منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

أوابـك

إنتاج الهيدروجين ودوره في عملية تحول الطاقة

دولة الكويت- آذار / مارس 2021

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2021

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066
هاتف 24959000 (965) - فاكسميلي 24959755 (965)
الموقع على الإنترنت: www.oapecorg.org
البريد الإلكتروني: oapec@oapecorg.org

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

أوابـك

إنتاج الهيدروجين ودوره في عملية تحول الطاقة

إعداد
م. وائل حامد عبد المعطي
خبير صناعات غازية

مراجعة
د. سمير محمود القرعيش
مدير إدارة الشؤون الفنية

إعتماد
سعادة الأستاذ علي سبت بن سبت
الأمين العام

دولة الكويت - آذار / مارس 2021

مقدمة

يمكن للهيدروجين أن يســـهم بدور فعال في عملية انتقال الطاقة في إطار الجهود الدولية الرامية إلى الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتحســـين جودة الهواء، وخلق مستقبل للطاقة منخفض الكربون وصولاً إلى حياد الكربون، وذلك بعد تهيئة الظروف الملائمة للتوسع في إنتاجه واستخدامه. حيث يعد الهيدروجين مصدر آمن ونظيف للطاقة لا ينتج عن احتراقه أية انبعاثات من غاز ثاني أكســـيد الكربون. كما أنه متعدد الاســـتخدامات حيث يمكن اســـتخدامه في خلايا الوقود للمركبات وكمصـــدر للحرارة في القطاع الســـكني أو كمادة خام في القطاع الصناعي.

ولا يعد إنتاج واســـتخدام الهيدروجين أمراً جديداً، بل على العكس فقد تم إنتاج الهيدروجين واستخدامه بكميات ضـخمة منذ عقود، بيد أن دوره الرئيسي لا يزال ينحصر على اســـتخدامه كمادة خام في عدد من الصـــناعات مثل الأمونيا والميثانول. إلا أن الزخم الدولي المتزايد يأتي من منظور تناول الهيدروجين " كمصـــدر للطاقة" تقوم عليه أنظمة الطاقة في المســـتقبل. حيث لا ينتج عن احتراق الهيدروجين أية انبعاثات من ثاني أكســـيد الكربون، وبالتالي يمكن أن يساهم في تحقيق اقتصاد عالمي خالي من الكربون.

ولا يوجد الهيدروجين في الطبيعة كعنصـر حر، بل يلزم إنتاجه من مصـادر أخرى ومن ثم نقله وتخزينه قبل استخدامه في القطاعات الاقتصـادية المختلفة. وهناك أكثر من 17 طريقة لإنتاج الهيدروجين، منها ما يســـتخدم الكهرباء المولدة من مصـــادر الطاقة المتجددة كالرياح والطاقة الشمسية وهو ما يعرف باسم " الهيدروجين الأخضـر"، ولا ينتج عن هذه العملية أية انبعاثات. كما يمكن إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي إلا أن هذه العملية يصاحبها إطلاق انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون، ولذا يطلق عليه الهيدروجين المنتج بهذه الطريقة "الهيدروجين الرمادي". ويمكن التخلص من تلك الانبعاثات، عبر تطبيق تقنية اصطياد واحتجاز الكربون ويطلق عليه في هذه الحالة اسم "**الهيدروجين الأزرق**". وبالرغم من ارتفاع تكلفة تقنية اصـــطياد واحتجاز الكربون إلا أن الهيدروجين الأزرق يظل تنافســـياً مقارنة بالهيدروجين الأخضر.

ولا شك أن توافر الغاز الطبيعي عالمياً بأسعار معقولة في ضوء الوفرة الحالية من الإمدادات علاوة على توافر شبكات واسعة لنقل الغاز ممتدة في معظم مناطق العالم، تعطي للهيدروجين الأزرق ميزة تنافسية مقارنة بأنواع الهيدروجين الأخرى، وتشجع على الاستثمارات في هذا القطاع الواعد. كما أن استمرار تطوير تقنية اصطياد وتخزين الكربون من خلال دعم وتمويل أنشطة البحث والتطوير، قد يسهم أيضاً في خفض تكلفتها، ومن ثم يمكن بناء اقتصاد مستقبلي للهيدروجين منخفض الكربون قائم على الغاز الطبيعي لخلق نافذة لدعم الطلب المستقبلي عليه.

من هنا تأتي أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى استعراض الطرق المختلفة لإنتاج الهيدروجين، وكافة المجالات الحالية والمستقبلية لاستخدام الهيدروجين كوقود أو مادة خام. كما تتطرق الدراسة إلى السياسات والاستراتيجيات الدولية الرامية نحو التوسع في استخدام الهيدروجين، واستشراف الطلب العالمي في ضوء تلك التوقعات. وتتناول الدراسة الخطط المستقبلية للدول العربية التي أبدت اهتماما حول الاستثمار في هذا المجال الواعد، وأبرز المقومات التي تملكها لإنجاح هذه الخطط.

إن الأمانة العامة إذ تصدر هذه الدراسة المتخصصة، في إطار سعيها نحو رصد أبرز المبادرات والاستراتيجيات الدولية المرتبطة بقطاع الطاقة العالمي، لدراسة ما لها من تداعيات على صناعة النفط والغاز، ومن ثم استعراض الفرص ومناطق القوة التي من شأنها دعم مصالح الدول الأعضاء وبما لا يتعارض مع الخطط والتوجهات الدولية على مبدأ المنفعة المشتركة لكل الأطراف والمساهمة في بناء مستقبل مستدام للطاقة.

والله ولي التوفيق،،،

الأمين العام

علي سبت بن سبت

قائمة المحتويات

مقدمة 3
قائمة المحتويات 5
قائمة الأشكال 7
قائمة الجدول 9
ملخص تنفيذي 11
الفصل الأول: الهيدروجين، أنواعه وطرق إنتاجه 15
1-1: لمحة تاريخية عن الهيدروجين 16
1-2: خواص الهيدروجين 20
1-2-1: الخواص الفيزيائية 21
1-2-2: الخواص الكيميائية 23
1-3: الهيدروجين، أنواعه وطرق إنتاجه 26
1-3-1: مصادر إنتاج الهيدروجين 27
1-3-2: الإنتاج الحالي من الهيدروجين 32
1-3-3: عمليات إنتاج الهيدروجين 34
1-4: تخزين ونقل الهيدروجين 40
1-4-1: خيارات تخزين الهيدروجين 40
1-4-2: نقل وتوزيع الهيدروجين 47
الفصل الثاني: دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة 53
2-1: السوق الحالي للهيدروجين 55
2-1-1: تطور الطلب العالمي على الهيدروجين 55
2-1-2: الهيدروجين كمصدر للطاقة: التطبيقات الحالية 58
2-1: دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة 63
2-1-1: لماذا الهيدروجين؟ 63
2-3: المبادرات الدولية حول الدور المحتمل للهيدروجين في عملية تحول الطاقة 74
2-3-1: الوضع الراهن 74
2-1-2: نظرة على نماذج من الاستراتيجيات: الاستراتيجية الأوروبية للهيدروجين 77
2-1-2: السوق المستقبلي للهيدروجين وتطبيقاته 80
الفصل الثالث: خطط ومبادرات الدول العربية في مجال الهيدروجين 85
3-1: مقومات نجاح مشاريع إنتاج الهيدروجين في الدول العربية 86
3-1-1: توافر بنية تحتية ضخمة للغاز الطبيعي داخل المنطقة العربية يمكن استغلالها للهيدروجين 87
3-1-2: توافر مصادر الطاقة المتجددة وخطط وأهداف وطنية طموحة للاستثمار فيها 89
3-1-3: الموقع الجغرافي المتميز والعلاقات التجارية الراسخة مع عدة أسواق 92

3-2: الخطط الحالية والمستقبلية في مجال الهيدروجين في الدول العربية 94
3-2-1: خطط الهيدروجين في دولة الإمارات 96
3-2-2: خطط الهيدروجين في المملكة العربية السعودية 99
3-2-3: خطط الهيدروجين في سلطنة عمان 101
3-2-4: خطط الهيدروجين في جمهورية مصر العربية 106
3-2-5: خطط الهيدروجين في المملكة المغربية 107
3-3: تحديات تطوير اقتصاد الهيدروجين في الدول العربية 111
3-3-1: الجدوى الاقتصادية والاستثمار 112
3-3-2: السياسات والإجراءات التنظيمية 113
3-3-3: متطلبات التكنولوجيا 115
الاستنتاجات والتوصيات 119
1. سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين 119
2. دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة 120
3. خطط الدول العربية في مجال الهيدروجين 123
4. التوصيات 125
المراجع 127

قائمة الأشكال

الشكل 1-1: انفجار منطاد Hindenburg الألماني في الولايات المتحدة عام 1937 الذي كان معبأ بغاز الهيدروجين ... 18
الشكل 1-2: السحب الناتجة عن احتراق مخلوط الهيدروجين-الأكسجين أثناء اختبار أحد محركات الصواريخ في مركز NASA للفضاء 19
الشكل 1-3: مقارنة نسب التمدد عند التحول إلى الحالة الغازية في ظروف الضغط الجوي 22
الشكل 1-4: اشتعال الهيدروجين في الهواء ينتج لهباً يصعب رؤيته في ضوء النهار 23
الشكل 1-5: مدى الاشتعال للهيدروجين في المخلوط الانفجاري مقارنة بأنواع الوقود الأخرى 24
الشكل 1-6: محتوى الطاقة* لأنواع مختارة من الوقود 25
الشكل 1-7: سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين بداية من إنتاجه وحتى الاستخدام النهائي 27
الشكل 1-8: مصادر إنتاج الهيدروجين والعمليات المستخدمة 28
الشكل 1-9: شدة الكربون (طن ثاني أكسيد الكربون/طن هيدروجين) لعملية إنتاج الهيدروجين حسب المصدر المستخدم في الإنتاج 31
الشكل 1-10: تصنيف أنواع الهيدروجين حسب اللون، وحسب طبيعته (متجدد أم غير متجدد) 32
الشكل 1-11: توزيع إنتاج الهيدروجين حسب المصدر 33
الشكل 1-12: نطاق تكاليف إنتاج الهيدروجين حسب المصدر 34
الشكل 1-13: تصنيف العمليات التي تستخدم في إنتاج الهيدروجين من المصادر المختلفة 35
الشكل 1-14: طريقة إصلاح الميثان بالبخار لإنتاج الهيدروجين 36
الشكل 1-15: متطلبات الماء والكهرباء لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين باستخدام جهاز التحليل الكهربائي 38
الشكل 1-16: العوامل المؤثرة على تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام أجهزة التحليل الكهربائي 40
الشكل 1-17: مقارنة المحتوى الحراري لخزان معبأ بوقود الديزل سعة 500 لتر في حال استبداله بالهيدروجين السائل والهيدروجين الغازي 41
الشكل 1-18: طرق تخزين الهيدروجين 42
الشكل 1-19: مقارنة السعة التخزينية المطلوبة للهيدروجين في حالة إنشاء محطة لتعبئة المركبات مع محطة لتعبئة الغازولين 44
الشكل 1-20: خيارات نقل وتوزيع الهيدروجين 47
الشكل 1-21: توزع شبكات نقل الهيدروجين عالمياً 48
الشكل 1-22: الحد الأقصى للهيدروجين في شبكات نقل الغاز الطبيعي في دول مختارة 50
الشكل 1-23: خيارات نقل الهيدروجين باستخدام المقطورات 52
الشكل 2-1: توزيع الطلب العالمي على الهيدروجين (الهيدروجين النقي، وخليط الهيدروجين مع غازات أخرى) 56
الشكل 2-2: تطور الطلب العالمي على الهيدروجين خلال الفترة 1975-2018 57
الشكل 2-3: مبدأ عمل خلية الوقود العاملة بالهيدروجين 58
الشكل 2-4: مزايا المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEVs) 60
الشكل 2-5: الأسطول العالمي من المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEV)، نهاية عام 2019 61
الشكل 2-6: توزيع محطات إعادة التعبئة بالهيدروجين عالمياً 62

الشكل 2-7: الأدوار التي يمكن أن يساهم بها الهيدروجين في عملية تحول الطاقة 65
الشكل 2-8: التحديات التي يجب تجاوزها للتوسع في استخدام الهيدروجين في منظومة الطاقة العالمية..... 66
الشكل 2-9: فرص الهيدروجين في تطبيقات الاستخدام النهائي..... 67
الشكل 2-10: تطبيقات خلايا الوقود في قطاع النقل البري 68
الشكل 2-12: أول قطار يعمل بالهيدروجين في ألمانيا، دخل التشغيل التجاري عام 2019..... 71
الشكل 2-13: مراحل إعداد الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين 75
الشكل 2-14: الدول التي بدأت تعمل على إعداد خطط واستراتيجيات وطنية للهيدروجين حتى فبراير 2021 76
الشكل 2-15: مراحل استراتيجية المفوضية الأوروبية الخاصة بالهيدروجين..... 78
الشكل 2-16: الأهداف المعلنة لقدرات أجهزة التحليل الكهربائي في أوروبا بحلول عام 2030 79
الشكل 2-17: توقعات نمو الطلب العالمي على الهيدروجين (إكساجول) في القطاعات المختلفة حتى عام 2050 81
الشكل 2-18: توزيع الطلب الإجمالي المتوقع على الهيدروجين وفق القطاعات المختلفة..... 82
الشكل 3-1: تكلفة إنتاج كيلوجرام واحد من الهيدروجين الرمادي والأزرق في مناطق مختارة 88
الشكل 3-2: كثافة الإشعاع الشمسي على مناطق العالم..... 89
الشكل 3-3: أطلس الرياح لدول العالم، عند ارتفاع 100 متر..... 90
الشكل 3-4: توزيع مشاريع الهيدروجين التي تم الإعلان عنها في الدول العربية (حتى شباط/فبراير 2021) 96
الشكل 3-5: المشاريع التجريبية لإنتاج واستخدام الهيدروجين في دولة الإمارات حسب التسلسل الزمني 98
الشكل 3-6: مشروع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء في مدينة نيوم في السعودية..... 100
الشكل 3-7: مشروع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء..... 101
الشكل 3-8: مخطط مشروع هجين لإنتاج الهيدروجين والطاقة الشمسية في إحدى مواقع الإنتاج التابعة لشركة آرا للبترول في سلطنة عمان 104
الشكل 3-9: مشاريع إنتاج الهيدروجين المقترحة في سلطنة عمان..... 105
الشكل 3-10: توزيع القدرات المركبة لتوليد الكهرباء في المغرب، عام 2020..... 108
الشكل 3-11: الإجراءات التي اتخذتها وزارة الطاقة المغربية لتقييم فرص الهيدروجين في المغرب 109
الشكل 3-12: التحديات التي تواجه تطوير صناعة الهيدروجين في الدول العربية..... 111
الشكل 3-13: مقارنة بين تكلفة إنتاج الهيدروجين، وسعر الغاز الطبيعي في الدول العربية 113
الشكل 3-14: الإجراءات التنظيمية المطلوبة لتطوير قطاع الهيدروجين في المنطقة العربية..... 114
الشكل 3-15: تطور قدرة أجهزة التحليل الكهربائي منذ عام 2011، والمتوقع حتى عام 2028 116

قائمة الجدول

الجدول 1-1: الخواص الفيزيائية والكيميائية للهيدروجين 20
الجدول 1-2: كثافة الطاقة * لأنواع مختارة من الوقود..... 26
الجدول 1-3: أنواع الهيدروجين حسب المادة الخام ومصدر الطاقة المستخدمة في الإنتاج..... 30
الجدول 1-4: المقارنة بين أجهزة التحليل الكهربائي..... 39
الجدول 1-5: مزايا وعيوب طرق تخزين الهيدروجين والطاقة المطلوبة 46
الجدول 1-6: مقارنة بين طرق نقل الهيدروجين المختلفة..... 52
الجدول 2-1: أنواع خلايا الوقود، والتطبيقات المختلفة لها 59
الجدول 2-2: الدول التي أعلنت حظراً على مبيعات مركبات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالوقود الأحفوري..... 68
الجدول 2-3: الأهداف التي أعلنتها عدة دول في مجال استخدام المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود..... 69
الجدول 2-4: توقعات نمو الطلب السنوي على الهيدروجين وفق عدة مصادر 81
الجدول 3-1: الخطط والأهداف الوطنية للطاقة المتجددة في الدول العربية، تحديث عام 2019 91
الجدول 3-2: مشاريع الهيدروجين التي تم تنفيذها والمخطط لها في الدول العربية..... 95

ملخص تنفيذي

عاد الحديث بقوة في السنوات الأخيرة عن استخدام الهيدروجين في التطبيقات اليومية على نطاق واسع في إطار الجهود الدولية الرامية إلى الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتحسين جودة الهواء، وخلق مستقبل للطاقة منخفض الكربون وصولاً إلى حياد الكربون. فالهيدروجين هو العنصر الأكثر وفرة في الكون، لكنه لا يتواجد كعنصر حر إلا في حالات نادرة جداً، لذا يتم إنتاجه من مصادر أخرى ويتطلب ذلك توفير مصدر للطاقة. وبالتالي عند التخطيط لتنفيذ مشروع لإنتاج الهيدروجين لابد من ضمان توافر كلا من المادة الخام ومصدر الطاقة التي ستستخدم في عملية الإنتاج. وهناك عدة طرق لإنتاج الهيدروجين يقدر عددها بأكثر من 17 طريقة، منها ما يعتمد على الغاز الطبيعي باستخدام طريقة تعرف باسم "إصلاح الميثان بالبخار" (Steam Methane Reforming, SMR) أو من الفحم عبر عملية تعرف باسم تغويز الفحم. أو من الماء عبر التحليل الكهربائي (Electrolysis) لفصل الهيدروجين عن الأكسيجين. كما يمكن استخدام الكتلة الحيوية (Biomass) في إنتاج الهيدروجين عن طريق عملية تعرف باسم التحلل الحراري اللاهوائي.

ونظراً لتعدد الطرق والمصادر التي تستخدم في إنتاج الهيدروجين، فيتم استخدام الألوان لتمييز الهيدروجين حسب طريقة الإنتاج المستخدمة، والتي تضم "الهيدروجين الرمادي" المنتج باستخدام الغاز الطبيعي (أو النفط)، و"الهيدروجين الأسود" المنتج باستخدام الفحم، " والهيدروجين الأخضر المنتج باستخدام الطاقة المتجددة وغيرها.

عالمياً يقدر إنتاج الهيدروجين النقي بنحو 77 مليون طن/السنة. ويعد الغاز الطبيعي المصدر الرئيسي للإنتاج بحصة 76%، بينما يساهم الفحم بنحو 23%، أما النسبة المتبقية فتمثل حصة مصادر الطاقة المتجددة. ومن جانب

التكلفة، يعد إنتاج الهيدروجين من الفحم الأقل تكلفة (1.2-2.2 دولار/كجم)، بينما تصل في حالة الغاز الطبيعي إلى 0.9-3.2 دولار /كجم، أما في حالة استخدام الطاقة المتجددة لتحليل الماء فتصل إلى 3-7.5 دولار/ كجم.

وينطوي الهيدروجين على جملة من التحديات لابد من تجاوزها للتوسع في استخدامه كمصدر للطاقة في المستقبل وإنشاء سلسلة قيمة له ذات مرونة عالية وسهلة التشغيل. فنتيجة انخفاض قيمة كثافة الطاقة، يحتاج تخزين الهيدروجين إلى صهاريج ضخمة، لكن عبر التطور التكنولوجي يمكن رفع قيمة الكثافة لتقليل الحجم المطلوب. كما تمثل عمليات نقل وتوزيع الهيدروجين تحدياً من الناحية الاقتصادية لارتفاع تكلفة نقله لمسافات طويلة مقارنة بأنواع الوقود الأخرى. وتتلخص طرق نقل وتوزيع الهيدروجين في النقل باستخدام خطوط الأنابيب من مواقع الإنتاج إلى مناطق الاستهلاك، أو باستخدام المقطورات، أو النقل باستخدام الناقلات للأسواق البعيدة وذلك بعد تحويل الهيدروجين إلى أمونيا كمادة حاملة له.

والسوق الحالي للهيدروجين هو سوق ضخم ومتنام وتقوم عليه العديد من الصناعات إلا أن دوره الرئيسي لا يزال ينحصر على استخدامه كمادة خام لتلك الصناعات، ولم يشهد بعد نمواً ملحوظاً في مجال استخدامه كحامل للطاقة. ومن المتوقع أن يكون للهيدروجين مستقبل واعد في عملية تحول الطاقة في عدة قطاعات اقتصادية، بما يسمح بتقليل الاعتماد على مصادر الوقود الأحفوري نظراً لإمكانية استخدامه كمصدر للوقود مباشرة، أو حامل للطاقة واستخدامه عبر تطبيقات خلايا الوقود، أو كمادة خام في الصناعة مثل صناعة السماد والمواد الكيميائية والتكرير، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة مثل صناعة الصلب.

ومؤخراً، أبدت عدة دول اهتماما بالهيدروجين والدور الذي يمكن أن يساهم في عملية تحول الطاقة. وقام البعض منهم بالشروع في إعداد وتطوير رؤى خرائط طريق واستراتيجيات لتحديد المسار الذي يمكن اتخاذه للوصول إلى اقتصاد للهيدروجين على المستوى الوطني. وتقوم تلك الاستراتيجيات على تحديد أفضل المسارات لتوفير إمدادات الهيدروجين (عبر الإنتاج المحلي أو الاستيراد) وتطبيقات الاستخدام النهائي.

على الصعيد العربي، أبدى عدد من الدول العربية اهتماماً بالاستثمار في مشاريع إنتاج الهيدروجين، منها ما يقوم على إنتاج الهيدروجين الأخضر ضمن خطط وطنية طموحة للتوسع في مشاريع الطاقة المتجددة، ومنها ما يقوم على التوسع في إنتاج الهيدروجين الأزرق (أو مشتقاته مثل الأمونيا الزرقاء) المعتمد على الغاز الطبيعي. ولا شك أن لدى الدول العربية عدة مقومات وفرص تمكنها من إنشاء محور تصدير عالمي للهيدروجين ومشتقاته. ومع تلك المقومات، هناك عدة تحديات قد تعيق الاستثمار في هذه الصناعة الواعدة، منها ما يتعلق بالجدوى الاقتصادية ومنها ما يرتبط بغياب الإجراءات التنظيمية للسوق. لكن من الممكن تجاوزها مع الوقت، فالهيدروجين لا يزال يخطو خطواته الأولى ليس على الصعيد العربي فحسب بل على الصعيد العالمي.

وإجمالا بلغ عدد الدول العربية التي أبدت اهتماما في مجال الهيدروجين خمس دول هي الإمارات والسعودية ومصر والمغرب وعمان، وقد تفاوتت طبيعة الإجراءات المتخذة، فمنها ما تعلق بتأسيس خطط وطنية للهيدروجين وتحديث استراتيجية الطاقة الوطنية لتأخذ في الاعتبار الدور المحتمل للهيدروجين مستقبلاً، ومنها ما تناول إبرام اتفاقيات وتفاهمات أولية مع شركات عالمية رائدة للاستثمار مباشرة في مشاريع لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق، ومشاريع تجريبية لتطبيق استخدام الهيدروجين في مجال النقل.

D 820
H2

الفصل الأول:

الهيدروجين.. أنواعه وطرق إنتاجه

1-1: لمحة تاريخية عن الهيدروجين

1-2: خواص الهيدروجين

1-3: طرق إنتاج الهيدروجين

1 - 1 : لمحة تاريخية عن الهيدروجين

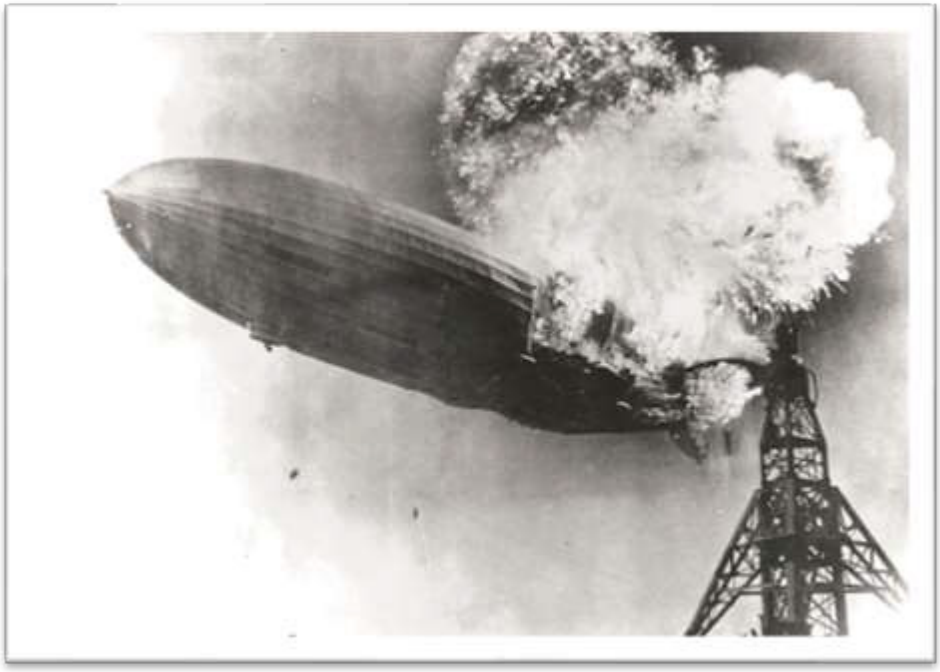
تعود معرفة الإنسان للهيدروجين إلى قرابة نحو 350 سنة، حيث يعود اكتشاف الهيدروجين إلى عام 1671 وذلك على يد العالم البريطاني Robert Boyle، والذي اكتشف أثناء وضع قطعة معدنية مثل الحديد أو الزنك داخل وعاء به حمض، تتحرر فقاعات غازية ينتج عنها اشتعال، وقد سجل Boyle تلك المشاهدات دون تحديد طبيعة هذا العنصر [1].

وبعد مرور نحو مائة عام على تجارب العالم Boyle، قام العالم البريطاني Henry Cavendish في عام 1766 بإجراء نفس التفاعل وتجميع الفقاعات الناتجة عنه وتحليلها، وأثبت أنها تختلف في طبيعتها عن بقية أنواع الغازات المعروفة الأخرى آنذاك. كما لاحظ أن اشتعال تلك الفقاعات الغازية في وجود الهواء ينتج عنه تكون الماء. وعليه فقد تم تسمية العنصر الجديد المكتشف اسم "الهيدروجين" والتي تتكون من مقطعين وهو "هيدرو-Hydro" أي الماء، و"جين-Gen" أي توليد، أي مولد الماء.

ومنذ السنوات الأولى لاكتشاف الهيدروجين، لاحظ العالمان البريطانيان أن الهيدروجين أخف من الهواء. وقد استغلت هذه الخاصية فيما بعد في مطلع القرن العشرين في استخدام الهيدروجين في تعبئة المناطيد (Airships) حيث كان الهيدروجين أرخص ومتوافر عن الهيليوم الذي يملك نفس الخاصية (أخف من الهواء)، لكنه كان أعلى في التكلفة وعنصر نادر آنذاك. إلا أن ذلك الاستخدام لم يدم طويلاً بسبب حادث انفجار منطاد Hindenburg الألماني في عام1937 المبين بالشكل 1-1 الذي كان يستخدم في نقل المسافرين بين أوروبا وأمريكا الشمالية والجنوبية، حيث اشتعل وانفجر في الهواء أثناء رحلته بسبب تحرر لشحنات كهرباء هيدروستاتيكية تسببت في إشعال تسربات من غاز الهيدروجين القابل للاشتعال[2].

وقد نتج عن هذا الحادث مقتل عشرات الأشخاص فوق ولاية نيوجيرسي في الولايات المتحدة. وقد كان ذلك سبباً قوياً في حظر استخدام الهيدروجين كغاز رفع (Lifting Gas) في المناطيد، واستخدام الهيليوم بدلا منه، ثم تطور قطاع النقل الجوي لاحقا حتى أصبحت الطائرات الوسيلة الرئيسية للنقل الجوي.

الشكل 1-1: انفجار منطاد Hindenburg الألماني في الولايات المتحدة عام 1937 الذي كان معبأ بغاز الهيدروجين



المصدر: Airships.net

أما من جانب استخدامه كوقود، فقد كان الهيدروجين على موعد مع تطور تاريخي أيضاً مع تأسيس وكالة الفضاء الأمريكية (NASA) عام 1958، حيث سخرت الوكالة خواص الهيدروجين لاستخدامه كوقود لدعم بعثاتها إلى الفضاء. حيث بدأت NASA في الاعتماد على الهيدروجين السائل كوقود للصواريخ التي يتم إرسالها لنقل رواد الفضاء والحمولات إلى الفضاء الخارجي باستخدام مزيج منه مع الأكسجين السائل. وعادة يحتاج محرك الصاروخ كمية هائلة من الوقود حيث تستهلك الرحلة الواحدة نحو 500 ألف جالون من الهيدروجين السائل في عملية الاحتراق،

بـالإضـــافـة إلى 239 ألف جـالون أخرى نتيجـة الفقد والتبخير أثنـاء عمليـات النقل والتخزين[3]. واسـتطاعت وكالة الفضـاء الأمريكية على مدار عقود، تطوير الاسـتخدام والنقل الآمن للهيدروجين السـائل الذي بات اليوم العلامة المميزة لبرنـامج الفضـاء الأمريكي. كما أنها تقوم على تطوير استخدام الهيدروجين لإعادة استخدامه في المحطة الفضائية الدولية في إنتاج الماء لتقليل الحاجة لإرسال إمدادات من الأرض. يبين الشكل 1-2، السـحب الناتجة عن احتراق مخلوط الهيدروجين-الأكسـجين أثناء اختبار أحد محركات الصواريخ في مركز NASA للفضاء.

الشكل 1-2: السحب الناتجة عن احتراق مخلوط الهيدروجين-الأكسجين أثناء اختبار أحد محركات الصواريخ في مركز NASA للفضاء

المصدر: وكالة الفضاء الأمريكية NASA

وفـي السـنوات الأخيـرة، عـاد الحـديث بقـوة عـن اسـتخدام الهيـدروجين فـي التطبيقـات اليوميـة علـى نطـاق واسـع فـي إطـار الجهـود الدوليـة الراميـة إلـى الحـد مـن انبعاثـات غـازات الاحتبـاس الحـراري، وتحسـين جـودة الهـواء، وخلـق مسـتقبل للطاقـة مـنخفض الكربـون وصـولاً إلـى حيـاد الكربـون، وذلـك بعـد تهيئـة

الظروف الملائمة للتوسع في إنتاجه واستخدامه. حيث لا ينتج عن استخدام الهيدروجين أية انبعاثات من غاز ثاني أكسيد الكربون، علاوة على إمكانية استخدامه كوقود في العديد من القطاعات مثل قطاع النقل والقطاع السكني أو حتى كمادة خام في العديد من الصناعات التحويلية.

1-2: خواص الهيدروجين [4،5]

يعد الهيدروجين العنصر الأكثر وفرة في الكون، وهو يتواجد في معظم المركبات العضوية، كما أنه المكون الرئيسي للماء مع الأكسجين عصب الحياة. ويعد دراسة خواص الهيدروجين المبينة بالجدول 1-1، من العوامل ذات الأهمية لمراعاة جوانب الأمن والسلامة أثناء تداول واستخدام الهيدروجين في التطبيقات المختلفة، وتحديد الطرق الأكثر فعالية لنقله وتخزينه وتوزيعه.

الجدول 1-1: الخواص الفيزيائية والكيميائية للهيدروجين

الخاصية	الوحدة	القيمة	المقارنة مع الغاز الطبيعي
الكثافة (غاز)، عند صفر مئوية	كجم/متر^3	0.089	10/1 قيمة الغاز الطبيعي
الكثافة (سائل)، عند درجة الغليان	كجم/متر^3	70.79	6/1 قيمة الغاز الطبيعي
نسبة التمدد (سائل إلى غاز)	-	848/1	تبلغ نسبة التمدد 600/1 للغاز الطبيعي المسال
درجة الغليان، عند الضغط الجوي	مئوية	252.76-	أقل بنحو 90 درجة تحت الصفر مقارنة بالغاز الطبيعي المسال الذي تبلغ درجة غليانه -162 درجة مئوية
درجة التجمد، عند الضغط الجوي	مئوية	259-	
درجة الحرارة الحرجة	مئوية	240-	أقل بنحو 89 درجة تحت الصفر مقارنة بالغاز الطبيعي المسال
محتوى الطاقة (غاز عند 25 درجة مئوية والضغط الجوي)	ميجا جول لكل كجم	119.93	2.4 أكبر من الغاز الطبيعي
كثافة الطاقة، الهيدروجين المسال	ميجا جول لكل لتر	8.5	3/1 من قيمة محتوى الطاقة للغاز الطبيعي المسال
مدى الاشتعال في الهواء	تركيز الهيدروجين في المخلوط الانفجاري%	%77:4	6 مرات مدى أوسع عن الغاز الطبيعي

المصدر: بيانات من عدة مصادر تضم وكالة الطاقة الدولية، الاتحاد الدولي للغاز IGU، وكالة الفضاء الأمريكية NASA

1-2-1: الخواص الفيزيائية

يعد الهيدروجين أخف وأبسط عنصر في الطبيعة، إذا تقل كثافته بنحو 14 مرة عن كثافة الهواء. وهو غاز ليس له لون أو رائحة أو طعم عند الظروف العادية أو القياسية، وهو الأمر الذي يُصعب من عملية تعقبه في حالة حدوث تسرب. ويعد الهيدروجين مادة غير سامة، ولا تسبب أي ضرر على البيئة وبالتالي يمكن اعتباره صديق للبيئة.

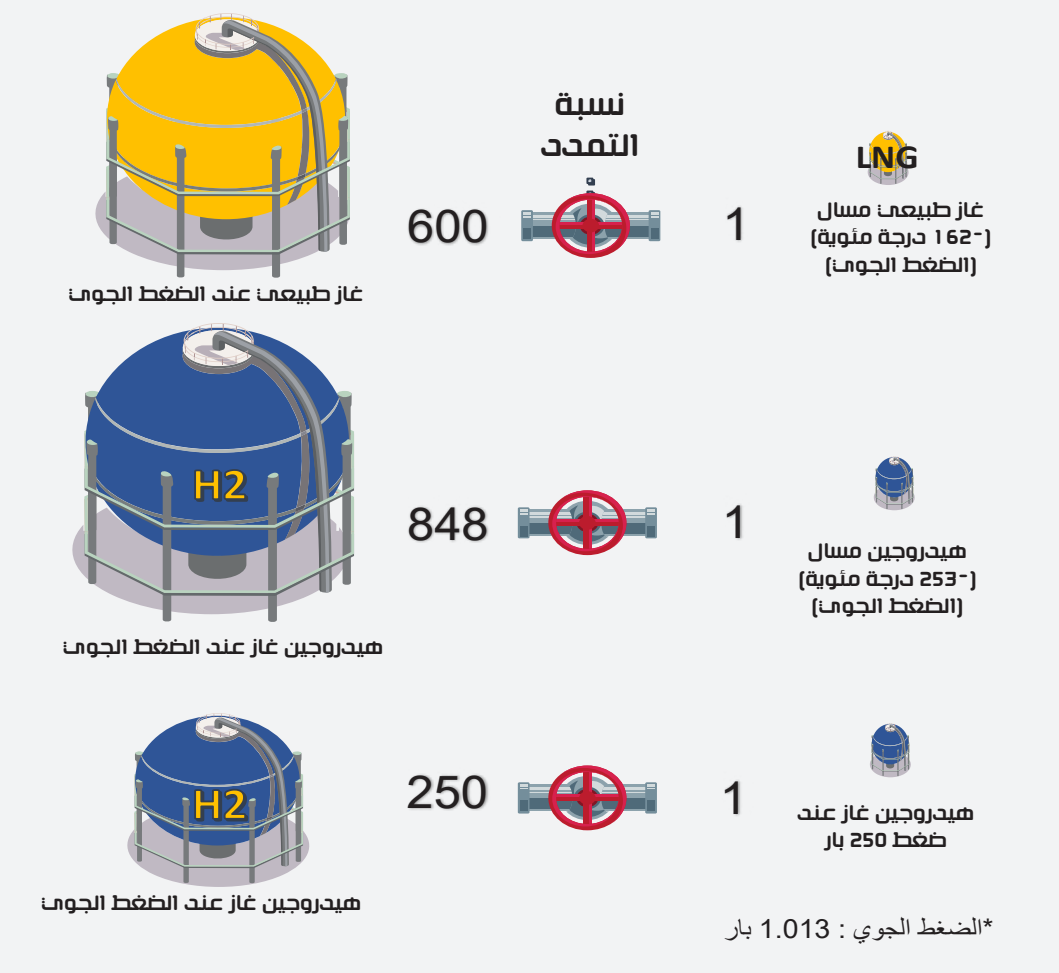
وغاز الهيدروجين له درجة غليان منخفضة جداً تبلغ نحو -252.76 درجة مئوية، أي ما يقترب من الصفر المطلق على مقياس كيلفن (صفر كيلفن = -273 درجة مئوية). ويمكن أن يتحول في الحالة السائلة عند تبريده إلى درجة حرارة تقل عن درجة غليانه عند ظروف الضغط الجوي العادي (1.013 بار).

وعملياً فإنه يمكن تحويل غاز الهيدروجين إلى الحالة السائلة عبر ضغطه كما هو الحال مع بعض المركبات الأخرى إلا أنه من غير الممكن تحقيق ذلك إلا إذا كانت حرارته أقل من درجة الحرارة الحرجة له والتي تبلغ -240 درجة مئوية، بغض النظر عن قيمة الضغط المطبق عليه. ولذلك فإن عملية نقل الهيدروجين في **"الحالة السائلة"** تتطلب تبريده أولاً إلى أقل من -240 درجة مئوية وهي تقل عن درجة إسالة الغاز الطبيعي في محطات إنتاج الغاز الطبيعي المسال والتي تبلغ -162 درجة مئوية. بينما تبلغ درجة ذوبان (أو التجمد) الهيدروجين (التي يتحول عندها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة) حوالي -259 درجة مئوية وهي أقل قليلاً من درجة غليانه.

كما تعد كثافة الهيدروجين (في الحالة الغازية عند الصفر مئوية) منخفضة جداً حيث تبلغ نحو 0.089 كجم/ م^3 أي أقل بنحو 14 مرة عن كثافة الهواء التي تبلغ 1.29 كجم/ م^3، ولذلك يتطاير الهيدروجين عند تسربه سريعاً في الهواء إلى أعلى، ولهذا كان يستخدم كعنصر لرفع المناطيد مثل الهيليوم في بدايات القرن العشرين. أما عند تبريده لتحويله إلى الحالة السائلة (عند درجة غليانه) فترتفع كثافته إلى 70.79 كجم/م^3، وينكمش حجمه إلى نحو

848/1 من حجمه وهو في حالته الغازية، وذلك بالمقارنة مع 600/1 في حالة الغاز الطبيعي المسال مقارنته بحجمه في الحالة الغازية، ونحو 250/1 مع غاز البترول المسال مقارنته بحجمه في الحالة الغازية، ولذلك فإن من الطرق المفضلة لنقل الهيدروجين بكميات كبيرة هي تحويله إلى هيدروجين سائل بعد تبريده إلى أقل من -240 درجة مئوية، ومن ثم إعادة تبخيره مجدداً في موقع الاستهلاك. أو يمكن ضغطه إلى 250 بار عند درجات الحرارة العادية لكنه سيظل في الحالة الغازية في تلك الحالة وسينخفض حجمه بنسبة 250/1 مقارنة بالضغط الجوي العادي كما يبين الشكل 1-3.

الشكل 1-3: مقارنة نسب التمدد عند التحول إلى الحالة الغازية في ظروف الضغط الجوي



1-2-2: الخواص الكيميائية

- **القابلية للاشتعال (Flammability)**

تعد قابلية الاشتعال السمة الرئيسية المميزة للهيدروجين، حيث يمكن أن يشتعل بسهولة في الهواء الجوي عند تركيزات مختلفة (في المخلوط الانفجاري) في وجود مصدر للاشتعال، مسبباً وهج يصعب رؤيته في ضوء النهار كما يظهر الشكل 1-4، وهو ما يشكل تحدياً كبيراً لقواعد الأمن والسلامة لصعوبة ترصد حرائق الهيدروجين.

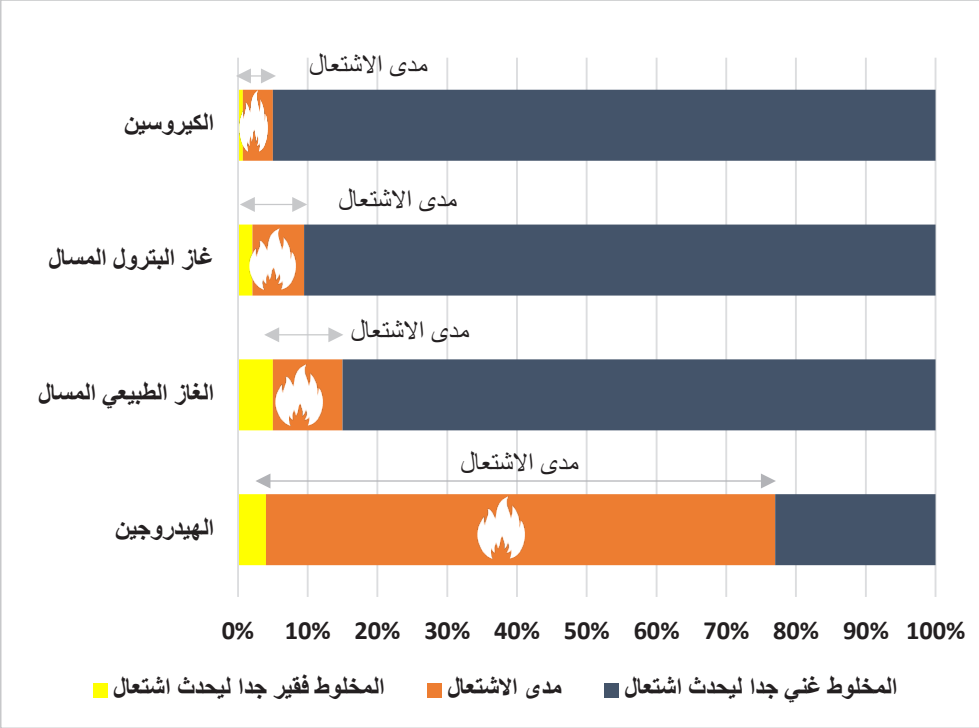
الشكل 1-4: اشتعال الهيدروجين في الهواء ينتج لهباً يصعب رؤيته في ضوء النهار

المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية EIA

ويتسم الهيدروجين بأن له مدى اشتعال واسع (الحد الأدنى والحد الأقصى لتركيز الهيدروجين لتحقيق الاشتعال في وجود مصدر للاشتعال) مقارنة بباقي أنواع الوقود كما يبين الشكل 1-5، حيث يبلغ الحد الأدنى لتركيز الهيدروجين في المخلوط الانفجاري (من الهواء والهيدروجين) نحو 4% بينما يبلغ الحد الأقصى نحو 77%. وبالتالي فإذا كان تركيز الهيدروجين أقل من 4% يصبح المخلوط الانفجاري فقير جداً

ولا يكفي لحدوث الاشتعال، وعند تركيز أعلى من 77% يصبح المخلوط غنياً جداً ولا يحدث أيضاً الاشتعال.

الشكل 1-5: مدى الاشتعال للهيدروجين في المخلوط الانفجاري مقارنة بأنواع الوقود الأخرى



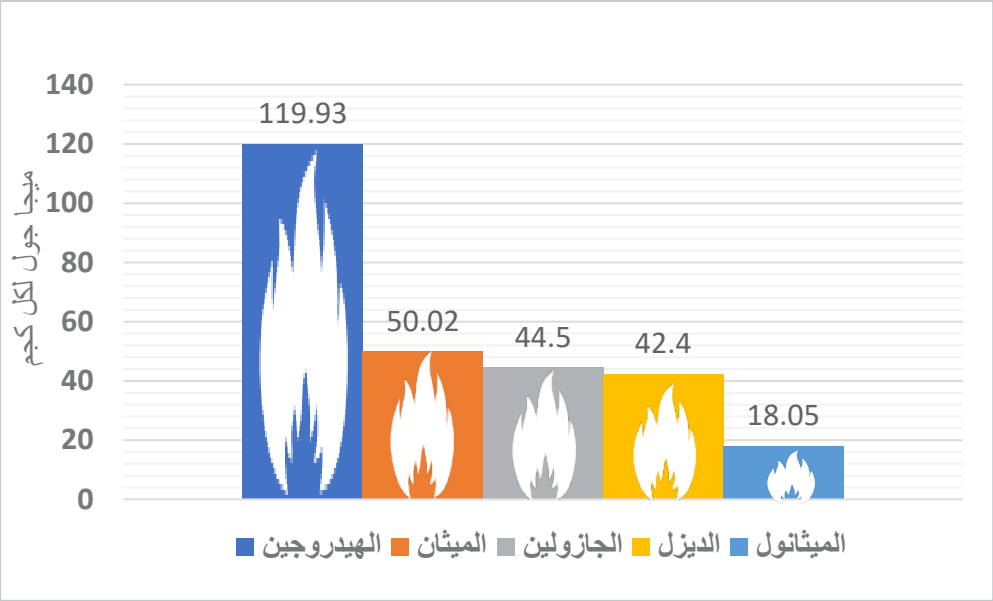
مصدر البيانات: NPFA Fire Protection Handbook[6]

- **محتوى الطاقة (Energy Content)**

يعرف محتوى الطاقة لوقود ما بأنه كمية الطاقة الكامنة لكل وحدة كتلة من الوقود. ويعد الهيدروجين الأعلى في محتوى الطاقة مقارنة بباقي أنواع الوقود الأخرى كما يبين الشكل 1-6، كونه الأقل في الوزن ولذلك كان يعتمد عليه في برامج الفضاء بسبب الحاجة إلى استهلاك كميات هائلة من الوقود مع تجنب حمل أوزان كبيرة في صاروخ الفضاء. لكن في المقابل يتسبب الانفجار الناتج عن اشتعال كمية محددة من الهيدروجين (بسبب ارتفاع قيمة محتوى الطاقة) في دمار يزيد بنحو 2.5 مرة عن استخدام نفس الكمية (على مقياس الكتلة) من أنواع الوقود الأخرى كالغازولين أو

السـولار أو غاز البترول المسـال. ولذا فإن انفجار الهيدروجين يعد أكثر تدميراً وأكثر خطورة من جانب الأمن والسلامة.

الشكل 1-6: محتوى الطاقة* لأنواع مختارة من الوقود



* محتوى الطاقة على أساس القيمة الحرارية الدنيا (Lower Heating Value, LHV) مقاسة عند 25 درجة مئوية والضغط الجوي العادي

مصدر البيانات: NPFA Fire Protection Handbook و وكالة الطاقة الدولية IEA

- **كثافة الطاقة (Energy Density)**

تعرف كثافة الطاقة لوقود ما بأنها كمية الطاقة الكامنة لوحدة الحجوم من الوقود، وهي تعتمد على حالة الوقود هل في الحالة الغازية أم السائلة وعند أي ضغط إذا كان في الحالة الغازية. وعلى النقيض من كون الهيدروجين الوقود الأعلى في محتوى الطاقة، يعد الأقل في كثافة الطاقة مقارنة بباقي أنواع الوقود الأخرى كما يبين الجدول 1-2. وعلى سبيل المقارنة، تمثل كثافة الطاقة للهيدروجين المسال نحو 28% تقريباً من كثافة الغازولين.

ويشكل انخفاض قيمة كثافة الطاقة للهيدروجين، أحد أبرز التحديات الراهنة في عمليات نقله وتخزينه، حيث سيتطلب ذلك توافر مساحة تخزين كبيرة جداً مقارنة بأنواع الوقود الأخرى.

الجدول 1-2: كثافة الطاقة * لأنواع مختارة من الوقود

الوقود	القيمة
الهيدروجين	• 10.05 ميجاجول لكل متر مكعب (غاز عند ضغط 1 بار، و 15 درجة مئوية) • 1825 ميجاجول لكل متر مكعب (غاز عند ضغط 200 بار، و 15 درجة مئوية) • 4500 ميجاجول لكل متر مكعب (غاز عند ضغط 690 بار، و 15 درجة مئوية) • 8491 ميجاجول لكل متر مكعب (سائل)
الميثان	• 32.56 ميجاجول لكل متر مكعب (غاز عند ضغط 1 بار، و 15 درجة مئوية) • 20920 ميجاجول لكل متر مكعب (سائل)
الغازولين (سائل)	• 31150 ميجاجول لكل متر مكعب
الديزل (سائل)	• 31435 ميجاجول لكل متر مكعب
الميثانول (سائل)	• 15800 ميجاجول لكل متر مكعب

المصدر: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA)

1-3: الهيدروجين، أنواعه وطرق إنتاجه

1-3-1: مصادر إنتاج الهيدروجين

تضم سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين مجموعة واسعة من العمليات المتتالية بداية من توليد الكهرباء اللازمة في عمليات الإنتاج (كما هو الحال في حالة الهيدروجين الأخضر المعتمد على مصادر الطاقة المتجددة)، مرورا بعمليات الإنتاج نفسها حسب الطريقة المستخدمة، ثم مرحلة التخزين والنقل التي قد تطلب إسالة أو ضغط الهيدروجين أو العمليتين معاً، وأخيراً مرحلة الاستخدام النهائي. وبالرغم من تعدد العمليات التي قد تستخدم في إنتاج واستخدام الهيدروجين، إلا أنها يمكن تبسيطها إلى ثلاثة مراحل رئيسية[7] هي مرحلة الإنتاج، ومرحلة التخزين والنقل وهما متداخلتان ويمثلان معاً حلقة واحدة داخل سلسلة القيمة، أما المرحلة الأخيرة فهي تطبيقات الاستخدام النهائي كما يبين الشكل 1-7.

الشكل 1-7: سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين بداية من إنتاجه وحتى الاستخدام النهائي

يعد إنتاج الهيدروجين أول مرحلة في سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين. ولا يتواجد الهيدروجين في الطبيعة كعنصر حر إلا في حالات نادرة جداً، لذا يتم إنتاجه من مصادر أخرى قبل استخدامه كوقود أو كمادة خام في القطاعات الاقتصادية المختلفة. ويتميز الهيدروجين بتواجده في العديد من المركبات المتواجدة بوفرة في الطبيعة، ولكن تتطلب عملية إنتاجه توفير مصدر للطاقة[8]. وبالتالي عند التخطيط لتنفيذ مشروع لإنتاج الهيدروجين لابد من ضمان توافر كلا من **المادة الخام ومصدر للطاقة** التي ستستخدم في عملية الإنتاج. ويمكن إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري كما هو مبين بالشكل 1-8، وفي مقدمتها الغاز الطبيعي الذي يهمين على الإنتاج العالمي للهيدروجين في الوقت الحالي، ويتم ذلك باستخدام عدة طرق أشهرها عملية إصلاح الميثان بالبخار (Steam Methane Reforming, SMR) لفصل الهيدروجين من الميثان.

الشكل 1-8: مصادر إنتاج الهيدروجين والعمليات المستخدمة

كما يمكن إنتاج الهيدروجين من الفحم عبر عملية تعرف باسم تغويز الفحم (Coal Gasification) عبر تسخينه مع الأكسجين وبخار الماء أو بكمية محدودة من الأكسجين إلى درجات حرارة وضغوط مرتفعة لإنتاج الغاز الصناعي الذي يضم ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين. كما يمكن استخدام الكتلة الحيوية (biomass) في إنتاج الهيدروجين عن طريق عملية تعرف باسم التحلل الحراري اللاهوائي (Pyrolysis). كما يمكن إنتاج الهيدروجين من الماء عبر التحليل الكهربائي (Electrolysis) للماء لفصل جزيئاته إلى هيدروجين وأكسجين.

وعادة ما يتم استخدام الألوان في تمييز الهيدروجين حسب طريقة الإنتاج المستخدمة [9، 10، 11] فكما يبين الجدول 1-3، هناك نحو ستة أنواع من الهيدروجين مصنفة حسب اللون وفق طرق الإنتاج المستخدمة، والتي تضم "الهيدروجين الرمادي" المنتج باستخدام الغاز الطبيعي (أو النفط)، و"الهيدروجين الأسود" المنتج باستخدام الفحم. وهناك أيضاً الهيدروجين الأزرق، وهو نفسه الرمادي ولكن يضم عملية إضافية للتخلص من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المصاحبة لإنتاجه. بينما يشير "الهيدروجين الأصفر" إلى الهيدروجين الذي يتم إنتاجه عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام الطاقة النووية. أما "الهيدروجين الأخضر" أو المتجدد حسب وصف بعض الهيئات الأوروبية مثل المفوضية الأوروبية، فهو الذي يتم إنتاجه عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وهناك أيضاً "الهيدروجين الفيروزي" والذي يتم إنتاجه من الغاز الطبيعي أو الكتلة الحيوية باستخدام التحلل الحراري اللاهوائي.

وبالرغم من التقسيم الحالي القائم على الألوان، لا تزال هناك بعض الاختلافات وعدم توحيد في المصطلحات المستخدمة فمثلاً يطلق على الهيدروجين الذي ينتج باستخدام الفحم اسم " الهيدروجين الأسود" في إشارة إلى لون الفحم، وفي بعض أنواع

الفحم "فحم الليجنيت" يطلق عليه اسم "الهيدروجين البني". وهناك أيضاً مصطلح الهيدروجين المتجدد في إشارة إلى الهيدروجين المنتج باستخدام مصادر الطاقة المتجددة في عملية التحليل الكهربائي للماء، بينما يطلق عليه أيضاً اسم الهيدروجين الأخضر. وبالرغم من تلك الاختلافات، أصبح هناك توجه عالمياً من بعض الهيئات والمؤسسات الدولية المعنية بالهيدروجين نحو توحيد تلك المصطلحات لمنع التضارب في المفاهيم، ووضع مرجعية واحدة للصناعة في المستقبل القريب.

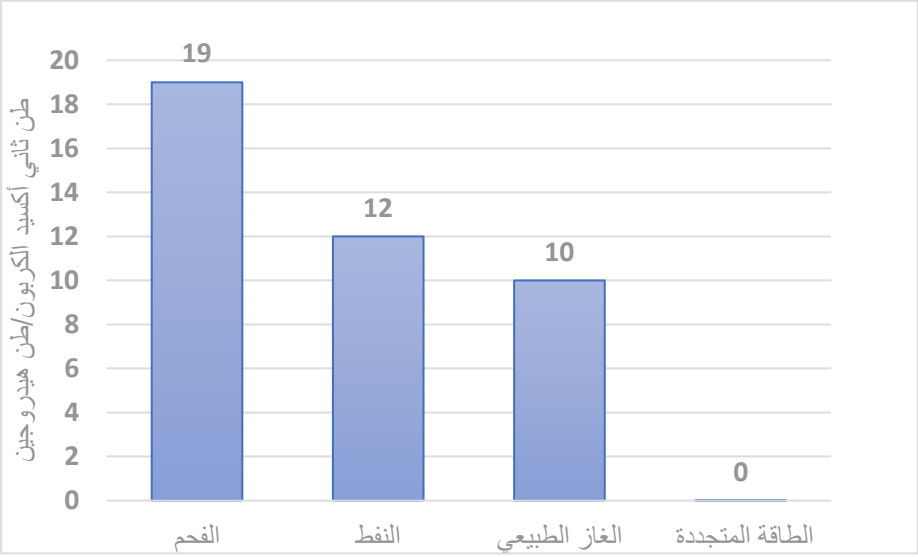
الجدول 1-3: أنواع الهيدروجين حسب المادة الخام ومصدر الطاقة المستخدمة في الإنتاج

النوع	المادة الخام/ مصدر الطاقة	وصف العملية	الأثر على البيئة
الهيدروجين الرمادي	الغاز الطبيعي/الطاقة الحرارية	فصل الهيدروجين عن الميثان باستخدام عملية إصلاح الميثان بالبخار	تطلق 10 كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم هيدروجين
الهيدروجين الأسود	الفحم/الطاقة الحرارية	تغويز الفحم عبر تسخينه مع الأكسجين وبخار الماء أو بكمية محدودة من الأكسجين إلى درجات حرارة وضغوط مرتفعة لإنتاج الغاز الصناعي	تطلق 19 كجم ثاني أكسيد الكربون/كجم هيدروجين
الهيدروجين الأزرق	الغاز الطبيعي أو الفحم/الطاقة الحرارية	نفس عملية إنتاج الهيدروجين الرمادي/الأسود مع تطبيق تقنية اصطياد وتخزين الكربون للانبعاثات المصاحبة	أثر بيئي أقل حيث تقلل الانبعاثات حتى 90%
الهيدروجين الأخضر	الماء/ مصادر الطاقة المتجددة كالرياح أو الطاقة الشمسية	التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولدة من مصادر الطاقة المتجددة	صديقة للبيئة
الهيدروجين الأصفر	الماء/ الطاقة النووية	التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مولدة من محطات الطاقة النووية	صديقة للبيئة
الهيدروجين الفيروزي	الغاز الطبيعي أو الكتلة الحيوية	التحلل الحراري للغاز الطبيعي أو الكتلة الحيوية في غياب الأكسجين	ينتج الكربون الصلب في حال استخدام الكتلة الحيوية

وبالرغم من أن حرق الهيدروجين كوقود لا ينتج عنه أية انبعاثات من غازات الاحتباس الحراري، إلا أن عملية إنتاجه نفسها قد ينتج عنها تولد انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون حسب المادة الخام المستخدمة، ومصدر الطاقة المستخدم، وفي حالة استخدام تقنية للتخلص منها، فسيتطلب ذلك أيضاً توفير مصدر للطاقة. ولذا لا بد من الأخذ في الاعتبار شدة الكربون (Carbon Intensity) لعملية إنتاج الهيدروجين

حسب المصدر المستخدم في الإنتاج، والطاقة المستهلكة لدراسة الجدوى الاقتصادية. وكما يبين الشكل 1-9، فإن الهيدروجين الأخضر المنتج عبر تحليل الماء باستخدام الطاقة المتجددة لا ينتج عنه أية انبعاثات، بينما تتراوح الانبعاثات ما بين 10و19 طن ثاني أكسيد الكربون لكل طن من الهيدروجين المنتج بواسطة أنواع الوقود الأحفوري.

الشكل 1-9: شدة الكربون (طن ثاني أكسيد الكربون/طن هيدروجين) لعملية إنتاج الهيدروجين حسب المصدر المستخدم في الإنتاج



مصدر البيانات: وكالة الطاقة الدولية IEA

وبخلاف التصنيف القائم على الألوان الأكثر شيوعاً عالمياً، هناك تصنيف للهيدروجين حسب طبيعة المادة الخام/مصدر الطاقة المستخدم في عملية الإنتاج هل هي متجددة أم لا، وبالتالي يمكن تقسيمه إلى:

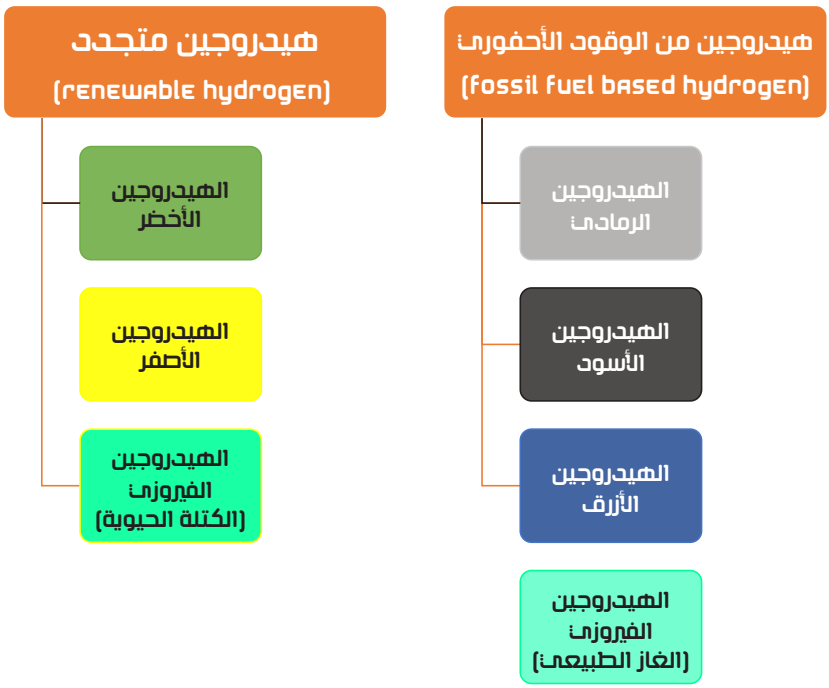
- **هيدروجين متجدد (Renewable Hydrogen):**

ويشمل ذلك الهيدروجين المنتج باستخدام الطاقة المتجددة (الهيدروجين الأخضر)، والمنتج باستخدام الطاقة النووية (الهيدروجين الأصفر)، والهيدروجين المنتج من الكتلة الحيوية (الهيدروجين الفيروزي).

- **هيدروجين من الوقود الأحفوري (Fossil Fuel based Hydrogen)**

ويشـــمل ذلك النوع كل من الهيدروجين الرمادي والهيدروجين الفيروزي في حال استخدام الغاز الطبيعي، والهيدروجين الأسود الذي ينتج من الفحم. كما يضم هذا النوع الهيدروجين الأزرق الذي يضم تقنية اصطياد وتخزين الكربون ويطلق عليه في هذه الحالة "هيدروجين من الوقود الأحفوري مع اصـــطياد وتخزين الكربون". يلخص الشكل 1-10، أنواع الهيدروجين حسب اللون، وحسب طبيعته (متجدد أم غير متجدد)

الشكل 1-10: تصنيف أنواع الهيدروجين حسب اللون، وحسب طبيعته (متجدد أم غير متجدد)



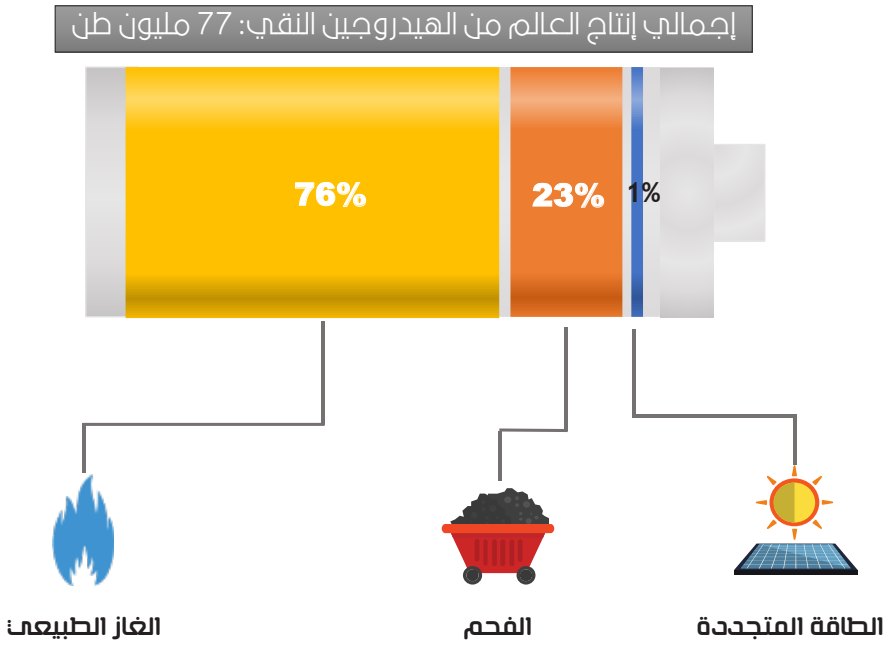
ملحوظة: الطاقة النووية تعتبر متجددة بينما الوقود المستخدم فيها غير متجدد.

1-3-2: الإنتاج الحالي من الهيدروجين

يقدر إنتاج العالم من الهيدروجين النقي حسب أحدث البيانات المتوفرة بنحو 77 مليون طن (عام 2018)[12]. ويعد الغاز الطبيعي المصـدر الرئيسـي لإنتاج الهيدروجين كما يبين الشكل 1-11 بحصة 76%، بينما يساهم الفحم بنحو 23%، أما النسبة المتبقية فتمثل حصـــة مصـــادر الطاقة المتجددة المســتخدمة في التحليل الكهربائي للماء. وتقدر

كميات الغاز الطبيعي المســتهلكة في إنتاج الهيدروجين بنحو 209 مليار متر مكعب (تعادل نحو 5% من الطلب العالمي على الغاز)، بينما يقدر استهلاك الفحم بنحو 107 مليون طن (تعادل نحو 2% من اســتهلاك الفحم عالمياً). وإجمالا يســتهلك الإنتاج العالمي من الهيدروجين حوالي 275 مليون طن نفط مكافئ (ما يعادل نحو 2% من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة الأولية)، ويتسـبب في إطلاق نحو 830 مليون طن ثاني أكسيد الكربون سنوياً.

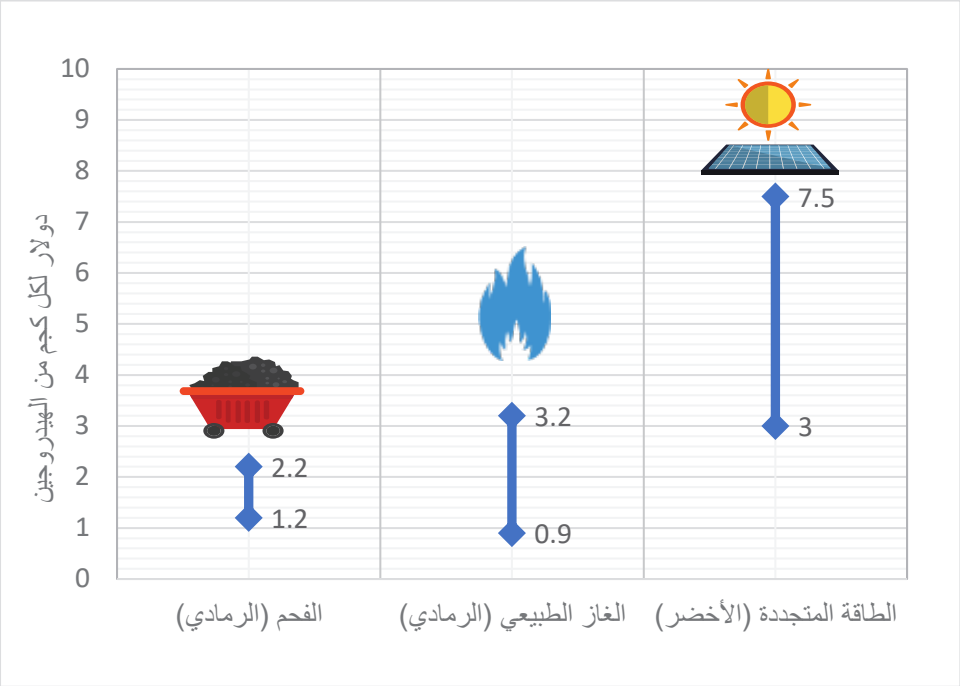
الشكل 1-11: توزيع إنتاج الهيدروجين حسب المصدر



مصدر البيانات: وكالة الطاقة الدولية IEA

أما من جانب التكلفة[13]، فيعد إنتاج الهيدروجين من الفحم الأقل تكلفة حيث تتراوح من 1.2-2.2 دولار/كجم من الهيدروجين، بينما تصل في حالة استخدام الغاز الطبيعي إلى 0.9-3.2 دولار/ كجم، أما في حالة استخدام الطاقة المتجددة لتحليل الماء فتصل إلى 3-7.5 دولار/ كجم كما يبين الشكل 1-12.

الشكل 1-12: نطاق تكاليف إنتاج الهيدروجين حسب المصدر



مصدر البيانات: وكالة الطاقة الدولية IEA

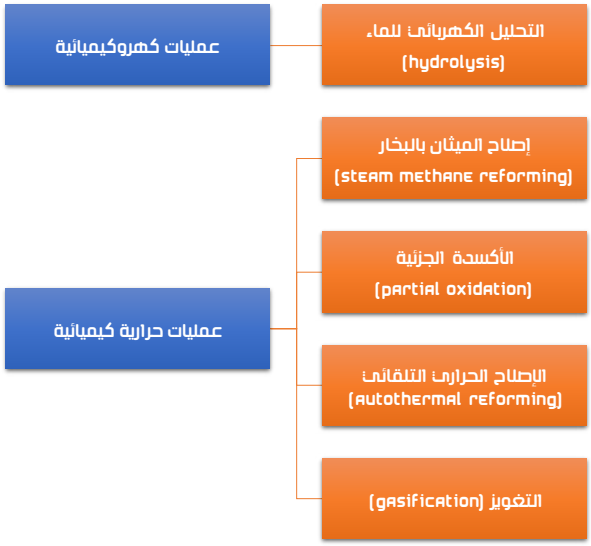
1-3-3: عمليات إنتاج الهيدروجين

تنقسم العمليات التي تستخدم في إنتاج الهيدروجين كما يبين الشكل 1-13 إلى نوعين رئيسيين هما[14]:

- عمليات حرارية كيميائية (Thermochemical) وهي العمليات التي تعتمد على استخدام الوقود الأحفوري كالغاز الطبيعي وتشمل طريقة إصلاح الميثان بالبخار (Steam methane reforming, SMR)، وطريقة الأكسدة الجزئية (Partial Oxidation)، وطريقة الإصلاح الحراري التلقائي (Autothermal Reforming). كما تضم هذه المجموعة طريقة تغويز الفحم (Coal Gasification) المستخدمة في إنتاج الهيدروجين من الفحم.

- عمليـات كهروحراريـة (Electrothermal) وهي التي تعتمـد على التحليـل الكهربائي للماء، باستخدام جهاز التحليل الكهربائي في وجود مصدر للكهرباء.

الشكل 1-13: تصنيف العمليات التي تستخدم في إنتاج الهيدروجين من المصادر المختلفة



وتعد عملية إصـــلاح الميثان بالبخار الأكثر شـــيوعاً في الاســـتخدام بين كافة العمليات الحرارية الكيميائية عالمياً، بينما تمثل عملية التحليل الكهربائي للماء الطريقة الكهروكيميائية المستخدمة.

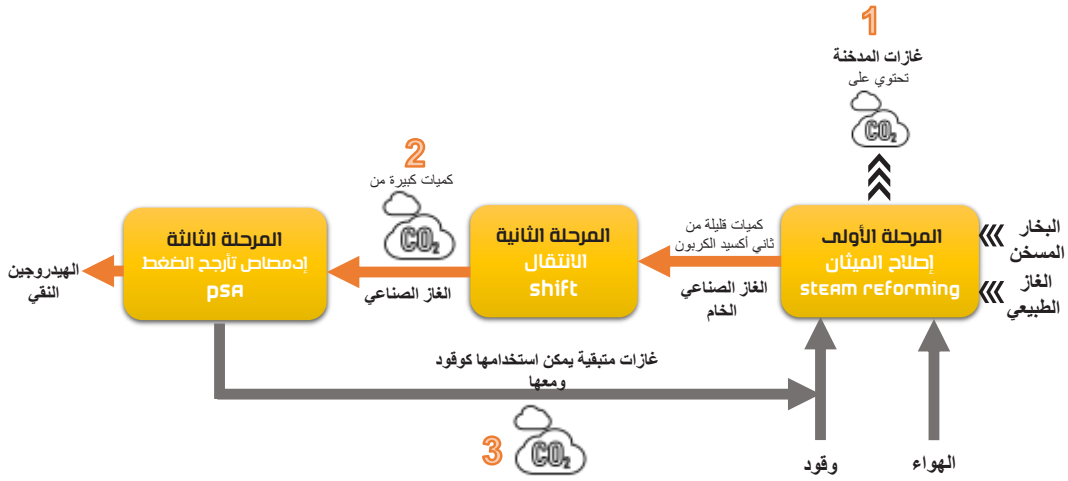
- **إنتاج الهيدروجين باستخدام طريقة إصلاح الميثان بالبخار (SMR)[15]**

تعد طريقة إصـــلاح الميثان بالبخار الطريقة الرئيســـية المســـتخدمة في إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي الذي يمثل الوقود والمادة الخام (مع الماء) في نفس الوقت في العملية. كما يمكن أن تســـتخدم نفس الطريقة في إنتاج الهيدروجين من أي مصـــدر للميثان مثل الغاز الحيوي. وفيها تتم عملية إنتاج الهيدروجين على ثلاث مراحل حيث يتم في المرحلة الأولى تسخين البخار إلى نحو 700-1000 درجة مئوية، ليتفاعل مع الميثان تحت ضـــغط 3-25 بار في وجود عامل حفاز، وينتج عن التفاعل

تكون كلا من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون أو ما يعرف باسم الغاز الصناعي ($CO+H_2$)، بالإضافة إلى كميات قليلة من ثاني أكسيد الكربون.

وفي المرحلة الثانية يتفاعل أول أكسيد الكربون مع البخار المسخن في وجود عامل حفاز (Water-Gas Shift Reaction) لينتج عن هذا التفاعل مزيد من غاز الهيدروجين ومعه ثاني أكسيد الكربون. أما في المرحلة الثالثة والأخيرة، فيتم فصل ثاني أكسيد الكربون والشوائب الأخرى من الهيدروجين لإنتاج الهيدروجين النقي كما يبين الشكل 1-14. وتعد عملية إصلاح الميثان بالبخار ماصة للحرارة (Endothermic) حيث يُستهلك نحو 30-40% من الغاز لتوفير الحرارة اللازمة لإحداث التفاعل بين الميثان والبخار. علاوة على أنها تتسبب في توليد انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون تصل إلى 10 طن لكل طن من الهيدروجين (في حالة استخدام الغاز الطبيعي). كما تستهلك عملية إصلاح الميثان بالبخار نحو 4.5 لتر لكل كجم من الهيدروجين المنتج، وهي أقل الطرق استهلاكاً للماء.

الشكل 1-14: طريقة إصلاح الميثان بالبخار لإنتاج الهيدروجين



وللتخلص من الانبعاثات الناتجة من تلك العملية للتحويل من الهيدروجين الرمادي إلى هيدروجين أزرق، يمكن استخدام تقنية اصطياد واستخدام وتخزين

الكربون (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) والتي تساهم في تقليل الانبعاثات في النقاط 1,2,3 بالشكل السابق ليصل التخفيض الإجمالي إلى 90%، لكنها ستزيد التكلفة الرأسمالية بنحو 50%، والتكلفة التشغيلية بنسبة 100%.

- **إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي (Hydrolysis)**

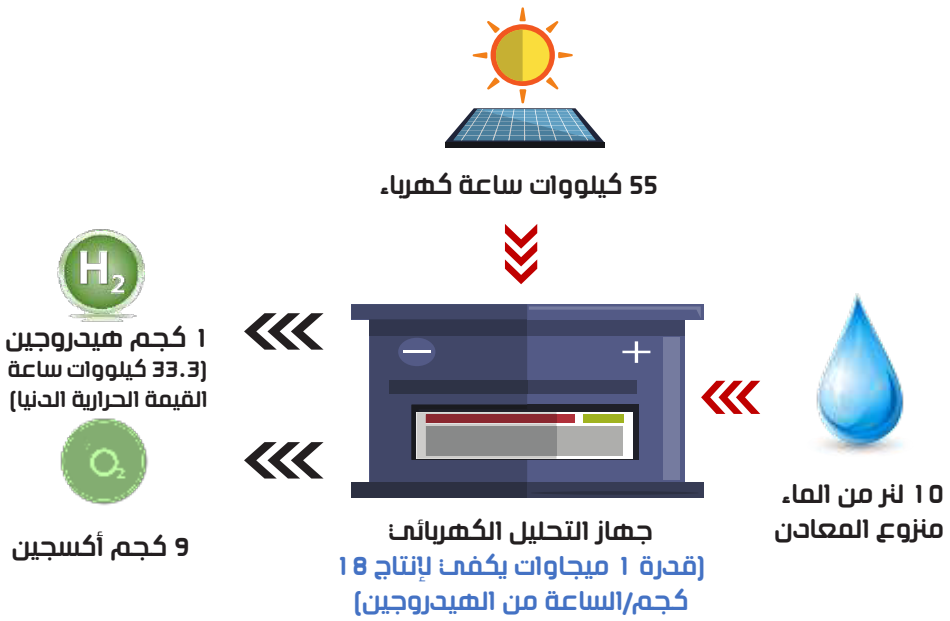
يتم في هذه العملية تحليل جزئ الماء إلى الأكسجين والهيدروجين، باستخدام تيار كهربائي مع غشاء (Membrane). وتتطلب عملية إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي، مياه ذات نقاوة عالية لتجنب التفاعلات والمشاكل الجانبية التي تتسبب فيها الأملاح المذابة في المياه الطبيعية، لذا عادة تضم أجهزة التحليل الكهربائي (Electrolysers) أجهزة تنقية للحصول على مياه صالحة للاستخدام في العملية. وينتج مع كل واحد كجم من الهيدروجين نحو 9 كجم من الأكسجين كمنتج ثانوي ويمكن تصريفه في الهواء أو استخدامه في التطبيقات الصناعية والطبية، بينما لا ينتج عنها أية انبعاثات من غاز ثاني أكسيد الكربون. ويشكل إنتاج الهيدروجين بهذه الطريقة نحو أقل من 1% من الإنتاج العالمي، وهي تنتج هيدروجين عالي النقاوة يمكن استخدامه مباشرة في التطبيقات النهائية دون الحاجة إلى تنقيته من الأكسجين.

أما من جانب الطاقة المستهلكة، فيستهلك جهاز التحليل الكهربائي ±55 كيلووات ساعة (عند الطاقة القصوى) لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين (القيمة الحرارية الدنيا لواحد كجم تعادل 33.3 كيلوات ساعة) باستخدام نحو 10 لتر من الماء منزوع المعادن (Demineralized Water). ويكفي جهاز تحليل كهربائي بقدرة 1 ميجاوت لإنتاج 200 متر مكعب في الساعة من الهيدروجين (عند الظروف العادية) وهو ما يعادل نحو 18 كجم / الساعة[16] كما يبين الشكل 1-15.

وهناك ثلاث أنواع من أجهزة التحليل الكهربائي تشمل جهاز التحليل الكهربائي القلوي (Alkaline Electrolysis, AE)، وجهاز التحليل الكهربائي بغشاء تبادل

البروتونات Polymer Exchange Membrane (PEM)، وخلايا تحليل الأكاسيد الصلبة (Solid Oxide Electrolysis Cells, SOEC)[17]. وتعد أجهزة التحليل الكهربائي القلوي (AE) التكنولوجيا الأقدم في الاستخدام عالمياً ويعود ذلك إلى عام 1920، كما أنها الأقل في التكلفة الرأسمالية. بينما بدأ استخدام أجهزة التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتونات خلال حقبة الستينيات من القرن الماضي للتغلب على المشاكل التشغيلية لأجهزة التحليل الكهربائي القلوي، ويتواجد منها الأجهزة الأعلى في السعة التصميمية عالمياً بقدرة 10 ميجاوات. أما خلايا تحليل الأكاسيد الصلبة فهي التكنولوجيا الأحدث ولكنها لا تزال في طور التطوير ولم تصل بعد إلى حد التشغيل التجاري. وقد وصل إجمالي السعات المركبة للأجهزة المركبة عالميا لأغراض الطاقة إلى نحو 95 ميجاوات موزعة في 100 مشروع حول العالم. وعالمياً، يوجد عدد لا بأس به من الشركات المصنعة لأجهزة التحليل الكهربائي، ولكنها تنتج أجهزة بقدرات محدودة في حدود 1 ميجاوات.

الشكل 1-15: متطلبات الماء والكهرباء لإنتاج 1 كجم من الهيدروجين باستخدام جهاز التحليل الكهربائي



وتختلف أنواع أجهزة التحليل سالفة الذكر فيما بينها من عدة جوانب منها كفاءة التشغيل وضغط وحرارة التشغيل، والمساحة المطلوبة، والتكلفة الرأسمالية كما يلخص الجدول 1-4.

الجدول 1-4: المقارنة بين أجهزة التحليل الكهربائي

وجه المقارنة	الوحدة	AE	PEM	SOEC
كفاءة التشغيل	%	77-63	60-56	81-74 (معمل)
ضغط التشغيل	بار	30-1	80-30	1
حرارة التشغيل	مئوية	80-60	80-50	1000-6500
المساحة	متر^2/كيلووات	0.095	0.048	-
التكلفة الرأسمالية	دولار/كيلووات	1400-500	1800-1100	5600-2800
درجة نضوج التكنولوجيا	-	مستخدمة تجاريا منذ 100 عام	مستخدمة تجاريا للتطبيقات الصغيرة	في مرحلة التجارب المعملية
قدرة الجهاز	كيلو وات	5300-1.8	1150-0.2	
طاقة إنتاج الهيدروجين	متر^3/الساعة	760 – 0.25	240 – 0.01	
استهلاك الطاقة (عند الطاقة القصوى)	كيلو وات/ متر^3	5.4-5	5.4-5	-
استهلاك المياه (مياه الصنبور)	لتر/ كجم هيدروجين	19	16	-
تكلفة إنتاج الهيدروجين على طول العمر الافتراضي (LCOH)	دولار/كجم	4.78-5.84	7.43-6.08	-

المصدر: أوابك استناداً إلى بيانات تم تجميعها من :

- IEA; Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells[18]
- Hydrogenics company
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization(CSIRCO)

ومن الأمور الهامة في اختيار أجهزة التحليل الكهربائي تكلفة إنتاج الهيدروجين على طول العمر الافتراضي (Levelized Cost Of Hydrogen, LCOH) وهي

تأخذ في الاعتبار عدة عوامل كما يبين الشكل 1-16، تشمل سعر الكهرباء المستخدمة، كفاءة التشغيل التي ترتفع كلما زادت طاقة المنشأة وهي تتراوح بين 63-77% حسب نوع الجهاز. والتكلفة الرأسمالية المطلوبة التي تقل مع زيادة اقتصاديات الحجم (Economies of Scale). كما يعد معامل القدرة (Capacity Factor) من العوامل المؤثرة فكلما زادت فترة تشغيل الجهاز كلما كان العائد منه أعلى وفترة استرداد التكاليف أسرع. ولتحقيق ذلك، يجب ألا يقل معامل القدرة عن 60-70%، إلا أن ذلك بدوره يشكل تحدياً كبيراً في حال استخدام محطات الطاقة المتجددة كمصدر للكهرباء، كونها تتسم بانخفاض معامل القدرة لها والذي تتراوح قيمته بين 10-21% للخلايا الكهروضوئية، و23-44% لتوربينات الرياح المقامة على البر.

الشكل 1-16: العوامل المؤثرة على تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام أجهزة التحليل الكهربائي

1-4: تخزين ونقل الهيدروجين

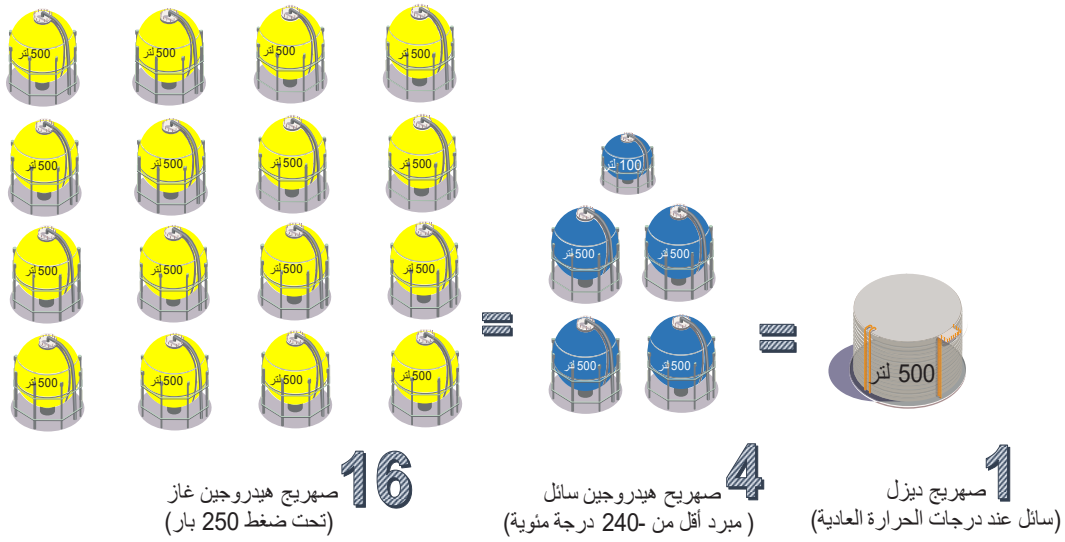
1-4-1: خيارات تخزين الهيدروجين

يعد تخزين الهيدروجين من التحديات الرئيسية للتوسع في استخدامه كمصدر للطاقة في المستقبل، وذلك بسبب انخفاض قيمة كثافة الطاقة له مقارنة بأنواع الوقود الأخرى وبالتالي زيادة الحجم اللازم للتخزين (الكثافة تتناسب عكسيا مع الحجم). وهذا

التحدي ينطبق على تخزين الهيدروجين في مواقع الإنتاج (والتصـــدير) وكذلك في تطبيقات الاســتخدام النهائي مثل تخزين الهيدروجين في مراكز التوزيع، ومحطات إعادة التعبئة بالوقود للمركبات العاملة بخلايا الوقود.

فصـــهريج واحد معبأ بالديزل ســـعة 500 لتر، يكافئ (على أســـاس القيمة الحرارية) صـهريج آخر مضـغوط (عند ضـغط 250 بار) معبأ بغاز الهيدروجين ولكن بســـعة 8000 لتر أي ســـيحتاج مســـاحة أكبر بمقدار 16 مرة، بينما إذا تم تحويله إلى هيدروجين سـائل عند الضـغط الجوي، فسيكافئ صـهريج سـعة 2100 لتر أي بمسـاحة أكبر بمقدار 4.2 مرة كما يبين الشـــكل 1-17. ويعتمد تخزين الهيدروجين في الوقت الراهن على اســـتخدام صـــهاريج تخزين ذات طاقات صـــغيرة في مواقع الاســـتهلاك كمصـافي التكرير لعدم الحاجة إلى كميات ضخمة.

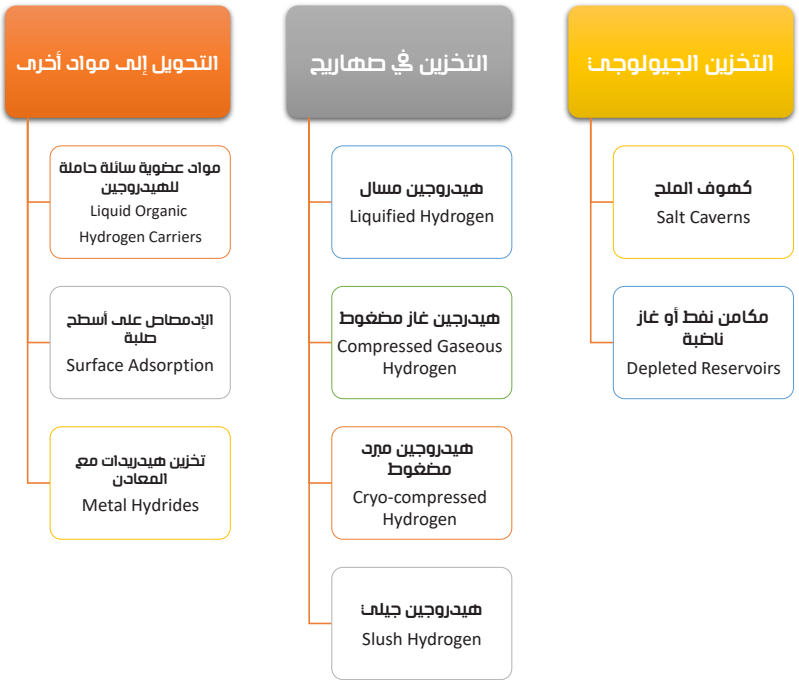
الشكل 1-17: مقارنة المحتوى الحراري لخزان معبأ بوقود الديزل سعة 500 لتر في حال استبداله بالهيدروجين السائل والهيدروجين الغازي



ولكن لكي يصـــبح الهيدروجين مكوناً من مكونات نظام الطاقة العالمي وإنشـــاء سلسلة قيمة له ذات مرونة عالية وسهلة التشغيل، فلابد من وجود عدة خيارات تسمح

بتخزين الهيدروجين بسعات تخزينية عالية. ففي محطة الإنتاج أو التصدير، لابد من توافر سعات تخزينية كبيرة للهيدروجين قبل مواعيد الشحن بفترة كافية كما هو الحال في محطات تصدير الغاز الطبيعي المسال. أما في تطبيقات الاستخدام في السوق المحلي مثل محطات إعادة تعبئة المركبات بالهيدروجين، يجب أن يتم تخزين الهيدروجين بسعات كافية تسمح بالتشغيل المنتظم للمحطة دون حدوث اضطرابات أو توقفات في عمليات الإمداد. وبخلاف ذلك، فإن تحول الهيدروجين إلى مكون رئيسي لمنظومة الطاقة المستقبلية في بلد أو سوق ما يتطلب توفير سعات تخزينية كافية لتلبية ذروة الطلب اليومي على الكهرباء أو خلال فترة التقطع الناتجة عن استخدام مصادر الطاقة المتجددة. وتتلخص الطرق الرئيسية في تخزين الهيدروجين في ثلاث خيارات[19] هي التخزين الجيولوجي إما في تجاويف الملح أو مكامن نفط وغاز ناضبة، أو مكامن الماء واستخدام طرق التخزين الفيزيائي في صهاريج التخزين وتخزين الهيدروجين في مواد أخرى عبر الإدمصاص على أسطح المواد أو التخزين في مواد عضوية سائلة كما يبين الشكل 1-18.

الشكل 1-18: طرق تخزين الهيدروجين



- **التخزين الجيولوجي للهيدروجين (Geological Storage)**

يعد التخزين الجيولوجي للهيدروجين في كهوف الملح (Salt Caverns) أو مكامن نفط وغاز ناضبة (Depleted Oil & Gas Reservoirs) أو مكامن الماء (aquifers) من الطرق الفعالة لتخزين كميات كبيرة منه لتغطي الاستهلاك لفترات طويلة. وهي تتسم بانخفاض التكلفة التشغيلية التي تبلغ نحو 0.6 دولار/طن هيدروجين بينما تصل كفاءتها إلى 98%. وتعد طريقة تخزين الهيدروجين في كهوف الملح أكثر الطرق شيوعاً في الاستخدام، وقد بدأ استخدامها منذ عقود في قطاع الصناعات الكيماوية في كلا من الولايات المتحدة الأمريكية والمملكة المتحدة على وجه الخصوص. وهي تتسم بارتفاع القدرة التخزينية، ففي الولايات المتحدة يكفي كهف ملح واحد لتلبية متطلبات الاستهلاك المحلي في منطقة صناعية لنحو 30 يوما بمعدل 10-20 ألف طن. أما خيارات التخزين الجيولوجي الأخرى مثل مكامن النفط الناضبة فهي لا تزال أقل شيوعاً من كهوف الملح لكنها تتمتع بقدرات تخزينية عالية.

- **التخزين الفيزيائي في صهاريج**

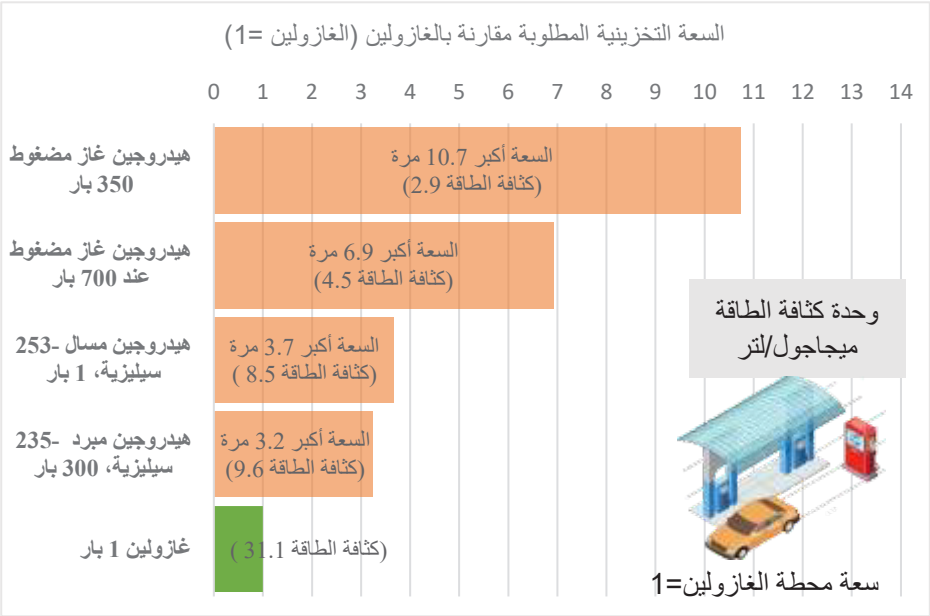
تعد صهاريج التخزين، الطريقة التقليدية لتخزين كافة أنواع الوقود سواء في مواقع الإنتاج أو في محطات التوزيع. ونظراً لانخفاض كثافة الطاقة للهيدروجين في حالته الغازية التي تبلغ 0.01 ميجاجول/ لتر عند الضغط الجوي، فلا بد من رفعها أولاً لتقليل السعة التخزينية المطلوبة. ويتم ذلك إما عبر إسالة الهيدروجين بالتبريد (هيدروجين مسال) أو ضغطه (هيدروجين غاز مضغوط) أو مزيج من العمليتين (هيدروجين مبرد مضغوط).

ففي حالة ضغط الهيدروجين عند 350 بار، ترتفع كثافة الطاقة إلى 2.9 ميجاجول/ لتر. بينما إذا تم رفع الضغط إلى 700 بار، ستصل إلى 4.5 ميجاجول/ لتر.

أما عند تحويل الهيدروجين إلى هيدروجين مسال بتبريده إلى -253 درجة مئوية، فتصل كثافة الطاقة إلى 8.5 ميجاجول/ لتر. وفي حالة تطبيق مزيج من العمليتين أي ضغط الهيدروجين بعد تبريده، فسترتفع الكثافة إلى 9.6 ميجاجول/لتر. كما يمكن الوصول بدرجة تبريد الهيدروجين إلى درجة تجمده (-259 درجة مئوية) والتي يصبح عندها عبارة عن مزيج من الحالة السائلة والحالة الصلبة أشبه بالجيلي (هيدروجين جيلي Slash Hydrogen)، لتصل كثافته إلى 9.8 ميجاجول/لتر.

يبين الشكل 1-19، القيم المختلفة لكثافة الهيدروجين عند ظروف مختلفة من الضغط والحرارة، ومقارنة السعة التخزينية المطلوبة للهيدروجين في حالة إنشاء محطة لإعادة تعبئة المركبات به بالمقارنة مع محطة غازولين، فمثلا في حالة استخدام صهاريج لتخزين غاز الهيدروجين المضغوط عند 350 بار، ستكون السعة التخزينية المطلوبة أكبر بأكثر من 10 مرات مقارنة بالغازولين بينما ستقل إلى 3 مرات أكبر تقريبا في حالة الهيدروجين المبرد لـ -235 مئوية ومضغوط عند 300 بار.

الشكل 1-19: مقارنة السعة التخزينية المطلوبة للهيدروجين في حالة إنشاء محطة لتعبئة المركبات مع محطة لتعبئة الغازولين



وأياً كانت الطريقة المستخدمة، فهي ستتطلب تكاليف كبيرة لإنشاء صهاريج من مواد تتحمل الضغط العالي أو صهاريج مخصصة معزولة جيداً لضمان الحفاظ على برودة الهيدروجين المسال، علاوة على الطاقة المطلوبة في عملية الضغط أو التبريد.

- **التخزين عبر التحويل إلى مواد أخرى**

يعد تخزين الهيدروجين في مواد أخرى مثل المعادن أو الهيدريدات، أحد طرق التخزين التي تمكن من رفع كثافة الهيدروجين وبالتالي تسمح بتخزين كميات كبيرة منه عند ظروف الضغط الجوي العادي لكنها لا تزال في مراحل التطوير الأولى.

كما يمكن تحويل الهيدروجين إلى أمونيا (NH_3) باستخدام طريقة تعرف باسم Haber-Bosh يتفاعل فيها الهيدروجين مع النيتروجين في وجود عامل حفاز. والأمونيا تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين، كونها تتسم بالكثافة العالية التي تصل إلى 121 كجم /متر مكعب (عند -33 درجة مئوية وضغط 1 بار)، وبالتالي تستطيع الأمونيا تخزين كمية أكبر بنحو 1.7 مرة مقارنة بالهيدروجين المسال (كثافة الهيدروجين المسال تبلغ 70.8 كجم/متر مكعب)، ويحتوي واحد طن من الأمونيا على نحو 177 كجم من الهيدروجين.

والأمونيا تكون في الحالة الغازية عند درجة حرارة الغرفة، ويمكن تحويلها إلى الحالة السائلة بالتبريد إلى -33 درجة مئوية بالمقارنة مع -153 درجة مئوية في حالة الهيدروجين المسال وبالتالي تكون تكلفة نقل الأمونيا السائلة أقل من تكلفة الهيدروجين المسال، كما يمكن تطبيق الضغط بدلا من التبريد. ولكن في المقابل، تستهلك عملية تحويل الهيدروجين إلى أمونيا كمية من الطاقة تعادل 7-18% من الطاقة المتواجدة في الهيدروجين، ونفس القدر في حالة إعادة تحويلها مجدداً إلى هيدروجين في السوق المستهلكة. كما تعد الأمونيا مادة سامة وهو الأمر الذي قد يحد من استخدامها في

التطبيقات النهائية. وبالرغم من إمكانية استخدام الأمونيا نفسها كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية إلا أن الاحتراق غير الكامل لها قد يؤدي إلى هروب كميات منها مسببة تلوث للبيئة بالجسيمات الدقيقة. ويتواجد عالمياً شبكة كبيرة من خطوط نقل وتوزيع الأمونيا في عدد من المناطق من أبرزها الصين. يلخص الجدول 1-5، أبرز مزايا وعيوب طرق تخزين الهيدروجين سالفة الذكر، مع احتياجاتها من الطاقة مقدرة بالـ كيلووات ساعة لكل كجم من الهيدروجين.

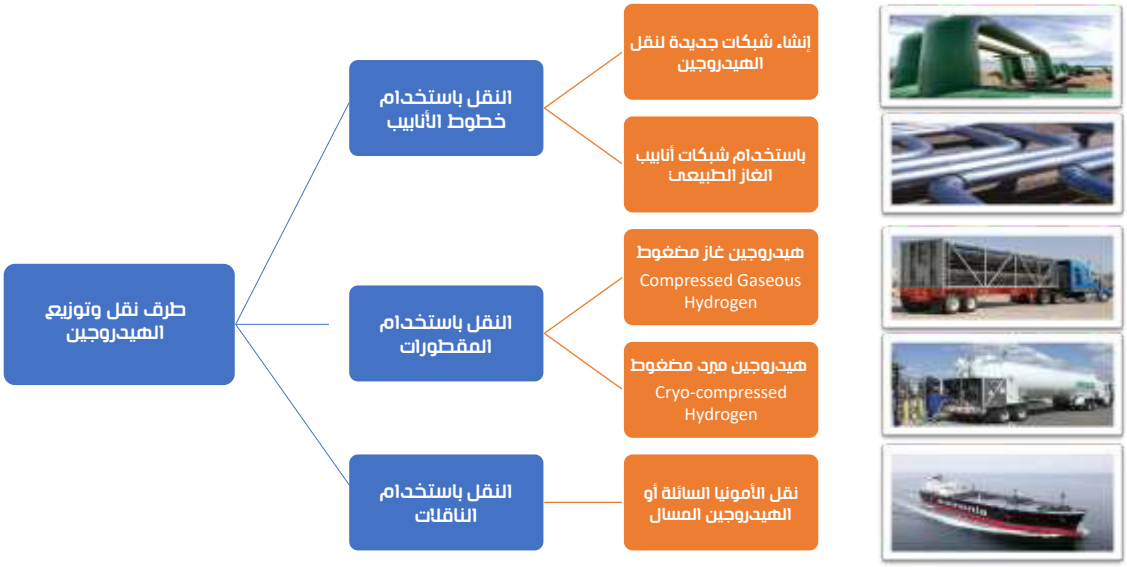
الجدول 1-5: مزايا وعيوب طرق تخزين الهيدروجين والطاقة المطلوبة

وجه المقارنة	مزايا	عيوب	الطاقة كيلووات ساعة /كجم هيدروجين
التخزين الجوفي	• تخزين كميات كبيرة بتكلفة منخفضة • فعالة لتلبية التغيرات الموسمية في الطلب على الهيدروجين • ارتفاع كفاءة التشغيل	• تقتصر جغرافيا على بعض المناطق حيث تنتشر في الولايات المتحدة وأوروبا على وجه الخصوص	0.8-0.2
صهاريج التخزين (عند ضغط منخفض، 30 بار و 25 مئوية)	• تكنولوجيا مثبتة واسعة التطبيق • تكلفة منخفضة نسبياً	• لا تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين • تحتاج إلى مساحة تخزين كبيرة	0.8-0.2
صهاريج التخزين (عند ضغط مرتفع، 350 بار و25 مئوية)	• تكنولوجيا مثبتة واسعة التطبيق • تكلفة منخفضة نسبياً	• لا تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين، وإن كانت أعلى من صهاريج الضغط المنخفض • مستهلكة للطاقة بشكل أكبر في عملية الضغط	4.4
صهاريج التخزين (هيدروجين مسال او مسال ومضغوط)	• تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين • تقلل من الفاقد أثناء التخزين	• تحتاج إلى صهاريج من مواد خاصة للحفاظ على برودة الهيدروجين • مستهلكة للطاقة بشكل أكبر لغرض الضغط والتبريد	13-10
تحويل الهيدروجين إلى أمونيا (ضغط 10 بارو 25 درجة مئوية)	• لديها بنية تحتية قائمة • تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين تزيد 1.7 مرة لنفس الحجم مقارنة بالهيدروجين المسال	• تحتاج إلى تشغيل الوحدات بشكل مستمر • الأمونيا مادة سامة • تحتاج إلى طاقة إضافية أثناء تحويل الهيدروجين إلى أمونيا وعند إعادة الأمونيا إلى هيدروجين	3-2 كيلووات ساعة لكل كجم أمونيا و 8 كيلووات ساعة لكل كجم هيدروجين في حال إعادة التحويل

1-4-2: نقل وتوزيع الهيدروجين

تمثل عمليات نقل وتوزيع الهيدروجين تحدياً كبيراً من الناحية الاقتصادية لارتفاع تكلفة نقله لمسافات طويلة مقارنة بأنواع الوقود الأخرى بسبب القيمة المتدنية لكثافة الطاقة. وتتم عملية نقل وتوزيع الهيدروجين إما باستخدام خطوط الأنابيب من مواقع الإنتاج إلى مناطق الاستهلاك، أو باستخدام المقطورات وفي هذه الحالة يمكن نقل الهيدروجين إما في الحالة السائلة أو في الحالة الغازية تحت ضغط مرتفع، أو النقل باستخدام الناقلات بعد تحويل الهيدروجين إلى أمونيا لنقله إلى الأسواق البعيدة عن مناطق الإنتاج كما يبين الشكل 1-20.

الشكل 1-20: خيارات نقل وتوزيع الهيدروجين

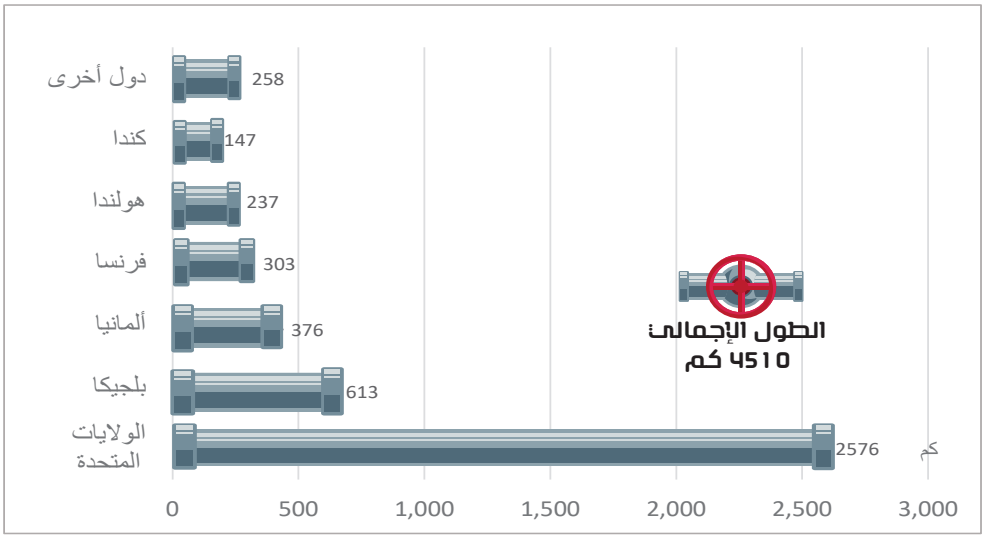


- **نقل الهيدروجين باستخدام خطوط الأنابيب**

تعد خطوط الأنابيب، الطريقة الأفضل لنقل كميات كبيرة من الهيدروجين خاصة وأنها قد تُستخدم نفسها كطريقة تخزين له. لكن في المقابل تتطلب ضخ استثمارات أولية ضخمة لبناء شبكات لربط مواقع الإنتاج بمراكز الاستهلاك في

السوق المحلي لبلد ما وكذلك لربط عدة أسواق ببعضها لإنشاء سوق تجاري للهيدروجين في المستقبل عابر للحدود على غرار أسواق الغاز الطبيعي الإقليمية مثل السوق الأوروبي أو السوق الأمريكي. عالمياً، توجد شبكات لنقل وتوزيع الهيدروجين تعمل بالفعل ولكنها تقتصر على ربط مواقع الإنتاج بالقطاعات المستهلكة له في مناطق صناعية محددة وتعود ملكيتها إلى الشركات المنتجة للهيدروجين والتي تستخدمها لنقل الهيدروجين إلى المنشآت الصناعية مثل مصافي التكرير. ويقع القسم الأكبر من شبكات نقل وتوزيع الهيدروجين في الولايات المتحدة الأمريكية ويصل مجموع أطوالها إلى 2600 كم. بينما تتوزع الشبكات المتبقية في عدد محدود من الدول الأوروبية كما يبين الشكل 1-21، وإجمالا ويصل الطول الإجمالي لشبكات نقل وتوزيع الهيدروجين عالمياً إلى حوالي 4510 كم.

الشكل 1-21: توزع شبكات نقل الهيدروجين عالمياً



المصدر: Shell

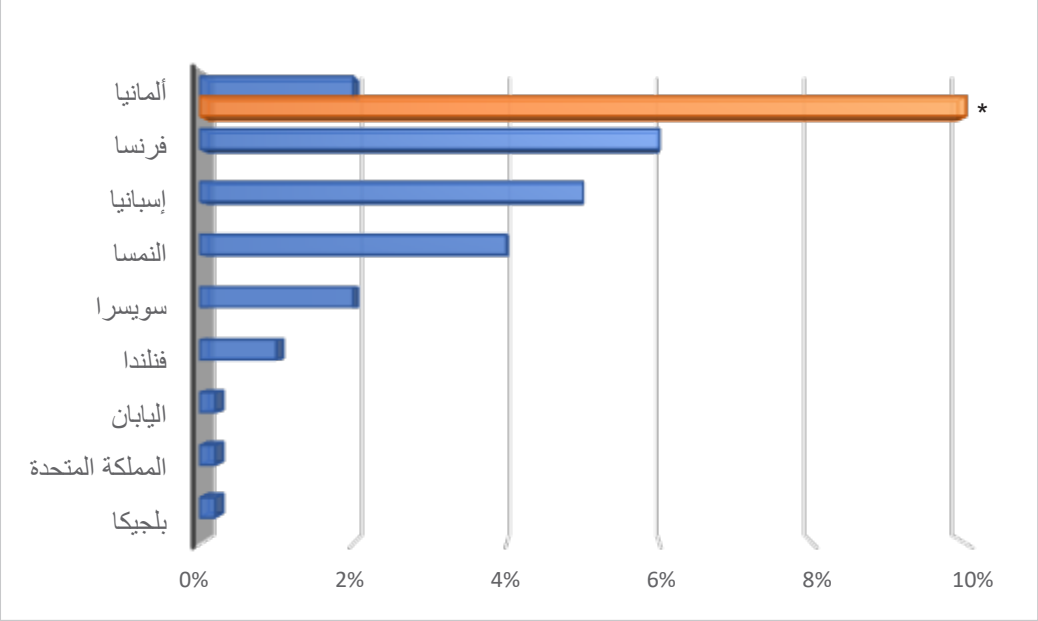
وللتغلب على التكلفة الرأسمالية الكبيرة لبناء شبكات جديدة للهيدروجين، برز خيار استخدام شبكات نقل الغاز الطبيعي الحالية في نقل الهيدروجين بعد التغلب على المعوقات الفنية. فصناعة الغاز الطبيعي راسخة منذ عدة عقود، وتمتلك شبكات نقل

وتوزيع واسعة النطاق تنتشر في العديد من دول العالم يصل مجموع أطوالها إلى قرابة 3 مليون كم. واستخدام شبكات الغاز الطبيعي لنقل الهيدروجين ليس بالأمر الجديد، بل كان الغاز الطبيعي الغني بالهيدروجين يستخدم مطلع القرن العشرين كغاز للمدينة (City Gas) في عدة دول من بينها بريطانيا والولايات المتحدة. حيث كانت تصل نسبة الهيدروجين في مخلوط الغاز إلى نحو 50%، لكن في نفس الوقت كانت الأجهزة المستخدمة آنذاك (الطهي والتدفئة) مصممة للعمل مع الغاز الغني بالهيدروجين.

وبناء على هذا الإرث القديم، بدأت بعض الدول في دراسة الحدود القصوى المسموح بها لخلط الهيدروجين مع الغاز في شبكات نقل الغاز القائمة دون أن يتسبب ذلك في ضرر على المستخدمين النهائيين أو يتطلب تحويلات جوهرية في شبكات الغاز التي ستقوم بنقل الخليط الجديد. وبرزت عدة دراسات حول هذا الموضوع منها دراسة أعدتها وزارة الطاقة الأمريكية، وتوصلت إلى إمكانية خلط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي حتى 15% حجماً مع إدخال بعض التعديلات المتوسطة على شبكات الغاز القائمة في الولايات المتحدة. بينما سيتطلب الأمر تعديلات ضخمة بتكاليف أكبر إذا تم تحويلها لنقل الهيدروجين النقي (أي 100% هيدروجين)، وبطبيعة الحال أعباء إضافية على المستخدمين النهائيين بسبب الحاجة إلى تعديل جوهري أو تعديل للأجهزة المنزلية للعمل على الخليط الجديد. أما في أوروبا، فيوجد العديد من أجهزة الطهي والتدفئة التي تم إنتاجها مؤخراً مجهزة للعمل مع خليط الغاز الطبيعي مع الهيدروجين حتى نسبة 23%، لكن يبقى الأثر على العمر الافتراضي للأجهزة غير معلوم. وبخلاف التحدي التقني لرفع نسبة الهيدروجين في الخليط مع الغاز الطبيعي ومدى إمكانية تأهيل الشبكات والتطبيقات النهائية للعمل به، هناك أيضاً مشكلة إضافية تتعلق بالقيمة الحرارية للهيدروجين التي تقل كثيراً عن القيمة الحرارية للغاز الطبيعي نفسه، وعليه سيضطر المستخدمين النهائيين إلى رفع معدلات استهلاكهم من الوقود الجديد لتلبية نفس احتياجاتهم الأصلية.

عالمياً تختص الشركات المشغلة لشبكات نقل وتوزيع الغاز الطبيعي بوضع الحدود المسموح بها لنسبة الهيدروجين في الغاز الطبيعي تلبية للمواصفات المطلوبة لبعض القطاعات. ففي القطاع الصناعي على سبيل المثال، تشترط الشركات المشغلة ألا تزيد نسبة الهيدروجين عن 2% كحد أقصى، وذلك للتعامل دون حدوث مشاكل تشغيلية مع الأجهزة وأنظمة التحكم في المنشآت الصناعية التي صممت على هذا الأساس. ولذلك، فإن التوسع في استخدام الهيدروجين في القطاع الصناعي عبر خلطه بنسب عالية مع الغاز الطبيعي لابد وأن يسبقه تعديل لتلك الأجهزة وأنظمة التحكم للتوافق مع الخليط الغازي الجديد، وتغيير أيضا في اللوائح التنظيمية الوطنية التي تضع تلك الضوابط والمواصفات القياسية. فكما يبين الشكل 1-22، تختلف الدول فيما بينها حسب نسبة الهيدروجين المسموح بها محليا في خليط الغاز، حيث تتراوح النسبة بين 2و6%، وتصل إلى 10% في ألمانيا ولكن في حالات محددة.

الشكل 1-22: الحد الأقصى للهيدروجين في شبكات نقل الغاز الطبيعي في دول مختارة



*يسمح حتى 10% كحد أقصى للهيدروجين للمناطق التي لا يتواجد فيها محطات للغاز الطبيعي المضغوط متصلة بالشبكة

المصدر: وكالة الطاقة الدولية IEA

- **نقل الهيدروجين باستخدام المقطورات**

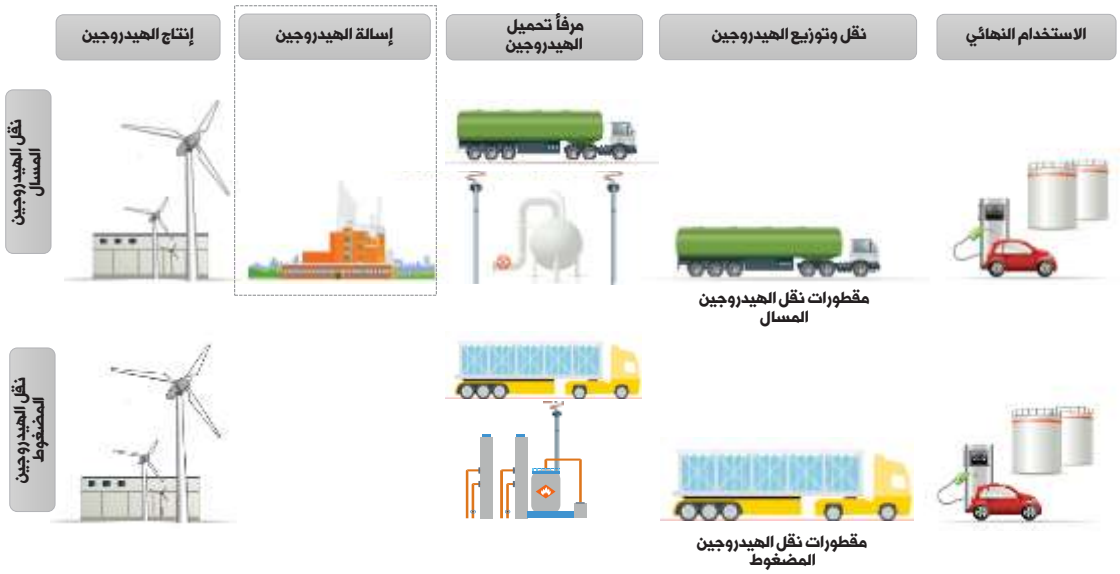
يعد استخدام المقطورات في نقل الهيدروجين الطريقة الرئيسية المستخدمة حالياً على نطاق تجاري في نقل الهيدروجين إلى مناطق استهلاكه، وهي فعالة في نقل كميات صغيرة إلى متوسطة. وهناك عدة خيارات لنقل غاز الهيدروجين المضغوط باستخدام المقطورات[20]، فللكميات الصغيرة يمكن استخدام مقطورة بوعاء، وللكميات الأكبر يمكن استخدام مقطورة مزودة بعدة أسطوانات لتشكل حزمة من الأنابيب (Tube Trailer) معبأة بالهيدروجين المضغوط ويتم وضعها داخل هيكل معدني للحماية. وقد تتراوح كمية غاز الهيدروجين المضغوط التي يمكن نقلها باستخدام المقطورات بين 500-1000 كجم وعند ضغط 250-500 بار، لكنها تتطلب أسطوانات بمواصفات خاصة من الصلب لتحمل الضغوط المرتفعة. أما في حالة نقل الهيدروجين المسال، فتستطيع المقطورة حمل كتلة أكبر من الهيدروجين لارتفاع كثافته مقارنة بغاز الهيدروجين المضغوط والتي قد تصل إلى 70.8 كجم/متر مكعب، فمقطورة ذات حجم 50 متر مكعب، تستطيع حمل ما يعادل نحو 3500 كجم من الهيدروجين المسال. لكنها في نفس الوقت ستتطلب صهاريج خاصة معزولة جيداً لضمان الحفاظ على الهيدروجين عند درجة حرارة أقل من -253 درجة مئوية، علاوة على التكلفة الإضافية المطلوبة لإسالة الهيدروجين في محطة التحميل كما يبين الشكل 1-23. ويمكن للمقطورات نقل الهيدروجين المسال لمسافات بعيدة لغاية 4000 كم كحد أقصى لتلافي تبخر كميات كبيرة منه بفعل الحرارة المحيطة أثناء الرحلة، وعادة ما يتم تفريغ بخار الهيدروجين الذي تكون أثناء الرحلة عند الوصول إلى وجهة التسليم.

- **نقل الهيدروجين باستخدام الناقلات**

تعد الناقلات من الطرق الممكنة لنقل الهيدروجين بعد تحويله إلى أمونيا، وذلك للمسافات البعيدة وتتراوح حجم الناقلة بين 30000-80000 متر مكعب[21]. ومن

المرجح أن تكون الطريقة الرئيســـية للتجارة الدولية للهيدروجين مثل الغاز الطبيعي المسال. الجدول 1-1، أبرز سمات المقارنة بين كافة الطرق سالفة الذكر.

الشكل 1-23: خيارات نقل الهيدروجين باستخدام المقطورات



الجدول 1-6: مقارنة بين طرق نقل الهيدروجين المختلفة

وجه المقارنة	شبكات نقل الهيدروجين	شبكات نقل الغاز الطبيعي	مقطورات نقل الهيدروجين المضغوط	مقطورات نقل الهيدروجين المسال	ناقلات نقل الأمونيا
التكلفة الرأسمالية	تكلفة باهظة لبناء شبكات جديدة	تكلفة قليلة في حال نقل خليط الغاز والهيدروجين حتى 20% وأعلى في حال نقل الهيدروجين النقي	تكلفة رأسمالية قليلة نسبياً	تكلفة رأسمالية أعلى بسبب الحاجة إلى إسالة الهيدروجين التي تشكل وحدها 50% من إجمالي التكلفة	تكلفة رأسمالية عالية
السعة	مرتفعة (أعلى من 1000 كجم في اليوم)	مرتفعة (أعلى من 1000 كجم /اليوم)	حتى 1000 كجم	حتى 4000 كجم	30,000- 80,000 متر مكعب أمونيا
المسافة	1000-4000 كم	1000-4000 كم	1000 كم	حتى 4000 كم حد أقصى لتقليل الفاقد	أعلى من 4000 كم
أبرز التحديات	استثمارات باهظة وطول الوقت اللازم للتنفيذ	تعديلات ضخمة بتكاليف أكبر إذا تم تحويلها لنقل الهيدروجين النقي	إنشاء صهاريج تتحمل الضغوط المرتفعة في حال نقل كميات كبيرة	• إنشاء صهاريج تحافظ على درجات الحرارة المنخفضة جدا للهيدروجين • فاقد البخر 0.3% يوميا	الأمونيا مادة سامة وقد تسبب أضراراً للبيئة البحرية

الفصل الثاني:

دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة

2-1 : السوق الحالي للهيدروجين

2-2: تطبيقات استخدام الهيدروجين

2-3: المبادرات الدولية لدور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة

2-1: السوق الحالي للهيدروجين

2-1-1: تطور الطلب العالمي على الهيدروجين

يقدر إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين في تطبيقات الاســتخدام النهائي (End-use Applications) بنحو 115 مليون طن/السنة، وذلك وفق أحدث البيانات المتوفرة (بيانات عام 2018)[22]، ما يعادل نحو 13.9 إكســاجول (EJ)[1]، أو ما يمثل نحو 4% من الاستخدام النهائي من الطاقة.

ويمثل الطلب على الهيدروجين النقي (Pure Hydrogen) قرابة ثلثي إجمالي الطلب العالمي بإجمالي 72 مليون طن/الســنة كما يبين الشــكل 2-1، حيث يعد قطاع تكرير النفط وصــناعة الأمونيا المســتهلكين الرئيســيين للهيدروجين النقي بحصــة 33%و27% من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين. أما التطبيقات الأخرى التي تســتهلك الهيدروجين النقي فتشــمل قطاع النقل (باســتخدام خلايا الوقود) وبعض الصناعات الأخرى مثل صناعة الزجاج والالكترونيات وغيرها، وتشكل مجتمعة نحو 4% تقريباً من إجمالي الطلب العالمي.

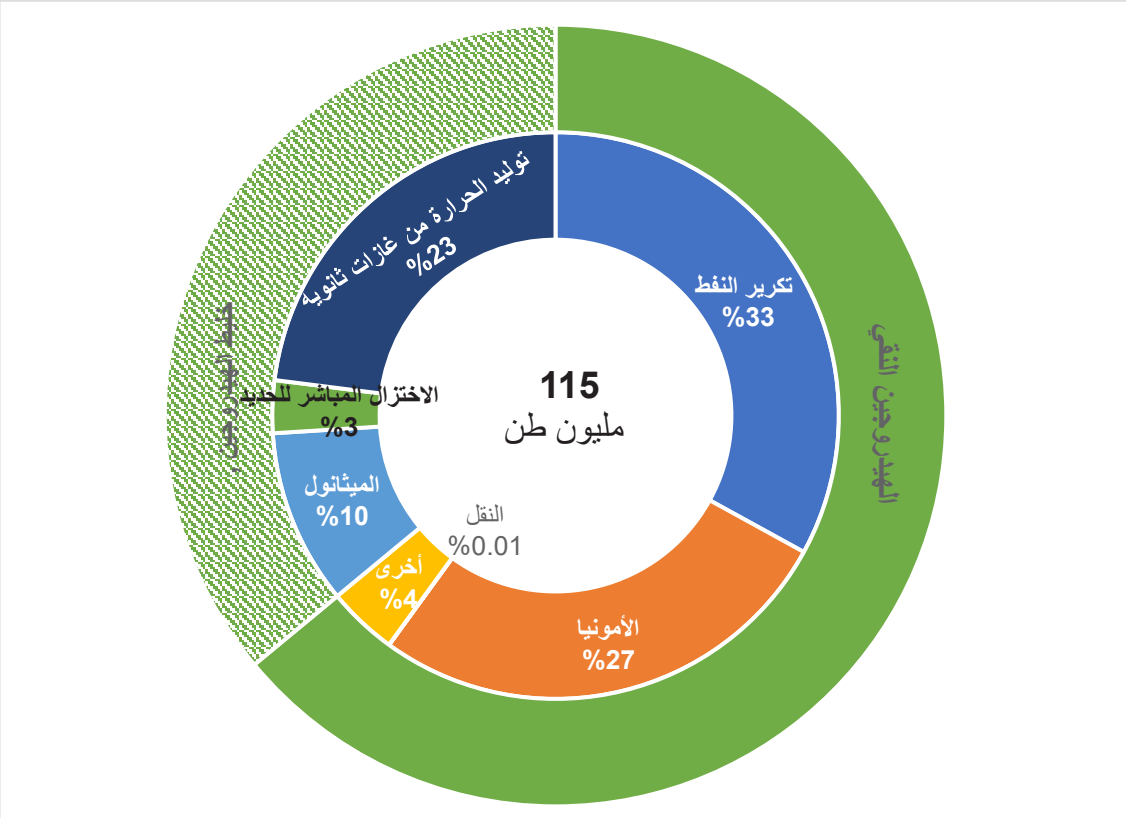
بينما يمثل الطلب على خليط الهيدروجين مع غازات أخرى قرابة ثلث الطلب العالمي بإجمالي 43 مليون طن/الســنة، ويشــمل ذلك إنتاج الميثانول ويمثل 10% من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين، وتوليد الحرارة من خليط الغازات الناتجة عن تصــنيع الفولاذ (Steelworks Arising Gases) بحصــة 23%، وإنتاج الحديد عبر الاختزال المباشــر (Direct Reduced Iron Steel, DR) والذي يســتخدم فيه خليط الهيدروجين مع أول أكسيد الكربون بحصة 3%.

---

[1] يمثل 8.3 مليون طن من الهيدروجين نحو 1 إكساجول (1 إكساجول= 10^{18} جول)

وينحصر استخدام الهيدروجين في التطبيقات الصناعية كمادة خام (Feedstock) في تلك الصناعات، مثل صناعة الأمونيا التي تنتج عبر التفاعل بين الهيدروجين والنيتروجين في وجود عامل حفاز، ومادة الميثانول التي تعتمد على التفاعل بين الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون.

الشكل 2-1: توزيع الطلب العالمي على الهيدروجين (الهيدروجين النقي، وخليط الهيدروجين مع غازات أخرى)



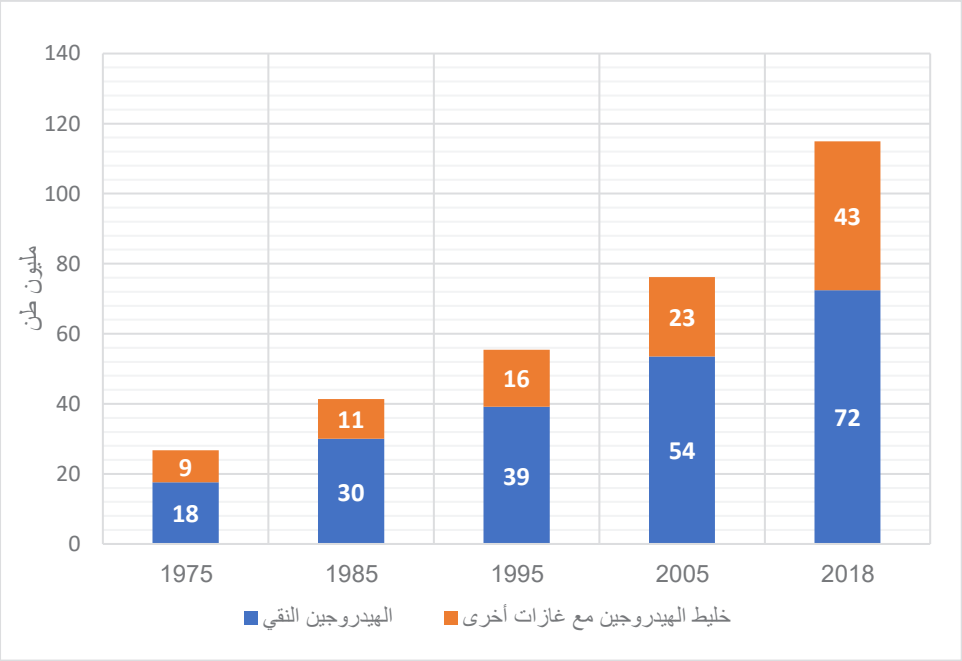
المصدر: معدل عن وكالة الطاقة الدولية IEA

وتتسم الصناعات التي يساهم فيها الهيدروجين سواء كان نقياً أو داخل خليط مع غازات أخرى مثل "خليط الهيدروجين مع أول أكسيد الكربون"، بأنها صناعات ذات استثمارات باهظة، ويعد الطلب على الهيدروجين فيها مرتفعاً وباقتصاديات ضخمة، حيث يمثل ذلك نحو 135.5 مليار دولار[23].

ويشـهد الطلب على الهيدروجين في القطاع الصـناعي نمواً سـنوياً مسـتمراً، فخلال الفترة 1975-2018، ارتفع الطلـب الإجمـالي من 27 مليون طن إلى 115 مليون طن محققاً نمواً إجمالياً 325% كما يبين الشـكل 2-2، وعلى حسـب نوع الهيدروجين، فإن النمو الإجمالي للطلب على الهيدروجين النقي قد بلغ خلال نفس الفترة نحو 300%، بينما بلغ لخليط الهيدروجين مع الغازات الأخرى نحو 377%.

وعليه يمكن اسـتنتاج أن السـوق الحالي للهيدروجين هو سـوق ضـخم ومتنام وتقوم عليه العديد من الصناعات إلا أن دوره الرئيسي لا يزال ينحصر على استخدامه كمادة خام لتلك الصـناعات، ولم يشـهد بعد نمواً ملحوظاً في مجال اسـتخدامه كحامل للطاقة (Energy Carrier).

الشكل 2-2: تطور الطلب العالمي على الهيدروجين خلال الفترة 1975-2018



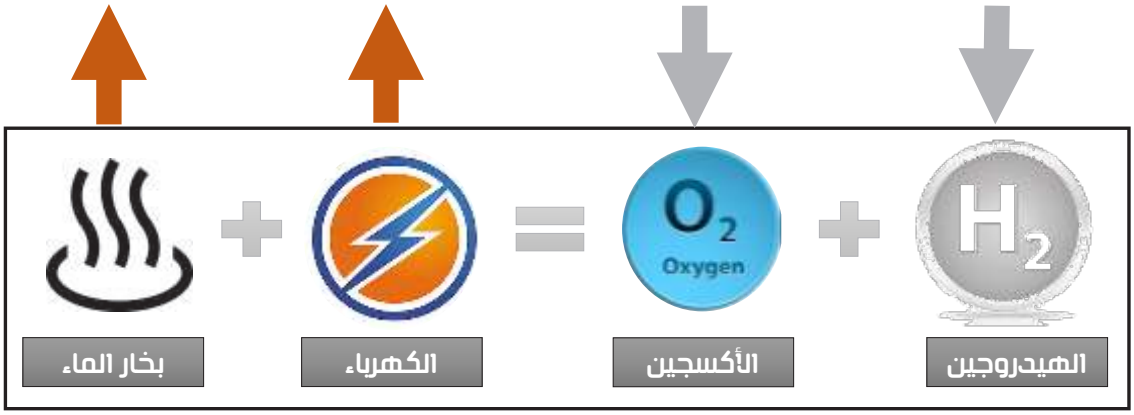
مصدر البيانات: وكالة الطاقة الدولية

2-1-2: الهيدروجين كمصدر للطاقة: التطبيقات الحالية

بجانب الاستخدام الرئيسي للهيدروجين كمادة خام في الصناعات المختلفة، يوجد أيضاً عدد من المجالات التي يستخدم فيها الهيدروجين كمصدر للطاقة ومنها قطاع النقل والقطاع السكني عبر استخدام ما يعرف باسم خلايا الوقود (Fuel Cell).

ومبدأ خلية الوقود هو عكس مبدأ التحليل الكهربائي للماء كما يبين الشكل 2-3، حيث تقوم خلية الوقود بتوليد طاقة كهربائية ذات جهد منخفض عبر التفاعل بين الهيدروجين والأكسجين، والذي ينتج عنه أيضاً الماء، وبالتالي فإن بنية خلية الوقود لا تختلف عن بنية أي خلية كهروكيميائية أخرى[24]. ويعد بخار الماء هو المنتج الثانوي الوحيد من خلية الوقود، ولا تنتج أية انبعاثات أخرى، وبالتالي فهي صديقة للبيئة.

الشكل 2-3: مبدأ عمل خلية الوقود العاملة بالهيدروجين



وبالرغم من تكلفتها المرتفعة، إلا أن خلايا الوقود لديها العديد من المزايا أبرزها ارتفاع الكفاءة بسبب التحويل المباشر من الطاقة الكيميائية إلى الطاقة الكهربائية دون فقد يذكر بالإضافة إلى تكاليف الصيانة المنخفضة. كما لا يصدر عن عملها أي ضوضاء وهادئة في التشغيل علاوة على أنها صديقة للبيئة، ولا تستغرق وقت كبير في عملية إعادة التعبئة مجدداً.

وتضـم منظومة خلايا الوقود مجموعة من خلايا الوقود المتصـلة مع بعضـها البعض على التوالي ضمن ما يعرف باسم Stacks. وكأي خلية كهروكيميائية تحتوي خلية الوقود على قطب موجب (الأنود) وقطب سـالب (الكاثود) بينهما موصـل (الالكتروليد) مع دائرة كهربائية التي سـيمر من خلالها التيار الكهربائي عند حدوث التفاعل. تجارياً هناك نحو خمس مجموعات من خلايا الوقود حسـب نوع الالكتروليد المستخدم ودرجة الحرارة التي تعمل عندها الخلايا[25]، وهي تختلف فيما بينها من حيث كفاءة التشـغيل، والقدرة الكهربائية، وطبيعة المادة المؤكسـدة (أكسـجين نقي أم هواء) كما يبين الجدول 2-1.

الجدول 2-1: أنواع خلايا الوقود، والتطبيقات المختلفة لها

النوع	نوع الالكتروليد	درجة الحرارة، سيليزية	القدرة	الكفاءة	العمر، ساعة	التكلفة دولار/ك.وات	التطبيقات
AFC	هيدروكسيد البوتاسيوم	90-60	250 ك. وات	%60-50	8000-5000	700-200	الفضاء، الغواصات
PEMFC	بوليمر	180-50	حتى 400 ك.وات	%60-30	60000	400-300	المركبات
PAFC	حمض الفسفوريك	-160 220	حتى 100 ميجاوات	%40-30	60000-30000	6000-4000	محطات الكهرباء
MCFC	كربونات	-600 700	من 100 ك.وات حتى ميجاوات	%60-55	40000-20000	6000-4000	محطات الكهرباء
SOFC	سيراميك صلب(أكسيد)	-700 1000	من 100 ك.وات حتى عدة ميجاوات	%70-50	حتى 90000	4000-3000	محطات الكهرباء

المصدر: Shell

عالميا تعد خلايا الوقود من نوع PEMFC هي الأكثر انتشـاراً في الاسـتخدام في المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEV)، وهو الاسـتخدام الرئيسـي

للهيدروجين كوقود في الوقت الراهن. وتشـــكل المركبات الخفيفة القســـم الأكبر من المركبات العاملة بالهيدروجين، بينما تمثل الحافلات والمقطورات حصة محدودة لكنها تشهد توسعاً من عام إلى عام في عدة دول.

ويستخدم لتخزين الهيدروجين على متن المركبات الخفيفة صهريج سعة 5 كجم من الهيدروجين مضغوط 700 بار، ويكفي لقطع مسافة 530 كم (معدل 106 كم/كجم من الهيدروجين)[26]. ورغم ارتفاع تكلفة إنتاج المركبات من هذا النوع إلا أن لديها عدة مميزات حتى بالمقارنة مع المركبات الكهربائية أبرزها كفاية الوقود لقطع مســـافة أطول، وإعادة التعبئة السريعة، والصيانة الأقل، كما أنها أطول عمراً كما يبين الشكل 2-4، وهو ما يسمح بخلق سوق واعد لها مستقبلاً. إلا أن المعضلة الرئيسية لها هي عدم رغبة قائدي المركبات في الشـــراء قبل وجود محطات كافية لتموين المركبات بالهيدروجين، وفي المقابل تتردد الشركات في بناء محطات تموين قبل وجود أسطول كافي من المركبات العاملة بخلايا الوقود.

الشكل 2-4: مزايا المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEVs)

01 تستغرق عملية إعادة التعبئة من 5-20 دقيقة حسب حجم الخزان، بينما يبلغ الوقت في حالة شحن المركبات الكهربائية إلى 8 ساعات

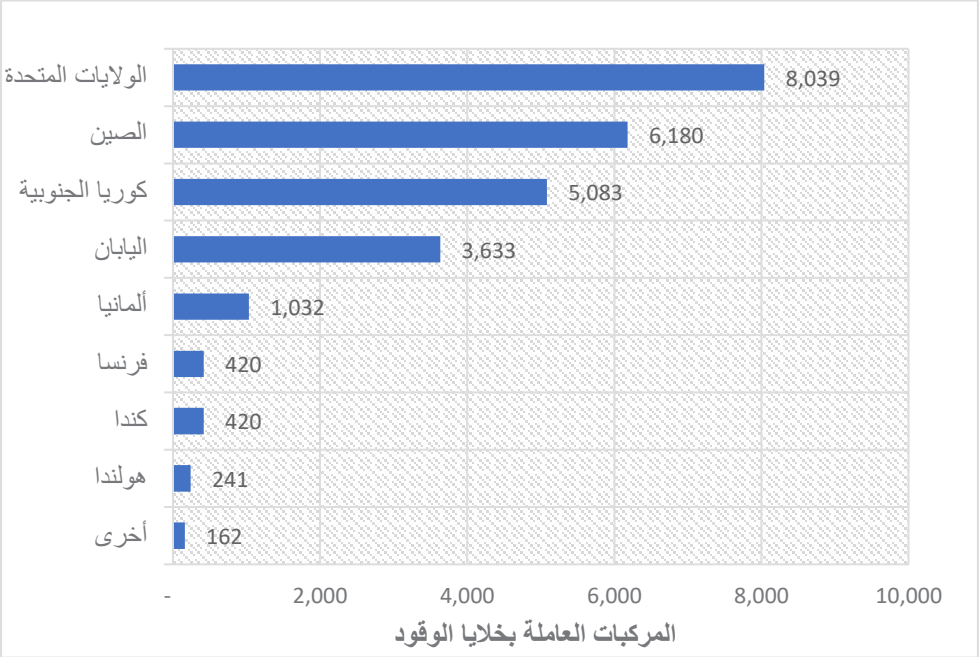
02 يغطي الهيدروجين في خزان سعة 5 كجم حتى مسافة 500 كم مقارنة بـ300 كم في حالة المركبات الكهربائية

03 يصل العمر الافتراضي للمركبات إلى نحو 150 ألف كم، وبتكلفة 60-100 ألف دولار

04 لا ينتج عنها أية انبعاثات، وتتراوح الكفاءة من الخزان إلى العجلات (tank to wheels) بين 43-60%

ومن الملاحظ أن عدد المركبات العاملة بخلايا الوقود في نمو وانتشار مستمر، حيث حقق عام 2019 طفرة غير مسبوقة بعد أن تضاعف الأسطول العالمي بنهاية العام إلى أكثر من 25 ألف مركبة مقارنة بـــ 13 ألف مركبة تقريباً عام 2018[27]. وتتصدر الولايات المتحدة دول العالم بأسطول يضم نحو 8039 مركبة كما يبين الشكل 2-5 وينحصر استخدامه تقريباً في ولاية كولورادو، تليها الصين واليابان وكوريا الجنوبية. كما تستخدم المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود في بعض الدول الأوروبية مثل فرنسا وألمانيا وهولندا وإيطاليا. أما على الصعيد العربي، فقد بدأت السعودية والإمارات في تنفيذ برامج تجريبية لاستخدام المركبات العاملة بخلايا الوقود ويصل الأسطول الإجمالي في كلا البلدين إلى 9 مركبات.

الشكل 2-5: الأسطول العالمي من المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود (FCEV)، نهاية عام 2019

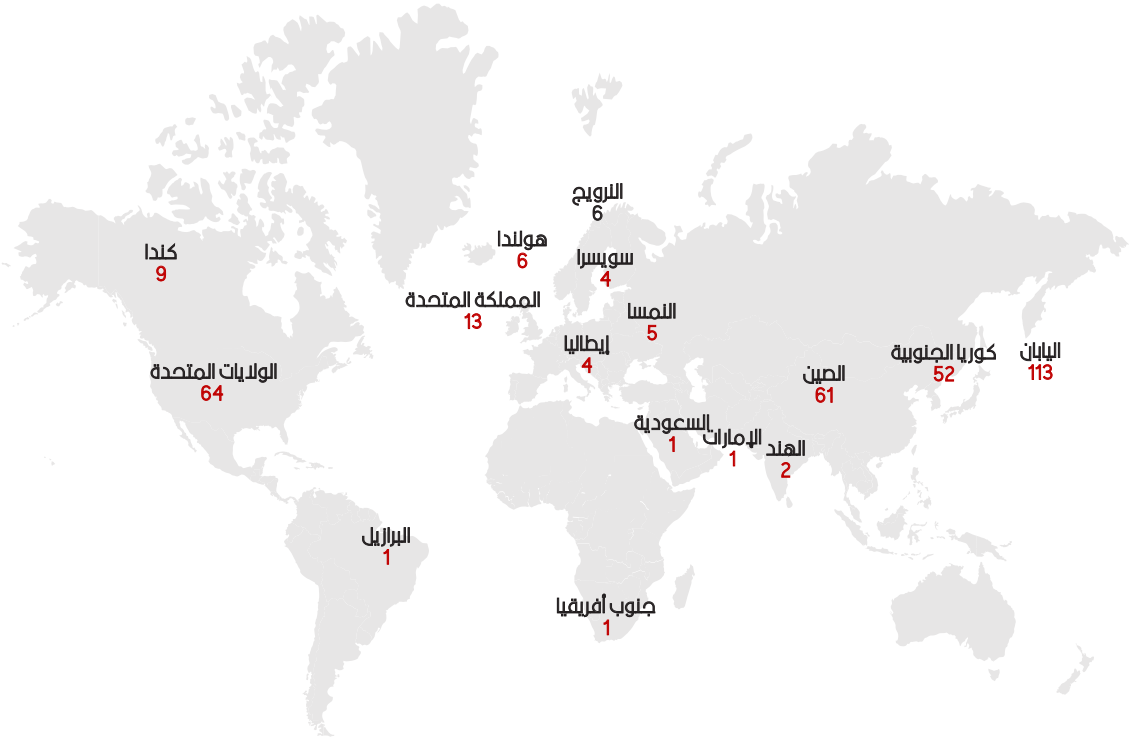


المصدر: بيانات تم تجميعها استناداً إلى عدة مصادر

- IEA, 2019
- International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, IPHF, 2020.
- CARA, Hydrogen Mobility In France, 2019

أما من جانب محطات إعادة التعبئة بالهيدروجين (HRS) وتوزيعها عالمياً، فقد بلغ عددها الإجمالي قرابة 470 محطة كما يبين الشكل 2-6، ولكن تتصدر اليابان دول العالم هذه المرة بإجمالي 113 محطة، ثم ألمانيا بإجمالي 81 محطة والولايات المتحدة بإجمالي 64 محطة والصين 61 محطة. وقد شهد عام 2019 أيضاً طفرة في بناء محطات إعادة التعبئة حيث حقق نمواً قدره 20% مقارنة بعام 2018، منقادة بزيادة عدد المحطات في السوق الصيني التي أدخلت نحو 41 محطة جديدة في عام 2019 وحده. كما يوجد في المنطقة العربية، محطتين لتموين المركبات بواقع محطة في كل من الإمارات والسعودية.

الشكل 2-6: توزيع محطات إعادة التعبئة بالهيدروجين عالمياً



ولا شك أن ازدياد عدد محطات تموين المركبات بالهيدروجين بالتزامن مع نمو عدد المركبات العاملة بخلايا الوقود سيساهم في ضمان عدم تكدس المركبات أمام المحطات مستقبلاً، لذلك عادة يراعى التناسبية بين إنشاء المحطات ونمو أسطول المركبات في المنطقة/الدولة الراغبة في التوسع في استخدام الهيدروجين كوقود للنقل.

2-1: دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة

2-1-1: لماذا الهيدروجين؟

تشـــير عملية تحول الطاقة إلى التغيرات الهيكلية المطلوبة في منظومة الطاقة لتسـمح بالتخلص التدريجي من الممارسـات التي تؤدي إلى انبعاثات غازات الاحتباس الحراري للوصـــول إلى نظام خالي من الكربون. وفي هذا الصـــدد، أعلنت العديد من الدول عن اسـتراتيجياتها لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري ومن ثم تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسـيد الكربون. ويعد التوسـع في مصـادر الطاقة المتجددة في قطاع توليد الكهرباء أحد أبرز الحلول التي يمكن الاعتماد عليها في عملية تحول الطاقة ومن ثم تطبيق " نموذج الكهرباء" أي الاعتماد على الكهرباء (المتجددة) في شـــتى القطاعات وهو ما وهو ما يعرف باسم "كهربة القطاعات" (Electrification). فتلك المصـادر متوافرة بكثرة في عدة مناطق، ولا ينتج عنها أية انبعاثات، ولكن في المقابل لا تزال تواجه جملة من التحديات الفنية والاقتصـادية التي تعيق اسـتخدامها على نطاق واسـع للوصـــول إلى مسـتقبل خالي من الكربون. حيث ثبت عملياً أن نموذج الكهرباء مكلف للغاية، وتحقيق نزع للكربون منه بشكل عميق سيأخذ وقتاً طويلاً علاوة على صعوبة تطبيقه في بعض الصناعات التي تحتاج إلى الوقود الأحفوري.

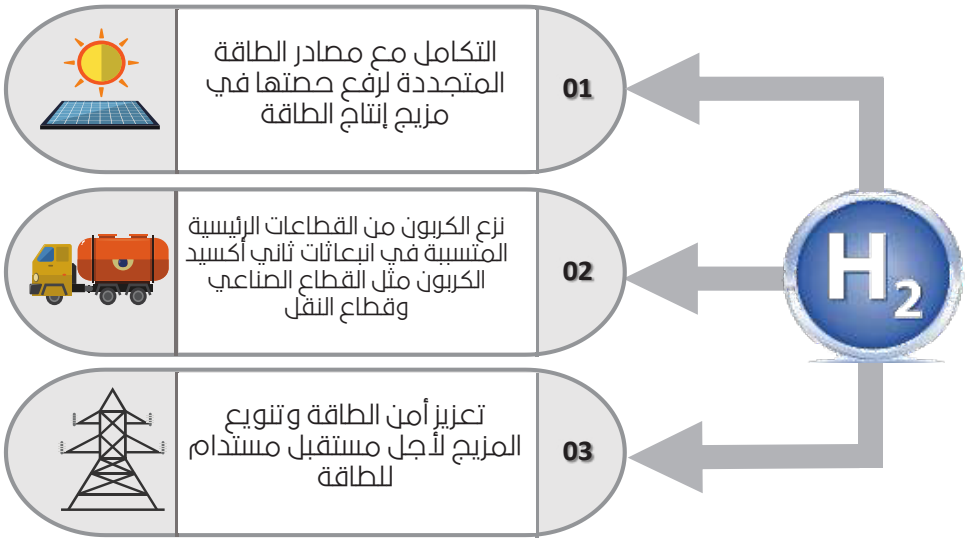
من هنا بدأ الاهتمام يتجه نحو إيجاد بدائل أو مكملات مع مصـــادر الطاقة المتجددة لتحقيق تلك الغاية، حيث برز الهيدروجين كأحد تلك الحلول مكتسـبا زخما دوليا غير مسـبوق حول الدور الذي يمكن أن يسـاهم به في عملية تحول الطاقة وخلق مسـتقبل للطاقة خالي من الكربون. وقد جاء هذا الاهتمام ممثلاً في خطط ومبادرات أعلنتها عدة دول وشـركات عالمية ومنظمات دولية معنية بأمور الطاقة. لكن يبقى سؤال مهم وهو لماذا الهيدروجين على وجه الخصوص.

بداية، يساهم الهيدروجين بشكل كبير في الوقت الراهن في تلبية احتياجات عدد من الصناعات كالأمونيا والسماد، ولا ينتج عن حرق الهيدروجين كوقود أية انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون وبالتالي قد يساهم بشكل فعال في نزع الكربون لمنظومة الطاقة والمساهمة في الحد من ظاهرة تغير المناخ.

ومن ثم فإن استخدام نموذج هجين من الكهرباء والهيدروجين معاً (Electricity-Hydrogen Hybrid Model) من الممكن أن يتغلب على عدة تحديات متعلقة بقطاع الطاقة كما يبين الشكل 2-7 وهي:

- السماح بالتوسع في مصادر الطاقة المتجددة عبر التكامل معها للتغلب على طبيعتها المتقطعة كما هو الحال مع طاقة الرياح والطاقة الشمسية، حيث يمكن إنتاج الهيدروجين وتخزينه لفترات أطول أثناء فترات التقطع لضمان استقرار شبكات الكهرباء، كما يمكن نقله لمناطق لا تتوافر فيها مصادر الطاقة المتجددة.
- يستطيع الهيدروجين نزع الكربون من القطاعات الرئيسية المسببة للانبعاثات والتي لا يمكن تحقيق نجاحاً كبيراً فيها باستخدام بدائل الوقود الأخرى مثل القطاع الصناعي، وقطاع النقل بأذرعه البري والبحري والجوي، حيث تساهم تلك القطاعات مجتمعة بنحو 55% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم. ولا يزال اختراق مصادر الطاقة المتجددة محدودا للغاية في تلك القطاعات، ومن ثم يمكن للهيدروجين لعب دول فعال لتقليل الانبعاثات الناتجة عن تلك القطاعات عبر التوسع في استخدام خلايا الوقود.
- تعزيز أمن الطاقة، عبر تنويع مزيج الاستهلاك وعدم الاعتماد على مصدر أو مصادر محدودة بغية تحقيق مستقبل مستدام للطاقة.

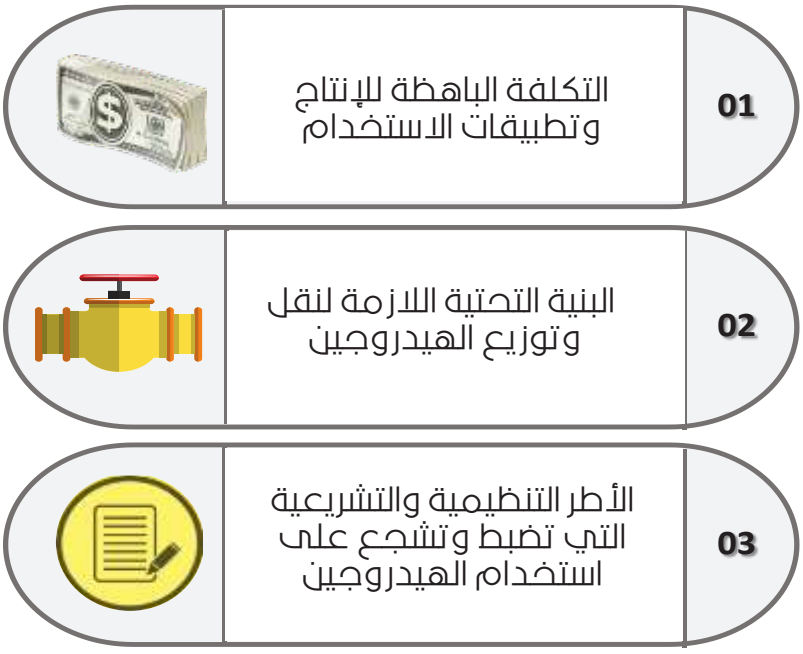
الشكل 2-7: الأدوار التي يمكن أن يساهم بها الهيدروجين في عملية تحول الطاقة



ولكن مع تلك الفوائد التي يوفرها الهيدروجين وما سيخلقها من فرص، هناك أيضاً عقبات يجب العمل على تجاوزها لتحقيق اقتصاد الهيدروجين كما يبين الشكل 2-8، وهي ارتفاع التكلفة التي يجب العمل على تقليلها حيث تصل تكلفة إنتاج الهيدروجين في بعض المناطق إلى نحو خمسة أمثال تكلفة الغاز الطبيعي على سبيل المثال. وضرورة إنشاء بنية تحتية لنقل وتوزيع الهيدروجين بما يسمح بتأسيس تجارة دولية له على غرار النفط والغاز الطبيعي، حيث لا تزال شبكات الهيدروجين محدودة للغاية وتنحصر في مناطق بعينها، ويمثل مجموع أطوالها حوالي 0.2% تقريبا من مجموع أطوال شبكات نقل وتوزيع الغاز الطبيعي عالميا.

أما التحدي الثالث فيتعلق بالحاجة إلى وضع سياسات وإعداد قواعد وإجراءات تنظيمية. حيث يجب على صناع القرار السياسي الإسراع بإدخال التعديلات والتغييرات المطلوبة على الأطر التشريعية والتنظيمية التي تضبط وتشجع على استخدام الهيدروجين في التطبيقات المختلفة.

الشكل 2-8: التحديات التي يجب تجاوزها للتوسع في استخدام الهيدروجين في منظومة الطاقة العالمية



2-1-2: التطبيقات/القطاعات الواعدة للهيدروجين

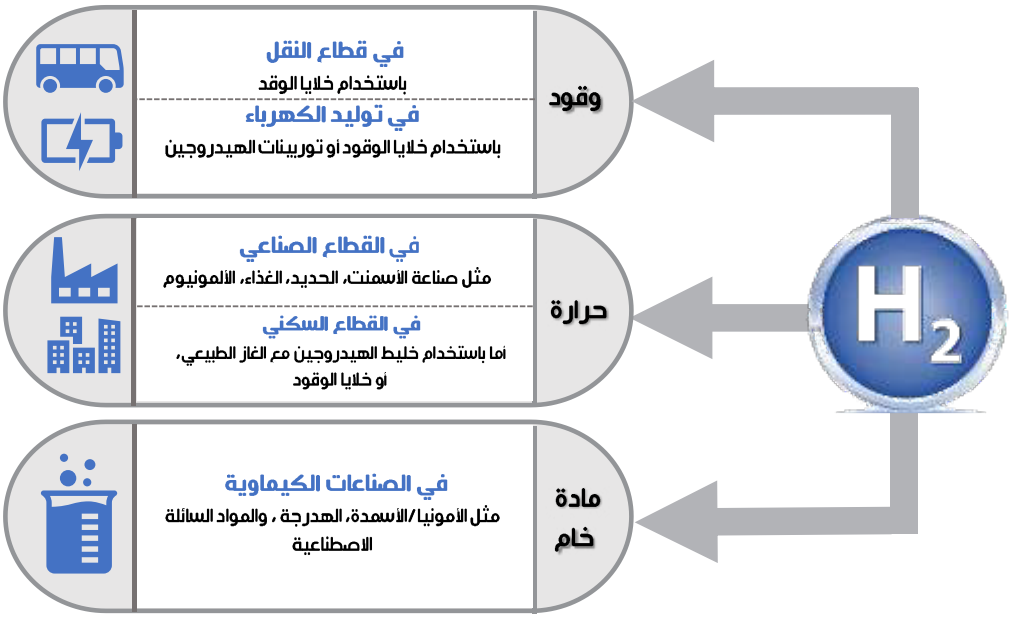
يتوقع أن يكون للهيدروجين مستقبل واعد في عملية تحول الطاقة في عدة قطاعات اقتصادية كما يبين الشكل 2-9، الأمر الذي سيسمح بتقليل الاعتماد على مصادر الوقود الأحفوري نظراً لإمكانية استخدامه مباشرة كمصدر للوقود، أو حامل للطاقة واستخدامه عبر تطبيقات خلايا الوقود، أو كمادة خام للعديد من الصناعات مثل صناعة السماد والمواد الكيميائية وصناعة التكرير. كما يمكن استخدامه لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة مثل صناعة الصلب.

- **قطاع النقل**

يأتي قطاع النقل في مقدمة القطاعات الواعدة للهيدروجين، وبالأخص النقل البري الذي يعد من القطاعات الرئيسية المتسببة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون،

بســـبب اعتمادها شـــبه الكامل على الوقود الأحفوري خاصـــة المنتجات البترولية (الغازولين والديزل).

الشكل 2-9: فرص الهيدروجين في تطبيقات الاستخدام النهائي



وهناك طيف واســـع من التطبيقات التي يمكن أن تســـتخدم فيها خلايا الوقود لتوفير الطاقة المطلوبة لهذا القطاع الضـــخم كما يبين الشـــكل 2-10، حيث يشـــمل ذلك مركبات الأفراد وحافلات نقل الركاب، والمقطورات ذات الخدمة الشـــاقة، علاوة على إمكانية اســـتخدامها في المركبات المســـتخدمة في الأعمال اللوجســـتية ونقل البضـــائع، وشوك الرفع (Forklifts) التي تستخدم في مواقع التخزين والموانئ المختلفة.

ووفقاً للخطط التي أعلنتها عدة دول، من المتوقع أن يشـــهد ســـوق المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود نمواً كبيراً ويكون مكملا ومنافســـاً للمركبات الكهربائية لما توفره تلك المركبات من مزايا. كما تعد خلايا الوقود الخيار الأفضـــل في المركبات ذات الخدمة الشـــاقة التي لا تصـــلح معها البطاريات الكهربائية التي لن تكون ملائمة لطبيعة عمل هذا النوع من المركبات.

الشكل 2-10: تطبيقات خلايا الوقود في قطاع النقل البري

وإجمالا فإن نمو سوق خلايا الوقود العاملة بالهيدروجين سيكون على حساب الوقود الأحفوري المستخدم في قطاع النقل البري في ضوء إعلان بعض الدول عن خططها حظر بيع المركبات الجديدة التي تعمل بنظام الاحتراق الداخلي (ICE) التي تعتمد على الوقود الأحفوري خاصة الديزل والجازولين كما يبين الجدول 2-2.

الجدول 2-2: الدول التي أعلنت حظراً على مبيعات مركبات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالوقود الأحفوري

الدولة	تاريخ الحظر	ملاحظات
المملكة المتحدة	2030	أعلنت الحكومة البريطانية في عام 2020 أنها عدلت خطتها الرامية لحظر بيع مركبات الاحتراق الداخلي لتصبح سارية من عام 2030 بدلا من عام 2040
فرنسا	2040	وضعت فرنسا هدفاً يقضي بإيقاف بيع المركبات التي تعمل بنظام الاحتراق الداخلي والحافلات التجارية ذات الخدمة الخفيفة بداية من عام 2040
ألمانيا	2040	أقرت ألمانيا تشريعاً يقضي بعدم تسجيل المركبات التي تعمل بنظام الاحتراق الداخلي بداية من عام 2030
إسبانيا	2040	أقرت إسبانيا قانوناً يسمح فقط ببيع المركبات التي لا يصدر عنها أيه انبعاثات بداية من عام 2040
هولندا	2025	بداية من عام 2025، سيسمح فقط بالحافلات التي لا تنتج أية انبعاثات، ويسري الأمر على مركبات الأفراد ولكن بداية من عام 2030
كندا	2040	أعلنت كندا على المستوى الوطني أنها تعتزم رفع مساهمة المركبات التي لا يصدر عنها أية انبعاثات تدريجياً بداية من عام 2025 وصولاً إلى 100% بحلول عام 2040 ولكن لم يصدر تشريع ملزم بهذا الخصوص

وفي نفس السـياق، أعلنت عدة دول عن وضـع أهداف وطنية لزيادة عدد المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود ضمن أسطولها البري كما يبين الجـدول 2-3، والتي من شـأنها خلق سـوق واعد للهيدروجين في هذا القطاع جاذب للاسـتثمار وخلق سوق عمل يضم الآلاف من الوظائف المباشرة وغير المباشرة.

الجدول 2-3: الأهداف التي أعلنتها عدة دول في مجال استخدام المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود

الدولة/المنطقة	الحالي/المستهدف	مركبات الأفراد	الحافلات	المقطورات	الشوك الرافعة	محطات التموين
الولايات المتحدة	**الوضع الراهن (منتصف 2020)**	9,000	60	نماذج أولية	35,000	**64**
	المستهدف بحلول عام 2030	الوصول بالعدد الإجمالي للمركبات على الطرق إلى 5,300,000			300000	**7100**
الصين	**الوضع الراهن نهاية عام 2019**	الإجمالي 6,180			-	**61**
	المستهدف عام 2020	3,000	11,600 حافلة	-	-	**100**
	المستهدف بحلول عام 2030	1,000,000	-	-	-	**500**
اليابان	الوضع الراهن **(نهاية 2020)**	3947	99	-	250	**161**
	المستهدف عام 2020	40,000	100	-	500	**160**
	المستهدف عام 2025	200,000	-	-	-	**320**
	المستهدف عام 2030	800,000	1200		10,000	**900**
كوريا الجنوبية	**الوضع الراهن (نهاية 2020)**	10,041	27	-	-	**52**
	المستهدف عام 2022	81,000	-	-	-	**310**
	المستهدف عام 2040	2,900,000	40,000	30,000	-	**1200**
أوروبا	الوضع الراهن **(نهاية 2019)**	1,000	76	100	300	**152**
	المستهدف 2030	3,700,000	45,000 حافلة ومقطورة		-	**3700**

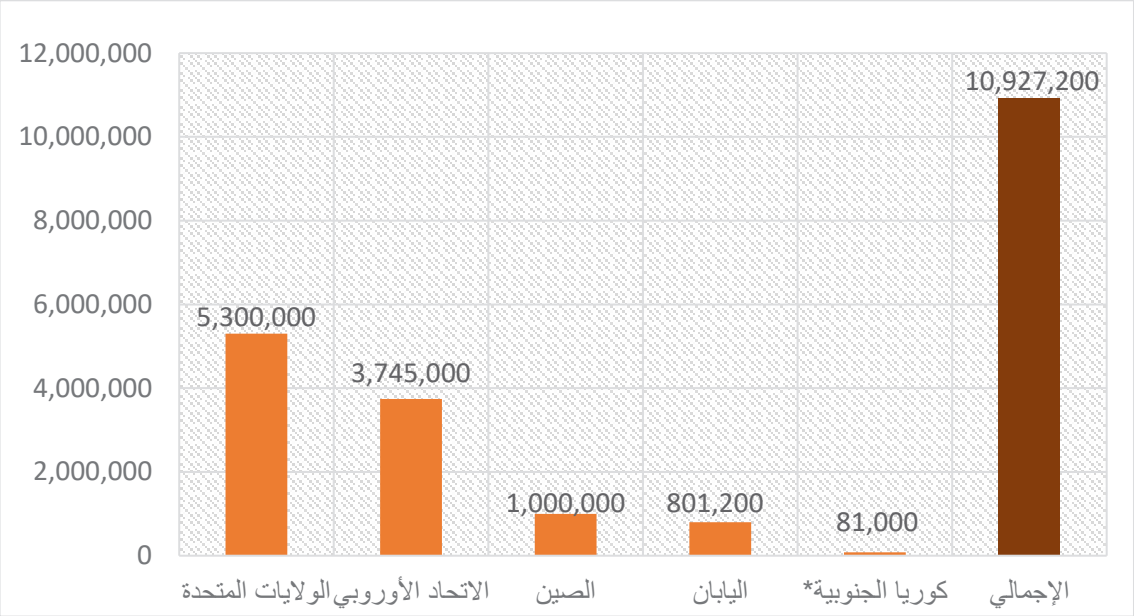
المصدر: أوابك استناداً إلى

- IEA, 2019
- International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, IPHF, 2020.
- IFRI;" Japan's Hydrogen Society Ambition: 2020 Status and Perspectives"; September 2020.
- Hydrogen Energy Ministerial Meeting;" Global Action Agenda Progress Report: the Hydrogen Energy Ministerial 2020"; Online event, October 14, 2020

وفي ضـــوء الخطط المعلنة من قبل بعض الدول الآســيوية والولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي، يتوقع أن ينمو أســطول المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود بشكل غير مسبوق ليصل إلى قرابة 11 مليون مركبة بحلول عام 2030.

واســتناداً إلى تلك الأهداف المعلنة وتحليلها، من المتوقع أن تتصــدر الولايات المتحدة دول العالم في عدد المركبات العاملة بخلايا الوقود بحلول عام 2030 بإجمالي 5.3 مليون مركبة، ثم أوروبا (الاتحاد الأوروبي) بإجمالي 3.75 مليون مركبة، والصين بإجمالي 1 مليون مركبة كما يبين الشكل 2-11. علاوة على الطفرة المتوقعة أيضاً في عدد محطات إعادة التعبئة بالهيدروجين في الدول، وهو الأمر الذي سيسمح بلعب الهيدروجين دوراً رئيسياً في تلبية احتياجات قطاع النقل.

الشكل 2-11: الأهداف المعلنة في عدة دول للمركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود بحلول عام 2030



المصدر: أوابك استناداً إلى البيانات المجمعة من المصادر التالية

- IEA, 2019
- International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, IPHF, 2020.
- IFRI;" Japan's Hydrogen Society Ambition: 2020 Status and Perspectives"; September 2020.
- Hydrogen Energy Ministerial Meeting;" Global Action Agenda Progress Report: the Hydrogen Energy Ministerial 2020"; Online event, October 14, 2020

وتتماشـــى تلـك الأهـداف المعلنـة مع مـا تم إعلانـه في الاجتمـاع الوزاري للهيدروجين (Hydrogen Energy Ministerial) الذي عقد عام 2019 في اليابان بمشـاركة 30 دولة و4 منظمات معنية بشؤون الطاقة، حيث أعلن الاجتماع عن تدشين هدف "10-10-10" وهو بناء أسطول يضم عدد 10 مليون مركبة تعمل بخلايا الوقود و10 آلاف محطة إعادة تعبئة بالهيدروجين خلال فترة 10 ســنوات (أي بحلول عام 2030)[28]. ويبقي هذا أيضـاً هدفاً طموحاً حيث يعني ذلك تصـنيع نحو 1 مليون مركبة، الأمر الذي سيعزز المنافسة بين منتجي السيارات في العالم.

وبخلاف قطاع المركبات الصغيرة، بدأ العمل على اختبار استخدام الهيدروجين في قطاع السكك الحديدية، حيث شهد عام 2019 تشغيل قطارين يعملان بخلايا الوقود في ألمانيا (الشـكل 2-12)، علاوة على خطط معدة لتشـغيل 14 قطار إضـافياً بحلول عام 2022. كما أعلنت كل من إســبانيا وفرنســا وإيطاليا والمملكة المتحدة عن خطط لإدخال الهيدروجين في قطاع السكك الحديدية.

الشكل 2-12: أول قطار يعمل بالهيدروجين في ألمانيا، دخل التشغيل التجاري عام 2019

المصدر: ALSTOM[29]

أما في قطاع النقل البحري، فهناك أيضاً فرصاً واعدة للهيدروجين، خاصة في ضوء الاستراتيجية الجديدة التي أعلنتها المنظمة البحرية الدولية التي تهدف إلى التخلص من 50% من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من قطاع النقل البحري بحلول عام 2050، حيث يمكن للهيدروجين المساهمة في تلبية احتياجات هذا القطاع الحيوي من وقود التموين خاصة أنه يستهلك نحو 4.3 مليون برميل نفط مكافئ/اليوم، أي ما يعادل قرابة 4% من إجمالي الطلب العالمي على النفط[30].

أما في مجال النقل الجوي، يعطي ارتفاع محتوى الطاقة للهيدروجين ميزة هامة لاستخدامه كوقود لقطاع الطيران. وبالرغم من أنه لم يصل بعد إلى مرحلة التطبيق التجاري في قطاع النقل الجوي، إلا أن العديد من الشركات مثل Boeing أبدت اهتماما بتنفيذ مشاريع تجريبية لاستخدام الهيدروجين كوقود للطائرات بغية القضاء على الانبعاثات نهائياً من هذا القطاع بحلول عام 2050. وبخلاف ذلك، يوجد بعض التطبيقات الصغيرة التي تعتمد على خلايا الوقود مثل الطائرات بدون طيار، والطائرات المسيرة وغيرهما.

- **توليد الكهرباء وضمان اتزان واستقرار الشبكات**

يوفر الهيدروجين أيضاً عدة خيارات عند اختياره كوقود في قطاع توليد الكهرباء، حيث يمكن استخدامه كوقود للتوربينات مباشرة أو في أنظمة خلايا وقود ثابتة (Fuel Cells Stationary Systems)، كما يمكن استخدام الأمونيا المنتجة من الهيدروجين في التوليد المشترك بمحطات توليد الكهرباء العاملة بالفحم. ويعد استخدام الهيدروجين في التوربينات من التطبيقات المتاحة تجارياً في الوقت الراهن، ولكنها تعتمد على استخدام خليط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي (حتى 10-15%). إلا أن الأمر يستلزم بعض التعديلات في المعدات والتوصيلات والمرافق للعمل على الخليط الجديد في حال رفع نسبة الهيدروجين عن 15%. وإلى جانب ذلك، بدأت الشركات

المصـــنعة للتوربينات في تطوير توربينات للعمل على الهيدروجين النقي (100% هيدروجين) ويتوقع أن تدخل التطبيق التجاري الواســع بحلول عام 2030. وبخلاف التوليد المباشــر، يمكن أن تســتخدم أجهزة التحليل الكهربائي نفســها في تحقيق اتزان شــبكات الكهرباء مســتقبلاً التي تعتمد على مصــادر الطاقة المتجددة وذلك بتخزين الهيدروجين عند وجود فائض في الطاقة المنتجة ومن ثم اســتخدامه في توليد الكهرباء مجدداً لضمان استقرار الشبكات.

- **قطاع الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة**

يمكن للهيدروجين المساهمة بشكل فعال في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة مثل صناعة الأسمنت وصناعة الصلب والتي يستخدم فيها لتوليد حرارة عالية بدلاً من الغاز الطبيعي الذي ينتج عنه كميات كبيرة من ثاني أكســيد الكربون لإتمام بعض العمليات مثل التغويز أو إذابة الحديد أو التجفيف. فاســتخدام الوقود لأغراض الحرارة في التطبيقات الصناعية (دون احتساب صناعة الصلب) يساهم بنحو 3% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عالمياً. كما يستخدم الهيدروجين كمادة خام في العديد من الصــناعات مثل الأمونيا، والميثانول، وفي صــناعة الغذاء في هدرجة الزيوت، وفي صناعة الزجاج لتوفير وسط محيط مع النيتروجين لمنع الأكسدة.

- **القطاع السكني**

يعد القطاع السكني من القطاعات الرئيسية المستهلكة للطاقة بحصة تمثل ثلث الطلب العالمي ويعود القســم الأكبر من الاســتهلاك إلى أغراض التدفئة. ويمكن للهيدروجين المساهمة في تقليل الانبعاثات من القطاع السكني عبر ضخه في شبكات الغاز الطبيعي في المدى القريب ضمن الحدود الآمنة المسموح بها. كما يمكن الاعتماد مســتقبلاً على الهيدروجين النقي كوقود في التطبيقات المنزلية كأجهزة الطهي والتدفئة والتسخين بعد التأكد من ملاءمتها لقواعد الاستخدام للتعامل مع الهيدروجين.

2-3: المبادرات الدولية حول الدور المحتمل للهيدروجين في عملية تحول الطاقة

2-3-1: الوضع الراهن

أبدت عدة دول اهتماما بالهيدروجين والدور الذي يمكن أن يساهم به في عملية تحول الطاقة. وقام البعض منهم بالشروع في إعداد وتطوير رؤى وخرائط طريق واستراتيجيات لتحديد المسار الذي يمكن اتخاذه للوصول إلى اقتصاد للهيدروجين على المستوى الوطني. وتقوم تلك الاستراتيجيات على تحديد أفضل المسارات (حسب الأولوية الوطنية) لتوفير إمدادات الهيدروجين (عبر الإنتاج المحلي أو الاستيراد) والتطبيقات التي يمكن أن يستخدم فيها الهيدروجين. كما عملت بعض الدول على دراسة فرص الاستثمار في مجال إنتاج الهيدروجين بغرض التصدير إلى الأسواق المحتملة، وإبرام اتفاقيات وتفاهمات أولية معها بما يضمن لها حصة في التجارة الدولية للهيدروجين مستقبلاً.

وتمر عملية تطوير استراتيجية للهيدروجين على المستوى الوطني بعدة مراحل[31] كما يبين الشكل 2-13 قبل صياغة الاستراتيجية في شكلها النهائي، حيث تبدأ **أولا** ببرامج البحث والتطوير لفهم المبادئ الأساسية للتكنولوجيا وبناء القاعدة المعرفية اللازمة للتعامل مع الهيدروجين من حيث الإنتاج والاستخدام. ومن بعدها يتم الانتقال إلى **المرحلة الثانية** وهي الرؤية والتي تجيب على سؤال لماذا الهيدروجين ولماذا الآن وهي تضع الإطار العام والتوجيهات للمشاريع الاسترشادية وعادة ما يتم صياغتها بالشراكة بين الحكومات والقطاع الخاص الذي ينجذب بآفاق النمو المتوقعة لتطبيقات الهيدروجين. أما **الخطوة الثالثة** فهي إعداد خارطة الطريق، والتي تشمل خطة متكاملة بالأنشطة المطلوبة لوضع تقييم أفضل عن إمكانات الهيدروجين وتحديد مناطق البحث ذات الأولوية والتطبيقات ذات الأهمية لتنفيذ مشاريع استرشادية بها.

وباكتمال المراحل الثلاثة سالفة الذكر، تكون المقومات الأساسية لصياغة الاستراتيجية الوطنية جاهزة، والتي بدورها ستضع السياسات الواضحة وتقييم مدى ملاءمتها مع سياسة الطاقة الحالية. كما تتضمن الاستراتيجية، السياسات التمكينية المطلوبة لضمان التطبيق الكامل للهيدروجين ضمن المنظومة ومن بينها توفير العمالة الماهرة، وعادة ما تعتمد على دراسات من الصناعة ومن الجانب الأكاديمي. وخلال المراحل الأربعة سالفة الذكر، عادة ما يتم إبرام شراكة بين القطاع العام والخاص لتكوين منصة لتبادل المعلومات والخبرات وتوحيد الرؤى بين الجانبين وهو إجراء من شأنه تقليل مخاطر الاستثمار عند التنفيذ الأولى لمشاريع الهيدروجين. لكن من المهم إدراك أن عملية الانتقال من برامج البحث والتطوير إلى إقرار استراتيجية وطنية ليست بالضرورة أن تسير في هذا المسار الخطي، حيث يمكن تخطي بعض المراحل والوصول مباشرة إلى إعلان الاستراتيجية الوطنية مع عدم الإفصاح عن الأنشطة التي سبقت الاستراتيجية.

الشكل 2-13: مراحل إعداد الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين

المصدر: معدل عن IRENA

وخلال السنوات القليلة الماضية (بداية من عام 2018) ارتفع عدد الدول المهتمة بالهيدروجين ودوره في السياسة الوطنية للطاقة، كما أعلن البعض منهم عن الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين، بينما لا يزال البعض الآخر في طور إعداد الاستراتيجية الوطنية أو خارطة الطريق.

ووفق آخر تحديث (حتى شباط/فبراير 2021)، بلغ عدد الدول التي أعدت استراتيجية وطنية للهيدروجين حوالي 13 دولة كما تبين الخريطة 2-14، ويشمل ذلك عدة أوروبية من بينها مثل ألمانيا وإسبانيا والبرتغال وفرنسا وهولندا. كما تضم القائمة دول في منطقة آسيا/المحيط الهادي منها أستراليا واليابان وكوريا الجنوبية.

أما في منطقة الأمريكيتين، فقد أعلنت كل من كندا وتشيلي عن خططهما الوطنية الهيدروجين أواخر عام 2020. وبخلاف ذلك، هناك نحو 7 دول أخرى تعمل على الانتهاء من إعداد الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين، والتي يتوقع أن يتم الإعلان عنها تباعاً خلال عام 2021 وما بعده.

الشكل 2-14: الدول التي بدأت تعمل على إعداد خطط واستراتيجيات وطنية للهيدروجين حتى فبراير 2021

كما يوجد عدد لا بأس به من الدول التي أنهت أو تعمل على إعداد خارطة طريق للهيدروجين بعدد إجمالي 9 دول. وبذلك يصل عدد الدول التي بدأت تعمل على إعداد خطط واستراتيجيات وطنية للهيدروجين إلى 29 دولة، بالإضافة إلى الاتحاد الأوروبي الذي أعلن عن **الاستراتيجية الأوروبية للهيدروجين منتصف عام 2020.** يذكر أن مجلس الهيدروجين (Hydrogen Council) كان قد أشار إلى أن عدد الدول التي أعلنت استراتيجيات وخرائط طريق قد بلغ نحو 18 دولة حتى في يناير/كانون الثاني 2020 تشكل مجتمعة نحو 70% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي[32].

ويعد مجلس الهيدروجين أكبر مبادرة تقودها الشركات الصناعية لدعم تطوير اقتصاد الهيدروجين. وقد تم تأسيسه في كانون الثاني/يناير 2017 في المنتدى الاقتصادي العالمي في دافوس، وهو يضم عدد ضخم من الشركات الرائدة العاملة في سلسلة القيمة الخاصة بالهيدروجين، ويشمل ذلك شركات الإنتاج والنقل والتخزين والتوزيع.

2-1-2: نظرة على نماذج من الاستراتيجيات: الاستراتيجية الأوروبية للهيدروجين

كشفت المفوضية الأوروبية عن استراتيجيتها حول الهيدروجين في منتصف عام 2020، والتي تتلخص رؤيتها في التوسع في إنتاج الهيدروجين المتجدد (الهيدروجين الأخضر) وخلق سوق تجاري للهيدروجين في أوروبا. ووفقا للاستراتيجية الأوروبية، من المستهدف في المرحلة الانتقالية على المدى القريب والمتوسط، أن يتم التوسع في إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون "الهيدروجين الأزرق" (المنتج من الغاز الطبيعي مع تقنية اصطياد وتخزين الكربون). وذلك بغية العمل على تقليل الانبعاثات، والتأسيس لسوق تجاري واعد للهيدروجين في المستقبل. كما ستنطوي تلك المرحلة الانتقالية على اتخاذ إجراءات لدعم اختراق الهيدروجين في عدة قطاعات أخرى غير قطاع الكهرباء مثل قطاع النقل وذلك عبر توسيع استخدامه

في حافلات النقل الجماعي، والسكك الحديدية، والمقطورات، والقطاع الصناعي عبر استخدامه في إنتاج المواد الكيماوية. أما على المدى الطويل، فسيتم التوسع في إنتاج الهيدروجين المتجدد (المنتج بشكل رئيسي من طاقة الرياح والطاقة الشمسية) وذلك على نطاق تجاري واسع بعد بلوغ التكنولوجيا للنضوج المطلوب.

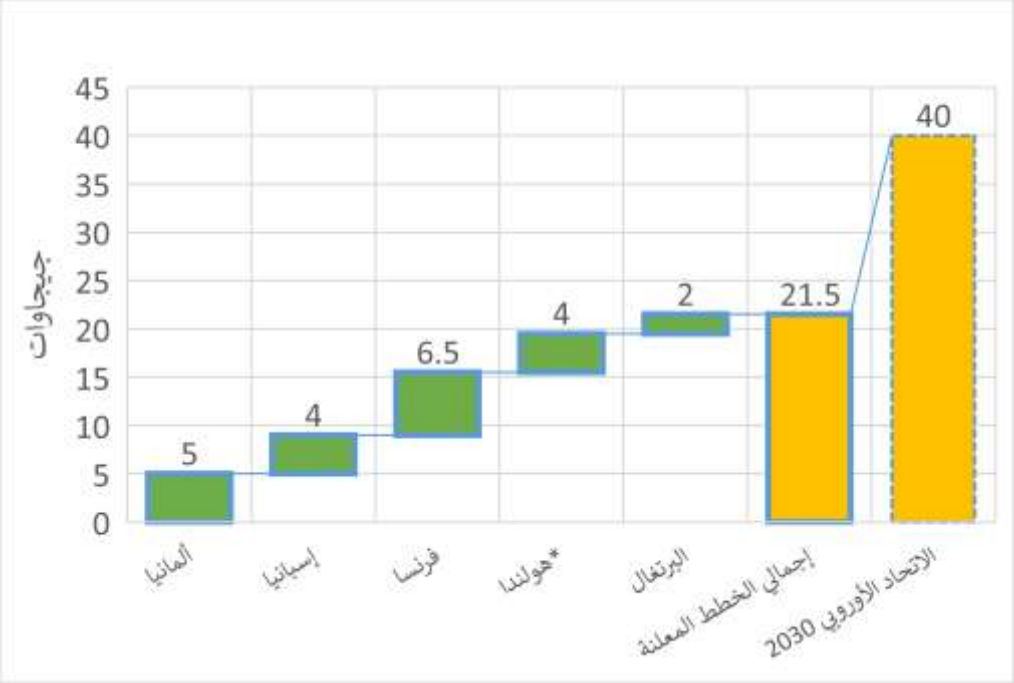
وقد وضعت المفوضية الأوروبية أهدافاً واضحة المعالم بأطر زمنية محددة للتوسع التدريجي في استخدام الهيدروجين ضمن منظومة الطاقة الأوروبية، حيث سيتم ذلك على ثلاث مراحل[33] كما يبين الشكل 2-15:

- المرحلة الأولي خلال الفترة (2020-2024)، وتهدف لإنتاج ما يصل إلى 1 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأخضر لنزع الكربون من قطاع الصناعات الكيميائية المعتمدة على الهيدروجين الرمادي.
- المرحلة الثانية خلال الفترة (2024-2030)، وتهدف إلى إنتاج نحو 10 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأخضر.
- المرحلة الثالثة خلال الفترة (2030-2050) والتي تهدف إلى تطوير سوق تجاري للهيدروجين في أوروبا.

الشكل 2-15: مراحل استراتيجية المفوضية الأوروبية الخاصة بالهيدروجين

وتأتي أهمية الاستراتيجية الأوروبية للهيدروجين كون أوروبا ستصبح سوقاً رئيسيا للهيدروجين، ونظراً لعدم كفاية الموارد المحلية لتلبية الطلب المتوقع، فمن المتوقع أن تحتاج إلى استيراد الهيدروجين أو الأمونيا من الخارج لدعم التوسع في استخدام الهيدروجين في القطاعات الاقتصادية المختلفة. فأوروبا تحتاج لبناء نحو 40 جيجاوات من أجهزة التحليل الكهربائي بحلول عام 2030 وقد تضطر إلى تنفيذها في مناطق من خارج أوروبا. وهو ما قد بدأ العمل عليه بالفعل من خلال قيام بعض الدول الأوروبية مثل ألمانيا بتنفيذ مشاريع مشتركة مع المغرب لإنتاج الهيدروجين الأخضر واستيراده. وتظهر الخطط المعلنة [34،35، 36،37] قيام عدة دول أوروبية بإعلان أهداف تقوم على التوسع في بناء أجهزة التحليل الكهربائي لتتماشى مع الاستراتيجية الأوروبية. فبحلول عام 2030، تخطط ألمانيا لبناء نحو 5 جيجاوات، وفرنسا 6.5 جيجاوات، وهولندا 3-4 جيجاوات، والبرتغال 2 جيجاوات، وإسبانيا 4 جيجاوات، بإجمالي 21.5 جيجاوات مقارنة بهدف المفوضية عند 40 جيجاوات بحلول عام 2030 كما بالشكل 2-16.

الشكل 2-16: الأهداف المعلنة لقدرات أجهزة التحليل الكهربائي في أوروبا بحلول عام 2030



2-1-2: السوق المستقبلي للهيدروجين وتطبيقاته

لا شك أن تسارع الدول في الإعلان عن استراتيجياتها الوطنية للهيدروجين وتحديد إطارات زمنية للتنفيذ وبناء قدرات محددة لأجهزة الإنتاج مثل أجهزة التحليل الكهربائي وتطبيقات الاستخدام مثل خلايا الوقود ساهم في تعزيز التفاؤل حول الدور المستقبلي للهيدروجين في عملية تحول الطاقة. ولا شك أن الاستراتيجية الأوروبية للهيدروجين تتربع على عرش الاستراتيجيات المعلنة كونها تضم أهداف ضخمة لتعزيز دور كل من الهيدروجين الأزرق في المدى القريب والمتوسط، والهيدروجين الأخضر في المدى الطويل. وفي مسعى نحو تحديد حجم السوق العالمي للهيدروجين مستقبلاً، أصدرت بعض الهيئات المتخصصة دراسات حول حجم الاستثمارات المتوقعة في هذا السوق الواعد أبرزها الدراسة الصادرة عن مجلس الهيدروجين أواخر عام 2017، التي توقعت أن يبلغ اقتصاد الهيدروجين نحو 2.5 تريليون دولار بحلول عام 2050 ويساهم في خلق نحو 30 مليون وظيفة، وتقليل نحو 6 جيجا طن من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الأمر الذي سيجعله مساهماً بتقليل نحو 20% من تلك الانبعاثات.

أما من جانب نمو الطلب المتوقع على الهيدروجين، فهناك تفاوت في التقديرات بين الدراسات التي تناولت توقعات الطلب كما يبين الجدول 2-4، فوفقاً لمجلس الهيدروجين، سيشهد الطلب على الهيدروجين نمواً سنوياً مركبا خلال الفترة 2020-2044 قدره 35% وبمعدل سنوي 28% حتى عام 2050. أما شركة Shell، فتوقعت أن يشهد الطلب العالمي عليه نمواً سنوياً مركباً حوالي 23% حتى عام 2040.

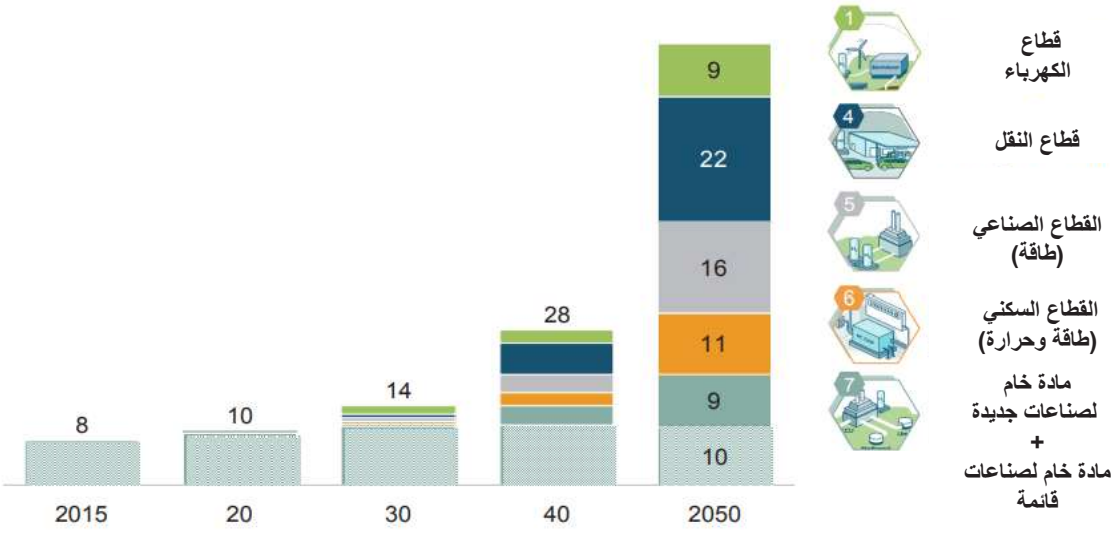
أما من جانب إجمالي الطلب، فوفقاً لتقديرات مجلس الهيدروجين[38]، من المتوقع في ضوء السياسات والخطط الرامية إلى التوسع في استخدام الهيدروجين في عملية تحول الطاقة أن يتضاعف الطلب العالمي على الهيدروجين (النقي) بعدة أمثال ليصل

إلى 78 إكســـاجول (أي ما يعادل نحو 647.5 مليون طن من الهيدروجين الغازي) بحلول عام 2050 حيث ستعتمد عدة قطاعات على الهيدروجين إما كمصدر للطاقة أو للحرارة أو كمادة خام كما يبين الشكل 2-17.

الجدول 2-4: توقعات نمو الطلب السنوي على الهيدروجين وفق عدة مصادر

المصدر	فترة التوقع	معدل النمو السنوي المتوقع	ملاحظات
Research and Markets	2021-2017	%6	معدل النمو السنوي محسوب على إجمالي الطلب على الهيدروجين
Hydrogen Council	2050-2020	%35 حتى عام 2040 %28 حتى عام 2050	معدل النمو السنوي محسوب على إجمالي الطلب على الهيدروجين كمصدر للطاقة وهي تعطي رؤية طموحة لاقتصاد الهيدروجين في المستقبل
Shell Sky Scenario	2040-2020	%23	تعتمد شل في هذا السيناريو على تحقيق التزامات اتفاقية باريس بأكبر قدر ممكن من الناحية الفنية

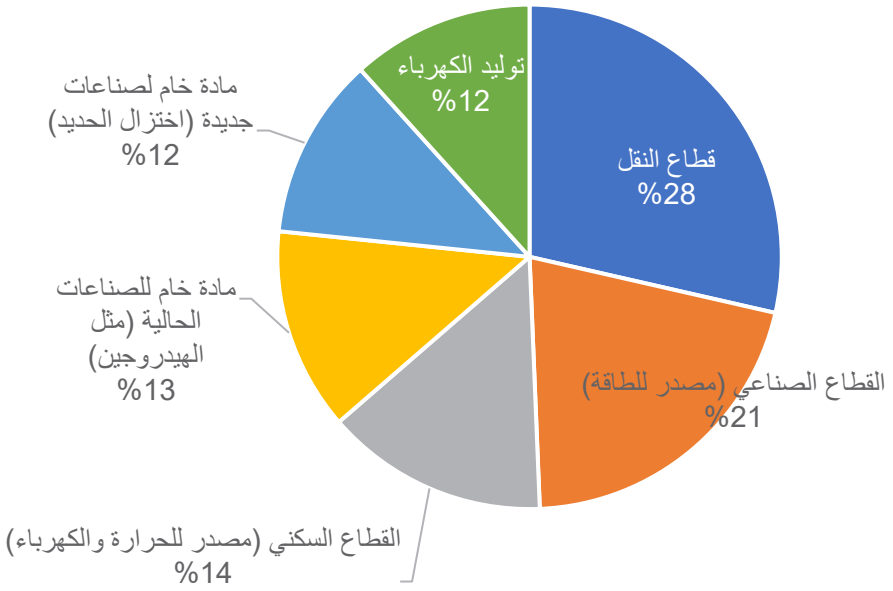
الشكل 2-17: توقعات نمو الطلب العالمي على الهيدروجين (إكساجول) في القطاعات المختلفة حتى عام 2050



المصدر: مجلس الهيدروجين

أما من جانب توزيع الطلب العالمي بحلول عام 2050، فسيمثل قطاع النقل بأذرعه المختلفة القطاع الرئيسي المستهلك للهيدروجين بإجمالي 22 إكساجول (182.6 مليون طن/السنة)، وبحصة 28%. أما القطاع الصناعي، فسيستحوذ على نحو 16 إكساجول (132.8 مليون طن/السنة) من الهيدروجين الذي سيستخدم فيه كمصدر للطاقة بحصة 21%. كما سيمثل القطاع السكني ثالث أكبر القطاعات المستهلكة للهيدروجين بإجمالي 11 إكساجول (91.3 مليون طن/السنة) والذي سيستخدم فيه الهيدروجين كمصدر للحرارة والكهرباء بحصة 14%. ويتوزع الطلب المتبقي على القطاعات الأخرى كما يبين الشكل 2-18.

الشكل 2-18: توزيع الطلب الإجمالي المتوقع على الهيدروجين وفق القطاعات المختلفة



مصدر البيانات: مجلس الهيدروجين

وفي ضوء تلك الرؤية الطموحة، سيصبح الهيدروجين ركيزة أساسية في عملية تحول الطاقة المطلوبة للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، وتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما يتوافق مع اتفاقية باريس للمناخ حتى مع الزيادة السكانية المتوقعة التي ستزيد من الطلب على الطاقة. كما أن الانتقال إلى الهيدروجين سيخلق بدوره فرصاً للنمو الاقتصادي المستدام. فمع وصول التكنولوجيا إلى مرحلة النضوج، وتطبيقها على نطاق واسع في الأسواق الكبرى، سيخلق سلاسل قيمة مستدامة لا تطلب دعما حكوميا وتستطيع بذاتها تحقيق عائدات سنوية قد تصل إلى 2.5 تريليون دولار بحلول عام 2050 حسب تقديرات مجلس الهيدروجين.

D 820
H2

الفصل الثالث:

خطط ومبادرات الدول العربية في مجال الهيدروجين

3-1: مقومات نجاح مشاريع إنتاج الهيدروجين في الدول العربية

3-2: المشاريع والخطط المقترحة لإنتاج الهيدروجين

3-3: تحديات السوق الراهنة والإجراءات المطلوبة

3-1: مقومات نجاح مشاريع إنتاج الهيدروجين في الدول العربية

أبدى عدداً من الدول العربية اهتماماً بالاستثمار في مشاريع إنتاج الهيدروجين، منها ما يقوم على إنتاج الهيدروجين الأخضر ضمن خطط وطنية طموحة للتوسع في مشاريع الطاقة المتجددة، بينما يقوم البعض الآخر على التوسع في إنتاج الهيدروجين الأزرق أو مشتقاته مثل الأمونيا الزرقاء. ولا شك أن لدى الدول العربية عدة مقومات وفرص تمكنها من تحويل المنطقة إلى محور تصدير عالمي للهيدروجين ومشتقاته إلى الأسواق الراغبة، وفي مقدمتها:

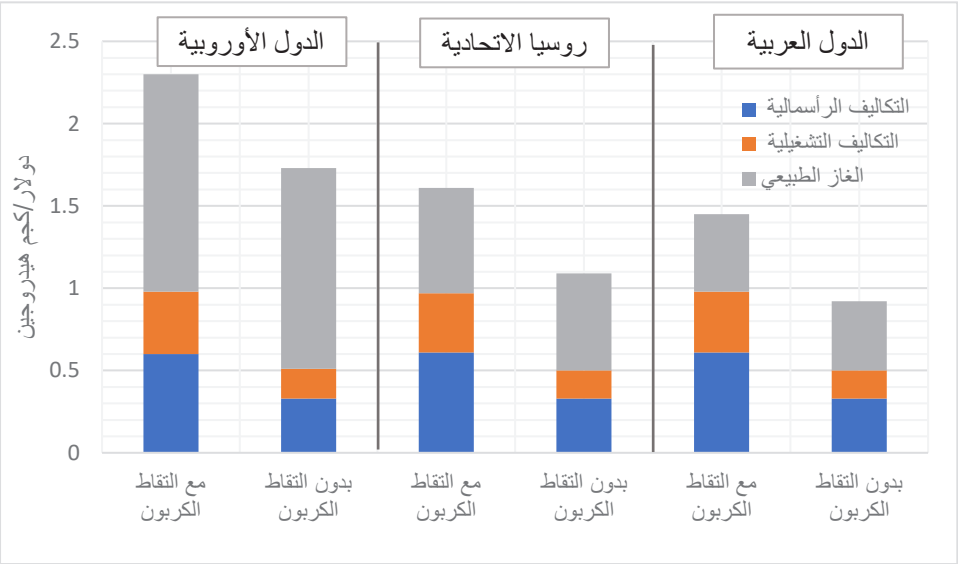
3-1-1: توافر بنية تحتية ضخمة للغاز الطبيعي داخل المنطقة العربية يمكن استغلالها للهيدروجين

تضم المنطقة العربية صناعة غازية متكاملة ومستقلة، ويشمل ذلك احتياطيات مكتشفة براً وبحراً وحقول منتجة للغاز للطبيعي، وشبكات أنابيب لنقل وتوزيع الغاز، ومحطات لمعالجة وتنقية الغاز الطبيعي، وبنية تحتية عملاقة لتصدير الغاز إلى الأسواق الإقليمية والعالمية. وتعد المنطقة العربية أحد أكبر منتجي الغاز الطبيعي عالمياً، ومن مصدري الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب ومن أكبر مصدري الغاز الطبيعي المسال. وبالتالي، فإن الدول العربية تستطيع البناء على تلك البنية القائمة لإنتاج ونقل الغاز الطبيعي لاستغلالها في إنتاج الهيدروجين بتكاليف استثمارية ستكون الأقل عالمياً مقارنة بباقي مناطق العالم.

علاوة على ما سبق، فإن أسعار الغاز الطبيعي في الدول العربية تعد الأقل عالمياً مقارنة بباقي مناطق العالم، وتعد أسعار الغاز أحد أهم العوامل المؤثرة على تكلفة إنتاج الهيدروجين بجانب التكاليف الرأسمالية والتكاليف التشغيلية. وبالتالي فإن إنتاج الهيدروجين باستخدام الغاز الطبيعي في الدول العربية سيكون تنافسي للغاية حتى

إذا ما اقترن بعملية اصطياد واستخدام وتخزين الكربون. فكما يبين الشكل 3-1، تعد المنطقة العربية الأقل في التكلفة في إنتاج الهيدروجين الرمادي أو الأزرق مقارنة بباقي مناطق العالم، حيث تصل التكلفة الإجمالية إلى أقل من 1 دولار لكل كجم من الهيدروجين الرمادي، ومع تطبيق تقنية التقاط واستخدام وتخزين الكربون، سترتفع تكلفة الهيدروجين الأزرق إلى 1.5 دولار لكل كجم، ويعود ذلك إلى انخفاض تكلفة إنتاج الغاز الطبيعي، وانخفاض التكاليف التشغيلية بشكل عام. وبالتالي تستطيع المنطقة العربية تولي ريادة العالم في مجال إنتاج الهيدروجين الأزرق وهو ما يضمن استمرار تطوير موارد الغاز الطبيعي على أراضيها، مع الأخذ في الاعتبار التوجهات الدولية في مجال انخفاض انبعاثات الكربون. كما سيساهم ذلك في الإسراع ببناء اقتصاد للهيدروجين داخل المنطقة وتأمين طلب عليه من عدة قطاعات، ومع إمكانية استغلال شبكات تصدير الغاز الممتدة من المنطقة إلى الأسواق الأوروبية يمكن أن تتحول المنطقة ككل إلى مصدر عالمي له.

الشكل 3-1: تكلفة إنتاج كيلوجرام واحد من الهيدروجين الرمادي والأزرق في مناطق مختارة

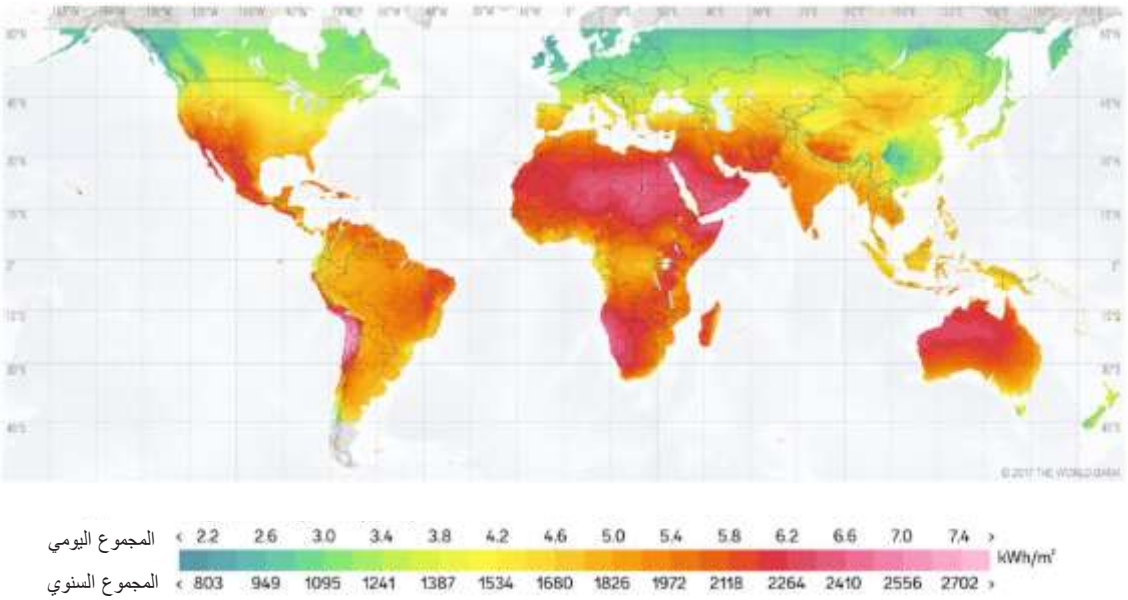


المصدر: وكالة الطاقة الدولية، 2019

3-1-2: توافر مصـــادر الطاقة المتجددة وخطط وأهداف وطنية طموحة للاســـتثمار فيها

في سياق الحديث عن الهيدروجين الأخضر، فلا شك أنه وثيق الصلة بمصادر الطاقة المتجددة كونها المصدر الرئيسي لإنتاجه. والمنطقة العربية تزخر بتلك الموارد وتعد من بين المناطق ذات الأفضلية لتنفيذ مشروعات الطاقة المتجددة. فالدول العربية جميعها تقريبا تتمتع بكثافة عالية للإشعاع الشمسي كما هو مبين على الخريطة 3-2.

الشكل 3-2: كثافة الإشعاع الشمسي على مناطق العالم



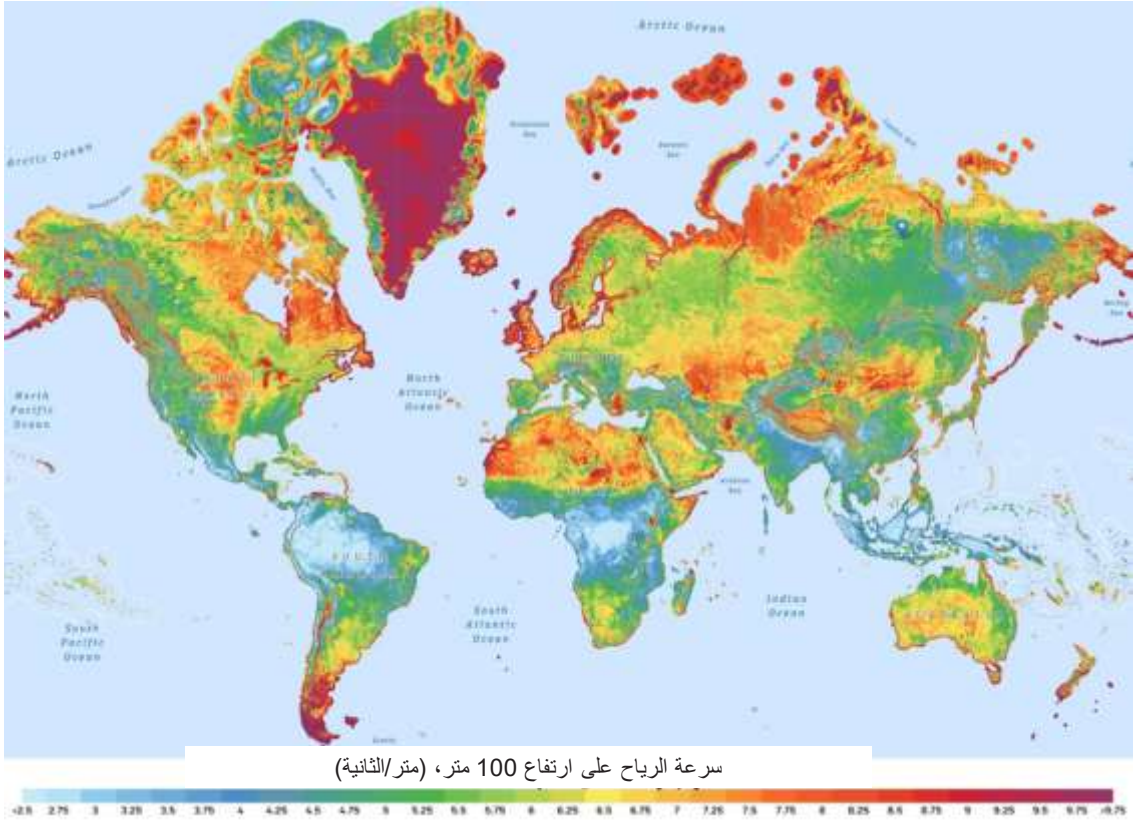
المصدر: البنك الدولي

World Bank Group, http://globalsolaratlas.info/

أما بالنســبة لطاقة الرياح، فهي تتركز في مناطق بعينها داخل المنطقة العربية، حيث تتمتع بعض الدول مثل المغرب ومصــر بســرعات رياح في بعض المناطق فيها تصــل إلى 9-11 متر/الثانية كما تبين الخريطة 3-3، وهو الأمر الذي يســمح بارتفاع معامل الســعة (Capacity Factor)[2] لمحطات الرياح لأكثر من 30%، وهو مؤشــر في غاية الأهمية لتحقيق الجدوى الاقتصادية من الاستثمار في هذا النوع من الطاقات.

[2] معامل السعة هو النسبة بين الطاقة الكهربائية المنتجة فعليا من محطة ما مقارنة بما كانت ستنتجه إذا كانت تعمل على مدار العام

الشكل 3-3: أطلس الرياح لدول العالم، عند ارتفاع 100 متر



المصدر: World Bank Group, https://www.globalwindatlas.info[39]

وقد أبدى عد كبير من الدول العربية خاصة المنتجة للنفط والغاز اهتماماً بمصادر الطاقة المتجددة منذ عدة سنوات، من منطلق تنويع مزيج الطاقة الأولية الذي يهمين عليه الوقود الأحفوري بغية تحقيق هدف وطني يقضي باستدامة المزيج، ومن ثم تقليل الضغط على النفط والغاز في تلبية الطلب المحلي على الطاقة للإيفاء بمتطلبات التصدير التي تمثل المصدر الرئيسي للإيرادات العامة في العديد من الدول العربية. ومن هذا المنطق، وضع عدد كبير من الدول العربية أهدافاً للطاقة المتجددة من حيث الحصة المستهدفة إما في مزيج الطاقة الأولية أو في مزيج توليد الطاقة الكهربائية أو مزيج الاستخدام النهائي من الطاقة، والتقنية المستهدفة كما يبين الجدول 3-1.

الجدول 3-1: الخطط والأهداف الوطنية للطاقة المتجددة في الدول العربية، تحديث عام 2019

الدولة	حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الأولية	حصة الطاقة المتجددة في مزيج الكهرباء	قدرات مركبة مستهدفة للطاقة المتجددة
الإمارات		44% بحلول عام 2050	
البحرين		5% بحلول عام 2025	255 ميجاوات عام 2020
		10% بحلول عام 2035	710 ميجاوات بحلول عام 2030
الجزائر		27% بحلول عام 2030	4.5 جيجاوات عام 2020
			22 جيجا وات بحلول عام 2030
السعودية		30% بحلول عام 2030	27.3 جيجاوات بحلول عام 2023
			58.7 جيجاوات بحلول عان 2030
العراق		10% عام 2020	2.4 جيجاوات عام 2020 (الخلايا الكهروضوئية)
قطر		20% بحلول عام 2030	500 ميجاوات بحلول عام 2030
الكويت		15% بحلول عام 2030	*3.5 جيجاوات (الخلايا الكهروضوئية) و 1.1 جيجاوات (الطاقة الشمسية المركزة) بحلول عام 2030 *3.1 جيجاوات (طاقة الرياح) بحلول عام 2030
ليبيا	10% عام 2020	10% بحلول عام 2025	3.35 جيجاوات (الخلايا الكهروضوئية)، و 400 ميجاوات (الطاقة الشمسية المركزة) بحلول عام 2030 1 جيجاوات (طاقة الرياح) بحلول عام 2025
		22% بحلول عام 2030	
مصر	14% بحلول عام 2020	20% بحلول عام 2022	*2.8 جيجاوات عام 2020 (طاقة الرياح) *17.3 جيجاوات (الخلايا الكهروضوئية)، و11 جيجاوات (الطاقة الشمسية المركزة) بحلول عام 2035 *7.2 جيجاوات بحلول عام 2022، 21 جيجاوات بحلول عام 2035
الأردن	10% عام 2020	20% عام 2020	1.8 جيجاوات عام 2020
		30% بحلول عام 2030	3.22 جيجاوات بحلول عام 2022
تونس		30% بحلول عام 2030	4.7 جيجاوات بحلول عام 2030
		100% بحلول عام 2050	
فلسطين	20% عام 2020		130 ميجاوات عام 2020
لبنان		30% بحلول عام 2030	400-500 ميجاوات عام 2020 (طاقة الرياح)
		100% بحلول عام 2050	
موريتانيا		60% عام 2020	60 ميجاوات عام 2020
عمان		10% عام 2020	
المغرب		42% عام 2020	6 جيجاوات عام 2020
		52% بحلول عام 2030	11 جيجاوات بحلول عام 2030
		100% بحلول عام 2050	

المصدر: بيانات مجمعة استناداً إلى

Ren21, Global Status Report 2020[40]

وقد شرع بالفعل عدد من الدول العربية في تنفيذ مشاريع للطاقة المتجددة مثل الخلايا الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة، ومزارع الرياح، لتبرهن على عزم صانعي السياسات على المضي قدماً في اعتماد هذا الخيار والسعي نحو بناء مستقبل للطاقة المستدامة. بل وباتت المنطقة صاحبة الريادة في بعض المشروعات من حيث السعة المركبة ومن أمثلة ذلك مشروع "شمس-1" بإمارة أبو ظبي الذي يعد أكبر محطة للطاقة الشمسية المركزة في العالم قيد التشغيل بقدرة إجمالية 100 ميجاوات.

وبالتالي يمكن البناء على الخطط والأهداف الوطنية للدول العربية واستثمار ما تم إنجازه في مجال مصادر الطاقة المتجددة للسعي نحو وضع خطط متكاملة تشمل استثمار الفائض من إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة في إنتاج الهيدروجين الأخضر وذلك لاستغلاله ضمن منظومات الطاقة الوطنية أو تصديره إلى الأسواق المحتملة مستقبلاً.

3-1-3: الموقع الجغرافي المتميز والعلاقات التجارية الراسخة مع عدة أسواق

تتميز المنطقة العربية بموقعها الجغرافي الفريد الذي يتوسط محوري الشرق والغرب، كما أنها تضم عدة خطوط ملاحية رئيسية، وممرات ملاحية هامة مثل قناة السويس. والمنطقة العربية محاطة بعدة أسواق رئيسية تشهد نمواً مستمراً في الطلب على موارد الطاقة أبرزها السوق الأوروبي والسوق الآسيوي وتحتاج إلى إمدادات من خارج حدودها لتلبية احتياجاتها من الطاقة. وقد كان لذلك عظيم الأثر في نجاح الدول العربية في استغلال ثرواتها من نفط وغاز وتصديرها إلى تلك الأسواق ونجحت في تأسيس علاقات تجارية راسخة معها. ومن ثم تستطيع الشركات الوطنية العربية استثمار تلك الشراكة التجارية مع عملاؤها في السوق الأوروبية والآسيوية التي ترسخت على مدار عقود، علاوة على ما تملكه من شركات لنقل النفط والمنتجات البترولية، للدخول بقوة في مجال تصدير الهيدروجين إلى الأسواق المحتملة مستقبلاً.

ويأتي السوق الأوروبي في مقدمة الأسواق المستهدفة خاصة بعد اعتماد المفوضية الأوروبية لاستراتيجية الهيدروجين ووجود حاجة إلى الاستيراد من الخارج وهو ما يعني خلق سوق واعد للطلب على تلك السلعة مستقبلاً.

3-1-4: الشراكة الاستراتيجية بين شركات البترول الوطنية وشركات البترول العالمية

تعود جذور الشراكة الاستراتيجية بين شركات البترول الوطنية في الدول العربية وشركات الطاقة العالمية إلى نشأة صناعة النفط والغاز والطاقة نفسها منذ عدة عقود. وقد أسفر التعاون البناء بين شركات البترول والطاقة الوطنية في الدول العربية وشركات البترول والطاقة العالمية عن انجاز عدة مشاريع مشتركة عملاقة بمئات المليارات من الدولارات في عدة مجالات على طول سلسلة القيمة للصناعة. ولا شك أن الزخم الدولي المتزايد حول دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة يعود قسم كبير منه إلى الاستراتيجيات التي أعلنتها عدة شركات كبرى مثل Eni الإيطالية وBP البريطانية وShell الهولندية وشركات أخرى رائدة في تصنيع تقنيات إنتاج الهيدروجين مثل Siemens الألمانية. وهذه الشركات لديها علاقات متجذرة في المنطقة العربية وبالتالي يمكن التعاون منها على أساس المنفعة المشتركة لكلا الشريكين والسعي نحو إبرام مبادرات أو تفاهمات ودراسة تنفيذ مشاريع مشتركة على غرار التجارب الناجحة في مشاريع النفط والغاز. وقد بات جلياً أن تلك الشركات عازمة على الاستثمار بقوة في مجال مصادر الطاقة المتجددة وتسخير فرقها في مجال البحث والتطوير لدراسة التقنيات التي تساهم في تحقيق حياد الكربون، بل إن البعض منها قرر تقليص استثماراته في مجال النفط والغاز وتوجيهها إلى تلك المصادر ومن بينها الهيدروجين وهو ما قد ينعكس سلباً على صناعة النفط والغاز في الدول العربية.

3-2: الخطط الحالية والمستقبلية في مجال الهيدروجين في الدول العربية

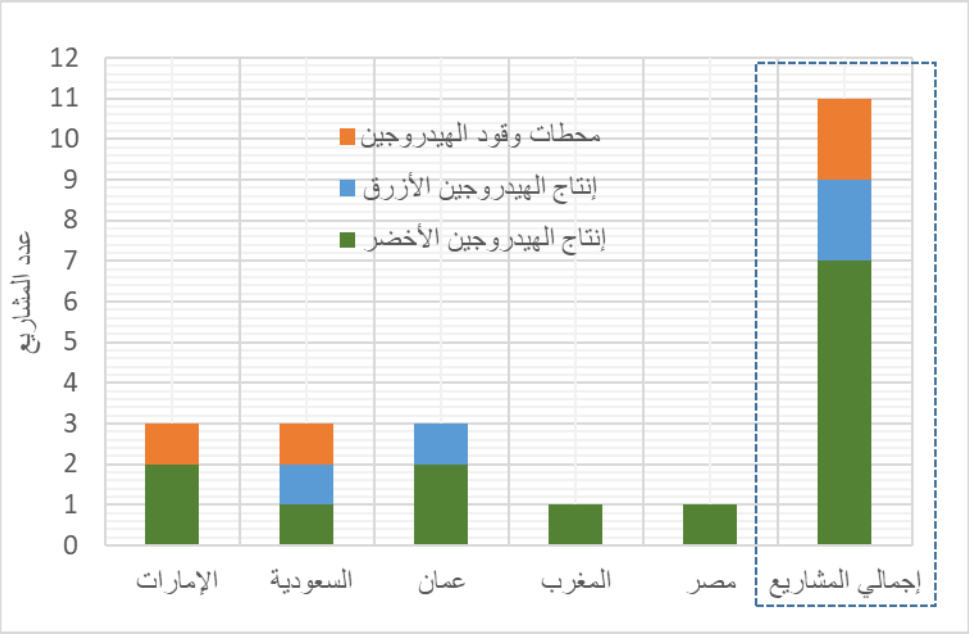
أبدى عدد من الدول العربية في السنوات الثلاث الأخيرة اهتماما بدراسة فرص استغلال الهيدروجين ومدى إمكانية تنفيذ مشاريع لإنتاج وتصدير الهيدروجين، خاصة في الأسواق التي بات لها استراتيجية واضحة نحو تعزيز دور الهيدروجين في المستقبل. وإجمالا فقد ارتفع عدد الدول العربية التي أبدت اهتماما في مجال الهيدروجين إلى خمس دول هي الإمارات والسعودية ومصر والمغرب وعمان كما يبين الجدول 3-2، وقد تفاوتت طبيعة الإجراءات التي اتخذت، فمنها ما تعلق بتأسيس خطط وطنية للهيدروجين وتحديث استراتيجية الطاقة الوطنية لتأخذ في الاعتبار الدور المحتمل للهيدروجين مستقبلاً، ومنها ما تناول إبرام اتفاقيات وتفاهمات أولية مع شركات عالمية رائدة للاستثمار مباشرة في مشاريع لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق، ومشاريع تجريبية لتطبيق استخدام الهيدروجين في مجال النقل. وإجمالا، فقد بلغ عدد مشاريع الهيدروجين المعلن عنها في الدول العربية حتى نهاية شهر شباط/فبراير عام 2021 حوالي 11 مشروعاً.

وقد استحوذ الهيدروجين الأخضر على غالبية مشاريع الإنتاج بإجمالي 7 مشاريع، بينما خصص مشروعين لإنتاج الهيدروجين الأزرق، ومشروعين لاستخدام الهيدروجين كما هو مبين بالشكل 3-4. ولا شك أن نجاح الدول العربية في تجسيد هذه المشاريع، سيمكنها من لعب دوراً هاما في السوق العالمي، والظفر بحصة جيدة من هذا السوق الواعد لتضيف فصلاً جديداً إلى دورها التاريخي كمصدر عالمي لإمدادات النفط والغاز منذ عدة عقود.

الجدول 3-2: مشاريع الهيدروجين التي تم تنفيذها والمخطط لها في الدول العربية

الدولة	وصف المشروع	الطاقة التصميمة	الإجراء المتخذ	الشركاء /الاستثمارات
الإمارات	أول محطة تجريبية لإعادة تعبئة المركبات بالهيدروجين في منطقة البادية في دبي	أسطول تجريبي من 3 مركبات تعمل بخلايا الوقود	تم تشغيل المحطة عام 2017، كما يتضمن المشروع إنشاء محطة ثانية لم يتم بنائها بعد	شركة الفطيم للسيارات وشركة Air Liquide
	انطلاق مشروع تجريبي لإنتاج "الهيدروجين الأخضر" في مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية في دبي	1.25 ميجاوات لإنتاج 20 كجم/الساعة	تم إطلاق المشروع عام 2019، ومن المخطط دخول المحطة في التشغيل عام 2022	هيئة كهرباء ومياه دبي ومكتب "إكسبو 2020 دبي" وشركة "Siemens" الألمانية
	تأسيس مشروع محطة تجريبية لتطوير الهيدروجين الأخضر في مدينة مصدر في دبي	لم يحدد بعد	تم الإعلان عن المشروع من قبل التحالف المنفذ في كانون الثاني/يناير 2021	شركة مصدر، ودائرة الطاقة في أبو ظبي، وشركة الاتحاد للطيران، ومجموعة "Lufthansa"، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا وشركة "Siemens" للطاقة، وشركة "Marubeni"
السعودية	أول محطة تجريبية لإعادة تعبئة المركبات بالهيدروجين	أسطول تجريبي من 6 مركبات تعمل بخلايا الوقود	تم تشغيل المحطة حزيران/يونيو 2019	شركة أرامكو السعودية وشركة Air Products
	بناء منشأة في نيوم تعمل بالطاقة المتجددة لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر إلى السوق العالمية	650 طن/اليوم من الهيدروجين الأخضر، و1.2 مليون طن/السنة من الأمونيا الخضراء	تم توقيع الاتفاق في يوليو 2020	نيوم وشركة أكواباور وشركة Air Products باستثمارات 5 مليار دولار
	مشروع استرشادي لإنتاج الأمونيا الزرقاء في الجبيل	وحدات لإنتاج الهيدروجين من الغاز، والأمونيا، والتقاط انبعاثات الكربون	تم تشغيل المشروع وتصدير أول شحنة من الأمونيا في سبتمبر 2020	شركة أرامكو السعودية وشركة سابك ومعهد اقتصاديات الطاقة في اليابان (IEEJ)
عمان	محطة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في منطقة الدقم	250-500 ميجاوات		مجموعة DEME البلجيكية ومجموعة OQ للطاقة مع الهيئة العامة للمناطق الاقتصادية الخاصة والمناطق الحرة
	مخطط مشروع هجين لإنتاج الهيدروجين والطاقة الشمسية في إحدى مواقع الإنتاج التابعة لشركة آرا للبترول	300-400 طن/السنة من الهيدروجين الأزرق 20 ميجاوات محطة للطاقة الشمسية	تم الاتفاق على إعداد دراسة الجدوى في يناير 2021	Sumitomo Corporation و شركة آرا للبترول
	محطة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ميناء صحار	لم يحدد بعد	لم يتخذ بعد أي إجراء	سلطة ميناء صحار والمنطقة الحرة
المغرب	محطة لإنتاج الهيدروجين الأخضر	100 ميجاوات		تمويل 300 مليون يورو من بنك
مصر	مشروع لإنتاج الهيدروجين الأخضر	غير محدد	توقيع خطاب نوايا مع شركة Siemens الألمانية في كانون الثاني/ يناير 2021	شركة سيمينز الألمانية

الشكل 3-4: توزيع مشاريع الهيدروجين التي تم الإعلان عنها في الدول العربية (حتى شباط/فبراير 2021)



3-2-1: خطط الهيدروجين في دولة الإمارات

تعد دولة الإمارات من الدول العربية الرائدة في مجال استثمار مصادر الطاقة المتجددة، وهي تسعى منذ سنوات نحو تنويع مزيج الطاقة الأولية، وزيادة مصادر إنتاج الطاقة الكهربائية التي لا تزال تعتمد بشكل كبير على الغاز الطبيعي.

وفي مجال الهيدروجين، كانت دولة الإمارات من أوائل الدول العربية التي بدأت دراسة الاستفادة من الهيدروجين كوقود في عدة مجالات من خلال تنفيذ عدة مشاريع تجريبية كما يبين الشكل 3-5، لإنتاج الهيدروجين الأخضر واستخدامه كوقود للمركبات. حيث شهد عام 2017، افتتاح أول محطة تجريبية في منطقة الشرق الأوسط لإعادة تموين المركبات بالهيدروجين في منطقة "البادية" بإمارة دبي، وهو مشروع تم تطويره بالشراكة بين الفطيم للسيارات وشركة Air Liquide المتخصصة في تنفيذ محطات تموين الهيدروجين في العالم[41]، ويضم أسطول تجريبي من ثلاث مركبات

تعمل بخلايا الوقود من نوع Toyota. وقد أُنشـئت محطة الهيدروجين كجزء من برنامج تجريبي بدأ في مايو/أيار 2017، بهدف اختبار تقنية خلايا وقود الهيدروجين الكهربائية عديمة الانبعاثات على الطرقات، وتقييم فرص نشر عدد أكبر من المركبات الكهربائية العاملة على خلايا الوقود. كما يضم البرنامج إنشاء محطة ثانية بالشراكة بين شركة "مصدر" وشركة بترول أبو ظبي الوطنية" وشركة" الفطيم للسيارات" وشركة Air Liquide.

وفي شباط/فبراير عام 2019، تم وضع حجر الأساس لتنفيذ مشروع لإنتاج "الهيدروجين الأخضر" باستخدام الطاقة الشمسية، في مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية [42،43]. وسيجري تطوير المشروع بالتعاون بين كل من هيئة كهرباء ومياه دبي ومكتب "إكسبو 2020 دبي" وشركة "Siemens" الألمانية، وذلك في منشآت الاختبارات الخارجية التابعة لمركز هيئة كهرباء ومياه دبي للبحوث والتطوير في مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية في دبي، بما يدعم مسيرة الاقتصاد الأخضر في دولة الإمارات. والمشروع سيضم منشأة للتحليل الكهربائي قدرة 1.25 ميجاوات، باستخدام تقنية PEM تكفي لإنتاج 20 كجم/الساعة (175 طن/السنة) من الهيدروجين عند ضغط 35 بار[44]. ومن المخطط أن تكون المحطة قيد التشغيل بحلول عام 2022.

ومع دخول عام 2021، تم الإعلان في شهر كانون الثاني/يناير الإعلان عن تأسيس تحالف للهيدروجين[45] يضم شركة مصدر، ودائرة الطاقة في أبوظبي، وشركة الاتحاد للطيران، ومجموعة "Lufthansa"، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا، وشركة "Siemens" للطاقة، وشركة "Marubeni" بهدف تأسيس مشروع محطة تجريبية في مدينة "مصدر" لتطوير الهيدروجين الأخضر والوقود المستدام وإنتاج الكيروسين من الكهرباء لأغراض النقل والشحن والطيران[46].

الشكل 3-5: المشاريع التجريبية لإنتاج واستخدام الهيدروجين في دولة الإمارات حسب التسلسل الزمني

تشغيل أول محطة تجريبية لإعادة تعبئة المركبات بالهيدروجين في منطقة البادية في دبي:

مشروع تم تطويره بالشراكة بين شركة الفطيم للسيارات وشركة Air Liquide

انطلاق مشروع تجريبي لإنتاج "الهيدروجين الأخضر" في مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية في دبي:

سيتم تنفيذ المشروع بالشراكة بين هيئة كهرباء ومياه دبي ومكتب "إكسبو 2020 دبي" وشركة "سيمنس" الألمانية

تأسيس مشروع محطة تجريبية لتطوير الهيدروجين الأخضر في مدينة مصدر في دبي:

سيتم تنفيذ المشروع بواسطة تحالف يضم شركة مصدر، ودائرة الطاقة في أبوظبي، وشركة الاتحاد للطيران، ومجموعة "Lufthansa"، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا، وشركة Siemens، وشركة Marubeni

وبخلاف المشاريع التجريبية التي تم الإعلان في السنوات الثلاثة الأخيرة، كانت دولة الإمارات الأولى إقليمياً في وضع الأطر التنظيمية للتعامل مع الهيدروجين، حيث قامت هيئة الإمارات للمواصفات والمقاييس "مواصفات" بإعداد اللائحة الفنية الخاصة بالمركبات العاملة بالهيدروجين، وقد اعتمدت تلك اللائحة بشكل نهائي في حزيران/يونيو 2020 [47].

وتغطي اللائحة متطلبات السلامة العامة التي يجب توافرها في المركبات العاملة بالهيدروجين، من حيث وضع اشتراطات خاصة بأسطوانات تخزين الهيدروجين المستخدمة وأنواعها ومادة التصنيع، والاختبارات المطلوب إجراؤها على الأسطوانات بشكل خاص. كما تغطي اللائحة متطلبات محطات شحن المركبات الهيدروجينية، واشتراطات السلامة اللازمة في هذه المحطات. وتعد تلك الخطوة، إجراء تنظيمي مهم للبدء في استخدام تطبيقات الهيدروجين داخل السوق الإماراتي.

3-2-2: خطط الهيدروجين في المملكة العربية السعودية

تبدي السعودية منذ سنوات اهتماما بالاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة لتقليل الاعتماد على النفط في السوق المحلي، وتأتي مشروعات الهيدروجين متوافقة بشكل عام مع رؤية السعودية 2030 في مجال زيادة الاعتماد على تلك المصادر.

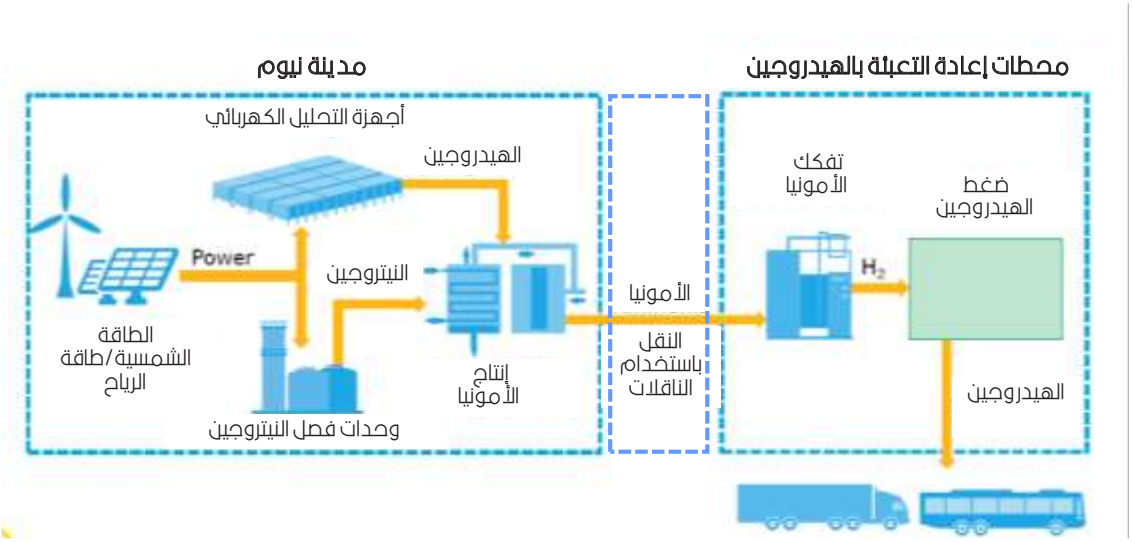
وقد بدأت السعودية أولى المشاريع التجريبية بهدف الاستفادة من الهيدروجين كوقود في عدة مجالات، من خلال افتتاح أول محطة تجريبية لإعادة تعبئة المركبات بالهيدروجين في حزيران/يونيو عام 2019، وهو مشروع تم تطويره بالشراكة بين شركة أرامكو السعودية وشركة Air Products، ويضم أسطول تجريبي من ست مركبات تعمل بخلايا الوقود من نوع Toyota Mirai [48].

أما على الصعيد التجاري، فأبرمت "نيوم" وشركة "أكواباور" السعودية اتفاقاً مع شركة Air Products في تموز/يوليو 2020 لتنفيذ مشروع هو الأكبر من نوعه على مستوى العالم عبارة عن منشأة في نيوم تعمل بالطاقة المتجددة لإنتاج وتصدير الهيدروجين الأخضر إلى السوق العالمية. وسيقوم المشروع المزمع تنفيذه على إنشاء محطات للطاقة الشمسية وطاقة الرياح بقدرة تزيد عن 4 جيجاوات لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل أجهزة التحليل الكهربائي لإنتاج 650 طن/اليوم من الهيدروجين الأخضر، ووحدات لفصل النيتروجين من الهواء لإنتاج نحو 1.2 مليون طن/السنة من الأمونيا الخضراء لتصديرها إلى الأسوق العالمية[49،50] كما يبين الشكل 3-6. وسوف تلعب Air Products دور المشتري الحصري للأمونيا الخضراء لتقوم بنقلها إلى جميع أنحاء العالم ويتم معالجتها من قبل المستوردين لاستخراج الهيدروجين الأخضر الذي سيمدّ قطاع النقل بما يحتاجه من وقود حيوي صديق للبيئة.

تصل التكلفة الإجمالية للمشروع شاملة مراحل الإنتاج والتوزيع إلى 7 مليار دولار، حيث سيخصص 5 مليار دولار لمحطة الإنتاج في مدينة نيوم يتم تقسيمها بالتساوي بين الأطراف الثلاثة المشاركة، بينما ستخصص تكلفة الـ2 مليار المتبقية

لمرحلة نقل وتوزيع الأمونيا الخضـــراء إلى الأســـواق العالمية وإعادة تحويلها إلى هيدروجين وســـوف تتحملها بالكامل شـــركة Air Products. ومن المقرر أن يكون المشروع قيد التشغيل بحلول عام 2025.

الشكل 3-6: مشروع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء في مدينة نيوم في السعودية



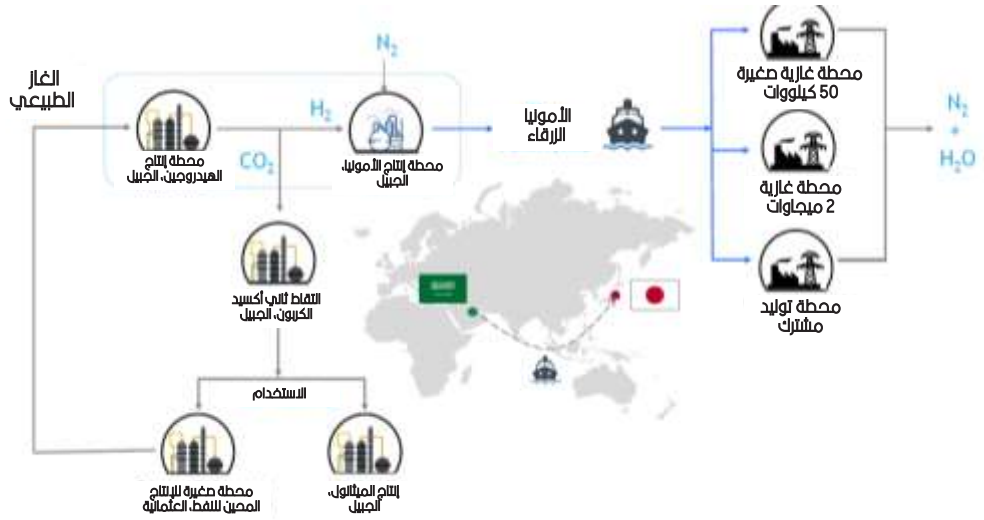
المصدر: معدل عن Air Products [51]

وبخلاف مشـــروع الهيدروجين الأخضـــر العملاق في مدينة نيوم، أبدت شـــركة أرامكو الســـعودية اهتماما بالاســـتثمار في مجال الهيدروجين الأزرق، وتصـــديره إلى الأســـواق العـالميـة. حيـث قـامـت أرامكو بتنفيـذ أول مشـــروع اســـترشـــادي (Demonstration Project) لإنتاج الأمونيا الزرقاء بالتعاون مع شـــركة ســـابك ومعهد اقتصـــاديات الطاقة في اليابان (IEEJ). ويعتمد المشـــروع على اســـتخدام الغاز الطبيعي في إنتاج الهيدروجين الرمادي ثم التقاط انبعاثات الكربون الناتجة لاستخدامها في إنتاج الميثانول، بينما يســـتخدم الهيدروجين الأزرق في إنتاج الأمونيا الزرقاء لتصديرها إلى اليابان واستخدامها في توليد الكهرباء.

وقد تم تصـدير أول شـحنة من المشـروع الاسـترشـادي في شـهر أيلول/سـبتمبر 2020 والتي بلغت 40 طن من الأمونيا الزرقاء إلى اليابان لتغذية محطات لتوليد

الكهرباء، حيث ستستخدم الأمونيا بنسبة 20% مع الغاز الطبيعي في محطة كهرباء بقدرة 2 ميجاوات، ومحطة أخرى تعمل بالفحم بقدرة 10 ميجاوات. أما الأمونيا نفسها، فسوف يتم استخدامها كوقود في محطة صغيرة قدرة 25 كيلووات [52]، [53] كما يبين الشكل 3-7. وقد نجح المشروع في التقاط نحو 30 طن من ثاني أكسيد الكربون لاستخدامها في محطة إنتاج الميثانول التابعة لشركة سابك، بينما تم التقاط كمية قدرها 20 طن من ثاني أكسيد الكربون لاستخدامها في عمليات إنتاج النفط المحسن (EOR). وهو يعد المشروع الأول من نوعه على مستوى العالم، وهو بمثابة نموذج استرشادي لاختبار التقنية ومعرفة المشاكل والحلول الفعالة لها للبناء عليها في حال التوسع لبناء مشاريع تجارية على مقياس كبير.

الشكل 3-7: مشروع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء



المصدر: أرامكو السعودية

3-2-3: خطط الهيدروجين في سلطنة عمان

أبدت سلطنة عمان اهتماماً باستغلال الهيدروجين في إطار خطة لتنويع مصادر الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون وتأمين حاجة البلاد من الهيدروجين ومشتقاته مثل الميثانول والأمونيا، وتصدير الفائض إلى الأسواق العالمية.

وقد جاءت أولى الخطوات الفعلية نحو تجسيد الاهتمام بالبحث والتطوير في مجال الهيدروجين في كانون الثاني/يناير 2020 عبر تأسيس أول مركز لأبحاث الهيدروجين في السلطنة في الجامعة الألمانية للتقنية باسم "مركز عمان للهيدروجين"، ليكون بمثابة مركز أبحاث يساهم في تسريع عملية تبني الطاقة الخضراء كالهيدروجين في الاقتصاد العُماني. ويختص المركز بتقديم الدعم البحثي لجميع الصناعات التي تطمح إلى تبني الهيدروجين كطاقة بديلة، بهدف فتح آفاق جديدة لتكثيف استخدامات الهيدروجين في السوق العماني حيث سيؤدي المركز دورا نشطا في عملية الترويج والتسويق التجاري للهيدروجين.

وبخلاف التوجه في مجال البحث والتطوير، عملت عمان على دراسة فرص استثمارية لإنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر وتصديره إلى الأسواق العالمية. وفي هذا الصدد، وقعت مجموعة DEME البلجيكية اتفاقية شراكة حصرية مع شركاء عُمانيين في آذار/مارس 2020، لتشييد محطة لإنتاج الهيدروجين الأخضر في منطقة الدقم على الساحل الشرقي لسلطنة عمان[54]. يهدف المشروع إلى إنشاء منشأة تقوم بإنتاج الهيدروجين باستخدام أجهزة التحليل الكهربائي، بغرض نزع الكربون من قطاع الصناعات الكيماوية القائمة على الهيدروجين في عمان، بالإضافة إلى تصدير الهيدروجين ومشتقاته مثل الأمونيا الزرقاء إلى الأسواق الأوروبية. وحسب المخطط المبدئي، سيمر المشروع بمراحل عدة قبل البدء في التنفيذ، حيث ستتضمن المرحلة الأولى دراسة الجدوى الاقتصادية بواسطة شركة استشارات عالمية من خلال تحديد الخيارات التقنية وخيارات التغذية بالكهرباء وخيارات شحن الهيدروجين ومشتقاته ونقله. أما المرحلة التالية فستتضمن التصميمات الهندسية النهائية وتحديد طرق التمويل حتى الوصول إلى اتخاذ قرار الاستثمار النهائي المخطط بحلول عام 2021. وقد اتفق الأطراف على أن يبدأ المشروع ببناء أجهزة التحليل الكهربائي بطاقة أولية 250-500 ميجاوات، على أن يتم دراسة إضافة مراحل توسعية مستقبلاً، وقد تم اختيار منطقة

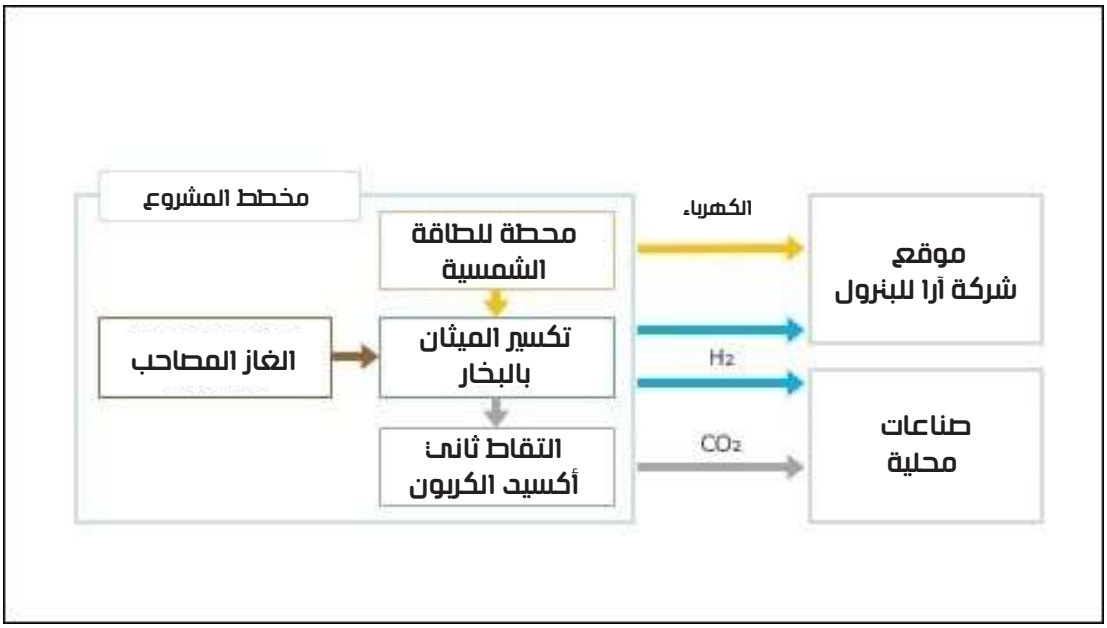
الدقم التي تتسم بوجود مصادر للطاقة المتجددة كالرياح والطاقة الشمسية، مما يقلل من التكلفة الرأسمالية للمشروع. وفي خطوة هامة تعكس العزم على المضي قدما في تنفيذ المشروع المقترح، أعلنت DEME البلجيكية ومجموعة OQ للطاقة في كانون الأول/ديسمبر 2020، عن توقيع اتفاقية تعاون مع الهيئة العامة للمناطق الاقتصادية الخاصة والمناطق الحرة[55]. حيث ستقوم الهيئة بتقديم كافة التسهيلات لتنفيذ المشروع، من بينها تخصيص موقع متميز لتركيب الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح في موقع يتميز بتوفر مصدر مثالي للطاقة الشمسية وكثرة الرياح فيه على طول ساحل السلطنة المطل على بحر العرب. كما ستتولى التنسيق مع مختلف الجهات الحكومية الأخرى للعمل على تسخير البنية الأساسية بالصورة الأمثل للمشروع بإقامة خطوط لنقل الكهرباء عالية الجهد، واستخدام مياه البحر وتحليتها لإنتاج الهيدروجين الأخضر، وتصدير الهيدروجين ومشتقاته عبر ميناء الدقم.

وبجانب مشروع ميناء "الدقم"، هناك مشروع آخر مقترح لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ميناء صحار تم الكشف عن ملامحه الأولية في تشرين الثاني/نوفمبر 2020 من قبل سلطة ميناء صحار والمنطقة الحرة[56]. حيث يهدف المشروع المقترح إلى إنشاء منشأة في ميناء "صحار"، تضم أجهزة للتحليل الكهربائي للماء لاستخدامها في إنتاج الهيدروجين الأخضر، باستغلال الطاقة الشمسية المتوفرة في تلك المنطقة، ومن ثم تخزينه ثم نقله إلى مراكز الاستهلاك عبر خطوط الأنابيب وعبر المقطورات. وقد جاء اختيار ميناء "صحار" لأن المنطقة تتميز بارتفاع كثافة الإشعاع الشمسي، ومن ثم سيكون استخدام الألواح الكهروضوئية خياراً ناجعاً يساهم في خفض تكلفة إنتاج الهيدروجين الأخضر ليكون خيار تنافسياً.

ولم يغب الهيدروجين الأزرق أيضاً عن المشهد في خطط عمان للاستثمار في الهيدروجين، حيث وقعت شركة "آرا للبترول"، إحدى شركات إنتاج النفط والغاز في عمان، على مذكرة تفاهم مع شركة Sumitomo Corporation اليابانية في

آذار/مارس 2020، للبدء في مناقشات لتنفيذ مشروع هجين لإنتاج الهيدروجين الأزرق والطاقة الشمسية في إحدى المواقع التابعة للشركة[57]. وفي خطوة تالية تعكس العزم على المضي قدما في تنفيذ المشروع المقترح، أعلنت Sumitomo في كانون الثاني/يناير 2021، البدء في إعداد دراسة جدوى للمشروع يقوم على إعداد نموذج لإنتاج واستهلاك الهيدروجين في عمان[58]. وبحسب ما أعلنته شركة Sumitomo فإنها ستقوم بدراسة تنفيذ مشروع لإنتاج الهيدروجين باستخدام الغاز المصاحب لإنتاج النفط في إحدى مواقع الإنتاج التابعة لشركة آرا للبترول باستخدام طريقة " إصلاح الميثان بالبخار"، بطاقة إنتاجية 300-400 طن/السنة، على أن يستخدم الهيدروجين المنتج كوقود للمركبات العاملة بخلايا الوقود في مواقع الشركة العمانية. كما يتضمن المشروع بناء وحدات لالتقاط الكربون المصاحب لإنتاج الهيدروجين لاستخدامه في بعض الصناعات المحلية كما يبين الشكل 3-8.

الشكل 3-8: مخطط مشروع هجين لإنتاج الهيدروجين والطاقة الشمسية في إحدى مواقع الإنتاج التابعة لشركة آرا للبترول في سلطنة عمان

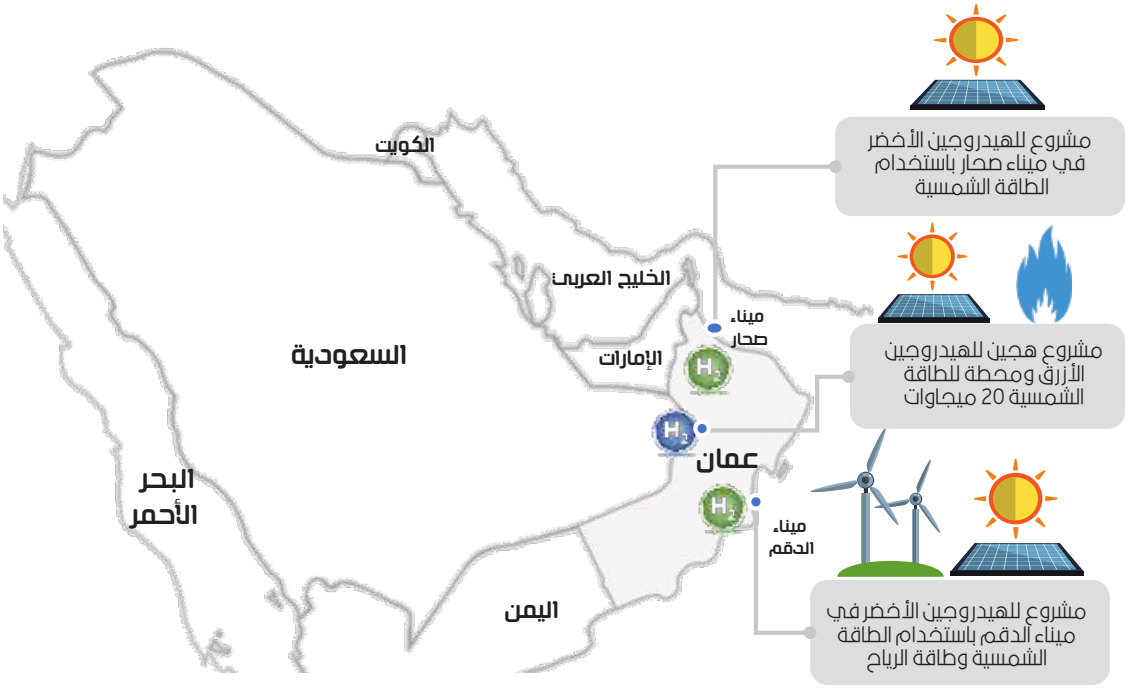


المصدر: Sumitomo Corporation

وإلى جانب ذلك، سـيتم بناء محطة توليد بالطاقة الشـمسـية قدرة 20 ميجاوات لتوليد الكهرباء اللازمة للمشروع وموقع الإنتاج بما يساهم في نزع الكربون من سلسلة إنتاج الغاز المسـتخدم في إنتاج الهيدروجين[59]. ويخطط الشـركاء أن يكون المشـروع المقترح قيد التشـغيل بحلول عام 2023. من الجدير بالذكر أن شـركة آرا للبترول تقوم بعمليات التشغيل في حقل نفطي صغير اسمه " قارة الملح" ويقع الحقل ما بين منطقتي "فرهود" و"آدم" ومن المتوقع أن يكون المشروع المقترح في تلك المنطقة.

وبذلك يصـل عدد مشـاريع الهيدروجين المزمع تنفيذها في سـلطنة عمان إلى ثلاثة مشـاريع منها مشـروعين لإنتاج الهيدروجين الأخضـر ومشـروع واحد لإنتاج الهيدروجين الأزرق كما يبين الشكل 3-9.

الشكل 3-9: مشاريع إنتاج الهيدروجين المقترحة في سلطنة عمان



3-2-4: خطط الهيدروجين في جمهورية مصر العربية

تولي مصر منذ سنوات اهتماما بالاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة، في إطار تنفيذ إستراتيجية الدولة التي تهدف إلى التوسع في مجالات الطاقة النظيفة الخضراء وزيادة مساهمة نسبة الطاقة المتجددة في مزيج توليد الكهرباء، وتنويع المزيج والاستفادة من ثروات مصر الطبيعية. وعلى إثر ذلك نجحت في تنفيذ وتشغيل مشاريع متميزة في هذا المجال منها على سبيل المثال مشروع محطة الكريمات، أول مشروع للطاقة الشمسية المركزة (Concentrated Solar Power, CSP) في مصر، وهي تقع على بعد 90 كم جنوب القاهرة، وتضم حقل شمسي يمتد على مساحة 1900 متر مربع. وتتميز تلك المنطقة، بارتفاع كثافة الإشعاع الشمسي التي تصل إلى 2400 كيلووات ساعة على المتر المربع / السنة. وتم التشغيل التجاري للمحطة في حزيران/يونيو 2011، وبلغت التكاليف الإجمالية نحو 290 مليون دولار، مولها البنك الدولي، ومرفق البيئة العالمي، وبنك اليابان للتعاون الدولي[60].

وبدأت مصر أولى خطواتها في مجال الهيدروجين عبر الإعلان عن تأسيس لجنة وزارية في تشرين الثاني/نوفمبر 2020، وذلك لإعداد استراتيجية وطنية لإنتاج الهيدروجين، وبحث فرص إنتاج واستغلال وتصدير الهيدروجين في مصر.

وفي خطوة جادة نحو الاستفادة من الشركات العالمية الرائدة في مجال الطاقة المتجددة، ودراسة فرص خلق اقتصاد للهيدروجين وتحديداً الهيدروجين الأخضر في مصر، وقعت وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة على خطاب نوايا مع شركة Siemens الألمانية في كانون الثاني/ يناير 2021، لبدء المناقشات والدراسات لتنفيذ مشروع تجريبي لإنتاج الهيدروجين الأخضر في مصر، كخطوة أولى نحو التوسع في هذا المجال، وصولًا إلى إمكانية التصدير[61]. كما تعتزم الوزارة البحث في جميع البدائل الممكنة لتوليد واستخدام الهيدروجين، مع الأخذ في الاعتبار التجارب الدولية

في هذا المجال، حيث سـيتم تحديث إسـتراتيجية الطاقة 2035 لتشـمل الهيدروجين الأخضر كمصدر للطاقة.

وبخلاف الهيدروجين الأخضـر، لدى مصـر فرص يمكن وصـفها بالواعدة في مجال الهيدروجين الأزرق القائم على استخدام الغاز الطبيعي، خاصـة أنها تملك شبكة خطوط أنابيب ضـخمة لنقل وتوزيع الغاز الطبيعي تم تشـييدها على مدار عدة عقود ووصـل طولها الإجمالي إلى قرابة 68 ألف كيلومتر، علاوة على أن مصـر لديها صـناعة غازية ناضـجة ومتكاملة وتعد من مصـدري الغاز الطبيعي المسـال منذ عام 2005. ولديها علاقات تجارية ناجحة وراسـخة مع الشـركات الأوروبية. وبالتالي تسـتطيع اسـتثمار تلك المقومات التي تملكها للدخول في مجال الهيدروجين الأزرق خاصة وأن الحكومة المصرية تسعى لأن تكون مصر مركز إقليمي لتجـارة الطاقة، ولا شك أن الهيدروجين سيكون له سوق واعد خاصة في السوق الأوروبي.

3-2-5: خطط الهيدروجين في المملكة المغربية

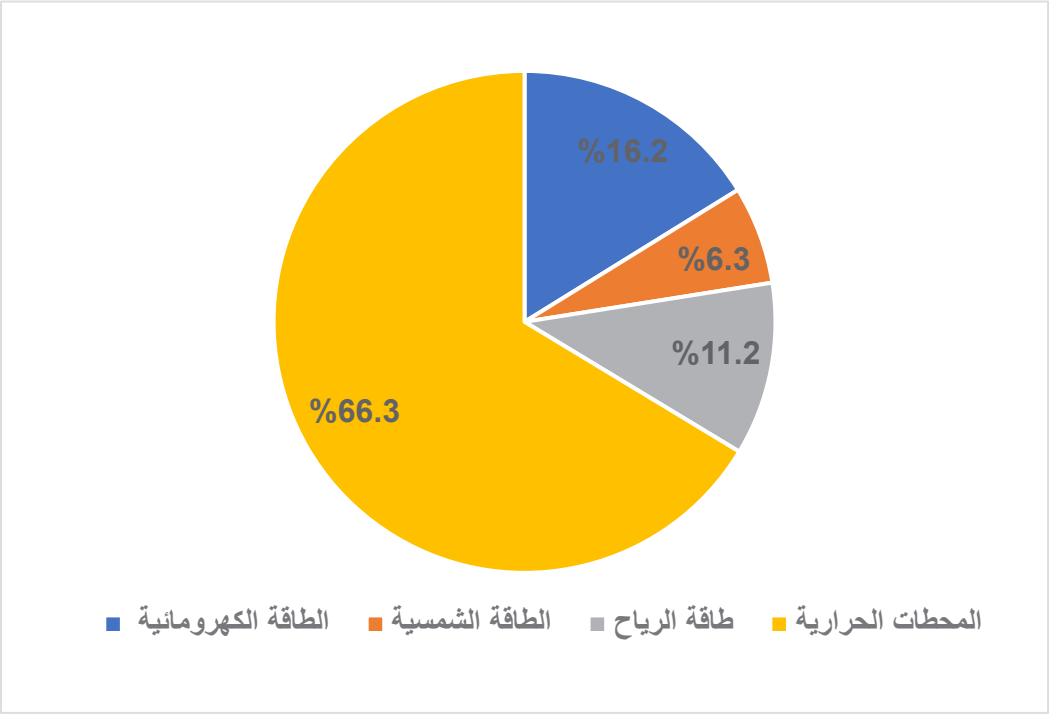
تعد المغرب من الدول العربية التي أولت اهتماماً متزايداً بالاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة، لتقليص الاعتماد على واردات النفط والغاز في تلبية احتياجات السوق المحلي من الطاقة. حيث تعد المغرب أكبر مستورد للطاقة بين دول شمال أفريقيا، لعدم وجود مصادر كافية من النفط والغاز لتلبية احتياجاتها من الطاقة. علاوة على ذلك، تعد المغرب، الدولة العربية الوحيدة التي تعتمد بشكل كبير على الفحم في توليد الطاقة الكهربائية بنسبة تصل إلى 67% من إجمالي الكهرباء المولدة عام 2019، علماً بأن محطات الفحم تشكل نحو 38.5% من إجمالي القدرات المركبة للكهرباء في البلاد.

وفي ضـوء تلك التحديات الداخلية، بدأت المغرب برنامجا وطنيا للاسـتثمار في مصـادر الطاقة المتجددة كطاقة الرياح والخلايا الكهروضـوئية لتنويع مزيج الطاقة واستغلال الموارد المتاحة بوفرة من تلك المصادر، ومن ثم تقليل الاعتماد على استيراد

النفط والمنتجات البترولية والغاز الطبيعي. وقد تم بالفعل تنفيذ عدة مشـــروعات خلال السنوات العشر الأخيرة ساهمت في رفع القدرة المركبة لمصادر الطاقة المتجددة إلى نحو 3700 ميجاوات، تمثل نحو 33.7% من إجمالي القدرات المركبة لتوليد الكهرباء كما يبين الشكل 3-10، وتساهم في تلبية نحو 20% من إجمالي الطلب على الكهرباء في المغرب [62].

علاوة على ذلك، من المخطط إضـــافة 3880 ميجاوات خلال الفترة 2021-2024، ثم إضافة 5400 ميجاوات خلال الفترة 2025-2030 ليصل إجمالي القدرات المركبة للطاقة المتجددة إلى قرابة 13000 ميجاوات بحلول عام 2030.

الشكل 3-10: توزيع القدرات المركبة لتوليد الكهرباء في المغرب، عام 2020

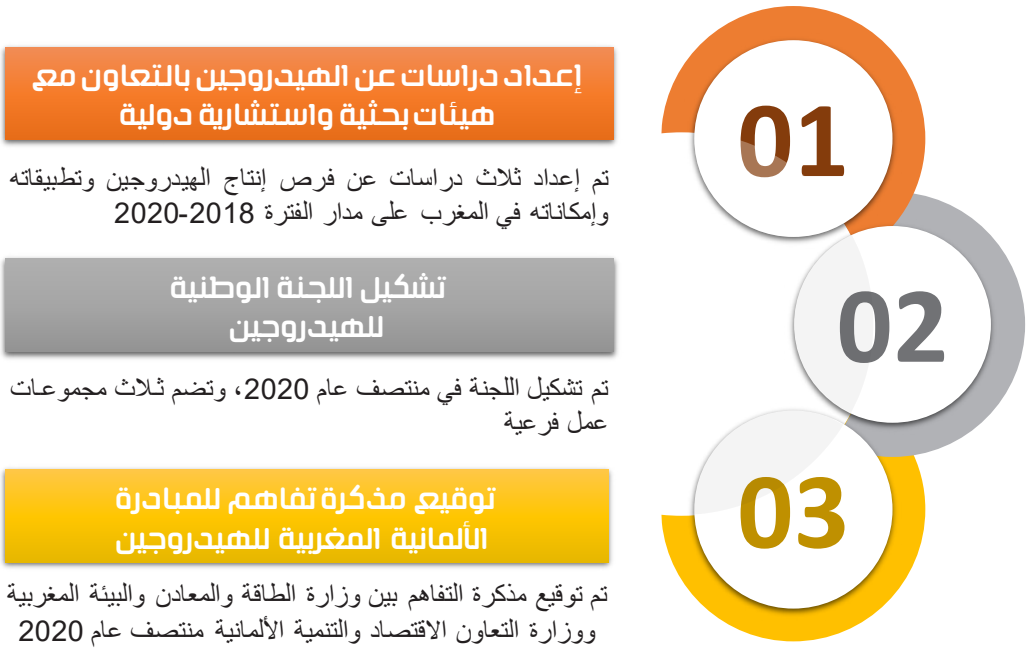


مصدر البيانات: وزارة الطاقة والمعادن والبيئة- المغرب

ويعد الهيدروجين نافذة مهمة لتنفيذ طموحات المغرب في مجال التحول الطاقي، والدفع باتجاه تحول المغرب إلى لاعبا رئيســـياً في تصـــدير الهيدروجين

ومشـتقاته إلى الأسـواق الأوروبية بحكم موقعها الجغرافي المتميز القريب من أوروبا. وعلى هذا الأســـاس، بدأت وزارة الطاقة والمعادن والبيئة منذ عام 2018 باتخاذ عدة إجراءات تهدف إلى تقييم فرص الهيدروجين في المغرب شـملت إعداد دراسـات حول الهيدروجين، وتشـــكيل اللجنة الوطنية للهيدروجين، وتوقيع مبادرة دولية للتعاون في مجال الهيدروجين كما يبين الشكل 3-11.

الشكل 3-11: الإجراءات التي اتخذتها وزارة الطاقة المغربية لتقييم فرص الهيدروجين في المغرب



وقد أســفرت الدراســات التي تم إعدادها بالتعاون مع هيئات بحثية ودولية عن وجود فرص لإنتاج الهيدروجين واســتخدامه في المغرب وإنتاج الجزيئات الخضــراء مثل الأمونيا، وأنه يمكن أن يصبح مصدراً للهيدروجين الأخضر ومشتقاته ويستحوذ على 2-4% من الســوق العالمي للهيدروجين بحلول عام 2030. وفي ضــوء النتائج الإيجابية لتلك الدراسـات، تعكف اللجنة الوطنية للهيدروجين التي تم استحداثها من قبل

وزارة الطاقة والمعادن والبيئة في تموز/ يوليو 2020 على إعداد **خارطة الطريق الوطنية للهيدروجين** التي ستضم مشاريع عملية ونموذجية لتطبيق تكنولوجيا الهيدروجين في المغرب[63]. كما تقوم اللجنة من خلال مجموعات العمل الفرعية منها باقتراح المقاربة الملائمة لتطوير الصادرات من الجزيئات الخضراء لاستغلال الفرص المتاحة في المجال، باعتبارها محور الاهتمام لدى الجانب الأوروبي. ووضع منهجية لدعم عمليات البحث والتطوير في مختلف المجالات المرتبطة بطاقة الهيدروجين.

أما من جانب المشاريع، فقد وقعت وزارة الطاقة والمعادن والبيئة المغربية على مذكرة تفاهم مع وزارة التعاون الاقتصادي والتنمية الألمانية في حزيران/يونيو 2020، لتطوير قطاع إنتاج الهيدروجين الأخضر [64،65]. حيث تتضمن الاتفاقية الأولية مشروع بناء مصنع لإنتاج الهيدروجين الأخضر والذي سيكون أول محطة لإنتاج الهيدروجين في أفريقيا يضم أجهزة للتحليل الكهربائي بقدرة 100 ميجاوات، ومن المقرر أن يمول بنك التنمية KfW المشروع بقيمة تتجاوز 300 مليون يورو. كما تتضمن الاتفاقية تعزيز التعاون في مجال الأبحاث ونقل المعرفة وبناء المهارات بالمشاركة مع معهد البحوث في الطاقة الشمسية والطاقة الجديدة المغربي (IRESEN). وفي خطوة هامة نحو تعزيز التعاون بين الجانبين، تم إبرام اتفاق للربط بين ميناء طنجة الواقع في شمال المغرب وميناء Hamburg الواقع في شمال ألمانيا في كانون الثاني/يناير 2021، بغية اعتماد الميناءين في نقل الهيدروجين الأخضر من المغرب إلى ألمانيا مستقبلاً[66].

ويستخلص مما سبق، أن المغرب قد اتخذت بالفعل خطوات جادة ورئيسية نحو الاستثمار في مجال الهيدروجين مستقبلا ليس فقط لتلبية احتياجات السوق المحلي من الطاقة ولكن لكي تصبح مصدرا رئيسيا للهيدروجين ومشتقاته وشريكاً تجارياً مع الجانب الأوروبي.

3-3: تحديات تطوير اقتصاد الهيدروجين في الدول العربية

بالرغم مما تملكه الدول العربية من مقومات تكفل نجاح قيام اقتصاد للهيدروجين على المستوى الوطني، ولعب دور عالمي في تأمين إمدادات للهيدروجين إلى الأسواق المحتملة مستقبلاً، إلا أن هناك العديد من التحديات التي تعيق الاستثمار في هذه الصناعة الواعدة، منها ما يتعلق بالجدوى الاقتصادية ومنها ما يرتبط بغياب الإجراءات التنظيمية للسوق كما يبين الشكل 3-12. ولا شك أن تلك التحديات يمكن تجاوزها مع مرور الوقت فالهيدروجين لا يزال يخطو خطواته الأولى ليس على الصعيد العربي فحسب بل على الصعيد العالمي، ولذا فإن اتخاذ الإجراءات والتدابير الفعالة، ووضع مبادرات تحفز على الاستثمار، ونشر الوعي والثقافة حول أهمية الهيدروجين كرافد من روافد التنمية كفيلة أن تقضي على كافة التحديات.

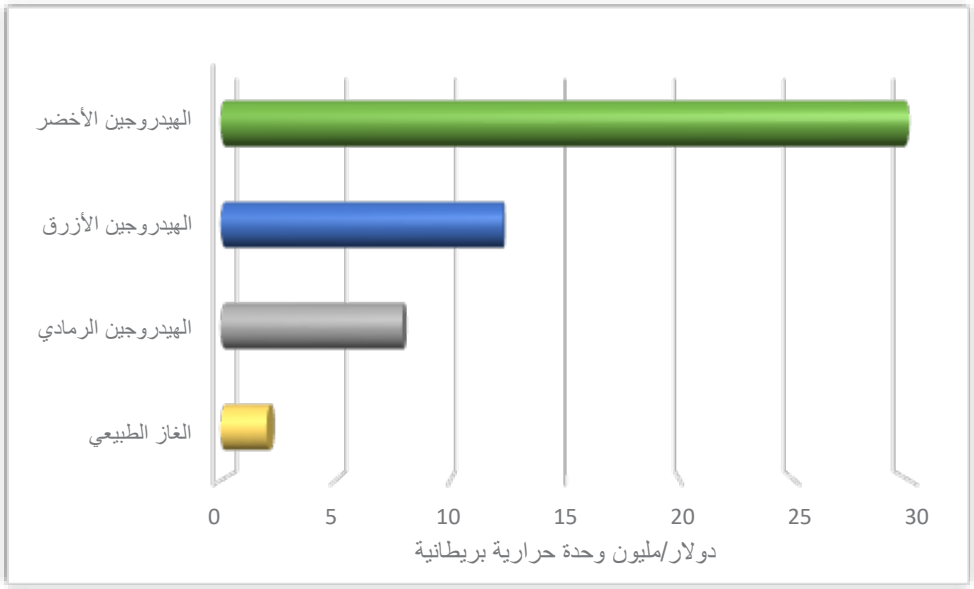
الشكل 3-12: التحديات التي تواجه تطوير صناعة الهيدروجين في الدول العربية

3-3-1: الجدوى الاقتصادية والاستثمار

يعد العامل الاقتصادي، العائق الأبرز أمام التوسع في تطوير صناعة الهيدرجين ليس فقط في المنطقة العربية وإنما عالمياً أيضاً، ويعود ذلك إلى التكلفة العالية سواء في مشاريع إنتاج الهيدروجين، أو حتى في تطبيقات استخدامه بالمقارنة مع أنواع الوقود الأحفوري الأخرى وبالأخص الغاز الطبيعي، الذي يمكن وضعه كمقياس للمقارنة مع الهيدروجين. فعلى أساس القيمة الحرارية (مليون وحدة حرارية بريطانية) تصل تكلفة إنتاج الهيدروجين الرمادي في المنطقة العربية إلى 8 دولار/مليون وحدة حرارية بريطانية بينما تصل في حالة الهيدروجين الأزرق إلى 13 دولار/مليون وحدة حرارية بريطانية، وقد تصل إلى 30 دولار /مليون وحدة حرارية بريطانية في حالة الهيدروجين الأخضر. وهي تكلفة تزيد بعدة أضعاف عن أسعار الغاز الطبيعي كما يبين الشكل 3-13، ولكن في وجود خطط حكومية وبرامج تحفيزية يمكن التغلب على هذا العائق خاصة في المرحلة الأولى من تطوير قطاع الهيدروجين.

لكن في المقابل يعد الهيدروجين من الخيارات التنافسية في مجال الطاقة منزوعة الكربون خاصة في حال تصديره إلى الأسواق ذات السياسات الواضحة في هذا الإطار مثل السوق الأوروبي، علاوة على أن تكلفة إنتاج الهيدروجين نفسها في المنطقة العربية تعد الأقل عالمياً مقارنة بباقي مناطق العالم وهو مرتكز جيد للبدء في الاستثمار على أساس التصدير إلى الأسواق المحتملة. وهو ما لجأت إليه بعض الدول العربية مثل المغرب التي شرعت في إبرام اتفاقيات ثنائية مع ألمانيا لتصدير الهيدروجين إليها مستغلة بذلك الموقع الجغرافي والتكلفة التنافسية بسبب وفرة مصادر الطاقة المتجددة.

الشكل 3-13: مقارنة بين تكلفة إنتاج الهيدروجين، وسعر الغاز الطبيعي في الدول العربية



ملاحظات:

- 8.8 كجم من الهيدروجين يعادل مليون وحدة حرارية بريطانية كأساس للمقارنة
- سعر الغاز الطبيعي هو متوسط سعر البيع (Wholesale Price) في منطقة الشرق الأوسط حسب إحصاء الاتحاد الدولي للغاز لعام 2019

3-3-2: السياسات والإجراءات التنظيمية

تحتاج الدول العربية إلى أن يكون لديها سياسة للهيدروجين وتحديد دور واضح في استراتيجيات الطاقة الوطنية. فالسياسات هي المحرك الرئيسي للاستثمار في مجال الهيدروجين، بما يتفق مع الأهداف الوطنية والخطط المستقبلية. ومع ذلك، فهناك خطوات قد اتخذت بالفعل من قبل بعض الدول العربية مثل المغرب ومصر التي بدأت نحو إعداد الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين، وتحديث خطة الطاقة الوطنية لتأخذ في الاعتبار الدور المستقبلي للهيدروجين في تلبية الطلب على الطاقة في السوق المحلي. وتستطيع الدول العربية الاستناد على ما لديها من خبرة عملية سابقة في هذا المجال، وتحديداً عندما أبدت اهتماما بمصادر الطاقة المتجددة، حيث شرعت في إعداد خطط

وأهداف وطنية تحدد حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة وفق أطر زمنية واضحة ويجرى تحديثها في إطار ما يستجد.

أما من جانب الإجراءات التنظيمية والتي يجب أن تغطي الجوانب التجارية والوظيفية وقواعد الأمن والسلامة كما يبين الشكل 3-14، فالقطاع لا يزال في مرحلة مبكرة جداً تستلزم الإعداد لسن العديد من التشريعات والإجراءات التنظيمية لتنظيم العمل في مشاريع إنتاج الهيدروجين، وتطبيقات استخدامه، لكن من الممكن الاستفادة من قوانين الغاز (Gas Act) والتشريعات المرتبطة به. فمن الجانب التجاري، لا يوجد إطار تنظيمي لإسناد وتمويل مشاريع إنتاج واستخدام الهيدروجين، أو تحديد دور للقطاع الخاص في هذا المجال.

الشكل 3-14: الإجراءات التنظيمية المطلوبة لتطوير قطاع الهيدروجين في المنطقة العربية

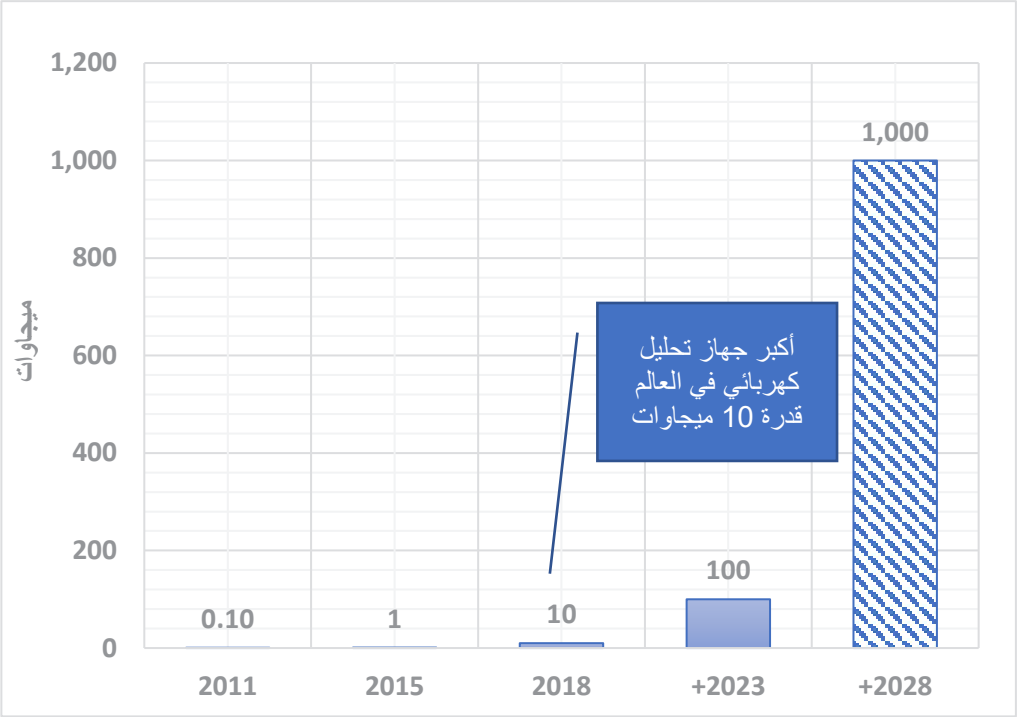
أما من جانب الإجراءات التنظيمية التي تغطي جوانب الأمن والسلامة والأمور الوظيفية، فهناك حاجة إلى وضع قواعد توضح قواعد الأمن والسلامة، والاختبارات المطلوبة والمتطلبات حسب المجال الذي سيستخدم فيه الهيدروجين، وهو ما سيتطلب وضع أكواد ومواصفات قياسية لتغطية كافة الجوانب الفنية والبيئية والاستخدام الآمن

للتعامل مع الهيدروجين. وقد كان لدولة الإمارات الريادة في هذا الإطار، حيث قامت هيئة الإمارات للمواصـــفات والمقاييس "مواصـــفات" بإعداد واعتماد اللائحة الفنية الخاصـــة بالمركبات العاملة بالهيدروجين. وبالتالي يمكن التعاون بين الدول العربية للاســتفادة مما حققته بعض الدول في هذا الإطار خاصـــة في المرحلة الأولى من بناء اقتصاد للهيدروجين.

3-3-3: متطلبات التكنولوجيا

لا شك أن لدى الدول العربية المقومات التي تمكنها من الاستثمار في مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق على حد سواء بسبب توافر المادة الخام في حال الهيدروجين الأزرق، ومصـــدر الطاقة المتجددة كما هو الحال في حالة الهيدروجين الأخضر. إلا أن متطلبات التقنيات المستخدمة في كلا النوعين لا تتوقف عند هذا الحد، بل هناك متطلبات أخرى مثل الحاجة إلى تطبيق تقنية التقاط وتخزين واســـتخدام الكربون التي لا تزال تستخدم بطاقة محدودة عالمياً، ولم تصل بعد إلى مرحلة التطبيق على نطاق تجاري واســـع لإنشـــاء مشـــاريع ضـــخمة لإنتاج الهيدرجين الأزرق. أما الهيدروجين الأخضر، فلا تزال قدرات أجهزة التحليل الكهربائي منخفضة ولا تصل بعد إلى المقياس التجاري الضخم (Mega Scale). ففي الوضع الراهن، تصل قدرة أعلى جهاز للتحليل الكهربائي إلى 10 ميجاوات (أكبر جهاز تحليل كهربائي من نوع PEM تابع لشـــركة Siemens تبلغ قدرته 10 ميجاوات وهو الأكبر في العالم لعام 2018). صحيح أنها تطور باستمرار بعد أن كانت ذات قدرات محدودة في حدود 100 كيلوات، ويتوقع أن تصـــل إلى 100 ميجاوات للجهاز الواحد بحلول عام 2023 مع اســـتمرار عمليات البحث والتطوير كما يبين الشـــكل 3-15، لكن المشـــاريع التجارية الضخمة تتطلب بناء قدرات تصل إلى 2 جيجاوات.

الشكل 3-15: تطور قدرة أجهزة التحليل الكهربائي منذ عام 2011، والمتوقع حتى عام 2028



علاوة على ذلك، فإن متطلبات المياه لأجهزة التحليل الكهربائي تشكل عائقاً إضافياً، حيث يحتاج إنتاج 1 متر مكعب من الهيدروجين (في الظروف العادية) إلى 1.4-1.7 لتر حسب الأنواع التجارية المتوافرة حالياً في السوق، وبذلك يستلزم إنتاج واحد كيلوجرام من الهيدروجين إلى 19 لتر تقريباً من المياه النقية. وبالتالي فإن بناء منشأة بحجم منشأة نيوم بطاقة إنتاجية 650 طن/اليوم من الهيدروجين ستحتاج إلى 12350 متر مكعب/اليوم أي ما يصل إلى 4.5 مليون متر مكعب/السنة. والمنطقة العربية أصلاً تعاني من شح المياه، وفي حالة استخدام مياه البحر، فلا بد من معالجتها أولاً قبل الاستخدام، وهي تكلفة إضافية تضاف إلى تكلفة الإنتاج.

3-3-4: الثقافة والوعي

لا يزال الإلمام بدور الهيدروجين في مستقبل الطاقة والمعلومات المتوافرة أمام الرأي العام محدودة للغاية، وهذا أمر طبيعي كما هو الحال مع أي تقنية جديدة وهي عملية تتطلب نشر معلومات لتعزيز الوعي العام حول فوائد الهيدروجين، ومجالات

اســتخدامه وقواعد الأمن والســلامة المرتبطة به. أما من الجانب المهني، فيجب العمل على إعـداد كوادر مؤهلـة للعمـل مع تقنيـات الهيـدروجين عبر الـدورات التـدريبيـة، والبرامج العملية، والشـراكة مع الهيئات والشـركات الدولية العاملة في المجال، وإعداد مراكز الأبحاث المتخصصة لتناول هذا النوع من الطاقات.

D 820
H2

الاستنتاجات والتوصيات

1. سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين

تضم سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين مجموعة واسعة من العمليات المتتالية بداية من عمليات الإنتاج حسب الطريقة المستخدمة، ثم مرحلة التخزين والنقل التي قد تتطلب إسالة أو ضغط الهيدروجين أو الاثنين معاً وأخيراً مرحلة الاستخدام النهائي.

وفي مرحلة الإنتاج، تعد عملية إصلاح الميثان بالبخار الطريقة الأكثر استخداماً في إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي. لكنها تتسبب في توليد انبعاثات تصل إلى 10 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل طن من الهيدروجين لذا يطلق عليه اسم "الهيدروجين الرمادي". وللتخلص من الانبعاثات الناتجة، يمكن استخدام تقنية اصطياد واستخدام وتخزين الكربون والتي تساهم في تقليل الانبعاثات حتى 90%، ليصبح الهيدروجين في تلك الحالة "هيدروجين أزرق". ولكن ستزيد التكلفة الرأسمالية لمنشأة الإنتاج بنحو 50%، بينما سترتفع التكلفة التشغيلية بنسبة 100%. أما الهيدروجين الأخضر أو المتجدد الذي يحظى بدعم دولي واسع النطاق، فينتج عبر التحليل الكهربائي لتحليل جزئ الماء إلى الأكسجين والهيدروجين، باستخدام تيار كهربائي مولد باستخدام مصادر الطاقة المتجددة. ولإنتاج واحد كجم من الهيدروجين يستهلك جهاز التحليل الكهربائي ±55 كيلووات ساعة ونحو 10 لتر من الماء منزوع المعادن، كما تنتج هذه العملية نحو 9 كجم من الأكسجين كمنتج ثانوي يمكن استخدامه للأغراض الطبية. ويكفي جهاز تحليل كهربائي بقدرة 1 ميجاوات لإنتاج ما يعادل نحو 18 كجم / الساعة.

عالميا يمثل إنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري نحو 99% من الإنتاج العالمي (76% باستخدام الغاز الطبيعي، و23% باستخدام الفحم)، بينما تساهم الطاقة المتجددة بـ1% فقط.

ويعد نقل وتخزين الهيدروجين من التحديات الرئيسية للتوسع في استخدامه كمصدر للطاقة في المستقبل، وذلك بسبب انخفاض قيمة كثافة الطاقة له مقارنة بأنواع الوقود الأخرى وبالتالي زيادة الحجم اللازم للتخزين وارتفاع تكلفة النقل والتوزيع. ولكي يصبح الهيدروجين مكوناً من مكونات نظام الطاقة العالمي وإنشاء سلسلة قيمة له ذات مرونة عالية وسهلة التشغيل، فلابد من وجود عدة خيارات تسمح بتخزين ونقل الهيدروجين بمستويات مرتفعة. ومن بين طرق نقل الهيدروجين استخدام خطوط الأنابيب إما لنقل الهيدروجين النقي أو بالخلط مع الغاز الطبيعي في شبكات نقل وتوزيع الغاز حتى نسبة 5-15% دون الحاجة إلى إدخال تعديلات جوهرية في الشبكات حسب الدراسات والمواصفات العالمية. أو باستخدام المقطورات وفي هذه الحالة يمكن نقل الهيدروجين إما في الحالة السائلة أو في الحالة الغازية تحت ضغط مرتفع، أو النقل باستخدام الناقلات في حالة المسافات البعيدة التي تزيد عن 4000 كم بعد تحويل الهيدروجين إلى مادة الأمونيا التي يمكنها حمل كميات أكبر من الهيدروجين.

2.دور الهيدروجين في عملية تحول الطاقة

تشير عملية تحول الطاقة إلى التغيرات الهيكلية المطلوبة في منظومة الطاقة لتسمح بالتخلص التدريجي من الممارسات التي تؤدي إلى إطلاق انبعاثات من غازات الاحتباس الحراري للوصول إلى نظام خالي من الكربون. وقد ثبت عملياً أن نموذج الكهرباء القائم على التوسع في محطات الطاقة المتجددة مكلف للغاية، وتحقيق نزع للكربون بشكل عميق سيأخذ وقتاً طويلاً علاوة على صعوبة تطبيقه في بعض الصناعات التي تحتاج إلى الوقود الأحفوري. من هنا بدأ الاهتمام يتجه نحو إيجاد بدائل أو مكملات مع مصادر الطاقة المتجددة لتحقيق تلك الغاية، وبرز الهيدروجين كأحد تلك الحلول كونه يصلح كوقود وكحامل للطاقة ويمكن إنتاجه من مصادر الطاقة

المتجددة مما يســهل من عملية التكامل معه واتزان الشــبكات. ومن ثم فإن اســتخدام نموذج هجين من الكهرباء والهيدروجين يمكنه التغلب على عدة تحديات متعلقة بقطاع الطاقة.

ولكن هناك أيضاً عقبات يجب العمل على تجاوزها لتحقيق اقتصاد للهيدروجين، والتي **حددتها الدراسة** في ارتفاع التكلفة التي يجب العمل على تقليلها حيث تصل تكلفة إنتاج الهيدروجين في بعض المناطق إلى نحو خمســة أمثال تكلفة الغاز الطبيعي على ســبيل المثال. علاوة على ضــرورة البدء في بناء البنية التحتية اللازمة لنقل وتوزيع الهيدروجين بما يسمح بتأسيس تجارة دولية له على غرار النفط والغاز، فشبكات نقل الهيدروجين الحالية يبلغ مجموع أطوالها حوالي 0.2% تقريبا من مجموع أطوال شبكات نقل وتوزيع الغاز الطبيعي عالميا حسب ما أحصته الدراسة. كما يجب وضع سياسات وقواعد وإجراءات تنظيمية تحفز وتضبط التوسع في استخدام الهيدروجين.

وقد أوضــحت الدراســة أن هناك عدة دول أبدت اهتماما بالهيدروجين والدور الذي يمكن أن يساهم به في عملية تحول الطاقة. وقيام البعض منهم بالشروع في إعداد وتطوير رؤى وخرائط طريق واستراتيجيات لتحديد المسار الذي يمكن اتخاذه للوصول إلى اقتصاد للهيدروجين على المستوى الوطني.

وتوصلت الدراسة إلى أن عدد الدول التي أعدت استراتيجية وطنية للهيدروجين بلغ 13 دولة حتى شــباط/فبراير 2021. ووجود نحو 16 دولة أخرى تعمل على الانتهاء من إعداد الاســتراتيجية الوطنية / خارطة الطريق للهيدروجين. وبذلك يصــل عدد الدول التي بدأت تعمل على إعداد خطط واســتراتيجيات وطنية للهيدروجين إلى 29 دولة تمثل أكثر من 70% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي، بالإضــافة إلى استراتيجية الاتحاد الأوروبي للهيدروجين التي تم الإعلان عنها **منتصف عام 2020، التي تتربع على عرش الاستراتيجيات بسبب أهدافها الطموحة للغاية.**

وفي هذا السياق، يتوقع أن يكون للهيدروجين مستقبل واعد في عملية تحول الطاقة وتقليل الكربون في عدة قطاعات اقتصادية، إما باستخدامه كمصدر للوقود، أو حامل للطاقة واستخدامه عبر تطبيقات خلايا الوقود، أو كمادة خام للعديد من الصناعات مثل صناعة السماد والمواد الكيميائية وصناعة التكرير، أو لتوفير الحرارة في الصناعات كثيفة استهلاك الطاقة مثل صناعة الصلب.

وقد توصلت الدراسة إلى أنه من المتوقع أن يكون قطاع النقل من القطاعات الواعدة التي يمكن أن تدعم الطلب المستقبلي على الهيدروجين، فبعد عمل مسح شامل للخطط المعلنة من قبل الدول الآسيوية والأوربية بالإضافة إلى الولايات المتحدة، يتوقع أن ينمو أسطول المركبات الكهربائية العاملة بخلايا الوقود بشكل غير مسبوق خلال العقد المقبل ليصل إلى قرابة 11 مليون مركبة على الأقل بحلول عام 2030 مقارنة بـ 25 ألف مركبة فقط في عام 2019.

كما سيتخرق الهيدروجين عدة قطاعات أخرى مثل القطاع الصناعي، والقطاع السكني، وقطاع الكهرباء كمصدر للطاقة أو للحرارة أو كمادة خام وعليه يتوقع أن يتضاعف الطلب العالمي على الهيدروجين (النقي) بعدة أمثال ليصل إلى 647.5 مليون طن من الهيدروجين الغازي بحلول عام 2050، مقارنة بـ 72 مليون طن/السنة في عام 2018. وعليه سيصبح الهيدروجين ركيزة أساسية في عملية تحول الطاقة المطلوبة للحد من ظاهرة الاحتباس الحراري، وتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما يتوافق مع اتفاقية باريس للمناخ حتى مع الزيادة السكانية المتوقعة خلال العقود المقبلة، التي ستزيد من الطلب الإجمالي على الطاقة. وسيحقق إيرادات قد تصل إلى أكثر من 2.5 تريليون دولار سنويا بحلول عام 2050.

3.خطط الدول العربية في مجال الهيدروجين

أبدى عدداً من الدول العربية اهتماماً بالاستثمار في مشاريع إنتاج الهيدروجين، منها ما يقوم على إنتاج الهيدروجين الأخضر ضمن خطط وطنية طموحة للتوسع في مشاريع الطاقة المتجددة، بينما يقوم البعض الآخر على التوسع في إنتاج الهيدروجين الأزرق أو مشتقاته مثل الأمونيا الزرقاء. **وقد أحصت الدراسة** عدد 11 مشروعاً مقترحاً لإنتاج واستخدام الهيدروجين في الدول العربية، غالبيتها لإنتاج الهيدروجين الأخضر بإجمالي 7 مشاريع، بينما خصص مشروعين لإنتاج الهيدروجين الأزرق، ومشروعين لاستخدام الهيدروجين كوقود في المركبات العاملة بخلايا الوقود. ولا شك أن نجاح الدول العربية في تجسيد مشاريع الإنتاج، سيمكنها من لعب دوراً هاما في السوق العالمي، والظفر بحصة جيدة من هذا السوق الواعد، لتضيف فصلاً جديداً إلى دورها التاريخي كمصدر عالمي لإمدادات النفط والغاز منذ عدة عقود.

وقد **عددت الدراسة** في الدول العربية المقومات والفرص التي تمكنها من إنشاء محور تصدير عالمي للهيدروجين ومشتقاته إلى الأسواق الراغبة، كونها تملك بنية تحتية ضخمة للغاز الطبيعي يمكن استغلالها للهيدروجين. علاوة على توافر مصادر الطاقة المتجددة (يزيد فيها كثافة الإشعاع الشمسي عن 2400 كيلووات ساعة على المتر المربع / السنة، وتزيد سرعة الرياح عن 9-11 متر/الثانية) وخطط وأهداف وطنية طموحة للاستثمار فيها. كما تتميز بموقعها الجغرافي المتميز والعلاقات التجارية الراسخة مع عدة أسواق، خاصة السوق الأوروبي والسوق الآسيوي. ولدى شركات البترول الوطنية وشركات البترول العالمية شراكة استراتيجية منذ عدة عقود.

وبالرغم من تلك المقوماتً، إلا أن هناك جملة من التحديات التي قد تعيق الاستثمار في هذه الصناعة الواعدة، منها ما يتعلق بالجدوى الاقتصادية ومنها ما يرتبط بغياب الإجراءات التنظيمية للسوق. ويعد العامل الاقتصادي، العائق الأبرز أمام

التوسع في تطوير صناعة الهيدرجين ليس فقط في المنطقة العربية وإنما عالمياً أيضاً، ويعود ذلك إلى التكلفة العالية سواء في مشاريع إنتاج الهيدروجين، أو حتى في تطبيقات استخدامه بالمقارنة مع أنواع الوقود الأحفوري الأخرى وبالأخص الغاز الطبيعي. فعلى أساس القيمة الحرارية تصل تكلفة إنتاج الهيدروجين الرمادي في المنطقة العربية إلى 8 دولار/مليون وحدة حرارية بريطانية بينما تصل في حالة الهيدروجين الأزرق إلى 13 دولار/مليون وحدة حرارية بريطانية، وقد تصل إلى 30 دولار /مليون وحدة حرارية بريطانية في حالة الهيدروجين الأخضر. وهي تكلفة تزيد بعدة أضعاف عن الغاز الطبيعي. لكن في المقابل يعد الهيدروجين من الخيارات التنافسية في مجال الطاقة منزوعة الكربون خاصة في حال تصديره إلى الأسواق ذات السياسات الواضحة في هذا الإطار مثل السوق الأوروبي الذي سيصبح السوق الرئيسي للهيدروجين، علاوة على أن تكلفة إنتاج الهيدروجين نفسها في المنطقة العربية تعد الأقل عالمياً مقارنة بباقي مناطق العالم وهو مرتكز جيد للبدء في الاستثمار على أساس التصدير إلى الأسواق المحتملة. وهو ما لجأت إليه بعض الدول العربية مثل المغرب التي شرعت في إبرام اتفاقيات ثنائية مع ألمانيا لتصدير الهيدروجين إليها مستغلة بذلك الموقع الجغرافي والتكلفة التنافسية بسبب وفرة مصادر الطاقة المتجددة.

لا شك أن لدى الدول العربية المقومات التي تمكنها من الاستثمار في مشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر والأزرق على حد سواء بسبب توافر المادة الخام في حال الهيدروجين الأزرق ومصدر الطاقة المتجددة في حالة الهيدروجين الأخضر. إلا أن متطلبات التقنيات المستخدمة لا تتوقف عند هذا الحد، بل هناك متطلبات أخرى مثل الحاجة إلى تطبيق تقنية التقاط وتخزين واستخدام الكربون التي لا تزال تستخدم بطاقة محدودة عالمياً، ولم تصل بعد إلى مرحلة التطبيق على نطاق تجاري واسع. أما الهيدروجين الأخضر، فلا تزال قدرات أجهزة التحليل الكهربائي منخفضة ولا تصل بعد إلى المقياس التجاري الضخم. ففي الوضع الراهن، تصل قدرة أعلى جهاز للتحليل

الكهربائي إلى 10 ميجاوات تابع لشـركة Siemens. المشـاريع التجارية الضـخمة تتطلب بناء قدرات تصل إلى 2 جيجاوات.

علاوة على ذلك، فإن متطلبات المياه لأجهزة التحليل الكهربائي تشـكل عائقاً إضافياً، حيث يحتاج إنتاج واحد كيلوجرام من الهيدروجين إلى 19 لتر تقريباً من المياه النقية. وبالتالي فإن بناء منشـأة بحجم منشـأة نيوم بطاقة إنتاجية 650 طن/اليوم من الهيدروجين سـتحتاج إلى 12350 متر مكعب/اليوم أي ما يصـل إلى 4.5 مليون متر مكعب/السـنة. والمنطقة العربية أصـلاً تعاني من شـح المياه، وفي حالة اسـتخدام مياه البحر، فلا بد من معالجتها أولاً قبل الاسـتخدام، وهي تكلفة إضـافية تضـاف إلى تكلفة الإنتاج.

٤.التوصيات

في ضـوء التطورات العالمية الرامية إلى خلق سـوق واعد للهيدروجين ودعم التحول إلى مستقبل منخفض الكربون، **توصي الدراسة** بما يلي:

- قيام المزيد من الدول العربية في الفترة المقبلة بإعداد اسـتراتيجيات أو خرائط وطنيـة حول الهيـدروجين تحـدد الأهـداف والإطـار الزمني، ودوره في استراتيجيات الطاقة الوطنية فالسياسـات هي المحرك الرئيسـي للاستثمار في مجال الهيدروجين.
- تحديث خطط الطاقة الوطنية لتأخذ في الاعتبار الدور المسـتقبلي للهيدروجين في تلبية الطلب على الطاقة وتستطيع الدول العربية الاستناد على ما لديها من خبرة عملية سـابقة في هذا المجال، وتحديداً عندما أبدت اهتماما بمصـادر الطاقة المتجددة، حيث شـرعت في إعداد خطط وأهداف وطنية تحدد حصـة

الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة وفق أطر زمنية واضحة ويجرى تحديثها في إطار ما يستجد.

- السعي نحو إبرام شراكات استراتيجية مع الأسواق الكبرى للهيدروجين التي ستحتاج إلى استيراده مستقبلاً من خارج أراضيها مثل السوق الأوروبي، واليابان، والصين وكوريا الجنوبية والصين.
- إنشاء مراكز للبحوث حول تقنيات إنتاج الهيدروجين وتطبيقاته مثل خلايا الوقود. ودعم التكامل فيما بينها والاستفادة من الخبرات والتجارب التي قطعتها بعض الدول في هذا الشأن. كما يجب العمل على إعداد كوادر مؤهلة للعمل مع تقنيات الهيدروجين عبر الدورات التدريبية، والبرامج العملية، والشراكة مع الهيئات والشركات الدولية العاملة في المجال.
- الاستفادة من انخفاض تكلفة إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي بالمنطقة العربية للتوسع في إنتاج الهيدروجين الأزرق الذي يستخدم تقنية اصطياد واستخدام وتخزين الكربون، بما يضمن استغلال موارد الغاز مستقبلا وخلق نافذة تدعم الطلب عليه في حال تحول الأسواق إلى استخدام الهيدروجين وتقليل الاعتماد على الغاز.
- الاستمرار في تنفيذ مشاريع استرشادية لإنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر بالتعاون مع الشركات الدولية المتخصصة كالشركات اليابانية والألمانية والفرنسية، على أن يتم تطويرها إلى مشاريع تجارية مستقبلاً.
- نشر الوعي والثقافة حول أهمية الهيدروجين، وتوفير معلومات لتعزيز الوعي العام حول فوائد الهيدروجين، ومجالات استخدامه وقواعد الأمن والسلامة المرتبطة به.

المراجع

تسلسل المراجع حسب ما ورد في الدراسة

[1] Aaron Granger & Let's Talk Science;" The History and Uses of Hydrogen"; August 31, 2019.

[2] Airship.net;" The Hindenburg Disaster"; available at:
https://www.airships.net/hindenburg/disaster/

[3] National Aeronautics and Space Administration (NASA); Nancy Bray;" Space Applications of Hydrogen and Fuel Cells"; August 4, 2017.

[4] College of the desert;" Module 1: Hydrogen Properties"; Revision 0, December 2001.

[5] Shell;" Shell Hydrogen Study: Energy OF The Future?"; Hamburg, 2017

[6] NPFA, Fire protection handbook, 2008 edition

[7] "Hydrogen Strategy for Canada: Seizing the Opportunities for Hydrogen, A call to action"; December 2020

[8] نفس المرجع رقم 7

[9] نفس المرجع رقم 7.

[10] Dii Desert Energy;" Risks and Opportunities of green hydrogen production and export"; November 2020.

[11] LYNX Industry Notes;" Hydrogen Energy"; November 2020.

[12] International energy Agency (IEA); "The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities"; Report prepared by the IEA for the G20, Japan"; June 2019.

[13] نفس المرجع رقم 11

[14] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRCO);" National Hydrogen RoadMap: Pathways to an economically sustainable
hydrogen industry in Australia"; 2018.

[15] Hydrogen Europe;" Hydrogen Production: Steam Methane Reforming"
https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-production-0

[16] بيانات تم احتسابها استناداً إلى نموذج بيانات أحد الأنواع التجارية المتاحة في السوق
Hydrogenics;" "Renewable Hydrogen: The missing link between the power, gas, industry and transport sectors"; June 2018

[17] CSIRCO;" National Hydrogen RoadMap: Pathways to an economically sustainable
hydrogen industry in Australia"; 2018.

[18] International Energy Agency (IEA); Technology Roadmap for Hydrogen and fuel cell"; June 2015.

[19] نفس المرجع رقم 12

[20] Shell;" Shell Hydrogen Study: Energy OF The Future?"; Hamburg, 2017

[21] Liquified Gas Carrier;" Fully refrigerated tankers that carry LPG, Ammonia & Vinyl chloride"; http://www.liquefiedgascarrier.com/Fully-Refrigerated-Ships.html

[22] Cedigaz;" CLEAN HYDROGEN: Building Large-scale Supply Chains"; July 2020.

[23] Baker Mackenzie;" Shaping Tomorrow's Global Hydrogen Market"; 2020.

[24] World Energy Council (WEC); NEW HYDROGEN ECONOMY - HOPE OR HYPE?"; Insight Brief 2019.

[25] نفس المرجع رقم 20

[26] Emre Gençer; MIT;" Hydrogen towards deep decarbonization"; June 2019.

[27] International Energy Agency (IEA), Hydrogen Tracking report — June 2020. https://www.iea.org/reports/hydrogen

[28] Hydrogen Energy Ministerial Meeting;" Global Action Agenda Progress Report: the Hydrogen Energy Ministerial 2020"; Online event, October 14, 2020.

[29] Alstom;" Successful year and a half of trial operation of the world's first two hydrogen trains, next project phase begins"; Press Release; May 19, 2020.

[30] أوابك، وائل حامد عبد المعطي،" استخدام الغاز الطبيعي المسال كوقود للنقل البحري"، الكويت، تموز/يوليو 2020

[31] IRENA;" Green Hydrogen: A Guide TO Policy Making"; 2020

[32] Hydrogen Council;" Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective"; 20 January 2020.

[33] وائل حامد عبد المعطي، تقرير حول الدورة السابعة لمجموعة خبراء الغاز بلجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا، مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد السادس والأربعون 2020، العدد 174.

[34] France;" Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plan"; July 2020.

[35] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy;" The National Hydrogen Strategy"; June 2020.

[36] EU;" A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe"; July 2020.

[37] The International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE) website.

[38] Hydrogen Council;" Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition"; November 2017.

[39] World bank;" Global wind atlas", available at: https://www.globalwindatlas.info/

[40] REN21; Renewables 2020: Global Status Report"

[41] Airliquide;" Air Liquide opens first hydrogen station in Dubai in the Emirates"; October 11, 2017 https://energies.airliquide.com/air-liquide-opens-first-hydrogen-station-dubai-emirates

[42] هيئة كهرباء ومياه دبي،" سمو الشيخ أحمد بن سعيد آل مكتوم يضع حجر الأساس لمشروع "الهيدروجين الأخضر" الأول من نوعه في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا في مجمع محمد بن راشد آل مكتوم للطاقة الشمسية"، خبر صحفي.

[43] Smart Energy;" Solar-driven hydrogen electrolysis facility, a first for middle east"; February 5, 2019.

https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-energy/solar-driven-hydrogen-electrolysis-facility-a-first-for-middle-east/

[44] وكالة أنباء الإمارات، "إكسبو 2020 دبي.. توليد الطاقة من مصادر متجددة بنسبة 100%" ، أكتوبر 27، 2019.

[45] H2 View;" Abu Dhabi Hydrogen Alliance launched to drive green hydrogen opportunities"; January 18, 2021.
https://www.h2-view.com/story/abu-dhabi-hydrogen-alliance-launched-to-drive-green-hydrogen-opportunities/#:~:text=The%20Abu%20Dhabi%20Hydrogen%20Alliance,as%20utilities%2C%20mobility%20and%20industry.

[46] Masdar;" Masdar leads initiative to support development of Abu Dhabi's green hydrogen economy"; press release; January 18, 2021.
https://news.masdar.ae/en/news/2021/01/18/16/45/masdar-leads-initiative-to-support-development-of-abu-dhabis-green-hydrogen-economy

[47] الموقع الرسمي لهيئة الإمارات للمواصفات والمقاييس

https://www.esma.gov.ae/ar-ae

[48] Saudi Aramco;" Saudi Aramco and Air Products inaugurate Saudi Arabia's first hydrogen fueling station"; Press Release; June 18, 2019.
https://www.aramco.com/en/news-media/news/2019/hydrogen-inauguration

[49] Trevor Brown (Green Ammonia Association), "Saudi Arabia to export renewable energy using green ammonia"; July 16, 2020.

https://www.ammoniaenergy.org/articles/saudi-arabia-to-export-renewable-energy-using-green-ammonia/

[50] Air Products;" Air Products, ACWA Power and NEOM Sign Agreement for $5 Billion Production Facility in NEOM Powered by Renewable Energy for Production and Export of Green Hydrogen to Global Markets"; Press Release, July 7, 2020.

https://www.airproducts.com/news-center/2020/07/0707-air-products-agreement-for-green-ammonia-production-facility-for-export-to-hydrogen-market#/

[51] Air Products;" Carbon-free hydrogen: the energy source of the future"; Investor presentation, July 7, 2020.

[52] IEEJ;" World's first blue Ammonia Shipment opens new route to a sustainable future"; Joint Press Release; September 27, 2020.
https://eneken.ieej.or.jp/en/press/press200927_en.pdf

[53] Saudi Aramco;" World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future"; press Release, September 27, 2020.
https://www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment

[54] DEME Group ;" DEME AND PARTNERS PRESENT HYPORT®DUQM, A LARGE-SCALE GREEN HYDROGEN PROJECT IN OMAN"; March 3, 2020.

[55] DEME Group;" KICK-OFF OF THE HYPORT® DUQM GREEN HYDROGEN PROJECT"; December 17, 2020.

https://www.deme-group.com/news/kick-hyportr-duqm-green-hydrogen-project

[56] Mark Geilenkirchen ;"SOHAR Port and Freezone | Going Green: Plans to create first green hydrogen hub in Oman"; White Paper, 2020.

[57] PV-Magazine;" Sumitomo reveals hydrogen plans in Australia, Oman"; JANUARY 26, 2021.
https://www.pv-magazine.com/2021/01/26/sumitomo-reveals-hydrogen-plans-in-australia-oman/

[58] نفس المرجع السابق

[59] Sumitomo Corporation;" Commencement of Feasibility Study on Hydrogen Hybrid Project Based on Local Production and Consumption in Oman"; January 22, 2021.
https://www.sumitomocorp.com/en/jp/news/release/2021/group/14290

[60] وائل حامد عبد المعطي، " دور الغاز الطبيعي في تحقيق التنمية المستدامة في الدول العربية-الجزء الثاني"، مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد الحادي والأربعون 2015، العدد 155

[61] RENEWAFRICA;" Siemens signs agreement to produce green hydrogen in Egypt"; January 19, 2021.
https://renewafrica.biz/2021/01/19/siemens-signs-agreement-to-produce-green-hydrogen-in-egypt/

[62] المملكة المغربية، وزارة الطاقة والمعادن والبيئة، أرقام أساسية لقطاع الطاقة، طبعة عام 2019

[63] المرصد المغربي للطاقة، إحداث اللجنة الوطنية للهيدروجين بهدف مواكبة خارطة الطريق لتطوير البحث العلمي والإنتاج والتسويق.

https://www.observatoirenergie.ma/ar/actualites/energies-renouvelables-creation-dune-commission-/nationale-de-lhydrogene

[64] RenewablesNow website;" Morocco, Germany to jointly work on green hydrogen production"; June 19, 2020.

[65] Fraunhover; " Fraunhofer research for German-Moroccan hydrogen initiative"; press release, July 29, 2020.

[66] EnergyMix report;" Green hydrogen to be transported from Morocco to Germany via port of Tangiers"; January 12, 21.

https://www.energymixreport.com/green-hydrogen-to-be-transported-from-morocco-to-germany-via-port-of-tangiers/

Abstract

Hydrogen production and its role in the energy transition

Hydrogen is gaining unprecedented momentum as a central pillar to foster the energy transition. This growing interest stems from the global shift toward decarbonization of the energy system. Hydrogen can be used as a fuel or an energy carrier and storage or a feedstock for many industries while emits no GHG emissions. It has many applications across industry sector, power generation and residential sectors.

In this regard, government policy is a crucial element to achieve such transition in a successful and well-organized manner and help to support the development of Hydrogen economy in a cost-effective way. This could include low carbon fuel regulations, CO_2 pricing, vehicle emissions regulations and zero-emission vehicle programs. Furthermore, policies may include specific incentives and/or legislations that could enable to reduce the risk of hydrogen demand and supply for the sector actors. Such policy support may help to attain the required economies of scale to enable the industry to drive down costs across different parts of the hydrogen value chain.

This study provides an overview of different production pathways of hydrogen, and its current and potential uses to decarbonize the global economy. It also addresses international policies and strategies that promote the use of hydrogen to foster energy transition.

The study is divided into three chapters. **Chapter-I** provides an overview of different production pathways of hydrogen and the most commonly used processes to produce it. Furthermore, it covers the main parts of hydrogen value chain and the most recent technological advances in each part. While **Chapter-II** is devoted to highlight the potential uses of hydrogen to foster the energy transition. It also addresses the international policies and strategies adopted to promote the use of hydrogen as a fuel for the future. **Chapter- III** analyses the key success factors to develop hydrogen sector in the Arab countries and actions needed to achieve that end. Moreover, it provides a market survey of the announced projects and plans to invest in this promising sector.

D 82
H2