



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماسترا أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة طرائق

تخصص: هندسة كيميائية

من اعداد الطلبة:

1- خلفاوي إسراء

2- طريبي مارية

3- عريق آية

الموضوع

الهـ يـ د ر و جـ يـ ن

الأخضر

نوقشت في: 2025/05/27

أمام لجنة المناقشة:

جامعة الوادي.

رئيسا

الدكتور بن عمارة حسن

جامعة الوادي.

مناقشا

الدكتورة أحمودة كوثر

جامعة الوادي.

مشرفا

الدكتور وصيف خالد محمد الطيب

الموسم الجامعي: 2025/2024



## الإهداء :

إلى حبي الأول وقدوتي الأولى، إلى من صقل أكثر جوانب شخصيتي تميزاً... والدي العزيز.  
إلى أقوى امرأة عرفتتها في حياتي، إلى من كانت رفيقتي في أولى خطوات تعليمي، إلى من أوصلتني لما  
أنا عليه اليوم... والدتي الغالية.

إلى أختي ورفيقتي... سندس.

إلى صديقة طفولتي وشبابي، إلى من تعرف خبايا روحي وتقبلني كما أنا... منال.

إلى ملائكتي الصغار: فراس، فاروق، ورحيم، وإلى أميراتي: أبرار ورزان، الذين علموني الصبر.

إلى من كنّ لي أخوات بحق، لا خالات فقط... سكينه وإلهام.

إلى جدتي فاطمة، أطال الله في عمرها.

إلى أرواح أجدادي: مريم، بلقاسم، وبشير، رحمهم الله وأسكنهم فسيح جنانه.

وأخيراً، إلى أقوى روح عرفتتها... إلى نفسي التي أفخر بها وبكل خطوة خطوتها في سبيل التطور والنمو.

اسراء خلفاوي

## الإهداء :

\*إهدي هذا البحث إلى إصراري الذي لم يخفت، وإلى قوتي التي ظهرت في لحظات الضعف، أهدي نفسي هذا النجاح المستحق.

\*إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها، وسهّلت لي الشدائد بدعائها، إلى القلب الحنون وسرّ قوتي ونجاحي ومصباح دربي، إلى وهج حياتي والدتي الغالية.

\*إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وعلمني أن الدنيا كفاح سلاحها العلم والمعرفة، سندي وقوتي وملاذي بعد الله والدي العزيز.

أدامكم الله ملوكا في عرش قلبي وحفظكم ملاذا إليه أنتمي

\*إلى من كان رفيق دربي في الحياة، أخي الغالي شكراً لوجودك الثابت في حياتي.

إلى صديقاتي الغاليات، شكراً لكل لحظة دعم ومحبة شاركنمني إياها.

مارية طريلي

## الإهداء:

الحمد لله على التوفيق والثبات، وعلى النعم التي لا تُعدّ ولا تُحصى.

أهدي ثمرة تخرجي هذه إلى:

أمي وأبي، مصدر أمانتي وثقتي،

إلى نفسي التي آمنت بي رغم كل شيء،

إلى إخوتي وخالاني، من كانوا دومًا سندًا ودعمًا.

لم يكن هذا هو الحلم يومًا،

لكننا ما عسانا أن نقول إلا أن الحمد لله رب العالمين، دائمًا وأبدًا.

أية عريق

# الشكر والتقدير:

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، ويتوفيقه تتحقق الغايات، والصلاة والسلام على سيدنا محمد، خاتم الأنبياء والمرسلين، وعلى آله وصحبه أجمعين.

إنه لمن دواعي الفخر والامتنان أن أفتتح هذا العمل الأكاديمي بكلمات شكر وتقدير صادقة أسجلها لكل من كان له الفضل، بعد الله سبحانه وتعالى، في إنجاز هذا البحث العلمي الذي أقدمه استيفاءً لمتطلبات نيل شهادة الماجستير.

أتوجّه بخالص الشكر وأسمى عبارات العرفان والتقدير إلى أستاذنا الفاضل ومؤطرنا الكريم **الدكتور وصيف محمد الطيب خالد**، لما قدّمه لنا من دعم علمي متواصل، وإشراف دقيق، وتوجيهات نيرة كان لها الأثر البالغ في توجيه مسار هذا البحث، وفي تجاوز الكثير من الصعوبات الأكاديمية والمنهجية التي واجهتنا. لقد كان لتفانيه في الإشراف، وحكمته في النصح، وسعة صدره في المتابعة، الأثر الكبير في إنضاج هذا العمل وإخراجه في هذه الصورة.

ولا يفوتنا أن نعبر عن بالغ امتناننا لكافة أعضاء الهيئة العلمية والتربوية بقسم هندسة الطرائق والبتروكيميا، وكلية التكنولوجيا، بجامعة الشهيد حمه لخضر، على ما وفروه من بيئة أكاديمية محفزة، وما قدّموه من علم وتوجيه وتشجيع طيلة فترة دراستنا، وهو ما ساعدنا على اكتساب المهارات الضرورية لإتمام هذا المشروع العلمي.

كما نخص بالشكر كل من ساهم، بشكل مباشر أو غير مباشر، في دعمنا ومساندتنا خلال مسيرتنا البحثية، سواء من الزملاء أو الأصدقاء أو أفراد العائلة، فلکم مننا جميعاً أصدق عبارات الامتنان والتقدير.

أسأل الله تعالى أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به، وأن يكون خطوة في طريق العلم والمعرفة، إنه ولي التوفيق وهو نعم المولى ونعم النصير.

## جدول المحتويات

الفهرس:

	الاهداء
	الشكر والتقدير
	الفهرس
	قائمة الجداول
	قائمة الأشكال
	قائمة الرموز
1.....	المقدمة العامة:
3.....	المراجع:
1.....	انتاج الهيدروجين الأخضر:
5.....	1.1. المقدمة:
5.....	الجدول (1.1): ألوان الهيدروجين وتكنولوجياها وتكلفتها وانبعثات ثاني أكسيد الكربون [5]
6.....	2.1. تقنيات انتاج الهيدروجين الأخضر:
6.....	1.2.1. التحليل الكهربائي للماء:
8.....	2.1.2.1. التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون: PEM Electrolysis:
9.....	3.1.2.1. التحليل الكهربائي بالأكسيد الصلب: SOEC – Solid Oxide Electrolysis:
10.....	2.2. I. الاصلاح البخاري للميثان :
12.....	3.2. I. التحليل الحراري باستخدام الطاقة الشمسية : (Solar Thermochemical Hydrogen Production)
13.....	4.2. I. الاصلاح الضوئي الحيوي : ( Photobiological )
14.....	5.2. I. التحفيز الضوئي (Photocatalytic):
15.....	3.I مقارنة بين تقنيات انتاج الهيدروجين الأخضر من حيث التكلفة والكفاءة والانبعثات:
20.....	1.II مقدمة الفصل:
21.....	2.II طرق تخزين الهيدروجين:
22.....	الكثافة الوزنية المستهدفة: 5.5% من حيث الوزن؛
22.....	الكثافة الحجمية المستهدفة: 0.04 كغ هيدروجين/لتر؛
22.....	نطاق درجة حرارة التشغيل: من -40 إلى 60 درجة مئوية؛
22.....	عدد دورات التشغيل (عمر النظام): 1500 دورة؛

- 22.....المدة الزمنية لماء النظام: 1.5 كغ هيدروجين/دقيقة. ....
- واستنادًا إلى تلك المعايير، بالإضافة إلى التوجهات البحثية المعتمدة، يمكن تصنيف تقنيات تخزين الهيدروجين إلى ثلاث فئات رئيسية: التخزين في الحالة الغازية، والتخزين في الحالة السائلة، والتخزين في الحالة الصلبة باستخدام الهيدريدات المعدنية... 22
- 1.2.II. التخزين في الحالة الغازية:** ..... 22
- 1.1.2.II. النوع الأول: أوعية الضغط من النوع الأول:** ..... 22
- تُصنَع هذه الأوعية بالكامل من معادن عالية الصلابة مثل الفولاذ أو الألمنيوم، وتتميز بجدران متجانسة سميكة تتحمل ضغوطًا تتراوح عادة بين 15 و30 ميغا باسكال. ورغم متانتها وسهولة تصنيعها، إلا أن كثافتها الوزنية المنخفضة تحد من استخدامها في التطبيقات المحمولة، ما يجعلها أكثر ملاءمة للتخزين الثابت في مواقع إنتاج الهيدروجين أو كمخازن صناعية داخل المنشآت. [1]. [3] ..... 22
- 2.1.2.II. النوع الثاني: أوعية الضغط من النوع الثاني:** ..... 23
- تتكون هذه الأوعية من بطانة معدنية مغلقة جزئيًا بألياف مقواة مشبعة براتجات مثل الإيبوكسي. وتُستخدم هذه الألياف - التي قد تكون زجاجية أو كربونية - لتقوية الأجزاء الأسطوانية من الوعاء، حيث تتركز أعلى درجات الإجهاد. يوفر هذا التصميم مقاومة أكبر للضغط مع تقليل نسبي في الكتلة. تُستخدم هذه الأوعية غالبًا في محطات التزود بالوقود بالهيدروجين، حيث قد تصل ضغوط التشغيل إلى 87.5 ميغا باسكال. [1]. [3] ..... 23
- 3.1.2.II. النوع الثالث: أوعية الضغط من النوع الثالث:** ..... 23
- يُصنَع هذا النوع من بطانة معدنية خفيفة الوزن (مثل الألمنيوم)، مغطاة بالكامل بطبقات متعددة من الألياف المقواة. توفر هذه البنية مزيجًا جيدًا من الصلابة وخفة الوزن، مما يجعلها خيارًا مفضلًا لتخزين الهيدروجين في المركبات أو الناقلات المتقلة. وتتميز بكثافة طاقة (طاقة لكل وحدة وزن) مرتفعة نسبيًا. [1]. [3] ..... 23
- 4.1.2. II. النوع الرابع: أوعية الضغط من النوع الرابع:** ..... 23
- تمثل أوعية النوع الرابع تطورًا تقنيًا كبيرًا، حيث تتكوّن من بطانة بوليميرية - غالبًا من البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) أو البولي أميد - (PA) مغلقة بالكامل بألياف كربونية أو أراميدية. توفر هذه الأوعية أعلى نسبة من الطاقة المخزنة إلى الوزن، وهي الخيار المثالي للتطبيقات التي تتطلب خفة كبيرة في الوزن، مثل السيارات العاملة بخلايا الوقود والطائرات بدون طيار. كما بدأ استخدامها في التطبيقات الثابتة منخفضة الضغط نظرًا لكفاءتها في استغلال المساحة مقارنة بأوعية النوع الأول. [1]. [3] ..... 23
- 5.1.2.II. النوع الخامس: أوعية الضغط من النوع الخامس:** ..... 24
- تُعد هذه الأوعية الأحدث من حيث التصميم والتطوير، حيث تتكون من مواد مركبة بالكامل بدون بطانة داخلية. لا تزال في مراحل البحث والتطوير، ويُتوقع أن توفر حلولًا ثورية بفضل وزنها الفائق الخفة وكفاءتها العالية، لكنها تواجه تحديات تتعلق بالسلامة واحتواء الهيدروجين عند الضغوط العالية. [3] ..... 24
- 6.1.2.II. العمليات التصنيعية لأوعية التخزين المضغوطة:** ..... 24
- 7.1.2.II. التخزين الجوي للهيدروجين: البديل طويل الأجل:** ..... 24
- 2.2.II. التخزين في الحالة السائلة:** ..... 25
- 1.2.2.II. تسهيل الهيدروجين - متطلبات الطاقة والتحديات الديناميكية الحرارية:** ..... 25

- 26.....II.2.2.2. تصميم الخزانات والتحديات الحرارية:
- 27.....II.3.2.2. المواد المستخدمة في تصنيع الخزانات:
- 27 .....II.3.2. التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية:
- 28.....II.1.3.2. الخصائص العامة للهيدريدات المعدنية كوسيط لتخزين الهيدروجين:
- 30.....II.3. أساليب النقل:
- 32 .....II.1.3. النقل عبر الأنابيب:
- نقل الهيدروجين عبر الأنابيب يُعد من أكثر الوسائل كفاءة واقتصادية لنقل كميات كبيرة من الهيدروجين، خاصة على المدى الطويل. تُشبه هذه التقنية إلى حد كبير أسلوب نقل الغاز الطبيعي، مما يجعل من الممكن الاستفادة من البنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي مع تعديلات محددة [23]. ويتميز الهيدروجين بخاصية انضغاطية مرتفعة نسبيًا، ما يسمح له بالمرور بكفاءة في الأنابيب عند ضغوط تشغيلية متوسطة تتراوح عادة بين 10 و 20 ميغاباسكال، مما يساهم في تقليل تكاليف الضغط والطاقة المطلوبة أثناء النقل [23].
- 32 ..... تشمل أبرز مزايا نقل الهيدروجين عبر الأنابيب انخفاض التكاليف التشغيلية مقارنة بوسائل النقل الأخرى، إمكانية النقل المستمر والآمن، وتقليل الاعتماد على وسائل النقل التقليدية كالناقلات أو الشاحنات. كما يُعد هذا الأسلوب خيارًا واعدًا لتغذية محطات التزود بالهيدروجين أو وحدات الاستهلاك الصناعي مباشرة [23].
- 32 ..... وتتجه العديد من المبادرات العالمية نحو تطوير شبكات أنابيب هيدروجين مخصصة، أو إعادة استخدام خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية بعد تهيئتها تقنيًا، بما في ذلك مشاريع مثل "العمود الفقري للهيدروجين الأوروبي" ( European Hydrogen Backbone) الذي يعتمد على أكثر من 90% من البنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي في أوروبا [23].
- 32 ..... مع ذلك، يواجه هذا الأسلوب عدة تحديات تقنية، أبرزها الهشاشة الهيدروجينية (Hydrogen Embrittlement)، وهي ظاهرة تؤثر على الخواص الميكانيكية للمواد المعدنية المستخدمة في الأنابيب، مما يؤدي إلى تدهور المناطق المتأثرة بالحرارة (HAZ) وانتشار الشقوق التعبية (FCP)، وبالتالي زيادة احتمالية تسرب الغاز [23]. هذه التحديات تفرض شروطًا صارمة على اختيار المواد المستخدمة، حيث يُفضل استخدام الفولاذات غير القابلة للصدأ، وسبائك النيكل، أو المواد المركبة التي تُظهر مقاومة أعلى للتشقق والتآكل تحت تأثير الهيدروجين [23].
- 33 ..... جانب آخر بالغ الأهمية في هذا السياق هو درجة نقاء الهيدروجين المنقول، إذ يجب أن يكون الهيدروجين خاليًا من الشوائب لتفادي تفاعلها مع مواد الأنابيب أو المكونات النهائية. ولهذا، تُستخدم تقنيات متقدمة مثل الامتزاز بالضغط المتأرجح (PSA)، الفصل بالغشاء، والتقطير للحصول على نقاء يصل إلى 99.9999% [23].
- 33 ..... في السياق الإقليمي، تُعد الجزائر من الدول الواعدة في هذا المجال نظرًا لما تمتلكه من شبكة واسعة من أنابيب الغاز الطبيعي الممتدة نحو أوروبا، الأمر الذي يفتح المجال لإعادة تأهيل هذه الشبكة لاستخدامها في تصدير الهيدروجين مستقبلاً، لا سيما في ظل مشاريع الربط الجديدة قيد التخطيط [23].
- 33 ..... كما أن المعايير التنظيمية والتشريعية تمثل عاملاً حاسمًا في نجاح تطبيق هذا النمط من النقل، حيث يتطلب الأمر تنسيقًا بين السياسات الوطنية والدولية لضمان السلامة وتوحيد المعايير الفنية المتعلقة بالضغط، المواد، ودرجات النقاء المسموح بها [23].

وفي ضوء هذه الاعتبارات، يمكن القول إن نقل الهيدروجين عبر الأنابيب يُمثل ركيزة أساسية في منظومات الهيدروجين المستقبلية، ووسيلة مثالية لتعزيز التكامل بين الإنتاج والاستهلاك عبر مسافات طويلة، مع الحفاظ على الكفاءة والاستدامة... 33	
II.3.2. النقل عبر الشاحنات: .....	34
II.1.2.3. النقل باستخدام الهيدروجين المضغوط: .....	34
II.2.2.3. النقل باستخدام الهيدروجين السائل: .....	34
II.3.3. النقل عبر السفن: .....	35
II.1.3.3. الشحن في الحالة الغازية المضغوطة (CGH <sub>2</sub> ): .....	35
II.2.3.3. الشحن في الحالة السائلة (LH <sub>2</sub> ): .....	36
II.3.3.3. الشحن باستخدام الأمونيا: .....	36
II.4.3.3. الشحن باستخدام حوامل الهيدروجين السائلة العضوية (LOHCs): .....	37
II.4. المقارنة بين طرق التخزين و النقل من حيث الكفاءة التكلفة الأمان: .....	39
يُعد التخزين الغازي للهيدروجين خيارًا مناسبًا للاستخدام المؤقت أو المتنقل، خصوصًا في المناطق الصناعية الشمالية المرتبطة بالنقل بالشاحنات. يتميز هذا النوع من التخزين بأمان مقبول، مع وجود تحديات تتعلق بالهشاشة الهيدروجينية التي تستدعي الانتباه. من حيث التكلفة، يتطلب بناء خزانات عالية الضغط تكلفة معتدلة تتراوح تقريبًا بين 500 إلى 1000 دولار لكل كيلوغرام من الهيدروجين. أما الكفاءة الطاقية لهذا الأسلوب فتعتبر متوسطة، مع كثافة طاقية منخفضة تقارب 5.6 ميغا جول لكل لتر عند ضغط 700 بار. [11] [18] .....	
أما التخزين السائل، فهو غير مفضل حاليًا في الجزائر بسبب المناخ الحار الذي يؤدي إلى فقد حراري مرتفع، بالإضافة إلى الحاجة إلى بنية تحتية مكلفة. بالرغم من ذلك، يتمتع التخزين السائل بأمان جيد، لكنه يتطلب مراقبة دقيقة بسبب خطر التبخر العالي. من الناحية التكلفة، فإن تسييل الهيدروجين وتوفير خزانات التخزين يترتب عليهما تكلفة مرتفعة، تتراوح بين 1500 إلى 3000 دولار لكل كيلوغرام. الكفاءة الطاقية للتخزين السائل عالية نسبيًا، حوالي 8.5 ميغا جول لكل لتر، ولكن هذا يصاحبها فقدان في طاقة التسييل يصل إلى 30-40%. [3] [19] .....	39
التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية يُعتبر خيارًا واعدًا للتخزين الثابت طويل الأمد، خاصة في المناطق الجنوبية من الجزائر التي تستفيد من محطات الطاقة الشمسية. يتميز هذا النوع بأمان حراري عالٍ دون الحاجة إلى ضغط عالي، وهو مناسب لأنظمة التخزين الثابتة. التكلفة تتراوح بين متوسطة إلى مرتفعة نتيجة المواد والتحفيز المستخدم، تقريبًا بين 600 و1200 دولار لكل كيلوغرام من الهيدروجين. من حيث الكفاءة الطاقية الحجمية، تتميز هذه الطريقة بارتفاع كبير، حيث تصل إلى 150-300 كيلوغرام هيدروجين لكل متر مكعب، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الطاقة المتجددة ومحطات التزويد. [1] [23] [24] وتم تلخيص هذه المقارنة في الجدول التالي: .....	39
الجدول (II.1): مقارنة بين طرق التخزين من حيث الكفاءة والتكلفة والأمان وتقديم ملاحظات بالنسبة للجزائر .....	40
ملاحظات متعلقة بالجزائر .....	40
الأمان .....	40
التكلفة .....	40

40	الكفاءة الطاقية .....
40	الطريقة .....
40	يناسب الاستخدام المؤقت/المتنقل، مناسب للمناطق الشمالية الصناعية المرتبطة بالنقل بالشاحنات .....
40	مقبول - تحديات تتعلق بالهشاشة الهيدروجينية .....
40	متوسطة - تكلفة بناء خزانات عالية الضغط معتدلة (~500-1000 kg-H <sub>2</sub> /\$) .....
40	متوسطة - كثافة طاقة منخفضة (~5.6 MJ/L عند 700 بار) .....
40	التخزين الغازي .....
40	غير مفضل حاليًا في الجزائر بسبب المناخ الحار وفقد الحرارة العالي؛ يتطلب بنية تحتية مكلفة .....
40	جيدة - لكن خطر التبخر العالي يحتاج مراقبة .....
40	مرتفعة - تكلفة التسييل والخزانات (~1500-3000 kg-H <sub>2</sub> /\$) .....
40	عالية (~8.5 MJ/L)، ولكن مع فاقد في التسييل يصل 30-40% .....
40	التخزين السائل .....
40	خيار واعد للتخزين الثابت طويل الأمد خاصةً في الجنوب، يناسب محطات الطاقة الشمسية .....
40	عالية - آمنة حراريًا ولا تحتاج ضغط عالي .....
40	متوسطة إلى مرتفعة - تكلفة المواد والتحفيز (~600-1200 kg-H <sub>2</sub> /\$) .....
40	مرتفعة جدًا من حيث الحجم (~150-300 kg-H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) .....
40	التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية .....
40	2.4.II. مقارنة وسائل نقل الهيدروجين: الكفاءة، التكلفة، الأمان: .....
42	ملاحظات متعلقة بالجزائر .....
42	الأمان .....
42	التكلفة .....
42	الكفاءة الطاقية .....
42	الوسيلة .....
42	خيار مثالي على المدى البعيد، خاصة لإعادة استخدام شبكة الغاز الطبيعي في الجنوب والشمال (مثال: أنبوب "ميدغاز") .....
42	جيدة - مخاطر التسرب والهشاشة الهيدروجينية تتطلب مراقبة دقيقة .....
42	استثمار أولي مرتفع، لكن تشغيل منخفض التكلفة (~0.1-0.25 kg-H <sub>2</sub> /100km/\$) .....
42	عالية جدًا - نقل مستمر دون طاقة تسييل أو ضغط إضافي .....
42	الانابيب .....
42	الأنسب في المرحلة الانتقالية؛ مثالي لتوزيع الهيدروجين في الجزائر بين نقاط إنتاج واستهلاك متفرقة .....

42	.....مقبول - خطر التبخر (السائل) أو الانفجار (الغازي) يتطلب احتياطات صارمة.....
42	.....متوسطة - اعتمادًا على نوع الشاحنات (غازي أو سائل) (~1.5-3 kg-H <sub>2</sub> /100km).....
42	..... مرونة عالية، لكنها محدودة من حيث الكمية والمسافة.....
42	..... الشاحنات.....
42	..... استراتيجية للتصدير نحو أوروبا عبر البحر الأبيض المتوسط؛ تعتمد على تطوير موانئ مثل سكيكدة وأرزيو.....
42	..... جيدة عند استخدام الأمونيا أو LOHC، لكن تحتاج بنية تحتية معقدة.....
42	..... مرتفعة جدًا (تسييل + إعادة تحويل) (~4-6 kg-H <sub>2</sub> /km) عند النقل لمسافات <5000 km).....
42	..... مناسبة لنقل كميات كبيرة لمسافات طويلة، لكن كفاءة منخفضة بسبب عمليات التسييل/التحويل.....
42	..... السفن.....
47	..... 1.III. مقدمة:
47	..... 2.III. استخدام الهيدروجين الأخضر في توليد الكهرباء:
48	..... 1. 2.III. الطرق الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر :
48	..... 2.2.III. خلايا الوقود :
48	..... 2.III. 2.1. فكرة عمل خلايا الوقود:
49	..... 3. 2.III. اقتصاديات خلايا الوقود :
50	..... 4. 2.III. المزايا الاقتصادية لخلايا الوقود :
51	..... 3.III. استخدام الهيدروجين الأخضر في النقل :
54	..... 1. 3.III. توقعات الطلب المستقبلي على هيدروجين في قطاع النقل الجزائري :
56	..... 4.III. استخدام الهيدروجين الأخضر في الصناعة :
56	..... 1. 4.III. إنتاج الأمونيا الخضراء :
56	..... 2. 4.III. طريقة إنتاجها :
57	..... 3. 4.III. استخداماتها :
58	..... 4. 4.III. تحديات استخدام الأمونيا كوقود:
59	..... 5.III. استخدام الهيدروجين الأخضر في تكرير النفط:
64	..... 1.IV. مقدمة:
65	..... 2.IV. التحديات المرتبطة بالهيدروجين الأخضر:

66.....	3.IV. الفرص الواعدة للهيدروجين الأخضر:
67.....	4.IV. التوصيات الاستراتيجية:
71.....	VI. الدراسات السابقة
1.VI	دراسة إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الشمسية وتحليل الماء كهربائياً - دراسة تجريبية في مدينة ورقلة [1]
71.....	
71	1.1.VI الهدف من التجربة:
71	2.1.VI الأدوات والمواد المستخدمة:
72	3.1.VI مبدأ العمل:
72	4.1.VI النتائج المتحصل عليها:
73.....	2.VI دراسة حول إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية (جامعة الوادي) [2]
73	1.2.VI الهدف من الدراسة:
73	2.2.VI مبدأ العمل:
73	3.2.VI الأدوات والمواد المستعملة:
74	4.2.VI النتائج المتحصل عليها:
74.....	3.VI دراسة حول إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية [3]
74	1.3.VI الهدف من الدراسة:
75	2.3.VI المواد والأدوات المستعملة:
75	3.3.VI مبدأ العمل:
76	4.3.VI النتائج المتحصل عليها:
76.....	4.VI دراسة مواد الكاثود الضوئي المعتمدة على الكربون لإنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية [4]
76	1.4.VI الهدف:
76	2.4.VI مبدأ العمل:
76	3.4.VI الأدوات والمواد:
77	4.4.VI النتائج:
77.....	5.VI دراسة جهاز ضوئي كهرومائي أحادي البنية لتحقيق تحليل مباشر للماء بكفاءة 19% [5]
77	1.5.VI الهدف:

77	2.5.VI مبدأ العمل:
77	3.5.VI الأدوات والمواد:
78	4.5.VI النتائج:
78	6.VI دراسة انتاج الهيدروجين الأخضر كمصدر للطاقة في منطقة ورقلة.
78	1. 6.VI الهدف من الدراسة:
78	2. 6.VI المواد والأدوات المستعملة:
78	3. 6.VI مبدأ العمل:
79	4. 6.VI النتائج المتحصل عليها:
79	7.VI التحليل والاستنتاجات:
80	8.VI استنتاجات نهائية:
1	
83	الخاتمة:
83	الملخص:

قائمة الجداول:

- الجدول (1.I): ألوان الهيدروجين وتكنولوجياها وتكلفتها وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون.....6
- الجدول (2.I): مقارنة بين تقنيات الإنتاج من حيث التكلفة والكفاءة والانبعاثات.....15
- الجدول (1.II): مقارنة بين طرق التخزين من حيث الكفاءة والتكلفة والأمان وتقديم ملاحظات بالنسبة للجزائر.....42
- الجدول (2.II): مقارنة بين وسائل النقل من حيث الكفاءة و التكلفة و الأمان و تقديم ملاحظات بالنسب للجزائر.....44
- الجدول (1.III): مقارنة بين خلايا الوقود ووسائل توليد الطاقة الأخرى.....49
- الجدول (2.III): خصائص أنواع الوقود المختلفة في قطاع النقل الجزائري.....53
- الجدول (3.III): خصائص وقود الهيدروجين والبنزين.....54
- جدول (1.VI): يمثل التحليل المقارن للدراسات.....80

قائمة الأشكال:

- الشكل (1.I): خلية التحليل الكهربائي القلوي.....8
- الشكل (2.I): خلية التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون.....9
- الشكل (3.I): خلية التحليل الكهربائي بالاكسيد الصلب.....10
- الشكل(1.II): طريقة عمل الهيدريدات المعدنية.....30
- الشكل (2.II): بعنوان ملخص طرق تخزين الهيدروجين.....30
- الشكل (3.II) ملخص اساليب النقل.....39
- الشكل (1.III) اجمالي الاستثمارات في خلايا الوقود بالولايات المتحدة عام 2016.....49
- الشكل (2.III): نمو حجم اسطول المركبات والطرق الجزائري (2000-2013).....51
- الشكل (3.III): توزيع أسطول المركبات في الجزائر حسب فئة المركبات.....52
- الشكل (4.III): الأحتياجات السنوية للسيارة من وقود الهيدروجين وفق الحالات الثلاث.....54
- الشكل (5.III): تطور أعداد المركبات في الجزائر بما فيها مركبات الهيدروجين.....56
- الشكل (6.III): النمو السكاني في الجزائر حسب دراسة سميرة رحموني.....56
- الشكل (7.III): مخطط لعملية انتاج الأمونيا.....57
- الشكل (8.III): رسم تخطيطي لإنتاج الأمونيا الخضراء بناء على إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء وازالة الكربون بالكامل من خلال عملية هابر بوش.....58
- الشكل (9.III): الاستخدامات الحالية والمستقبلية للأمونيا.....59

قائمة الرموز:

الرمز	التسمية بالعربية	الوحدة
%wt	النسبة الوزنية للهيدروجين	%
kg H <sub>2</sub> /L	الكثافة الحجمية للهيدروجين	كغ/لتر
°C	درجة الحرارة المئوية	درجة مئوية (°C)
MJ/L	الكثافة الطاقية الحجمية	ميغا جول/لتر
kg H <sub>2</sub> /min	معدل ملء النظام	كغ/دقيقة
MPa	الضغط	ميغاباسكال
bar	الضغط	بار
K	درجة الحرارة المطلقة	كلفن
H <sub>2</sub>	الهيدروجين	—
PSA	الامتزاز بالضغط المتأرجح	—
CGH <sub>2</sub>	الهيدروجين الغازي المضغوط	—
LH <sub>2</sub>	الهيدروجين السائل	—
NH <sub>3</sub>	الأمونيا	—
LOHC	الناقلات العضوية السائلة للهيدروجين	—
MJ/kg	الكثافة الطاقية النوعية	ميغا جول/كغ
MJ/m <sup>3</sup>	الكثافة الطاقية الحجمية	ميغا جول/متر مكعب
kg-H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	كثافة الهيدروجين التخزينية الحجمية	كغ هيدروجين/متر مكعب
kg-H <sub>2</sub> /100km	تكلفة النقل لكل 100 كيلومتر	كغ هيدروجين/100 كم
kWh/kg	استهلاك الطاقة النوعي	كيلوواط ساعة/كغ
%	الكفاءة أو الفقد الطاقى أو الانبعاثات	نسبة مئوية

المقدمة العامة

اعتمد العالم لسنين طويلة على الوقود الأحفوري لتلبية احتياجاته الطاقوية والصناعية، مما أدى إلى ظهور العديد من المشاكل الاقتصادية والبيئية [1][2].

وقد ساهمت الاضطرابات العالمية المتكررة التي شهدتها أسواق الطاقة التقليدية، إلى جانب الجهود الدولية الرامية إلى خفض الانبعاثات الكربونية وتحقيق الحياد الكربوني [3]، في دفع عجلة التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة [2]. وتُعد هذه المصادر، مثل طاقة الرياح، والطاقة الشمسية، وطاقة المحيطات، والمد والجزر، والوقود الحيوي، والطاقة الأرضية الحرارية، والهيدروجين الأخضر، بدائل واعدة وآمنة لا يمكن احتكارها أو التحكم فيها كما هو الحال مع الوقود الأحفوري، وهي في الوقت ذاته طاقات أغلبها نظيفة وصديقة للبيئة.

رغم المزايا البيئية والاقتصادية للهيدروجين الأخضر، إلا أن هذه التقنية تواجه عدة تحديات، أبرزها: التكلفة المرتفعة للإنتاج [4]، تحديات التخزين، وصعوبة النقل على نطاق واسع [5]. بناءً على ذلك، تتمحور إشكالية البحث حول:

**ما هي أفضل تقنية لإنتاج الهيدروجين الأخضر التي تلائم وتناسب الموقع الجغرافي للجزائر؟**

وللإجابة على هذه الإشكالية، تم تقسيم هذه المذكرة بناءً على الفصول الأربع التالية:

**الفصل الأول:** إنتاج الهيدروجين الأخضر وتقنياته المختلفة.

وفي هذا الفصل سيتم عرض تقنيات الإنتاج المختلفة (التحليل الكهربائي، الإصلاح البخاري....)

كما سيتم المقارنة بين هذه التقنيات من حيث الكفاءة والتكلفة والانبعاثات.

**الفصل الثاني:** وتم تخصيصه لطرق تخزين الهيدروجين ومقارنتها من حيث الكفاءة، والتكلفة، والأمان.

**الفصل الثالث:** تم تخصيصه لدراسة التطبيقات المختلفة للهيدروجين الأخضر.

**الفصل الرابع:** سناقش فيها التحديات والفرص المستقبلية لصناعة الهيدروجين الأخضر.

الفصل الخامس: دراسات سابقة حول انتاج الهيدروجين الأخضر.

وسننهي هذه المذكرة بخاتمة عامة تشمل أهم الاستنتاجات التي حصلنا عليها وكذا أهم

التوصيات التي نعتقد انها تعمل على تطوير انتاج الهيدروجين الأخضر.

المراجع:

- [1] عبد الجليل هدايا عبد الستار عبد المنعم . (2023). SJSC. اقتصاديات الهيدروجين الأخضر ودورها في تعزيز أمن الطاقة.
- [2] دور الهيدروجين الأخضر في اقتصاد الطاقة المستدامة (2023) . EIJ .
- [3] مدونة البنك الدولي . (2023) . إطلاق العنان لقوة الهيدروجين للتحويل إلى الطاقة النظيفة.
- [4] ملتقى أسبار . (2023) . إنتاج الهيدروجين الأخضر ضرورة لتحقيق الاستدامة.
- [5] بوشعالة، ف.، جمال، ك.، وخراف، أ. (2023). اقتصاد الهيدروجين في الجزائر. المجلة الدولية للهيدروجين. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.148>

انتاج الهيدروجين الأخضر

### 1.1. المقدمة:

يُعد الهيدروجين الأخضر أحد أهم الحلول الواعدة لتحقيق انتقال طاقي مستدام، نظرًا لما يوفره من إمكانية إنتاج وقود نظيف انطلاقًا من مصادر متجددة. وتكمن أهمية هذا الفصل في تسليط الضوء على الطرق التقنية المعتمدة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مع التركيز على المبادئ العامة لكل تقنية، ومتطلبات التشغيل، وكفاءتها، وآثارها البيئية.

ومن بين هذه البدائل، يبرز الهيدروجين [1][2] بأنواعه الستة، المصنّفة حسب الألوان تبعًا لمصدر الطاقة المستخدم في عملية الإنتاج [3]، وهي:

• **الهيدروجين الأزرق:** الناتج عبر تقنية التقاط الكربون، سواء عبر تقنية التغويز باستخدام الفحم، أو عبر تقنية إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار باستخدام الغاز الطبيعي [3].

• **الهيدروجين الرمادي:** ناتج من الغاز الطبيعي بواسطة إعادة تشكيل غاز الميثان بالبخار، ولكن بدون استخدام تقنية التقاط الكربون [4].

• **الهيدروجين الأسود:** يُنتج من الفحم باستخدام تقنية التغويز، دون الاستعانة بتقنيات التقاط الكربون [4].

• **الهيدروجين البني:** ناتج عن تحويل الفحم أو غيره من المواد الخام الغنية بالهيدروكربونات إلى غاز [3].

• **الهيدروجين الأخضر:** يُنتج من الطاقات المتجددة من خلال عمليات متنوعة مثل التحليل الكهربائي باستخدام الكهرباء الناتجة عن مصادر الطاقة المتجددة، وهو خالٍ من الانبعاثات الكربونية، ويُعد الخيار الأمثل للبيئة [4].

الجدول (1.1): ألوان الهيدروجين وتكنولوجياها وتكلفتها وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون [5]

لون الهيدروجين	تكنولوجيا الإنتاج	تكلفته	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون
أزرق	إصلاح البخار للغاز الطبيعي، مع التقاط الكربون وتخزينه	معتدل	كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم بيروجين 9-12
رمادي	اصلاح الغاز بالبخار، دون احتجاز الكربون وتخزينه	قليل	كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم بيروجين 16-18
بني	تحويل الفحم أو غير من المواد الخام الغنية بالهيدروكربونات الى غاز	معتدل	كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم بيروجين 19-25
أسود	تحويل الفحم إلى غاز، مع فصل الهيدروجين والغازات الأخرى التي يتم إطلاقها في الغلاف الجوي	عالي	كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم بيروجين 24-28
أخضر	التحليل الكهربائي للمياه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة	عالي	انبعاثات صفرية من ثاني أكسيد الكربون

يمثل فهم هذه التقنيات خطوة أساسية لتقييم جدواها الاقتصادية والبيئية، ولاختيار الحلول الأنسب

حسب طبيعة الموارد المتاحة محليًا وعالميًا.

## 2.I. تقنيات انتاج الهيدروجين الأخضر:

### 1.2.I. التحليل الكهربائي للماء :

يُعد التحليل الكهربائي للماء من أبرز الطرق المستدامة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، إذ يعتمد

على استخدام

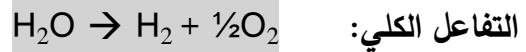
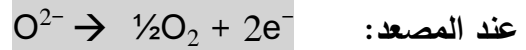
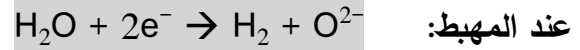
## الفصل الأول.....انتاج الهيدروجين الأخضر

الكهرباء المتولدة من مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح لتحليل الماء إلى هيدروجين وأكسجين.

حيث تُعتبر تقنية تحليل الماء - الذي يتكوّن من ذرّة أكسجين مركزية ترتبط بها ذرّتا هيدروجين -

الطريقة الشائعة، حيث تنقسم ذرة الماء إلى هيدروجين وأكسجين، ويتم تبخير الأكسجين خلال عملية

التحليل [2][6] كما هو موضح في التفاعلات التالية [7]:



توجد ثلاث تقنيات رئيسية للتحليل الكهربائي، تتميز كل منها بألية عمل مختلفة وأثر بيئي متنوع

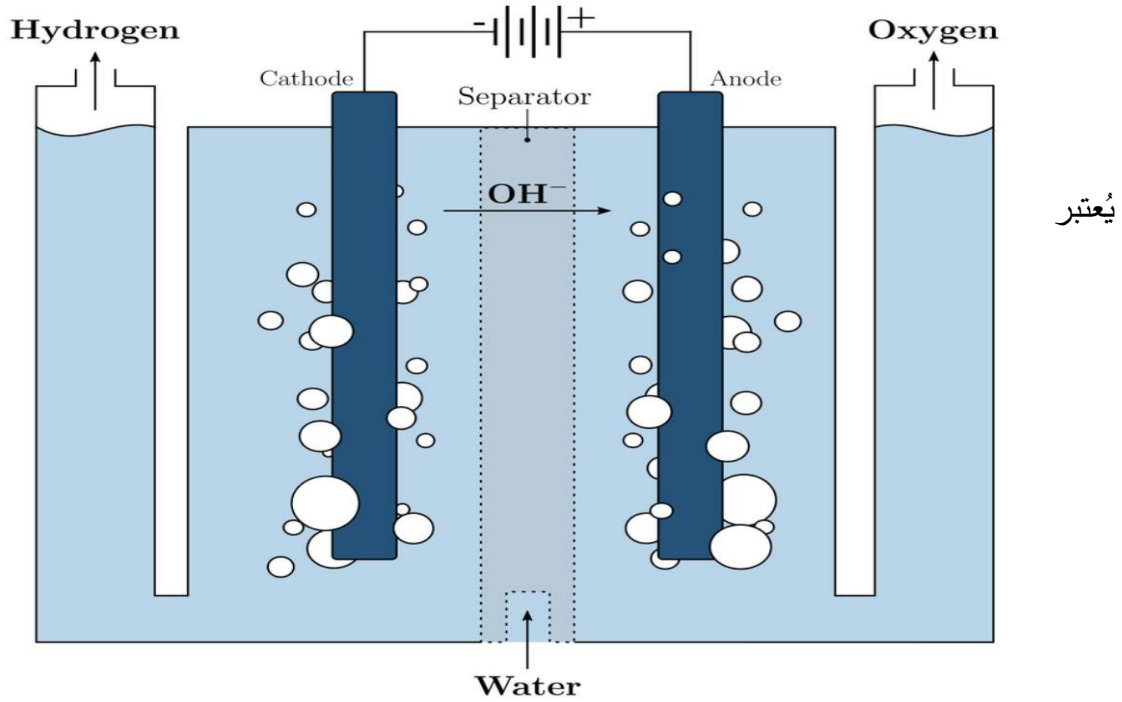
مرتبط بدورة حياة الهيدروجين المنتج.

### 1.2.1. I التحليل الكهربائي القلوي: Alkaline Electrolysis :

تعتمد هذه التقنية على استخدام محلول قلوي (مثل هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) أو

الصوديوم (NaOH)) لنقل الأيونات بين الأقطاب، وتُستخدم أقطاب معدنية غير نبيلة مثل النيكل، وتعمل

عند درجات حرارة معتدلة (60-90°C) [7]. كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (1.1): خلية التحليل الكهربائي القلوي [7]

التحليل القلوي من أقدم وأكثر الطرق نضجًا في المجال، ويتميز بموثوقيته وسهولة صيانته [7]

[8] من حيث دورة الحياة، ينتج الهيدروجين القلوي بانبعاثات منخفضة بشرط استخدام كهرباء نظيفة، فيما

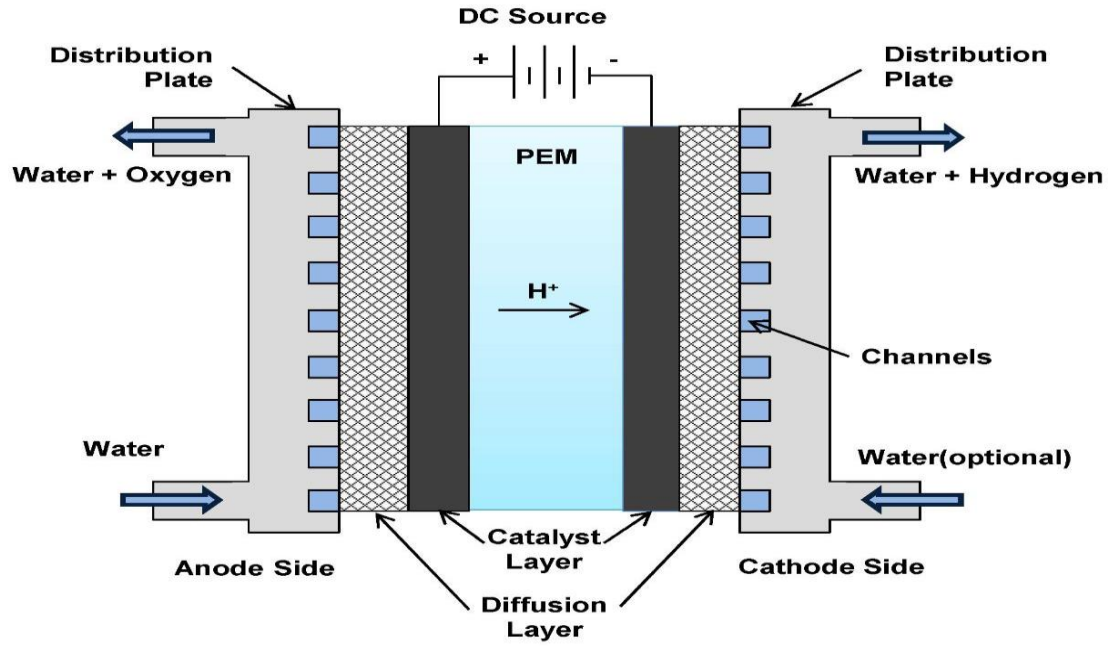
تكون البصمة البيئية الأكبر في مرحلة تصنيع المعدات وصيانة النظام [9].

### 2.1.2.1 التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون: PEM Electrolysis

تعتمد تقنية PEM على غشاء بوليمري صلب يسمح بمرور البروتونات فقط، في بيئة حمضية.

يتم استخدام معادن نبيلة مثل البلاتين والإيريديوم في الأقطاب، وتُشغّل عند درجات حرارة بين (50-

80 °C) [7] [8]. كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (2.1): خلية التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون [7]

تُعد PEM من التقنيات الحديثة ذات التصميم المدمج وسرعة الاستجابة للتغيرات في تزويد

الطاقة [8].

أما في دورة حياتها، فهي تُنتج هيدروجينًا نظيفًا عند الاعتماد على طاقة متجددة، إلا أن

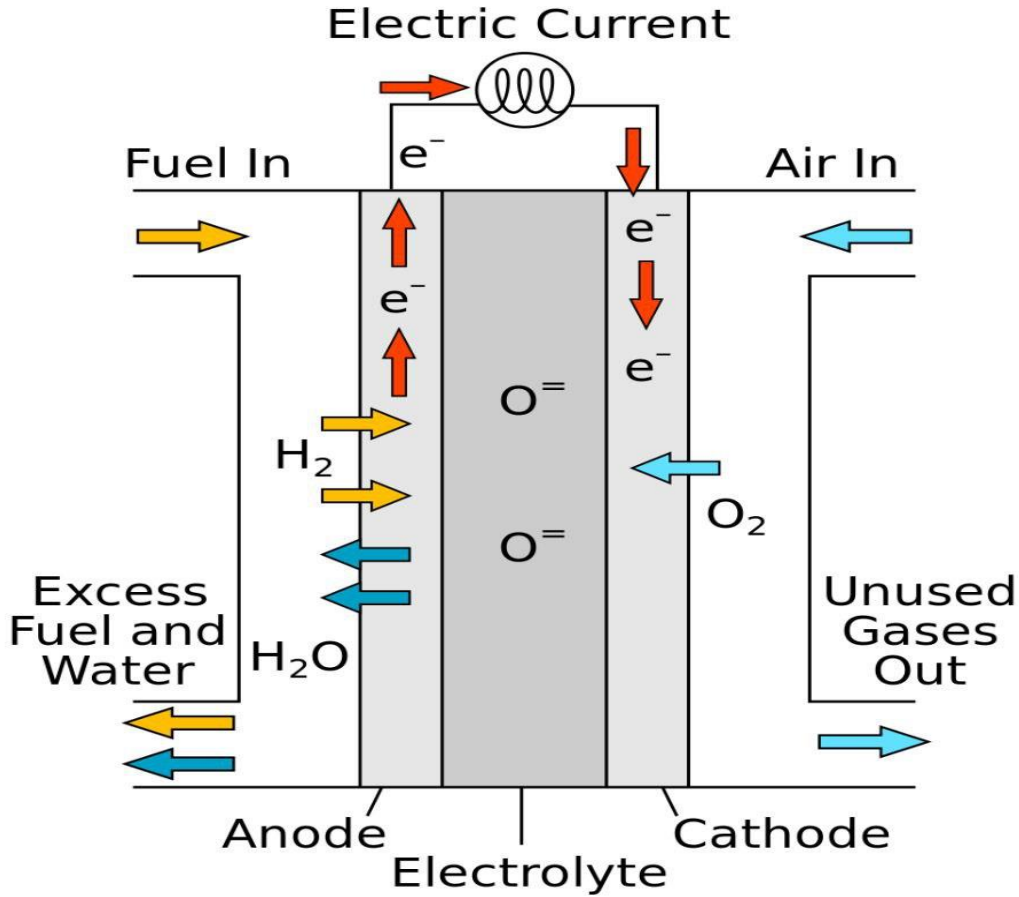
استخدامها للمعادن الثمينة يضيف عبئًا بيئيًا في مراحل التصنيع [9].

### 3.1.2.I التحليل الكهربائي بالأكسيد الصلب: SOEC – Solid Oxide Electrolysis:

تستخدم هذه التقنية إلكتروليت خزفي ناقل لأيونات الأكسجين، وتُشغّل في درجات حرارة عالية

تصل إلى 900 °C [10]

تعمل هذه الخلية كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (3.1): خلية التحليل الكهربائي بالاكسيد الصلب [7]

ما يميز SOEC هو قدرتها على استخدام الحرارة (سواء من مصادر صناعية أو من العمليات

نفسها)، ما يسمح بتوفير جزء من الطاقة الكهربائية المطلوبة [10] [11]

دورة حياة هذه التقنية واعدة من حيث تقليل الاعتماد على الكهرباء، لكنها تتأثر بارتفاع درجة

حرارة التشغيل واستخدام المواد الخزفية المعقدة التي ترفع الأثر البيئي في مرحلة التصنيع [12].

### I. 2.2. الإصلاح البخاري للميثان :

الإصلاح البخاري للميثان هو التقنية الصناعية الأكثر شيوعًا لإنتاج الهيدروجين، ويُستخدم فيها

الغاز الطبيعي الذي يتكوّن أساسًا من الميثان  $CH_4$  كمادة أولية. تعتمد هذه التقنية على تفاعل الميثان مع

بخار الماء في درجات حرارة عالية تتراوح بين 700 إلى 1100 درجة مئوية وبوجود محفز معدني (عادةً

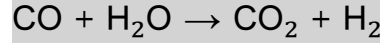
النكل (Ni) لإنتاج خليط من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون [13].

تحدث في هذه العملية تفاعلات كيميائية رئيسية، تشمل:

تفاعل الإصلاح البخاري:



تفاعل تحويل الماء والغاز [7] :



هذه التقنية تُستخدم على نطاق واسع في الصناعة نظرًا لنضجها وكفاءتها في إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين. ورغم أن الإصلاح البخاري يُنتج عادة هيدروجينًا رماديًا بسبب انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، إلا أنه يمكن جعله أكثر صداقة للبيئة باتباع أحد الخيارين:

✓ استخدام الغاز الحيوي كمصدر للميثان بدلاً من الغاز الطبيعي. يُنتج الغاز الحيوي عن طريق التخمير اللاهوائي للمواد العضوية مثل:

- المخلفات الزراعية (قش القمح، الذرة، بقايا الفواكه والخضروات)
- السماد الحيواني (فضلات الأبقار والدواجن)
- النفايات المنزلية العضوية (بقايا الطعام)
- مياه الصرف الصحي
- مخلفات الصناعات الغذائية (الألبان والمجازر)
- النفايات الخضراء (أوراق الأشجار، الأعشاب) [13]

هذه المواد تُخمر لاهوائيًا (في غياب الأكسجين) لإنتاج الغاز الحيوي (Biogas)، والذي يحتوي أساسًا على الميثان ( $\text{CH}_4$ ) وثاني أكسيد الكربون ( $\text{CO}_2$ )، ويمكن تنقيته ليُستخدم في إنتاج الهيدروجين بطريقة الإصلاح البخاري أو في توليد الكهرباء.

## الفصل الأول.....انتاج الهيدروجين الأخضر

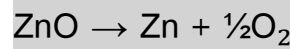
✓ دمج التقنية مع أنظمة احتجاز واستخدام الكربون (CCUS) مما يُقلل من الانبعاثات الكربونية الناتجة ويحوّل الهيدروجين إلى "أزرق"، ويمكن في حالات معينة اعتباره "أخضرًا" إذا تم الاعتماد على مصادر طاقة متجددة لتشغيل النظام [13].

### I 3.2. التحليل الحراري باستخدام الطاقة الشمسية : (Solar Thermochemical Hydrogen Production)

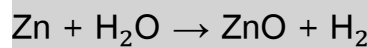
تُعد تقنية التحليل الحراري الشمسي لإنتاج الهيدروجين واحدة من أكثر الطرق الواعدة مستقبلاً لإنتاج هيدروجين أخضر خالٍ من الانبعاثات. تعتمد هذه التقنية على استخدام الطاقة الشمسية المركزة (Concentrated Solar Power – CSP) لتوليد درجات حرارة عالية تتجاوز 1000 °C من أجل تحفيز تفاعلات حرارية-كيميائية تقوم بتفكيك الماء (H<sub>2</sub>O) إلى مكوناته الأساسية: الهيدروجين (H<sub>2</sub>) والأكسجين [14]، (O<sub>2</sub>) [15]

في هذه التقنية، تُستخدم مرايا أو عدسات لتركيز أشعة الشمس على مفاعل حراري يحتوي على مواد وسيطة، مثل أكاسيد المعادن (كأكسيد السيريوم أو الزنك)، تمر بدورة حرارية من خطوتين:

✓ **الخطوة الأولى (الاختزال):** يتم تسخين المعدن بتركيز شمسي قوي حتى يتحلل جزئيًا ويطلق الأكسجين عند (T > 1500°C) [14]



✓ **الخطوة الثانية (الأكسدة):** يُعاد تفاعل المعدن المختزل مع بخار الماء لإنتاج الهيدروجين [14]:



يُعاد استخدام الوسيط المعدني في دورات مستمرة، مما يجعل العملية فعالة نظريًا.

لا تُنتج أي انبعاثات كربونية أثناء التشغيل، ما يجعل الهيدروجين الناتج أخضر بالكامل. [14]،

[16]

تعتمد على مصدر طاقة متجدد ومجاني (الشمس)، ما يجعلها قابلة للتطبيق طويل الأمد. [14]،

[16]

كفاءة حرارية عالية محتملة على الرغم من التحديات التقنية الحالية، إلا أن الدراسات الحديثة

تشير إلى إمكانية تطوير مفاعلات شمسية ذات كفاءة تحويل مرتفعة. [15]

ومن بين التحديات التقنية التي تواجهها كونها تتطلب التقنية درجات حرارة مرتفعة جدًا تتجاوز

1000°C، ما يستدعي أنظمة تركيز شمسية متقدمة. كما أن توفر أشعة الشمس يقتصر على ساعات

النهار، وتواجه المواد الوسيطة تحديات متعلقة بالصمود أمام التغيرات الحرارية المتكررة. [16]

### I. 4.2. الإصلاح الضوئي الحيوي : ( Photobiological )

يُعد الإصلاح الضوئي الحيوي إحدى أكثر الطرق الواعدة لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام

الطاقة الشمسية والكائنات الحية الدقيقة مثل الطحالب الخضراء والبكتيريا الزرقاء. يتميز هذا النظام

بإمكانه تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى طاقة كيميائية على شكل غاز الهيدروجين، عبر مسارات

ميكروبيولوجية تتضمن إنزيمات مثل الهيدروجيناز (Hydrogenase) والنيتروجيناز (Nitrogenase)

[18].

تُقسم هذه التقنية إلى نوعين أساسيين:

✓ التحلل الضوئي الحيوي المباشر، حيث تقوم الطحالب أو البكتيريا الزرقاء بتحليل الماء تحت ضوء

الشمس إلى هيدروجين وأوكسجين باستخدام إنزيم الهيدروجيناز.

✓ التحلل غير المباشر، ويحدث عندما تقوم الكائنات الحية بتخزين النشويات خلال عملية البناء الضوئي

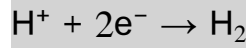
ثم تستخدمها لاحقًا لإنتاج الهيدروجين في بيئة لاهوائية [18]

## الفصل الأول.....انتاج الهيدروجين الأخضر

رغم كون هذه التقنية صديقة للبيئة ولا تتطلب مدخلات طاقة خارجية كبيرة، إلا أن من أبرز التحديات التي تواجهها ضعف الاستقرار الإنزيمي، وانخفاض كفاءة التحويل، وعدم ملاءمتها بعد للتطبيق الصناعي واسع النطاق [19].

### I .5.2. التحفيز الضوئي (Photocatalytic):

هو تقنية حديثة لإنتاج الهيدروجين باستخدام الضوء (غالبًا من الشمس) ومحفزات ضوئية نصف ناقلة تقوم بفصل الماء إلى هيدروجين وأوكسجين دون انبعاثات كربونية. من أشهر هذه المحفزات  $TiO_2$  و  $MnO_2$  و  $Al_2O_3$ ، وقد أثبتت بعض هذه المواد أداءً ملحوظاً في التجارب المخبرية [20]. تبدأ الآلية عندما يمتص المحفز الفوتونات، مما يولد إلكترونات وفجوات تنتقل إلى سطح المادة وتشارك في تفاعلات اختزال الماء كما يلي:



أظهرت التجارب التي أجريت بجامعة ورقلة أن  $MnO_2$  تصرّف كمحفز ضوئي فعال في وسط قلوي (13.59%)، بينما تصرّف  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  كمثبطين بنسبة -4.29% و-24.68% على التوالي عند تركيز 10 g/l. وقد أدى مزج 75  $TiO_2$  % مع 25  $MnO_2$  % إلى تحسين الإنتاج بنسبة 23.06%، مع أفضل أداء عند استخدام 30 g/l من KOH كمحلول إلكتروليتي، مما رفع الإنتاج بنسبة 26% [14].

من جهة أخرى، هناك توجهات بحثية جديدة نحو تطوير محفزات عضوية قائمة على الكربون، والتي تتميز بكونها صديقة للبيئة وخالية من المعادن الثقيلة. أحد الأمثلة هو تطوير بوليمرات عضوية تُستخدم كمحفزات فعالة تحت الضوء المرئي [21].

### I.3 مقارنة بين تقنيات إنتاج الهيدروجين الأخضر من حيث التكلفة والكفاءة والانبعاثات:

تتعدد التقنيات المستخدمة في إنتاج الهيدروجين الأخضر، وتختلف فيما بينها من حيث الكفاءة، التكلفة، والانبعاثات الكربونية المصاحبة. يوضح الجدول التالي مقارنة شاملة بين أبرز هذه التقنيات، بهدف تسليط الضوء على مزايا وعيوب كل منها، مما يساعد في تقييم جدواها البيئية والاقتصادية.

الجدول (2.1): مقارنة بين تقنيات الإنتاج من حيث التكلفة والكفاءة والانبعاثات

المرجع	الانبعاثات (كغ/CO <sub>2</sub> /كغ H <sub>2</sub> )	التكلفة (دولار/كغ H <sub>2</sub> )	الكفاءة (%)	التقنية
[22]	1.98-2.39	4-6	60-70	التحليل الكهربائي القلوي (AEL)
[23]	1.33-27.5 بحسب مصدر الكهرباء	6-8	65-75	التحليل الكهربائي PEM
[24]	حوالي 11	1-2	65-75	الإصلاح البخاري للميثان (SMR)
[25]	7.6-9.3	2-3.5	60-70	SMR+احتجاز الكربون
[22]	<1	غير محددة تحت التطوير	<10	التحفيز الضوئي
[22]	قريبة من الصفر	غير محددة	<5	الإصلاح الضوئي الحيوي
[22]	<2	5-7	30-50	التحليل الحراري الشمسي

تشير المقارنة بين تقنيات إنتاج الهيدروجين الأخضر إلى تباين ملحوظ من حيث الكفاءة، التكلفة والانبعاثات. إذ تُعد تقنية الإصلاح البخاري للميثان من أكثر الطرق كفاءةً، إلا أنها تقليدية وتسبب انبعاثات كربونية عالية، مما يفقدها صفة الاستدامة ما لم تُقرن بتقنيات التقاط الكربون (CCUS)، والتي بدورها ترفع من التكلفة. في المقابل، تقدم تقنيات التحليل الكهربائي للماء، ولا سيما التحليل القلوي

## الفصل الأول.....انتاج الهيدروجين الأخضر

(AEL)، توازنًا جيدًا بين الكفاءة (60-80%)، انخفاض الانبعاثات، والتكلفة، مما يجعلها من أكثر الخيارات جدوى في حال توفرت مصادر طاقة متجددة رخيصة مثل الشمس أو الرياح. أما تقنيات التحفيز الضوئي والإصلاح الضوئي الحيوي، فرغم وعودها المستقبلية، إلا أن كفاءتها المنخفضة وتكلفتها العالية في هذه المرحلة البحثية لا تؤهلها بعد للاستخدام الصناعي الواسع، الأمر الذي ينطبق أيضًا على التحليل الحراري الشمسي الذي لا يزال يواجه تحديات تقنية تتعلق بالتصميم والموثوقية رغم ملاءمته المحتملة في مناطق ذات إشعاع شمسي مرتفع. وبناءً على ذلك، يمكن اعتبار التحليل الكهربائي القلوي الخيار الأكثر توازنًا حاليًا لإنتاج الهيدروجين الأخضر، في حين تبقى التقنيات الأخرى بحاجة إلى مزيد من التطوير لتصبح مجدية اقتصاديًا وصناعيًا.

المراجع:

- [1] مجلة. (2023). EIJ. دور الهيدروجين الأخضر في اقتصاد الطاقة المستدامة .
- Dspace.su.edu.ly تحليل تقنيات الهيدروجين في الصناعات الطاقوية [2] .
- [3]. (2022). Solar Est. ألوان الهيدروجين.
- [4] الطاقة. هبة محمد امام (2023، 31 ديسمبر). الهيدروجين الأخضر.. صناعة تواجه تحديات صعبة رغم ميزاتها. الرابط [attaqa.net/2023/12/31/.../?utm\\_source=chatgpt.com](https://attaqa.net/2023/12/31/.../?utm_source=chatgpt.com) :
- [5] بوشعالة، ف.، جمال، ك.، وخراف، أ. (2023). اقتصاد الهيدروجين في الجزائر. المجلة الدولية للهيدروجين <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.148>
- [6] مؤسسة. (2023). TÜV Rheinland. الهيدروجين الأخضر كحامل للطاقة.
- [7] Stargate Hydrogen، "Basics of Hydrogen Electrolysis," 2023. <https://stargatehydrogen.com/blog/basics-of-hydrogen-electrolysis/>
- [8] Solarabic, "Types of Electrolyzers.," Sep. 2023. <https://solarabic.com/learn/2023/09/>
- [9] Petro News، "التحليل الكهربائي للهيدروجين،" <https://petro-news.com/39564/>
- [10] Fuji Electric، "Hydrogen Industry," <https://www.fujielectric.fr/ar>
- [11] MCE Clean Energy، "الخبير في الطاقة: الهيدروجين الأخضر،" <https://mcecleanenergy.org/ar>
- [12] B. Lagogui، "Production d'hydrogène par électrolyse," Univ. Ouargla، <https://dspace.univ-ouargla.dz/bitstream/123456789/24064/4/bouallati-lagogui.pdf>
- Sep. 2023. <https://solarabic.com/learn/2023/09/>
- [13] MCE Clean Energy، "الخبير في الطاقة : الهيدروجين الأخضر،" <https://mcecleanenergy.org/ar>
- [14] Atlas Copco, "What is Hydrogen and How is it Produced?" <https://www.atlascopco.com/ar-eg/compressors/air-compressor-blog/what-is-hydrogen-and-how-is-it-produced>
- [15] DSpace - Université de Ouargla، "Zarouki Chouaib، "مذكرة ماجستير حول الهيدروجين،" [Online]. Available: <https://dspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/36149/1/zarouki->

chouaib.pdf [6] MCE Clean Energy، "الخبير في الطاقة: الهيدروجين الأخضر"، [Online].

Available: <https://mcecleanenergy.org/ar>

[16] M. Unni، "Biohydrogen Production" SlideShare، Jun. 2021. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/MeghanaUnni/biohydrogen-production-249421789>

[17] A. Alalwan، A. Alminshid، and M. Aljaafari، "Biohydrogen Production From Biomass Sources : Metabolic Pathways and Economic Analysis" Front. Energy Res.، vol. 9، p. 753878، 2021. [Online]. Available:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.753878/full>

[18] A. Raache، Utilisation des photo-catalyseurs pour la production de l'hydrogène، Doctoral Thesis، Université Kasdi Merbah Ouargla، 2021.

[19] X. Chen et al.، "Semiconductor-based photocatalytic hydrogen generation"، Chemical Reviews، vol. 110، no. 11، pp. 6503–6570، 2010.

[20] CNRS، "Des photocatalyseurs organiques pour la production durable d'hydrogène vert" CNRS.fr، Jun. 2023. [Online]. Available: <https://www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/des-photocatalyseurs-organiques-pour-la-production-durable-dhydrogene-vert>

[21] R. D. Smith et al.، "Photocatalytic water splitting: materials and challenges"، Frontiers in Chemistry، vol. 2، pp. 1–9، 2014. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2014.00028>

[22] M. Pelaez et al.، "A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications"، Applied Catalysis B: Environmental، vol. 125، pp. 331–349، 2012.

[23] A. Ghirardi et al.، "Photobiological hydrogen-producing systems"، Energy Policy، vol. 33، no. 17، pp. 2103–2110، 2005.

[24] I. A. Dincer and C. Acar، "Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability"، International Journal of Hydrogen Energy، vol. 40، no. 34، pp. 11094–11111، 2015.

## الفصل الثاني

تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

## 1.II مقدمة الفصل:

في إطار التحول العالمي نحو الطاقة النظيفة، يحتل الهيدروجين الأخضر موقعًا استراتيجيًا كأحد أهم ركائز منظومة الطاقة المستقبلية. ومع التوسع في إنتاجه، تبرز تحديات كبيرة تتعلق بآليات تخزينه ونقله، نظرًا لخصائصه الفريدة التي تفرض متطلبات فنية وهندسية دقيقة [1] [2] [3]. يُعد التخزين والنقل جزءًا حيويًا من سلسلة القيمة المرتبطة بالهيدروجين، وتؤثر بشكل مباشر في تكلفة وسلامة وكفاءة النظام بأكمله [4] [5] [6]. لذا، فإن تطوير حلول عملية وفعالة في هذا المجال أصبح من أولويات البحث العلمي والاستثمار التكنولوجي على مستوى العالم. [7] [8] [9]

يعتمد اختيار طريقة التخزين أو النقل المثلى على عدة عوامل، من بينها الكثافة الطاقوية المطلوبة، المسافة، البنية التحتية المتاحة، الكلفة، والأمان [10] [11] [12]. يتوفر حاليًا ثلاث طرق رئيسية لتخزين الهيدروجين: في الحالة الغازية تحت ضغط عالٍ، في الحالة السائلة عند درجات حرارة منخفضة للغاية، أو عبر الامتصاص الكيميائي في مركبات صلبة مثل الهيدريدات المعدنية [1] [2] [13]. من جهة أخرى، تشمل وسائل النقل الرئيسية: شبكات الأنابيب، الشاحنات، والسفن، كلٌ منها مناسب لسيناريوهات معينة من حيث المسافة، الكمية، والنطاق الجغرافي [5] [14] [15]

تكمن الصعوبة في أن الهيدروجين، ورغم بساطته الكيميائية كأخف عنصر في الجدول الدوري، إلا أنه يتطلب عناية خاصة في التعامل معه. فهو يتمتع بكثافة طااقوية عالية من حيث الكتلة، لكنه منخفض الكثافة من حيث الحجم، ما يستدعي ضغوطًا عالية أو درجات حرارة منخفضة لتخزينه بفعالية. كما أنه غاز سريع الانتشار، وقابل للاشتعال في نطاق واسع من التراكيز، مما يفرض متطلبات أمان صارم. [10] [16]

على المستوى الدولي، تبذل الدول الصناعية جهودًا ضخمة في هذا المجال. على سبيل المثال، تُعد ألمانيا واليابان من الدول الرائدة في مشاريع البنية التحتية للهيدروجين، إذ استثمرت مليارات الدولارات في

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

تطوير شبكات الأنابيب ومرافئ التسييل [6] [7]. كما طورت الولايات المتحدة برامج بحثية متقدمة في تخزين الهيدروجين بالمركبات الصلبة [2] [4]. في المقابل، تشهد الدول العربية، ومنها الجزائر، اهتمامًا متزايدًا بهذا القطاع، لما لها من إمكانات كبيرة في الطاقة الشمسية والرياح، ما يجعلها مرشحة لتكون من بين أهم منتجي الهيدروجين الأخضر في العالم. [17] [18] [19] [20] [21] [22]

في هذا الفصل، سيتم تحليل كل من طرق التخزين الثلاث ووسائل النقل الثلاث، مع تقديم مقارنة شاملة بين هذه الطرق من حيث الكفاءة، والتكلفة، والأمان. وسيتم الاعتماد على مجموعة كبيرة من الدراسات الحديثة، والتقارير التقنية الصادرة عن الوكالات الدولية مثل وكالة الطاقة الدولية (IEA) ، ووزارة الطاقة الأمريكية (DOE) ، بالإضافة إلى مقالات علمية محكمة من مجلات أكاديمية [1] [4] [7] [27] [28]

### II.2. طرق تخزين الهيدروجين:

تلعب تقنيات تخزين الهيدروجين دورًا محوريًا في تطوير البنية التحتية المستدامة لاقتصاد الهيدروجين، إذ تتجاوز أهميتها مجرد تحديد آليات نقله، لتشمل أيضًا طرائق استخدامه وتطبيقاته النهائية. ويُعد التقدم في تقنيات التخزين عاملاً أساسيًا في توسيع نطاق استخدام الهيدروجين في مختلف القطاعات، لا سيما في مجالي الطاقة والنقل.

ومن منظور تقني، يُعتمد في تقييم أداء نظم تخزين الهيدروجين على مجموعة من المعايير الرئيسية التي وردت في الأدبيات المرجعية، ولعل أبرزها ما حددته وزارة الطاقة الأمريكية (US-DOE) كأهداف تقنية لتخزين الهيدروجين على متن المركبات التي تعمل بخلايا الوقود الخفيفة بحلول عام 2020 [1]. وتشمل هذه المعايير ما يلي [1]:

- الكثافة الوزنية المستهدفة: 5.5% من حيث الوزن؛
- الكثافة الحجمية المستهدفة: 0.04 كغ هيدروجين/لتر؛
- نطاق درجة حرارة التشغيل: من -40 إلى 60 درجة مئوية؛
- عدد دورات التشغيل (عمر النظام): 1500 دورة؛
- المدة الزمنية لملء النظام: 1.5 كغ هيدروجين/دقيقة.

واستنادًا إلى تلك المعايير، بالإضافة إلى التوجهات البحثية المعتمدة، يمكن تصنيف تقنيات تخزين الهيدروجين إلى ثلاث فئات رئيسية: التخزين في الحالة الغازية، والتخزين في الحالة السائلة، والتخزين في الحالة الصلبة باستخدام الهيدريدات المعدنية.

### II.1.2. التخزين في الحالة الغازية:

يمثل تخزين الهيدروجين بالضغط إحدى أكثر تقنيات تخزين الهيدروجين نضجًا واستخدامًا، لا سيما في التطبيقات الصناعية والتنقلية. وتعتمد هذه التقنية على ضغط غاز الهيدروجين وتعبئته في أوعية مصممة خصيصًا لتحمل ضغوط عالية، مع الحرص على توازن الأداء التقني والاقتصاد التشغيلي. تتفاوت أنواع أوعية الضغط المستخدمة حاليًا من حيث المواد البنائية، آلية التصنيع، والكفاءة من حيث الكتلة والطاقة، وتنقسم إلى خمسة أنواع رئيسية: من النوع الأول إلى النوع الخامس. [1]. [4]

#### II.1.1.2. النوع الأول: أوعية الضغط من النوع الأول:

تُصنَع هذه الأوعية بالكامل من معادن عالية الصلابة مثل الفولاذ أو الألمنيوم، وتتميز بجدران متجانسة سميكة تتحمل ضغوطًا تتراوح عادة بين 15 و30 ميغا باسكال. ورغم متانتها وسهولة تصنيعها، إلا أن كثافتها الوزنية المنخفضة تحد من استخدامها في التطبيقات المحمولة، ما يجعلها أكثر ملاءمة للتخزين الثابت في مواقع إنتاج الهيدروجين أو كمخازن صناعية داخل المنشآت. [1]. [3]

## II.2.1.2. النوع الثاني: أوعية الضغط من النوع الثاني:

تتكون هذه الأوعية من بطانة معدنية مغلقة جزئياً بألياف مقواة مشبعة براتنجات مثل الإيبوكسي. وتستخدم هذه الألياف - التي قد تكون زجاجية أو كربونية - لتقوية الأجزاء الأسطوانية من الوعاء، حيث تتركز أعلى درجات الإجهاد. يوفر هذا التصميم مقاومة أكبر للضغط مع تقليل نسبي في الكتلة. تُستخدم هذه الأوعية غالباً في محطات التزود بالوقود بالهيدروجين، حيث قد تصل ضغوط التشغيل إلى 87.5 ميغا باسكال. [1]. [3]

## II.3.1.2. النوع الثالث: أوعية الضغط من النوع الثالث:

يُصنَع هذا النوع من بطانة معدنية خفيفة الوزن (مثل الألمنيوم)، مغطاة بالكامل بطبقات متعددة من الألياف المقواة. توفر هذه البنية مزيجاً جيداً من الصلابة وخفة الوزن، مما يجعلها خياراً مفضلاً لتخزين الهيدروجين في المركبات أو الناقلات المتحركة. وتتميز بكثافة طاقة (طاقة لكل وحدة وزن) مرتفعة نسبياً. [1]. [3]

## II.4.1.2. النوع الرابع: أوعية الضغط من النوع الرابع:

تمثل أوعية النوع الرابع تطوراً تقنياً كبيراً، حيث تتكوّن من بطانة بوليمرية - غالباً من البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) أو البولي أميد - (PA) مغلقة بالكامل بألياف كربونية أو أراميدية. توفر هذه الأوعية أعلى نسبة من الطاقة المخزنة إلى الوزن، وهي الخيار المثالي للتطبيقات التي تتطلب خفة كبيرة في الوزن، مثل السيارات العاملة بخلايا الوقود والطائرات بدون طيار. كما بدأ استخدامها في التطبيقات الثابتة منخفضة الضغط نظراً لكفاءتها في استغلال المساحة مقارنة بأوعية النوع الأول. [1]. [3]

## II.5.1.2. النوع الخامس: أوعية الضغط من النوع الخامس:

تُعد هذه الأوعية الأحدث من حيث التصميم والتطوير، حيث تتكون من مواد مركبة بالكامل بدون بطانة داخلية. لا تزال في مراحل البحث والتطوير، ويُتوقع أن توفر حلولاً ثورية بفضل وزنها الفائق الخفة وكفاءتها العالية، لكنها تواجه تحديات تتعلق بالسلامة واحتواء الهيدروجين عند الضغوط العالية. [3]

## II.6.1.2. العمليات التصنيعية لأوعية التخزين المضغوطة:

تتشارك أوعية النوع الأول حتى الثالث في خطوات تصنيع البطانة المعدنية، حيث تُشكّل عبر عمليات السحب على البارد، ثم يُشكّل العنق باستخدام الضغط أو الدوران الساخن. أما بطانات النوع الرابع، فتنتج عبر تقنيات قولبة حرارية متقدمة كالتشكيل الدوراني أو بالنفخ، وتُدمج مع قبة بوليمرية عبر اللحام. يتم لف الألياف المقواة حول البطانات بطرق مختلفة – كالحلقية، القطبية، أو الحلزونية – بحسب متطلبات التصميم الميكانيكي. تُستخدم مزيجات مختلفة من الألياف والراتنجات (غالبًا إيبوكسي) لضمان مقاومة عالية للضغط والتآكل. [1].

## II.7.1.2. التخزين الجوفي للهيدروجين: البديل طويل الأجل:

يمثل التخزين الجوفي للهيدروجين (Underground Hydrogen Storage – UHS) خيارًا واعدًا لتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين على المدى المتوسط والطويل، خاصة لتخزين الفوائض الناتجة عن إنتاج الطاقة المتجددة الموسمية أو الاستيراد. تعتمد هذه التقنية على استخدام تكوينات جيولوجية طبيعية – مثل الكهوف الملحية، والمكامن الغازية المستنفدة، والمكامن المائية – كوحدات تخزين ضخمة. [1]. [3]

تتنوع الخيارات الجيولوجية لتخزين الهيدروجين الجوفي، وأبرزها الكهوف الملحية، والمكامن الغازية المستنفدة، والمكامن المائية. تُعد الكهوف الملحية الخيار الأمثل لتخزين الهيدروجين النقي، نظرًا لخصائصها الجيولوجية الممتازة مثل الإغلاق المحكم، والمقاومة الكيميائية، والمرونة الميكانيكية، إضافة إلى انخفاض استهلاك الهيدروجين من قبل الكائنات الدقيقة. ومع ذلك، فإن محدودية توزيعها الجغرافي

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

وسعتها التخزينية النسبية تُعد من التحديات القائمة [1][3]. أما المكامن الغازية المستفدة، فهي توفر ساعات تخزين كبيرة، وتتميز ببنية جيولوجية معروفة بفضل أنشطة الاستكشاف السابقة، إلا أن بقايا الغاز الطبيعي قد تؤثر على نقاوة الهيدروجين، مما يقيد استخدامها في التطبيقات التي تتحمل نسب اختلاط معينة [1][3]. من جهة أخرى، تتميز المكامن المائية بانتشارها الجغرافي وقدرتها على التخزين واسع النطاق، لكنها تواجه تحديات تقنية كبيرة كالتسرب والتفاعلات الكيميائية والبيولوجية، ولا توجد حتى الآن تجارب موثقة لتخزين الهيدروجين النقي فيها، مما يجعلها مجالاً واعداً للبحث المستقبلي.

إن تخزين الهيدروجين في الحالة الغازية، سواء عبر أوعية الضغط أو في تكوينات تحت سطح الأرض، يمثل ركيزة أساسية في سلاسل القيمة المستقبلية للطاقة. ورغم تحديات الكلفة والسلامة، فإن التطور التكنولوجي المتسارع في المواد والهندسة الحرارية يعزز من فرص الاعتماد الواسع لهذه التقنيات [1]. [3]

### II.2.2. التخزين في الحالة السائلة:

#### II.2.2.1. تسييل الهيدروجين - متطلبات الطاقة والتحديات الديناميكية الحرارية:

تعتمد تقنية تسييل الهيدروجين على خفض درجة حرارته إلى ما دون  $-253^{\circ}\text{C}$  (20.28 كلفن)، وهي عملية كثيفة الاستهلاك للطاقة، حيث يُستهلك أكثر من 30% من إجمالي الطاقة الكامنة للهيدروجين خلال التسييل فقط [1]. وتُعزى هذه النسبة العالية إلى الخصائص الجزيئية للهيدروجين، ومنها انخفاض درجة غليانه ونقطة التحول الحرجة (33 كلفن)، فضلاً عن أن معامل جول-تومسون للهيدروجين يصبح موجباً فقط عند درجات حرارة أقل من 202 كلفن، مما يستوجب التبريد المسبق لتحقيق التسييل الفعال [1]. تاريخياً، استخدمت دورات تسييل متعددة مثل دورة ليند-هامبسون ودورة كلود. ورغم فاعلية الأولى مع الغازات التقليدية، إلا أنها غير كافية لتسييل الهيدروجين دون التبريد الأولي بالنيتروجين السائل. أما دورة كلود، التي تدمج التمديد الميكانيكي مع مبادلات حرارية متعددة، فقد أثبتت كفاءتها وجرى اعتمادها في محطات مثل "ليوننا" الألمانية التي انطلقت عام 2007 بسعة إنتاج يومية 5.5 طن متري [1]. ولزيادة

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الكفاءة، تم في العقود الأخيرة تطوير نظم تسييل تدمج بين التوربينات التوسعية والمحفظات لتحويل الهيدروجين من الحالة الأورثو إلى الباراء، وهو تحول يُطلق حرارة إضافية تُستغل في تحسين الكفاءة الحرارية للعملية. [1]

وفي هذا السياق، طوّر فريق بحثي في جامعة واشنطن نظام تسييل مبتكر يستخدم أنبوب رانك-هيلش الدوّامي جنبًا إلى جنب مع التحول الداخلي من أورثو إلى باراء، ما أتاح تحقيق درجات حرارة تصل إلى 30 كلفن بكفاءة تبريد أعلى بنسبة تصل إلى 20% مقارنةً بالتقنيات التقليدية، وفقًا لتقديرات أولية. [1]

### II.2.2.2. تصميم الخزانات والتحديات الحرارية:

يستلزم تخزين الهيدروجين السائل في خزانات مُصممة خصيصًا للحفاظ على درجة الحرارة المنخفضة، إذ إن أي تسرب حراري يؤدي إلى تبخر الغاز (boil-off) وبالتالي فقدان الهيدروجين [1]. يتكوّن خزان LH<sub>2</sub> النموذجي من ثلاث طبقات رئيسية: وعاء داخلي يتلامس مباشرة مع الهيدروجين السائل، وطبقة عزل حراري متعددة الطبقات (MLI)، ووعاء خارجي يعمل كحاجز ميكانيكي ويُستخدم لربط الخزان بالهيكل الخارجي. وتُحافظ المسافة بين الطبقتين على فراغ عميق للحد من انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل [1].

في تطبيقات الفضاء مثل برنامج مكوك الفضاء التابع لوكالة ناسا، تُستخدم خزانات LH<sub>2</sub> ذات عزل عالي، وتُجهّز غالبًا بخاصية التفريغ العالي (~10<sup>-4</sup> ميلليبار) ومواد مثل "البيرلايت" أو "الأبروجل"، ما يحد من الفاقد بالتبخر إلى مستويات تتراوح بين 0.01% و0.04% يوميًا [1]. ومع ذلك، فإن الخزانات التقليدية المستخدمة في التطبيقات المدنية، والتي تعتمد على تصميمات LN<sub>2</sub>، تسجل معدلات فقد حراري تتراوح بين 1% إلى 5% يوميًا. [1]

وللتغلب على هذه التحديات، جرى تطوير تقنيات لاسترداد الهيدروجين المتبخر، مثل استخدامه لتبريد الهيدروجين المضغوط الساخن في محطات التزود بالوقود، مما يقلل الفاقد إلى أقل من 1% يوميًا

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

[1]. كما أُجريت تجارب على أنظمة تبريد داخلية باستخدام الهيليوم السائل، تعرف باسم IRAS (نظام التبريد والتخزين المتكامل)، والتي يمكنها نظريًا تقليل الفاقد إلى الصفر، لكنها لا تزال غير مناسبة للتطبيقات التجارية بسبب التعقيد والتكلفة. [1]

### II.3.2.2. المواد المستخدمة في تصنيع الخزانات:

تعتمد كفاءة وأمان تخزين الهيدروجين السائل بدرجة كبيرة على المواد المستخدمة في تصنيع الخزانات. وتشمل المواد الأكثر شيوعًا الفولاذ المقاوم للصدأ، وسبائك الألمنيوم، وسبائك النيكل. ويُعد الفولاذ المقاوم للصدأ الخيار الأمثل بفضل أدائه الممتاز في درجات الحرارة المنخفضة ومقاومته لهشاشة الهيدروجين. في المقابل، تُجرى حاليًا أبحاث لتطوير مواد خفيفة وعالية الكفاءة مثل الأيروجلات، وسبائك التيتانيوم، والمواد المركبة. وتتميز سبائك التيتانيوم، على وجه الخصوص، بنسبة قوة إلى وزن عالية وقدرة ممتازة على الحفاظ على الخصائص الميكانيكية في الظروف المبردة. [1] [3]

### II.3.2. التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية:

يُعد تخزين الهيدروجين في الحالة الصلبة باستخدام الهيدريدات المعدنية أحد أكثر الأساليب الواعدة لتأمين مصادر طاقة مستدامة، في ظل التوجه العالمي المتسارع نحو التخلص من الوقود الأحفوري وتقليل الانبعاثات الكربونية. تعتمد هذه التقنية على التفاعل الكيميائي بين الهيدروجين والمعادن أو سبائكها، لتشكيل مركبات تُعرف بالهيدريدات المعدنية، والتي يمكن عكسها حراريًا لإطلاق الهيدروجين عند الحاجة دون الحاجة إلى طاقة مستمرة، حيث يكفي فقط توفير طاقة حرارية مناسبة. [1] [23]

تتميز هذه الطريقة بأمان عالٍ نسبيًا، حيث يتم تخزين الهيدروجين تحت ضغط منخفض وفي درجات حرارة معتدلة مقارنة بالتخزين في حالته الغازية أو السائلة. كما توفر الهيدريدات المعدنية كثافة طاقة عالية حجمية مرتفعة، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات التخزين الثابتة، أنظمة الطاقة المتجددة، ومحطات تزويد المركبات الهيدروجينية. [1] [23]

### II.1.3.2. الخصائص العامة للهيدريدات المعدنية كوسيط لتخزين الهيدروجين:

- أمان عالٍ أثناء التشغيل والتخزين.
- أداء جيد من حيث إمكانية التدوير وإعادة الاستخدام. (reversible cycling)
- كثافة طاقة مرتفعة من حيث الكتلة والحجم.
- نقاء عالٍ للهيدروجين المخزن.
- تكاليف تشغيل وصيانة منخفضة.
- إمكانية استخدام المعادن في أشكال مختلفة: نقية، سببكية، أو كمركبات معقدة.

يبدأ تكوين الهيدريدات عندما تتفكك جزيئات الهيدروجين عند سطح المادة إلى ذرات، ومن ثم تنتشر داخل البنية البلورية للمعدن أو السببكية لثمتص كيميائياً، وهي عملية تُعرف بالـ *chemisorption*، وقد تؤدي إلى تمدد في حجم الشبكة البلورية بنسبة تتراوح بين 20-30%. يمكن أن يتم التفاعل إما مباشرة بين المعدن والهيدروجين، أو عن طريق التحليل الكهروكيميائي لجزيئات الماء. [23]

من الأمثلة البارزة للهيدريدات البسيطة  $MgH_2$ ،  $TiH_2$ ،  $LaNi_5H_6$ ،  $FeTiH_2$ ،  $Mg_2NiH_4$ . وتُعد مركبات مثل  $MgH_2$  من أكثر المواد جذباً للبحث العلمي نظراً لقدرتها العالية على تخزين الهيدروجين (7.6% وزنياً)، وكثافتها الطاقوية التي تفوق كثافة الهيدروجين السائل بمقدار الضعف تقريباً، رغم بطء ديناميكية التفاعل التي تحدّ من استخدامها في الأنظمة المحمولة. ولهذا، تم تطوير تقنيات مثل الطحن الكروي (ball milling) والتقنيات النانوية لتحسين سرعة الامتصاص والتحرر، بالإضافة إلى إدخال عناصر انتقالية مثل النيكل والفاناديوم لتحفيز التفاعل. [23]

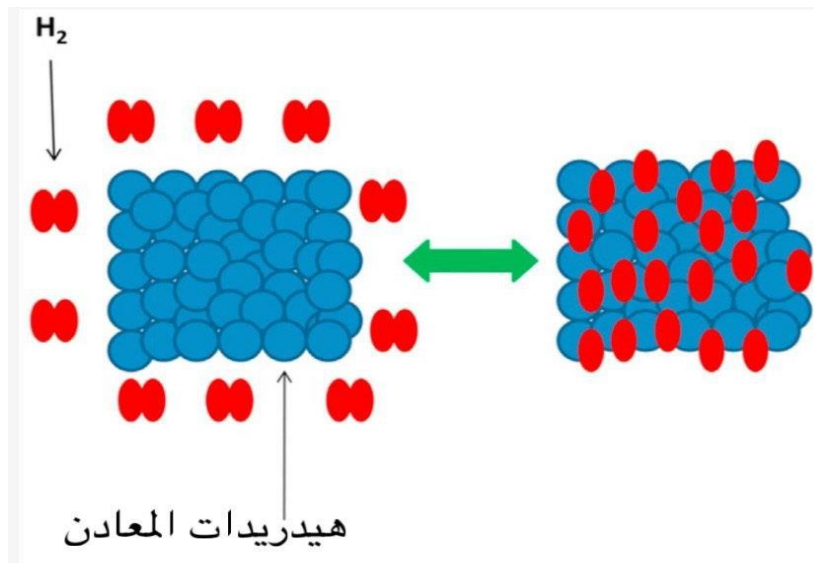
في المقابل، هناك الهيدريدات المعقدة مثل  $LiBH_4$  و  $NaAlH_4$  و  $Mg(BH_4)_2$  و  $NH_3BH_3$ ، والتي تُظهر سعة تخزين وزنية مرتفعة، ولكنها تتطلب درجات حرارة تفكك عالية ومحفزات نشطة مثل  $Fe$  و  $TiCl_3$  وتتميز هذه المواد ببنية كيميائية معقدة، حيث تتكون من روابط تساهمية بين ذرات

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الهيدروجين ومركز معدني (مثل Al، B)، وتُثبت بواسطة كاتيونات مثل  $Mg^{2+}$  أو  $Li^+$ . تُقسم الهيدريدات المعقدة إلى ثلاث فئات رئيسية: الألانات (alanates)، البوروهيدريدات (borohydrides)، والأميدات-الإيميدات. [23] (amides-imides)

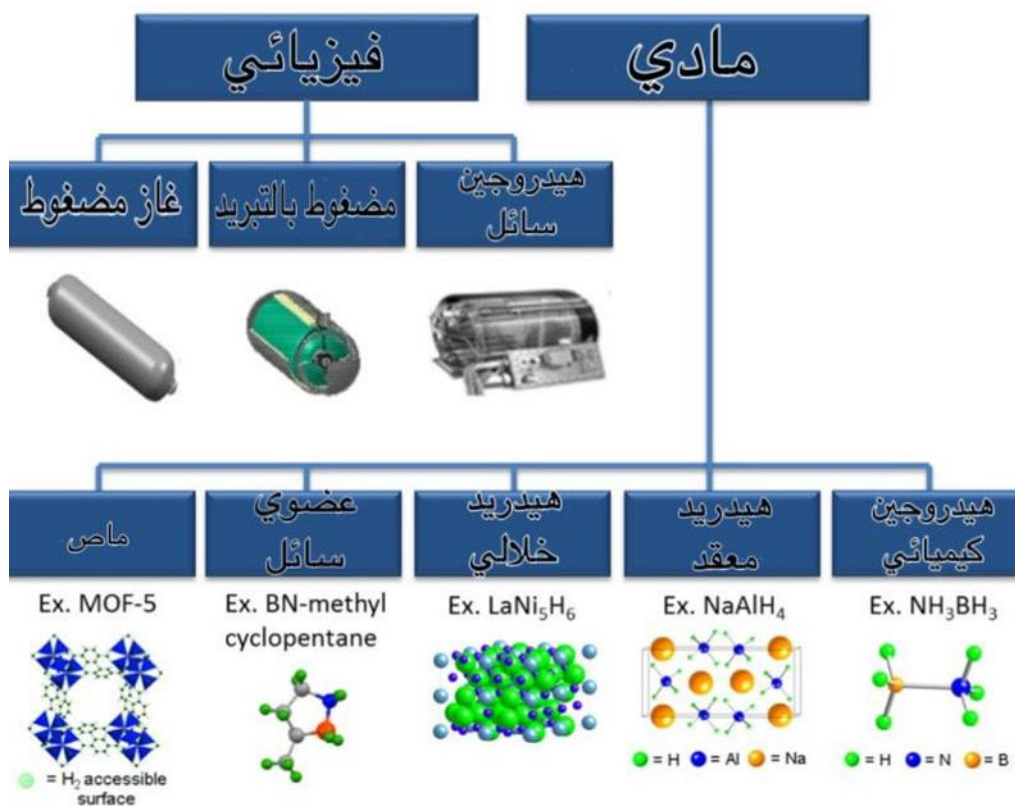
أظهرت مركبات مثل  $Mg_2FeH_6$ ،  $Mg_2NiH_4$ ، و  $Li_3NH$  أداءً واعدًا، ويمكن لبعضها الوصول إلى الهدف الأمريكي (DOE) للتخزين الوزني بنسبة 9%، وهو ما يفتح آفاقًا لتطبيقات أوسع خاصة في المركبات وخلايا الوقود. رغم ذلك، لا تزال هناك تحديات تتعلق بالتكلفة العالية، والاستقرار البيئي، والتفاعل العنيف مع الرطوبة أو الأكسجين، مما يتطلب معالجة هذه المواد في بيئة خاملة باستخدام ما يُعرف بصندوق القفازات. [23] (glove box)

وللتعامل مع الهيدريدات الحساسة للهواء والرطوبة مثل  $LiBH_4 \cdot MgH_2$  و  $NH_3BH_3$ ، يتم تحضيرها وتداولها في أجواء غازية خاملة مثل الأرجون، وذلك لتفادي التفاعلات الانفجارية التي قد تحدث عند تعرضها للماء أو الهواء. وقد طُوّرت أنظمة متقدمة لصناديق القفازات تتضمن منظمات ضغط وأجهزة لتأمين الفراغ من الهواء حتى في حالة انقطاع الغاز الخامل. [23] والوثيقة التالية تظهر طريقة عمل الهيدريدات المعدنية وتخزينها للمواد:



الشكل (1. II): طريقة عمل الهيدريدات المعدنية [9]

والصورة التالية ملخص لأساليب تخزين الهيدروجين



الشكل (2.11): بعنوان ملخص طرق تخزين الهيدروجين [4].

### 3.11. أساليب النقل:

يُعد نقل الهيدروجين عنصرًا محوريًا في تطوير سلسلة إمداد مستدامة لهذا الناقل الطاقي النظيف، حيث يُمثل الوسيط الرابط بين مراكز الإنتاج (سواء كانت تعتمد على التحليل الكهربائي أو إصلاح الغاز الطبيعي) والمستخدمين النهائيين في قطاعات الصناعة، النقل، وتوليد الكهرباء [1] [3] [7]. ومع التوسع العالمي في مشاريع الهيدروجين الأخضر والأزرق، يزداد الضغط على البنية التحتية اللوجستية، ما يستوجب تطوير حلول فعالة وآمنة وذات جدوى اقتصادية لنقل كميات متزايدة من الهيدروجين عبر مسافات طويلة ومتفاوتة جغرافيًا [6] [12] [14].

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

تتعدد استراتيجيات النقل المتاحة اليوم، وتشمل النقل عبر الأنابيب (Pipelines)، الشاحنات باستخدام خزانات الضغط أو الحالة السائلة، والسفن لنقل الهيدروجين المبرد أو المشتقات مثل الأمونيا والميثانول. وتمثل هذه الخيارات مجموعة متكاملة تتفاوت من حيث الكفاءة، التكلفة، الأمان، ومتطلبات البنية التحتية [2] [15] [16] [24]. ففي حين يُعد النقل عبر الأنابيب الأكثر كفاءة في المناطق ذات الطلب المرتفع والمتصل جغرافيًا، يُفضل استخدام الشاحنات أو السفن لتغطية الاحتياجات المؤقتة أو للتصدير عبر القارات. [14] [15].

كما تختلف الحلول التقنية باختلاف حالة الهيدروجين الفيزيائية: الهيدروجين الغازي المضغوط يُستخدم غالبًا في التطبيقات المحلية والنقل البري، بينما يتطلب الهيدروجين السائل تقنيات متقدمة للحفاظ على درجات حرارة منخفضة جدًا  $253^{\circ}\text{C}$  في حين تلجأ بعض المشاريع إلى الناقلات الكيميائية كبديل تخزينية ونقلية مرنة، مثل الأمونيا والـ LOHC (الناقلات العضوية السائلة للهيدروجين). [1] [3] [13] [25]

ومع التوجهات العالمية نحو الحياد الكربوني وتزايد الاستثمارات في الهيدروجين الأخضر، برزت الحاجة إلى تقييم دقيق لجميع أنماط النقل المتاحة من حيث كثافة الطاقة، السلامة، تكاليف الدورة الكاملة، والتكامل مع سلاسل الإمداد الحالية [7] [12] [26] [27]. كما أصبحت الاعتبارات الجغرافية والبنية التحتية القائمة، كما في حالة الجزائر مثلاً، عاملاً حاسماً في اختيار النمط الأمثل، ما يُبرز أهمية هذا الجزء من الدراسة في تحليل الأبعاد التقنية والاقتصادية والسياسية لنقل الهيدروجين. [19] [20] [21].

### II.1.3. النقل عبر الأنابيب:

نقل الهيدروجين عبر الأنابيب يُعد من أكثر الوسائل كفاءة واقتصادية لنقل كميات كبيرة من الهيدروجين، خاصة على المدى الطويل. تُشبه هذه التقنية إلى حد كبير أسلوب نقل الغاز الطبيعي، مما يجعل من الممكن الاستفادة من البنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي مع تعديلات محددة [23]. ويتميز الهيدروجين بخاصية انضغاطية مرتفعة نسبيًا، ما يسمح له بالمرور بكفاءة في الأنابيب عند ضغوط تشغيلية متوسطة تتراوح عادة بين 10 و 20 ميغاباسكال، مما يساهم في تقليل تكاليف الضغط والطاقة المطلوبة أثناء النقل [23].

تشمل أبرز مزايا نقل الهيدروجين عبر الأنابيب انخفاض التكاليف التشغيلية مقارنة بوسائل النقل الأخرى، إمكانية النقل المستمر والآمن، وتقليل الاعتماد على وسائل النقل التقليدية كالناقلات أو الشاحنات. كما يُعد هذا الأسلوب خيارًا واعدًا لتغذية محطات التزود بالهيدروجين أو وحدات الاستهلاك الصناعي مباشرة [23].

وتتجه العديد من المبادرات العالمية نحو تطوير شبكات أنابيب هيدروجين مخصصة، أو إعادة استخدام خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية بعد تهيئتها تقنيًا، بما في ذلك مشاريع مثل "العمود الفقري للهيدروجين الأوروبي" (European Hydrogen Backbone) الذي يعتمد على أكثر من 90% من البنية التحتية الحالية للغاز الطبيعي في أوروبا [23].

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

مع ذلك، يواجه هذا الأسلوب عدة تحديات تقنية، أبرزها الهشاشة الهيدروجينية ( Hydrogen Embrittlement)، وهي ظاهرة تؤثر على الخواص الميكانيكية للمواد المعدنية المستخدمة في الأنابيب، مما يؤدي إلى تدهور المناطق المتأثرة بالحرارة (HAZ) وانتشار الشقوق التعبية (FCP)، وبالتالي زيادة احتمالية تسرب الغاز [23]. هذه التحديات تفرض شروطاً صارمة على اختيار المواد المستخدمة، حيث يُفضل استخدام الفولاذات غير القابلة للصدأ، وسبائك النيكل، أو المواد المركبة التي تُظهر مقاومة أعلى للتشقق والتآكل تحت تأثير الهيدروجين [23].

جانباً آخر بالغ الأهمية في هذا السياق هو درجة نقاء الهيدروجين المنقول، إذ يجب أن يكون الهيدروجين خالياً من الشوائب لتفادي تفاعلها مع مواد الأنابيب أو المكونات النهائية. ولهذا، تُستخدم تقنيات متقدمة مثل الامتزاز بالضغط المتأرجح (PSA)، الفصل بالغشاء، والتقطير للحصول على نقاء يصل إلى 99.9999% [23].

في السياق الإقليمي، تُعد الجزائر من الدول الواعدة في هذا المجال نظراً لما تمتلكه من شبكة واسعة من أنابيب الغاز الطبيعي الممتدة نحو أوروبا، الأمر الذي يفتح المجال لإعادة تأهيل هذه الشبكة لاستخدامها في تصدير الهيدروجين مستقبلاً، لا سيما في ظل مشاريع الربط الجديدة قيد التخطيط [23].

كما أن المعايير التنظيمية والتشريعية تمثل عاملاً حاسماً في نجاح تطبيق هذا النمط من النقل، حيث يتطلب الأمر تنسيقاً بين السياسات الوطنية والدولية لضمان السلامة وتوحيد المعايير الفنية المتعلقة بالضغط، المواد، ودرجات النقاء المسموح بها [23].

وفي ضوء هذه الاعتبارات، يمكن القول إن نقل الهيدروجين عبر الأنابيب يُمثل ركيزة أساسية في منظومات الهيدروجين المستقبلية، ووسيلة مثالية لتعزيز التكامل بين الإنتاج والاستهلاك عبر مسافات طويلة، مع الحفاظ على الكفاءة والاستدامة.

## II.2.3. النقل عبر الشاحنات:

يُعد النقل البري من الوسائل الرئيسة لنقل الهيدروجين، لا سيما في المراحل التمهيدية لتطوير اقتصاد الهيدروجين، حيث تُستخدم الشاحنات المتخصصة لنقل الهيدروجين إما في حالته الغازية المضغوطة أو في حالته السائلة المبردة. ويُعتمد على هذه الوسيلة لمرونتها العالية وقدرتها على تلبية الطلب في المناطق ذات الاستهلاك المحدود أو المتفرقة جغرافياً، أو لتزويد محطات التعبئة والمنشآت الصناعية التي لا ترتبط بشبكة أنابيب. [3]

### II.1.2.3. النقل باستخدام الهيدروجين المضغوط:

في هذا النمط، يُنقل الهيدروجين في أسطوانات أو حاويات أنبوبية عالية الضغط تُحمل على شاحنات. [6] تُصنع هذه الحاويات عادةً من الفولاذ أو المواد المركبة لتحمل ضغوط تصل إلى 200-500 بار. ومع أن هذا النمط يتيح سرعة ومرونة في النقل، إلا أن كمية الهيدروجين المنقولة تكون محدودة نسبياً نتيجة الوزن الكبير للحاويات وقيود الحمولة على الطرقات. على سبيل المثال، تستطيع شاحنة أنبوبية تقليدية نقل ما بين 250 و500 كغم من الهيدروجين عند ضغط يتراوح بين 200 و250 بار. وقد تم تطوير جيل جديد من الحاويات يتيح نقل الهيدروجين عند ضغوط تصل إلى 700 بار باستخدام مواد متقدمة مثل ألياف الكربون، مما يزيد من كمية الهيدروجين المنقولة دون تجاوز حدود الوزن المسموح به على الطرق. [3] [23]

### II.2.2.3. النقل باستخدام الهيدروجين السائل:

أما في حالة الهيدروجين السائل، فيتم نقله باستخدام صهاريج معزولة حرارياً على متن شاحنات، بهدف الحفاظ على درجة حرارة منخفضة جداً تصل إلى -253°C. يسمح هذا الأسلوب بزيادة الكثافة الحجمية للهيدروجين وبالتالي نقل كميات أكبر تصل إلى حوالي 3500-4000 كغم في الرحلة الواحدة.

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

ومع ذلك، فإن تسييل الهيدروجين يتطلب طاقة كبيرة تعادل حوالي 30-40% من محتواه الطاقوي، إضافةً

إلى خسائر مرتبطة بالتبخر التدريجي أثناء النقل، والمعروفة بظاهرة "Boil-off" [3] [23]

في السياق الجزائري، ما تزال بنية نقل الهيدروجين في مراحلها الأولية، غير أن الدراسات الاستشرافية تشير إلى أن النقل البري باستخدام الشاحنات سيكون الخيار المفضل في المدى القريب لتوزيع الهيدروجين منخفض الكربون من مواقع الإنتاج (كالجنوب الصحراوي الغني بالطاقة الشمسية) إلى مراكز الاستهلاك في الشمال. ويُتوقع أن تُستخدم شاحنات مزودة بخزانات أنبوبية عالية الضغط لتزويد المناطق الصناعية، خصوصًا في محور الجزائر العاصمة - وهران - قسنطينة، ريثما يتم إنشاء بنية تحتية دائمة كشبكات الأنابيب. وقد أكدت دراسات الوكالة الوطنية لتطوير الطاقات المتجددة (APRUE) ومعهد الطاقة الجزائري (CDER) على أهمية تكييف تقنيات النقل الحالية مع ظروف المناخ والطرق في الجزائر، خاصةً فيما يتعلق بدرجات الحرارة المرتفعة في الجنوب وأطوال المسافات بين مواقع الإنتاج والاستهلاك.

### II.3.3. النقل عبر السفن:

يمثل النقل البحري للهيدروجين أحد الخيارات المحورية في سلاسل الإمداد العالمية للطاقة الهيدروجينية، حيث يتيح إمكانية نقل كميات ضخمة من الهيدروجين بين الدول ذات الفائض الإنتاجي والدول المستهلكة. [28] وتُقسم تقنيات الشحن البحري للهيدروجين إلى أربعة مسارات رئيسية: الشحن في الحالة الغازية المضغوطة ( $CGH_2$ ) ، الشحن في الحالة السائلة ( $LH_2$ ) ، الشحن باستخدام الأمونيا كناقل ( $NH_3$ )، والشحن باستخدام حوامل الهيدروجين السائلة العضوية (LOHCS) [14].

### II.1.3.3. الشحن في الحالة الغازية المضغوطة ( $CGH_2$ ):

يُعد شحن الهيدروجين في صورته الغازية من أبسط الخيارات من الناحية التقنية، نظرًا لانخفاض متطلبات الطاقة الخاصة بضغط الغاز ~ (1.1 كيلوواط ساعي/كغ  $H_2$  للضغط من 2 إلى 25 ميغاباسكال)

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

مقارنةً بالخيارات الأخرى [28]. ويتميز هذا النمط ببنية تحتية بسيطة نسبيًا، حيث يمكن ضخ الهيدروجين مباشرة في صهاريج السفينة بعد ضغطه. [5]

ورغم بساطته، إلا أن التحدي الرئيسي لهذا الخيار يتمثل في الكثافة الحجمية المنخفضة، مما يحد من كفاءة النقل [6]. ومع ذلك، تعمل شركة (GEV) Global Energy Ventures الأسترالية على تطوير أول سفينة شحن للهيدروجين المضغوط، "C-H<sub>2</sub>"، والتي تحتوي على خزائين أسطوانيين بقطر 12 مترًا وتعمل عند ضغط تشغيل يبلغ 25 ميغاباسكال، مما يمكنها من نقل 430 طنًا من الهيدروجين. ويهدف المشروع إلى بناء نسخة موسعة من السفينة بحمولة 2000 طن باستخدام خزائين بقطر 20 مترًا. [30]

### II.2.3.3. الشحن في الحالة السائلة (LH<sub>2</sub>):

يكتسب شحن الهيدروجين في الحالة السائلة اهتمامًا متزايدًا بفضل كثافته الحجمية العالية وإمكانية الاستفادة من الخبرات المتراكمة في مجال نقل الغاز الطبيعي المسال (LNG) [28]. ويُعد التحدي الأساسي في هذا النمط هو فقدان الهيدروجين المتبخر (boil-off)، حيث لا تزال عملية إعادة تسيل الغاز المتبخر على متن السفن غير متاحة اقتصاديًا [2]. ويُعتمد حاليًا على استخدام الغاز المتبخر كوقود للسفينة عن طريق خلايا الوقود أو محركات الاحتراق المباشر. [7]

وقد انطلق أول مشروع عملي في هذا المجال ضمن مبادرة HySTRA، وهو مشروع تعاوني بين أستراليا واليابان، حيث يتم إنتاج الهيدروجين من الفحم البني، ويُخطط لإضافة نظام احتجاز الكربون لتقليل البصمة الكربونية. وقد تم إطلاق سفينة SUI SO FRONTIER في ديسمبر 2019، وتتنقل 75 طنًا من الهيدروجين السائل على مسافة 9000 كم خلال 16 يومًا. [3]

### II.3.3.3. الشحن باستخدام الأمونيا:

تقدم الأمونيا خيارًا فعالًا لنقل الهيدروجين بفضل خصائصها الفيزيائية المستقرة عند درجات حرارة وضغوط معتدلة (-33°C عند الضغط الجوي أو 25°C عند 10 بار)، إضافةً إلى البنية التحتية الصناعية

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الجاهزة عالميًا [8]. يُنقل سنويًا نحو 17.5 مليون طن من الأمونيا عبر البحر باستخدام 170 سفينة و38 ميناء تصدير و88 ميناء استيراد. [3]

غير أن هذا المسار يتطلب طاقة كبيرة في مرحلتي التكوين (إنتاج الأمونيا) والتفكيك (تحليلها لاسترجاع الهيدروجين)، حيث تُستهلك طاقة إضافية تعادل حوالي 20% من القيمة الحرارية الدنيا للهيدروجين خلال عملية التكسير [26]. كما يتطلب فصل الهيدروجين عن النيتروجين بعد التحلل، مما يقلل من كفاءة السلسلة مقارنةً بالخيارات الأخرى. [10]

### II.4.3.3. الشحن باستخدام حوامل الهيدروجين السائلة العضوية (LOHCs) :

تُعد حوامل الهيدروجين السائلة العضوية (LOHCs) خيارًا واعدًا، حيث تتيح نقل الهيدروجين بشكل آمن وفعال بدون الحاجة لضغط عالٍ أو درجات حرارة منخفضة [28]. وتُخزن LOHCs كمواد سائلة ذات خصائص مشابهة لوقود الديزل، ويمكن التعامل معها باستخدام البنية التحتية الحالية. [29] إلا أن عملية تحرير الهيدروجين على جهة الاستيراد (نزع الهيدروجين) تُعد كثيفة الاستهلاك للطاقة (9 كيلواط ساعي/كغ H<sub>2</sub>) وتتطلب محفزات عالية الكفاءة واستقرارًا كيميائيًا طويل الأمد. [11]

رغم المزايا البيئية والسلامة التي تقدمها LOHCs، مثل عدم وجود تبخر وفقدان للهيدروجين أثناء النقل، فإن الحاجة إلى إعادة نقل المادة المستنفدة إلى الجهة المصدرة وارتفاع تكاليف التشغيل والوقود الإضافي المطلوب للسفن يُعد من أبرز التحديات. [28]

كما يجب الانتباه للآثار الصحية والبيئية المحتملة لبعض المركبات العضوية المستخدمة مثل H18-DBT والتولوين، والتي تُشتق من النفط الخام [28].

نظرًا لموقع الجزائر الجغرافي الاستراتيجي على البحر الأبيض المتوسط وقربها من الأسواق الأوروبية الكبرى، تمتلك الجزائر إمكانات هائلة في أن تصبح مركزًا إقليميًا لتصدير الهيدروجين عبر البحر. [19] وتُعد موانئ الجزائر، مثل ميناء أرزيو وسكيكدة، مزودة ببنية تحتية متقدمة لنقل وتخزين الغازات والمواد

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الكيميائية، ويمكن تكييفها تدريجياً لاستيعاب تقنيات شحن الهيدروجين سواء في صورته السائلة أو باستخدام

حوامل كيميائية مثل الأمونيا وLOHCs. [17]

علاوة على ذلك، تُتيح وفرة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في الجزائر إمكانية إنتاج الهيدروجين

الأخضر بتكلفة تنافسية، وهو ما يجعل من خيار الشحن البحري للهيدروجين استراتيجية واعدة للاندماج في

السوق الأوروبية للهيدروجين، خاصة في ظل تطور السياسات الأوروبية نحو تقليل الانبعاثات وتعزيز

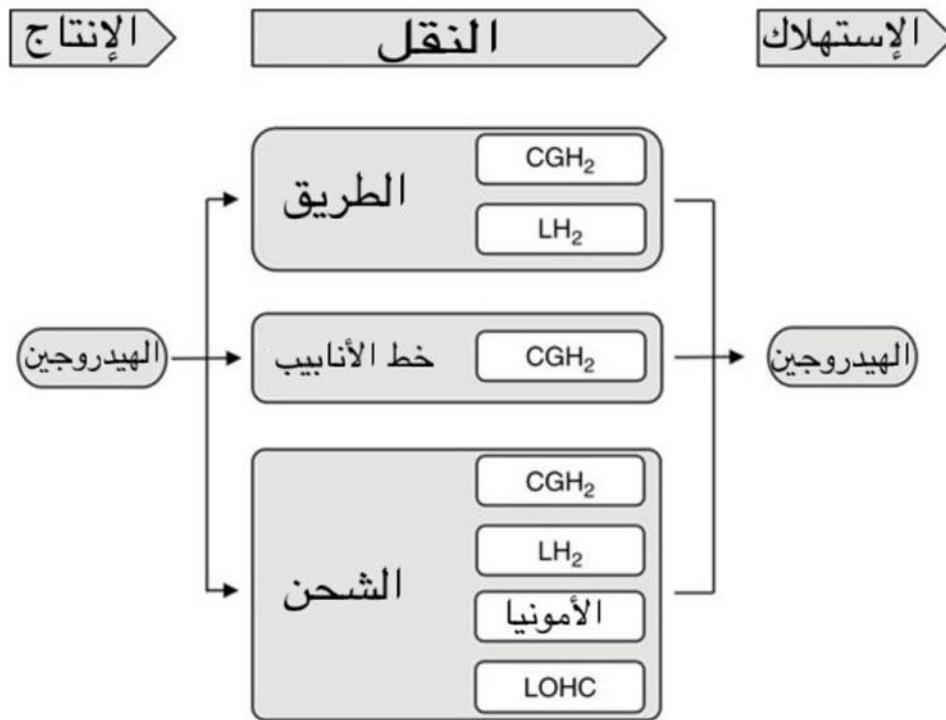
الطاقات المتجددة. [18] كما يمكن للجزائر الاستفادة من خبرتها في تصدير الغاز الطبيعي المسال (LNG)

لتسريع تبني تقنيات شحن الهيدروجين السائل [7]

تشير التقديرات إلى أن الجزائر قد تتمكن من تصدير الهيدروجين إلى أوروبا عبر مسارات بحرية

قصيرة نسبياً (أقل من 3000 كم)، مما يضعها في موقع تنافسي مقارنةً بالدول المصدرة الأخرى. [30]

والصورة التالية تلخص طرق نقل الهيدروجين: [23]



الشكل (3.II) ملخص اساليب النقل

## II.4. المقارنة بين طرق التخزين و النقل من حيث الكفاءة التكلفة الأمان:

يُعد التخزين الغازي للهيدروجين خيارًا مناسبًا للاستخدام المؤقت أو المتقل، خصوصًا في المناطق الصناعية الشمالية المرتبطة بالنقل بالشاحنات. يتميز هذا النوع من التخزين بأمان مقبول، مع وجود تحديات تتعلق بالهشاشة الهيدروجينية التي تستدعي الانتباه. من حيث التكلفة، يتطلب بناء خزانات عالية الضغط تكلفة معتدلة تتراوح تقريبًا بين 500 إلى 1000 دولار لكل كيلوغرام من الهيدروجين. أما الكفاءة الطاقية لهذا الأسلوب فتعتبر متوسطة، مع كثافة طاقة منخفضة تقارب 5.6 ميغا جول لكل لتر عند ضغط 700 بار. [11] [18]

أما التخزين السائل، فهو غير مفضل حاليًا في الجزائر بسبب المناخ الحار الذي يؤدي إلى فقد حراري مرتفع، بالإضافة إلى الحاجة إلى بنية تحتية مكلفة. بالرغم من ذلك، يتمتع التخزين السائل بأمان جيد، لكنه يتطلب مراقبة دقيقة بسبب خطر التبخر العالي. من الناحية التكلفة، فإن تسييل الهيدروجين وتوفير خزانات التخزين يترتب عليهما تكلفة مرتفعة، تتراوح بين 1500 إلى 3000 دولار لكل كيلوغرام. الكفاءة الطاقية للتخزين السائل عالية نسبيًا، حوالي 8.5 ميغا جول لكل لتر، ولكن هذا يصاحبها فقدان في طاقة التسييل يصل إلى 30-40%. [3] [19]

التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية يُعتبر خيارًا واعدًا للتخزين الثابت طويل الأمد، خاصة في المناطق الجنوبية من الجزائر التي تستفيد من محطات الطاقة الشمسية. يتميز هذا النوع بأمان حراري عالٍ دون الحاجة إلى ضغط عالي، وهو مناسب لأنظمة التخزين الثابتة. التكلفة تتراوح بين متوسطة إلى مرتفعة نتيجة المواد والتحفيز المستخدم، تقريبًا بين 600 و1200 دولار لكل كيلوغرام من الهيدروجين. من حيث الكفاءة الطاقية الحجمية، تتميز هذه الطريقة بارتفاع كبير، حيث تصل إلى 150-300 كيلوغرام هيدروجين لكل متر مكعب، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الطاقة المتجددة ومحطات التزويد. [1] [23] [24] وتم تلخيص هذه المقارنة في الجدول التالي:

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الجدول (1.11): مقارنة بين طرق التخزين من حيث الكفاءة والتكلفة والأمان وتقديم ملاحظات

### بالنسبة للجزائر

الطريقة	الكفاءة الطاقية	التكلفة	الأمان	ملاحظات متعلقة بالجزائر
التخزين الغازي	متوسطة - كثافة طاقية منخفضة (~5.6 MJ/L) عند 700 بار)	متوسطة - تكلفة بناء خزانات عالية الضغط معتدلة (~500- (kg-H <sub>2</sub> /\$1000)	مقبول - تحديات تتعلق بالهشاشة الهيدروجينية	يناسب الاستخدام المؤقت/المتنقل، مناسب للمناطق الشمالية الصناعية المرتبطة بالنقل بالشاحنات
التخزين السائل	عالية (~8.5 MJ/L)، ولكن مع فاقد في التسييل يصل 30-40%	مرتفعة - تكلفة التسييل والخزانات (~1500- (kg-H <sub>2</sub> /\$3000)	جيدة - لكن خطر التبخر العالي يحتاج مراقبة	غير مفضل حاليًا في الجزائر بسبب المناخ الحار وفقد الحرارة العالي؛ يتطلب بنية تحتية مكلفة
التخزين باستخدام الهيدريدات المعدنية	مرتفعة جدًا من حيث الحجم (~150-300 (kg-H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	متوسطة إلى مرتفعة - تكلفة المواد والتحفيز (~600- (kg-H <sub>2</sub> /\$1200)	عالية - أمانة حراريًا ولا تحتاج ضغط عالي	خيار واعد للتخزين الثابت طويل الأمد خاصة في الجنوب، يناسب محطات الطاقة الشمسية

### II.2.4. مقارنة وسائل نقل الهيدروجين: الكفاءة، التكلفة، الأمان:

بالنسبة لأنابيب نقل الهيدروجين، تُعتبر خيارًا مثاليًا على المدى البعيد، خصوصًا مع إمكانية إعادة استخدام شبكات الغاز الطبيعي القائمة في الجزائر مثل أنبوب "ميدغاز" في الجنوب والشمال. الأمان جيد، مع ضرورة مراقبة مخاطر التسرب والهشاشة الهيدروجينية بدقة. الاستثمار الأولي في أنظمة الأنابيب مرتفع، لكن التكلفة التشغيلية منخفضة نسبيًا، حيث تصل إلى حوالي 0.1-0.25 دولار لكل

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

كيلوغرام هيدروجين لكل 100 كيلومتر . الكفاءة الطاقية عالية جدًا بفضل النقل المستمر دون الحاجة لطاقة تسييل أو ضغط إضافي. [9] [19]

أما النقل بالشاحنات، فيعد الأنسب للمرحلة الانتقالية لتوزيع الهيدروجين داخل الجزائر، بين نقاط إنتاج واستهلاك متفرقة. من حيث الأمان، فهو مقبول، لكن هناك مخاطر تتعلق بالتبخر للهيدروجين السائل وخطر الانفجار للهيدروجين الغازي، مما يتطلب تطبيق احتياطات صارمة. التكلفة متوسطة وتعتمد على نوع الشاحنات المستخدمة، إذ تتراوح بين 1.5 و3 دولارات لكل كيلوغرام لكل 100 كيلومتر. تتميز الشاحنات بمرونة عالية في التوزيع، لكنها محدودة من حيث الكميات والمسافات المقطوعة. [11] [25]

فيما يخص النقل البحري للهيدروجين، فإن الاستراتيجية تعتمد على التصدير إلى أوروبا عبر البحر الأبيض المتوسط، مع تطوير موانئ مثل سكيكدة وأرزيو في الجزائر. الأمان جيد عند استخدام ناقلات الهيدروجين بشكل الأمونيا أو حاملات الهيدروجين السائل العضوي (LOHC) ، رغم أن البنية التحتية المطلوبة معقدة. تكلفة النقل مرتفعة نسبيًا، بسبب عمليات التسييل وإعادة التحويل التي تتراوح بين 4 إلى 6 دولارات لكل كيلوغرام عند نقل مسافات تزيد على 5000 كيلومتر. الكفاءة الطاقية مناسبة لنقل كميات كبيرة لمسافات طويلة، لكنها أقل بسبب خسائر التسييل والتحويل. [19] [30] وتم تلخيص هذه المقارنة في الجدول التالي:

الجدول (2.11): مقارنة بين وسائل النقل من حيث الكفاءة و التكلفة و الأمان و تقديم

ملاحظات بالنسب للجزائر

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

الوسيلة	الكفاءة الطاقية	التكلفة	الأمان	ملاحظات متعلقة بالجزائر
الانابيب	عالية جدًا - نقل مستمر دون طاقة تسهيل أو ضغط إضافي	استثمار أولي مرتفع، لكن تشغيل منخفض التكلفة (~0.1-0.25\$/kg) (H <sub>2</sub> /100km)	جيدة - مخاطر التسرب والهشاشة الهيدروجينية تتطلب مراقبة دقيقة	خيار مثالي على المدى البعيد، خاصة لإعادة استخدام شبكة الغاز الطبيعي في الجنوب والشمال (مثال: أنبوب "ميدغاز")
الشاحنات	مرونة عالية، لكنها محدودة من حيث الكمية والمسافة	متوسطة - اعتمادًا على نوع الشاحنات (غازي أو سائل) (~1.5-3\$/kg) (H <sub>2</sub> /100km)	مقبول - خطر التبخر (السائل) أو الانفجار (الغازي) يتطلب احتياطات صارمة	الأفضل في المرحلة الانتقالية؛ مثالي لتوزيع الهيدروجين في الجزائر بين نقاط إنتاج واستهلاك متفرقة
السفن	مناسبة لنقل كميات كبيرة لمسافات طويلة، لكن كفاءة منخفضة بسبب عمليات التسييل/التحويل	مرتفعة جدًا (تسييل + إعادة تحويل) (~4-6\$/kg-H <sub>2</sub> ) عند النقل لمسافات <5000km)	جيدة عند استخدام الأمونيا أو LOHC، لكن تحتاج بنية تحتية معقدة	استراتيجية للتصدير نحو أوروبا عبر البحر الأبيض المتوسط؛ تعتمد على تطوير موانئ مثل سكيكدة وأرزو

### المراجع:

[1] تشاو، يانغ وآخرون. "مراجعة لتقنيات تخزين ونقل الهيدروجين"، مجلة الطاقة النظيفة، 2023، المجلد

7، العدد 1، الصفحات 190-216.

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

- [2] وانغ، هونغ وآخرون. 2023 "مراجعة حول المواد الهيدريدية لتخزين الهيدروجين"، مجلة تخزين الطاقة، المجلد 72، الصفحة 108456.
- [3] زانغ، شياو وآخرون. 2023 "تخزين ونقل الهيدروجين: التقدم والتحديات"، مجلة Energies، المجلد 17، العدد 16، الصفحة 4070.
- [4] وزارة الطاقة الأمريكية. "تخزين الهيدروجين". متاح عبر : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025.
- [5] وزارة الطاقة الأمريكية. "نقل الهيدروجين". متاح عبر : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery>. تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025.
- [6] FASTECH. "لوجستيات وقود الهيدروجين". متاح عبر " <https://www.fastechus.com> ". تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025. (<https://www.fastechus.com/>).
- [7] الوكالة الدولية للطاقة. "المراجعة العالمية للهيدروجين 2024". متاح عبر <https://www.iea.org>. تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025. (<https://www.iea.org/>).
- [8] Hydrogen Energy. "مراجعة تكنولوجيا تخزين الهيدروجين"، 2023.
- [9] Energies. "التقنيات الهيدروجينية : مراجعة وجدوى"، 2023.
- [10] Taylor & Francis. "خصائص تخزين الهيدروجين"، 2023.
- [11] ScienceDirect. "الاستراتيجية التقنية والاقتصادية لنقل الهيدروجين"، 2023.
- [12] McKinsey & Company. "الآفاق العالمية لتكلفة الهيدروجين"، 2023.

## الفصل الثاني.....تخزين ونقل الهيدروجين الأخضر

[13] تشين، يوي وآخرون. 2023 "نظرة شاملة على تقنيات تخزين الهيدروجين"، المجلد 48، العدد 12، الصفحات 5400-5425.

[14] DiviGas. مقارنة طرق نقل الهيدروجين". متاح عبر <https://www.divigas.com>. تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025. (<https://www.divigas.com/>).

[15] Hexagon Purus. نقل الهيدروجين بأمان". متاح عبر <https://hexagonpurus.com>. تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025. (<https://hexagonpurus.com/>).

[16] DomBor Valve. 2023 دليل نقل الهيدروجين عبر الأنابيب".

[17] مؤسسة فريديش إيبيرت. "الهيدروجين في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا"، 2021.

[18] مدونة البنك الدولي. "إطلاق إمكانات الهيدروجين"، 2023.

[19] بوشعالة، دجامام، خرف. "اقتصاد الهيدروجين في الجزائر"، 2023.

[20] APRUE. 2022 نحو تطوير الهيدروجين الأخضر في الجزائر".

[21] CDER. 2021 إمكانات إنتاج وتوزيع الهيدروجين المتجدد في الجزائر".

[22] وزارة الانتقال الطاقوي. "خارطة الطريق الوطنية للهيدروجين"، 2023.

[23] ResearchGate. "مراجعة لتقنيات تخزين ونقل الهيدروجين".

[24] وزارة الطاقة الأمريكية. "نقل الهيدروجين". متاح عبر <https://www.energy.gov> : تمت زيارة الموقع بين 7 و 15 أبريل 2025. (<https://www.energy.gov/>).

[25] Xie, Z.; Jin, Q.; Su, G.; Lu, W. (2024). A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges. *Energies*, 17(16), 4070. DOI:10.3390/en17164070.

[26] Nature Energy. 2022 مراجعة سلسلة إمداد الهيدروجين"، 2022.

[27] Breakthrough Energy. متاح عبر .: كيفية نقل وتخزين الهيدروجين

تمت زيارة الموقع (<https://www.breakthroughenergy.org>) (<https://www.breakthroughenergy.org/>).

بين 7 و15 أبريل 2025

[28] Yang, M.; Hunger, R.; Berrettoni, S.; Sprecher, B.; Wang, B. (2023). A review of hydrogen storage and transport technologies. *Clean Energy*, 7(1), 190–216. DOI: 10.1093/ce/zkad021

[29] Fuel Cell Store. متاح عبر .: طرق تخزين الهيدروجين. <https://www.fuelcellstore.com>

تمت زيارة الموقع بين 7 و15 أبريل 2025 (<https://www.fuelcellstore.com/>).

[30] دراسة حول النقل البحري للهيدروجين في المتوسط باستخدام الأمونيا وLOHC، 2024.

[31] مراجعة حول تخزين الهيدروجين السائل وتكاليف التسييل، مرجع داخلي.

[32] مرجع حول التخزين الغازي للهيدروجين وتكاليف الضخ، مرجع داخلي.

[33] مرجع حول تطبيقات الهيدريدات المعدنية في التخزين الثابت، مرجع أكاديمي.

[34] دراسة مقارنة بين نقل وتخزين الهيدروجين بالشاحنات، مرجع داخلي.

[35] محتوى حول استخدام شبكات الغاز لنقل الهيدروجين في شمال أفريقيا، 2024.

[36] نقل الهيدروجين بحريًا من الجزائر لأوروبا، باستخدام LOHC، 2024.

## الفصل الثالث

### تطبيقات الهيدروجين الأخضر

### 1.III. مقدمة:

على حسب ما تطرقنا في دراستنا بأن الهيدروجين الأخضر ينتج من مصادر نظيفة، حيث ان استخدامه خالي من أي انبعاثات ضارة. أكد الباحثين على العمل به اذ أنه يعتبر مصدرا من مصادر الطاقة المتجددة وبات دوره متزايد الأهمية في مختلف المجالات كالنقل والصناعة.

في هذا الفصل سنتطرق الى اهم تطبيقات الهيدروجين الأخضر والتي تشمل:

استخدامه في توليد الكهرباء، استخدامه فالنقل، استخدامه في الصناعة. كذلك سنرى الإيجابيات التي يقدمها والمعيقات التي قد تواجهه

### 2.III. استخدام الهيدروجين الأخضر في توليد الكهرباء:

يعتبر الهيدروجين عنصرا أساسيا في تشغيل الطائرات والقطارات، السيارات، السفن، المصانع، تدفئة المنازل ومكاتب وغيرها، كما أن للهيدروجين دورا هاما في نقل الطاقة كالكهرباء لمسافات بعيدة وعبر انابيب النقل او الصهاريج بجودة عالية واكل تكلفة أيضا باستخدام الهيدروجين توفير ماء صالح للشرب أيضا كوقود هيدروجيني وبشكل رئيسي ضمن الحقول الأربعة التالية:

✓ يستخدم كوقود للسيارات التي تعمل على تقنية خلايا الوقود الهيدروجيني حيث شهدت زيادة حوالي ثلاثة أضعاف في قطاع النقل، وبهذا النمو يمكن لكل من اليابان وكوريا أن تصدر هذا النوع من السيارات الى مختلف مناطق العالم، كما أصدرت الصين عام 2016 حافلات الخلية الوقودية.

استعمال الهيدروجين كبطاريات حيث تتدرج من الأضعف التي تستخدم فالحواسيب الشخصية الى الأقوى وهي بواخر نقل الهيدروجين حيث تنقله من محطات انتاج الطاقة المتجددة الى أماكن توليد الكهرباء [1]

✓ استخدامه كوقود للطاقة الحرارية والذي يتم بالاحتراق المباشر للهيدروجين في محطات الطاقة ويستعمل أيضا كوقود دفعي للصواريخ

✓ استعماله كوقود في التفاعلات النووية، يتم التركيز على مفاعل (ITER) وذلك لتوليد الطاقة من الشمس

[2]

### III.2.1 الطرق الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين الأخضر :

تعتمد مصادر الطاقة البديلة على تقنيات معقدة وعالية التكلفة أيضا تشترط ظروف مناخية معينة

كالطقس الصافي حيث أن سطوع الشمس لفترات طويلة مهم لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية ومن هنا

تحدث إشكالية لدى البلدان التي تكثر فيها السحب طيلة السنة.

مع نهاية القرن العشرين تم تبني طريقة لتوفير الطاقة لاقت اهتمام واسع حيث تم استخدامها كوقود

في المركبات الفضائية إذ نجد هذه التقنية في خلايا الوقود. تتميز هذه التقنية بأنها أقل ضجيج ولا تنتج

انبعاثات غير مرغوبة بالإضافة الى الكفاءة العالية في تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في المركبات

الهيدروكربونية الى طاقة كهربائية مباشرة [3]

### III.2.2 خلايا الوقود :

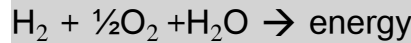
خلايا الوقود عبارة عن جهاز يحول الطاقة الكيميائية الى طاقة كهربائية وتتم بجمع الهيدروجين

مع الاوكسجين الى الماء وينتج عن هذا التفاعل تيار كهربائي.

### III.2.1 فكرة عمل خلايا الوقود:

تتم العملية في خلايا الوقود بمنح جهاز مصدر وقود مثل الهيدروجين والاكسجين بصفة مستمرة وينتج

عن ذلك طاقة كهربائية كما هو موضح في التفاعل التالي: [6]



يتميز نظام التوليد هذا بأنه ذو كفاءة عالية مقارنة بأنظمة التوليد الأخرى حيث ان نظام توليد

الكهرباء بواسطة الاحتراق يتم بتحويل الطاقة الكيميائية في الوقود الى حرارية ومن ثم طاقة ميكانيكية ثم

الى طاقة كهربائية وبالتالي فان الكفاءة ضعيفة [7]

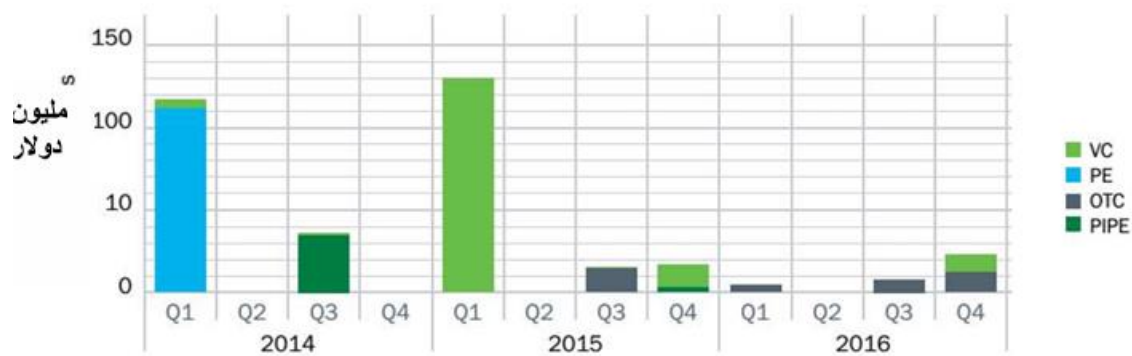
III.2.3 اقتصاديات خلايا الوقود :

عند التدقيق في التطور الاقتصادي لتكنولوجيا خلايا الوقود مقارنة بأنظمة التوليد الأخرى تجد أن خلايا الوقود في بدايتها كانت عالية التكلفة ولم تكن في مستوى الإنتاج التجاري.

حيث أن في عام 1985 تم تشغيل وحدة خلايا الوقود بسعة 27 ميغا واط بالولايات المتحدة الأمريكية لكنها لم تجذب التمويلات الرأسمالية.

بحلول عام 2016 تطورت الصناعة بشكل ملحوظ بحيث ارتفعت الاستثمارات العالمية ووصلت

قيمتها حوالي 355.8 دولار بين عامي 2014 و2016 [8]



الشكل (III.1) اجمالي الاستثمارات في خلايا الوقود بالولايات المتحدة عام 2016 [9]

الجدول (III.1): مقارنة بين خلايا الوقود ووسائل توليد الطاقة الأخرى [10]

طريقة التوليد	الكفاءة		كثافة الطاقة المولدة		التكلفة الاستثمارية	
	نسبة مئوية	حاليًا	مستقبلاً	حاليًا	مستقبلاً	(دولار/ كيلو واط)
خلايا الوقود الباردة	90	70	1.84	0.07	544	136
خلايا الوقود الساخنة	90	60	3.3	0.37	408	68
الخلايا الشمسية	25	15	1.84	1.1	952	680
محركات البنزين	30	27	0.44	0.44	408	544
محركات البترول	45	42	0.29	0.29	408	544

III.2. 4. المزايا الاقتصادية لخلايا الوقود :

✓ ان استخدام خلايا الوقود للسيارات بدلا من البطاريات تعتبر البديل الأمثل. لأنها تحافظ على البيئة.  
✓ كما تتنافس شركات السيارات العالمية لاستعمال أفضل كفاءة خلايا الوقود حيث صرح مهندسو شركة <<هوندا>> عام 2004 أن محرك السيارة FCX يعمل في درجة حرارة 20C° تحت الصفر وهذا راجع لحفظ الماء بحالة غازية داخل النظام[11].

✓ عام 2016 تطور استعمال الهيدروجين الأخضر كوقود نأخذ كمثال خلايا الوقود (Clarity Honda) وأيضا نماذج من شركة هونداي (Toyota، Mirai، Tucson fuel cell، ix35Fuel Cell).  
✓ كما اعتمدت تويوتا وهونداي الجيل الجديد من خلايا الوقود التي تستخدم الهيدروجين كوقود من نوع (FCEV) والمقرر طرحها في 2018 بالنسبة لهونداي وعام 2020 بالنسبة لتويوتا، أيضا من المحتمل أن يتزايد الفترة القادمة [12]

✓ خلايا الوقود الهيدروجيني لم تستخدم فقط لسيارات ففي عام 2016 أصبحت السكك الحديدية تعمل بالوقود الهيدروجيني وذلك من قبل شركة ALSTOM حيث أطلقت وقود iLint لأول مرة في معرض inno trans2016 التجاري في برلين حيث كان هذا القطار بمواصفات عالية تصل سرعته 90 ميل في ساعة إضافة الى استهلاك خزان من الهيدروجين في 500 ميل أيضا يستوعب 300 مسافر [13]  
✓ أعلنت ولاية شيليز فيج هولشتاين الألمانية على اعتمادها تزويد شبكة السكك الحديدية بالكهرباء بحلول 2025 حيث ستتم هذه العملية باستعمال الهيدروجين المولد من فائض الذرة في طاقة الرياح إضافة الى مصادر أخرى خالية من الكربون.

✓ أوضحت الطائرة البريطانية من نوع ايزي جيت مخططها لاستعمال خلايا الوقود في الطائرات عام 2016 [14]

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

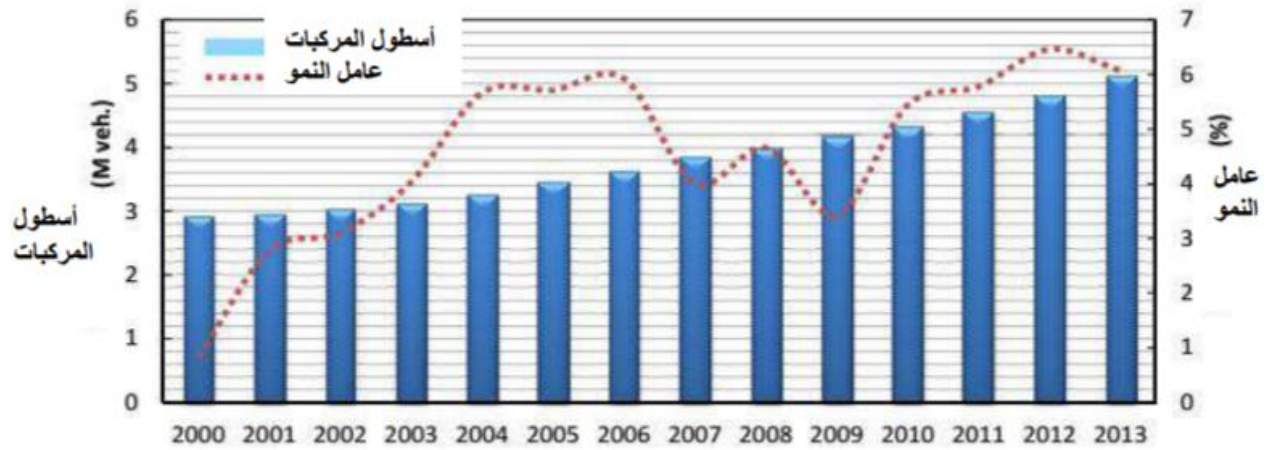
أعلنت شركة رويال كاربييان كروز انها ستجري تجربة تكنولوجيا خلايا الوقود على سفينة من فئة اواسيس عام 2017 حيث ستستخدم في سفنها الجديدة كل من الغاز الطبيعي المسال وخلايا الوقود كمصدر الطاقة التكميلية، أيضا أعلنت على سفينتين جديدتين من نوع Icon سيستعمل فيهما الغاز الطبيعي وخلايا الوقود خلال 2022 و2024 [15]

### 3.III استخدام الهيدروجين الأخضر في النقل :

يعد النقل البري في الجزائر الوسيلة الأكثر انتشارا وهذا يعود لحجم الرقعة الجغرافية الكبيرة، كما انه الأكثر كثافة في قارة إفريقيا بحجم كلي 112696 كم من الطرق منها 29567 كم سريعة وأكثر من 4910 كم جسورا وأنفاقا.

تقدر نسبة النقل الآلية في الجزائر 0.5% من اسطول المركبات العالمي، حيث شهد زيادة في فترة

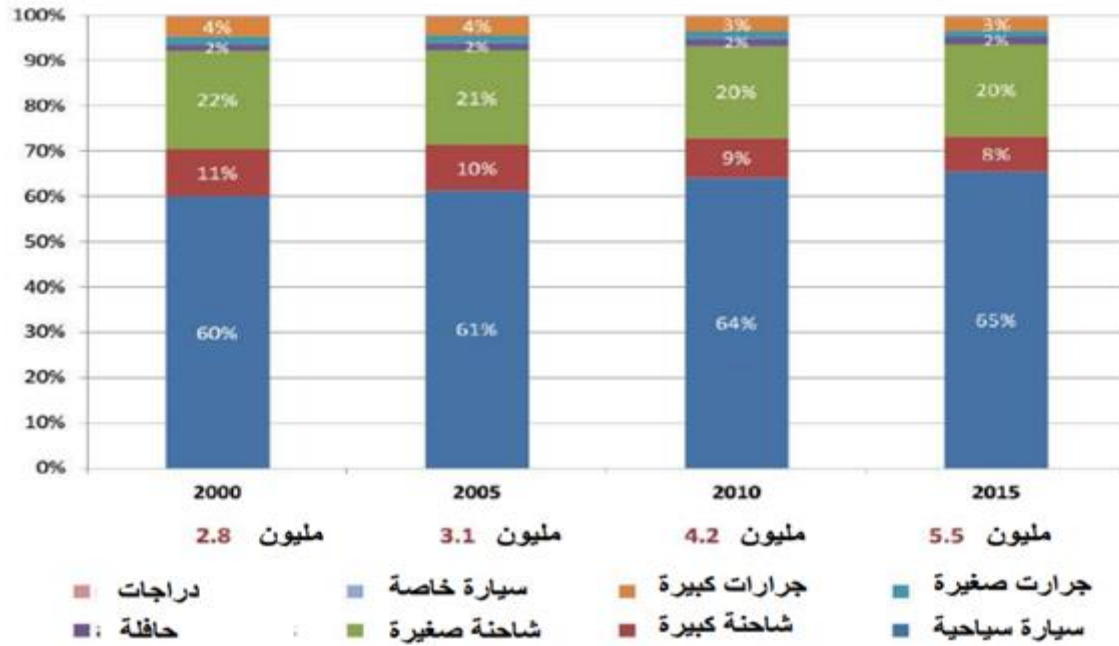
(2003-2013) حوالي 41% [16]. كما هو موضح في الشكل:



الشكل (2.III): نمو اسطول المركبات والطرق الجزائري (2000-2013) [16]

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

كما تطورت عدد المركبات عام 2015 الى أكثر من 5.5 مليون حيث يشمل السيارات السياحية نسبة 65%:



الشكل (3.III): توزيع أسطول المركبات في الجزائر حسب فئة المركبات [17]

مع تزايد حجم اسطول المركبات في العالم، ظهرت مشكلة الأمن الطاقوي وهذا يعود لانبعاثات ثاني

أوكسيد الكربون لذا وجب إعتتماد الهيدروجين المتجدد كوقود بدلا من أنواع الوقود التقليدية بحيث خصائصه

ملائمة لضمان بيئة مستدامة كما هو موضح في الجدول الآتي:

الجدول (2.III): خصائص أنواع الوقود المختلفة في قطاع النقل الجزائري [18]

كثافة الكتلة (كغ / م<sup>3</sup>) كثافة الطاقة (كيلووات ساعة / كغم)

كثافة الكتلة	كثافة الطاقة	
720	12.7	البنزين
417	11.6	غاز البترول المسال
348	13.9	الديزل
0.084	39.5	الهيدروجين

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

أوضحت إحدى الدراسات إمكانية إحلال الوقود الهيدروجيني محل الوقود التقليدي وذلك وفقا للحالات

الثلاث الآتية:

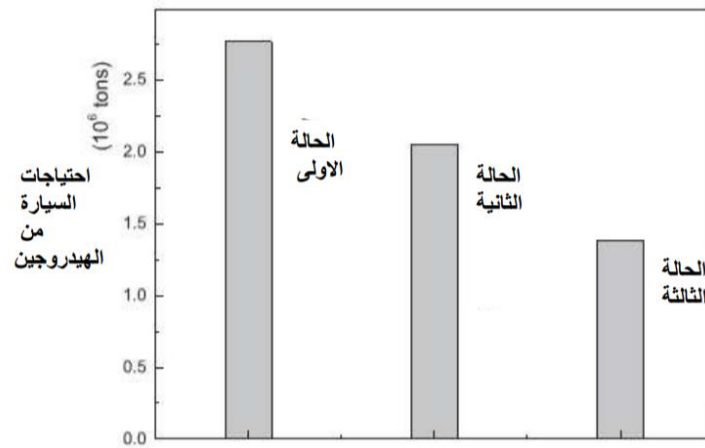
-الحالة الأولى: سيارة هيدروجين ذات كفاءة متساوية مع سيارة تعمل بالوقود التقليدي

-الحالة الثانية: سيارة هيدروجين لديها تحسن في الكفاءة بنسبة 35% لأكثر من سيارة تعمل بالوقود

التقليدي

-الحالة الثالثة: سيارة تعمل بالخلايا الوقود هيدروجينية والتي لديها طاقة تحسن في كفاءتها تفوق 100%

[19]



الشكل (4.III): الأحتياجات السنوية للسيارة من وقود الهيدروجين وفق الحالات الثلاث [19]

أظهرت دراسة أجرتها وزارة الطاقة الأمريكية أن اقتصاد خلايا الوقود بالنسبة للطاقة كان أعلى 1.4

مرة من استعمال وقود الديزل أيضا صرح مشروع "ابيردين" اسكتلندا أن مجموعة مركباتها المكونة من 10

حافلات كفاءتها تعادل أربع أضعاف الوقود من الحافلات التي تستخدم وقود الديزل [20]

الوقود/ الخصائص	درجة حرارة الهب	الحد الأدنى لطاقة الاشتعال	انبعاثات CO2
البنزين	2307	0.7	2.3
الهيدروجين	2207	0.02	00

الجدول (3.III): خصائص وقود الهيدروجين والبنزين [21]

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

لتبني الهيدروجين كوقود بدلا من الوقود التقليدي يجب تجاوز العقبات التقنية والاقتصادية، تتوفر

ثلاث خيارات مستقبلية لانتاج الهيدروجين و توزيعه بالجزائر:

✓ الخيار الأول " الإنتاج المركزي :«يتم انتاج هيدروجين في منشآت ضخمة ثم ينقل الى محطات التزود بالوقود.

✓ الخيار الثاني " الإنتاج اللامركزي :«ينتج الهيدروجين في وحدات صناعية صغيرة وتكون متواجدة في محطات التزود بالوقود

✓ الخيار الثالث انتاج الهيدروجين فالسيارة: لنجاح هذه الاستراتيجيات تحتاج الجزائر الى تطوير السيارات او المركبات المعتمدة على الهيدروجين وهما نوعان:

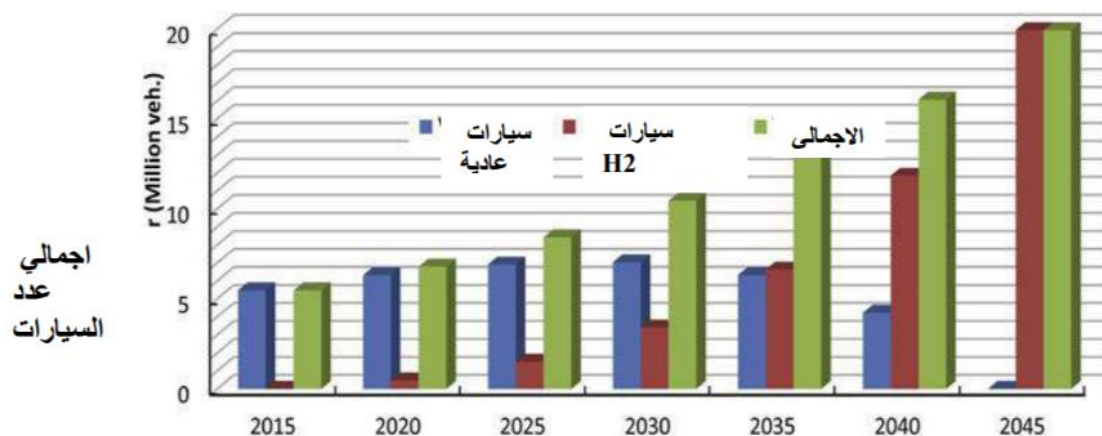
✓ مركبات احتراق الهيدروجين الداخلي

✓ مركبات خلايا الوقود [22]

لتنفيذ هذه الخيارات يجب تطوير البنية التحتية ايضا نظرا لارتفاع تكاليف الإنتاج تحتاج لتشجيع الاستثمار.

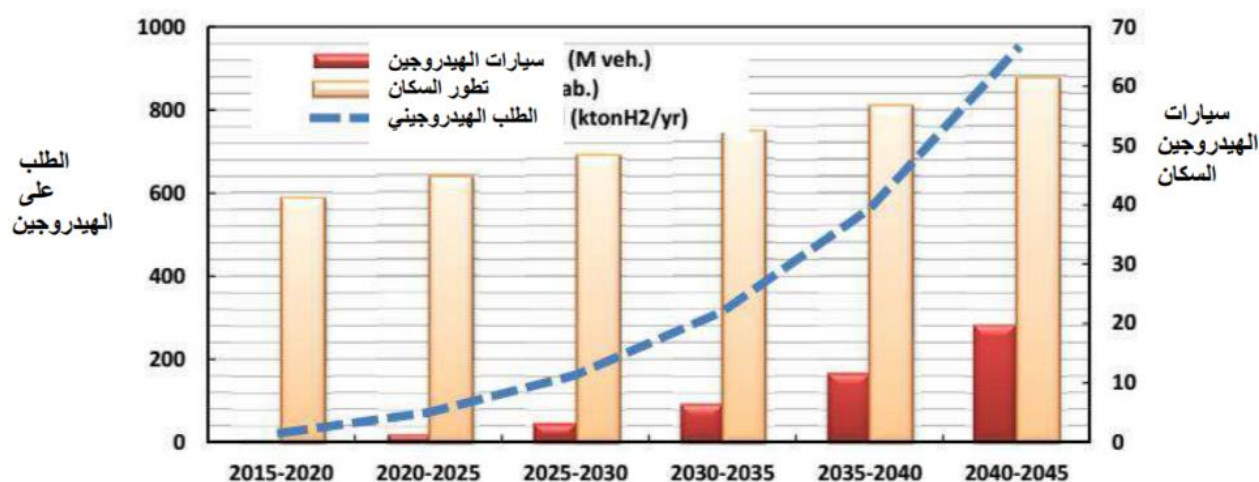
### III.3.1 توقعات الطلب المستقبلي على هيدروجين في قطاع النقل الجزائري :

ان التوقعات المستقبلية للطلب على الهيدروجين مهمة جدا لوضع استراتيجيات ودراسات لتطوير البنية التحتية الوطنية، من اهم هذه الدراسات نموذج "سميرة رحموني " حيث اعتمدت على نظام المعلومات الجغرافية (GPS) لتحليل التوزيع المكاني أيضا لتقدير الطلب على طاقة الهيدروجين لعام 2045 [23] كما أوضحت في دراستها التطور الذي سيحدث في عدد المركبات في الجزائر، فسيزداد العدد من 5.5 مليون مركبة في 2015 الى 19.92 مليون مركبة في عام 2045 منها 11.8 مليون مركبة تعتمد على طاقة الهيدروجين كما هو موضح في الشكل التالي:



الشكل (5.III): تطور أعداد المركبات في الجزائر بما فيها مركبات الهيدروجين [24]

اما بالنسبة للنمو السكاني في الجزائر حسب دراسة "سميرة رحموني" أنه سيتصاعد من 39.9 مليون نسمة عام 2015 الى 61.3 مليون نسمة عام 2045 كذلك فيما يتعلق بنجاح الهيدروجين في كسب السوق الجزائري فسيزداد من 22.5 كيلوطن خلال الفترة (2045-2015) الى قيمة 945.5 كيلوطن في الفترة (2045-2040) بنسبة نجاح مقدرة بـ 100 % و الشكل التالي يوضح ذلك:

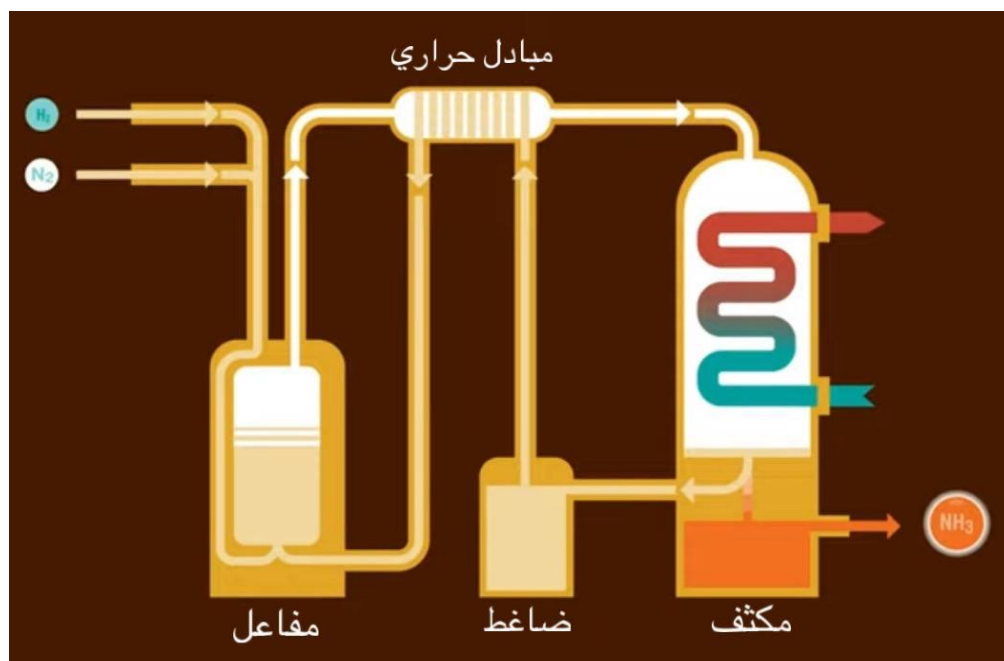


الشكل (6.III): النمو السكاني في الجزائر حسب دراسة سميرة رحموني [24]

### 4.III استخدام الهيدروجين الأخضر في الصناعة :

#### 1. 4.III إنتاج الأمونيا الخضراء :

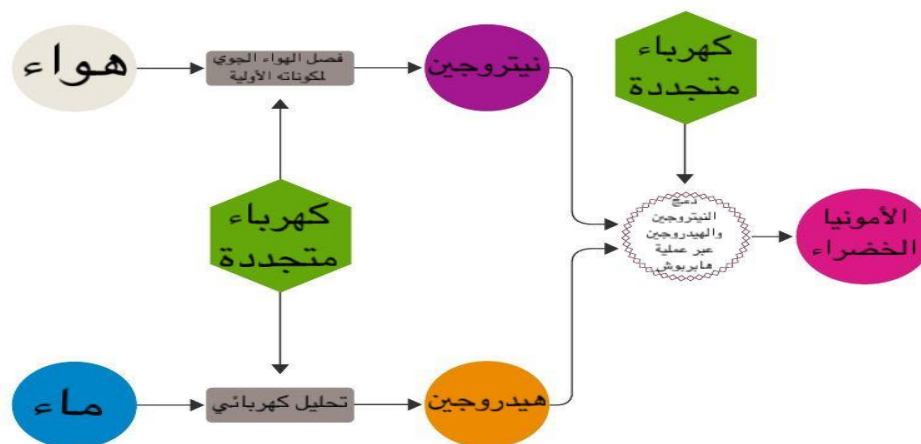
الأمونيا الخضراء غاز نفاذ الرائحة رمزها الكيميائي ( $NH_3$ ) يتم انتاجها باتباع عملية هابر بوش والتي تكون خالية من انبعاثات الكربون وهذا بفضل استخدام الهيدروجين الأخضر والنيتروجين المنفصل عن الهواء [25].



الشكل (7.III): مخطط لعملية إنتاج الأمونيا [26]

#### 2. 4.III طريقة انتاجها :

"تتم عملية إنتاج الأمونيا الخضراء بفصل النيتروجين عن الهواء، حيث يتم ضغط الهواء وتنقيته عن طريق إزالة ثنائي أكسيد الكربون وبخار الماء ثم تبريده وفصله الى أوكسجين ونيتروجين وعناصر أخرى باستخدام عملية "Haber-Booch" للميناء. يمكن دمج النيتروجين مع الهيدروجين الأخضر عند ضغط ودرجات حرارة عالية ومحفز معدني لإنشاء الأمونيا الخضراء [27]



الشكل (8.III): رسم تخطيطي لإنتاج الأمونيا الخضراء بناء على إنتاج الهيدروجين من التحليل

الكهربائي للماء وإزالة الكربون بالكامل من خلال عملية هابر بوش [28]

### III.4.3 استخداماتها :

ان استعمال الهيدروجين الأخضر في عملية انتاج الأمونيا الخضراء أمرا بالغ الأهمية وهذا يعود لبيئة أكثر استدامة واقتصاد منخفض الكربون.

تقدر طاقة الأمونيا للمتر المكعب الواحد ثلاث أضعاف من طاقة الهيدروجين المضغوط، أي أن لها إمكانية هائلة لاستغلالها كحامل طاقة خالي من الكربون ومصدر وقود نظيف لتوليد أنواع الطاقة. وحسب تصريح شركة "يارا" النرويجية لتصنيع الأسمدة النيتروجينية فإن الأمونيا الخضراء تستعمل في إنتاج الأسمدة الخالية من الكربون وإزالة الكربون من الأسمدة الزراعية، وتحتل الأمونيا المركز الثاني كأكثر السلع الكيميائية تصنيفا في العالم، حيث بلغ حجم انتاجها السنوي أكثر من 180 مليون طن ويتم ترويج ما يقرب 20 مليون طن سنويا، تستخدم الأمونيا في معظم الأحيان في الزراعة حيث 80 % يتم انتاجه سماد زراعي و20% للتصنيع. [29]

عند التحدث عن الأمونيا الخضراء كوقود نجد أنها نالت اهتمام كبير وهذا راجع لكونها خالية من

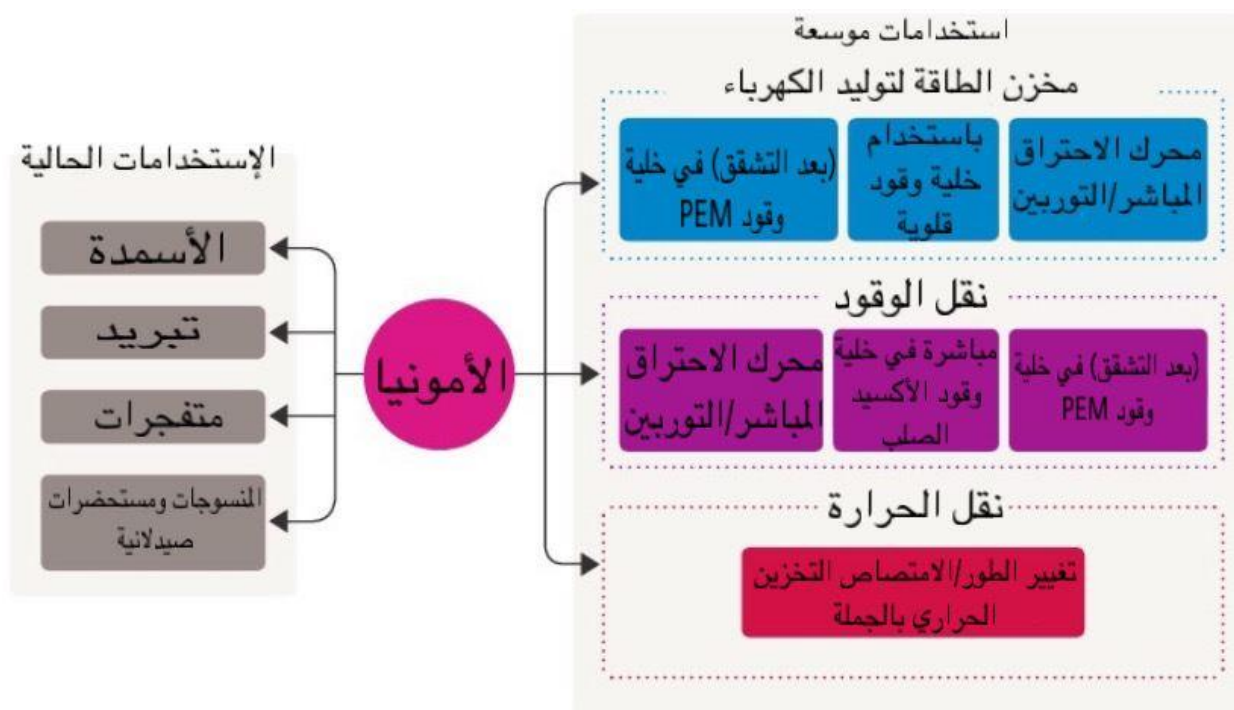
الكربون، أيضا سهولة النقل والتخزين من مزاياها كوقود:

✓ الكثافة العالية للطاقة: كثافتها العالية تجعلها وقودا فعالا لتطبيقات النقل والتخزين.

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

✓ احتراق خال من الكربون: تنتج الأمونيا عند احتراقها بخار الماء وغاز النيتروجين فقط

✓ البنية التحتية الحالية: تتميز الأمونيا ببنية تحتية قوية للإنتاج والتوزيع والتخزين [30]



الشكل (9.III): الاستخدامات الحالية والمستقبلية للأمونيا [31]

### 4.III. 4. تحديات استخدام الأمونيا كوقود:

✓ كفاءة التحويل: عند تحويل الأمونيا مرة أخرى الى طاقة لاستخدام كفاءتها تكون أقل من كفاءة الهيدروجين.

✓ مخاوف تتعلق بالسلامة: نظرا لأن الأمونيا سامة يجب اتخاذ إجراءات صارمة للسلامة قبل استعمالها كوقود.

✓ انبعاث أكاسيد النيتروجين (Nox): عند احتراق الأمونيا صحيح أنه لا ينبعث منه ثاني أكسيد الكربون الا أن هذا الاحتراق ينتج أكسيد النيتروجين مما يؤدي الى تلوث الهواء لذا يجب الاعتماد على تقنيات التحكم في الانبعاثات.

✓ **تكلفة الإنتاج:** ان انتاج الأمونيا الخضراء يتطلب استخدام الكهرباء المتجددة لذا تكون تكلفتها مرتفعة بالنسبة للطرق التقليدية. [32]

### 5.III استخدام الهيدروجين الأخضر في تكرير النفط :

يمثل قطاع تكرير النفط ثاني أكبر فرع استهلاك للهيدروجين، حيث تعدت كمية الطلب عليه خلال سنة 2022 حوالي 41.9 مليون طن. اذ أنه يستخدم في الكثير من العمليات داخل المصافي منها نزع الشوائب من المنتجات النفطية مثل المركبات الكبريتية وذلك في عملية نزع الكبريت بالهدرجة، يستعمل أيضا في تطوير المقطرات الثقيلة لجعلها خفيفة.

حسب تصريح من منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوبك"، أنه في الغالب يتم انتاج الهيدروجين في المصافي مباشرة لاستخدامه في عمليات تكرير النفط، ففي سنة 2022 أنتج نحو 80% من الهيدروجين المستعمل في التكرير داخل المصافي نفسها. [33]

يعد الهيدروجين الرمادي الذي يتم انتاجه من الغاز الطبيعي النوع الأكثر استخداما في عملية تكرير البترول وهذا راجع لعدة ميزات:

✓ **تكاليف الإنتاج المنخفضة:** تكلفته أقل من تكلفة انتاج الهيدروجين الأخضر بسبب توفر الغاز الطبيعي خاصة هنا في الجزائر. قدرت تكلفة الهيدروجين الرمادي العام الماضي من 1 الى 2 دولار للكيلوغرام، اما تكلفة الهيدروجين الأخضر فقدرت من 4 الى 8 دولارات للكيلوغرام.

✓ **استقرار البنية التحتية للهيدروجين الأخضر:** وذلك لتوفر أنظمة التخزين والتوزيع أي أن الشركات لا تحتاج الى مستثمرين.

رغم هذه الميزات للهيدروجين الرمادي الا أنه يخلف انبعاثات عالية من ثاني أكسيد الكربون (ينبعث ما يقارب 10 أطنان من ثاني أكسيد الكربون لكل 1طن من الهيدروجين الرمادي)، وهذا يؤدي الى رفع الضرائب على هذه الشركات مما يضخم التكلفة الكلية للهيدروجين الرمادي.

## الفصل الثالث.....تطبيقات الهيدروجين الأخضر

---

ومع ظهور التأثيرات البيئية وتطور المعايير التنظيمية تلجأ بعض الشركات لاستخدام الهيدروجين الأخضر كبديل للهيدروجين الرمادي بدعم من الحكومات والإعفاءات الضريبية. وللانقال لهذه الاستراتيجيات يمكن تكييف البنية التحتية الموجودة دون الحاجة للتغييرات. [34]

مستقبلاً يمكن للشركات النفطية الاعتماد على الهيدروجين الأخضر إلا أنها ستواجه عقبات تتمثل في تكلفة الإنتاج وهذا يؤدي إلى التقدم بشكل بطيء لبيئة أكثر استدامة.

قائمة مراجع الفصل الثالث:

- [1] Sandra Curtin and Jennifer Gangi . Fuel Cell Technologies Market Report. In Washington، D.C. October 2 2017.p:3
- [2] <http://www.ar.wikibooks.org/wiki/10-10-2017>
- [3] <http://www.ar.wikibooks.org/wiki/10-10-2017>
- [4] سعد الدين خرفان، استخدام الهيدروجين كطاقة بديلة لوقود السيارات، وزارة البحث العلمي، أكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا، الحلقة الدراسية (استخدام الهيدروجين كطاقة بديلة)، القاهرة، 19-21/02/2001
- [5] [http://www.hazemskeek.com/QansA/Fuel\\_cell/Fuel\\_cell.htm](http://www.hazemskeek.com/QansA/Fuel_cell/Fuel_cell.htm)
- [6] علي المراكبي، خلايا الوقود، جهاز تخطيط الطاقة، 1997، ص13
- [7] جديد فالعالم وإمكانية استخدامه كوقود فالجزائر ص 77 أطروحة دكتوراه. طاقة الهيدروجين كبديل طاقي
- [8] علي المراكبي، خلايا الوقود، جهاز تخطيط الطاقة، 1997
- [9] Sandra Curtin and Jennifer Gangi . Fuel Cell Technologies Market Report. in Washington ، D.C. October 2017.p:6
- [10] علي المراكبي، خلايا الوقود، جهاز التخطيط للطاقة 1997 ص32
- [11] ستيفن اشلي، نحو سيارة تعمل بالهيدروجين، مجلة العلوم، المجلد 21، الكويت، 2005، ص22.
- [12] Sandra Curtin and Jennifer Gangi .Fuel Cell Technologies Market Report.in Washington، D.C.October 2017 p:12
- [13] <http://ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/news0818602.aspx>
- [14] <http://www.theguardian.com/travel/2016/feb/02/easyjet-plans-cut-carbon-emissions-hydrogen-fuel-cell-trial>
- [15] <http://www.rclcorporate.com/rcl-announces-two-new-ships-powered-by-lng-and-fuel-cells>
- [16] World Bank. Algeria indicators. <http://data.worldbank.org>
- [17] Rahmouni S، et al. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector. Int J Hydrogen Energy 41. 2016 p2132
- [18] Ouazene Mourad EXPERIENCE ALGERIENNE DANS LA PROMOTION DES CARBURANTS ET VEHICULES PROPRES «workshop sur la Promotion des Carburants Propres; Balaclava ، le république de l'île de Maurice 12 et 13 octobre 2017

Hydrogen as a fuel in the transport sector in Algeria. Int J Hydrogen Energy 39. 2014 ،Boudries  
[19] P1521

Hydrogen as a fuel in the transport sector in Algeria. Int J Hydrogen Energy 39. ،Boudries  
[20]2014.p15219

[21] Sandra Curtin and Jennifer Gangi . Fuel Cell Technologies Market Report . in  
Washington، D.C. October 2017.p17

. [22]Rafika Boudries ;Comparative Economic Competitiveness Assessment of Hydrogen as a  
Fuel in the Transport Sector in Algeria. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL  
42، 2014 .p63

[23]Rahmouni S، et al. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the  
Algerian road transport sector. Int J Hydrogen Energy 41. 2016

[24] Source:Rahmouni S، et al. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in  
the Algerian road transport sector. Int J Hydrogen Energy 41. 2016 p 2135

[25] <http://royalsociety.org/news->

[26] [Hydrogen\\_Report\\_2022.pdf.hydrogen.revolve.media](https://hydrogen.revolve.media)

[27] [https://hydrogen.revolve.media/2022/Hydrogen\\_Report\\_2022.pdf?utm\\_medium](https://hydrogen.revolve.media/2022/Hydrogen_Report_2022.pdf?utm_medium)

[28]<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>

[29] [https://hydrogen.revolve.media/2022/Hydrogen\\_Report\\_2022.pdf?utm\\_medium](https://hydrogen.revolve.media/2022/Hydrogen_Report_2022.pdf?utm_medium)

[30] <https://stargatehydrogen.com/blog/green-ammonia/>

[31] <https://stargatehydrogen.com/blog/green-ammonia/>

[32] <http://attaqa.net/2023/11/09/>

[33] <https://stargatehydrogen-com.translate.goog/blog/grey-hydrogen/>

الفصل الرابع  
التحديات والفرص

### 1.IV. مقدمة:

رغم التقدم الملحوظ في تطوير تقنيات الهيدروجين الأخضر خلال السنوات الأخيرة، إلا أن هذا المجال لا يزال يواجه تحديات تقنية واقتصادية وتنظيمية تعيق تسريعه واعتماده على نطاق واسع. فعلى الرغم من نضج تقنيات التحليل الكهربائي نسبياً، إلا أن الكفاءة والتكلفة لا تزالان تشكلان عائقاً كبيراً أمام تنافسية الهيدروجين مقارنة بالوقود الأحفوري [1]. كما أن تكاليف الإنتاج المرتفعة، والحاجة إلى مواد أولية نادرة، فضلاً عن محدودية البنية التحتية المخصصة للتخزين والنقل، كلها عوامل تؤثر سلباً على الجدوى الاقتصادية للمشاريع المتعلقة بالهيدروجين الأخضر [2][3]

إلى جانب هذه التحديات، تفتقر العديد من الدول إلى أطر تنظيمية واضحة ومستقرة تدعم إنتاج وتوزيع واستخدام الهيدروجين، مما يخلق بيئة غير مواتية لجذب الاستثمارات [4]. ومع ذلك، تبرز في المقابل فرص واعدة يمكن أن تعزز من مكانة الهيدروجين الأخضر كمصدر طاقة مستدام، خاصة في ظل الحاجة العالمية إلى خفض الانبعاثات وتحقيق أهداف الحياد الكربوني، لا سيما في القطاعات التي يصعب فيها إزالة الكربون مثل الصناعات الثقيلة والنقل البحري والجوي [5]

علاوة على ذلك، فإن قدرة الهيدروجين على التكامل مع مصادر الطاقة المتجددة من خلال تخزين فائض الكهرباء، تفتح المجال أمام استخدامه كوسيط لتثبيت أنظمة الطاقة المنقطعة [6]. كما أنه يشكل فرصة استراتيجية لتحقيق التنمية الاقتصادية وخلق فرص عمل جديدة، بالإضافة إلى دوره المحتمل في إعادة تشكيل العلاقات الاقتصادية والسياسية بين الدول من خلال التجارة الطاقوية الجديدة القائمة على الهيدروجين النظيف [7][8]

بناءً على ما سبق، يهدف هذا الفصل إلى تحليل التحديات الرئيسية التي تعترض طريق تطوير اقتصاد الهيدروجين الأخضر، واستكشاف الفرص المتاحة لتعزيز دوره في التحول الطاقوي العالمي، مع تقديم توصيات استراتيجية لدعم هذا التوجه في السياقين المحلي والدولي.

## 2.IV.التحديات المرتبطة بالهيدروجين الأخضر:

✓ ارتفاع تكاليف الإنتاج: يُعد إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام التحليل الكهربائي مكلفًا مقارنة بالهيدروجين الرمادي أو الأزرق، نتيجة ارتفاع تكلفة الكهرباء من مصادر متجددة والبنية التحتية المطلوبة [1].

✓ قلة البنية التحتية للنقل والتوزيع: تواجه مشاريع الهيدروجين الأخضر صعوبة في الوصول إلى الأسواق بسبب نقص في البنية التحتية مثل خطوط الأنابيب وخزانات التخزين والنقل البحري [2].

✓ فجوة في السياسات والتنظيم: لا تزال العديد من الدول تفتقر إلى أطر تنظيمية وتشريعية واضحة لتنظيم إنتاج ونقل وتجارة الهيدروجين الأخضر، ما يعرقل جذب الاستثمارات [3].

✓ تحديات تقنية في التخزين: تتطلب تقنيات تخزين الهيدروجين، سواء في صورته الغازية أو السائلة أو باستخدام المركبات الحاملة، تطويرًا مستمرًا لضمان الكفاءة والسلامة بتكاليف منخفضة [2].

✓ عدم نضج الأسواق: يواجه الهيدروجين الأخضر منافسة قوية من مصادر الطاقة التقليدية والمتجددة الأرخص، مما يُصعب تحقيق جدوى تجارية مستقلة في المدى القصير [4].

✓ صعوبات في التكامل مع شبكات الطاقة: يحتاج الهيدروجين الأخضر إلى تكامل فعال مع أنظمة الطاقة القائمة، مثل الربط مع شبكات الكهرباء أو الغاز، وهو أمر معقد من الناحية التقنية والتنظيمية [5].

✓ تحديات في الموارد المائية: يعتمد التحليل الكهربائي على الماء كمصدر للهيدروجين، ما يثير مخاوف في المناطق التي تعاني من شح المياه، خاصة في المناطق الصحراوية [1].

✓ عدم وضوح آليات الدعم الحكومي: يفتقر العديد من المشاريع إلى خطط دعم حكومية مستقرة وواضحة، مما يحد من قدرتها على الاستمرار والتوسع [3].

## الفصل الرابع.....التحديات والفرص

✓ صعوبات لوجستية في التصدير: تصدير الهيدروجين الأخضر يتطلب بنية تحتية متطورة في الموانئ، وسفن متخصصة للنقل، وهو ما لا يتوفر حالياً إلا في عدد محدود من الدول [2].

✓ مخاوف تتعلق بالسلامة: يُعد الهيدروجين مادة شديدة الاشتعال، مما يستدعي توفير معايير سلامة صارمة وتقنيات متطورة أثناء التخزين والنقل والاستخدام [6].

### 3.IV. الفرص الواعدة للهيدروجين الأخضر:

✓ توافر إمكانات ضخمة لإنتاج الطاقات المتجددة: تمتلك الدول ذات الإشعاع الشمسي المرتفع والرياح القوية، مثل الجزائر، فرصاً كبيرة لإنتاج كهرباء منخفضة التكلفة من مصادر متجددة تستخدم في التحليل الكهربائي [7]

✓ الطلب المتزايد عالمياً: يتوقع أن يتضاعف الطلب على الهيدروجين الأخضر خلال العقود القادمة خاصة في قطاعات الصناعة الثقيلة والنقل والشحن [8]

✓ تحقيق الحياد الكربوني: يمثل الهيدروجين الأخضر وسيلة أساسية لتحقيق أهداف المناخ والحياد الكربوني، مما يجعله محوراً لخطط الانتقال الطاقي في دول كثيرة [7]

✓ فرص للتصدير وجذب الاستثمارات: تستطيع الدول ذات القدرات الشمسية والريحية الكبيرة أن تصبح مراكز لتصدير الهيدروجين نحو أوروبا وآسيا، ما يجذب استثمارات أجنبية ضخمة [9]

✓ دعم المؤسسات الدولية: توفر منظمات مثل IRENA والاتحاد الأوروبي برامج تمويل وخطط دعم فني لتطوير مشاريع الهيدروجين الأخضر في الدول النامية [7]

✓ التطور التكنولوجي السريع: تشهد تقنيات التحليل الكهربائي وتخزين الهيدروجين تطوراً كبيراً مما يؤدي إلى انخفاض تدريجي في التكاليف وزيادة الكفاءة [10]

✓ خلق فرص عمل جديدة: سيشهد التحول نحو الهيدروجين الأخضر في توليد آلاف الوظائف في مجالات التصنيع، البنية التحتية، البحث والتطوير [11]

## الفصل الرابع.....التحديات والفرص

✓ إمكانية التكامل مع مشاريع تحلية المياه :يمكن دمج مشاريع التحليل الكهربائي مع محطات تحلية مياه

البحر، ما يضمن الأمن المائي ويزيد من كفاءة الموارد [12]

✓ تحسين أمن الطاقة :الاعتماد على إنتاج محلي للهيدروجين الأخضر يقلل من التبعية لمصادر الطاقة

المستوردة ويعزز الاستقلال الطاقوي [13]

✓ إمكانية إعادة استخدام البنية التحتية الحالية :يمكن تكييف بعض خطوط الغاز الطبيعي والموائئ لنتناسب

مع نقل الهيدروجين أو مشتقاته، مما يقلل من تكاليف الاستثمار [14]

### 4.IV. التوصيات الاستراتيجية:

✓ إعداد استراتيجية وطنية شاملة للهيدروجين الأخضر تتضمن أهدافاً واضحة، وجدولاً زمنياً، وآليات تنفيذ

بالتعاون مع الشركاء الدوليين [7]

✓ تحفيز البحث والتطوير من خلال دعم الجامعات ومراكز البحث الوطني لتطوير تقنيات محلية فعالة

ومخفضة التكلفة [11]

✓ تعزيز الشراكات الدولية مع الدول الصناعية والمؤسسات المالية لتوفير تمويل مستدام ونقل التكنولوجيا

[9]

✓ تطوير البنية التحتية بما في ذلك خطوط الأنابيب، محطات التخزين، ومرافق التصدير بما يتوافق مع

المعايير الدولية [2]

✓ توفير حوافز مالية وضريبية لجذب الاستثمارات الأجنبية والمحلية نحو مشاريع الهيدروجين [3]

✓ إدماج الهيدروجين في خطط الطاقة الوطنية كمصدر مكمل وليس بديلاً، لضمان التوازن بين الأمان

الطاقوي والتنمية المستدامة [5]

✓ إطلاق برامج تكوين وبناء قدرات لتأهيل اليد العاملة في قطاع الهيدروجين، خاصة المهندسين والتقنيين

[11]

## الفصل الرابع.....التحديات والفرص

✓ وضع إطار تنظيمي مرن يراعي التغيرات السريعة في السوق العالمية ويضمن حماية المستثمرين والمستهلكين [3]

✓ إدماج الاعتبارات البيئية في جميع مراحل سلسلة القيمة، من الإنتاج إلى الاستخدام لضمان استدامة المنظومة [1]

✓ العمل على تصدير مشتقات الهيدروجين مثل الأمونيا أو الميثانول لتسهيل النقل وخفض التكاليف وتعزيز التنافسية [14]

يُمثل الهيدروجين الأخضر خيارًا استراتيجيًا جوهريًا ضمن مسارات الانتقال الطاقوي العالمي، إلا أن تفعيل إمكاناته الكاملة يظل مرهونًا بتجاوز حزمة من التحديات التقنية والمؤسسية والاقتصادية التي تتطلب استثمارات موجّهة، وتنسيقًا دوليًا فعالاً، وسياسات طويلة المدى قائمة على الاستشراف والابتكار. وفي هذا السياق، تمتلك الجزائر - بفضل موقعها الجغرافي الاستراتيجي ووفرة مصادر الطاقة المتجددة من شمس ورياح - مقومات واعدة تؤهلها للعب دور محوري كمرکز إقليمي لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر، وهو ما يستدعي بلورة رؤية وطنية متكاملة تُسرّع من تفعيل هذا التوجه وتحوّله إلى رافعة تنموية ذات بعد استراتيجي.

قائمة مراجع الفصل الرابع:

- [1] مجلس الهيدروجين (2020) الطريق نحو تنافسية الهيدروجين: منظور تكلفة.
- [2] هيدروجين أوروبا (2021) نظرة عامة على لوجستيات وتخزين الهيدروجين.
- [3] الوكالة الدولية للطاقة المتجددة. (IRENA) (2024) إستراتيجية الهيدروجين الأخضر: دليل للتصميم.
- [4] الوكالة الدولية للطاقة. (IEA) (2021) التقرير العالمي للهيدروجين.
- [5] البنك الدولي (2023) الأطر التنظيمية لتطوير الهيدروجين النظيف.
- [6] وزارة الطاقة الأمريكية (2022) إرشادات لجنة سلامة الهيدروجين.
- [7] الوكالة الدولية للطاقة المتجددة. (IRENA) (2022) الجغرافيا السياسية لتحول الطاقة: عامل الهيدروجين.
- [8] الوكالة الدولية للطاقة. (IEA) (2023) مستقبل الهيدروجين.
- [9] المفوضية الأوروبية (2020) إستراتيجية الهيدروجين من أجل أوروبا محايدة مناخياً.
- [10] معهد فراونهوفر (2022) حالة تقنيات التحليل الكهربائي.
- [11] المنتدى الاقتصادي العالمي (2022) آفاق القوى العاملة في مجال الهيدروجين النظيف.
- [12] ديزررت إنرجي. (2021) Dii الكهرباء إلى وقود (Power-to-X) في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا.
- [13] لجنة تحولات الطاقة (2022) إستراتيجية الكهرباء النظيفة.
- [14] هيدروجين أوروبا (2023) البنية التحتية للهيدروجين والنقل.

## الفصل الخامس

دراسات حول انتاج الهيدروجين الأخضر

## VI. الدراسات السابقة

### 1.VI دراسة إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الشمسية وتحليل الماء كهربائياً - دراسة

تجريبية في مدينة ورقلة [1]

#### 1.1.VI الهدف من التجربة:

تهدف الدراسة إلى استغلال ظاهرة المياه الصاعدة (المياه الفائضة) في منطقة ورقلة كمصدر لتحليل الماء كهربائياً وإنتاج الهيدروجين، وذلك بالاعتماد على الطاقة الشمسية كوسيلة نظيفة ومتجددة. تسعى التجربة إلى تقديم حل لمشكلة بيئية محلية ناتجة عن المياه الصاعدة، وفي الوقت ذاته إنتاج وقود نظيف ومستدام.

#### 2.1.VI الأدوات والمواد المستخدمة:

##### • أجهزة وألواح كهروضمسية: (Photovoltaic Panels)

وحدة SM50 بقدرة 50 واط.

مصدر أساسي للطاقة في النظام.

##### • محلل كهربائي للماء: (Electrolyzer)

نوعان تم استعمالهما:

جهاز هوفمان. (Voltameter de Hofmann)

محلل كهربائي من نوع PH441

##### • محلول كهربائي:

محلول مائي بهيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) بتركيزات مختلفة كمادة إلكتروليتيية.

##### • أجهزة قياس:

جهاز قياس متعدد الوظائف.(Multimeter)

أجهزة قياس الجهد (Voltmeter) وشدة التيار.(Ammeter)

• عناصر مساعدة:

لوح تغذية كهربائية رئيسي.

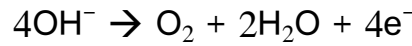
أنابيب لتجميع الغاز.

كؤوس قياس للهيدروجين المنتج.

**3.1.VI مبدأ العمل:**

1. تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية عبر الألواح الكهروضوئية.
2. استخدام التيار الكهربائي الناتج لتحليل الماء كهربائياً في المحلل.
3. تفكك جزيئات الماء إلى هيدروجين وأكسجين وفق التفاعلات التالية:

عند المهبط:(Cathode)



**4.1.VI النتائج المتحصل عليها:**

تم رصد علاقة طردية بين شدة التيار الكهربائي وحجم الهيدروجين الناتج.

أقصى حجم للهيدروجين المنتج تم الحصول عليه عند:

ربط الألواح الشمسية بالتسلسل: زاد حجم الهيدروجين بنسبة ملحوظة.

تركيز معين لـ KOH أعطى نتائج أفضل من غيره.

نوع المحلل الكهربائي أثر أيضاً على الكفاءة:

جهاز PH441 أظهر تحسناً في حجم الإنتاج مقارنة بجهاز هوفمان.

## 2.VI دراسة حول إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية (جامعة الوادي) [2]

### 1.2.VI الهدف من الدراسة:

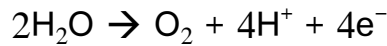
تهدف الدراسة إلى إنتاج غاز الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية كوسيلة نظيفة ومتجددة، عبر تقنية التحليل الكهربائي للماء باستخدام غشاء تبادل البروتون (PEM) ، وتقييم أداء النظام من حيث كفاءة اللوح الشمسي، المحلل الكهربائي، وخلية الوقود.

### 2.2.VI مبدأ العمل:

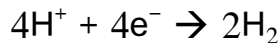
تعتمد التجربة على تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية عبر الألواح الشمسية، ثم استخدام هذه الطاقة لتشغيل محلل كهربائي يفصل الماء إلى هيدروجين وأوكسجين. يُجمع الهيدروجين ويُستعمل لاحقًا كوقود في خلية وقود لتوليد الكهرباء من جديد.

العملية تتم على الشكل التالي:

في الأنود:



في الكاثود:



### 3.2.VI الأدوات والمواد المستعملة:

- لوح شمسي – (Photovoltaic Panel) لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء.
- محلل كهربائي بتقنية – PEM لتحليل الماء إلى هيدروجين وأوكسجين.
- غشاء – Nafion كإلكتروليت في خلية. PEM.
- أقطاب من البلاتين المتقرب – لتسهيل التفاعل.
- خلية وقود – لإعادة تحويل الهيدروجين إلى كهرباء.

## الفصل الخامس.....دراسات حول إنتاج الهيدروجين الأخضر

- أجهزة قياس: لوكس متر (لقياس شدة الإضاءة)، مقياس جهد، مقياس تيار، مقياس تدفق الغاز، وأجهزة تسجيل البيانات.
- أنابيب بلاستيكية، مقاومات، حمولة كهربائية، وحدة تحكم إلكتروني.

### 4.2.VI النتائج المتحصل عليها:

أداء اللوح الشمسي:

أظهر زيادة في التيار والجهد مع زيادة شدة الإشعاع الشمسي.

الجهد الناتج بلغ حتى 19.5 فولت في بعض الحالات، مما يكفي لتشغيل المحلل.

أداء المحلل الكهربائي:

زاد حجم غاز الهيدروجين المنتج بزيادة مدة التشغيل.

تدفق الغاز تأثر بشدة بالإضاءة المسلطة على اللوح الشمسي.

العلاقة بين كمية الغاز وشدة الإضاءة كانت شبه خطية.

أداء خلية الوقود:

عند استخدام الغاز المنتج من التحليل الكهربائي، تم توليد جهد وتيار جيدين.

الجهد والتيار الناتجين تأثرا بحمولة الدارة (المقاومة)

الكفاءة الكلية للنظام:

كفاءة اللوح الشمسي والمحلل كانت مرضية مقارنة بالأنظمة المخبرية.

أثبتت الدراسة إمكانية بناء منظومة محلية لإنتاج الهيدروجين وتخزينه ثم استخدامه في توليد الطاقة.

### 3.VI دراسة حول إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية [3]

1.3.VI الهدف من الدراسة:

## الفصل الخامس.....دراسات حول إنتاج الهيدروجين الأخضر

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي للماء باستخدام الطاقة الشمسية في منطقة الوادي بالجزائر، باعتبارها منطقة ذات إشعاع شمسي مرتفع. الغرض من ذلك هو إيجاد مصدر طاقتي نظيف ومستدام يمكنه تعويض بعض المصادر الطاقوية التقليدية مثل الوقود الأحفوري.

### 2.3.VI المواد والأدوات المستعملة:

اللوحة الشمسية: نوع TE500P بقدرة 55 واط، يتكون من 36 خلية مرتبة في 9 صفوف.  
المحلل الكهربائي: مكون من حوض تحليل بلاستيكي، أقطاب من الألمنيوم، أسطوانتين للغاز، وأنابيب اختبار.

المحلول المستخدم: ماء مقطر مذاب فيه 10 غ من ملح الطعام.

أجهزة القياس: أجهزة لقياس الجهد، شدة التيار، درجة الحرارة، وتدفق الغاز الناتج.

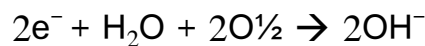
### 3.3.VI مبدأ العمل:

يُحوّل اللوح الشمسي الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية تُستخدم في عملية التحليل الكهربائي للماء المالح داخل المحلل الكهربائي. يتم فصل الماء إلى هيدروجين عند القطب السالب وأوكسجين عند القطب الموجب وفق المعادلتين:

عند القطب السالب :



عند القطب الموجب:



التيار الكهربائي الناتج من اللوح يحفز هذه التفاعلات الكيميائية، ويزداد إنتاج الهيدروجين كلما ارتفعت شدة الإشعاع الشمسي.

### 4.3.VI النتائج المتحصل عليها:

معدل إنتاج الهيدروجين في يوم مشمس قُدر بحوالي 0.5 مل/ثانية.  
لوحظت علاقة طردية بين كمية الإشعاع الشمسي وكفاءة إنتاج الهيدروجين.  
كانت ذروة الإنتاج عند منتصف النهار، حيث يكون الإشعاع في أقصى درجاته.  
زادت مردودية النظام الشمسي والمحلل الكهربائي مع ارتفاع درجة الحرارة وشدة الإشعاع.  
النتائج أظهرت أن النظام قادر على إنتاج الهيدروجين بكفاءة مرضية باستخدام مصدر طاقة نظيف، مما  
يثبت جدوى هذه التقنية في المناطق المشمسة.

### 4.VI دراسة مواد الكاثود الضوئي المعتمدة على الكربون لإنتاج الهيدروجين باستخدام

#### الطاقة الشمسية [4]

#### 1.4.VI الهدف:

تقييم إمكانات المواد الكربونية مثل الجرافين والبلاستيك العضوي كبديل رخيصة وقابلة للتطوير للمصابيح  
الضوئية في خلايا التحليل الضوئي للماء لإنتاج الهيدروجين .

#### 2.4.VI مبدأ العمل:

تعتمد الخلايا الكهروضوئية (PEC) على شبه موصل يمتص ضوء الشمس، يولد أزواج شحن-Hall  
Electron، ويتفاعل كهربائياً مع الماء لإطلاق الهيدروجين (HER) من الفوتوكاثود والأكسجين  
(OER) من الفوتوأنود. تُركب طبقات اختيارية للشحنات وطبقات واقية لتعزيز الكفاءة والمتانة .

#### 3.4.VI الأدوات والمواد:

مواد شبه موصلة كربونية (جرافين، مركبات عضوية)

طبقات إجراء شحني/وقائية (مثل MoOx، NiOx، PEDOT: PSS) بنية جانبية مثل P3HT: PCBM

منظومة FTO/Pt كقطب معاكس.

تقنيات تحضير الأفلام الرقيقة (حل-معالجة، ALD، الصبّ اللوني ).

#### 4.4.VI النتائج:

أُظهر أن الخلايا القائمة على P3HT: PCBM يمكن أن تولّد كثافة تيار فوتوكهربي تُنافس الخلايا الشمسية.

أطلقت مخرجات تحسناً ملحوظاً عند استخدام طبقات نقل الشحن المثلى.

تمت معالجة القضايا التي تتعلق بالاستقرار والتوسيع الإنتاجي.

#### 5.VI دراسة جهاز ضوئي كهرومائي أحادي البنية لتحقيق تحليل مباشر للماء بكفاءة

[5]19%

#### 1.5.VI الهدف:

تحقيق خلية متكاملة (monolithic) لتحليل الماء ضوئياً بكفاءة شمسية-لهيدروجين  $\leq 19\%$ ، دون

الحاجة لنظام خارجي منفصل .

#### 2.5.VI مبدأ العمل:

استُخدم هيكل خلية شمسية مزدوجة (tandem junction) مغطاة بطبقة حماية  $TiO_2$  وطبقة محفّز

Rh النانوي لتقليل الانعكاسية وامتصاص الضوء غير المرغوب فيه، وزيادة توافق الحزم الإلكترونية

لإنتاج الهيدروجين .

#### 3.5.VI الأدوات والمواد:

• خلية مزدوجة (tandem) ضوئية.

• طبقة واقية  $TiO_2$ .

- نانو جزيئات Rh كمحفّز في الفوتوكاثود.
- بيئة تحليل ضوئي في وسط حمضي ومحايد، ومحاكاة ضوء شمسي موحد .

#### VI.4.5 النتائج:

كفاءة التحويل الشمسي إلى هيدروجين بلغت 19.3% في وسط حمضي و18.5% في ظل درجة الحموضة المتعادلة .

التصميم الموحد يقلل من الفاقد الضوئي، ويحسن ثبات وأداء الخلية.

#### VI.6 دراسة انتاج الهيدروجين الأخضر كمصدر للطاقة في منطقة ورقلة.

##### VI.6.1 الهدف من الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة ومحاكاة تجربة لإنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الشمسية في منطقة ورقلة.

وذلك عن طريق التحليل الكهربائي للماء باستخدام لوح شمسي، ومن ثم حساب كمية الهيدروجين المنتجة خلال ساعات اليوم، في كل من يوم شتوي وصيفي، وتحليل مردودية النظام وإمكانية تخزين الغاز الناتج.

##### VI.6.2 المواد والأدوات المستعملة:

تم استخدام لوح شمسي كهروضوئي كمصدر طاقة متجدد لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. كما استعمل محلل كهربائي لفصل الماء إلى عنصريه الأساسيين (الهيدروجين والأكسجين)، بالإضافة إلى أجهزة قياس مثل الفولتميتر والأميتر والواطمتر لمتابعة الجهد والتيار والاستطاعة الكهربائية. تم تخصيص خزان لجمع وتخزين الهيدروجين الناتج. كما استخدمت برامج حاسوبية لحساب الكميات المنتجة وتحليل مردودية النظام.

##### VI.6.3 مبدأ العمل:

## الفصل الخامس.....دراسات حول انتاج الهيدروجين الأخضر

يعتمد النظام على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية عبر اللوح الكهروضوئي، والتي تُستخدم مباشرة لتغذية محلل كهربائي مملوء بالماء.

تقوم هذه الطاقة بفصل جزيئات الماء إلى غاز الهيدروجين (عند المهبط) وغاز الأوكسجين (عند المصعد)

يتم تخزين الهيدروجين المنتج في خزان مخصص، ويمكن استخدامه لاحقًا كوقود نظيف.

### 4. 6.VI النتائج المتحصل عليها:

في اليوم الشتوي: كانت كمية الهيدروجين المنتجة أقل بسبب انخفاض شدة الإشعاع الشمسي.

في اليوم الصيفي: زادت الكمية المنتجة بفضل الارتفاع في ساعات الإشعاع وكثافته.

تم ربط مردودية الإنتاج بعدة عوامل منها:

شدة الإشعاع الشمسي.

كفاءة اللوح الشمسي.

خصائص المحلل الكهربائي.

أظهرت النتائج أن النظام قادر على إنتاج الهيدروجين بمردودية مقبولة، ويمكن تطويره ليكون نظامًا مستدامًا في مناطق الجنوب الجزائري.

### 7.VI التحليل والاستنتاجات:

• جميع الدراسات تؤكد على أن الهيدروجين الأخضر ممكن فعلاً بالاعتماد على الطاقة الشمسية.

• العلاقة بين شدة الإشعاع الشمسي والإنتاج كانت واضحة في كل الأنظمة.

• التجارب المخبرية (دراسات الوادي) أثبتت إمكانيات التطبيق العملي على نطاق مصغر.

## الفصل الخامس.....دراسات حول انتاج الهيدروجين الأخضر

الدراسة (5+4)	الدراسة (6+3+2+1)	الدراسة
تطوير الكفاءة	اثبات جدوى التطبيق العملي	الهدف
منخفضة - عالية ( 6 - 19 )%	متوسطة~10%	الكفاءة
ضعيف الى مستقر	جيد الى متوسط	الاستقرار
مرتفعة	منخفضة	التكلفة
محدودة حالية	عالية محليا	قابلية التعميم

جدول (1.VI): يمثل التحليل المقارن للدراسات

### 8.VI استنتاجات نهائية:

- PEM Electrolysis المدعوم بالطاقة الشمسية يُعتبر اليوم الأكثر توازناً بين الكفاءة، التكلفة، والعملية.
- PEC يمثل المستقبل طويل المدى لإنتاج الهيدروجين مباشرة من الشمس، لكن يحتاج تطوير في المواد والأنظمة.
- الأنظمة الحرارية-الشمسية مثل PET و Thermochemical قوية في الأداء لكنها غير مناسبة إلا للمشاريع الصناعية الكبرى.
- التجارب الجزائرية (الوادي) تُظهر إمكانات ممتازة للاستقلال الطاقوي المحلي بتقنيات بسيطة.
- الكفاءة وحدها لا تكفي: يجب النظر دائماً إلى التكامل مع التخزين، التوزيع، والسلامة.

المراجع:

- [1] <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/24064>
- [2] يوسف، مهاجر سبوعي ياسين. (2017). دراسة الهيدروجين الشمسي لولاية الوادي ، جامعة الوادي، الجزائر  
<https://dspace.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/b2d26501-0d9c-4325-9ab2-70d16697356b/content>
- [3] <https://dspace.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/23e87148-619a-473f-b759-44cf8920bc57/content>
- [4] <https://arxiv.org/pdf/1903.08959>
- [5] <https://arxiv.org/pdf/1706.01493>
- [6] <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/36149>

الخاتمة

## الخاتمة:

في ظل التحولات الجذرية التي يشهدها قطاع الطاقة العالمي، يبرز الهيدروجين الأخضر كخيار تكنولوجي استراتيجي لتحقيق الأهداف المناخية والانتقال إلى منظومة طاقة مستدامة. فبفضل إمكانية إنتاجه من مصادر متجددة، وانعدام انبعاثاته الكربونية أثناء الاستعمال، يمثل هذا المورد الطاقوي إحدى الركائز الأساسية نحو اقتصاد منخفض الكربون وأكثر مرونة وسيادة طاقوية. وقد تناول هذا البحث، من خلال مقارنة شاملة ومتكاملة، مختلف جوانب سلسلة قيمة الهيدروجين الأخضر، انطلاقاً من تقنيات الإنتاج، مروراً بوسائل التخزين والنقل، ووصولاً إلى التطبيقات النهائية في قطاعات الطاقة والنقل والصناعة.

أظهرت الدراسة أن التحليل الكهربائي باستخدام مصادر متجددة، ورغم كونه الخيار الأوفر استدامة، لا يزال يعاني من تحديات تقنية واقتصادية، من أبرزها ارتفاع التكاليف وانخفاض الكفاءة التشغيلية، إلى جانب الاعتماد الكبير على معادن نادرة باهظة التكلفة، خاصة في تقنيات مثل PEM. كما أن تخزين الهيدروجين، سواء في الحالة الغازية أو السائلة أو باستخدام الهيدريدات المعدنية، يطرح صعوبات متعلقة بالأمان وتعقيد البنية التحتية المطلوبة. أما على صعيد النقل، فإن محدودية الجاهزية التكنولوجية والجدوى الاقتصادية لأنظمة الأنابيب والشاحنات والسفن تجعل من تطوير حلول لوجستية أكثر كفاءة أمراً ملحاً.

فيما يخص التطبيقات، أظهرت النتائج قدرة الهيدروجين الأخضر على لعب دور محوري في إزالة الكربون من الصناعات الثقيلة والنقل الطويل المدى، فضلاً عن إمكاناته في إنتاج الكهرباء والوقود الاصطناعي. ومع ذلك، فإن تحقيق هذا الدور يتطلب بيئة تنظيمية داعمة، وتمويلاً مخصصاً، وشراكات متكاملة بين القطاعين العام والخاص، بالإضافة إلى تطوير المهارات المحلية.

وفي السياق الجزائري، برزت الإمكانيات الطبيعية الكبيرة لإنتاج الهيدروجين الأخضر، خاصة من خلال وفرة الإشعاع الشمسي وطاقة الرياح، واتساع المساحات غير المستغلة، فضلاً عن توفر شبكة نقل غاز قابلة للتكيف. إلا أن الاستفادة الفعلية من هذه الإمكانيات تستوجب تجاوز تحديات البنية التحتية،

والفجوة التكنولوجية، والنقص في الأطر التنظيمية والمؤسسية. ومن هذا المنطلق، اقترح البحث بروتوكولاً وطنياً متكاملًا لإنتاج الهيدروجين الأخضر، يركز على مزيج من الطاقة الشمسية والرياح، مع اعتماد تقنيات ملائمة من حيث التكلفة والمرونة، وتكييف سلاسل القيمة بما يتناسب مع الواقع المحلي.

وقد خلصت الدراسة إلى عدد من **النتائج المحورية**، من أبرزها:

✓ أهمية الهيدروجين الأخضر في دعم الانتقال الطاقوي وخفض الانبعاثات، خصوصًا في القطاعات الصناعية والنقل.

✓ استمرار تحديات الكفاءة والتكلفة في تقنيات التحليل الكهربائي.

✓ ضرورة ضخ استثمارات ضخمة في البنية التحتية للنقل والتخزين لتلبية متطلبات السلامة والكفاءة.

✓ توفر الجزائر على مؤهلات طبيعية استثنائية تؤهلها لتكون فاعلاً محورياً في السوق الأوروبية للهيدروجين، شريطة تفعيل الأطر القانونية والمؤسسية المناسبة.

✓ استمرار الاعتماد على التكنولوجيا المستوردة، مما يبرز الحاجة إلى تعزيز القدرات المحلية وتطوير الصناعة الوطنية.

✓ الحاجة إلى ربط مشاريع الهيدروجين بالتنمية الاقتصادية والاجتماعية، خاصة في المناطق الداخلية، من خلال خلق فرص عمل وتنشيط النسيج الإنتاجي المحلي.

وبناءً على ما سبق، قدم البحث **جملة من التوصيات الاستراتيجية** لتطوير صناعة الهيدروجين الأخضر في الجزائر، من بينها:

✓ تبني إطار قانوني وتنظيمي محفّز، مع تحديد المعايير التقنية والبيئية وتسهيل إجراءات الاستثمار.

✓ دعم البحث العلمي والابتكار، وإنشاء مراكز متخصصة في تقنيات الهيدروجين.

✓ الاستثمار في البنية التحتية الطاقوية والهيدروجينية المتكاملة، وربطها بشبكات ذكية مرنة.

✓ تطوير الكفاءات البشرية من خلال إدماج تخصصات جديدة في التعليم العالي وتكوين مستمر للمهندسين والتقنيين.

✓ تشجيع التصنيع المحلي لمكونات سلسلة الهيدروجين، وتقليل الاعتماد على الواردات.

✓ تنويع الاستخدامات التطبيقية للهيدروجين، لتشمل الصناعات الثقيلة، إنتاج الأسمدة، والنقل البحري والجوي.

✓ إطلاق صندوق وطني لتمويل مشاريع الهيدروجين، وتفعيل أدوات تمويل مبتكرة مثل السندات الخضراء والقروض التفضيلية.

✓ تعزيز التعاون الإقليمي والدولي، خاصة مع دول الجنوب ذات الخبرة والدول الأوروبية الراغبة في الاستيراد.

وفي ضوء الإمكانيات المتوفرة في الجزائر من موارد طبيعية وبنية تحتية أولية، يُقترح بروتوكول وطني متكامل ومرحلي لتطوير سلسلة قيمة الهيدروجين الأخضر. يبدأ هذا البروتوكول بتقييم الموارد الطبيعية، لا سيما توفر الإشعاع الشمسي العالي في المناطق الجنوبية ووفرة المياه قليلة الملوحة المناسبة للتحليل الكهربائي بعد التحلية. يُستكمل ذلك باختيار تقنيات التحليل الكهربائي الأنسب، حيث يُوصى باستخدام التكنولوجيا القلوية للمشاريع الكبيرة، وتقنية PEM للمشاريع المتوسطة ذات الطابع المحلي، مع تشغيلها اعتمادًا على مصادر الطاقة الشمسية والرياح. يشمل البروتوكول أيضًا مراحل الإنتاج والمعالجة، من خلال تشغيل وحدات التحليل في أوقات ذروة الإنتاج الطاقوي، وتخزين الهيدروجين بشكل مضغوط أو مسال حسب طبيعة الاستخدام، مع ضمان تنقيته لتحقيق درجة نقاء صناعي عالية. أما في جانب التوزيع والاستخدام، فيُقترح توجيه الإنتاج لتغطية احتياجات الصناعة والنقل، وتخصيص جزء منه لتحويله إلى أمونيا خضراء قابلة للتصدير، مع دراسة إمكانية استخدام شبكة الغاز الحالية لنقل الهيدروجين أو مزجه مع الغاز الطبيعي. وأخيرًا، يدعو البروتوكول إلى إنشاء هيئة وطنية للهيدروجين تتولى الإشراف على السياسات

والتتظيم، إلى جانب توفير حوافز مالية وضريبية لتشجيع مشاركة القطاع الخاص وتسهيل الاستثمارات المحلية والأجنبية في هذا المجال الواعد.

وفي الختام، يؤكد هذا البحث أن تطوير صناعة الهيدروجين الأخضر في الجزائر يتطلب مقاربة شاملة ومتعددة الأبعاد، تُراعي التحديات التقنية، الاقتصادية، والمؤسسية، وتستند إلى الابتكار، وبناء الشراكات، وتوظيف الإمكانيات المحلية. إن التحول نحو اقتصاد هيدروجيني لا يمثل مجرد حل بيئي، بل فرصة استراتيجية لبناء نموذج تنموي جديد، أكثر عدلاً واستدامة وسيادة. ويفتح هذا العمل الباب أمام دراسات مستقبلية معمقة لتقييم الجدوى طويلة الأمد، واستكشاف النماذج الاقتصادية والتمويلية المثلى، بما يضمن مرافقة فعالة ومستمرة لهذا القطاع الواعد.

**الملخص:**

تشهد الساحة العالمية تحولات متسارعة نحو مصادر الطاقة النظيفة في ظل التغيرات المناخية المتفاقمة والالتزامات الدولية بخفض الانبعاثات الكربونية. في هذا الإطار، يبرز الهيدروجين الأخضر كأحد الحلول الواعدة بفضل إمكانية إنتاجه من مصادر متجددة دون انبعاثات ضارة. تهدف هذه الدراسة النظرية إلى تقديم دراسة تحليلية شاملة حول منظومة الهيدروجين الأخضر، بدءًا من تقنيات إنتاجه، مرورًا بوسائل نقله وتخزينه، وصولًا إلى تطبيقاته في مختلف القطاعات، مع تسليط الضوء على التحديات التي تواجه انتشاره والفرص التي يتيحها. تم الاعتماد على مجموعة من الدراسات والمراجع الحديثة في هذا المجال. وقد خلصت الدراسة إلى أن اعتماد الهيدروجين الأخضر على نطاق واسع لا يزال مشروطًا بتطور التكنولوجيا، وانخفاض التكاليف، وتوفير بنية تحتية مناسبة، بالإضافة إلى الدعم السياسي والتشريعي. كما أظهرت النتائج أن الهيدروجين الأخضر قد يشكل دعامة أساسية لتحقيق انتقال طاقي مستدام إذا ما توفرت له البيئة المواتية للنمو.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة النظيفة، الانبعاثات الكربونية، مصادر متجددة، الهيدروجين الأخضر.

**Abstract:**

The global landscape is undergoing a rapid transition toward clean energy sources, driven by the intensifying climate crisis and international commitments to reducing carbon emissions. Within this context, green hydrogen has emerged as one of the most promising solutions, due to its potential to be produced from renewable sources without generating harmful emissions. This theoretical study aims to provide a comprehensive analytical exploration of the green hydrogen ecosystem, encompassing its production technologies, transportation and storage methods, and applications across various sectors. Particular emphasis is placed on identifying the main challenges hindering its widespread deployment, as well as the potential opportunities it offers for sustainable energy transformation.

The study draws upon a wide range of recent academic and technical references in the field. Findings suggest that the large-scale adoption of green hydrogen remains contingent upon technological advancements, cost reductions, the availability of appropriate infrastructure, and strong political and legislative support. Moreover, the results indicate that green hydrogen could serve as a foundational pillar in achieving a sustainable energy transition—provided that the enabling conditions for its development are effectively established.

**Keyword:** Green hydrogen, renewable energy, clean energy, carbon emissions.