

Green Hydrogen Production in Libya: Opportunities for Harnessing Solar Energy to Achieve Sustainable Development and Economic Diversification

Ablqasim Bassam ^{1*}, Rodwan Elhashmi ², Albahloul Abdulghafur³

^{1,2,3} Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
University of Gharyan, Gharyan, Libya

إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا: فرص الاستفادة من الطاقة الشمسية لتحقيق التنمية المستدامة وتنويع الاقتصاد

بسام أبوالقاسم ^{1*}، رضوان الهاشمي ²، عبد الغفور البهلوان ³

^{3,2,1} قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة، جامعة غريان، غريان، ليبيا

*Corresponding author: Bassam.aboled@gmail.com

Received: October 18, 2025 | Accepted: November 25, 2025 | Published: December 07, 2025



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract:

Libya faces a significant challenge in transitioning from near-total dependence on fossil fuels to sustainable energy systems. This study aims to explore the feasibility of producing and utilizing green hydrogen as a clean energy alternative, leveraging Libya's abundant solar resources, which average 4.94 kWh/m²/day in Tripoli and up to 6 kWh/m²/day in other regions. Using the HOMER Pro software, a system was designed to produce 100 kg/day of green hydrogen through solar-powered electrolysis, with seasonal adjustments to increase production to 150 kg/day during peak solar months (April - October). The proposed system includes solar panels with a capacity of 4656 kW, lithium-ion battery storage with a capacity of 9530 kWh, and an electrolyzer with a capacity of 2000 kW, resulting in an annual production of 36,498 kg. Economic analysis reveals a levelized cost of energy (LCOE) of \$0.42/kg, which is competitive with global standards, and a total net cost of \$12.78 million. The project highlights Libya's potential to reduce carbon emissions, diversify its economy, and position itself as a key supplier to European markets. The study also addresses challenges such as political stability, infrastructure deficits, and the need for legislative frameworks, alongside recommendations for investment and an overview of major green hydrogen projects in North Africa and worldwide.

Keywords: green hydrogen, solar energy, Electrolysis, Sustainable Development,

الملخص

تواجه ليبيا تحدياً كبيراً في الانتقال من الاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري إلى أنظمة الطاقة المستدامة. تهدف هذه الدراسة إلى البحث في إمكانية إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر كبدائل نظيف للطاقة وذلك بالاستفادة من الموارد الشمسية الوفيرة في ليبيا، والتي تبلغ في المتوسط 4.94 kWh/m²/day في طرابلس وتصل إلى 6 kWh/m²/day في مناطق أخرى. باستخدام برنامج HOMER Pro، تم تصميم المنظومة لإنتاج 100 kg/day من الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي والذي يعمل بالطاقة الشمسية، مع تعديلات موسمية لزيادة الإنتاج إلى 150 kg/day خلال أشهر الذروة الشمسية (أبريل - أكتوبر). يشمل النظام المقترن أواح طاقة شمسية بقدرة 4656 kW، تخزين بطاريات ليثيوم أيون بسعة 9530 kWh، ومحول كهربائي بقدرة 2000 kW، مما ينتج إنتاجاً سنوياً يبلغ 36,498 Kg. يكشف التحليل الاقتصادي عن تكلفة متوسطة للطاقة تبلغ \$0.42/kg، وهي تنافسية مع المعايير العالمية، وتكلفة صافية إجمالية تبلغ 12.78 مليون دولار.

يبز المشروع قدرة ليبا على تقليل انبعاثات الكربون وتتنوع اقتصادها، وتحديد موقعها كمورد رئيسي للأسوق الأوروبية. كما تتناول الدراسة التحديات مثل الاستقرار السياسي، العجز في البنية التحتية، وال الحاجة إلى إطار تشريعية، بجانب التوصيات للاستثمار. بالإضافة إلى عرض لهم مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال إفريقيا والعالم.

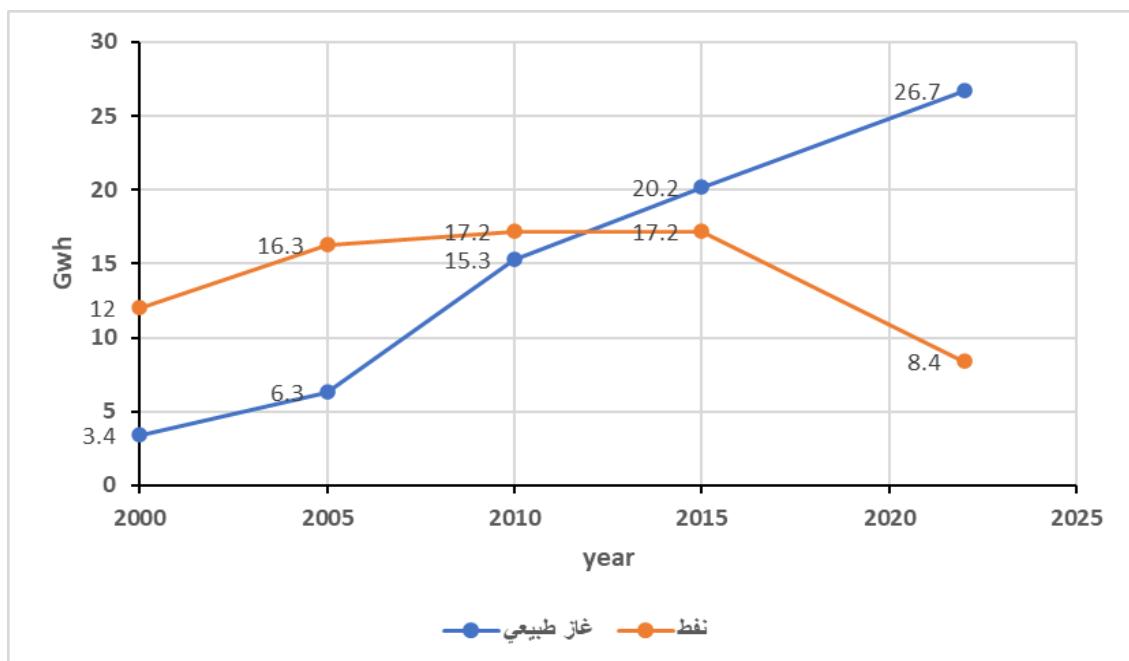
الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الأخضر، الطاقة الشمسية، التحليل الكهربائي، التنمية المستدامة.

المقدمة

إن الطلب العالمي المتزايد على الطاقة أدى إلى الطلب على تنوع مصادر الطاقة وخاصة الطاقة المتجدد، حيث تعتمد ليبا حالياً بشكل كلي على مصادر الطاقة غير المتجددة (الشكل 1)، لذلك أصبح وجود مصدر للطاقة النظيفة والمتجددة أحد أسس التنمية المستدامة، لذلك أصبح من الضروري البحث عن مصدر طاقة بديل للنفط والغاز المصدر الوحيد للطاقة في ليبا كما مبين في الشكل (2). وتبث هذه الدراسة في تحديات وآفاق إمكانات إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبا واستخدامه للتطبيق المستقبلي، كما تقدم نظرة عامة على فوائد التحول إلى تقنية الهيدروجين الأخضر. إن إنتاج الهيدروجين سيوفر مصدر طاقة بديل في ليبا، وسيكون بدليلاً أفضل لمصادر الطاقة المتاحة حالياً لأنها طاقة مستدامة وصديقة للبيئة. وتؤكد الدراسة أن ليبا من أكثر الدول الواعدة لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين الأخضر لعدة أسباب، وأهمها توفر الطاقة الشمسية. تتمتع ليبا بإشعاع شمسي مرتفع (3000 إلى 3500 ساعة من أشعة الشمس سنويًا)، ومناخ حار وجاف، ومناطق شاسعة غير مأهولة بالسكان، 88% منها مغطاة بالصحراء. بالإضافة إلى ذلك، من المحتمل أن تتوفر طاقة الرياح والطاقة الحرارية في ليبا. علاوة على ذلك، تتمتع ليبا بموقع استراتيجي قريب من السوق الأوروبية [1].



الشكل 1: مصادر توليد الكهرباء، ليبا، 2022 [2].



الشكل 2: تطور مصادر توليد الكهرباء في ليبا منذ عام 2000 [2].

مفهوم الهيدروجين وأنواعه

الهيدروجين هو غاز عديم اللون والرائحة وغير سام، كما أن كثافته تقل عن كثافة الهواء بنحو 14 مرة، ويتوافر بكميات لا تنضب في أنحاء العالم كافة، لكن المشكلة تكمن في أنه لا يوجد حرجاً إلا في حالات نادرة للغاية، لهذا فإن الحصول عليه يتطلب فصله عن العناصر الأخرى، إذ يكون غالباً مرتبطاً بجزيئات أخرى، سواء مع الغاز الطبيعي في الحالة الغازية أو مع الماء والنفط في حالته السائلة، ومن هنا جاءت مسمياته حسب طريقة فصله أو إنتاجه إلى عدة مسميات أبرزها:

- الهيدروجين الرمادي: ينتج من الوقود الأحفوري، غالباً النفط والغاز، ويرافق ذلك انبعاثات الكربون وغيرها.
- الهيدروجين الأزرق: ينتج من الوقود الأحفوري، إلا أنه يرافق عملية إنتاج الهيدروجين احتجاز الكربون.
- الهيدروجين الأخضر: يُنتج عن طريق التحليل الكهربائي للماء، ولا ينبع عن ذلك أي انبعاثات، على فرض أن الكهرباء تأتي من طاقة متعددة [3].

الهيدروجين الأخضر وأهميته في الانتقال إلى الطاقة المستدامة

منذ أكثر من عقدين تصاعد الاهتمام العالمي بالتحول نحو استخدام مصادر الطاقة النظيفة بما في ذلك الطاقة الشمسية والرياح إلى جانب المصادر الأخرى، وذلك من أجل معالجة مشكلة الانبعاثات الكربونية العالمية التي تفرض تغيرات مناخية عديدة ذات تبعات اقتصادية وسلبية جسيمة. ولكي يحافظ العالم على الزيادة في متوسط درجة الحرارة العالمية عند أقل من 2 درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعية، ينبغي خفض صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 45% بحلول عام 2030 من مستويات عام 2010، على أن تصل إلى صفر بحلول عام 2050. ويعتبر التحول نحو استخدام الهيدروجين الأخضر أو المتجدد ضمن الحلول الرئيسية التي طرحت مؤخراً من جهة العديد من الحكومات العالمية من أجل مساندة الجهود العالمية الرامية لخفض الانبعاثات الكربونية. وبإمكانه أن يلعب دوراً حيوياً في تعزيز الانتقال نحو استخدام الطاقة النظيفة نظراً لما يتمتع به من الوفرة في الطبيعة، وإمكانية تخزينه ونقله لمسافات طويلة [4].

كيف يمكن للهيدروجين الأخضر المساهمة في تحقيق التنمية الاقتصادية في ليبيا

تتمتع ليبيا بفرص واعدة لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر، وفقاً لتقرير وكالة الطاقة الدولية، يعتبر الهيدروجين الأخضر أحد الحلول الفعالة للتحول إلى الطاقة النظيفة، خاصة في ظل الارتفاعات القياسية في أسعار الطاقة عالمياً.

1. التكلفة الاقتصادية

أشارت الوكالة إلى أن إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال أفريقيا، بما في ذلك ليبيا، يمكن أن يكون بتكلفة أقل من دولار واحد للكيلوغرام، حيث تتراوح التكاليف في بعض المناطق حول \$ 1.5 فقط. هذه التكلفة المنخفضة تعزز من قدرة ليبيا على المنافسة في السوق العالمي للهيدروجين [5].

2. الأثر الاقتصادي

- خلق فرص العمل: يمكن أن يؤدي تطوير صناعة الهيدروجين الأخضر إلى خلق العديد من فرص العمل في مختلف القطاعات، بما في ذلك التصنيع والطاقة المتعددة.

- جذب الاستثمارات: من المتوقع أن يجذب قطاع الهيدروجين الأخضر استثمارات محلية ودولية، مما يسهم في تعزيز الاقتصاد الوطني.

- تحسين الأمان الطاقي: من خلال التحول إلى مصادر الطاقة المتعددة، يمكن لليبيا تقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري، مما يعزز من أمنها الطاقي [6].

مصادر الطاقة في ليبيا

تتميز ليبيا بموقعها الجغرافي بين دول أفريقيا وجنوب أوروبا، وتنوع تضاريسها، وأجوائها المدارية والصحراوية، وبمساحتها الشاسعة التي تبلغ $1.7 \times 10^6 \text{ Km}^2$ ، وساحلها الذي يبلغ 1900 Km، كما تمثل الصحراء 88% من مساحتها، مما يجعلها وفيرة بمصادر الطاقات المتعددة، كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، المتوفرة بكميات غير محدودة وبدون ثمن، زيادة على أنها صديقة للبيئة، إلا أنها لازالت تعتمد

على النفط والغاز كمصدر للطاقة. جدول رقم (1) يبين مصادر الطاقة ونسبة وجودها، ويبلغ الطلب الأقصى على الطاقة الكهربائية 5981MW بمعدل استهلاك 4850 kWh/year، وتعتبر الصناعات النفطية، وصناعة الحديد والصلب، وصناعة الإسمنت من أهم الصناعات التي تحتاج إلى كميات كبيرة من الطاقة .[7]

جدول 1: مصادر الطاقة في ليبيا [7]

طاقة الرياح	الطاقة الشمسية	الغاز الطبيعي	البترول
سرعة رياح بمتوسط عال بمناطق متعددة	إشعاع شمسي بمتوسط 2470 kWh/m ² /day ثانٍ أعلى إشعاع بالعالم	احتياطي بأكثر من 10 بلايين برميل نفط مكافئ (رابع أكبر احتياطي بأفريقيا)	احتياطي بأكثر من 43 بلايين برميل نفط مكافئ (أكبر احتياطي بأفريقيا)

فرص إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا

تتمتع ليبيا بفرص كبيرة لإنتاج الهيدروجين الأخضر حيث تقع ليبيا في قلب الحزام الشمسي، ويصل دوام الإشعاع الشمسي (3000-3500) ساعة/السنة، ويعتبر الإشعاع الشمسي في ليبيا عال جداً، حيث يصل متوسطه الإشعاع الشمسي ببعض مناطق بلبيبا، كما يوضح الجدول (2) إلى أكثر من 6 kWh/m^2 ، بالنسبة إلى الرياح يوضح جدول رقم (3) متوسط سرعة الرياح ببعض المناطق الليبية، اعتماداً على الارتفاع عن مستوى سطح الأرض، وتعتبر هذه السرعات جذابة للاستثمار في هذا المجال. كل هذة الإمكانيات تساعد في إنتاج الهيدروجين بالمنطقة وبسعر جيد[7] .

جدول 2: المتوسط اليومي للإشعاع الشمسي (kWh/m^2) لبعض مناطق ليبيا [7]

المدينة	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر	المتوسط
طرابلس	2.95	3.87	5.0	5.97	6.45	7.09	7.05	6.47	5.06	4.1	3.5	1.83	4.94
غات	4.0	4.8	4.7	6.3	6.6	6.8	5.8	5.1	4.1	4.1	3.5	3.36	5.36
جalo	3.66	4.54	5.37	6.74	7.16	7.17	6.74	6.74	5.83	4.86	3.44	3.48	5.48
سبها	4.18	4.88	5.81	6.68	6.65	7.35	7.26	6.96	6.51	5.56	3.97	3.88	5.88
شحلت	2.3	2.72	3.93	5.45	6.05	6.73	6.72	6.14	4.67	3.59	2.69	1.97	4.41
هون	3.54	4.22	5.1	6.61	6.61	7.06	7.09	6.91	5.72	4.8	3.19	3.34	5.34
الكفرة	3.43	4.38	5.84	6.86	7.24	7.43	7.25	7.19	6.45	5.67	4.7	3.99	6.05
القرىات	3.85	4.63	5.65	6.75	6.65	7.12	7.39	7.02	5.45	4.32	3.47	3.2	5.43
القبة	3.8	4.7	5.71	7.1	7.67	7.1	7.66	7.1	6.23	5.13	4.0	3.51	5.77

جدول 3: متوسط سرعة الرياح لبعض المناطق الليبية [7]

الموقع	متوسط السرعة (m/s)	A (m/s)	K	كثافة القدرة (W/m^2)
العزيزية	6.35	7.12	1.73	334.6
الأصابعة	7.35	8.20	1.60	566.9
ترهونة	7.14	8.06	2.15	368.6
مسلسلات	6.68	7.54	2.39	291.5
مصراته	6.46	7.40	2.33	286.0
سرت	6.40	7.30	2.50	263.0
المقرون	7.20	8.10	2.34	376.0
طلميطة	6.20	6.90	1.70	328.0
درنة	8.00	9.00	2.60	480.0

تبين مما سبق أن ليبيا تمتلك موارد هائلة غير مستغلة من الطاقة المتجدددة، خاصة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، مما يؤهلها لتصبح لاعباً رئيسياً في إنتاج الهيدروجين الأخضر عالمياً. ومع ذلك، تواجه البلاد تحديات تعوق استغلال هذه الموارد، بسبب عدة عوامل منها البنية التحتية المتأخرة في قطاعي الطاقة والمياه، أضف إلى هذا الاعتماد التاريخي والكامل على النفط والغاز. أيضاً عدم وجود إطار تشريعي واضح أو استراتيجية وطنية لدعم إنتاج/تصدير الهيدروجين ونقص الخبرة المحلية وقلت الأبحاث في تقنيات الهيدروجين. وأخيراً غياب مشاريع الطاقة المتجدددة واسعة النطاق والتکاليف العالية لتوريد الم حللات الكهربائية (Electrolyzers)، وأنظمة تخزين ونقل الهيدروجين.

يمكن أن يُسهم التحول إلى الهيدروجين الأخضر في تنويع الاقتصاد الليبي وخفض الانبعاثات الكربونية بالإضافة إلى تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة النظيفة والاسهام في امن واستدامة الطاقة. ولذلك يهدف هذا البحث إلى دراسة نظرية لموارد الطاقات المتجدددة وفرص انتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا، تصميم منظومة لإنتاج الهيدروجين الخضر في طرابلس ليبيا بقدرة إنتاجية 100 kg/day، مع تعديلات موسمية لزيادة الإنتاج إلى 150 kg/day خلال أشهر الذروة الشمسية (أبريل – أكتوبر)، وذلك باستخدام برنامج هومر برو. ودراسة تكلفة انتاج الهيدروجين الخضر في ليبيا التكلفة حسب السوق العالمي نظراً إلى افتقار ليبيا لهذا النوع من مصادر الطاقة.

أهم مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال أفريقيا والعالم

يُعد إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال أفريقيا أحد الحلول المعتمدة أمام أوروبا لتنفيذ خططها بشأن التزود بذلك الوقود النظيف، في ظل الإمكانيات الكبيرة غير المستغلة التي تتمتع بها القارة السمراء. ويستهدف الاتحاد الأوروبي استيراد 10 ملايين طن سنوياً من الهيدروجين الأخضر بحلول عام 2030، لتسريع دولة إلى توقيع مذكرات تفاهم وتقديم عروض لتمويل المشروعات في أفريقيا.

وبفضل موارد الطاقة الشمسية والرياح القوية التي تتميز بها شمال أفريقيا والتي تدعيمها أيضاً الأراضي المتاحة وخطوط أنابيب تصدير الغاز إلى أوروبا، تبرز دول المنطقة بوصفها مركزاً محتملاً لإنتاج الهيدروجين الأخضر.

مشاريع الهيدروجين في مصر: تواجه القاهرة طلباً محلياً متزايداً على استعمالات الهيدروجين في الصناعات كثيفة الاستهلاك، بهدف التخلص من الكربون، كما عززت الحكومة هذه الرؤية بمبادرات صديقة للبيئة تضمنت تشريعات مساندة وامتيازات. ومن أبرز مشروعات الهيدروجين في مصر:

- مشروع الشركة المصرية للصناعات الأساسية إيباك (EBIC): وهو مشروع تطوير شركة فيرتيلجلوب (Fertiglobe) متعددة الجنسيات، ومقرّها أبو ظبي، بسعة تحليل كهربائي قدرها 100 ميجاواط.

- مشروع الشركة القابضة لكهرباء مصر (EEHC): هو مشروع مع شركة سيمنس (Siemens) الألمانية، يهدف إلى إنتاج الهيدروجين الأخضر بقدرة تحليل كهربائي تتراوح بين 100 إلى 200 ميجاواط.

مشاريع الهيدروجين في المغرب: تتعذر خبرة المغرب انعكاساً لقدرات تطوير الهيدروجين الأخضر في أفريقيا، إذ حظي بتقنية دولية بصفته مصدراً رئيساً، وزادت فرص رياضته في هذا المجال بعدما منحه بنك التنمية الأفريقي المرتبة الثانية على مستوى القارة في الأداء الصناعي. ومن أبرز مشروعات الهيدروجين في المغرب:

- مشروع مجموعة أو سي بي (OCP): يستهدف إنتاج 260 طن سنوياً.
- مشروع مازن للهيدروجين الأخضر: من المقرر أن يبدأ المشروع عام 2025، بقدرة تحليل كهربائي قدرها 100 ميجاواط.

- مشروع هيغو: تطور مشروع هيغو شركة فيوجن فيو (Fusion Fuel) الأيرلندية، بدءاً من عام 2026، ويهدف إلى إنتاج 31 ألف طن سنوياً من الهيدروجين، لينطلق نحو التصدير وإنعاش صدارة الهيدروجين الأخضر في أفريقيا [8].

مشروع "نيوم" في السعودية: يهدف هذا المشروع إلى بناء أكبر منشأة هيدروجينية تجارية على مستوى المراقب في العالم تعمل بالكامل بالطاقة المتعددة، عند تشغيل المشروع في عام 2026، ستنتج المنشأة 600 طن متري من الهيدروجين النظيف يومياً من خلال التحليل الكهربائي، إضافة إلى إنتاج النيتروجين عن طريق فصل الهواء. وب مجرد تشغيل المنشأة سيكون الهيدروجين الأخضر المنتج متاحاً للتصدير العالمي، على شكل أمونيا.

مشروع Mauricie في كندا: سينتج 70 ألف طن متري سنوياً بحلول عام 2028 حيث أن ثلث الهيدروجين المولد سيستهدف إزالة الكربون من وسائل النقل لمسافات طويلة، في حين أن الباقي سينتج الغاز الطبيعي المتعدد (e-NG) للصناعات التي يصعب إزالة الكربون منها.

مركز "الطاقة الخضراء الغربي" في أستراليا: يبعد هذا المشروع واحداً من أكبر مشاريع الطاقة الخضراء في العالم، تعتمد فيه شركة "انتركونتيننتال إنرجي" إنشاء مركز للطاقة المتعددة في غرب أستراليا بقدرة 50 جيجاوات مخصص لإنتاج الهيدروجين الأخضر بحلول عام 2030، سيمتد مركز "الطاقة الخضراء الغربي" على مساحة 15 ألف كيلومتر مربع وسينتج 3,5 مليون طن متري من الهيدروجين الأخضر الخالي من الكربون، أو 20 مليون طن من الأمونيا الخضراء كل عام، للاستهلاك المحلي والتصدير [9].

4.2 الفوائد البيئية والاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر.

الفوائد البيئية

1- معالجة تغير المناخ

- إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام مصادر الطاقة المتعددة يؤدي إلى انبعاثات صفرية من الغازات المسامية للاحتباس الحراري.
- يقلل من الاعتماد على مصادر الطاقة كثيفة الكربون ويخفض الانبعاثات المسامية لتغيير المناخ.

2- تخزين الطاقة والمرونة

- يمكن تخزين الهيدروجين الأخضر ونقله بفعالية، مما يساعد على استقرار الشبكات الكهربائية المعتمدة على مصادر الطاقة المتعددة المتقطعة (مثل الشمس والرياح).
- يوفر مصدر طاقة مرناً يمكن تحويله إلى كهرباء أو حرارة عند الحاجة.

3- إزالة الكربون من القطاعات الصعبة

يمكن للهيدروجين الأخضر أن يحل محل الوقود الأحفوري في الصناعات الثقيلة (مثلاً تصنيع الصلب) ووسائل النقل الثقيلة (مثلاً الطيران وال_boats)، مما يقلل انبعاثاتها الكربونية.

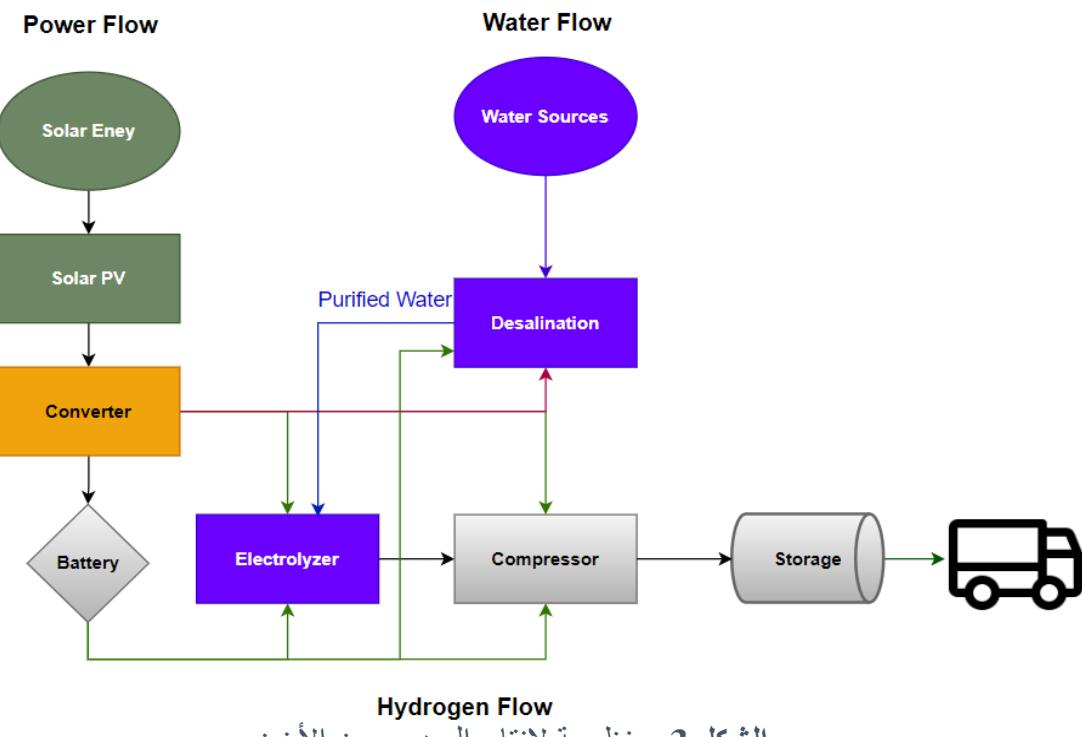
الفوائد الاقتصادية

- 1- تعزيز أمن الطاقة: إنتاج الهيدروجين الأخضر محلياً يقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري المستورد، مما يعزز أمن الطاقة الوطني ويقلل المخاطر الجيوسياسية.
- 2- النمو الاقتصادي وخلق فرص العمل: تطوير تقنيات الهيدروجين الأخضر والبنية التحتية الخاصة به يخلق فرص عمل جديدة ويدعم الابتكار والنمو الاقتصادي.
- 3- تخزين ونقل الطاقة: سهولة تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر تجعله خياراً اقتصادياً لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة في المستقبل.
- 4- المساهمة في الحد من انبعاثات الكربون: باستخدامه كوقود منخفض الكربون في القطاعات المختلفة، يعزز التحول إلى اقتصاد عالمي منخفض الكربون وأكثر استدامة.
- 5- تنويع مصادر الطاقة: يساهم الهيدروجين الأخضر في تنويع مزيج الطاقة العالمي، مما يدعم بنية تحتية للطاقة أكثر مرونة واستدامة [10].

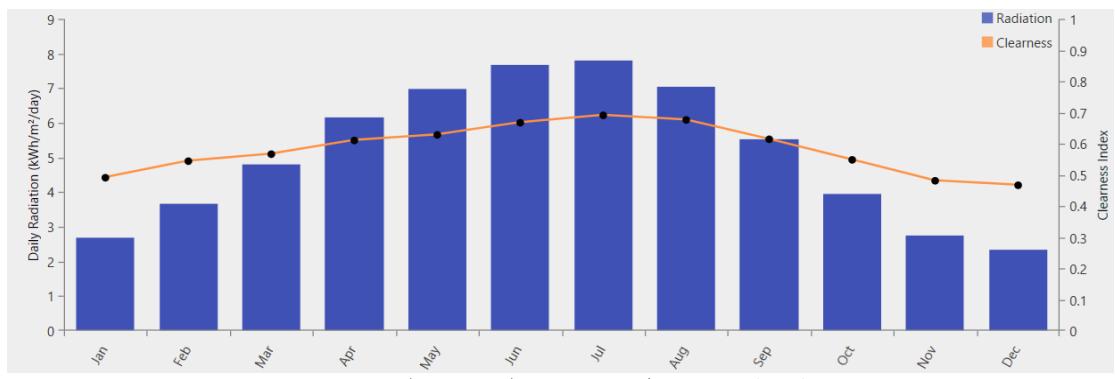
تصميم المنظومة

يُنتج الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام طاقة متعددة بنسبة 100%， مما يضمن عملية خالية من الانبعاثات الكربونية. يتناول هذا الفصل تصميم منظومة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في طرابلس Libya (32,8875 شمالاً و 13,1917 شرقاً) بقدرة انتاجية 100 kg/day الشمسية، مع تعديلات

موسمية لزيادة الإنتاج إلى 150 kg/day خلال أشهر النروء الشمسيّة (أبريل - أكتوبر). كذلك حساب كل الأحمال الكهربائية المتعلقة بعملية الإنتاج وتفصيل لأهم أجزاء المنظومة كما هو موضح بالشكل(3)). بناء على وكالة ناسا، تتمتع طرابلس بمعدل اشعاع شمسي يقارب 4.94 kWh/m^2 وسرعة الرياح عند ارتفاع 50 m حوالي 4 m/s وهذا الرقم غير كافي لتوليد الكهرباء من التوربينات الهوائية، لذلك سيقتصر اختيارنا على الطاقة الشمسيّة. الشكل 4 يبيّن معدل الإشعاع الشمسي الشهري لطرابلس.



الشكل 3: منظومة لإنتاج الهيدروجين الأخضر.



الشكل 4: معدل الإشعاع الشمسي الشهري

ت تكون المنظومة من الواح للطاقة الشمسيّة كمصدر للطاقة تولد الكهرباء (تم في هذه الدراسة استخدام Monocrystalline بسبب الكفاءة العالية وتحمل أفضل للحرارة، درجة حرارة طرابلس: $20-30^\circ\text{C}$) بدون انبعاثات ضارة وممول للتيار لضبط خصائص الكهرباء وقد تم في اختيار محول الهجين (Hybrid Inverter/Charger) وذلك لقدرته على إدارة الطاقة الشمسيّة، البطاريات، والأحمال بكفاءة لتناسب مع متطلبات الأجهزة الكهربائية في المنظومة، بالإضافة إلى بطاريات من الليثيوم لتخزين الطاق الكهربائية وضمان استقرار الإمداد الكهربائي. أيضاً نظام معالجة للمياه للحصول على ماء نقي (منزوع الأيونات أو مقطر) لتجنب تلف مكونات المجلل. وكذلك جهاز التحليل الكهربائي

لفصل جزيئات الماء الى هيدروجين وأكسجين. تم اختيار نوع PEM وذلك لقدرته على التكيف مع التذبذبات في الإشعاع الشمسي (بدء/إيقاف سريع). كذلك بسبب الكفاءة العالية ونقاء هيدروجين مرتفع (مُهم للتطبيقات الصناعية). ويوفر ضغط إنتاج مدمج (لا يحتاج ضاغطاً خارجياً).

وأخيراً الضغط والتخزين ويهدف الضاغط الى رفع ضغط الهيدروجين إلى 350-700 بار لتقليل حجمه وتسهيل التخزين . ويمكن تخزين الهيدروجين إما في خزانات عالية الضغط وهو المستخدم في هذه الدراسة أو بشكل سائل عند 253°C. هذا بالإضافة الى أنظمة التشغيل المساعدة وتشمل:

- نظام التبريد: للتحكم في الحرارة الناتجة عن التفاعلات الكهروكيميائية .
- أنظمة التحكم: مراقبة الضغط، درجة الحرارة، التدفق.
- أنظمة السلامة: كواشف التسرب، صمامات الطوارئ، وأنظمة تهوية لمنع الاشتعال.

حساب الاحمال الكهربائية

تنقسم الاحمال الكهربائية إلى قسمين، الحمل الأساسي (جهاز التحليل الكهربائي) والاحمال الثانوية وتشمل احتمال الضغط والتخزين وحمل نظام التبريد وحمل نظام معالجة المياه واحتمال ثانوية أخرى وتشمل احتمال المضخات، ونظام التحكم، وحساسات النظام، والاضاءة.

1. حمل جهاز التحليل الكهربائي (أساسي)

يعتبر جهاز التحليل الكهربائي اهم جزء في المنظومة حيث انه المسؤول عن تحويل الكهرباء والماء الى هيدروجين ويعتمد الحمل الكهربائي لجهاز التحليل الكهربائي على معدل انتاج الهيدروجين (kg/day) ومقدار كفاءته. ويمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$\text{Electrolyzer Load (kWh/day)} = \frac{\text{Daily Hydrogen Production (kg/day)} * \text{Energy Intensity (kWh/kg)}}{\text{System Efficiency}} \quad (1)$$

2. الاحمال الثانوية

وهي الاحمال الإضافية التي تحتاجها المنظومة للإنتاج وتشمل:

• احتمال الضغط والتخزين: لضغط وتخزين الهيدروجين تحتاج الى طاقة بمقدار 4-2

kWh/kg

• احتمال التبريد: وهي الاحمال المحتاجة لتبريد جهاز التحليل الكهربائي والهيدروجين المضغوط

وتكون تقريباً من 1-0.5 kWh/kg

• حمل نظام معالجة المياه: ويكون تقريباً مساوي الى 3-1 kWh/kg

3. احتمال المضخات ونظام التحكم وحساسات النظام والاضاءة: تحسب هذه الاحتمال مجتمعة كنسبة مئوية (5-10%) من حمل جهاز التحليل الكهربائي. الجدول رقم (4) يبين الاحمال اليومية لمحطة انتاج الهيدروجين قيد الدراسة.

جدول 4: اجمالي معدل استهلاك الكهرباء اليومي

استهلاك الكهرباء (kWh/day)		الوحدة
150 kg/day	عند انتاج 100 kg/day	جهاز التحليل الكهربائي
8250	5500	الضغط والتخزين
450	300	احمال التبريد
112.5	75	نظام معالجة المياه
300	200	المضخات ونظام التحكم وحساسات النظام والاضاءة
825	550	
9938	6625	الاجمالي

تكلفة المشروع

لحساب تكالفة المشروع تم الاعتماد على المتوسط العالمي للأسعار وذلك لعدم توفر هذه الأسعار في السوق الليبي أو تعذر الحصول عنها. الجدول رقم (5) يبين سعر وحجم عناصر المنظومة.

جدول 5: حجم وتكلفة عناصر المنظومة.

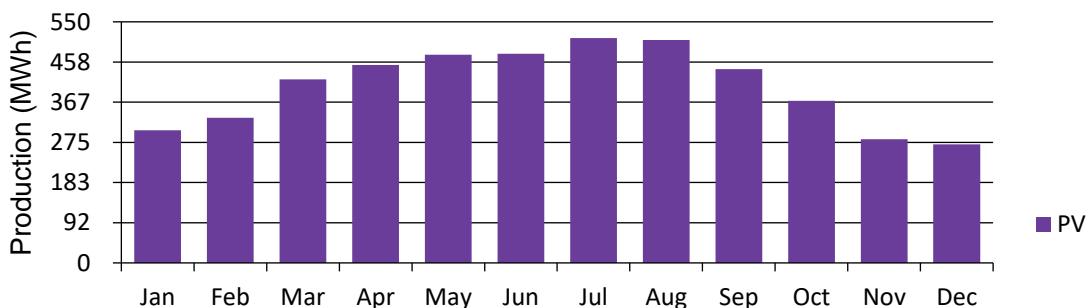
تكلفة التشغيل والصيانة	التكلفة	العنصر
\$10/kW/year	\$800/kW	الواح للطاقة الشمسية
\$5/kWh/year	\$300/kWh	البطاريات
\$5/kW/year	\$300/kW	المحول الكهربائي
\$20/kW/year	\$1000/kW	جهاز التحليل الكهربائي
\$10/kg/year	\$500/kg	الضغط والتخزين

النتائج والتحليل

يتم توفير الاحتياجات الكهربائية والهيدروجينية لمصنع الهيدروجين قيد الدراسة، عبر نظام طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة 4655 كيلووات، ونظام تخزين بطاريات بسعة 9530 kW/h كيلوواط/ساعة.

الاستهلاك الكهربائي

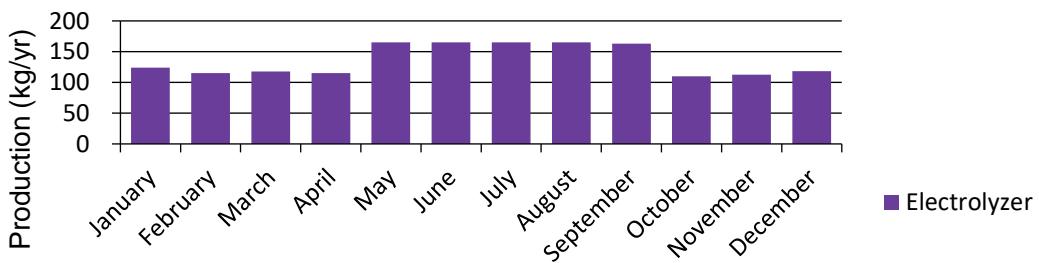
يبلغ استهلاك الكهرباء 12775 kWh/day، مع ذروة حمل تصل إلى 3100 kW في النظام المقترن، يتم تغطية الحمل الكهربائي عبر الواح الطاقة الشمسية والبطاريات. الشكل (5) يبين الإنتاج الشهري من الكهرباء والمتحصل عليها من الواح الطاقة الشمسية (MWh).



الشكل 5: الإنتاج الشهري للكهرباء من الواح الطاقة الشمسية.

إنتاج الهيدروجين:

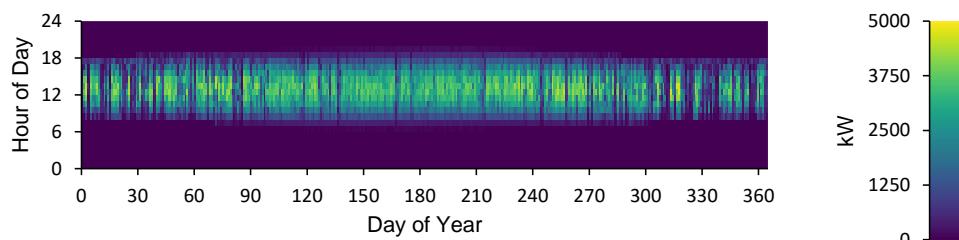
الشكل (6) يبين الإنتاج الشهري للهيدروجين الأخضر بحيث يكون الإنتاج خلال الفترة من ابريل الى أكتوبر 150 Kg/day و 100 Kg/day في باقي الأشهر. زيادة الإنتاج في هذه الأشهر يهدف الى الاستفادة من الطاقة الأكبر المتوفرة خلال هذه الفترة.



الشكل 6: الإنتاج الشهري من الهيدروجين الأخضر

الطاقة الشمسية الكهروضوئية

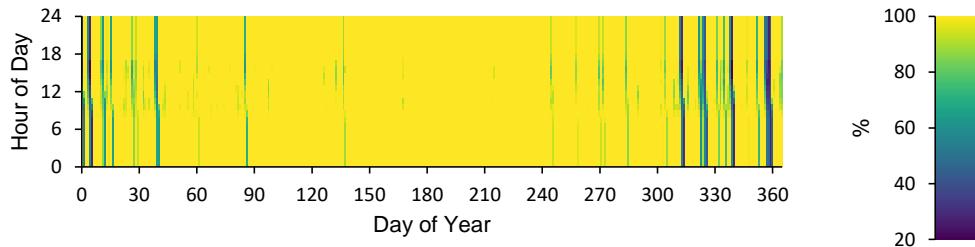
يتمتع النظام الشمسي الكهروضوئي العام بأقصى قدرة كهربائية والتي يمكن للنظام توليدها تحت الظروف القياسية تبلغ 4,656 kW، مع إنتاج سنوي يُقدر بـ 7,515,804 kWh/year (7). الشكل (7) يبين الإنتاج اليومي للخلايا لسنة كاملة. حيث تعتبر سعة الألواح الشمسية مناسبة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا، نظراً للإشعاع الشمسي العالي الذي تتمتع به البلاد خاصة في طرابلس بالإضافة إلى هذه السعة تغطي التذبذب في الإنتاج خلال الأشهر ذات الطلب الأعلى (150 Kg/day) مع الأخذ في الاعتبار كفاءة المحلل الكهربائي.



الشكل 7: الإنتاج اليومي الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

بطاريات التخزين

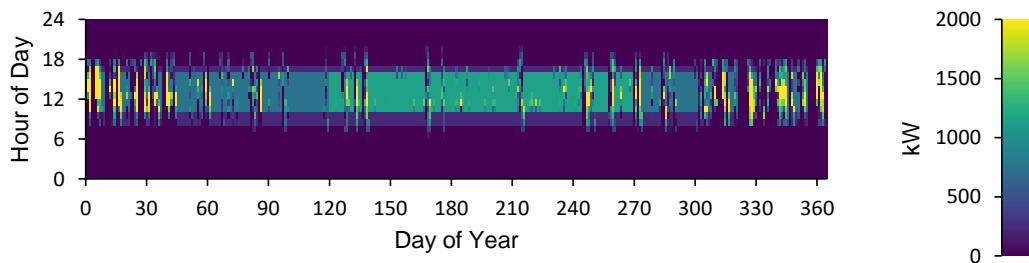
وهي من نوع ليثيوم-أيون kWh 1 وتتمتع بإجمالي طاقة قابلة للتخزين في النظام تحت الظروف القياسية تبلغ 9,530 kWh ، مع إنتاجية سنوية (شحن/نطريغ) تقدر بـ 135,019 kWh/year كما هو موضح بالشكل 8. يبين الشكل ان حجم تخزين البطاريات كبيراً، لكنه ضروري لتعويض التقلبات في توليد الطاقة الشمسية لضمان استمرارية تشغيل المحلول الكهربائي بالإضافة الى ان هذا النظام يعتمد كلياً على الطاقة المتجدددة دون اتصال بالشبكة.



الشكل 8: سعة بطاريات التشغيل لسنة كاملة.

المحلل الكهربائي

أقصى قدرة كهربائية يمكن للمحلل الكهربائي التعامل معها تبلغ 2,000 KW، مع إنتاج سنوي (مع احتساب كفاءة التحليل وفترات التوقف للصيانة) إجمالي يُقدر بـ 36,500 Kg/year. التحليل الكهربائي حوالي 50 إلى 55 KWh لانتاج 1kg من الهيدروجين. لإنتاج 150 Kg/day يحتاج النظام إلى 7500 كيلوواط ساعة في اليوم علماً بـ سعة المحلل 2000 kW.



الشكل 9: عمل المحلل الكهربائي.

خزان الهيدروجين

سعة خزان الهيدروجين هي 750 Kg وهي كافية لتخزين إنتاج 5 أيام. أخيراً، أظهرت النتائج الاقتصادية للنظام أن التكلفة المنشورة للطاقة تبلغ \$/kW 0.42، وهي أسعار جيدة مقارنة مع المعايير العالمية، وإن التكلفة الإجمالية الصافية المنظومة تبلغ 12.78 مليون دولار تشمل رأس المال والتشغيل والصيانة طيلة فترة عمر المشروع (25 سنة).

المناقشة والخلاصة

تؤكد هذه الدراسة إمكانيات الهائلة لليبيا لتصبح رائدة في إنتاج الهيدروجين الأخضر، مدفوعة بمواردها الشمسية والموقع الجغرافي الاستراتيجي. يظهر هذا البحث الجدوى الفنية، حيث يحقق إنتاجاً يتراوح بين 100 و 150 Kg /day باستخدام الموارد المحلية المتاحة. تتماشى تكلفة الطاقة المنشورة البالغة 0.42 \$/Kg مع التوقعات لشمال إفريقيا وتقل عن المتوسطات العالمية الحالية (\$/Kg 3.00 – 1.50)، مما يعطي ليبيا موقع تنافسي جيد. وهذا بالإضافة إلى القرب من الأسواق الأوروبية التي تهدف إلى استيراد 10 ملايين طن من الهيدروجين الأخضر سنوياً بحلول عام 2030.

ومع ذلك، لا تزال هناك عوائق تعرقل هذا الانتقال مثل الاضطرابات السياسية والبنية التحتية غير المطورة. تكشف المقارنات مع المشاريع الإقليمية - مثل مشاريع مصر بقدرة 100-200 MW وبرنامج "ماسين" في المغرب - عن تأخر ليبيا في السياسات والاستثمارات. يتطلب معالجة هذه الفجوات إعطاء الأولوية للشراكات بين القطاعين العام والخاص، وتأمين التمويل الدولي، ووضع إطار تنظيمية واضحة.

يعتمد النظام الحالي على الطاقة الشمسية فقط (نظرًا لأنخفض سرعات الرياح في طرابلس)، مما يسبب مخاطر القطع، والتي يتم التخفيف منها هنا بواسطة تخزين البطاريات. يمكن أن تتضمن التوسعات المستقبلية دمج طاقة الرياح من المناطق الساحلية ذات سرعات الرياح الأعلى. بالإضافة إلى ذلك، سيتطلب

توسيع الإنتاج لتلبية متطلبات التصدير تحسينات في تخزين الهيدروجين والبنية التحتية للنقل، مثل مرافق التسليم أو تحويله إلى الأمونيا.

لتحقيق هذا الإمكانيات، يجب معالجة التحديات الحرجة: تحقيق الاستقرار السياسي، تحديث البنية التحتية للطاقة، وسن السياسات لجذب الاستثمارات الأجنبية. سيكون التعاون مع الشركاء الأوروبيين وأصحاب المصلحة الإقليميين، جنباً إلى جنب مع الاستثمارات في التعليم والبحث والتطوير، محورياً. من خلال إعطاء الأولوية للهيدروجين الأخضر، يمكن لليبيا تأمين مستقبل طاقة مستدام، وتعزيز أمن الطاقة، والظهور كلاعب رئيسي في الانتقال العالمي إلى الطاقة النظيفة.

المراجع

- [1] Alarfi, A., & Al-Zawawi, M. (2022). *Analysis of solar energy potential in Libya and its role in supporting national energy strategies*. Journal of Sirte University Scientific Journal, 14(2), 45–59.
- [2] Al-Jifrani, A., & Al-Sanusi, M. (2023). Electricity generation trends in Libya: Data analysis from 2000–2022. *Journal of Engineering Sciences and Technology*, 10(1), 33–48.
- [3] Dincer, I. (2021). Green hydrogen production, storage, and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(60), 30175–30197. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.123>
- [4] International Energy Agency. (2022). *Global hydrogen review 2022*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [5] International Renewable Energy Agency. (2021). *Green hydrogen cost reduction drivers in Africa*. IRENA Technical Report. <https://www.irena.org/publications>
- [6] El-Emam, R., & Özcan, H. (2022). Economic viability of green hydrogen for emerging markets. *Energy Policy*, 165, Article 112964. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112964>
- [7] شنب، ع. ع، زغينين، م. س، العيساوي، س. ج، وشتوان، م. ع. (2016). *معوقات استخدام الطاقات المتتجدة في ليبيا. في وقائع المؤتمر الدولي حول الهندسة المدنية وهندسة القوى (ICCPGE-2016) (ص. 822–813)*. كلية التقنية الصناعية، مصراتة، ليبيا.
- [8] Aziz, M., & Said, A. (2022). Hydrogen roadmap in North Africa: Opportunities and challenges. *Renewable Energy*, 185, 1300–1315. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.065>
- [9] International Energy Agency. (2023). *Hydrogen projects database 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- [10] United Nations Industrial Development Organization. (2021). *Green hydrogen for sustainable industrial development*. UNIDO Publications. <https://www.unido.org/resources>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JSHD** and/or the editor(s). **JSHD** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.