

RESEARCH ARTICLE

RENEWABLE ENERGY

Optimal Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/PHS) Under Multiple Constraints of Connection to the Electricity Grid: A Case Study

Bishara M. Ahmed^{1*}  , Yasser F. Nassa¹  , Hala J. El-Khozondar²  , Mohamed M. Khaleel³  

¹Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

²Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College, London SW7 2AZ, UK

³Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk 78050, Turkey

ARTICLE HISTORY

Received 08 December 2025
Revised 11 January 2026
Accepted 15 January 2026
Online 17 January 2026

KEYWORDS

Solar Energy;
Wind Energy;
Hydropower;
Hybrid Energy Systems;
Electrical Loads;
Libya.

ABSTRACT

Libya faces a challenge in providing a secure and stable electricity supply. The deficit recorded in 2024 reached approximately 32.5%, forcing the General Electricity Company to resort to rationing, with power cuts lasting up to eight hours daily. The country's strategic vision aims to overcome this problem by transitioning to renewable energy sources and adopting decentralized generation systems. This approach is clearly embodied in the National Energy Strategy for the period 2025–2050, which aims to increase the share of renewable sources in the overall energy mix to more than 50% by 2050. In this context, this research paper proposes the design of an integrated hybrid renewable energy system, combining photovoltaic cell and wind turbine technologies, supported by a pumped hydroelectric storage (PV/Wind/PHS) system. The study results showed that the ideal system configuration consists of a 1000 MW solar photovoltaic field and a 200 MW wind farm, integrated with an 854 MWh storage system. This system generates a total annual energy output of approximately 1515.761 GWh, fully covering the current electricity deficit estimated at around 15575 MWh. The system also injects energy into the national grid, adhering to the grid's protocol, which stipulates that no energy is drawn from the grid during a deficit and no energy is exported to it during a saturated period, and vice versa. The optimized design achieves 100% sustainable load supply and records the lowest levelized power cost of \$49.9/MWh. The project cost is estimated at approximately \$19.923 billion, with a payback period of 11.10 years. The proposed system also contributed to reducing carbon emissions by 11,624 kilotons, saving an estimated \$816.246 million in emissions-related social costs, in addition to an estimated \$2.189 billion in savings resulting from reduced conventional fuel consumption.

التصميم المثالي لمنظومات الطاقات المتجددة الهجينة تحت قيود متعددة من الاتصال بشبكة الكهرباء (دراسة حالة خاصة)

بشارة محمد احمد^{1*}، ياسر فتحي نصار¹، هالة جارا الله الخزندار²، محمد محمد خليل³

المصطلحات المفتاحية	الملخص
الطاقة الشمسية طاقة الرياح الطاقة الكهرومائية منظومات الطاقات الهجينة الاحمال الكهربائية ليبيا	تواجه ليبيا تحدياً في امداد الطاقة الكهربائية الامن والمستقر، وبلغت نسبة العجز المسجلة عام 2024 نحو 32.5%، مما اضطر الشركة العامة للكهرباء إلى اللجوء لسياسة تقنين الإمداد بفترات قطع قد تصل إلى ثماني ساعات يومياً. تنهج الرؤية الاستراتيجية للدولة لتخطي هذه الإشكالية عبر التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة، وتبني اللامركزية في نظم التوليد. ويتجسد هذا التوجه جلياً في الاستراتيجية الوطنية للطاقة للفترة 2025–2050، التي تستهدف رفع حصة المصادر المتجددة في مزيج الطاقة الإجمالي إلى أكثر من 50% بحلول عام 2050. في هذا السياق، تقدم هذه الورقة البحثية اقتراحاً لتصميم نظام هجين متكامل للطاقة المتجددة، يجمع بين تقنيي الخلايا الكهروضوئية، وتوربينات الرياح، مدعومة بنظام تخزين بواسطة الضخ الكهرومائي وأظهرت نتائج الدراسة أن التركيبة المثالية للنظام تتألف من حقل خلايا شمسية بسعة 1000 ميجاوات، ومزرعة رياح بقدرة 200 ميجاوات، مدمجا مع نظام تخزين بسعة 854 ميجاوات ساعة. يُنتج هذا النظام طاقة سنوية إجمالية تقدر بـ 1515.761 جيجاوات ساعة، تغطي بالكامل العجز الكهربائي الحالي المقدّر بحوالي 15575 ميجاوات/ساعة. كما وتم حقن الشبكة العامة للكهرباء بطاقة قدرها مع الالتزام ببروتوكول الشبكة الكهربائية والذي ينص على عدم الطلب من الشبكة في حالة العجز وعدم التصدير إليها في حالة تشبع الشبكة والعكس صحيح. حقق التصميم الأمثل امداد مستدام 100% للحمل، كما وسجل التصميم أدنى قيمة لتكلفة إنتاج الطاقة المستوية 49.9 دولار/ميجاوات ساعة، وقدرت تكلفة المشروع حوالي 19.923 مليار دولار، مع فترة استرداد تبلغ 11.10 سنة. كما اسهم النظام المقترح في خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 11,624 كيلوطن، مما يوفر ما يقدر بحوالي 816.246 مليون دولار من التكاليف الاجتماعية المرتبطة بالانبعاثات، بالإضافة إلى توفير ما يُقدّر بحوالي 2,189 مليون دولار ناتجة عن خفض استهلاك الوقود التقليدي.

*Corresponding author

https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_09

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0).



محليا، يوجد الكثير من الدراسات التي أجريت على الأنظمة الهجينة للطاقة المتجددة المتصلة مع (PHS) [19-29]. عرض Elsadik et al. [19] منهجية لتحديد الحجم الأمثل لنظام طاقة كهروضوئية مدمج مع تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ، وذلك لضمان إمدادات طاقة مستدامة لمدينة براك، ليبيا. يتكون النظام المقترح من 55 ميغاوات من الخلايا الكهروضوئية و775 ميغاوات ساعة من سعة PHS، مما يولد طاقة كافية لتلبية الحمل السنوي للمدينة والمقدر بحوالي 55,515 ميغاوات ساعة. وقد قدرت تكلفة النظام بحوالي 665.8 مليون دولار أمريكي. وبلغت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (LCOE) 132.5 دولار أمريكي لكل ميغاوات ساعة. كما وبحول النظام المقترح من انبعاث ما قيمته 111 طنا من ثاني أكسيد الكربون في السنة.

قدمت دراسة قام بها Ahmed et al. [20] تصميمًا وتحليلًا لمنظومة طاقة متجددة تتكون من 432 ميغاوات مزرعة توربينات رياح وحوالي 10782 ميغاوات ساعة من PHS. تولد المنظومة المقترحة طاقة كافية لتغطية حمل يقدر بحوالي 590 ميغاوات ساعة. وقد بلغت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (LCOE) 156.12 دولار أمريكي لكل ميغاوات ساعة. والنظام المقترح يقلل من انبعاث ما قيمته 611.85 طنا من ثاني أكسيد الكربون.

اقترح Nassar et al. [21] نظامًا هجينًا يجمع بين 1 ميغاوات من الطاقة الشمسية و3 ميغاوات من طاقة الرياح مع 63.510 ميغاوات ساعة من الطاقة الكهرومائية المخزنة (PHS) لتغطية حمل سنوي لحرم جامعي في مدينة براك الشاطئ والبالغ 6,137 ميغاوات ساعة، حيث أنتج النظام 9,342 ميغاوات ساعة سنويًا. ويتطلب الاستثمارات في هذا المشروع 10.5 مليون دولار وكانت LCOE المقدرة 13.2 سنًا/كيلووات ساعة. يمكن للنظام المقترح أن يوفر سنويًا حوالي 4,385 طنًا من CO₂ وحوالي 20,700 طن من وقود الديزل أو 1.48 مليون متر مكعب من الغاز الطبيعي.

كما قام Mohammed, et al. [22] بمسح للأراضي الليبية باستخدام GIS بحثًا عن المواقع المناسبة لإنشاء محطات PHS. وبينت الدراسة أن حوالي 10% من الأراضي الليبية تعتبر مناسبة للاستثمار في محطات ضخ المياه. وبشكل عام، يقدم هذا البحث نموذجًا كميًا يدعم الجدوى الفنية والاقتصادية والبيئية لاعتماد أنظمة الطاقة الهجينة واسعة النطاق في ليبيا، مما يسهم في تعزيز أمن الطاقة والاستدامة البيئية على المدى الطويل.

منهجية البحث

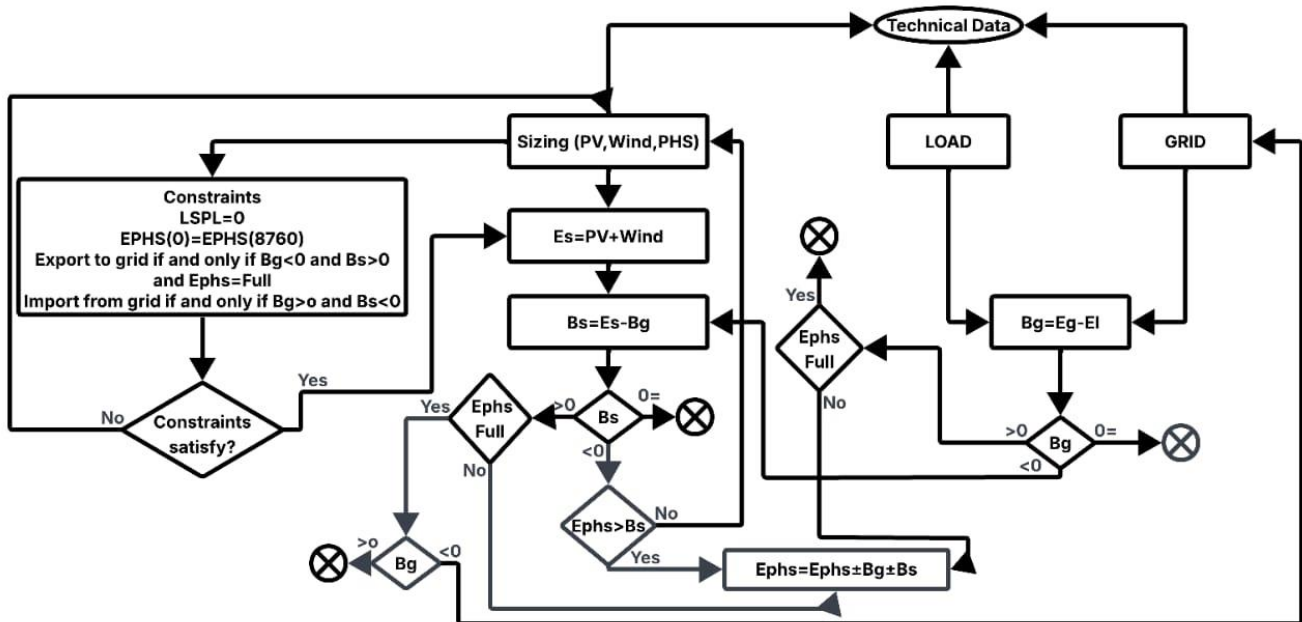
تناول هذا القسم المنهجية المتبعة لتحقيق أهداف البحث. حيث تم تحديد البيانات اللازمة للتحليل، والتي تشمل: البيانات المناخية، والبيانات التقنية والاقتصادية لمعدات المنظومة المقترحة، والاحمال الكهربائية، والبيانات البيئية. وباستخدام برنامج (SAM) تم الحصول على انتاجية حقل خلايا شمسية ومزرعة رياح بقدرة تحت الظروف المناخية الحقيقية لمدينة براك. يوضح الشكل (1) المخطط الانسيابي لعملية التشغيل والتحكم للمنظومة المقترحة، بما في ذلك ربط الشبكة العامة للكهرباء ومستوى الطاقة في نظام التخزين (PHS)، ثم التحقق ما اذا كانت القيود مستوفاة؟. اذا تم استيفاء القيود تنتقل العملية الى تحديد حجم الطاقة المنتجة من (PV/Wind) بالاضافة الى حساب الطاقة المستوردة من الشبكة. بعد ذلك، يتم حساب الفرق بين الطاقة المنتجة والمستوردة ومقارنتها بقيم أخرى مثل حالة تخزين الطاقة في النظام (PHS). اذا كان النظام ممتلئًا، يتم اتخاذ اجراءات معينة، اذا لم يكن النظام ممتلئًا، يتم تعديل تدفق الطاقة. اخيرا،

يشهد العالم تحولًا بيئيًا ملحوظًا نحو مصادر الطاقة المتجددة، حيث بلغت السعات المركبة من هذه الطاقات في نهاية 2024 نحو 4,448 GW، حيث بلغت مساهمة الطاقة الشمسية بحوالي 2,200 GW، بينما بلغت مساهمة طاقة الرياح 1,136 GW، كما بلغت الطاقة المولدة من الطاقة الكهرومائية حوالي 1,283 GW، اما السعات التخزينية المركبة من PHS فبلغت حوالي 189 جيجاوات، وبهذا تكون نسبة مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة العالمي تتعدى 30% [2,1]. تتزايد المحاولات في جميع أنحاء العالم لتصميم محطات كبيرة لتوليد الطاقة الكهربائية عبر أنظمة طاقة هجينة بديلة وربطها بشبكة الكهرباء العامة بهدف تقليل الانبعاثات أو تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري أو تغطية العجز في نظام التوليد (كما هو الحال في ليبيا). وقد أعلنت الحكومة الليبية عن نيتها في دمج الطاقات المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، في مزيج الطاقة ليتجاوز إجمالي الطاقة المتولدة في ليبيا 50% بحلول عام 2050 [3]. من هنا تأتي أهمية هذه الدراسة، كونها تجسد استراتيجية الدولة الليبية وتنشئ قاعدة بيانات متخصصة في إمكانيات الدولة في إنتاج الطاقة بواسطة (PV/Wind/PHS). تشير الدراسات إلى أن اقتران مصادر الطاقة المتجددة، مع أو بدون أنظمة تخزين الطاقة، في شبكات الكهرباء العامة ينمو بسرعة [4]. وقد وثّق العديد من الباحثين حالة التقنيات الحالية واتجاهات تخزين الطاقة في سياق الرؤى الاقتصادية والبيئية [4-15].

أبرزت دراسة Blakers et al. دور (PHS) في دعم الطاقة الكهربائية المتجددة. ووجدت الدراسة أنه يوجد حوالي 22,000 موقعًا للطاقة الكهرومائية خارج الأنهار في أستراليا، مع إمكانيات تخزين طاقة تصل إلى 67 تيراوات ساعة. وأظهرت النمذجة الاقتصادية لنظام الكهرباء الذي يعتمد على 100% من الطاقة المتجددة في أستراليا أن تكلفة إنتاج الكهرباء (LCOE) من الطاقة (PV/Wind/PHS) هي فقط حوالي 20 \$/MWh [16].

طور Bogdanov et al. رؤية لنظام طاقة متكامل يعتمد على الطاقة المتجددة لأوروبا ومناطق روسيا ومنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. ناقشت الورقة أنظمة الطاقة التي تعتمد على 100% من الطاقة المتجددة، والتي يمكن بناؤها باستخدام تقنيات توليد الطاقة، والتخزين، والنقل الموجودة بالفعل في المناطق المحلية. وأظهرت الدراسة أن التكلفة الإجمالية للطاقة (LCOE) تصل إلى 50 يورو لكل ميغاوات ساعة، وتم تحديد سعة الطاقة الشمسية بحوالي 1350 جيجاوات، وطاقة الرياح بـ 1406 جيجاوات، وطاقة الكتلة الحيوية بـ 281 جيجاوات، وطاقة الكهرومائية بـ 316 جيجاوات، بينما بلغ التخزين 1,495 جيجاوات ساعة للطاقة الكهرومائية المخزنة (PHS)، و1,317 جيجاوات ساعة للبطاريات، و630 جيجاوات ساعة لتخزين الهواء المضغوط [17].

في إسبانيا، قيم Naval et al. نظامًا للطاقة الهجينة المتصلة بالشبكة لمدة عام كامل. تكون النظام من 396 ميغاوات من الطاقة الكهربائية للشبكة و860 ميغاوات من الطاقة الشمسية و465 ميغاوات من طاقة الرياح و5,750 ميغاوات ساعة من الطاقة الكهرومائية المخزنة (PHS). أظهرت النتائج أن دمج مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وPHS يقلل من تكلفة شراء الطاقة من سوق الكهرباء بنسبة تصل إلى 27% لتلبية الطلب على الكهرباء. كما أن نظام التخزين يمنع خطر فقد الطاقة [18].



الشكل 1: مخطط التحكم في تشغيل المنظومة تحت ظروف ربط مختلفة مع الشبكة

يتم التحقق من تدفق الطاقة بين النظام والشبكة بناء على القيود المحددة سواء كان ذلك يتضمن تصدير الطاقة أو استيرادها.

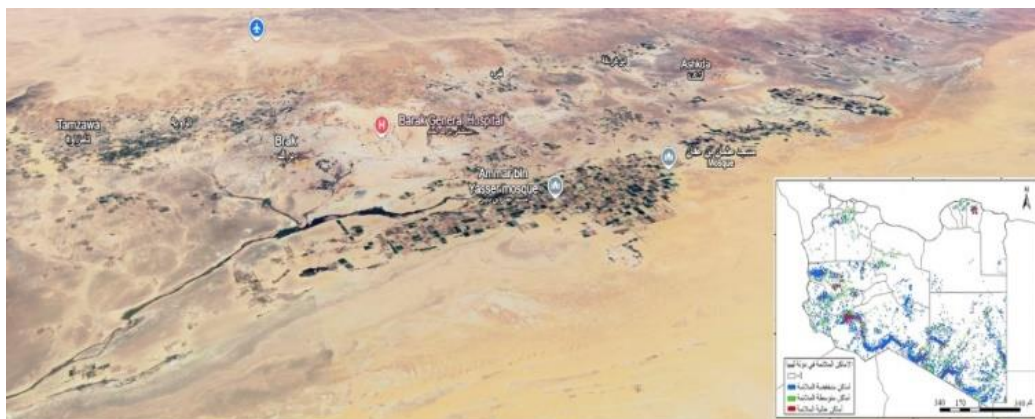
المعلومات الرئيسية عن موقع الدراسة

تم اعتماد مدينة براك حالة دراسية. تقع مدينة براك في الجنوب الغربي الليبي بين خطي طول وعرض $(27^{\circ}32'N, 14^{\circ}17'E)$. يمثل الشكل 2 صورة جوية للموقع تحت الدراسة مع خريطة ليبيا مبيّنة عليها الأماكن الواعدة لإنشاء محطات PHS [30]. تم اختيار الموقع بعناية ليتوافق مع الخصائص الطبوغرافية والظروف المناخية، بهدف إظهار الامكانيات والاستفادة من المصادر المختلفة المتوفرة في الموقع لتوليد طاقة نظيفة ومستدامة. يقع الموقع بالقرب من جبل بارتفاع 560 متراً عند الإحداثيات $E. 14.26, N27.54$. يمكن لهذا الموقع أن يكون قاعدة لإنشاء أول محطة تجريبية في ليبيا في المستقبل القريب. كما يمكن تطبيق هذا النموذج على جميع القرى التي تتمتع بطبوغرافيا مشابهة لمدينة براك.

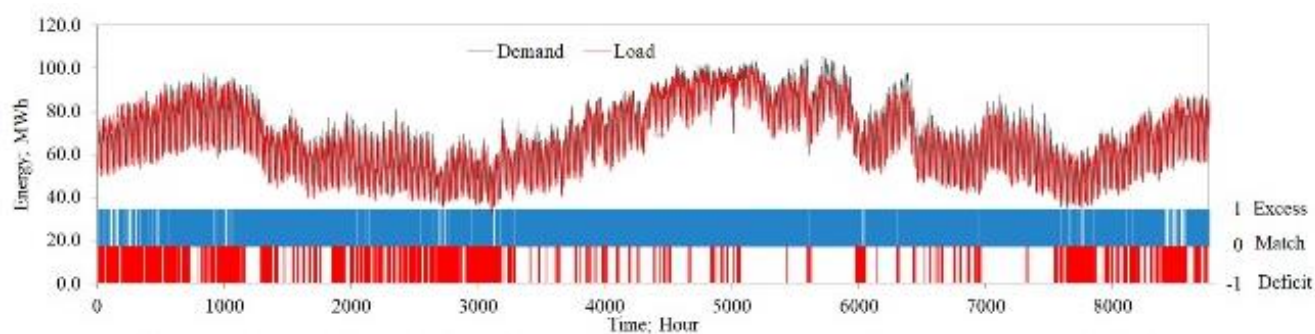
الاحمال الكهربائية لموقع الدراسة

يستعرض الشكل 3 الحمل الكهربائي الساعي للعام 2024، حيث بلغ الحمل السنوي في العام 2024 605,343 MWh، بينما كان إجمالي الطاقة المنتجة

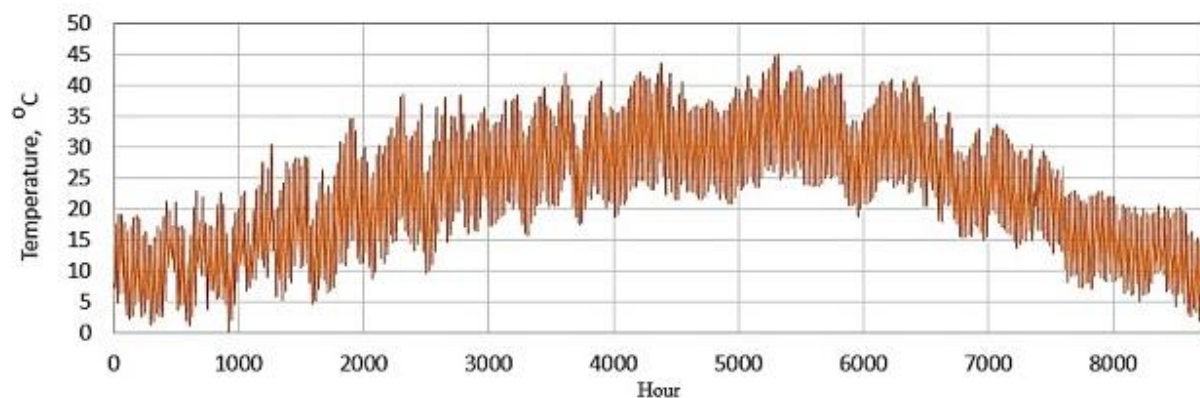
البيانات المناخية لموقع الدراسة
يعرض الشكل 4 درجات الحرارة، حيث يسود المناخ الصحراوي على مدينة براك، حيث ترتفع درجات الحرارة خلال فصل الصيف، وتصل متوسط درجات الحرارة إلى $33^{\circ}C$. ويعد شهر يوليو الأكثر حرارة. حيث تصل فيه درجة الحرارة إلى $41^{\circ}C$. بينما تنخفض درجات الحرارة بشكل ملحوظ خلال المواسم الباردة ويصل متوسط درجات الحرارة إلى $12^{\circ}C$. وتصل إلى $2^{\circ}C$ خلال شهر يناير. بينما يستعرض الشكل 5 شدة الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي، حيث يبلغ متوسط الإشعاع الشمسي اليومي إلى $6.1 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$. وتصل متوسط ساعات السطوع الشمسي إلى أكثر من 4200 ساعة في السنة. يبين الشكل 6 متوسط سرعة الرياح الساعية والاتجاهات السائدة للرياح في منطقة الدراسة، حيث تصل متوسط سرعة الرياح إلى 3.4 m/s والاتجاه السائد الشمال الشرقي.



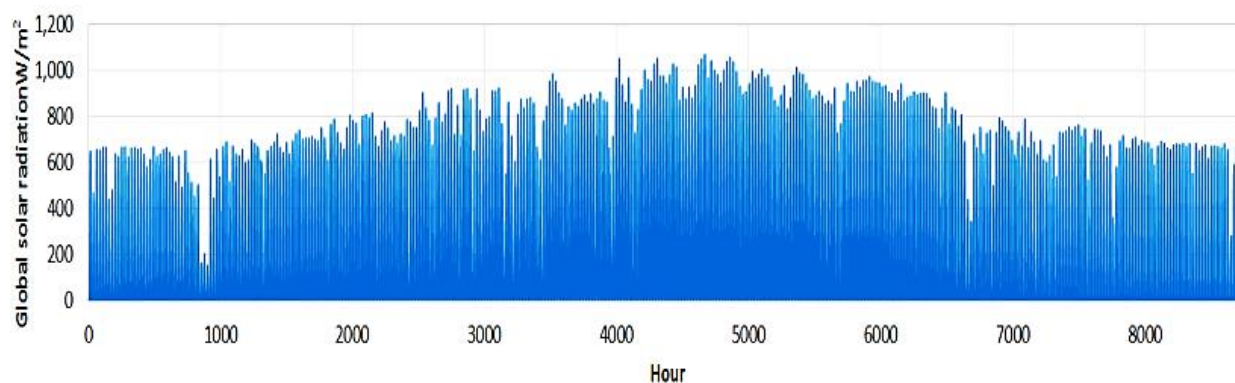
الشكل 2: موقع الدراسة وخريطة ليبيا للمواقع الواعدة لإنشاء محطات تخزين الطاقة بالضخ (PHS)



الشكل 3: الحمل السنوي الكهربائي والطلب للشبكة الفرعية للموقع

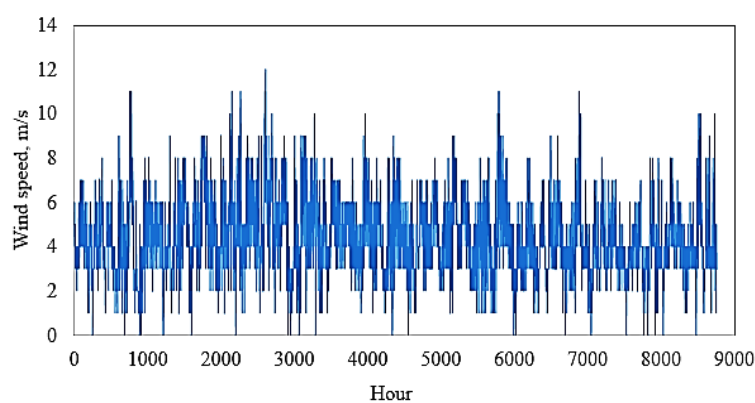


الشكل 4: درجات الحرارة لموقع الدراسة

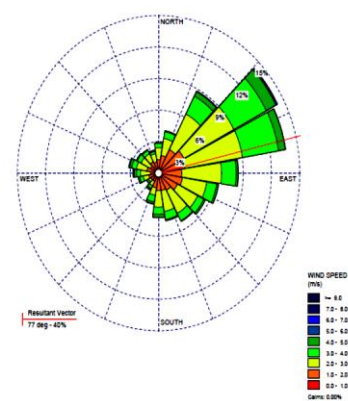


الشكل 5: الاشعاع الشمسي الافقي الكلي لمنطقة الدراسة

(a)



(b)



الشكل 6: سرعة والاتجاهات السائدة للرياح في موقع الدراسة

$$E_W = \begin{cases} P_{rat} & V_{rat} \leq V_{Z,t} \leq V_{cut-off} \\ P_{rat} \left(\frac{V_{Z,t} - V_{cut-in}}{V_{rat} - V_{cut-in}} \right) & V_{cut-in} < V_{Z,t} < V_{rat} \\ 0 & V_{Z,t} \leq V_{cut-in} \text{ OR } V_{Z,t} > V_{cut-off} \end{cases} \quad (3)$$

حيث P_{rat} هي القدرة المقدرة لتوربين الرياح عند سرعة الرياح المقدرة V_{rat} و V_{cut-in} و $V_{cut-off}$ هما سرعتا بداية التشغيل وإيقاف التشغيل. و $V_{Z,t}$ هي سرعة الرياح عند ارتفاع محور توربين الرياح (h_z) ويتم حسابه عن طريق المعادلة [57]: $V_{Z,t} = V_{0,t} \left(\frac{h_z}{h_0} \right)^\alpha$ حيث $V_{0,t}$ هي سرعة الرياح عند ارتفاع معين (h_0)، و α هو معامل القص [58].

الجدول 2: مواصفات توربينات الرياح

البند	القيمة
نوع التوربين	Nordex
بلد المنشأ	ألمانيا
قطر الدوار	80 m
ارتفاع البرج	100 m
سرعة بداية التشغيل	2 m/s
سرعة إيقاف التوربين	25 m/s
سرعة الرياح المقدرة	12.5 m/s
العمر الافتراضي	30 year

التحليل الهيدروليكي لنظام التخزين بالضخ الكهرومائي (PHS)

في أنظمة تخزين الطاقة بالضخ الكهرومائي (PHS) يكون تدفق الطاقة ثنائي الاتجاه تبعاً لوضع التشغيل. ومع ذلك، فإن القدرة، سواء في وضع التوليد (P_t) أو في وضع الضخ (P_p)، تعتمد على المعاملات الخاصة بنظام التخزين بالضخ الكهرومائي وفقاً للعلاقة التالية [21]:

$$P_t = \rho g Q H \eta_t \quad (4)$$

$$P_p = \frac{\rho g Q (H + h_f)}{\eta_p} \quad (5)$$

حيث تمثل ρ الكثافة بوحدة (kg/m^3) ، g تسارع الجاذبية الأرضية بوحدة (m/s^2) ، Q معدل التدفق الحجمي بوحدة (m^3/s) ، H ارتفاع الخزان العلوي بوحدة (m) ، h_f فقدان الحمل الهيدروليكي (m) ، η_t و η_p كفاءة المضخة والتوربين على التوالي [21].

$$D = 0.72 Q^{0.5} \quad (6)$$

حيث يشير D إلى قطر أنبوب السحب بوحدة (m) ، ويتم حساب فقدان الحمل الهيدروليكي وفقاً لمعادلة (Darcy-Weisbach formula) [21]:

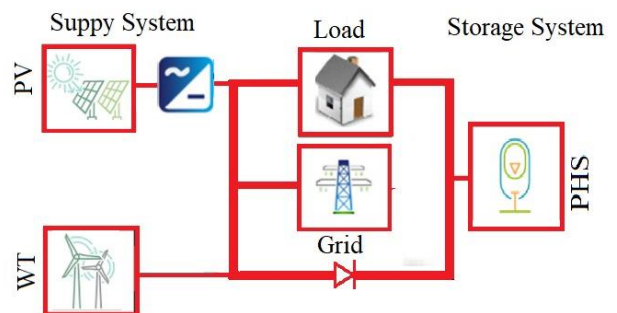
$$h_f = \frac{8 L f Q^2}{\pi^2 g D^5} \quad (7)$$

حيث يُعبرُ المعامل (f) عن معامل الاحتكاك، بينما يرمز (L) لطول أنبوب السحب مقدراً بالتر. ويمكن اعتماد قيمة أولية للمعامل (f) تُقدَّر بـ 0.2 في معادلة (Darcy-Weisbach formula) لغرض الحصول على تقدير مبدئي لفقدان الحمل الهيدروليكي، على أن يتم تحديث قيمة معامل الاحتكاك لاحقاً. وبشكل عام، يمكن تحديد قيمة المعامل (f) مباشرةً من المنحنى النظري المعروف بمخطط مودي [21]:

$$f = \left\{ 1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} \quad (8)$$

مكونات المنظومة المقترحة

يمثل الشكل 7 مخططاً لمكونات النظام المقترح. حيث يتكون النظام المقترح من حقل طاقة شمسية (PV)، ومزرعة توربينات رياح (W)، والشبكة الفرعية (G)، ونظام الاستهلاك المتمثل في الحمل (L)، ونظام تخزين كهرومائي (PHS).



الشكل 7: مخطط مكونات النظام

النمذجة الرياضية لمكونات المنظومة

الألواح الشمسية الكهروضوئية

تقدر الطاقة المنتجة من اللوح الشمسي من المعادلة التالية [31-37].

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

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

يمثل P_{STC} القدرة المنتجة من اللوح الشمسي في الظروف القياسية. β_p معامل درجة الحرارة للقدرة. بينما يعبر T_{cell} و T_{STC} عن درجة حرارة سطح الخلية في الظروف القياسية وتحت الظروف التشغيلية. وكذلك تعبر H_t و H_{STC} عن الإشعاع الشمسي الكلي والإشعاع الشمسي عند الظروف القياسية، T_{∞} تعبر عن درجة حرارة الهواء المحيط. وقد تم اختيار نوع اللوح الشمسي استناداً على نتائج أبحاث محلية تحقّقاً لأفضل أداء تحت الظروف المناخية الحقيقية لمنطقة براك الشاطئ [38-44].

الجدول 1: مواصفات الألواح الشمسية المختارة

البند	القيمة
نوع اللوح	Zytech Solar ZT235P
نوع التقنية	الاعشنية الرقيقة
بلد المنشأ	إسبانيا
القدرة	235wp
فرق الجهد	36V
التيار	8A
معامل درجة الحرارة للقدرة	%-0.42
الكفاءة	%14.39
العمر الافتراضي	30 year

طاقة الرياح

كذلك تم اختيار نوع توربينة رياح تناسب وطبيعة المنطقة المدروسة استناداً على توصيات بجات محليين [49-45]. ويمكن تقدير كمية الطاقة المنتجة من طاقة الرياح باستخدام المعادلة التالية [50-56].

دالة الهدف والقيود

يهدف هذا البحث إلى تحديد التكوين الأمثل لنظام الطاقة الهجين (PV/Wind/Grid/PHS) لمدينة براك، مع تحقيق أدنى تكلفة LCOE.

$$OF = \min(LCOE) \quad (11)$$

يجب أن يتمتع نظام الطاقة الهجين المتجدد المقترح بالمتانة والأمان، مع توفير إمداد طاقة مستدام ومستقل. وباعتباره المصدر الوحيد لتلبية متطلبات الحمل الكهربائي للموقع قيد الدراسة، فإن دالة الهدف (11) تخضع بالتالي لشرط التشغيل الخاص بموثوقية إمداد الطاقة LPSP

$$LPSP = \frac{\left[\sum_{t=1}^T E_{Load}(t) - (E_g(t) + E_{PV}(t) + E_{wind}(t) - \frac{E_{PHS}(t)}{\eta_{PHS}}) \right]}{\left[\sum_{t=1}^T E_{Load}(t) \right]} \quad (12)$$

حالة الشبكة الكهربائية

تنقسم أوضاع الربط مع الشبكة الكهربائية العامة إلى ثلاث فئات أساسية: وضع الاستيراد، وضع التصدير، والوضع المحايد. يُعرف توازن الطاقة في هذا السياق بالعلاقة التالية:

$$E_{ba}(t) = E_{grid}(t) - E_{load}(t) = \begin{cases} > 0; \text{Energy surplus } E_{su}(t) \\ = 0; \text{Energy balance } E_{Ne}(t) \\ < 0; \text{Energy shortage } E_{sh}(t) \end{cases} \quad (13)$$

شروط الربط وتتمثل في المعادلات الآتية:

$$\text{Import mode } E_{Im}(t): \quad E_{ba}(t) > 0 \text{ and } \eta_{p/t} \times [\eta_{inv} E_{PV}(t) + E_w(t) + E_{ba}(t)] + E_s(t-1) < E_s \quad (14)$$

$$\text{Export mode } E_{Ex}(t): \quad E_{ba}(t) < 0 \text{ and } \eta_{p/t} \times [\eta_{inv} E_{PV}(t) + E_w(t) + E_{ba}(t)] + E_s(t-1) \geq E_s \quad (15)$$

$$\text{Standby mode } E_{Sb}(t): \quad E_{ba}(t) = 0 \text{ and } \eta_{p/t} \times [\eta_{inv} E_{PV}(t) + E_w(t)] + E_s(t-1) \geq E_s \quad (16)$$

الاعتبارات البيئية والاقتصادية

تمثل كلفة الطاقة المستوية (LCOE) التكلفة الفعلية لإنتاج الطاقة من نظام محدد. ويُعد مؤشر (LCOE) أداة فعالة تُستخدم على نطاق واسع للمقارنة بين تقنيات الطاقة المختلفة، وتشمل جميع التكاليف: الاستثمار الأولي، وتكاليف التشغيل والصيانة، وكلفة الوقود بالإضافة إلى تكلفة الضرر البيئي. ويمكن التعبير عن LCOE بالمعادلة التالية:

$$LCOE = \frac{\left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (C_{PV} + C_w + C_{PHS}) + (O_{PV} + O_w + O_{PHS}) - C_{CO_2} \right]}{\sum_{t=1}^{8760} E_{sh}(t) + E_{Ex}(t)} \quad (17)$$

القدرات التصميمية المصنفة. ويمكن حساب تكلفة الأضرار البيئية (C_{CO_2}) الناجمة عن انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون باستخدام المعادلة 18 [26].

$$CO_{2savings} = 1.037 \sum_{t=1}^{8760} [E_{load}(t) + E_{Ex} - E_{Im}(t)] \quad (18)$$

$$C_{CO_2} = CO_{2savings} \times \phi_{CO_2} \quad (19)$$

حيث يُمثل (Re) رقم رينولدز الذي يصف الخصائص الديناميكية للجريان، بينما يرمز (E) إلى خشونة السطح الداخلي لأنبوب السحب. ويتم حساب رقم رينولدز كدالة في معدل التدفق وفق العلاقة التالية [21]:

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} \quad (9)$$

حيث يرمز (v) للزوجة الحركية مقاسة بوحدة (m^2/s)، فيما تشير "مواصفات معدات نظام التخزين بالضخ الكهرومائي" إلى الخصائص الفنية والتشغيلية للمكونات الأساسية للنظام.

الجدول 3: مواصفات وخصائص المكونات لنظام الكهرومائي

البند	القيمة
تكلفة الخزانات	12.5 \$/kWh
سعر التوربينات	140 \$/kWh
سعر المضخات	51 \$/kWh
الاعمال الانشائية	1000 \$/kWh
النفقات الاستثمارية بالنسبة للقدرة المركبة	775 \$/kWh
تكاليف التشغيل والصيانة	0.025 \$/kWh
العمر الافتراضي	60 year

التحليل الديناميكي لحجم الخزان الكهرومائي

يُحدّد التحليل الديناميكي لنظام التخزين بالضخ الكهرومائي المقترح عبر مفهوم الطاقة اللحظية للنظام ($E_{PHS}(t)$)، والتي تُعطى بالعلاقة:

$$E_{PHS}(t) = E_g(t) + E_{PV}(t) + E_{wind}(t) - E_{Load}(t) \quad (10)$$

حيث تمثل $E_{PV}(t)$ ، $E_w(t)$ ، $E_{sh}(t)$ و $E_s(t)$ الطاقة المولدة من حقول الألواح الشمسية، ومزارع توربينات الرياح، والعجز في الطاقة، ومستوى الطاقة في نظام التخزين بالضخ الكهرومائي بوحدة الميجاوات ساعة في زمن معين (t) على الترتيب. بينما تمثل E_{ur} سعة الخزان العلوي بالميجاوات ساعة، ويرمز $\eta_{p/t}$ لكفاءة المضخة والتوربين.

حيث يمثل (r) معدل الخصم الحقيقي المقدّر بـ 0.024 %، وقد تم حسابه بناءً على معدل الخصم الاسمي (i) البالغ 6.5 % ومعدل التضخم (f) البالغ 2.5 % وفق العلاقة [41] $r = \frac{i-f}{1+f}$ ، بينما يرمز (n) إلى العمر الافتراضي للمنشأة (25 سنة لمشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، و60 سنة لمشاريع التخزين بالضخ الكهرومائي). وتُستخدم الطاقات المقابلة لمصادر الطاقة المتجددة (الرياح والطاقة الشمسية) ونظام التخزين بالضخ لحساب

حيث يُمثل الرقم 1.037 kg CO₂/kWh معامل انبعاث CO₂ في منظومة توليد الكهرباء في ليبيا [59,60]. التكلفة الاجتماعية للكربون 70\$/ton CO₂ [61,62].

وتقدم المعادلة (19) تقديرًا لفترة استرداد الأموال (PBP):

$$PBP = \frac{C_{PV} + C_{Wind} + C_{PHS}}{Income} \quad (20)$$

حيث Income تمثل العائد المادي من مبيعات الكهرباء بتعريفه 10 سنت/كيلووات ساعة.

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالايقين في النتائج

لتسهيل التحليل تم تبني الفرضيات التالية:

1. اعتماد نموذج Liu & Jordan نموذجًا لتحويل الإشعاع الشمسي الأفقي المنتشر من السماء إلى مائل [63,64]
2. إهمال انخفاض معدل أداء الأجهزة مع الزمن.
3. إهمال سعر المعدات والأجهزة بعد انتهاء فترة العمر.
4. إهمال الفقد في الطاقة من خلال أسلاك التمديد ونقاط التوصيل.
5. اعتبار الكفاءات الأجهزة المساندة (محولات التردد، أجهزة التحكم، المحولات) ثابتة.

يشكل عدم إجراء دراسة حساسية النتائج لاختلاف بعض المعلمات (أسعار أجهزة ومعدات الطاقات المتجددة، اختلاف نمط منحى الحمل) أحد حدود الدراسة. تعتبر البيانات أكبر مصدرًا للالايقين مثل البيانات المناخية والاحمال. كذلك تعتبر أسعار معدات وأجهزة الطاقات المتجددة مصدرًا من مصادر للالايقين، حيث سجل تفاوتًا في سعر الخلايا الشمسية يصل إلى 360% في السوق الدولية للطاقة الشمسية [65].

النتائج والمناقشة

يظهر الشكل 9 العلاقة التصميمية بين مكونات المنظومة المقترحة. ويظهر جليا تأثير طاقة الرياح في التقليل من سعة الخزان PHS كون طاقة الرياح متوفرة دائما. والعكس صحيح بالنسبة للطاقة الشمسية.

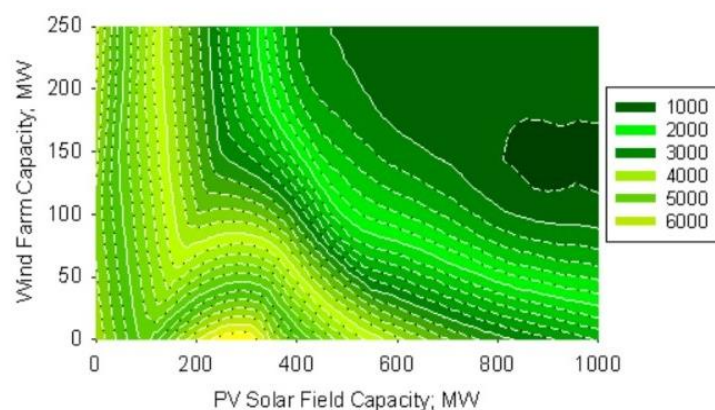
يوضح الشكل 10 تحليلًا زمنيًا للأداء التشغيلي لحقل الخلايا الشمسية بقدرة 1000 ميغاوات. يبرز الرسم البياني التباين الموسمي في الإنتاجية الإجمالية للنظام، مع تسجيل انخفاضات مؤقتة خلال فترات محددة. تُعزى هذه الانخفاضات في الأداء بشكل أساسي إلى الظروف المناخية ذات درجات الحرارة المرتفعة، والتي تؤثر سلبًا على كفاءة الخلايا الشمسية نظراً

لحساسيتها المعروفة تجاه الحرارة. يعرض الشكل 11 مستوى الطاقة في نظام تخزين الطاقة بواسطة الضخ الكهرومائي، وفقاً للمواصفات التصميمية والتشغيلية وقيود التصميم. تؤكد النتائج المتحصل عليها من الدراسة الحالية قدرة النظام على تلبية كامل الحمل الكهربائي المطلوب بنسبة 100%. يتبين من الشكل 10 نجاح المنهجية المتبعة في تصميم نظام التخزين ويظهر ذلك من وجود قيمة الصفر لاقل مستوى طاقة في الخزان وهذا يدل على تلبية الحمل الكهربائي بالكامل (LPSP=0)، وكذلك تتطابق مستوى الطاقة في الخزان في بداية المحاكاة (t=0) مع النهاية (t=8760).

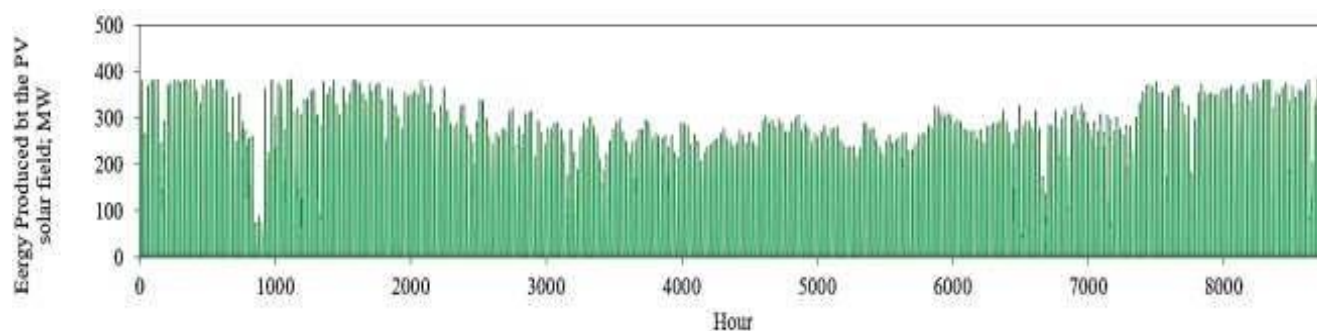
بناءً على التقييم الاقتصادي، يعتبر التكوين ذو أدنى قيمة لتكلفة الطاقة المستوية هو الخيار الأمثل. وفقاً للشكل 12، تتحقق هذه القيمة الدنيا باستخدام حقل خلايا شمسية بقدرة 1000 ميغاوات ومزرعة رياح بقدرة 100 ميغاوات مقترنة بنظام تخزين بالضخ الكهرومائي بسعة 882 ميغاوات ساعة.

الاستنتاجات

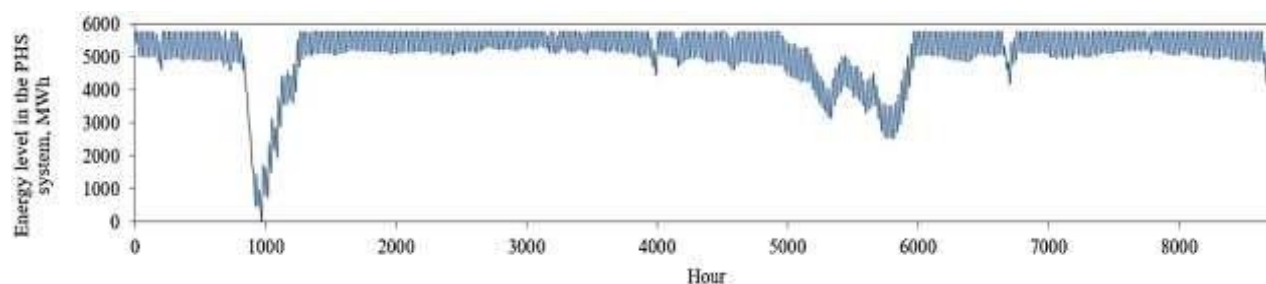
أكدت هذه الدراسة ما توصلت إليه العديد من الأبحاث السابقة حول وفرة مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في ليبيا، وإمكانية الاستفادة من التضاريس المرتفعة في إنشاء محطات تخزين الطاقة بالضخ (PHS). وبناءً على ذلك، تقدم هذه الورقة البحثية إطاراً عملياً يمكن أن يساهم في تحقيق الأهداف الاستراتيجية الوطنية الليبية للتحويل نحو الطاقات المتجددة، وتعزيز أنظمة توليد الطاقة. تم في هذا البحث تصميم نظام هجين متكامل ومتصل بشبكة الكهرباء، يتكون من: حقل خلايا شمسية بسعة 1000 ميغاوات، ومزرعة رياح بسعة 200 ميغاوات. ونظام تخزين بالضخ كهرومائي بسعة تخزينية تبلغ 854 ميغاوات ساعة. النظام المقترح قادر على سد العجز السنوي في الطاقة الكهربائية والمقدر بحوالي 15575 ميغاوات/ساعة. وقدّرت متوسط التكلفة المستوية للطاقة LCOE 49.9 دولار/ميغاوات ساعة. وفترة استرداد الاستثمار 10.48 سنة. ويقلل النظام من الانبعاثات الكربونية بمقدار 17,624 كيلوطن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. وبشكل عام، يقدم هذا البحث نموذجاً كمياً يدعم الجدوى الفنية والاقتصادية والبيئية لاعتماد أنظمة الطاقة الهجينة واسعة النطاق في ليبيا، مما يساهم في تعزيز أمن الطاقة والاستدامة البيئية على المدى الطويل.



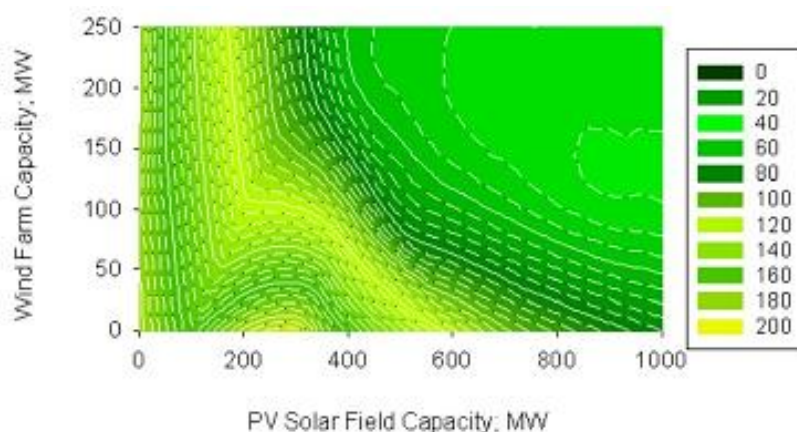
الشكل 9: العلاقة بين قدرات منظومة التوليد والسعة التخزينية لنظام PHS



الشكل 10: الطاقة الانتاجية لحقل الألواح الشمسية



الشكل 11: مستوى الطاقة في نظام التخزين PHS



الشكل 12: ادنى قيمة للتكلفة المستوية للطاقة

Author Contributions: “Ahmed: Analysis, writing—original draft preparation, results' analysis and discussion. Nassar: Conceptualization and methodology. El-Khozondar and Khaleel: Results' analysis and discussion, review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Funding: “This research received no external funding.”

Data Availability Statement: “The data are available at request.”

Conflicts of Interest: “The authors declare no conflict of interest.”

References

- [1] M. Salem, et al. "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*, vol. 2/2025, pp. 1-19, 2025. <https://doi.org/10.3280/EFE2025-002007>
- [2] M. Salem, et al. "Towards Green Economy: Case of Electricity Generation Sector in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 334–360, 2025.
- [3] Y. Nassar, et al. "Regression Model for Optimum Solar Collectors' Tilt Angles in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10209547>
- [4] K. Moumani. "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*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2023. https://doi.org/10.63318/waujpasvli1_01
- [5] H. El-Khozondar, M., Andeef, N. Fathi, R. El-Khozondar, and H. Awad. "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*, vol. 4, no. 1, pp. 56-69, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_06
- [6] A. Alkhazmi, et al.. "Design and Analysis of PV Solar Street Lighting systems in Remote Areas: A Case Study." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol.

- 4, no. 1, pp. 1-14. 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_01
- [7] L. Ben Dalla, Ö. Karal, M. EL-Sseid, and A. Alsharif. "An IoT-Enabled, THD-Based Fault Detection and Predictive Maintenance Framework for Solar PV Systems in Harsh Climates: Integrating DFT and Machine Learning for Enhanced Performance and Resilience." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 41-55, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_05
- [8] El-Khozondar, et al. "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*, vol. 4, no. 1, pp. 56-69, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_06
- [9] A. Mahmoud, et al. "Charging systems/techniques of electric vehicle: A comprehensive review." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 18-44, 2024. <https://doi.org/10.51646/jesd.v13i2.203>
- [10] A. Abodwair, et al. "Feasibility Assessment of Hybrid Renewable Energy Based EV Charging Station in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 311-349, 2024. <https://doi.org/10.51646/jesd.v13i2.292>
- [11] F. Yasser, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif, M. Elmnifi, M. Salem and I. Mangir, "Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/Wind hybrid renewable system," *Energy Conversion and Management*, vol. 322, p. 119173, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119173>
- [12] M. Elnaggar, et al. "Leveraging Wind Energy for Electricity and Hydrogen Production: A Sustainable solution to Power Shortages and Eco-Friendly Alternative Fuel." *Advanced Energy and Sustainability Research*, P. e202500049, 2025. <https://doi.org/10.1002/aesr.202500049>
- [13] I. Imbayah, M. Khaleel, and Z. Yusupov. "Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems: Classical Optimization Methods, Artificial Intelligence, Recent Trend, and Software Tools." *The International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 3, no. 4, pp. 47-69, 2025. <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/150>
- [14] A. Ahmed, A. Alsharif, and N. Fathi. "Recent Advances in Energy Storage Technologies." *The International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 9-17, 2023. <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/11>
- [15] M. Khaleel, I. Imbayah, Y. Fathi, and H. El-Khozondar. "Renewable Energy Transition Pathways and Net-Zero Strategies." *The International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 3, no. 4, pp. 01-16, 2025. <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/145>
- [16] A. Blakers, B. Lu, K. Anderson and A. Nadolny, "Pumped hydro energy storage to support 100% renewable electricity," in 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Waikoloa, HI, USA, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8548026>
- [17] D. Bogdanov, O. Koskinen, and C. Breyer, "Integrated renewable energy based power system for Europe, Eurasia and MENA regions," in 2016 International Energy and Sustainability Conference (IESC), Cologne, Germany, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7569508>
- [18] N. Naval, J. Yusta, R. Sánchez and F. Sebastián, "Optimal scheduling and management of pumped hydro storage integrated with grid-connected renewable power plants," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, no. 12, p. 108993, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108993>
- [19] E. Salim, A. Abubaker, B. Ahmed, and Y. Nassar, "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", *waujpas*, vol. 3, no. 1, pp. 152-167, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_22
- [20] S. Ahmed, A. Agrira, and Y. Nassar, "The Impact of Loss of Power Supply Probability on Design and Performance of Wind/Pumped Hydropower Energy Storage Hybrid System ", *waujpas*, vol. 3, no. 2, pp. 52-62, May 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_06
- [21] Y. Nassar, M. Abdunnabi, M. Sbeta, A. Hafez, K. Ali, A. Hassan and B. Belgasim, "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 229, p. 113744, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113744>
- [22] S. Mohammed, et al. "Exploring Optimum Sites for Exploitation Hydropower Energy Storage Stations (PHES) Using the Geographic Information System (GIS) in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 394-409, 2025. <https://doi.org/10.51646/jesd.v14i1.426>
- [23] A. Abdullallah, N. Fathi, S. Mohammed, and M. Ghatas. "Integrating Electricity Sub-Grid with Pumped Hydropower Storage System for Grid Stability and Sustainability." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 322-332, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_40
- [24] M. Elmnifi, et al. "Design of an Innovative Wastewater Treatment System Using Photovoltaic-Hydro System Coupled with Reverse Osmosis Technology: Sustainability and Continuous Improvement." In *Proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management*, WREM 2024. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88850-2_12
- [25] M. Elmnifi, et al. "Solar and Wind Energy Generation Systems with Pumped Hydro Energy: City of Derna." In *the proceedings of the 7th International Symposium on Water Resource and Environmental Management*, 2025. WREM 2024. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88850-2_17
- [26] M. Elmnifi, et al. "Ensuring sustainability in Libya with renewable energy and pumped hydro storage." *Ecological Questions*, vol. 35, no. 3, pp. 1-17, 2024. <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.036>
- [27] A. Awad, et al. "Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: a case study of Gharyan city – Libya." *Acta Innovations*, vol. 50, no. 4, pp. 46-56, 2023. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1233304>
- [28] I. Mangir, et al. "Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study." *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 14, p. 100650, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100650>
- [29] A. Ali, E. Karram, Y. Nassar, A. Hafez. "Reliable and economic isolated renewable hybrid power system with pumped hydropower storage." In the 22nd international Middle East power systems conference (MEPCON), 14-16 December 2021, Assiut, Egypt. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686233>
- [30] S. Mohammed, et al. "Exploring Optimum Sites for Exploitation Hydropower Energy Storage Stations (PHES) Using the Geographic Information Systems (GIS) in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 394-409, 2025. <https://doi.org/10.51646/jesd.v14i1.426>
- [31] F. Yasser, et al. "Thermoelectrical analysis of a new hybrid PV-thermal flat plate solar collector." In *the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)*, 08-09 May 2023, Gaza, Palestine, State of. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209472>
- [32] K. Amer, et al. "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*, vol. 3, no. 1, pp. 51-58, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_09
- [33] H. El-Khozondar, et al. "Economic and Environmental Implications of Solar Energy Street Lighting in Urban Regions: A Case Study." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, pp. 1, pp. 142-151. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_21
- [34] I. Imbayah, et al. "Design of a PV solar-covered parking system for the college of renewable energy Tajoura, Libya: A PVsyst-based performance analysis." *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 288–307, 2025. <https://doi.org/10.26629/uzjest.2025.23>
- [35] I. Latiwash, and A. Abubaker. "Performance Analysis and Sizing Optimization of a Utility Scale Stand-Alone Renewable Energy PV/Battery Storage System for Urban Zones." *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 261–275, 2025. <https://doi.org/10.26629/uzjest.2025.21>
- [36] J. El-Khozondar, et al. "Sustainable street lighting in Gaza: Solar energy solutions for main street." *Energy 360*, vol. 4, no. 12, p. 100042, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energ.2025.100042>
- [37] A. Aqila, et al. "Real Time Design and Analysis of a Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Battery) for Self-Consumption Residential Building." In Conference: Engineering for Palestine Conference At: Palestine Polytechnic University, Hebron, Palestine, 2025. <https://www.researchgate.net/publication/396910534>
- [38] B .Ahmed, et al. "Atlas of solar (PV and CSP) and wind energy technologies in Libya." *The North African Journal of Scientific Publishing (NAJSP)*, vol. 1, no. 4, pp. 8-24, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/374846048>
- [39] A. Alatrash, et al. "Assessing the Viability of Solar and Wind Energy Technologies in Semi-Arid and Arid Regions: A Case Study of Libya's Climatic Conditions." *Applied Solar Energy*, vol. 60, no. 1, pp. 149–170, 2024. <https://doi.org/10.3103/S0003701X24600218>
- [40] N. Abuhamoud, et al. "Mapping of PV solar module technologies across Libyan territory." In *the Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*, 07-08 September 2022, Basrah, Iraq, <https://doi.org/10.1109/IICCIT55816.2022.10010476>
- [41] N. Abuhamoud, et al. "Atlas of PV solar systems across Libyan territory." In 2022 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), 04-06 July 2022, Istanbul, Turkey. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS56295.2022.9914355>
- [42] M. Khaleel, et al. "Solar and Wind Atlas for Libya." *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 27–43, 2023. <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/44>
- [43] A. Al-Mathnani, A. Mohammed, S. Al-Hashmi, and E. Geepalla. "Control and Modification of 12-Pulse Static Compensator with PV Cell Using New Control Algorithm." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 30-34, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_06
- [44] D. Albuzaia, A. Ali, M. Mohmed, and A. Hafez. "Reliable and Robust Optimal Interleaved Boost Converter Interfacing PhotoVoltaic Generator". *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 192-201, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_24
- [45] M. Elnaggar, et al. "Leveraging Wind Energy for Electricity and Hydrogen Production: A Sustainable Solution to Power Shortages and Eco-Friendly Alternative Fuel." *Advanced Energy and Sustainability Research*, e202500049, 2025. <https://doi.org/10.1002/aesr.202500049>
- [46] W. El-Osta, et al. "Carbon footprint and energy life cycle assessment of wind energy industry in Libya." *Energy conversion and management*, vol. 300, p. 117846, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117846>
- [47] A. Amhimmid, W. El-Osta, Y. Nassar, H. El-Khozondar, and M. Salem. "Financial Modeling of Social and Environmental Impacts of Wind Farm in Urban Zones: A Case Study of Zawia-Libya." *International Journal of Energy and Environmental Engineering (IJEEE)*, vol. 15, no. 4, pp. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.57647/ijeee.2024.1504.17>
- [48] S Mohammed, et al. "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50-69, 2023. <https://www.ajol.info/index.php/jesd/article/view/260868>
- [49] A. Elmariami, et al. "Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya." *Appl. Sol. Energy*, vol. 59, pp. 64–78, 2023. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22601557>
- [50] M. Elnaggar, et al. "Assessing the techno-enviro-economic viability of wind farms to address electricity shortages and Foster sustainability in Palestine." *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103111, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103111>
- [51] M. Salem, A. Elmabruk, M. Irhouma, and I. Mangir. "Assessment of Wind Energy Potential in Western Mountain: Nalut and Yefren as Case Study." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 35-42, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_7
- [52] S. Ahmad, and A. Agrira. "The Impact of Loss of Power Supply Probability on Design and Performance of Wind/Pumped Hydropower Energy Storage Hybrid System." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 52-62, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_06
- [53] E. Almehdi, and G. Miskeen. "Power and Carbon Footprint Evaluation and Optimization in Transitioning Data Centres." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 221-229, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_28
- [54] S. Alfathi, and G. Miskeen. "Evaluation and Prediction Performance of Solar Panel and Wind Turbine Systems Using Simulation." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 221-229, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_11
- [55] A. Elmabruk, M. Salem, M. Khaleel, and A. Mansour. "Prediction of Wind Energy Potential in Tajoura and Mislata Cities." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 125-131, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_17
- [56] A. Aqila, Y. Nassar, H. El-Khozondar, "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*, vol. 3, no. 1, pp. 168-181, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23
- [57] Y. Nassar, and S. Alsadi. "Wind Energy Potential in Gaza Strip-Palestine state." *Solar Energy and Sustainable Development*, vol. 7, no. 2, pp.57-41, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/357891125>
- [58] A. Abdalla, et al. "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." *Appl. Sol. Energy*, vol. 59, pp. 343–359, 2023. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600212>
- [59] M. salem, et al. "Estimation of CO2 Emission within Libya's Electricity Generation Sector." *Next Research*, vol. 2, no. 3, p. 100567, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100567>
- [60] A .Makhzom, et al. "Estimation of CO2 emission factor for Power Industry Sector in Libya." In *the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy &*

- Sustainability (ieCRES 2023)*, 08-09 May 2023, Gaza, Palestine, State of. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209528>
- [61] M. Inweer, and N. Fathi. "Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 162-173, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_21
- [62] M. Inweer, et al. "Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya." *Discover Concrete and Cement*, vol. 1, no. 1, p. 37, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1>
- [63] N. Fathi, S. Alsadi, H. El-Khozondar, and S. Refaat. "Determination of the Most Accurate Horizontal to Tilted Sky-Diffuse Solar Irradiation Transposition Model for the Capital Cities in MENA Region." *The 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, 22-24 March, 2022, Doha-Dubai. <https://doi.org/10.1109/SGRE53517.2022.9774146>
- [64] M Khaleel, et al. "Sensitivity of global solar irradiance to transposition models: Assessing risks associated with model discrepancies." *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 11, p. 100887, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100887>
- [65] Y. Nassar, and S. Alsadi. "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine." *Sustainable energy technologies and assessments*, vol. 31, pp. 318-328, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.010>