تشخيص الفرص والتحديات المرتبطة باستراتيجيات انتقال ليبيا نحو اقتصاد الهيدروجين الأخضر

عبدالفتاح الهادي الشيباني
عضو هيئة تدريس - استاذ مساعد- علاقات اقتصادية دولية- الهيئة الليبية للبحث العلمي - ليبيا
afshibani@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2025/06/30م
القبول: 2025/07/15م
تاريخ النشر: 2025/09/20م

ملخص البحث:
تتناول هذه الورقة البحثية مفهوم اقتصاد الهيدروجين، مستكشفةً إمكاناته في تنمية الاقتصاد الليبي بما يتماشى مع أهداف الاستدامة، تم تطبيق إطار مصفوفة SWOT لتحليل نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات وتطبيق مصفوفة تحليل TOWS لتحديد الاستراتيجيات المرتبطة بانتقال ليبيا نحو اقتصاد الهيدروجين الأخضر. يُسلِّط هذا التحليل الضوء على الموارد الليبية لإنتاج الهيدروجين والبنية التحتية الحالية للطاقة كنقاط قوة وفرص متاحة، إلى جانب الفجوات التنظيمية والتحديات باعتبارها نقاط ضعف وتهديدات محتملة. وتختتم الورقة بتوصيات استراتيجية مُوجَّهة لأصحاب المصلحة للاهتمام بتطوير نقاط القوة والفرص والتخفيف من نقاط الضعف والتهديدات. وتُشدِّد على الحاجة إلى المناقشة العلمية المُعمَّقة لاقتصاد الهيدروجين واقتراح سيناريوهات مستقبلية مُصمَّمة خصيصًا للسياق الليبي.

الكلمات المفتاحية: اقتصاد الهيدروجين الأخضر، موارد الهيدروجين بليبيا، مصفوفة TOWS للمقارنة.

Diagnosing the opportunities and challenges associated with Libya's transition strategies towards a green hydrogen economy

Abelfatah Hadi Shibani
Faculty Member, Assistant Professor, International Economic Relations
Libyan Authority for Scientific Research – Libya
afshibani@gmail.com

Received (date): م2025/06/30
Accepted (date): م2025/07/15
Published (date): م2025/09/20

Abstract:
This research paper addresses the concept of the hydrogen economy, exploring its potential for developing the Libyan economy in line with sustainability goals. The SWOT matrix framework was applied to analyze strengths, weaknesses, opportunities, and threats, and the TOWS analysis matrix was applied to identify strategies related to Libya's transition towards a green hydrogen economy. This analysis highlights Libya's hydrogen production resources and existing energy infrastructure as strengths and opportunities, along with regulatory gaps and challenges as potential weaknesses and threats. The paper concludes with strategic recommendations for stakeholders to develop strengths and opportunities and mitigate

weaknesses and threats. It emphasizes the need for in-depth scientific discussion of the hydrogen economy and proposes future scenarios tailored to the Libyan context.

Keyword: Green hydrogen economy, hydrogen resources in Libya, TOWS comparison matrix.

المقدمة:

حُظي مفهوم اقتصاد الهيدروجين باهتمام كبير باعتباره حجر الزاوية كبديل مستدام وفعال للوقود الأحفوري كثيف الكربون الذي يهيمن حاليًا على المشهد العالمي للطاقة. إن إدخال اقتصاد الهيدروجين في مصفوفة الموارد الاقتصادية الليبية يمثل تحولاً اقتصادياً مستداماً متعدد الجوانب لتلبية احتياجات الطاقة لمختلف القطاعات. ومن خلال تنامي مكانة اقتصاد الهيدروجين في الخطاب الاقتصادي المتعلق بالطاقة، تركز هذه الورقة على الدور الاستراتيجي الذي يمكن أن يلعبه الهيدروجين الأخضر في السعي نحو مستقبل اقتصادي آمن وصديق للبيئة وقادر على الصمود. تعتبر طاقة الهيدروجين كونها مصدرًا خاليًا من الكربون، بمثابة حافز حاسم لتحقيق تحول اقتصادي أخضر منخفض الكربون. وبالرغم من أن ليبيا لا تزال تعتمد بشكل كبير على أنظمة الطاقة التقليدية القائمة على الوقود الأحفوري مثل النفط والغاز الطبيعي إلا إن التطورات التي يشهدها العالم تحتم على ليبيا إدراك أن السمة المتأصلة في أي شكل منفرد من أشكال الطاقة والاعتماد عليه كمورد اقتصادي وحيد تحتاج إلى الرفد بموارد مستدامة. بالتوجه إلى انتاج وتصدير الوقود الهيدروجيني بإمكان ليبيا فك الارتباط السائد بين النمو الاقتصادي والوقود الاحفوري، فالهيدروجين (H_2) كرمز كيميائي وكمورد طبيعي وكناقل للطاقة هو مورد اقتصادي فريد من نوعه مع انبعاثات صفرية من ثاني أكسيد الكربون والغازات الأخرى المسببة للاحتباس الحراري العالمي، وهو ذو سمة واعدة مُثيرة للأمل في تطوير نظامي الاقتصاد والطاقة الخاليين من الكربون. وبالرغم من تزايد الأبحاث حول تطوير الاقتصاد الهيدروجيني، إلا أنه هناك حاجة إلى إجراء تحليلًا محدداً لتشخيص التحديات والفرص في السياق الليبي. تحاول هذه الورقة المساهمة في سد هذه الفجوة من خلال تطبيق تحليل SWOT لتشخيص ملامح التحول نحو

اقتصاد الهيدروجين الأخضر في ليبيا، وتطبيق تحليل TOWS لتحديد استراتيجيات اقتصاد الهيدروجين الأخضر. مع مراعاة تفاعل العوامل التكنولوجية والاقتصادية والتنظيمية والجيوسياسية. تتجلى مساهمات هذه الورقة في ثلاثة جوانب: إجراء تقييمًا لإمكانات ليبيا في إنتاج الهيدروجين الأخضر. تحديد العوائق التي تقف أمام تطوير الهيدروجين الأخضر في ليبيا. اقتراح توصيات استراتيجية عملية مصممة خصيصًا للسياق الليبي. لذلك، تسعى هذه الورقة لتقديم رؤى قيّمة لصانعي السياسات والمستثمرين والباحثين المهتمين بالتطوير الاقتصادي القائم على الهيدروجين الأخضر. تقدم هذه الورقة البحثية لمحة عامة عن اقتصاد الهيدروجين وأهميته لدعم نمو الاقتصاد الليبي، وتسلط الضوء على خصائص الإنتاج والبنية التحتية، والتكنولوجيا المستخدمة، والتنظيم، والسوق، والاستهلاك؛ وذلك بناء على إجراء تحليل SWOT للوقوف على ملامح اقتصاد الهيدروجين الليبي إلى جانب تحليل TOWS لتحديد استراتيجيات اقتصاد الهيدروجين الأخضر.

أهمية البحث وأسباب اختياره:

تُمثِّل هذه الورقة أول جهد بحثي يتناول تشخيص التحديات والفرص لاقتصاديات الهيدروجين الاخضر في السياق الليبي قياسا على المنهجية وطرق التحليل المُتَّبَعة التي تسمح بفهم الموضوع بسلوب سهل ومبسط.

تسعى هذه الورقة إلى المساهمة في توفير لبنات لوضع خارطة طريق تحول ليبيا نحو اقتصاد الهيدروجين الأخضر بناءً على تشخيص الموارد والمُمكّنَات والتحديات المؤثرة على إنتاج وتصدير طاقة الهيدروجين. لذلك تتلخص الأهمية الأساسية للورقة في محاولة توفير تحليل يقدم أفكارا أساسية في سياق مسار التحول نحو اقتصاد الهيدروجين في ليبيا.

مشكلة البحث:

يُعدّ الهيدروجين الأخضر وتأثيره على النمو الاقتصادي والاستدامة من المواضيع التي تحتاج إلى الكثير من الاهتمام الأكاديمي لذلك صُممت هذه الورقة للنظر في إمكانية تشخيص الفرص والتحديات والاستراتيجيات المرتبطة بانتقال ليبيا نحو اقتصاد الهيدروجين الأخضر. تستند الرؤية التي تتبناها هذه الورقة إلى وجود مُمكّنَات هامة تدعم تحول أنظمة الاقتصاد والطاقة في ليبيا إلى أنظمة متآزرة ومستدامة، ولا تستبعد الرؤية وجود تحديات تواجه هذا التحول. وفي إطار هذه الرؤية، تطرح الورقة السؤال التالي: تأسيسًا على الموارد والفرص المتاحة وفي ظل التحديات

القائمة هل بإمكان ليبيا تطوير نظام اقتصادي هيدروجيني مستدام؟

أهداف البحث:
تهدف الورقة إلى تسليط الضوء على نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات المرتبطة بإنتاج الهيدروجين في ليبيا والاستراتيجيات اللازمة لتدويره اقتصاديا.

منهج البحث:
تستند منهجية التحليل بشكل أساسي على أسلوب تحليل المحتوى من خلال مراجعة الأدبيات ذات الصلة، لاستكشاف الحالة السائدة والمسارات المستقبلية المحتملة والمشاريع المتعلقة باقتصاديات الهيدروجين.
أدوات التحليل: يُعد إطار مصفوفة تحليل SWOT أداةً استراتيجيةً مهمةً لتحليل المؤثرات الخارجية والداخلية. SWOT هو اختصار لنقاط القوة (Strengths)، ونقاط الضعف (Weaknesses)، والفرص (Opportunities)، والتهديدات (Threats). بحكم التعريف، تُعتبر نقاط القوة والضعف عوامل داخلية تخضع لرقابة مشددة. أما الفرص والتهديدات، فتُعتبر عوامل خارجية لا تخضع لأية ضوابط تُذكر. يُساعد تحليل SWOT الدولة على فهم أيٍّ من مواردها وقدراتها يُحتمل أن تُمثل مصادر للميزة التنافسية وأيها أقل احتمالًا لأن تكون مصادر لهذه المزايا، (Farhangi A., et. al., 2012).

الجدول 1، إطار مصفوفة تحليل SWOT.

إطار مصفوفة SWOT لتحليل نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات	
نقاط القوة (S) (عوامل داخلية)	نقاط الضعف (W) (عوامل داخلية)
الفرص (O) (عوامل خارجية)	التهديدات (T) (عوامل خارجية)

المصدر، عمل الباحث (2025).

يزخر عالم التخطيط الاستراتيجي بأدوات ونماذج تحليلية مُصممة لمساعدة المؤسسات على اتخاذ قرارات مدروسة. ومن هذه الأدوات، البالغة الأهمية، مصفوفة TOWS وهي أداة تُبسط التعقيد، وتُحوّل البيانات المُربكة إلى رؤى عملية وتقدم نهجًا أكثر دقة لتقييم نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات. تُبرز مصفوفة TOWS لاقتصاد الهيدروجين الأخضر ضرورة الاستفادة من نقاط القوة، كالفوائد البيئية والدعم الحكومي، لاستغلال فرص خفض التكاليف ودخول أسواق جديدة، مع التخفيف من نقاط الضعف، كارتفاع التكاليف وضعف البنية التحتية، من خلال مواجهة تهديدات

مثل عدم اليقين التنظيمي والمنافسة من شركات الطاقة الأخرى. كما يُعد إطار مصفوفة المقارنة لتحليل TOWS أداة هامة لتحديد استراتيجيات نقاط القوة والفرص (O&S)، واستراتيجيات نقاط الضعف والفرص (O&W)، واستراتيجيات نقاط القوة والتهديدات (T&S)، واستراتيجيات نقاط الضعف والتهديدات (T&W).

الجدول، إطار مصفوفة المقارنة لتحليل TOWS

مصفوفة المقارنة لاستراتيجيات نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات			
العوامل المؤثرة		عوامل داخلية	
		نقاط القوة (S)	نقط الضعف (W)
عوامل خارجية	الفرص (O)	استراتيجيات SO: الاستفادة من نقاط القوة لاغتنام الفرص.	استراتيجيات WO: التغلب على نقاط الضعف من خلال استغلال الفرص.
	التهديدات (T)	استراتيجيات ST: استخدام نقاط القوة لمواجهة التهديدات.	استراتيجيات WT: استراتيجيات دفاعية تهدف إلى تقليل نقاط الضعف وتجنب التهديدات.

المصدر، عمل الباحث (2025).

الدراسات السابقة:

صيغ مفهوم اقتصاد الهيدروجين في عام 972. ومع ذلك، في السنوات الأخيرة، انخفضت تكلفة سلسلة القيمة الكاملة الخاصة به بما يكفي لنشر الهيدروجين تجاريًا. تشمل العوامل الرئيسية التي تدفع التغيير في تكاليف سلسلة قيمة الهيدروجين ما يلي: (أ) الانخفاض الكبير في تكلفة الكهرباء الشمسية وطاقة الرياح، و(ب) التحسن المطرد في الوضع التجاري لأجهزة التحليل الكهربائي وخلايا الوقود والبنية التحتية الداعمة (Burdon, R., et.al., 2019). تُظهر الدراسات التي أجراها (Dawood, F., et. al., 2020)، أن اقتصاد الهيدروجين قد تم بحثه بنشاط؛ كما تم إعداد العديد من المراجعات ودراسات الحالة، وتم نشر العديد من تقارير خارطة الطريق التي تسلط الضوء على التقدم الرئيسي المحرز ودور الهيدروجين في قطاع الطاقة. هناك اهتمام متزايد بجعل إنتاج الهيدروجين واستخدامه عملية أكثر قابلية للتطوير وأكثر تنوعًا. إذا زاد الطلب العالمي على الهيدروجين فمن المرجح نتيجةً لذلك، أن ينشأ سوق عالمي للهيدروجين لتلبية هذا الطلب، (Milani, D. et. al., 2020). فيما يتعلق بنطاق تخزين ونقل الهيدروجين، تُعدّ التكاليف بالغة

الأهمية أيضًا، فعادةً ما يُخزّن الهيدروجين ويُنقل في حالة غاز مضغوط أو مُسال نظرًا لانخفاض كثافته (Mayyas, A., et. al., 2020). وقد فرضت بعض الدول بالفعل حدوداً وقيودًا على خلط الهيدروجين في شبكات الغاز الطبيعي. تتراوح هذه الحدود في ألمانيا بين 2% و8%، وفقًا لظروف مُحددة، وفرنسا 6%، وإسبانيا 5%، وأستراليا 4% (IEA, 2020). وفقًا لـ (Tabiti, E. et al. (2020) يعتبر الهيدروجين الأخضر مكلفًا على امتداد سلسلة القيمة الخاصة به، من التحليل الكهربائي إلى النقل وخلايا الوقود. إن البنية التحتية غير الكافية للنقل والتخزين، وخسائر الطاقة العالية، ونقص القيمة للفائدة الأساسية (مثل انخفاض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري) التي يمكن أن يحققها الهيدروجين الأخضر تُسهم بشكل كبير في ارتفاع التكاليف. قد تُمثل مصادر الهيدروجين الطبيعية أيضًا موردًا جديدًا جذابًا للطاقة الأولية الخالية من الكربون. ووفقًا لشركة أستوت أناليتيكا، من المتوقع أن يشهد سوق الهيدروجين العالمي ارتفاعًا في الإيرادات من 206.6 مليار دولار أمريكي في عام 2022 إلى 761.3 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2040 (Astute Analytica, 2021). يُعد إنتاج الغاز الطبيعي من عملية الإصلاح البخاري والاستخدامات الصناعية للهيدروجين متماسكًا نسبيًا، ومع ذلك، سيتطلب الاستخدام الأوسع لمشاريع الطاقة القائمة على الهيدروجين استمرار البحث والتطوير والاستثمار في الابتكار، ما يسمح للبلدان المنتجة بأن تصبح لاعبًا فاعلًا في اقتصاد الهيدروجين (Sabrina Macedo, et.al., 2023). كما يُمكن إجراء التخزين في كهوف الملح وخزانات الغاز أو النفط المُستنفدة، مما يُتيح تخزينًا واسع النطاق وطويل الأمد بتكاليف أقل من الخزانات. ويُمكن نقل الهيدروجين وتوزيعه من خلال خلطات الهيدروجين في خطوط أنابيب الغاز الطبيعي (Sabrina Macedo, et.al., 2023).

خطة البحث:

يتكون هيكل الورقة من ستة أجزاء، يختص الجزء الأول بالمقدمة، ويشير الجزء الثاني إلى أهمية وأهداف ومشكلة البحث، الجزء الثالث يوضح الإطار النظري لمنهجية البحث وطرق وأدوات التحليل، ويتناول الجزء الرابع مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة، الجزء الخامس يستعرض المناقشة والاستنتاجات، ويتضمن الجزء السادس الخلاصة والتوصيات.

لضمان اختيار العوامل المؤثرة في اقتصاد الهيدروجين الأخضر استند المسار التحليلي المُتبع على أدوات TOWS/SWOT وتم عرض النتائج من خلال جداول إطار تحليل TOWS/SWOT لتسليط الضوء على الفرص والتحديات. متبوعةً بشرحً لكل عنصر فيها. وتختتم الورقة بتلخيص

الاستنتاجات الرئيسية ووجهات النظر حول اقتصاد الهيدروجين الأخضر.

المناقشة والاستنتاجات:

يتمحور جانب المناقشة والاستنتاجات حول استكشاف نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات والمقايضات الكامنة فيما بينهما في السياق الليبي، وذلك بناءً على مراجعة عدد من الأدبيات ذات الصلة بمسارات إنتاج هيدروجين المستدامة والمجدية اقتصاديًا وتجاريًا ومُناخيًا، وللدخول في المناقشة نستهلها بتقديم فكرة عن تصنيفات الهيدروجين.

تصنيف الهيدروجين: لتصنيف إنتاج الهيدروجين يتم ترميزه بألوان مختارة حيث يتلون الهيدروجين المنتج باللون الرمادي والبني والأزرق والأخضر وأحيانًا الوردي والأصفر أو الهيدروجين متعدد الألوان، وفقًا للموارد والتقنيات المختلفة المستخدمة في إنتاجه، (Arcos, J. M. M. & D. M. F. Santos, 2023).

- الهيدروجين الرمادي: ينتج عن تقسيم الغاز الطبيعي إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون، ولكن لا يتم التقاط ثاني أكسيد الكربون المنبعث منه ويتم إطلاقه في الغلاف الجوي. الهيدروجين الرمادي الأكثر شيوعًا ينتج من الغاز الطبيعي أو الميثان عبر تقنية إعادة تشكيل الميثان بالبخار.
- الهيدروجين الأزرق: ينتج عن تقسيم الغاز الطبيعي إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون، ولكن يتم التقاط ثاني أكسيد الكربون وتخزينه. يتم إنتاج الهيدروجين الأزرق من خلال التقاط الكربون وحجزه. وسط ندوب (Scars) الوقود الأحفوري، يعمل الاختراع العلمي الأخير لإنتاج الهيدروجين من التفاعل بين معدن الألومنيوم مع الماء كبديل خالٍ من الكربون للوقود الأحفوري.
- الهيدروجين الأخضر: ينتج عن تقسيم الماء بالتحليل الكهربائي، هذه العملية لصناعة الهيدروجين الأخضر مدعومة بمصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح. يتم إنتاج الهيدروجين الأخضر عن طريق التحليل الكهربائي للماء الذي يعمل بالطاقة النووية بدلاً من مصادر الطاقة المتجددة (Graaf T.V.D., et. al., 2022). الهيدروجين الأخضر هو النوع الوحيد الذي يتم تصنيعه بطريقة محايدة للمُناخ، (Marchant N., 2021)، ويُعتبر وقودًا واعدًا لمستقبل منخفض الكربون. في السباق نحو الكربون الصفري الصافي. التحليل الكهربائي للماء هو عملية كهروكيميائية تفصل الماء إلى مكوناته من الأكسجين والهيدروجين في شكل غازي. يمكن أيضًا إنتاج الهيدروجين الأخضر عن طريق تقسيم الماء بالطاقة الشمسية المباشرة دون الحاجة إلى خطوة تحليل كهربائي وسيطة أو من خلال التحويل الكيميائي الحراري أو الكيميائي الحيوي للكتلة الحيوية (Megía P.J., et. al., 2021).
- الهيدروجين البني، يتم إنتاجه من الفحم عن طريق التغويز، (Gasification). هناك فرق

رئيسي آخر بين الهيدروجين الرمادي والبني وهو ببساطة الانبعاثات المنخفضة الناتجة عن إنشاء الهيدروجين الرمادي.

الهيدروجين الوردي، يتم إنتاجه عن طريق التحليل الكهربائي للماء بالطاقة النووية بدلاً من مصادر الطاقة المتجددة.

نقاط القوة الدافعة ضمن سلسلة الاقتصاد الهيدروجيني:

يهيمن الوقود الأحفوري على المشهد الاقتصادي الحالي في ليبيا ويشكل الطموح إلى تطوير نظام اقتصادي مستدام من خلال استغلال الموارد الطبيعية المتجددة الوفيرة أحد الركائز الليبية لضمان طاقة موثوقة وفعالة من حيث التكلفة ومتجددة وصديقة للمُناخ والبيئة. يمكن أن تؤدي تكاليف تكنولوجيا الطاقة المتجددة المتراجعة إلى تسريع هذا التحول وإطلاق العنان للإمكانات الاقتصادية الهائلة (Rajini K R Karduri & Christo Ananth, 2020). يتوقع خبراء الطاقة أن الهيدروجين منخفض الكربون لديه القدرة على أن يصبح سائدًا نظرًا لكفاءته العالية كمصدر طاقة وتوافره على نطاق واسع وصديق للبيئة مقارنة بالوقود الأحفوري (Karidis A., 2020) وبغض النظر على اللون أو الطيف الهيدروجيني تتمتع ليبيا بفرص منافسة لإنتاج الهيدروجين، وبالتالي، يمكن تلخيص نقاط القوى الدافعة لإنتاج الهيدروجين في ليبيا على النحو التالي:

- بإمكان حزمة موارد الهيدروجين المتوفرة في ليبيا أن تلعب دورًا كبيرًا في رفد مورد الوقود الأحفوري بموارد الهيدروجين المنتج عبر سلسلة الاقتصاد الهيدروجيني.
- مع ذروة الطلب على النفط، زاد الاهتمام بالطرق الاقتصادية البديلة الأكثر أمانًا لإنتاج الهيدروجين ومع استمرار تطوير تقنيات إنتاج الهيدروجين سيصبح بديل منافسا للوقود الأحفوري.
- أغلب البلدان الأوروبية، التي لديها مساحة محدودة من الأرض وإمكانات منخفضة نسبيًا للطاقة المتجددة ولكن الطلب على الطاقة لديها مرتفع، تُظهِر اهتمامًا متزايدًا باستيراد الهيدروجين الأخضر من البلدان النامية، وتعتبر ليبيا مرشح مثالي لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر، على أساس إمكاناتها اللوجستية ومواردها الاقتصادية وموقعها الاستراتيجي القريب من مراكز الطلب الأوروبية.
- تتمتع ليبيا بميزة كونها تقع بالقرب من مراكز الطلب الكبيرة في أوروبا، وبنيتها الأساسية الحالية للغاز الطبيعي والتي يمكن إعادة تأهيلها بتكلفة معقولة لنقل الهيدروجين.
- تتميز ليبيا بوفرة الأراضي الشاسعة التي تستقبل الإشعاع الشمسي بكثافة وبصورة يومية. تتلقى الأراضي الليبية إشعاعًا شمسيًا سنويًا متوسطًا يتجاوز 2100 كيلووات ساعة / متر مربع (IRENA & AfDB, 2022) ومع ذلك، فمن المبشر أن تكون الإمكانات الفنية للطاقة المتجددة

أكبر بأكثر من 1000 مرة من الطلب المتوقع على الطاقة في عام 2040.

- يبدو خيار تحلية مياه البحر الخيار الأكثر جدوى لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ليبيا. تحلية مياه البحر هي طريقة أخرى لتقليل الضغط على إمدادات المياه العذبة من خلال الاستفادة من المياه المالحة الوفيرة.

- عالميا يسيطر الوقود الأحفوري على الإنتاج الحالي للهيدروجين بسبب انخفاض تكلفته. بإمكان ليبيا إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري أو الكتلة الحيوية مع التقاط الكربون وتخزينه، أو من خلال أجهزة التحليل الكهربائي التي تعمل بالطاقة المتجددة.

- بإمكان ليبيا تعظيم الاستفادة من وفرة غازات النفايات الصناعية وإنشاء سلسلة توريد هيدروجين مستدامة. يمكن تحويل غازات العمليات الصناعية، التي يُنظر إليها غالبًا على أنها انبعاثات، إلى موارد قيمة من خلال الأساليب المبتكرة. توفر تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة فرصًا لاستخراج الطاقة وتقليل النفايات. ومن خلال تبني هذه الاستراتيجيات، يمكن لليبيا تعزيز توليد الطاقة وتقليل بصمتها الكربونية.

- إنتاج وقود الهيدروجين المشتق من النفايات، تتضمن هذه العملية تحويل النفايات العضوية، مثل "المخلفات الزراعية ونفايات الطعام وحماة الصرف الصحي" إلى هيدروجين من خلال عمليات التغويز أو الهضم اللاهوائي. لا توفر هذه العمليات مصدرًا مستدامًا للهيدروجين فحسب، بل تقدم أيضًا حلاً للمشكلة المتنامية المتمثلة في إدارة النفايات العضوية.

نقاط الضعف التي تشكل عائقًا ضمن سلسلة الاقتصاد الهيدروجيني:

تتعدد نقاط الضعف التي تشكل عائقًا رئيسيًا أمام اقتصاد الهيدروجين في ليبيا ومن أهمها:

. يجب تحسين الهياكل المؤسسية والقانونية والتنظيمية، وتكييفها لتوفير الاستقرار والقدرة على التنبؤ والثقة للمستثمرين. كما سيكون من الضروري توفير الأمن للصناعة والمستهلكين. . يُعد تكرير النفط منتجًا مهمًا للهيدروجين في ليبيا، ولكن لا يوجد سوق لهذا المنتج ونتيجة لذلك، فإن الإنتاج يعادل استهلاك المصافي، مع توفر طاقة إنتاجية خاملة لتلبية الاحتياجات المحتملة في أسواق الهيدروجين. . بالرغم من وجود سوق المواد البيتروكيميائية والأسمدة الليبية التقليدية واستخدامها في عمليات التكرير، لم يتم تحفيز التطبيقات الأخرى للهيدروجين لتوليد سوق تنافسية إضافية. . لا توجد حوافز ضريبية حكومية تدعم نشأة السوق. . تواجه البنية التحتية للهيدروجين تحديات تكنولوجية ومالية، مما يتطلب حلولاً معدنية خاصة لخطوط الأنابيب والخزانات، وهي أكثر تكلفة من البنى التحتية التقليدية. . انعدام التدريب المهني التقني (يقتصر حاليًا على البحث والتطوير). نقص الموارد البشرية المؤهلة، سواءً على المستوى التشغيلي أو على

المستوى الهندسي والتكنولوجي، مما يعني أن الدولة ستعتمد، على الأقل لفترة طويلة، على الموردين الأجانب. □. يواجه طموح استخدام الهيدروجين للطاقة تحديات تكنولوجية وسوقية كبيرة على طول سلسلة التوريد بأكملها (الإنتاج والنقل والتخزين والاستهلاك). □. الحاجة إلى المزيد من الاهتمام بسوق الغاز في ليبيا مقارنة بالدول الأخرى، نظرا لمحدودية مدى شبكة أنابيب الغاز التي يتركز معظمها في المنطقة الساحلية. □. الحاجة إلى بناء بنية تحتية خاصة بالهيدروجين (التخزين والتوزيع) وبنية تحتية محدودة خاصة بالغاز الطبيعي. □. لا توجد محطات للتزود بالوقود للاستخدام في المركبات ذات خلايا الوقود. □. لا يوجد حتى الآن تنظيم محدد لاستخدام الهيدروجين ونقله وتخزينه. □. هناك حاجة لتحديد القيود الضريبية والتمويلية، بالإضافة إلى الحاجة إلى تحسين الظروف لجذب الاستثمارات في الهيدروجين منخفض الكربون. □. المسافات الطويلة لنقل الهيدروجين تحفز عامل التكلفة. □. الغياب الفعلي للهيدروجين في مصفوفة الموارد الاقتصادية الليبية. □. نقص حجم إنتاج المعدات الوطنية (أجهزة التحليل الكهربائي). □. بالرغم من وجود مسارات وخيارات وفرص على المستوى الاستراتيجي، ومع ذلك، لا توجد رؤية واضحة لإمكانات القيمة السوقية للهيدروجين، ولا يوجد تحديد مفعل للأولويات اللازمة لوضع استراتيجية وطنية.

الفرص والفوائد المترتبة على إنشاء اقتصاد الهيدروجين الأخضر في ليبيا:

بإمكان إنتاج الهيدروجين عبر سلسلة الاقتصاد الهيدروجيني المساهمة في تحقيق الفوائد التالية:

□. النمو الاقتصادي: إن تبني حلول الطاقة الهيدروجينية المبتكرة في الصناعات من شأنه أن يحفز النمو الاقتصادي. كما أنه من الممكن أن يخلق فرصًا جديدة للسوق، ويعزز التقدم التكنولوجي، ويجذب الاستثمارات في قطاع الطاقة المتجددة. □. الفوائد البيئية: لا ينتج الهيدروجين أي انبعاثات غازية دفيئة عند استخدامه في خلايا الوقود، مما يساهم في تقليل البصمة الكربونية. ومن خلال معالجة النفايات، يساهم الهيدروجين في تنويع مزيج الطاقة وتخفيض الانبعاثات المتسببة في تغيُّر المُناخ. □. أهداف التنمية المستدامة: يتماشى نهج الاقتصاد الهيدروجيني مع العديد من أهداف التنمية المستدامة، بما في ذلك الطاقة النظيفة وبأسعار معقولة (الهدف، 7)، والاستهلاك والإنتاج المسؤولان (الهدف، 12)، والصناعة والابتكار والبنية الأساسية (الهدف، 9)، والعمل المُناخي (الهدف، 13). إن تطوير البنية التحتية للهيدروجين النظيف من خلال الإصلاحات النظامية يمكن أن يساهم في الأمن الغذائي (الهدف، 2 والهدف، 3)، وتحسين فرص الحصول على سبل عيش عادلة (الهدف، 8)، والحد من التفاوت (الهدف، 10)، وتعزيز المدن والمجتمعات المستدامة (الهدف، 11) (Trüby, J., et. al., 2023). علاوة على ذلك، يمكن لخلايا وقود الهيدروجين

دعم تحقيق أهداف التنمية المستدامة، وخاصة تلك المتعلقة بالطاقة النظيفة وبأسعار معقولة (الهدف، 7)، ومن خلال دعم الانتقال إلى الاقتصاد الهيدروجيني، يمكن لخلايا وقود الهيدروجين أيضًا المساهمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة الأخرى، مثل تلك المتعلقة بالعمل بالحياة تحت الماء (الهدف، 14)، من خلال تقليل كمية النفايات المرسلة إلى مكبات النفايات ومحارق النفايات، يمكن لخلايا وقود الهيدروجين المساعدة في حماية النظم البيئية البحرية من التلوث. وكل ذلك يدل على مساهمته في أجندة الاستدامة العالمية.

تمتلك ليبيا فرص لدعم آفاق التعاون الدولي بشأن الهيدروجين الأخضر مع الاتحاد الأوروبي. يمكن إنتاج الهيدروجين في أي مكان تقريبًا في العالم؛ ومع ذلك، فإن القدرة التنافسية الاقتصادية تختلف حسب المنطقة والبلد. وفي الوقت نفسه، هناك فجوة كبيرة بين الأماكن التي يوجد فيها الطلب المرتفع على الهيدروجين والأماكن التي تتوفر فيها إمكانية الحصول على كميات كبيرة من إمدادات الهيدروجين الأخضر. تتمتع ليبيا بإمكانية إنتاج كميات هائلة من الهيدروجين الأخضر نظرًا لوفرة الطاقة الشمسية المتجددة، والمساحة الأرضية الشاسعة، ومياه البحر، وشبكات أنابيب نقل الغاز، والدافع القوي للتنمية المحايدة للمُناخ. وتتميز ليبيا بموقع استراتيجي كجسر بين إفريقيا وأوروبا وتبلغ مساحتها 1.759,40 كيلومترًا مربعًا، (680,000 ميلًا مربعًا)، ويحدها من الشمال حوض البحر الأبيض المتوسط، ويبلغ إجمالي طول ساحلها 1820 كيلومترًا (1131 ميلًا). وتشمل الموارد الواعدة الأخرى الأراضي الشاسعة المنبسطة وتوفر موارد الطاقة الشمسية الوفيرة، فضلاً عن المناظر الطبيعية الصحراوية الشاسعة والظروف المثالية المناسبة لنشر البنية الأساسية للطاقة المتجددة. وفي حين يُنظر إلى متطلبات المياه لإنتاج الهيدروجين على أنها معتدلة، إلا إن مياه البحر الليبية كافية لسد هذه الثغرة.

بإمكان ليبيا استغلال فرصة الاستثمار في مبادرة الطاقة الخضراء بين أفريقيا وأوروبا، (Africa–Europe Green Energy Initiative)، تهدف المبادرة إلى تيسير التعاون بين القطاعات الأوروبية والأفريقية في كل من القطاعين العام والخاص. وتشمل أهدافها الأساسية توسيع إنتاج الكهرباء، وتحسين الوصول إلى الطاقة، وتعزيز كفاءة الطاقة، ودعم الإصلاحات التنظيمية المواتية للاستثمار الخاص، وتعزيز تكامل السوق. وباعتبارها عنصراً حيوياً في البوابة العالمية الأفريقية، تجمع مبادرة أوروبا بين الاتحاد الأوروبي ودوله الأعضاء والمؤسسات المالية والإنمائية الأوروبية والقطاع الخاص. ومن بين الشركاء الرئيسيين في هذا الجهد التعاوني البنك الأوروبي للاستثمار والبنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية. ويتمثل الهدف الشامل في تضافر الجهود في تعزيز حلول الطاقة المستدامة وتعزيز الشراكات ذات المنفعة المتبادلة بين أفريقيا وأوروبا،

(Dagnachew Anteneh G, et. al., 2023). بإمكان ليبيا أن تستغل مواردها الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر. ونظرا لمحدودية قدرة العديد من البلدان الأوروبية على إنتاج الهيدروجين فمن المرجح أن تستخدم معظم إمكانات الطاقة المتجددة لإنتاج الكهرباء النظيفة. لذلك، هناك اهتمام متزايد بالإمكانات الليبية للهيدروجين كمكون رئيسي للشراكة الأوروبية الليبية. ونظرًا لتوقعات التحول العالمي في مجالات الاقتصاد والطاقة، يمكن أن يلعب إنتاج الهيدروجين في ليبيا دورًا حيويًا في التحول الاقتصادي وإزالة الكربون من الصناعات التي يصعب الحد منها في مناطق أخرى. وهذا يخلق وضعًا مربحًا لليبيا كبلد مصدر وللبلدان المستوردة كبلدان مستهلكة. إن احتضان أوروبا لواردات الهيدروجين من ليبيا من شأنه أن يعزز ويسهل انتقال أوروبا إلى نظام طاقة مستدام، ويقدم فرصة لليبيا للاستفادة من تبادل التعاون للمساعدة في تنفيذ المبادرات الأوروبية للهيدروجين الأخضر، EU Green Hydrogen Policies and Initiatives، بما يتماشى مع التزاماتها باتفاقية باريس للمناخ.

التهديدات والتحديات والمخاوف التي تشكل عائقًا رئيسيًا أمام اقتصاد الهيدروجين:

- تحديات الندرة الاقتصادية للمياه العذبة، تتميز ليبيا بمناخها الجاف وشبه الجاف. ويشكل الإجهاد المائي وندرته مشكلتين سائدتين بشكل خاص تعتبر ليبيا من بلدان الشمال الأفريقي الأكثر جفافًا جنوبي حوض البحر المتوسط (IPCC, 2022). في ليبيا تأتي النسبة الأكبر من إمدادات المياه من الآبار وهذا يزيد من الضغط على مواردها المائية الجوفية. ومن المرجح أن تشتد أنماط ندرة هطول الأمطار والجفاف المستمر في العقود القادمة، حيث من المتوقع أن ينخفض هطول الأمطار بنسبة تصل إلى 65٪ خلال مواسم الجفاف (World Bank, 2023) ما يؤدي إلى تفاقم ضعف المجتمعات المحلية التي تعتمد على الزراعة وتربية الماشية. يتطلب اقتصاد الهيدروجين الأخضر الكثير من المياه، ولكن في سياق الطلب العالمي الإجمالي الحالي على المياه، فإن الزيادة الناجمة عن اقتصاد الهيدروجين ضئيلة. ووفقًا لتقديرات (الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، IRENA, 2022) فإن الطلب العالمي السنوي على الهيدروجين في ظل سيناريو المناخ 1.5 م° الذي يصف مسار انتقال الطاقة يصل إلى 614 مليون طن بحلول عام 2050 (IPCC, 2018).

- تحديات متطلبات وإدارة البنية الأساسية لنقل وتخزين الهيدروجين: لكي يساعد التخزين في دفع ليبيا نحو مستقبل خالٍ من الكربون، يتعين على الجهات التنظيمية أن تضع سياسات مناسبة لتوفير تعويض مناسب عن الفائدة التي يقدمها للشبكات. إن نشر أنظمة تخزين الهيدروجين بنجاح من شأنه أن يوفر توصيل الهيدروجين بشكل آمن ومنخفض التكلفة، كما يسمح بنشر الهيدروجين

وتسويقه بشكل أسرع. ويمكن إعادة تهيئة خطوط الأنابيب والبنية الأساسية للغاز لنقل الهيدروجين وتخزينه. في ليبيا يتمثل الحاجز الأول حالياً في عدم وجود بنية تحتية مخصصة لنقل أو توزيع الهيدروجين.

- تحديات المخاوف المتعلقة بالسلامة والبيئة، إن المخاوف المتعلقة بالسلامة البيئية تشكل عائقًا رئيسيًا آخر أمام اقتصاد الهيدروجين. فنظرًا لكثافة الهيدروجين المنخفضة ونطاق قابليته للاشتعال الواسع نسبيًا مقارنة بالوقود الآخر، والذي يتراوح من 4% إلى 75% من حيث الحجم في الهواء وما يصل إلى 95% في الأكسجين في الظروف الجوية (Schmidtchen U., 2009) فإن تسرب الهيدروجين سيؤدي إلى انفجار عند اشتعاله أو إشعاله. كما أن لهب الهيدروجين عديم الرائحة وغير المرئي تقريبًا يفرض تحديات أمنية وكشفية إضافية. ومن أجل التنبؤ بسلامة الهيدروجين وتحليل حوادث تسربه، اقترح هان وآخرون، (Han U., et. al., 2018) تطبيق ديناميكيات السوائل الحسابية للتحليل المكثف والنمذجة العددية لتصريف الغاز والاختلاط.

- تحديات الربط مع الشبكة العامة للكهرباء، قد يكون توافر الشبكة الكهربائية مصدر قلق لتطوير مشاريع الهيدروجين، حيث لا يُسمح لمعظم محطات الطاقة المتجددة بالاتصال بالشبكة بسبب نقص البنية التحتية (خطوط النقل والمحطات الفرعية).

- تحديات بناء قدرات المؤسسات والموارد البشرية، تحتاج ليبيا إلى تسريع استراتيجيتها، إذ يُمكن أن يُحقق تطوير اقتصاد الهيدروجين فوائد عديدة تتجاوز تحسين البيئة. سيتطلب إنشاء هذه التكنولوجيا الجديدة موارد بشرية، ما يعني أن تأهيل المهنيين سيكون مفتاح الحفاظ على هذا الاقتصاد وتطويره. وهذا يعني أن هذه العملية برمتها يُمكن أن تُساهم بشكل كبير في ازدهار الناس، وفي الوقت نفسه في نمو البلاد.

من خلال المناقشة والاستنتاجات السابقة التي تمت بناءً على مراجعة عدد من المراجع تم إعداد مصفوفة خصائص الهيدروجين، ومصفوفة نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات. ومصفوفة المقارنة وفقًا للجداول 3 و4 و5.

الجدول 3، مصفوفة (SWOT) لتحليل خصائص الهيدروجين.

تحليل نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات لمورد الهيدروجين الأخضر	
نقاط القوة	نقاط الضعف
(S) ⟸ • وقود نظيف. • خالٍ من الانبعاثات • يتم إنتاجه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة. • ناقل طاقة متعدد الاستخدامات. كثيف الطاقة،	(W) ⟸ • ارتفاع تكلفة الإنتاج • الحاجة إلى توسيع البنية التحتية بشكل كبير. • تحديات تكنولوجيا المحلل الكهربائي. • تعقيد التخزين

توفر غير محدود في الماء. غير سام. مرونة في الاستخدام.	والنقل. • يحترق بشكل غير مرئي. ذاتي الاشتعال.
الفرص	**التهديدات**
(O) ⟸ • انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة. • الاستثمار الحكومي القوي ودعم السياسات. • التقدم التكنولوجي في التحليل الكهربائي. • دفع عالمي متزايد نحو الاستدامة. • أساليب تخزين جديدة.	(T) ⟸ • التحديات التقنية والسلامة المتعلقة بالهيدروجين. • المنافسة من الوقود الأحفوري الراسخ. • عدم اليقين السياسي. • تحديات التسرب. • الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة المتقطعة.

المصدر، عمل الباحث (2025).

الجدول 4، مصفوفة تحليل نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات (SWOT)

تحليل نقاط القوة ونقاط الضعف والفرص والتهديدات لاقتصاد الهيدروجين الأخضر	
نقاط القوة (S)، (عوامل داخلية)	**نقاط الضعف (W)، (عوامل داخلية)**
□ (S_1) ⟸ يتوقع خبراء الطاقة أن الهيدروجين الأخضر منخفض الكربون لديه القدرة على أن يصبح سائدًا نظرًا لكفاءته العالية كمصدر طاقة وتوافره على نطاق واسع وصديق للبيئة. □ (S_2) ⟸ تعتبر ليبيا مرشح مثالي لمشاريع الهيدروجين الأخضر واسعة النطاق لامتلاكها الأراضي الغنية بالطاقة الشمسية + الوقود الاحفوري + وفرة مياه البحر+ غازات النفايات الصناعية. □ (S_3) ⟸ تتمتع ليبيا بميزة كونها تقع بالقرب من مراكز الطلب الكبيرة في أوروبا. □ (S_4) ⟸ تمتلك ليبيا بنية أساسية للغاز الطبيعي والتي يمكن إعادة تأهيلها لنقل الهيدروجين.	□ (W_1) ⟸ ضعف ثقة المستثمرين والمستهلكين في أداء الهياكل المؤسسية والقانونية والتنظيمية وغياب الفعلي للهيدروجين في مصفوفة الموارد الاقتصادية الليبية. □ (W_2) ⟸ عدم وجود سوق لوقود الهيدروجين + عدم وجود حوافز ضريبية حكومية تدعم نشأة سوق الهيدروجين. □ (W_3) ⟸ عدم اليقين التكنولوجي للصناعة الليبية. □ (W_4) ⟸ تواجه البنية التحتية للهيدروجين تحديات تكنولوجية ومالية وانعدام التدريب المهني التقني وقلة الموارد البشرية المؤهلة.

الفرص (O)، (عوامل خارجية)	التهديدات (T)، (عوامل خارجية)
□ (O_1) ⟸ إنتاج الهيدروجين عبر سلسلة الاقتصاد الهيدروجيني بإمكانه المساهمة في تحقيق النمو الاقتصادي، الفوائد البيئية والاستدامة. □ (O_2) ⟸ دعم آفاق إمكانات التعاون الدولي بشأن الهيدروجين النظيف بين ليبيا وأوروبا. □ (O_3) ⟸ بإمكان ليبيا الاستفادة من الانخراط في مبادرة الطاقة الخضراء بين أفريقيا وأوروبا. □ (O_4) ⟸ تخفيض الانبعاثات الكربونية.	□ (T_1) ⟸ تحديات الندرة الاقتصادية المياه العذبة. □ (T_2) ⟸ تحديات متطلبات وإدارة البنية الأساسية لنقل وتخزين الهيدروجين تحديات الربط مع الشبكة العامة للكهرباء. □ (T_3) ⟸ تحديات المخاوف المتعلقة بالسلامة والبيئة. □ (T_4) ⟸ تحديات بناء قدرات المؤسسات والموارد البشرية.

المصدر، عمل الباحث (2025)

الجدول 5، إطار مصفوفة المقارنة لإستراتيجيات نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات.

مصفوفة المقارنة لاستراتيجيات اقتصاد الهيدروجين الأخضر			
العوامل المؤثرة		عوامل داخلية	
		نقاط القوة	نقط الضعف
عوامل خارجية	الفرص	(S_1⇋O_2) ≃ تعزيز استخدام دور الهيدروجين كمورد اقتصادي. (S_2⇋O_1) ≃ تطوير التشريعات الشاملة المنظمة للاقتصاد الهيدروجين. (S_3⇋O_3) ≃ الانفتاح الاقتصادي الدولي لتحفيز الشراكة والتعاون. (S_4⇋O_3) ≃ الاستفادة الاقتصادية من مصادر الطاقة المتجددة المتنامية لتقليل التكاليف وتوسيع نطاق الإنتاج..	(O_1⇋W_2) ≃ تحفيز التطوير والابتكار والبحث. (O_2⇋W_3) ≃ تحفيز تطوير البنية التحتية للهيدروجين. (O_3⇋W_1) ≃ مبادرات حكومية لتبادل التعاون. (O_4⇋W_4) ≃ الاستفادة من مصادر التمويل المحلي والدولي.

	التهديدات	$(S_3 \leftrightarrows T_2)$ ≃ استمرار تمويل البحث والتطوير لاستكشاف التطبيقات المحتملة. $(S_1 \leftrightarrows T_3)$ ≃ استخدام الموارد النظيفة المتأصلة لكسب حصة سوقية من الوقود الأحفوري لتقليل المنافسة بينها. $(S_2 \leftrightarrows T_1)$ ≃ التعاون بين الجهات الفاعلة في مجال الطاقة، ومراكز البحث والاقتصاديين. $(S_4 \leftrightarrows T_4)$ ≃ التأهيل وبناء القدرات.	$(T_3 \leftrightarrows W_3)$ ≃ تعزيز مؤشرات الاستعداد والجهازية. $(T_2 \leftrightarrows W_1)$ ≃ استقطاب الاستثمارات الخاصة والأجنبية لدعم مشاريع اقتصاد الهيدروجين ماليًا. $(T_1 \leftrightarrows W_2)$ ≃ تطبيق قانون خاص لضمان السلامة والاستقرار في الاستخدام. $(O_4 \leftrightarrows T_4)$ ≃ تطوير سياسات محددة لمعالجة التحديات.

المصدر، عمل الباحث (2025).

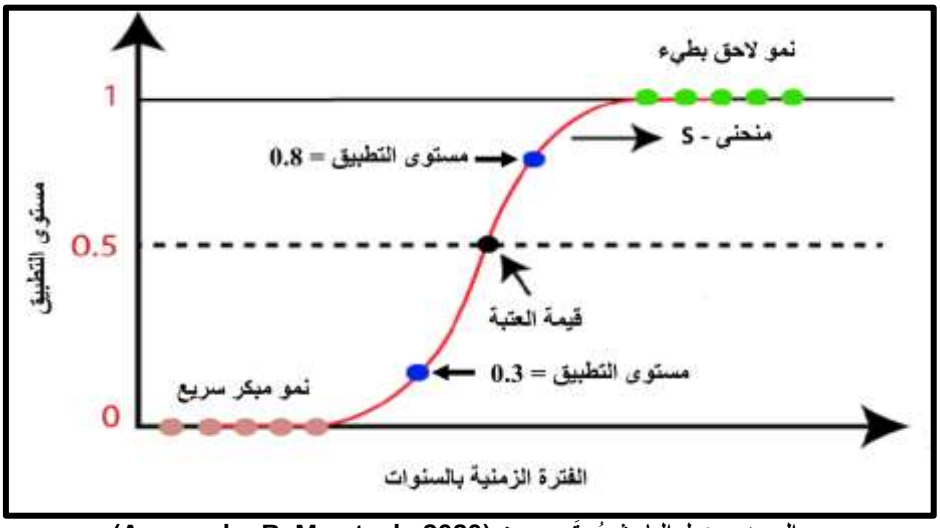
يتبع منحنى فوائد تطبيق اقتصاد الهيدروجين الأخضر منحنى (S)، ما يشير إلى نمو أولي بطيء، وتوسع سريع بعد الوصول إلى نقطة تحول، ثم استقرار مع نضج السوق وتشبعه. ويعود هذا المسار إلى انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة، مما يجعل الهيدروجين الأخضر أكثر تنافسية، وإنشاء أسواق جديدة من خلال دعم السياسات والتزام الشركات، ما يؤدي إلى زيادة الاستثمارات في كل من العرض والطلب. يُظهر منحنى S المراحل التالية:

- المرحلة 1: بداية بطيئة: يبدأ الابتكار بتبني بطيء مع تطوير أصحاب الرؤى لمفهوم الهيدروجين الأخضر وإدراك الفرصة ووضع تصور أولي للهيدروجين الأخضر.
- المرحلة 2: النمو والابتكار: تنخفض التكاليف بفضل التقدم التكنولوجي المستمر، ويبدأ المبتكرون في تشكيل أسواق متخصصة بالانتقال من المفاهيم المختبرية إلى المشاريع التجريبية والنماذج الأولية.
- المرحلة 3: النمو السريع، يصل الهيدروجين الأخضر إلى نقطة تحول، غالبًا ما تتراوح حصته السوقية بين 5-10%، ثم ينمو بسرعة ليهيمن على السوق. تتميز هذه المرحلة بدعم حكومي كبير من السياسات والاستثمارات وإنشاء سلاسل توريد قوية.
- المرحلة 4: (السوق الشامل)، يتفوق الهيدروجين الأخضر على التقنيات الحالية من حيث

الأداء والتكلفة، مما يؤدي إلى نمو هائل.

• المرحلة 5: تشبع السوق، يتباطأ النمو مع نضج الابتكار ووصوله إلى مستويات عالية من اختراق السوق، مما قد يؤدي إلى مزيد من الابتكار أو الانتقال إلى أسواق جديدة. يصل السوق إلى مرحلة التشبع، ويتباطأ النمو.

وعلى هذا الأساس، يتوافق منحنى فوائد اقتصاد الهيدروجين الأخضر مع منحنىً على شكل حرف S، يتميز بتباطؤ التكاليف وتسارع الطلب مع انتقاله من مرحلة التبني المبكر إلى الانتشار الواسع في السوق (Annwesha et. al., 2020). ومن المتوقع أن تنخفض التكاليف بشكل ملحوظ بحلول عام 2030 بفضل وفورات الحجم والتقدم التكنولوجي، بينما ينمو الطلب بثبات في التطبيقات المتخصصة الأولية قبل أن يرتفع بشكل حاد في منتصف إلى أواخر ثلاثينيات القرن الحالي في قطاعات الصناعة والنقل والطاقة. ويخلق هذا المسار حلقة إيجابية، حيث يؤدي ازدياد الحجم إلى خفض التكاليف، مما يجعل الهيدروجين الأخضر أكثر تنافسية ويعزز الطلب والاستثمار. ويُطلق العنان لفوائد اقتصادية كبيرة للشركات الرائدة والدول التي تقود الابتكار والتوسع.



المصدر، عمل الباحث مُستَوحى من (Annwesha B. M., et. al., 2020).
الشكل 1، الهيدروجين الأخضر على منحنى S.

الخلاصة والتوصيات:

في جوهره، يُعد اقتصاد الهيدروجين منارةً لمستقبل مستدام، إلا أن الطريق إلى تحقيقه محفوفٌ بتحدياتٍ تكنولوجيةٍ وبنيويةٍ وسوقيةٍ وبيئية. هذه التحديات هائلة، لكنها ليست مستعصية على الحل. بفضل جهدٍ عالميٍّ متضافرٍ يُسخّر قوة الابتكار والتعاون، يُمكن لاقتصاد الهيدروجين أن ينتقل من رؤيةٍ مُقنعةٍ إلى واقعٍ ملموس، في ليبيا يُعد تطوير اقتصاد الهيدروجين مسارًا استراتيجيًا مُهيئًا لتحفيز النمو الاقتصادي وخلق فرص عمل جديدة ويُشكّل أساسًا لاقتصاد أكثر اخضرارًا واستدامةً. يُعد إنتاج الهيدروجين في ليبيا محدودًا مقارنةً بإمكانياته، لذلك يحتاج الوضع الحالي إلى تخطيط استراتيجي لتطوير آليات الانتاج والاستثمار الاقتصادي في موارد الهيدروجين المتاحة في ليبيا. تتلخص عوامل التصنيف للوضع الحالي كالتالي، أولًا-نقاط القوة: (وفرة الموارد المتجددة، البنية التحتية القائمة، الموقع الاستراتيجي). الوصف: تتمتع ليبيا بإمكانيات كبيرة في مجال الطاقة الشمسية، وهي ضرورية لإنتاج الهيدروجين الأخضر. يمكن تكييف البنية التحتية القائمة للنفط والغاز لإنتاج الهيدروجين وتوزيعه. زيادة التركيز على تنويع مصادر الطاقة والاستدامة في السياسات الوطنية. أهداف الطاقة المتجددة القائمة، وبعض الدعم لتنويع مصادر الطاقة. القرب من أسواق تصدير الهيدروجين المحتملة في أوروبا. ثانيًا-نقاط الضعف: (الاعتماد المطلق على الوقود الأحفوري. نقص الخبرة التكنولوجية. محدودية الوعي العام. الفجوات التكنولوجية. القيود الاقتصادية. عدم اليقين التنظيمي). الوصف: يُعيق الاعتماد الاقتصادي على النفط والغاز الاستثمار في مصادر الطاقة البديلة، مثل الهيدروجين. كما أن نقص الخبرة المحلية في تقنيات الهيدروجين المتقدمة وعمليات إنتاجه يُعيق تطويره. كما أن ضعف الوعي العام بالهيدروجين وقبوله كمصدر طاقة فعال يُعيق تطويره. بالإضافة إلى ذلك، يُعيق نقص الاستراتيجية المُحددة للهيدروجين، ومحدودية الحوافز المالية المباشرة، وعدم اتساق تطبيق اللوائح. كما أن الخبرة المحلية المحدودة في تقنيات المُحلل الكهربائي المتقدمة ومواد تخزين الهيدروجين، تُعيق الاستثمار، أيضاً ارتفاع تكاليف رأس المال لأنظمة المُحلل الكهربائي والطاقة المتجددة يُعيق الوصول إلى التمويل الدولي. بالإضافة إلى ذلك، تُعيق اللوائح المُختلفة، وغياب إطار قانوني شامل لإنتاج الهيدروجين وتوزيعه. ثالثًا-الفرص: (التعاون الدولي. الاستثمار في البحث والتطوير. الطلب في السوق العالمية. نقل التكنولوجيا. التنويع الاقتصادي. دعم السياسات). الوصف: إمكانية إقامة شراكات مع دول رائدة في تطوير تكنولوجيا الهيدروجين (مثل الاتحاد الأوروبي وافريقيا). فرص للابتكار من خلال استثمارات البحث والتطوير لخفض تكاليف الإنتاج وتحسين كفاءة التكنولوجيا. يُهيئ الطلب العالمي المتزايد على حلول الطاقة النظيفة سوقًا لصادرات الهيدروجين الليبية. إمكانية الحصول على

تقنيات متقدمة من خلال شراكات دولية واتفاقيات ترخيص. فرصة لتنويع الاقتصاد بعيدًا عن النفط والغاز وخلق فرص عمل جديدة في قطاعي الطاقة المتجددة والهيدروجين. إمكانية وضع تدابير سياسية مُستهدفة لتعزيز إنتاج الهيدروجين الأخضر، مثل الحوافز المالية والإصلاحات التنظيمية وآليات تسعير الكربون. رابعًا -التهديدات: (عدم الاستقرار الجيوسياسي. المنافسة من مصادر الطاقة الأخرى. التحديات التنظيمية. القبول العام. تقلب أسعار الطاقة). الوصف: قد تُعيق الصراعات الإقليمية جهود الاستثمار والتطوير في قطاع الهيدروجين. قد تُلقي تقنيات الطاقة المتجددة المتنافسة (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) بظلالها على مبادرات الهيدروجين إذا لم يُخططّ لها استراتيجيًا. قد تُعيق الأطر التنظيمية غير الواضحة الاستثمار والتطوير في قطاع الهيدروجين. ضعف الوعي العام وقبول الهيدروجين كمصدر طاقة آمن وموثوق. تقلبات أسعار النفط والغاز التي قد تؤثر على الجدوى الاقتصادية للهيدروجين الأخضر. بينما ينصبّ التركيز طويل الأمد على الهيدروجين الأخضر. ونظرًا لاحتياطيات ليبيا الكبيرة من الغاز الطبيعي.

يتوافق اقتصاد الهيدروجين الأخضر مع مفهوم منحنى التكلفة المحتملة (غالبًا ما يكون منحنى S أو منحنى تكلفة مشابه) أساسي لنمذجة تطوره، إذ يُظهر كيف يتزايد إنتاج الهيدروجين المحتمل مع انخفاض التكاليف. توضح هذه المنحنيات أنه مع انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة وأجهزة التحليل الكهربائي، يُمكن إنتاج كميات هائلة من الهيدروجين الأخضر، حيث تتمتع بعض المناطق بإمكانيات كبيرة جدًا بتكاليف منخفضة. تشمل العوامل الرئيسية المؤثرة على هذه المنحنيات وفرة الموارد المتجددة، والتقدم التكنولوجي، ودعم السياسات، وتحسين سلاسل التوريد، حيث يجب أن يصبح الهيدروجين الأخضر قادرًا على منافسة مصادر الطاقة الأخرى.

عالميًا يمر اقتصاد الهيدروجين الأخضر حاليًا بالمرحلة الثالثة من نموه على شكل منحنى S، والذي يتميز بتسارع الاستثمار، واتخاذ إجراءات سياسية، وتكوين أسواق مبكرة، وهو اتجاه مدفوع بشكل أكبر بالانخفاض الحاد في تكاليف الطاقة المتجددة. ستؤدي هذه المرحلة إلى فترة من النمو السريع في المرحلة الرابعة، حيث يصبح الهيدروجين الأخضر منافسًا من حيث التكلفة للوقود الأحفوري في الأسواق الشاملة، يليه تشبع السوق في المرحلة الخامسة.

التوقعات المستقبلية، يشير المسار الحالي إلى أن الهيدروجين الأخضر مهيأ للتوسع بشكل كبير، وقد يسير على نفس خطى الطاقة المتجددة والبطاريات. ومع استمرار انخفاض التكاليف، من المتوقع أن يصبح الهيدروجين الأخضر قوةً مهيمنةً في إزالة انبعاثات الكربون من الصناعات التي يصعب التخلص منها.

توصي الورقة بالتركيز على دراسة الهيدروجين الأزرق المُنتَج من الغاز الطبيعي باستخدام تقنية

احتجاز الكربون وتخزينه. ويُعدّ إصلاح الميثانول والغاز الاصطناعي مسارات انتقالية محتملة، حيث يُمكنهما الاستفادة من البنية التحتية القائمة.

في الختام، لا يقتصر التنفيذ الاستراتيجي لإنتاج الهيدروجين الأخضر على معالجة التحديات التقنية المعقدة، مثل تحسين كفاءة الطاقة وتوسيع نطاق البنية التحتية، بل يُتيح أيضًا فرصًا قيّمة لتحويل أنظمة الطاقة نحو الاستدامة. ومن خلال الاستفادة من الاستثمارات الاستراتيجية والتعاون الدولي والسياسات التقدمية، يُمكن المضي قدمًا نحو مستقبل لا يُحقق فيه الهيدروجين الأخضر أهداف التنمية المستدامة فحسب نظرا لمساهمته في إزالة انبعاثات الكربون من القطاعات التي يصعب الحدّ من انبعاثاتها، ويُعتبر عنصرًا سريعًا ومفيدًا وحتميًا كمورد اقتصادي مستقبلي واعد، ويُحفّز أيضًا الانتقال إلى أنظمة طاقة عالمية أكثر مرونةً وترابطًا وخلوًّا من الكربون.

المصادر والمراجع:

Annwesha Banerjee Majumder, Somsu bhra Gupta, Dharmpal Si ngh & Sourav Majumder (2020). An Intelligent System for Prediction of COVID-19 Case using Machine Learning Framework-Logistic Regression. *Journal of Physics: Conference Series 1797 (2021) 012011*. IOP Publishing, P. 2. doi:10.1088/1742-6596/1797/1/012011.

Arcos, J. M. M. and D. M. F. Santos (2023). The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases* ***3****(1)*: pp. 25-46.

Astute Analytica (2021). Hydrogen Market - Industry Dynamics, Market Size, and Opportunity Forecast to 2040. https://www.astuteanalytica.com/industry-report/hydrogen-market?gclid=CjwK. accessed in: 21.02.2025.

Burdon, R., Palmer, G., & Chakrorty, S. (2019). National Hydrogen Strategy. March, pp. 1–23.

Dagnachew Anteneh G, et. al., (2023). The Opportunities, Challenges and Potentials for Hydrogen in AFRICA. *African-*

European partnerships for sustainable development. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Dawood, F., Anda, M., & Scafiulah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: *An overview. International Journal of Hydrogen Energy*.

Farhangi A. A., Far M. S. and Danaei A., (2012). Development SWOT Matrix of Strategic Planning in Media Organizations. *International Journal of Business and Commerce*, 1(5), pp. 1-12.

Graaf T.V.D., Blanco H., Bianco E., Tsang W., Ferroukhi R., Gielen D., (2022). Geopolitics of the energy transformation: The hydrogen factor. *International Renewable Energy Agency*, UAE.

Han U., Oh J., Lee H., (2018). Safety investigation of hydrogen charging platform package with CFD simulation*. International Journal of Hydrogen Energy* 43 (29): pp. 13687-13699.

IEA. (2020). Current limits on hydrogen blending in natural gas networks and gas demand per capita in selected locations. pp. 1–3, 2020.

IPCC. (2018). IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C - Summary for policy makers.

IPCC. 2022. "Climate Change (2022). Impacts, Adaptation, and Vulnerability of *Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*.

IRENA and AfDB (2022). Renewable Energy Market Analysis: Africa and Its Regions. Abu Dhabi and Abidjan*, International Renewable Energy Agency and African Development Bank*.

IRENA (2022). Global hydrogen trade to meet the 1.5°c climate goal part I - Trade outlook for 2050 and way forward. Abu Dhabi, *International Renewable Energy Agency*.

Karidis A., (2020). Could trash-to-energy technology feed hydrogen demand? *Green Biz*, <www.greenbiz.com/article/could-trash-energy-technology-feed-hydrogen-demand/>, accessed in, 29.09.2025.

Marchant N., (2021). Grey, blue, green – why are there so many colors of hydrogen? World Economic Forum <www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/>, accessed in, 29.09.2025.

Mayyas, A., Wei, M., & Levis, G. (2020). Hydrogen as a long-term, large-scale energy storage solution when coupled with renewable energy sources or grids with dynamic electricity pricing schemes. International Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 33, pp. 16311–16325.

Megía P.J., Vizcaíno A.J., Calles J.A., Carrero A., (2021). Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources. *A Mini Review. Energy Fuels*, 35(20), pp.16403-16415.

Milani, D.; Kiani, A.; Mcnaugfton, R. (2020). Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective*. International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 46, pp. 24125–24145.

Rajini K R Karduri & Christo Ananth, (2020). Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges for a Sustainable Future. *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST)* Vol.6, Issue.2. pp. 69-76.

Ren, J. et al. (2015). Hydrogen economy in China: Strengths–weaknesses– opportunities–threats analysis and strategies prioritization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, pp. 1230–1243.

Sabrina Macedo, Drielli Peyerl, Donato da Silva Filho (2023). Brazilian Hydrogen Economy Development*. Revista Brasileira de*

Energia | Vol. 29, Nº 2, 2º Trimestre de 2023. pp181-197.
Schmidtchen U., (2009). Fuels – safety | Hydrogen: Overview. In: *J. Garche (Ed.)*, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Elsevier Science & Technology, Amsterdam, UK, pp. 519-527.
Tabiti, E. et al. (2020). Green Hydrogen Cost Reduction. *IRENA.*
Trüby, J., S. Douguet, B. Shirizadeh, E. Bovari, A. Ailleret, A. Guillon, N. El-Khatib, B. Lorentz and F.-K. Phillips (2023). How green hydrogen conquers the world—An outlook on the global clean hydrogen market. 8th Multi-stakeholder Forum on Science, *Technology and Innovation for the Sustainable Development Goals*, The United Nations.
World Bank. (2023): "Chile to Accelerate its Green Hydrogen Industry with World Bank Support." In. Washington, D.C.
Yuki Numata, Laurens Speelman, Nick Pesta, & Oleksiy Tatarenko (2022). Green Hydrogen on an S-curve: Fast, Beneficial, and Inevitable. RMI Energy Transformed.
https://rmi.org/green-hydrogen-fast-beneficial-and-inevitable/ accessed in, 29.09.2025.