Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies*. pp. 227–232.
- [72] Miskeen, G., et al. 2022. Atlas of PV solar systems across Libyan territory. *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Istanbul, Turkey.
- [73] Albuzaia, D., Ali, A., Mohamed, M., and Hafez, A. 2025. Reliable and Robust Optimal Interleaved Boost Converter Interfacing PhotoVoltaic Generator. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2): 192-201.
- [74] Mremi, W., Al-Mathnani, A., and Alfathi, S. 2026. Harmonic Distortion in Three-Phase Networks Using a 24-Pulse STATCOM: Modeling, Simulation, and Performance Evaluation. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1): 122-130.
- [75] 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.
- [76] Mekonnin, A. et al. 2025. Hydrogen Storage Technology and Its Challenges: A Review. *Catalysts*. 15(3): 260.
- [77] Oyewole, O. et al. 2024. Optimal Design of Hydrogen-Based Storage with Hybrid Renewable Energy System Considering Economic and Environmental Uncertainties. *Energy Conversion and Management*. 300: 117991.
- [78] Qasem, N. et al. 2024. Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types and Applications. *International Journal of Energy Research*. 2024: 7271748.
- [79] 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.
- [80] H2Tools. 2024. Hydrogen Density at Different Temperatures and Pressures. *Hydrogen Tools Database*.
- [81] Kumar, P. et al. 2024. Freshwater Supply for Hydrogen Production: An Underestimated Challenge. *International Journal of Hydrogen Energy*. 78: 202–217.
- [82] Bianco, E., et al. 2023. Water for Hydrogen Production. *Energy Report Publication*.

- [83] Elnaggar, M., et al., "Design of a solar thermal powered system for electricity generation and water desalination," 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), Gaza, Palestine, State of, 2023, pp. 1-6,
- [84] Fadiel, A. et al. 2025. Desalination in Libya (2000-2025): A Strategic Review of Technological Evolution, Institutional Challenges and Pathways toward Water Security (October 01, 2025).
- [85] Elmnifi, M., et al. 2023. Induction Heating for Residential Water Desalination: A Numerical Simulation and Experimental Evaluation. *International Journal of Heat and Technology*. 41 (6): 1433-1440.
- [86] H. J. El-Khozondar, et al. 2023. Linear Fresnel collector (LFC) for enhancing solar water desalination process. 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), Gaza, Palestine, State of, 1-6,
- [87] Yasser, F., Yousif, S., and Salem, A. 2007. The second generation of the solar desalination systems. *Desalination*. 209(1-3): 177-181.
- [88] Kong, S. et al. 2024. Acid-Stable Manganese Oxides for Proton Exchange Membrane Water Electrolysis. *Nature Catalysis*. 7(3): 252–261.
- [89] El-Shafie, M. et al. 2019. Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*. 7(1): 107–154.
- [90] Ahmed, B., et al., et al. 2025. Technical, economical and environmental aspects of hybrid renewable energy systems. *Scientific Journal for Publishing in Health Research and Technology*, 01-17
- [91] Hala, J., EL-Khozondar, R., and El-Batta, F. 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.
- [92] Abuhelwa, M., Elnaggar, M., Salah, W., and Bashir, M. 2025. Exploring the Prevalence of Renewable Energy Practices and Awareness Levels in Palestine. *Energy Science & Engineering*. 13(3): 1292-1305.
- [93] 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.
- [94] Elmnifi, M., et al. 2025. Solar and Wind Energy Generation Systems with Pumped Hydro Energy: City of Derna. *Proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management*.
- [95] Mohammed, S., et al. 2025. Exploring Optimum Sites for Exploitation Hydropower Energy Storage Stations (PHES) Using the Geographic Information Systems (GIS) in Libya. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 14(1): 394-409.
- [96] Yakymchuk, A. et al. 2025. Economic Analysis of Fossil CO₂ Emissions: European Perspective on Sustainable Development. *Energies*. 18(8): 2106.
- [97] Kabeyi, M. et al. 2023. Levelized Cost of Energy and Modifications for Electricity Generation Planning. *Energy Reports*. 9: 495–534.
- [98] Fathi, N. et al. 2019. Assessment of Solar Energy Potential in Gaza Strip-Palestine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 31: 318–328.
- [99] Stolarski, J. et al. 2024. Economic Analysis of Renewable Energy Generation from Multi-Energy Installation in a Single-Family House. *Energies*. 17(24): 6213.
- [100] Roy, T. 2026. Techno-economic and Environmental Assessment of Green Hydrogen Production in Australian Regions. *Renewable Energy*. 256.

- [101] Alharbi, A. et al. 2025. Comparative Techno-economic Optimization of Microgrid Configurations Using Hybrid Battery–Hydrogen Storage: NEOM Case Study. PLoS One. 20(9): e0326050.
- [102] Nassar, Y. et al. 2025. Estimation of CO₂ Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya. Solar Energy and Sustainable Development Journal. 14(1): 42–55.
- [103] Nassar, Y. et al. 2025. Estimation of CO₂ Emission within Libya’s Electricity Generation Sector. Next Research. 2(3): 100567.
- [104] 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.
- [105] Inweer, M., et al. 2025. Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya. Discov. Concr. Cem. 1: 37.
- [106] Aissa, K., and Alsadi, S. 2017. Estimation of Environmental Damage Costs from CO₂e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation. Low Carbon Economy. 8: 118-132.
- [107] Mekonnin, A. et al. 2025. Hydrogen Storage Technology and Its Challenges: A Review. Catalysts. 15(3): 260.
- [108] Staffell, I. et al. 2019. The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Global Energy System. Energy & Environmental Science. 12(2): 463–491.
- [109] Egeland, T. et al. 2021. Hydrogen-Based Systems for Integration of Renewable Energy in Power Systems: Achievements and Perspectives. International Journal of Hydrogen Energy. 46(63): 31963–31983.
- [110] 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.