Solar Energy
And Sustainable Development
Refereed, biannual scientific journal issued by:
The Libyan Center for Solar Energy Research and Studies

Exploring Optimum Sites for Exploitation Hydropower Energy Storage Stations (PHES) Using the Geographic Information Systems (GIS) in Libya

Suhaylah Mohammed[1*], Yasser Nassar[2], Hamed Algassie[3], Asma Mahammed[4], Hala El-Khozondar[5], Monaem Elmnifi[6], Mohamed Khaleel[7], Sassi Rekik[8], Mansour Salem[9].

[1]Higher Institute of Sciences and Technology, Tamezawa, Brack, Libya. .
[1,2]Mechanical and Renewable Energy Engg. Dept., Eng, Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya
[3]ELibyan Audit Bureau, Brack, Libya.
[4]Department of GIS and Cartography, Faculty of Geographical and Environmental Sciences, University of Khartoum, Sudan.
[5]Electrical Eng. and Smart Systems Dept., Islamic University of Gaza, Palestine.
[6]Mechanical Eng. Technology Dept., Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia.
[7]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk, Türkiye.
[8]Laboratory of Thermal and Energy Systems Studies (LESTE), National Engineering School of Monastir, University Monastir, Tunisia.
[9]Environment and Natural resources Faculty, Wadi Alshatti Uni., Brack, Libya.

E-*mail:* [1] s.mohammed@wau.edu.ly ,[2] y.nassar@wau.edu.ly ,[3] malgassi78@gmail.com , [4] asmamahammed40@gmail.com,[5] hkhozondar@iugaza.edu.ps ,[6] monm.hamad@yahoo.co.uk ,[7] lykhaleel@yahoo.co.uk ,[8] sassi.rekik@gmail.com ,[9] m.salem@wau.edu.ly .

ARTICLE INFO.

Article history:
Received 22 Feb 2025
Received in revised form 24 Feb 2025
Accepted 14 May 2025
Available online 16 May 2025

KEYWORDS

Geographic Information Systems (GIS), Renewable Energy, Pumped Hydropower Energy Storage (PHES), Libya.

ABSTRACT

This research aims to identify promising locations for establishing pumped hydropower energy storage (PHES) stations in Libya using geographic information systems (GIS). The study focuses on integrating geographic and climatic data and applying specific criteria to assess the spatial suitability of these stations. The objective is to harness the natural potential of the region to achieve Libya's strategic goals of mitigating network deficits and increasing the contribution of renewable and clean energy to over 50% of the energy mix by 2050.

This research supports the transition toward renewable and environmentally friendly energy, aligning with national and international commitments including the pairs climate agreement, by reducing the carbon footprint and ensuring energy sustainability. The study identified several promising locations in Libya for establishing PHES stations, which could reduce the electricity

*Corresponding author.

DOI: https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.426

This is an open access article under the CC BY-NC license (http://Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC 4.0)).

deficit by storing surplus energy for retrieval on demand, ensuring grid stability. Additionally, these stations can serve as energy storage sources for renewable and hybrid energy systems. The study revealed that approximately 24.73% of Libya's total area could be potential sites for PHES development. To determine the most suitable sites. The promising locations were categorized into three levels based on multiple layers integrated into a GIS- based decision- making matrix. High- suitability areas accounted for about 4.90% medium-suitability areas for approximately 6.15%, and low suitability areas for around 13.68% of Libya's total land area. The elevations of the promising locations ranged between 188m and 2200 m above ground level the available energy storage capacity for PHES was calculated, ranging from 384-4,496 Wh/m3 of upper reservoir volume.

تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ باستخدام منصة نظم المعلومات الجغرافية في ليبيا

سهيلة محمد، ياسر نصّار، أحمد القاسي، أسماء عصمان، هالة الخزندار، منعم المنفي، محمد خليل، ساسي رقيق، منصور سالم.

ملخص: يهدف هذا البحث لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ (PHES) في ليبيا باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وذلك من خلال التركيز على دمج البيانات الجغرافية والمناخية، وتطبيق معايير محددة لتقييم الملائمة المكانية لهذه المحطات. كما هدفت الدراسة إلى استغلال الإمكانات الطبيعية في المنطقة؛ وذلك لتحقيق أهداف استراتيجية الدولة الليبية في التخفيف من العجز في الشبكة بالإضافة لجعل مساهمة الطاقات المتجددة والنظيفة أكبر من 50 % في مزيج الطاقة المنتجة بحلول عام 2050. يساهم هذا البحث في التحول نحو الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة، مما يتماشى مع الالتزامات الوطنية والدولية، بما في ذلك معاهدة باريس للتغير المناخي، وذلك من خلال تقليل بصمة الكربون وتحقيق الاستدامة في الطاقة. بينت الدراسة وجود العديد من الاماكن الواعدة في ليبيا لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية، والتي من شأنها أن تقلل العجز في الطاقة الكهربائية إذا ما تم تخزين الفائض منها لاسترجاعها عند الطلب، وكذلك لضمان استقرار الشبكة. وايضا يمكن استخدامها كمصدر لتخزين الطاقة في منظومات الطاقات المتجددة والهجينة.

كشفت الدراسة ان حوالي 24.73 % من اجمالي مساحة ليبيا يمكن ان تشكل هدفا لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ. ولتحديد الانسب تم تصنيف الاماكن المثلى الى ثلاثة مستويات استنادا على دمج عدة طبقات والتي يشكل GIS على اساسها مصفوفة اتخاذ القرار. بداية من الأماكن ذات الملائمة العالية والتي شكلت حوالي 4.90 %، في حين تمثل الأماكن المتوسطة الملائمة حوالي 6.15 %، بينما تشكل الأماكن المنخفضة نحو 13.68 % من إجمالي مساحة الاراضي الليبية. وتراوحت الارتفاعات للاماكن الواعدة بين 188 – 2200 متر عن سطح الارض، كما تم حساب الطاقة المتاحة لتخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ وتراوحت بين 384 – 4,496 وات ساعة لكل متر مكعب من حجم الخزان.

الكلمات المفتاحية – نظم المعلومات الجغرافية، الطاقات المتجددة، تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ، ليبيا.

1. المقدمة

مدفوعاً بالضغوط البيئية، شهد العالم في السنوات الأخيرة تحولاً كبيراً نحو توليد الطاقة من مصادر متجددة وصديقة للبيئة، حيث بلغت القدرات المركبة للطاقات المتجددة في عام 2023 حوالي 3865 جيجاوات ويمثل ذلك زيادة قدرها 473 جيجاوات عن عام 2022. وبلغت مساهمة الطاقة الشمسية حوالي 36.7%، الطاقة الكهرومائية 32.7%، وطاقة الرياح 26.3%، وطاقة الكتلة الحيوية 3.9%، وطاقة حرارة جوف الارض 0.4% [1]. وبسبب طبيعة معظم الطاقات المتجددة من حيث عدم ضمان التوافق بين المتاح والطلب على الطاقة، أدى ذلك الى زيادة الاهتمام بتقنيات التخزين. حيث يعتبر تخزين الطاقة من أنجع الاساليب الهندسية لدأب التفاوت الزمني بين العرض والطلب، وتمثل انظمة التخزين للطاقة الكهرومائية بالضخ الأكثر انتشاراً حول العالم. حيث بلغت القدرات التخزينية للطاقة الكهرومائية بالضخ حول العالم بأكثر من 30% خلال عقد من الزمن تقريبا ليصل الى أكثر من 139.9 جيجاوات في عام

2023، وشكلت ما نسبته 79.8% من اجمالي القدرات التخزينية في العالم [2]
تواجه ليبيا تحديات جسيمة في قطاع الطاقة، حيث يعتمد قطاع الكهرباء بشكل كامل على الوقود الأحفوري، وهو ما يساهم في زيادة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. إلى جانب ذلك يعاني القطاع قصورا في الامدادات الكهربائية، حيث بلغ اجمالي توليد الطاقة الكهربائية في عام 2023 حوالي 38,396.3 MWh بينما بلغ الطلب على الطاقة حوالي 48,140.3 MWh، وبذلك سجل عجزا في الامداد بقيمة 9,744,033 MWh، الامر الذي يستعدي ايجاد حلولا مستدامة للخروج من هذه الازمة. أظهرت الدراسات أن ليبيا تمتلك إمكانيات كبيرة لاستغلال الطاقات المتجددة [3-17]. حفز هذا السلطات الليبية الى تضمين الطاقات المتجددة في خطتها الاستراتيجية للأعوام 25 سنة القادمة (2025-2050) في قطاع الكهرباء، وتقتضي الخطة الى زيادة مساهمة الطاقات المتجددة والنظيفة ليصل إلى 30% بحلول عام 2030 وإلى أكثر من 50% في مزيج الطاقة المنتجة بحلول عام 2050 [18]. حيث إن التطور المستمر للحضارة يحمل بصمة واضحة لقدرتنا المتزايدة على تسخير الطاقة بما يتجاوز مجرد العمل البشري أو الحيواني. لقد أتاح ظهور الثورات الصناعية والزراعية المتعاقبة لشريحة متزايدة من سكان العالم الاستمتاع براحة المنازل المدفأة والمضيئة، وغلال المحاصيل المخصبة والمروية، والترابط الذي تتيحه التكنولوجيا، وسهولة السفر لمسافات بعيدة هذه الإنجازات تمثل معالم للتقدم، وهي مدفوعة بقدرتنا المتنامية على تحديد مواقع الطاقة واستخراجها واستخدامها بإتقان متزايد. وتُعد التطورات في علم المواد مفتاحًا لمستقبل مستدام، يتميز بتوليد نظيف للطاقة ونقلها وتوزيعها، والتخزين الفعّال للطاقة الكهربائية والكيميائية، وتحسين كفاءة الطاقة، ونظم أكثر تطورًا لإدارة الطاقة [20,19]. فالبرغم من ان العديد من الدراسات أكدت الجدوى الاقتصادية والبيئية والتقنية من دمج منظومات PHES مع منظومات الطاقات المتجددة [21-25]، إلا أنه لا توجد دراسة شاملة تحدد الامكانيات المتاحة لتخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ في ليبيا. تهدف هذه الدراسة لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ في ليبيا، مما يسهم في تحقيق الأهداف الوطنية للتحول نحو الطاقة المتجددة وتقليل بصمة الكربون [26-28]. وفي هذا السياق تعتبر GIS اداة حيوية لتحديد المواقع المناسبة لمشاريع الطاقات المتجددة [29]، وذلك لقدرته على تحليل البيانات الجغرافية والطبوغرافية والعمرانية والبنية التحتية والهيدرولوجية واستخدام التقنيات المختلفة لتصوير المعلومات، والاستشعار عن بعد. أن استخدام GIS في تحديد الاماكن المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ لم يتم تطبيقه من قبل في ليبيا (على حسب علم المؤلفين). حيث استخدم GIS في تحديد الأماكن المثلى لإنشاء محطات الخلايا الشمسية [29،30] ومزارع طاقة الرياح [31]، وأيضا استخدم البرنامج في عمليات الاستشعار عن بعد في التطبيقات البيئية [32] للتحقق من سلامة السدود المائية وإمكانية حدوث فيضانات في بعض المناطق مثل درنة وغدامس [33] وكشف ومراقبة حدوث تلوث في المنشأت النفطية [34].
الجدير بالذكر إن استخدام GIS في ليبيا لا يزال في مراحله الأولى، فعلى الرغم من أن العديد من الدراسات حول العالم (كما هو مبين في الشكل 1) بينت كيف ساهم استخدام نظم المعلومات الجغرافية في تحسين التخطيط والتنفيذ لمشاريع البنية التحتية في مختلف البلدان، إلا أن تطبيق التقنيات الحديثة مثل GIS في هذا المجال لازال محدودًا، ولم يتم استغلاله بشكل كامل بالرغم من نقص البيانات المناخية والجغرافية الدقيقة والذي يشكل مصدرا من مصادر اللايقين في اتخاذ القرار في تنفيذ مشاريع الطاقات المتجددة. كما أن الفجوات المعرفية في مجال GIS والعوامل المؤثرة على تحديث مواقع إنشاء مشاريع الطاقات المتجددة لا تزال بحاجة إلى البحث والتطوير [35].
أظهرت نتائج دراسة في أسبانيا أن استخدام GIS يساعد في تحديد الموقع الأمثل لتخزين الطاقة الهيدروليكية [36]. وفي مصرقام بتطوير معايير نموذج GIS باستخدام تقنية التركيبة الخطية الموزونة (WLC). تم استخدام نموذج الارتفاع الرقمي العالمي لتصوير معايير الارتفاع والانحدار. كما تم اعتبار شبكة الكهرباء وشبكات الطرق واستخدام الأراضي والمناطق المحظورة كمعايير لأداة التحليل المكاني Arc GIS. كشفت النتائج على العديد من المواقع المناسبة لإنشاء PHES وبمساحة إجمالية قدرها 10428 km^2، كما تم عرض خرائط للأماكن المثلى لإنشاء محطات PHES [37]. في الصين، قامت دراسة بتقييم امكانية انشاء محطات PHES في ثلاثة مواقع مختلفة التضاريس في شمال الصين، وذلك بتطوير نموذج تعريف المعايير الخاصة بمحطات PHES باستخدام ArcGisPro لتحديد المواقع الممكنة، واستخدمت طريقة صنع القرار المكانية متعددة المعايير لتصنيف المواقع. أظهرت النتائج أن هناك 994 موقعاً مناسباً في شمال غرب الصين، وبسعة إجمالية لتخزين الطاقة تبلغ 2.8 تيراوات ساعة. وصنفت المواقع الى ثلاثة مستويات شملت على 34 و843 و118 موقعا محتملا لإنشاء محطات PHES على التوالي. وبلغ إجمالي سعة تخزين الطاقة لهذه الهياكل حوالي 162.8، 1979.9، 678.1 جيجاوات ساعة، على التوالي. تتركز المواقع ذات الدرجات المركبة الأعلى إلى حد كبير في منطقة شينجيانغ ألتاي والمنطقة الوسطى من قانسو والمنطقة الشمالية الشرقية من تشينغهاي [38]. كما طورت دراسة أجريت في أستراليا تقنية تعتمد على GIS وعملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) لتحديد مواقع PHES بشكل مستقل بناءً على مجموعة من المعايير البيئية والتقنية. كذلك تم حساب تكلفة انتاج الطاقة (LCOE) من عدد محدود من المواقع المثلى، بالإضافة إلى إمكاناتها لخفض انبعاثات الكربون. حدد النهج 14 موقعاً محتملاً بطاقة اجمالية تقدر بحوالي 366.94 تيراوات ساعة طوال عمرها وتحول دون انبعاث

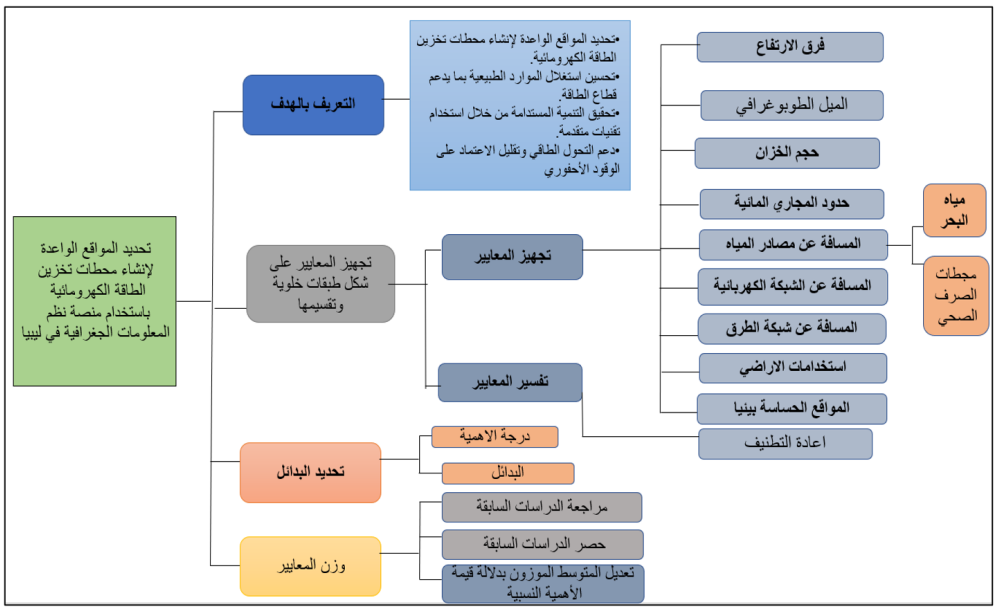
حوالي 300 كيلو طن CO_2. وتراوحت تكلفة انتاج الطاقة LCOE لمواقع PHES الأربعة عشر هذه بين 0.04 -0.27 دولار أسترالي/كيلووات ساعة. إن النهج المطور يساهم بشكل فعال في تحسين ادارة الطاقة والانتقال إلى اقتصاد خالٍ من الانبعاثات [39]. قدرت دراسة الإمكانات التقنية لمحطات PHES في إيران من خلال نماذج آلية قائمة على GIS تعتمد على أربع ركائز. تركز اثنتان منهما على وجود الخزانات العلوية والسفلية، بينما توفر الركيزة الثالثة، التي تم تطويرها على أساس الأنهار الدائمة في البلاد، المزيد من المواقع البديلة. وتقوم الركيزة الرابعة بتقييم إمكانات تزويد محطات PHES بمياه البحر كحل محتمل للمناطق التي تتميز بندرة المياه العذبة. يتم تطبيق طريقة TOPSIS على المواقع المكتشفة الممكنة لدمج الحساسية الاقتصادية في عملية التقييم. أظهرت النتائج أن إيران لديها تضاريس مواتية لإنشاء محطات PHES والإمكانات التقنية تصل إلى 5108 جيجاوات ساعة من 250 موقعاً مكتشفاً، مع مراعاة المسافة القصوى 20 كم بين خزانات محطة PHES [40]. كما أُجريت دراسة باستخدام GIS لتقييم إمكانيات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ صغيرة الحجم (Small-PHES) على نطاق واسع في هنغاريا. تم استخدام التحليل الطبوغرافي للكشف عن المسطحات المائية الطبيعية والمنخفضات الأرضية المناسبة لتخزين الطاقة. أظهرت الدراسة أن إمكانيات التخزين تتراوح بين 14 - 33 جيجاوات ساعة، مما يمثل حوالي 8% إلى 18% من القدرة التخزينية الحالية للطاقة المائية [41].

سعت الدراسة الحالية إلى سد الفجوة البحثية في هذا المجال، وذلك بتوظيف تقنية نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ في ليبيا، بناءً على معايير متعددة مثل الارتفاع، والانحدار، والقرب من البنية التحتية لشبكة الكهرباء وطرق المواصلات، ومصادر المياه، واستخدامات الأراضي. بالإضافة إلى إنشاء خرائط رقمية لدرجات الملاءمة المكانية لدعم تخطيط وتنفيذ مشاريع إنشاء محطات PHES. بالإضافة الى تقديم توصيات قائمة على نتائج التحليل تسهم في تحسين التخطيط المستقبلي لمشاريع محطات تخزين الطاقة في ليبيا بما يحقق الكفاءة الاقتصادية. مما يفتح مجال الموارد الطبوغرافية والديموغرافية المناسبة في ليبيا التي تتمتع بتضاريس مثالية للاستثمار في مثل هذه المشاريع. تقدم هذه الدراسة رؤى قيِّمة لصناع القرار والمستثمرين في قطاع الطاقة، حيث تساهم في تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية.

الشكل 1: التوزيع الجغرافي لاستخدام GIS في دراسات تحديد اماكن انشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ PHES .

2. منهجية البحث

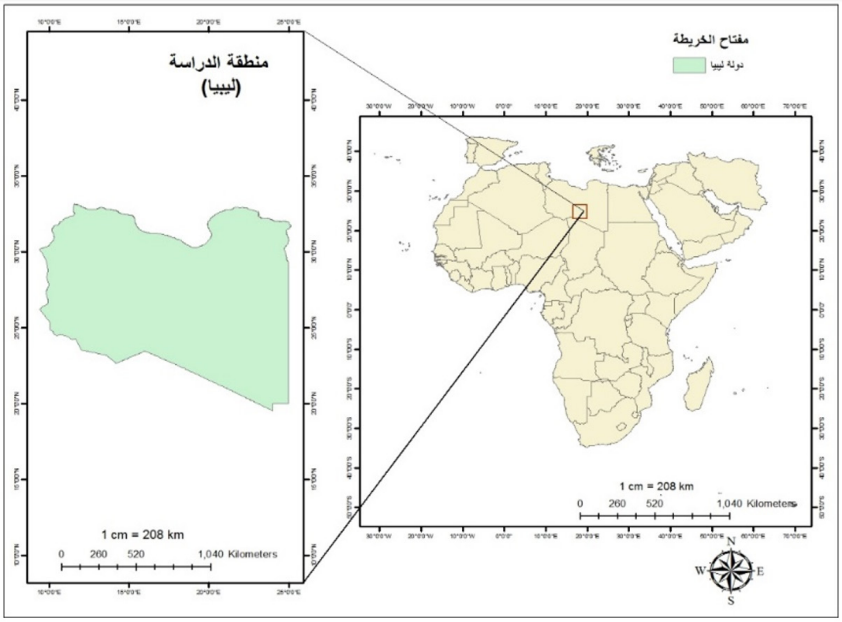
يمثل اختيار الموقع الخطوة الأكثر أهمية في إنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية. لذلك نحتاج الى إجراء تحليلاً للتحقق من ملاءمة الموقع استنادا على المعايير الفنية والاقتصادية التي يتم تحديدها من قبل المصمم. تم استخدام بيانات نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM) بدقة مكانية بحدود 30 مترا كمصدر بيانات طبوغرافية لتبني معايير فرق الارتفاع بين الخزانين وانحدار التضاريس. كما تم تحليل البيانات المكانية الإضافية الأخرى مثل شبكة الطرق وشبكة توزيع الكهرباء ومصادر المياه وبعض قيود استخدام الأراضي. ثم إصدار أداة التحليل المكاني في ArcGisPro3 للعثور على الخزانات العلوية الأكثر ملاءمة في ليبيا باستخدام تقنية التركيبة الخطية المرجحة (WLC) كوظيفة رئيسية في المنهجية المقترحة [42]. مُثلت المنهجية المتبعة في هذا البحث بيانيا في الشكل 2.



الشكل (2) منهجية البحث.

1.2. منطقة الدراسة

تقع ليبيا بين خطي طول °9-°25 شرق خط غرينتش وبين دائرتي عرض °19-°33 شمال الدائرة الاستوائية، ويحدها من الشمال البحر المتوسط ومن الجنوب تشاد والنيجر ومن الشرق مصر والسودان ومن الغرب تونس والجزائر، وتقدر مساحتها بحوالي 1759540 كيلو متر مربع وتطل على ساحل البحر المتوسط بحوالي 1900 كيلو متر [43]. يبين الشكل 3 الموقع الجغرافي لليبيا.



الشكل 3: الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة.

2.2. تقنية نظم المعلومات الجغرافية (GIS)

تتيح تقنية نظم المعلومات الجغرافية للمستخدمين تحليل وتحديد المواقع الجغرافية بشكل دقيق وفعال، وأيضا جمع البيانات الجغرافية وتحليلها لفهم العلاقات المكانية واتخاذ القرارات بناءً على هذه البيانات. وتشمل هذه البيانات الجغرافية المساحات الطبيعية والتضاريس والموارد الطبيعية والبنية التحتية وأكثر من ذلك. أما بالنسبة لأهمية GIS فإنه يلعب دوراً حيوياً في فهم البيئة وتخطيط الموارد وإدارة الكوارث وتحليل السوق واتخاذ القرارات الاستراتيجية

والاستشعار عن بعد، كما يساهم في تحسين الكفاءة في العمليات والخدمات وتحسين التنبؤات والتخطيط المستقبلي. وبفضل تطور التكنولوجيا أصبح من الممكن اليوم استخدام GIS بشكل متكامل مع العديد من التطبيقات والأنظمة الأخرى، مما يزيد من قدرته على تحليل وتقديم البيانات بشكل أفضل وأسرع، وبالتالي يعزز دوره في مجالات متعددة وخاصة في تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات توليد وتخزين الطاقات المتجددة. في الوقت الحالي تُعد التحليلات متعددة المعايير باستخدام GIS أداة فعالة لتحديد المواقع المثلى لإنشاء أي نوع من المشاريع، ويعتمد عدد ونوع المعايير المستخدمة بشكل أساسي على طبيعة المشروع، وحيث أن الهدف هو تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات PHES في ليبيا كنموذج لهذه الدراسة، وعليه فقد تم تصنيف هذه المعايير باستخدام معاملات ترتيب الاوزان

3.2. تحليل المعايير الطبوغرافية والديموغرافية

يتم تحليل الخصائص الجيومرفولوجية اللازمة لإنشاء محطات التخزين الكهرومائية باستخدام GIS لتحديد المواقع المثلى وفقاً للمعايير التالية:

- فرق الارتفاع بين القمة والقاعدة: فرق الارتفاع: يجب أن يكون الفرق بين الخزانين العلوي والسفلي كبيراً بما يكفي لضمان كفاءة الطاقة.
- الميل الطبوغرافي: حيث يجب أن يكون الميل مناسبًا لتدفق المياه.
- بعد مصدر المياه: يجب أن تكون المواقع قريبة من مصادر المياه لتقليل تكاليف نقل المياه.
- القرب عن الشبكة الكهربائية وخطوط توزيع الطاقة: القرب من شبكة الكهرباء القائمة يعد بالغ الأهمية في اختيار المواقع، حيث يقلل من تكاليف الربط والنقل ويسهل دمج الطاقة المنتجة في الشبكة، فكلما كان الموقع أقرب إلى البنية التحتية زادت جدواه الاقتصادية وقلّت التحديات الفنية.
- القرب عن الطرق وشبكة المواصلات: صعوبة الوصول الى المواقع بسبب التضاريس الوعرة أو البُعد عن الطرق الرئيسية يزيد من تكاليف النقل والبناء. كما يمكن أن تواجه فرق الصيانة والتشغيل صعوبات في الوصول الى الموقع، إضافة الى التحديات المتعلقة بتوفير المياه ومواد البناء.
- القرب من المناطق السكانية: لسهولة وصول العمال الى موقع المحطة وكذلك سرعة الحصول على الدعم اللوجستي.
- استخدامات الأراضي المحيطة: حيث يجب تحليلها لتجنب التأثيرات السلبية على الانظمة البيئية. حيث ينبغي تجنب المواقع التي قد تؤثر على النظم البيئية الحساسة أو المسارات الحيوية للحيوانات. وكذلك عدم التعدي على الاراضي الزراعية او الممتلكات الخاصة.

في الحقيقة لا توجد معايير محددة وإنما هي معايير نسبية، حيث تراوحت قيم الملاءمة العالية إلى المنخفضة وتراوحت قيم إعادة التصنيف المستخدمة من 1الى 5، حيث يمثل الرقم 5 الأكثر ملائمة كما موضح في الجدول 1.

الجدول 1: الرتب وتوزيع الاوزان لطبقات البيانات [27].

ر.م	العوامل	المستوى	الرتبة	درجة الملائمة	الوزن
1	الارتفاع	المرتفع	5	2200 m	%40
		المتوسط		550 m	
		المنخفض		188 m	
2	الانحدار	المرتفع	1	10-5 m	%5
		المتوسط		20-10 m	
		المنخفض		75-20 m	
3	مصادر المياه	مياه البحر	4	35 km	%25
		مياه الصرف الصحي		40 km	
4	القرب من الشبكة الكهربائية	3	50-20 km	%15	
5	القرب من شبكة المواصلات والطرق	3	80-50 km	%10	
6	استخدامات الارض	الأراضي الزراعية	2	40 km²	%5
		المناطق الحضارية			
		المحميات البيئية			

1.3.2. خطوات التنفيذ

1. يتم جمع البيانات الطبوغرافية باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) من خلال موقع

USGS EXPLOR Data لهيئة المساحة الامريكية وجمع بيانات استخدامات الأرض.
3. إدخال DEM إلى برنامج ArcGisPro3 ومعالجة القيم المفقودة.
4. تحليل الانحدارات (Slope Analysis) وهذه العملية تعتمد على حساب التغير في الارتفاع بين نقاط متجاورة لمعرفة مدى حدة الانحدار.
5. تحليل تدفق المياه (Flow Accumulation) ويتم تحديد المسارات الطبيعية لتدفق المياه باستخدام التحليل الهيدرولوجي مما يساعد في اختيار مواقع الخزانات السفلية التي يمكن أن تجمع المياه بشكل طبيعي.
6. يتم تصنيف المعايير بناءً على أهميتها باستخدام معاملات ترتيب الاوزان.
7. اختيار مواقع الخزانات وذلك من خلال تحديد مناطق ذات ارتفاعات مناسبة وبانحدارات مناسبة لتخزين المياه وتوجيهها كخزانات علوية، واختيار مواقع قريبة من الأودية أو مناطق منخفضة يمكن أن تكون مناسبة لتجمع المياه كخزانات سفلية.
8. باستخدام تقنيات تحليل الأوزان (Overlay weighted) تم تحديد المواقع الواعدة لإنشاء محطات التخزين، وإنتاج خرائط الملاءمة النهائية لمناطق الدراسة.

4.2. التمثيل الرياضي

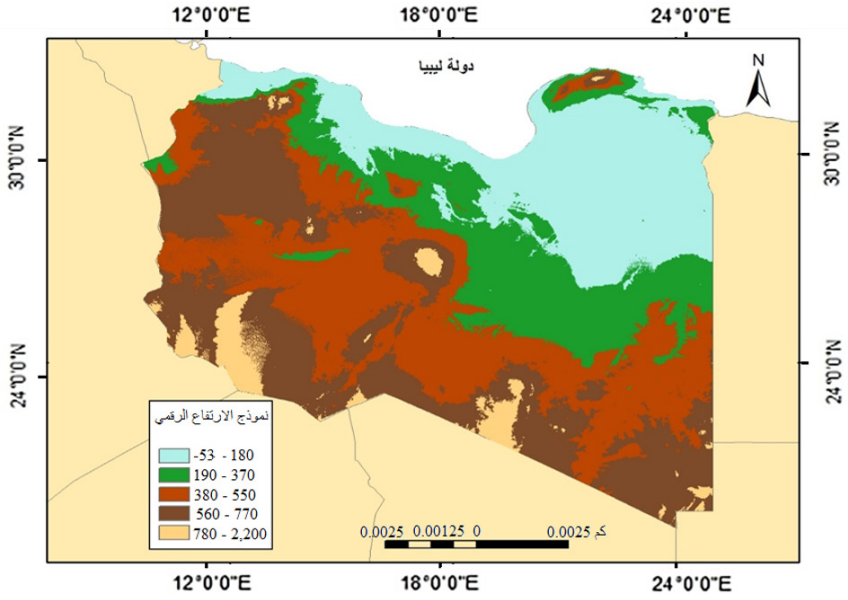
في هذا الجزء أُدرجت المعادلة المستخدمة لحساب السعة التخزينية لأنظمة تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ التي تم ترشيحها لإنشاء محطات PHES من GIS، وتمثلت في الصيغة الرياضية التالية [23]:

$$E = \rho g h v \eta \qquad (1)$$

حيث E: الطاقة المتاحة (جول). ρ: الكثافة النوعية للماء ($1000\ kg/m^3$). g: الجاذبية الأرضية ($9.81\ m/s^2$). h: الارتفاع بين الخزانين (m). v: حجم المياه في الخزان (m^3). η: كفاءة التوربين والمضخة (0.75 %) [21].
تم وصف النمذجة الرياضية والتحكم وحساب الحجم المثالي والتحليل الديناميكي لمستوى الطاقة في الخزان العلوي في العديد من الدراسات المتخصصة على سبيل المثال لا الحصر [21-25].

3. النتائج والمناقشة

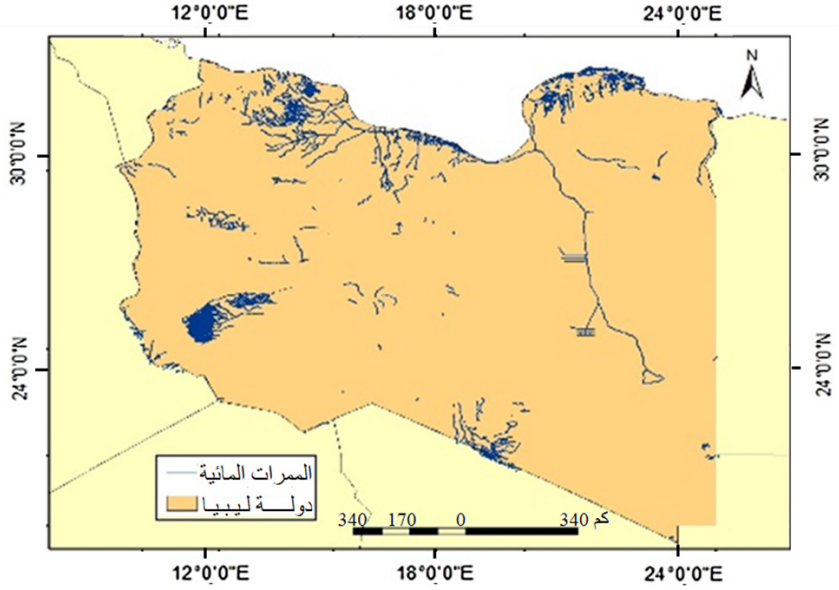
يوضح الشكل (4) نموذج الارتفاع الرقمي DEM وهي بيانات ذات تمثيل رقمي على صيغة Raster فكل Pixel يحتوي على قيمة رقمية تمثل متوسط الارتفاع عن مستوى سطح البحر في مساحة هذا البيكسل وهي عادة كبيرة المقياس وهي مفيدة لأغراض التخطيط واعتمدت الدراسة على استخدام DEM.



الشكل 4: خريطة نموذج الارتفاع الرقمي.

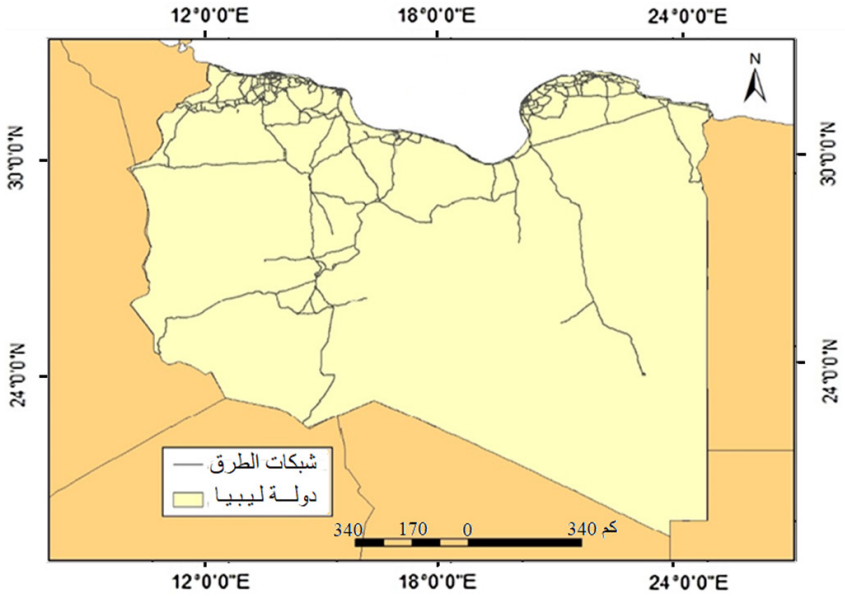
كما هو مبين في الشكل 4 تتراوح الارتفاعات من -53 الى 2200 مترا عن سطح البحر، حيث أن منسوب الارتفاعات بين نقطتين يمثل المعيار الأساسي في اختيار الأماكن الواعدة.
تعتبر ليبيا دولة صحراوية شحيحة المصادر المائية المتجددة، وتعتمد بصورة كبيرةً على المياه الجوفية لتغطية

احتياجاتها المائية، والتي تمثل أكثر من 97% من المياه المستخدمة، حيث توجد الأحواض الجوفية المتجددة في الشمال (في سهل الجفارة والجبل الأخضر وجزء من الحمادة الحمراء)، بينما توجد الأحواض الرسوبية الغير متجددة في الجنوب (مرزق والكفرة والسرير). تقدر المياه الجوفية المتجددة بما يتراوح بين 600-650 مليون متر مكعب/ السنة [44]. ولتعزيز كفاءة مشاريع PHES يُعد استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة حلاً مبتكرا لتزويد المحطات بالمياه المطلوبة، مما يقلل من الاعتماد على الموارد المائية الطبيعية ويزيد من استدامة هذه المشاريع. تقدر كمية مياه الصرف الصحي المنتجة يوميا في ليبيا بحوالي 1,324,054 متر مكعب [45]. يمثل الشكل (5) توزيع الموارد الهيدرولوجية في ليبيا، حيث تشير المساحات الزرقاء إلى أماكن تجمع المياه السطحية والموسمية. ويعتبر هذه الطبقة أداة أساسية لدعم اتخاذ القرار بناءً على التحليل الهيدرولوجي والجغرافي.



الشكل 5: توزيع الموارد المائية في ليبيا.

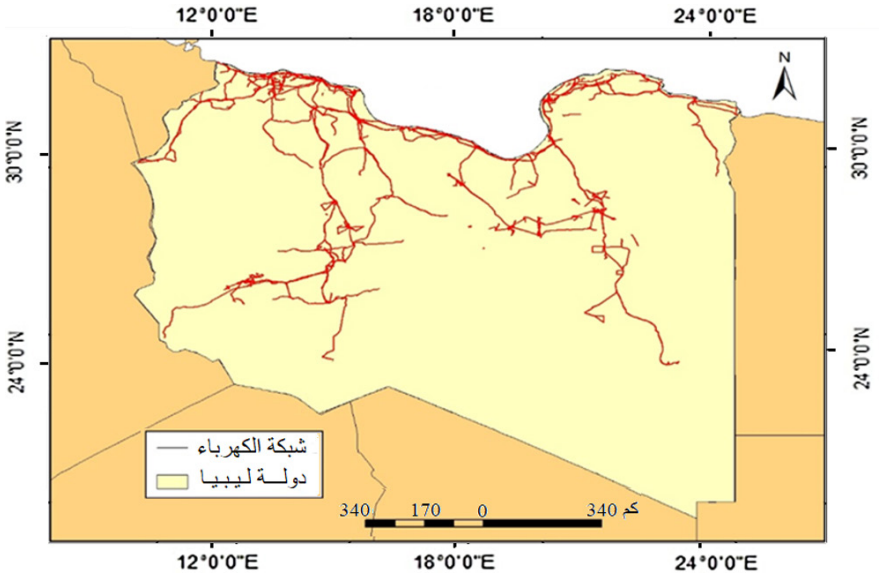
ليبيا دولة كبيرة، حيث تبلغ مساحتها نحو 1,759,540 كيلومتر مربعا، وتربط المدن شبكة طرق بطول 83,200 كيلومتر منها 47,590 كلم مُعَبّدة وحوالي 35,610 كيلومتر طرق غير معبدة، إضافة إلى ما يزيد عن 100 مطار ومهبط في مختلف مدن ليبيا [46]. يعرض الشكل (6) شبكة الطرق المعبدة في ليبيا تُعد هذه الخريطة أداة أساسية لتحليل البنية التحتية عند اختيار الموقع الأنسب لمشاريع إنشاء محطات PHES، حيث تلعب شبكة الطرق دورًا محوريًا في تقييم إمكانية الوصول والتكلفة اللوجستية للمشروع.



الشكل 6: شبكة الطرق البرية في ليبيا.

تُظهر الخريطة أن المواقع المناسبة لهذه المشاريع هي تلك الواقعة بالقرب من الطرق الرئيسية، خصوصًا في المناطق الساحلية الشمالية، حيث تتوافر الموارد المائية. يساهم هذا التكامل في تقليل التكاليف اللوجستية والآثار البيئية مع ضمان تشغيل المشروع بكفاءة.

توزع الطاقة الكهربائية في ليبيا عبر خطوط نقل الجهد 220، 400 كيلوفولت، ويتم توزيع الطاقة على خطوط نقل مساعدة الجهد المتوسط 30، 60 كيلوفولت وتغطي كافة المناطق الحضرية في ليبيا. بلغ إجمالي أطوال خطوط النقل ذات الجهد الفائق 400 كيلوفولت 2,290 كيلومترا، وبلغ أطوال شبكات الجهد العالي 220 كيلوفولت 706,13 كيلومترا، كما بلغ إجمالي شبكات الجهد المتوسط 30، 60 كيلوفولت حوالي 25,453 كيلومترا [47].



الشكل 7: شبكة الكهرباء في ليبيا.

يوضح الشكل 7 شبكة توزيع الطاقة الكهربائية في ليبيا ببعض وهو ما يجعل خطوط النقل والتوزيع قريبة من مواقع إنشاء محطات التخزين الكهرومائية عند الاختيار.

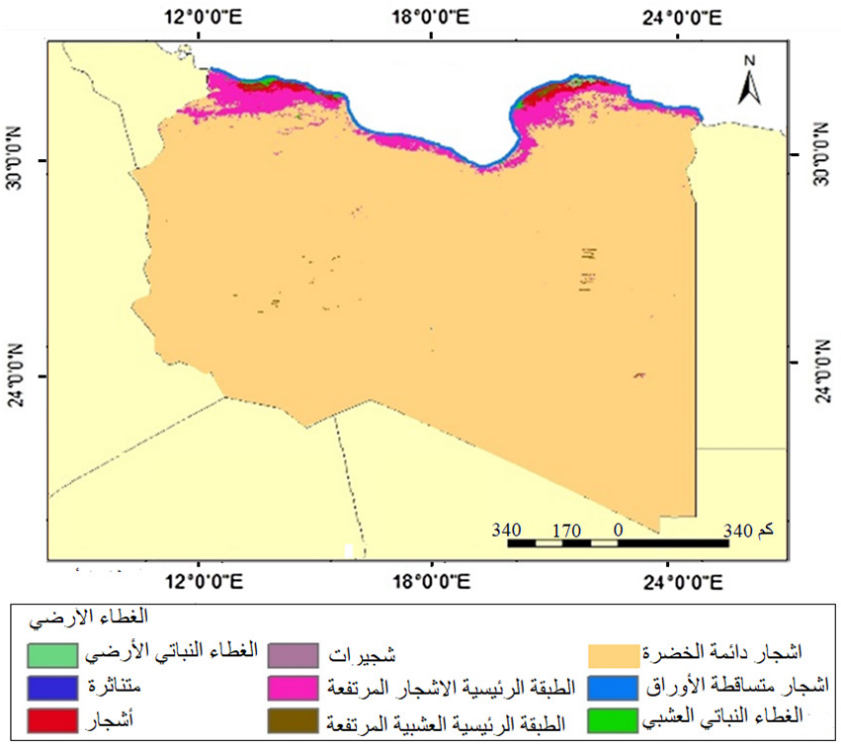
يتضح من الشكل الانتشار الواسع لشبكة خطوط نقل الطاقة الكهربائية الممتدة على مسافات طويلة وتغطي معظم الأراضي الليبية وهذا بدوره يزيد من فرص الأماكن المثلى لإنشاء محطات PHES بالنسبة لهذا المعيار.

إن استخدام الأراضي وممارسات إدارة الأراضي لها أثر كبير على الموارد الطبيعية بما في ذلك المياه والتربة والنباتات والحيوانات. تستطيع تقنية GIS تحديد طبقة لاستخدام الأراضي ومراقبة التغيرات فيها ووضع حلولا لقضايا إدارة الموارد الطبيعية مثل الزراعة والرعي والغابات والاعمار والمحميات الطبيعية والاماكن الاثرية. يمثل الشكل 8 الغطاء النباتي واستخدامات الاراضي وتوزيع الموارد البيئية في ليبيا.

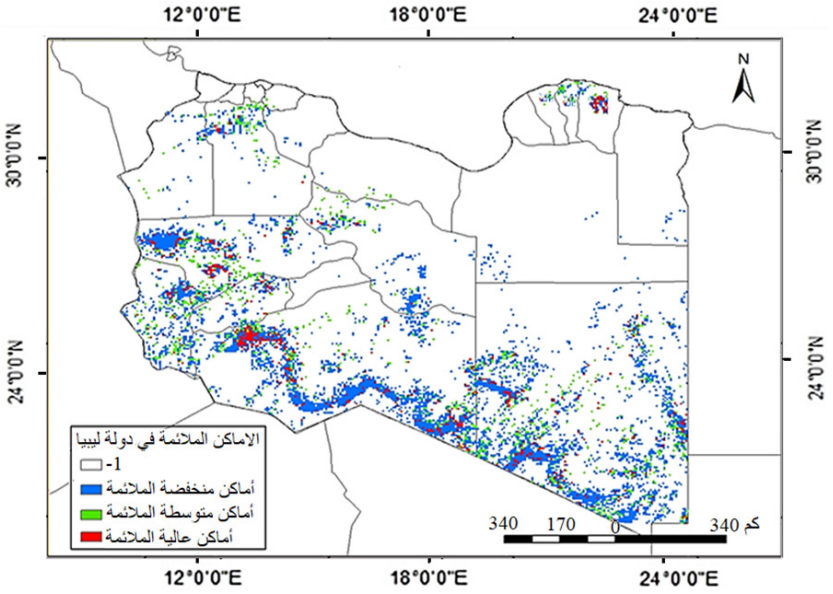
يفسر الشكل 8 العلاقة بين توفر المياه والنظام البيئي والطبيعة الجغرافية، حيث يتمركز السكان والانشطة الزراعية على الشريط الساحلي الضيق. تعتبر طبقة استخدامات الاراضي أداة مهمة لدعم اختيار الموقع الأنسب لإنشاء محطات PHES، ويساعد في اتخاذ قرارات مبنية على البيانات الموجودة على الارض. كما ويتضح من الخريطة ان معظم الأرض الليبية غير مستغلة وبالتالي ترتفع فرص استغلال هذه الاراضي لإنشاء مشاريع الطاقات البديلة بدون تأثيرات اضافية على البيئة المحلية.

يمثل الشكل 9 الخريطة النهائية للاماكن المثلى والتي تشكلت من تقاطع الطبقات الخمس والتي صنفت على أساس ثلاثة مستويات متدرجة حسب ملاءمتها للمعايير.

يتضح من الشكل 9 أن ما نسبته 24.73% من اجمالي مساحة البلاد يمكن أن يشكل هدفا لإنشاء محطات PHES. بينما يمثل الشكل 10 فلترة للمستوى المرتفع الملاءمة لمجموع الطبقات المدمجة في الشكل 9.

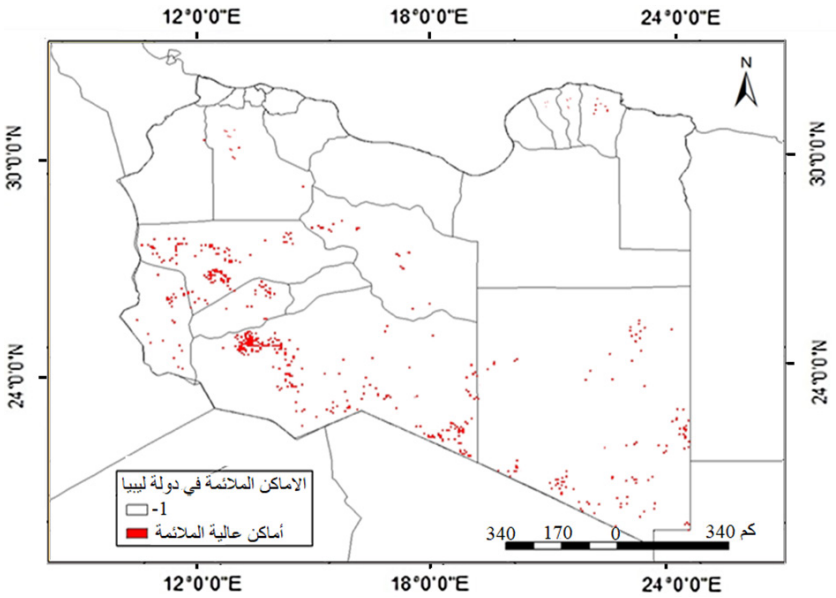


الشكل 8: خريطة استخدامات الأراضي.



الشكل 9: الأماكن الواعدة لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ.

يوضح الشكلان 9،10 أن أفضل المواقع لإنشاء محطات الطاقة الكهرومائية في ليبيا تتمركز في المناطق ذات التضاريس الجبلية. بداية من الأماكن ذات الملاءمة العالية (اللون الأحمر) والتي شكلت حوالي 4.90%، في حين تمثل الأماكن المتوسطة الملاءمة (اللون الأخضر) حوالي 6.15%، بينما تشكل الأماكن المنخفضة (اللون الأزرق) نحو 13.68% من إجمالي مساحة الاراضي الليبية. وتراوحت الارتفاعات للاماكن الواعدة بين 188- 2200 متر عن سطح الأرض. كما تم حساب السعة التخزينية المتاحة لتخزين الطاقة الكهرومائية لجميع المستويات الثلاثة وتراوحت بين 391– 4,583 وات ساعة لكل متر مكعب من حجم الخزان العلوي.



الشكل 10: الأماكن الأكثر ملائمة لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ.

يستعرض الجدول 2 احداثيات الاماكن المثلى من المستوى الثالث في بعض المناطق في ليبيا استنادا الى خرائط GIS وكذلك السعات التخزينية لمحطات الطاقة الكهرومائية بالضخ المقدرة من المعادلة (1) باعتبار كفاءة التوربين/ المضخة ثابتة حوالي 75% [21].

الجدول 2: عرض بعض الاماكن المثلى والسعات التخزينية للطاقة الكهرومائية في ليبيا.

المنطقة	الفرق بين الارتفاع (متر)	الاحداثيات (خط عرض ، خط طول)	السعة التخزينية (Wh/m^3)
الكفرة	200	23.31º، 24.17º	409
اجدابيا	188	20.22º، 30.75º	384
طبرق	192	23.96º، 32.08º	392
سرت	340	16.58º، 31.20º	695
مرزق	690	13.91º، 25.91º	1410
نالوت	640	10.59º، 31.52º	1308
المرج	410	20.83º، 32.48º	838
اوباري	490	12.76º، 26.58º	1001
درنة	620	22.63º، 32.76º	1267
وادي الشاطئ	560	14.26º، 27.54º	1145
الجفرة	840	15.94º، 29.12º	1717
الجبل الاخضر	910	21.66º، 32.40º	1860
الجبل الغربي	990	12.80º، 30.26º	2023
غات	2200	10.16º، 24.96º	4496
المجمـــــــــــــــوع			18946

تكمن أهمية الجدول 2 في صيغته العامة، حيث تم تحديد القدرات التخزينية لكل متر مكعب من حجم الخزان العلوي، حيث يتم تحديد هذا الاخير عن طريق حسابات الاثمدة الاقتصادية وميزان الطاقة بين التوليد ومتطلبات الطاقة لكل موقع على حده. استنادا على دراسة [23] والتي أجريت على موقع في منطقة وادي الشاطئ، لتغطية حمل كهربائي حوالي 1.2 ميجاوات، وقدر حجم الخزان بحوالي 166,532 مترا مكعبا وبالتالي يستطيع القارئ ان يقدر القدرات التخزينية الإجمالية لهذه المواقع.

فالبرغم من هذه القدرات العالية لتخزين الطاقة، الا انه لا توجد خطة معلنة لإنشاء مشاريع تخزين الطاقة بالضخ (على حسب علم الباحثين). غير ان الإطار العام للتحول نحو الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة مدرج في الخطة

الاستراتيجية للدولة الليبية في قطاع صناعة الطاقة للخمسة وعشرين سنة القادمة (2025-2050) حيث تهدف الخطة المعلنة على ان مساهمة الطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) في مزيج الطاقة لعام 2050 سيتعدى 50% من اجمالي الطاقة المنتجة في الدولة الليبية. وبطبيعة الحال سيكون لأنظمة تخزين الطاقة دورا محوريا في تنفيذ هذه الاستراتيجية. وعليه فان المجتمع يعول على مراكز البحوث والمؤسسات التعليمية بالقيام بالأبحاث والدراسات والعمل على توطين صناعة الطاقات المتجددة، ورسم خارطة طريق للتحول نحو الطاقات المتجددة والنظيفة أسوة بجميع الدول التي لديها اسهامات كبيرة في هذا المجال مثل الصين [48-52].

4. الاستنتاجات والدراسات المستقبلية

يتطلب تحقيق الاستدامة الاستغلال الأمثل لمصادر الطاقات المتجددة مثل (الطاقة الشمسية، والرياح وطاقة الكتلة الحيوية) كطاقة نظيفة وبديلة للمصادر التقليدية. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام أدوات وتكنولوجيا المعلومات وخاصة نظم المعلومات الجغرافية ونظم دعم القرار وبرامج الاستشعار عن بعد، وذلك لتحديد المواقع الجغرافية الأكثر ملاءمة لإنشاء مشاريع الطاقات المتجددة. تضمن هذا البحث استخدام نموذج لتحليل البيانات المكانية لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ، واستخدمت لذلك عدة عوامل لطبقات البيانات تضمنت نموذج الارتفاع الرقمي، ودرجة الانحدار والقرب من شبكة الكهرباء والقرب من الطرق ومصادر المياه، واستخدام الاراضي. بينت النتائج أن خرائط الملاءمة النهائية للاماكن المثلى توزعت على كافة البلاد، حيث تم تصنيف 24.73% من المساحة الكلية لليبيا كأماكن مثلى، من بينها حوالي 4.90% عالية الامكانية، في حين تمثل الأماكن المتوسطة الملاءمة حوالي 6.15%، بينما تشكل الأماكن المنخفضة نحو 13.68% من إجمالي مساحة الاراضي الليبية. وتراوحت الارتفاعات للاماكن المثلى بين 188- 2200 متر عن سطح الأرض. وقدرت السعات التخزينية المتاحة لتخزين الطاقة الكهرومائية لجميع الأماكن المثلى وتراوحت بين384 – 4,496 وات ساعة لكل متر مكعب. تعتبر هذه الدراسة الخطوة الاولى في مشروع بحثي سيقوم به المؤلفون، حيث سيتم استخدام GIS في الدراسات المستقبلية.

1. تحديد الاماكن المثلى لإنشاء حقول الطاقة الشمسية المركزة والخلايا الشمسية.
2. تحديد الاماكن المثلى لإنشاء مزارع الرياح.
3. تحديد شبكات وصل منظومات توليد الطاقة المتجددة الهجينة المتكاملة ومنظومات التخزين.
4. تحديد اماكن محطات شحن السيارات الكهربائية وتطوير قطاع المواصلات استعدادا للتحول نحو السيارات الكهربائية.

Author Contributions: All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication.
Funding: There is no funding for the article.
Data Availability: The data are available at request.
Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

[1] Qery."Renewable Energy Capacity Tracker". https://qery.no/renewable-energy-capacity-tracker/ 2024.

[2] Statista, Global pure pumped storage capacity 2010-2023, 2025. https://www.statista.com/ statistics/1304113/pumped-storage-hydropower-capacity-worldwide/

[3] L. Rtemi, W. El-Osta and A. Attaiep. "Hybrid System Modeling for Renewable Energy Sources". Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 1, pp. 13–28, 2023. https://doi. org/10.51646/jsesd.v12i1.146

[4] J. Rifa, et al. "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, vol. 441, no. 2, p. 140944, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140944

[5] F. Alasali, et al. "Assessment of the impact of a 10-MW grid-tied solar system on the Libyan grid in

terms of the power protection system stability." Clean Energy, vol. 7, no. 2, pp. 389–407, 2023. https://doi.org/10.1093/ce/zkac084

[6] A. Teyabeen, F. Akkari, A. Jwaid, A. Zaghwan and R. Abodelah. "Assessment of Wind Energy Potential In Zwara, Libya". Solar energy and sustainable development Journal, vol. 8, no. 2, pp. 34–49, 2019. https://doi.org/10.51646/jsesd.v8i2.28

[7] M. Almaktar and M. Shaaban. "Prospects of renewable energy as a non-rivalry energy alternative in Libya", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 143, p. 110852, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110852.

[8] A. Alsharif, et al. "Mitigation of Dust Impact on Solar Photovoltaics Performance Considering Libyan" Climate Zone: A Review. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 22-27, 2023. https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/7

[9] Y. Fathi, et al. "Optimum Number of Glass Covers of Thermal Flat Plate Solar Collectors" . Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2023. https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/35

[10] M. Abdunnabi, I. Rohuma, E. Endya and E. Belal. "Review on solar water heating in Libya". Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 7, no. SI, pp. 1–27, 2018. https://doi.org/10.51646/jsesd.v7iSI.72

[11] H. Shreif, W. El-Osta and A. Yagub. "Wind Resource Assessment for southern part of Libya": Case Study of Hun. Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 8, no. 1, 12–33, 2019. https://doi.org/10.51646/jsesd.v8i1.18

[12] H. El-Khozondar, 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

[13] 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://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.150

[14] A. Jary, M. Elmnifi, Z. Said, L. Habeeb and H. Moria." Potential wind energy in the cities of the Libyan coast, a feasibility study," Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, vol. 44, no. 7, pp. 236-252, 2021. https://www.researchgate.net/publication/352994227

[15] M. Khaleel, et al. "Towards Sustainable Renewable Energy". Appl. Sol. Energy, vol. 59, pp. 557–567, 2023. https://doi.org/10.3103/S0003701X23600704

[16] O. Mohamed and S. Masood,. "A brief overview of solar and wind energy in Libya". Current trends and the future development, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering".2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012136.

[17] 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.

[18] N. Abouhmod, et al. "Regression model for optimum solar collectors' tilt angles in Libya." In the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability, 08-09 May 2023, Gaza, Palestine. https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209547

[19] M. Abdunnabi, N. Etiab, Y. Fathi, H. El-Khozondar and R. Khargotra. "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy." Advances in Building Energy Research, vol. 17, no. 4, pp. 379–411, 2023. https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2209094

[20] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Fathi and H. El-Khozondar. "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya." In the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability, 08-09 May 2023, Gaza, Palestine. https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209521

[21] Y. Nassar, H. El-Khozondar and M. Fakher. "The role of hybrid renewable energy systems in covering power shortages in public electricity grid: An economic, environmental and technical optimization analysis." Journal of Energy Storage, vol. 108, no. 2, p. 115224, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115224.

[22] Y. Nassar, et al. "Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/Wind hybrid renewable system", Energy Conversion and Management,. vol. 322, no. 12, 2024. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119173.

[23] Y. Nassar, M. Abdunnabi, M. Sbeta and A. Hafez. "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system": A case study. Energy Conversion and Management, vol. 229, no. 2, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2020.113744.

[24] 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. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, 152-167, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_22.

[25] A. Ali, E. Karram, Y. Nassar and A. Hafez. "Reliable and economic isolated renewable hybrid power system with pumped hydropower storage." The 22nd international Middle East power systems conference, 14-16 December 2021, Assiut, Egypt, pp. 515-520 . https://do.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686233

[26] Y. Nassar, M. Salem and H. El-Khozondar. "Estimation of CO2 Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya". Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 14, no. 1, 2025. pp. 42–55. https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.415

[27] M. Abuqila, Y. Nassar, and M. Nyasapoh. "Estimation of the Storage Capacity of Electric Vehicle Batteries under Real Weather and Drive-mode Conditions: A Case Study". Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, 3(1), 58-71, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_10

[28] M. Khaleel, et al. "Evolution of Emissions: The Role of Clean Energy in Sustainable Development." Challenges in Sustainability, vol. 12, no. 2, pp.122-135, 2024. https://doi.org/10.56578/cis120203

[29] E. Najem and F. Alhadar. "Utilizing Geographic Information Systems to Identify Optimal Locations for Establishing Solar Power Plants in the Sebha Region." Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 14, no. FICTS-2024, pp. 36–54, 2025. https://doi.org/10.51646/jsesd.v14iFICTS-2024.442

[30] I. Badi, D. Pamucar, L. Gigović and S. Tatomirović. "Optimal site selection for sitting a solar park using a novel GIS- SWA'TEL model": A case study in Libya. International Journal of Green Energy,2021. vol. 18,no. 4, pp. 336–350. https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1854264

[31] T. El hasady and M. Hasni. "GIS-Based Decision Support System for Wind Farm Site Selection." Alqrtas Journal, vol. 14. 2021. https://alqurtas.alandalus-libya.org.ly/ojs/index.php/qjhar/article/view/385/322

[32] H. Zurqani. Environmental Applications of Remote Sensing and GIS in Libya. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97810-5_12

[33] H. Algassie, M. Fakroun, M. Miskeen and I. Gargar. "The Use of GIS and Multi-Criteria Fuzzy Logic to Assess and Identify Flood-Prone Areas in the Greater Ghat Region". Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 37-47, 2023. https://www.waujpas.com/index.

php/journal/article/view/15

[34] K. Abdunaser. "Oil Pollution Monitoring and Detection Using GIS and Remote Sensing Techniques": A Case Study from Libya. In: Springer, Cham.2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97810-5_11

[35] S. Mohammed, Y. Fathi, H. Algassie, A. Mahammed, H. El-Khozondar and A. Alatrash. "Exploring Promised Sites for Establishing Hydropower Energy Storage (PHES) Stations in Libya by Using the Geographic Information Systems (GIS)." Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 85-94, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_13

[36] J. Ruiz, J. Haya, R. García, P. Alonso and R. Álvarez. "Optimal location of hydraulic energy storage using geographic information systems and multi-criteria analysis". Journal of Energy Storage, vol. 49, no. 5, p. 104159, 2022. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104159.

[37] H. Ahmed, M. Mohamed and S. Saleh. "A GIS model for exploring the water pumped storage locations using remote sensing data". The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, vol. 24, no. 3, pp. 515-523, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.006.

[38] J. Li, D. Chen, W. Han, P. Wang, Z. Zhao and G. Liu. "Site identification and capacity determination of pumped hydro storage plants using GIS and spatial MCDM in Northwest China". Energy Conversion and Management, vol. 322, no. 12, p. 119179,2024. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119179.

[39] S. Ali, R. Stewart, O. Sahin and A. Vieira. "Integrated GIS-AHP-based approach for off-river pumped hydro energy storage site selection". Applied Energy, vol. 337, no. 5, p. 120914, 2023. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120914

[40] N. Ghorbani, H. Makian and C. Breyer. "A GIS-based method to identify potential sites for pumped hydro energy storage - Case of Iran". Energy, vol. 169, no. 12, pp. 854-867, 2019. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.073

[41] T. Soha, et al. "GIS-based assessment of the opportunities for small-scale pumped hydro energy storage in middle-mountain areas focusing on artificial landscape features", Energy, vol. 141, no. 12, p. 1363-1373, 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.051

[42] B.Lu, M. Stocks, A. Blakers, K. Anderson,. "Geographic information system algorithms to locate prospective sites for pumped hydro energy storage",.2018. Applied Energy, vol. 222, no. 7, pp. 300-312. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.177.

[43] https://www.embassyoflibya.ca/pages/about-libya-ar

[44] General Water Authority, Water report.2020. https://water.fanack.com/ar/libya/water-resources-in-libya/

[45] A. Miskeen, et al. "Electricity from wastewater treatment plants". Solar Energy and Sustainable Development Journal,.2023. vol. 12, 2,pp. 24–37. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i2.156.

[46] Y. Nassar, et al. "Towards Green Economy: Case of Electricity Generation Sector in Libya", Solar Energy and Sustainable Development Journal,.2025 vol. 14, no.1, pp. 334-360, 2025. https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.549

[47] General Electricity Company of Libya,.2012 Statistics http://www.gecol.ly/resources/documents/reports/static_ar_2012.pdf

[48] 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, 35-42, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_7.

[49] 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, no. 1, 142-151, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_21

[50] A. Aqila, and S. Suliman. "Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Battery) Under Real Climatic and Operational Conditions to Meet Full Load of the Residential Sector: A Case Study of a House in Samno Village– Southern Region of Libya". Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences,2025. vol. 3, no. 1, 168-181. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23.

[51] M. Khaleel, T. Ghandoori, A. Ahmed, A. Alsharif, A. Alnagrat and A. Abulifa. "Impact of Mechanical Storage System Technologies: A Powerful Combination to Empowered the Electrical Grids Application," 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. 628-636, https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837670.

[52] M. Khaleel, et al. "Analyzing China's Solar PV Sector: Lessons for Global Application." Solar energy and Sustainable Development Journal. Under consideration.