

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

Ablqasim Bassam<sup>1\*</sup>, Rodwan Elhashmi<sup>2</sup>, Albahloul Abdulghafur<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> 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 أبو القاسم<sup>1\*</sup>، رضوان الهاشمي<sup>2</sup>، عبد الغفور البهلول<sup>3</sup>  
<sup>3,2,1</sup> قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة، جامعة غريان، غريان، ليبيا

\*Corresponding author: [Bassam.aboled@gmail.com](mailto: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/m<sup>2</sup>/day in Tripoli and up to 6 kWh/m<sup>2</sup>/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,

#### المخلص

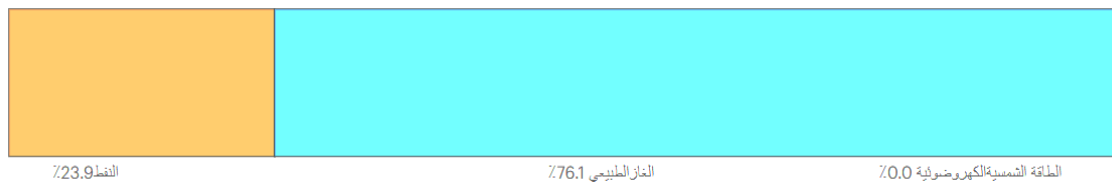
تواجه ليبيا تحديًا كبيرًا في الانتقال من الاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري إلى أنظمة الطاقة المستدامة. تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف إمكانية إنتاج واستخدام الهيدروجين الأخضر كبديل نظيف للطاقة وذلك بالاستفادة من الموارد الشمسية الوفيرة في ليبيا، والتي تبلغ في المتوسط 4.94 kWh/m<sup>2</sup>/day في طرابلس وتصل إلى 6 kWh/m<sup>2</sup>/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 المقترح ألواح طاقة شمسية بقدرة 4656 KW، تخزين بطاريات ليثيوم أيون بسعة 9530 kWh، ومحلل كهربائي بقدرة 2000 kW، مما ينتج إنتاجًا سنويًا يبلغ 36,498 Kg. يكشف التحليل الاقتصادي عن تكلفة مستوية للطاقة تبلغ \$0.42/kg، وهي تنافسية مع المعايير العالمية، وتكلفة صافية إجمالية تبلغ 12.78 مليون دولار.

يبرز المشروع قدرة ليبيا على تقليل انبعاثات الكربون وتنويع اقتصادها، وتحديد موقعها كمورد رئيسي للأسواق الأوروبية. كما تتناول الدراسة التحديات مثل الاستقرار السياسي، العجز في البنية التحتية، والحاجة إلى أطر تشريعية، بجانب التوصيات للاستثمار. بالإضافة إلى عرض لأهم مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر في شمال إفريقيا والعالم.

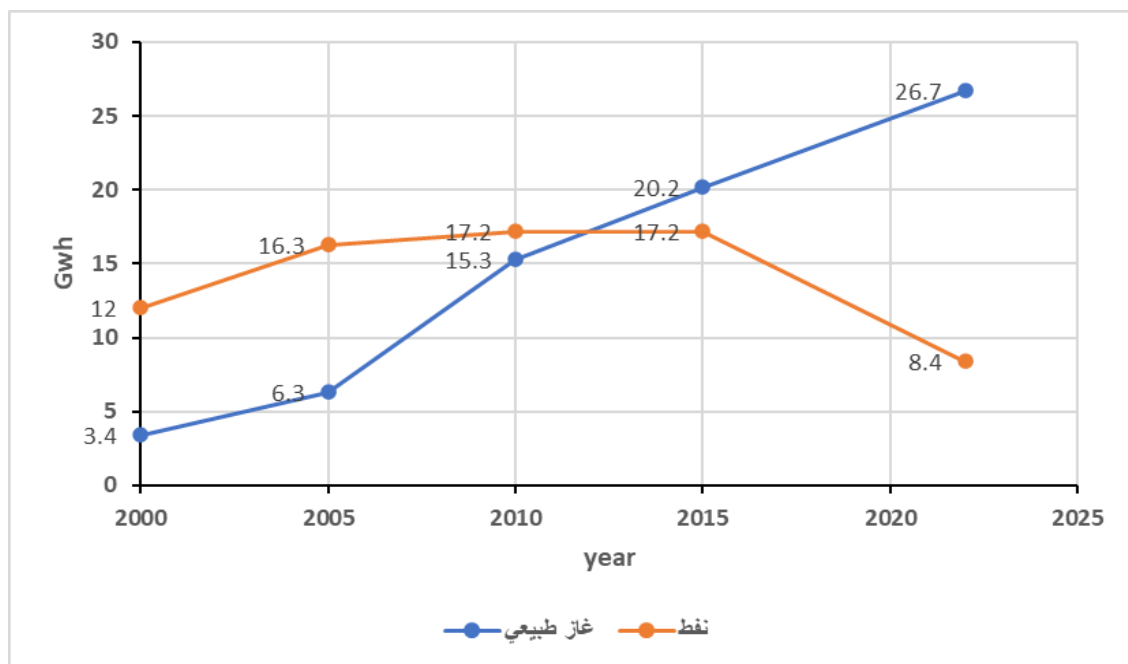
**الكلمات المفتاحية:** الهيدروجين الأخضر، الطاقة الشمسية، التحليل الكهربائي، التنمية المستدامة.

#### المقدمة

إن الطلب العالمي المتزايد على الطاقة أدى إلى الطلب على تنويع مصادر الطاقة وخاصة الطاقة المتجددة، حيث تعتمد ليبيا 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 ليبيا كما مبين في الشكل (2). وتبحث هذه الدراسة في تحديات وآفاق إمكانات إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا واستخدامه للتطبيق المستقبلي، كما تقدم نظرة عامة على فوائد التحول إلى تقنية الهيدروجين الأخضر. إن إنتاج الهيدروجين الأخضر سيوفر مصدر طاقة بديل في ليبيا، وسيكون بديلاً أفضل لمصادر الطاقة المتاحة حالياً لأنه طاقة مستدامة وصديقة للبيئة. وتؤكد الدراسة أن ليبيا من أكثر الدول الواعدة لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين الأخضر لعدة أسباب، وأهمها توفر الطاقة الشمسية. تتمتع ليبيا بإشعاع شمسي مرتفع (3000 إلى 3500 ساعة من أشعة الشمس سنوياً)، ومناخ حار وجاف، ومناطق شاسعة غير مأهولة بالسكان، 88% منها مغطاة بالصحاري. بالإضافة إلى ذلك، من المحتمل أن تتوفر طاقة الرياح والطاقة الحرارية في ليبيا. علاوة على ذلك، تتمتع ليبيا بموقع استراتيجي قريب من السوق الأوروبية [1].



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



**الشكل 2: تطور مصادر توليد الكهرباء في ليبيا 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 حرًا إلا في حالات نادرة للغاية، لهذا فإن الحصول عليه يتطلب فصله عن العناصر الأخرى، إذ يكون غالبًا مرتبطًا بجزيئات أخرى، سواء مع الغاز الطبيعي في الحالة الغازية أو مع الماء والنفط في حالته السائلة، ومن هنا جاءت تسمياته حسب طريقة فصله أو إنتاجه إلى عدة تسميات أبرزها:

- الهيدروجين الرمادي: ينتج من الوقود الأحفوري، غالبًا 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 ينتج عن ذلك أي انبعاثات، على فرض أن الكهرباء تأتي من طاقة متجددة [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 طُرحت مؤخرًا من جهة العديد من الحكومات العالمية من أجل مساندة الجهود العالمية الرامية لخفض الانبعاثات الكربونية. وبإمكانه أن يلعب دورًا حيويًا في تعزيز الانتقال نحو استخدام الطاقة النظيفة نظرًا 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، وفقًا لتقرير وكالة الطاقة الدولية، يُعتبر الهيدروجين الأخضر أحد الحلول الفعالة للتحول إلى الطاقة النظيفة، خاصة في ظل الارتفاعات القياسية في أسعار الطاقة عالميًا.

### 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 المتجددة.

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

- **تحسين الأمن الطاقى:** من خلال التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة، يمكن لليبيا تقليل اعتمادها على الوقود الأحفوري، مما يعزز من أمنها الطاقى [6].

## مصادر الطاقة في ليبيا

تتميز ليبيا بموقعها الجغرافي بين دول أفريقيا وجنوب أوروبا، ويتنوع 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 المتجددة، 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 للفرد، 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]**

البترو	الغاز الطبيعي	الطاقة الشمسية	طاقة الرياح
احتياطي بأكثر من 43 بليون برميل نبط مكافئ (أكبر احتياطي بأفريقيا)	احتياطي بأكثر من 10 بليون برميل نبط مكافئ (رابع أكبر احتياطي بأفريقيا)	اشعاع شمسي بمتوسط 2470 kWh/m <sup>2</sup> /day ثاني أعلى إشعاع بالعالم	سرعة رياح بمتوسط عال بمناطق متعددة

### 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 بلبييا، كما يوضحه الجدول (2) إلى أكثر من 6 kWh/m<sup>2</sup> ، 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 هاذة الإمكانيات تساعد في إنتاج الهيدروجين بالمنطقة وبسعر جيد [7] .

**جدول 2: المتوسط اليومي للإشعاع الشمسي (kWh/m<sup>2</sup>) 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	6.3	6.6	6.8	5.8	5.1	4.1	3.5	3.36	5.36
جالو	3.66	4.54	5.37	6.74	6.74	7.16	7.17	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
شحات	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
القريات	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
القبّة	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 <sup>2</sup> )
العززية	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
مسلاتة	6.68	7.54	2.39	291.5
مصراتة	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
ظلمية	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 المتجددة، 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 المتجددة واسعة النطاق والتكاليف العالية لتوريد المحطات الكهربائية (Electrolyzers)، وأنظمة تخزين ونقل الهيدروجين.

يمكن أن يسهم التحول إلى الهيدروجين الأخضر في تنويع الاقتصاد الليبي وخفض الانبعاثات الكربونية بالإضافة إلى تلبية الطلب العالمي المتنامي على الطاقة النظيفة والاسهام في أمن واستدامة الطاقة. ولذلك يهدف هذا البحث إلى دراسة نظرية لموارد الطاقات المتجددة وفرص إنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا، تصميم منظومة لإنتاج الهيدروجين الأخضر 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 إنتاج الهيدروجين الأخضر 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، لتسرع دوله إلى توقيع مذكرات تفاهم وتقديم عروض لتمويل المشروعات في أفريقيا. وبفضل موارد الطاقة الشمسية والرياح القوية التي تتميز بها شمال أفريقيا والتي تدعمها 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 إيبك (EBIC): وهو مشروع تطوره شركة فيرتيغلوب (Fertiglobe) متعددة الجنسيات، ومقرها أبو ظبي، بسعة تحليل كهربائي قدرها 100 ميغاواط.

- 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 ميغاواط.

**مشاريع الهيدروجين في المغرب:** تعدّ خبرة المغرب انعكاساً لقدرات تطوير الهيدروجين الأخضر في أفريقيا، إذ حظي بثقة دولية بصفته مُصدراً رئيساً، وزادت فرص ريادته 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 ميغاواط.
- مشروع هيفو: تطور مشروع هيفو شركة فيوجن فيول (Fusion Fuel) الأيرلندية، بدءاً من عام 2026، ويهدف إلى إنتاج 31 ألف طن سنوياً من الهيدروجين، لينطلق نحو التصدير وإنعاش صناعة الهيدروجين الأخضر في أفريقيا [8].

**مشروع "نيوم" في السعودية:** يهدف هذا المشروع إلى بناء أكبر منشأة هيدروجينية تجارية على مستوى المرافق في العالم تعمل بالكامل بالطاقة المتجددة، 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. وبمجرد 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 المتجدد (e-NG) للصناعات التي يصعب إزالة الكربون منها.

**مركز "الطاقة الخضراء الغربي" في أستراليا:** يعد هذا المشروع واحداً من أكبر مشاريع الطاقة الخضراء في العالم، تعتزم فيه شركة "انتركونتيننتال إنيرجي" إنشاء مركز للطاقة المتجددة 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 المتجددة يؤدي إلى انبعاثات صفرية من الغازات المسببة للاحتباس الحراري.
  - يقلل من الاعتماد على مصادر الطاقة كثيفة الكربون ويخفض الانبعاثات المسببة لتغير المناخ.
- 2- تخزين الطاقة والمرونة
  - يمكن تخزين الهيدروجين الأخضر ونقله بفعالية، مما يساعد على استقرار الشبكات الكهربائية المعتمدة على مصادر الطاقة المتجددة 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 (مثل تصنيع الصلب) ووسائل النقل الثقيلة (مثل الطيران والسفن)، مما يقلل انبعاثاتها الكربونية.

### الفوائد الاقتصادية

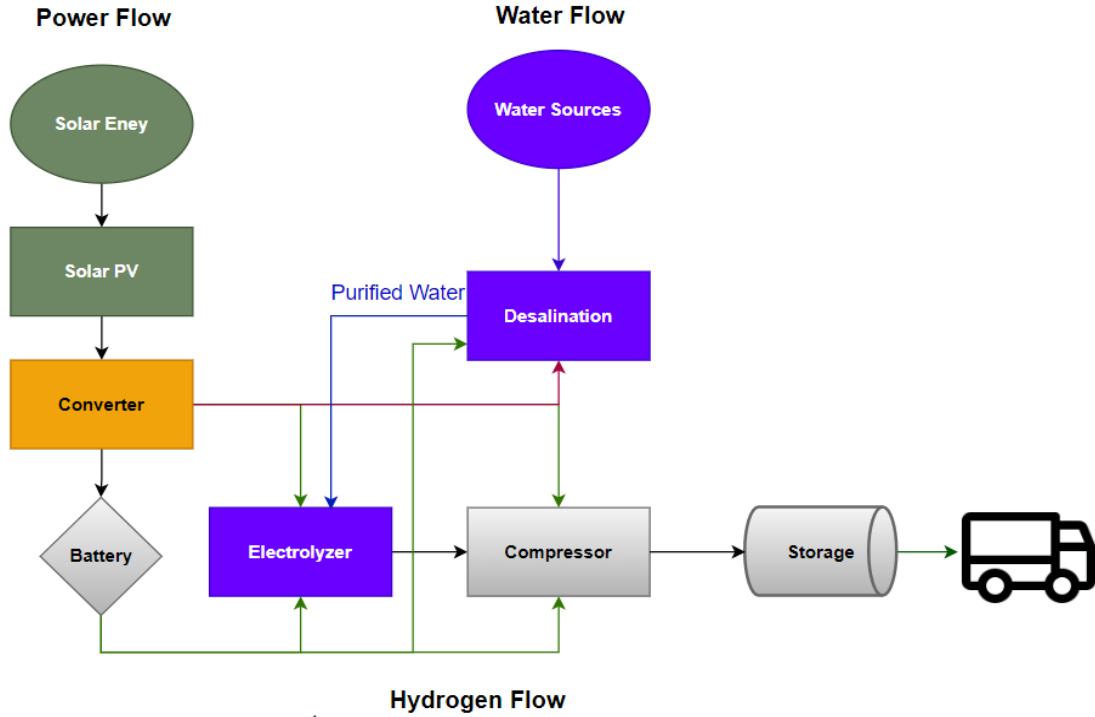
- 1- تعزيز أمن الطاقة: إنتاج الهيدروجين الأخضر محلياً يقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري المستورد، مما يعزز أمن الطاقة الوطني ويقلل المخاطر الجيوسياسية.
- 2- النمو الاقتصادي وخلق فرص العمل: تطوير تقنيات الهيدروجين الأخضر والبنية التحتية الخاصة به يخلق فرص عمل جديدة ويدعم الابتكار والنمو الاقتصادي.
- 3- 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، يُعزز 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

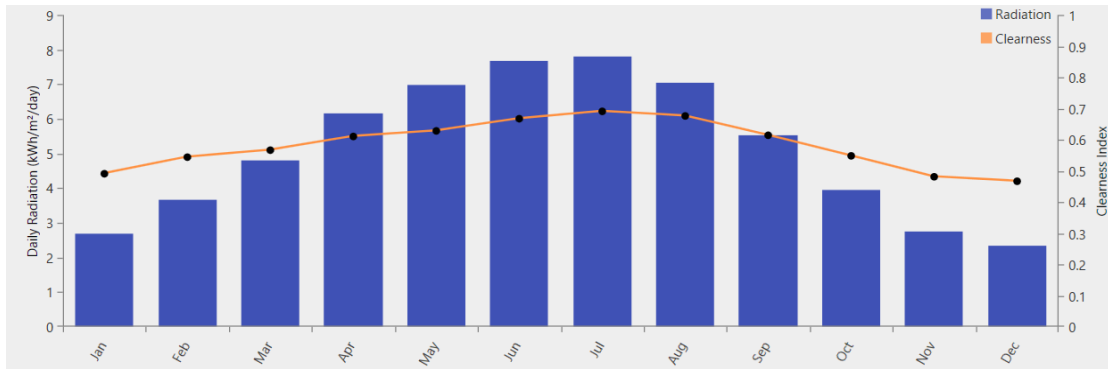
يُنتج الهيدروجين الأخضر عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام طاقة متجددة بنسبة 100%، مما يضمن عملية خالية من الانبعاثات الكربونية. يتناول هذا الفصل تصميم منظومة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في طرابلس ليبيا (32,8875 شمالاً و13,1917 شرقاً) بقدرة إنتاجية 100 kg/day الشمسية، مع تعديلات



موسمية لزيادة الإنتاج إلى 150 kg/day خلال أشهر الذروة الشمسية (أبريل - أكتوبر). كذلك حساب كل الاحمال الكهربائية المتعلقة بعملية الإنتاج وتفصيل لاهم أجزاء المنظومة كما هو موضح بالشكل 3)). بناء على وكالة ناسا، تتمتع طرابلس بمعدل اشعاع شمسي يقارب  $4.94 \text{ kWh/m}^2$  وسرعة الرياح عند ارتفاع 50 m حوالي 4 m/s وهذا الرقم غير كافٍ لتوليد الكهرباء من التوربينات الهوائية، لذلك سيقصر اختيارنا على الطاقة الشمسية. الشكل 4 يبين معدل الاشعاع الشمسي الشهري لطرابلس.



الشكل 3: منظومة لإنتاج الهيدروجين الأخضر.



الشكل 4: معدل الاشعاع الشمسي الشهري

تتكون المنظومة من ألواح للطاقة الشمسية كمصدر للطاقة تولد الكهرباء (تم في هذه الدراسة استخدام Monocrystalline بسبب الكفاءة العالية وتحمل أفضل للحرارة، درجة حرارة طرابلس: 20-30 °م) بدون انبعاثات ضارة ومحول للتيار لضبط خصائص الكهرباء وقد تم في اختيار محول الهجين (Hybrid Inverter/Charger) وذلك لقدرته على ادارة الطاقة الشمسية، البطاريات، والأحمال بكفاءة لتتناسب مع متطلبات الأجهزة الكهربائية في المنظومة، بالإضافة الى بطاريات من الليثيوم لتخزين الطاق الكهربائية وضمان استقرار الإمداد الكهربائي. أيضا نظام معالجة للمياه للحصول على ماء نقي (منزوع الأيونات أو مقطر) لتجنب تلف مكونات المحلّل. وكذلك جهاز التحليل الكهربائي

لفصل جزيئات الماء الي 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  $253^{\circ}\text{C}$ -. هذا بالإضافة الى أنظمة التشغيل المساندة 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 احمال الضغط والتخزين وحمل نظام التبريد وحمل نظام معالجة المياه واحمال ثانوية أخرى وتشمل احمال 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:

- احمال الضغط والتخزين: لضغط وتخزين الهيدروجين نحتاج الى طاقة بمقدار 2-4 kWh/kg
- احمال التبريد: وهي الاحمال المحتاجة لتبريد جهاز التحليل الكهربائي والهيدروجين المضغوط وتكون تقريباً من 0.5-1 kWh/kg

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

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

**جدول 4: اجمالي معدل استهلاك الكهرباء اليومي**

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



## تكلفة المشروع

لحساب تكلفة 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.

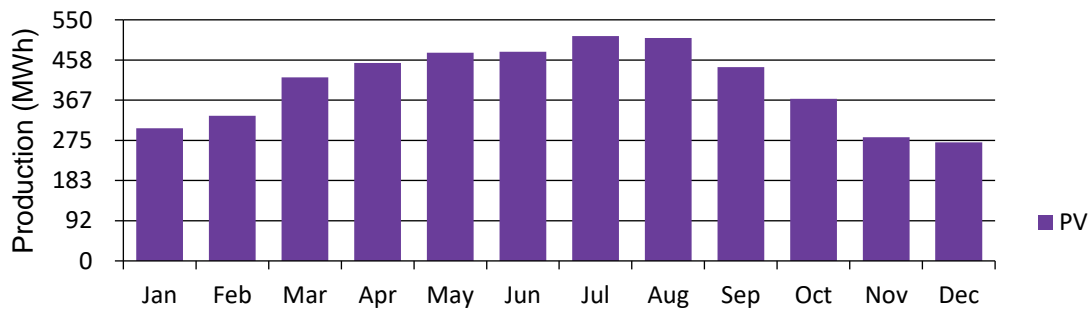
العنصر	التكلفة	تكلفة التشغيل والصيانة
الواح للطاقة الشمسية	\$800/kW	\$10/kW/year
البطاريات	\$300/kWh	\$5/kWh/year
المحول الكهربائي	\$300/kW	\$5/kW/year
جهاز التحليل الكهربائي	\$1000/kW	\$20/kW/year
الضغط والتخزين	\$500/kg	\$10/kg/year

## 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

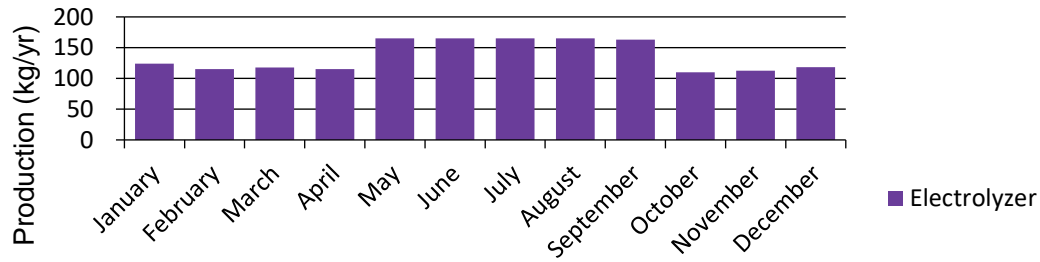
يبلغ استهلاك الكهرباء 12775 kWh/day، مع ذروة حمل تصل إلى 3100 kW في النظام المقترح، يتم تغطية الحمل الكهربائي عبر اللوح الشمسية والبطاريات. الشكل (5) يبين الإنتاج الشهري من الكهرباء والمتحصل عليها من الواح الطاقة الشمسية (MWh).



الشكل 5: الإنتاج الشهري للكهرباء من الواح الطاقة الشمسية.

### انتاج الهيدروجين:

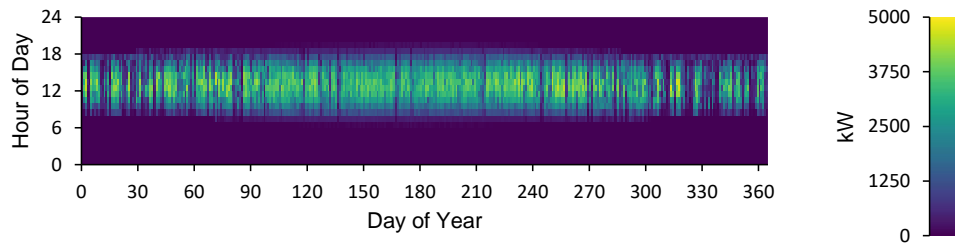
الشكل (6) يبين الإنتاج الشهري للهيدروجين الأخضر بحيث يكون الإنتاج خلال الفترة من ابريل الى أكتوبر 150 Kg/day و 100 Kg/day في باقي الاشهر. زيادة الإنتاج في هذه الأشهر يهدف الى الاستفادة من الطاقة الأكبر المتوفرة خلال هذه الفترة.



الشكل 6: الإنتاج الشهري من الهيدروجين الأخضر

### الطاقة الشمسية الكهروضوئية

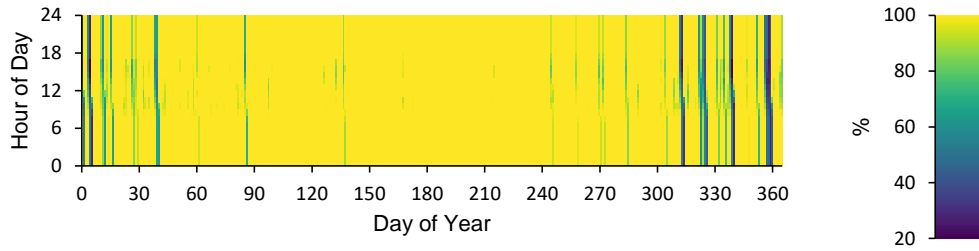
يتمتع النظام الشمسي الكهروضوئي العام بأقصى قدرة كهربائية والتي يُمكن للنظام توليدها تحت الظروف القياسية تبلغ 4,656 kW، مع إنتاج سنوي يُقدَّر بـ 7,515,804 kWh/year. الشكل (7) يبين الإنتاج اليومي للخلايا لسنة كاملة. حيث تعتبر سعة الألواح الشمسية مناسبة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا، نظرًا للإشعاع الشمسي 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

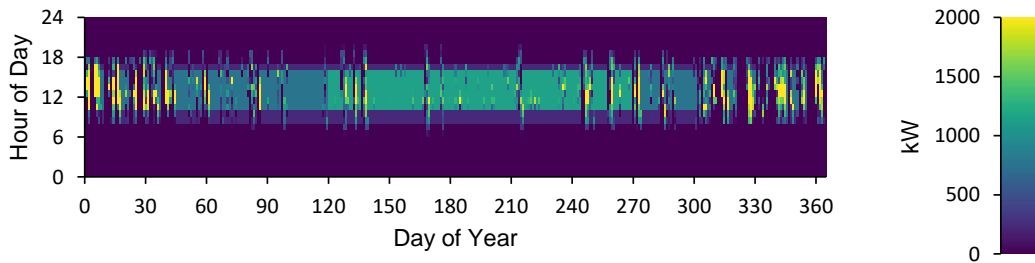
وهي من نوع ليثيوم-أيون 1 kWh وتتمتع بإجمالي طاقة قابلة للتخزين في النظام تحت الظروف القياسية تبلغ 9,530 kWh، مع إنتاجية سنوية (شحن/تفريغ) تقدر بـ 135,019 kWh/year كما هو موضح بالشكل 8. يبين الشكل ان حجم تخزين البطاريات كبيراً، لكنه ضروري لتعويض التقلبات في توليد الطاقة الشمسية لضمان استمرارية تشغيل المحلل الكهربائي بالإضافة الى ان هذا النظام يعتمد كلياً على الطاقة المتجددة 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 يُقدَّر بـ 36,500 Kg/year تستهلك عملية التحليل الكهربائي حوالي 50 إلى 55 KWh لإنتاج 1kg من الهيدروجين. لإنتاج 150 Kg/day، يحتاج النظام إلى 7500 كيلوواط ساعة في اليوم علماً بأن 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 المستوية للطاقة تبلغ 0.42 \$/kW، وهي أسعار جيدة مقارنة مع المعايير العالمية، وأن التكلفة الإجمالية الصافية للمنظومة تبلغ 12.78 مليون دولار تشمل راس المال والتشغيل والصيانة طيلة فترة عمر المشروع (25 سنة).

### المناقشة والخلاصة

تؤكد هذه الدراسة الإمكانيات 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 المستوية البالغة 0.42 \$/Kg مع التوقعات لشمال إفريقيا وتقل عن المتوسطات العالمية الحالية (1.50 – 3.00 \$/Kg)، 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 أطر تنظيمية واضحة. يعتمد النظام الحالي على الطاقة الشمسية فقط (نظراً لانخفاض سرعات الرياح في طرابلس)، مما يسبب مخاطر التقطع، 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 التسيل 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، جنبًا إلى جنب مع الاستثمارات في التعليم والبحث والتطوير، محوريًا. 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.، زغبين، م. س.، العيسوي، س. ج.، وشتوان، م. ع. (2016). معوقات استخدام الطاقات المتجددة 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.