مجلة كلية الآداب بقنا (دورية أكاديمية علمية محكمة)

طاقة الهيدروجين وآثرها على النقل:

دراسة جغرافية

د. محمد سالم سعداوي سالم

مدرس بقسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية
كلية الآداب – جامعة حلوان

DOI: 10.21608/qarts.2024.329452.2089

مجلة كلية الآداب بقنا – جامعة جنوب الوادي – المجلد (٣٣) العدد (٦٥) أكتوبر ٢٠٢٤

الترقيم الدولي الموحد للنسخة المطبوعة ISSN: 1110-614X

الترقيم الدولي الموحد للنسخة الإلكترونية ISSN: 1110-709X

موقع المجلة الإلكتروني: https://qarts.journals.ekb.eg

طاقة الهيدروجين وآثرها على النقل: دراسة جغرافية

الملخص:

يعد الهيدروجين ناقل للطاقة، فدوره يتشابه مع دور الكهرباء، وتتصدر الدول المتقدمة قائمة الدول المنتجة والمستهلكة للهيدروجين، فنجد أن الصين هي المنتج الرئيسي له بنسبة ٣٠.٥٪ في عام ٢٠٢٤، وتعد كذلك المستهلك الأكبر له عالميًا، إذ بلغ استهلاكها ٢٩٪ من الطلب العالمي، وتليها الولايات المتحدة الأمريكية. ووصل عدد المركبات التي تعمل بالهيدروجين في العالم إلى ١٤٢.٨ ألف مركبة في عام ٢٠٢٤، وبلغ معدل النمو السنوي في عددها ١٩.٥٪ سنوياً خلال الفترة من ٢٠١٨– ٢٠٢٤، وتتصدر الولايات المتحدة الأمريكية دول العالم بأكثر من ثُلث (٣٦.٨٪) عددها، تليها كوريا الجنوبية بنسبة تقترب من الربع (٢٤.٢٪)، ثم الصين بنسبة تقترب من الخمس (١٩٪)، ثم اليابان بنسبة العشر (٩.٨٪).

ووصل عدد محطات الوقود إلى ١٢٣١ محطة عام ٢٠٢٤، بنسبة نمو ١٧.٦٪ سنوياً خلال الفترة من ٢٠١٨ – ٢٠٢٤، وتستأثر الصين بثلث (٣١.٧٪) عددها، تليها كوريا الجنوبية واليابان بنسب ٢٣.٢، و١٣.٢٪ على التوالي. إن مركبات الوقود الهيدروجيني هي مركبات لا تحتوي على انبعاثات من العوادم، وبالتالي تقليل تلوث الهواء، ومن ثم فإن التوقعات المستقبلية على زيادة الطلب على الهيدروجين في النقل كبيرة جداً، ويمكن تشغيل أي وسيلة نقل باستخدام الهيدروجين سواء مباشرة باستخدام خلايا الوقود أم عن طريق الوقود المعتمد على الهيدروجين في محركات الاحتراق الداخلي.

الكلمات المفتاحية: طاقة الهيدروجين، جغرافية النقل، خلايا الوقود الهيدروجيني، المركبات الهيدروجينية.

- **تمهيد:**

يتم الترويج لغاز الهيدروجين كوقود محتمل في مجالات النقل المختلفة مستقبلاً، وإنه بديل منخفض الكربون للمنتجات النفطية مثل البترول والغاز الطبيعي، كما إنه طاقة مكملة للطاقات الأخرى بجانب الكهرباء والوقود الحيوي، وتعد إحدى مصادر الطاقة المتجددة التي تبشر بآفاق اقتصادية واعدة في المستقبل القريب، ففي ظل الارتفاع المتزايد في أسعار النفط لم يعد أمام الدول من خيار سوي البحث عن مصادر بديلة أخرى جديدة للطاقة، ورخيصة، **(الدليمي، ٢٠١٨، ٢٩)** ونظيفة حيث لا ينتج عنها ملوثات للبيئة خاصة مع استمرار المخاوف من ظاهرة الاحتباس الحراري والتغيرات المناخية. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ١٨٨)**

وتعد السيارات التي تعمل بخلايا الوقود الهيدروجيني أفضل من السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطارية، حيث لا يصدر عنها أي انبعاثات من عوادم السيارات مما يقلل من تلوث الهواء. ويمكن تحويل الهيدروجين إلى وقود مثل الميثان الاصطناعي والميثانول والأمونيا والوقود الهيدروجيني السائل. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٣)** وتعد ذرة الهيدروجين أبسط الذرات وأخفها وأكثرها شيوعاً في الكون، حيث تكون نحو ٩٠٪ من كتلة عناصر الكون. مما يعنى وجوده تقريباً في كل شيء عضوي وكل الكائنات الحية، وفي أي مادة تحتوي على عنصر الكربون ما عدا الألماس والجرافيت. ***(Palmer, 1997, 12)***

ويعد الهيدروجين ناقل للطاقة، فدوره يتشابه مع دور الكهرباء، حيث يمكن إنتاج كلاهما من مصادر الطاقة المختلفة، وكلاهما متعدد الاستخدامات في العديد من المجالات والتطبيقات، ولا ينتج عنهما انبعاثات ضارة كالغازات الدفيئة والجسيمات وأكاسيد الكبريت وغاز الأوزون. وينتج عند استخدام الهيدروجين الماء فقط، **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٠)** ولكن يمكن أن ينتج ثاني أكسيد الكربون بكثافة عالية إذا تم إنتاجهما من الوقود الأحفوري مثل

الفحم والنفط، لذا يتجه العالم نحو الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة أو الطاقة النووية في الوقت الحالي والمستقبلي. والتي من المتوقع أن تمد العالم بنصف احتياجاته من الطاقة منتصف القرن الواحد والعشرين (**الزاملى**، ٢٠٠٨، ٢٨٣).

ويختلف الهيدروجين عن الكهرباء في إنه حامل طاقة كيميائية، ويتكون من جزيئات وليس إلكترونات فقط، وتعد الطاقة الكيميائية جذابة حيث يمكن تخزينها ونقلها بصورة مستقرة مثل نقل الغاز الطبيعي، ويمكن تخزين الجزيئات لفترات طويلة، ونقلها بالسفن عبر البحار، وحرقها لإنتاج طاقة حرارية، ويمكن استخدامها في البنية التحتية الخاصة بالوقود الأحفوري، وكذلك دمج الهيدروجين مع عناصر أخري مثل النيتروجين والكربون لصنع وقود يعتمد على الهيدروجين. ***(IEA, 2019, 35)***

ويتأثر نظام الطاقة القائم على التدفق كالطاقة الأحفورية بالعرض والطلب، ولذا فهي عرضه لانقطاع العرض، أما الطاقة الكيميائية فيسهل تخزينها، مما يسهم بشكل كبير في مرونة نظام الطاقة العالمي، وإتاحة إمكانية تخزين الطاقة مما يجعل مخزون الطاقة عنصر في اقتصاد الطاقة. ***(IEA, 2019, 36)***

- **أسباب الدراسة:**

يرجع اختيار الموضوع إلي زيادة أزمة الطاقة على مستوي العالم، وزيادة الطلب على وسائل النقل بمختلف أنواعها، وظهور طاقة الهيدروجين كأحد حلول هذه الأزمة العالمية، كما أنها طاقة جديدة لم يتم تناولها بعد في أبحاث أو دراسات جغرافية. وكذلك دراسة آثرها على وسائل النقل المختلفة.

- **أهمية الدراسة:**

- ابراز دور الجانب النفعي في البحوث الجغرافية وطرح بدائل لحل المشكلات البيئية والمجتمعية، ومن ثم مساعدة صناع القرار على إيجاد حلول لمشكلة نقص الطاقة.

- تعد الدراسة خطوة للتعرف على أهمية طاقة الهيدروجين ومدي تأثيرها على وسائل النقل المختلفة.

- **أهداف الدراسة:**

- دراسة الهيدروجين، والتعرف على كيفية استخدامه كطاقة.
- تقييم مدي ملائمة الهيدروجين ومشتقاته للاستخدام في وسائل النقل المختلفة، سواء نقل جوي أم بري وبحري.
- استشراف مستقبل استخدام الهيدروجين في مجالات النقل.

- **مشكلة الدراسة:**

تعد إدارة نقل الأفراد والبضائع من أصعب التحديات التي تواجه المخططين. ومن المتوقع بحلول عام ٢٠٣٠، أن تتجاوز حركة المسافرين ٧ مليار مسافر أي بزيادة قدرها ٥٠٪ عن الوضع الراهن، وسيزداد نقل البضائع بنسبة ٧٠٪ على مستوى العالم. ***(worldbank.org)*** وبالتالي طلب متزايد على مركبات النقل، ومع أزمة الطاقة العالمية، فكان لابد من البحث عن مصادر وأنواع جديدة للطاقة، مثل طاقة الهيدروجين.

- **مناهج البحث وأساليب الدراسة:**

بنيت الدراسة على عدة مناهج جغرافية أسهمت في التعرف على موضوع الدراسة، وتحليل بياناتها، ومن هذه المناهج الآتي:

- **المنهج الموضوعي:** لتحديد موضوع البحث وتحليل بياناته، والتعرف على طاقة الهيدروجين وآثرها على النقل.
- **المنهج الأصولي:** وترجع أهميته إلى التأكيد على الدراسات المنهجية الأصولية في مجالات البحث العلمي لاسيما الجغرافية منها، وهو يبحث في تأصيل الظاهرة وخصائصها وعناصرها المختلفة وعلاقتها بالعوامل المؤثرة فيها، وهي تتمثل هنا

استعمال طاقة الهيدروجين في النقل باعتبارها عامل مساعد في حل مشكلة الطاقة مستقبلاً.

- **المنهج التاريخي:** الذي استعرض التطور التاريخي لطاقة الهيدروجين، وتطور الطلب العالمي عليها.
- **أساليب الدراسة وآلياتها:** تعتمد الدراسة على بعض الأساليب الوصفية والتحليلية والكمية والخرائط، والتي عكست أهمية الدراسة، وأبرزت نتائجها.

- **مصادر البيانات:**

بنيت الدراسة على مجموعة من مصادر البيانات، منها ما يختص بالبحوث والدراسات الخاصة بالجغرافيا الاقتصادية بصفة عامة للتعرف على مناهج وأساليب البحث وتحليل الظاهرة، ومنها ما يتعلق ببيانات واحصاءات الدراسة مثل بيانات منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، ووكالة الطاقة الدولية، والوكالة الدولية للطاقة المتجددة، ومدونات البنك الدولي.

- **محتوي الدراسة:**

جاءت الدراسة لتتناول مجموعة من العناصر، تتناول ماهية الهيدروجين، والتطور التاريخي لإنتاجه، والتوزيع الجغرافي للدول المنتجة والمستهلكة له، وكيفية استخدام الهيدروجين، واستخدامات الهيدروجين في وسائل النقل المختلفة (البرية والجوية والبحرية)، ومشكلات استخدام طاقة الهيدروجين وكيفية التغلب عليها، واحتمالات المستقبل للطلب على الهيدروجين في النقل.

أولاً: تطور إنتاج الهيدروجين

عُرف الهيدروجين منذ زمن بعيد، ولكن بداية التعامل التجاري معه جاءت في مطلع القرن العشرين، ولم يكن التعامل معه بصفته وقودًا أو مادة خامًا، ولكنه كان يُستعمل بصفته غاز رفع، لأنه مادة خفيفة جدًا، فكان يتم استعماله بالمناطيد الهوائية، خاصة أن تكلفة الهيليوم في ذلك الوقت كانت مرتفعة، عكس الهيدروجين الذي كان مادة متوفرة ورخيصة، ويمكن استعماله لهذا الغرض، وكان ذلك قبل اختراع الطائرات النفاثة. ***(IRENA, 2018, 15)***

ومنذ حادثة تسرّب الهيدروجين في أحد المناطيد، وانفجاره عام ١٩٣٧ بولاية نيوجيرسي الأميركية، وبدأت إعادة التفكير في استعمال الهيدروجين، وبدأ استعماله بشكل وقود مع انطلاق وكالة ناسا الأميركية في خمسينيات القرن الماضي، إذ بدأت وكالة الفضاء الأميركية استعماله وقودًا من خلال استغلاله في رحلات مركباتها إلى الفضاء، بسبب طبيعته منخفضة الوزن وعالية الطاقة، والوكالة كانت مهتمة بالوزن، فهي لا تريد استعمال أوزان كبيرة من الوقود في بعثاتها الخارجية. ***(IRENA, 2018, 16)***

وشهد الهيدروجين عدة محاولات لاستخدامه، ولكن لم تترجم أي منها إلى استثمار مستدام، إلى أن زاد الاهتمام به منذ سبعينيات القرن العشرين، بسبب تذبذب أسعار النفط والاهتمام العالمي بتلوث الهواء والأمطار الحمضية، فتم إطلاق المجلة الدولية للطاقة الهيدروجينية في عام ١٩٧٦، وتم إنشاء برنامج التعاون في تكنولوجيا الهيدروجين وخلايا الوقود التابع لوكالة الطاقة الدولية في عام ١٩٧٧. **(وكالة الطاقة الدولية، ٢٠١٨)**

(أ) تغيرات إنتاج الهيدروجين خلال الفترة من ١٩٧٥ – ٢٠٢٤

وتفيد بيانات الجدول (١) والشكل (١) في إلقاء الضوء على تطور إنتاج الهيدروجين والطلب العالمي عليه منذ عام ١٩٧٥ حتى ٢٠٢٤، ومنهما يتضح الآتي:

(١) تغيرات جملة إنتاج الهيدروجين:

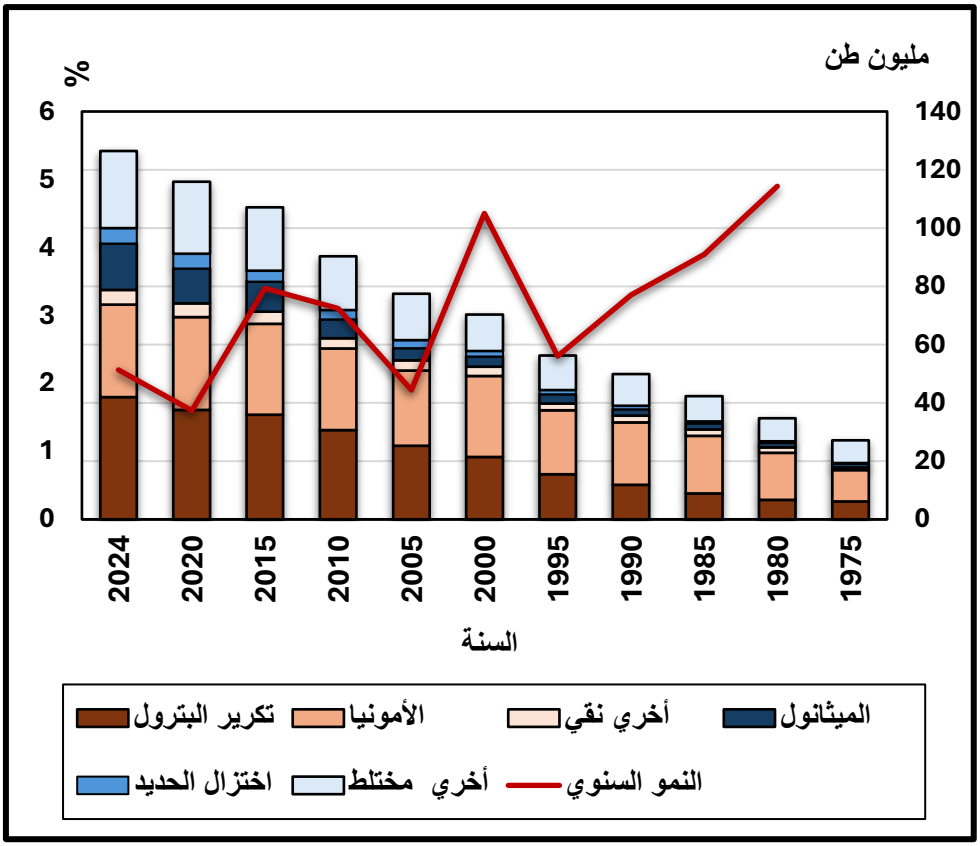
شهد إنتاج الهيدروجين زيادة مستمرة خلال الفترة المدروسة، فقد ارتفعت جملة إنتاجه من ٢٧.١ مليون طن عام ١٩٧٥ إلى ٥٦.٢ مليون طن عام ١٩٩٥، أي تضاعف بمقدار مرة واحدة خلال ٢٠ عاماً، ثم تضاعف مرة أخرى خلال ٢٠ عاماً حيث وصلت كمية الإنتاج إلى ١٠٧.١ مليون طن عام ٢٠١٥، واستمرت هذه الزيادة حتى وصلت كمية الإنتاج إلى ١٢٦.٤ مليون طن عام ٢٠٢٤، أي تضاعفت كمية الإنتاج نحو ٤ مرات خلال ٤٩ سنة (١٩٧٥ – ٢٠٢٤)، وهو بذلك يشكل ٣٪ من الطلب العالمي النهائي على الطاقة. ***(IRENA, 2024)*** وزاد الاهتمام بالهيدروجين منذ سبعينيات القرن العشرين كما سبق ذكره، وزاد الاهتمام بالهيدروجين في تسعينيات القرن العشرين لعدة أسباب منها: القلق بشأن تغير المناخ بصفة عامة واحتجاز الكربون وتخزينه بشكل خاص، والاهتمام بالطاقة المتجددة، وكذلك وسائل النقل، ومحاولة تطوير محركاتها وإيجاد بدائل للوقود الأحفوري المستخدم في حركتها. وبدأت المخاوف بشأن تغير المناخ تترجم إلى إجراءات سياسية تستهدف قطاع النقل بحلول القرن الحادي والعشرين، وعادة أزمة الطاقة للظهور بقوة ومحاولة إيجاد بدائل جديدة. ***(IRENA, 2021, 19)***

جدول (١) تغيرات إنتاج الهيدروجين بين عامي ١٩٧٥– ٢٠٢٤الإنتاج بالمليون طن

السنة / الانتاج	الهيدروجين النقي			الهيدروجين المختلط			الجملة	معدل النمو %	نسبة الهيدروجين النقي
	التكرير	الأمونيا	أخري	الميثانول	اختزال الحديد	أخري			
١٩٧٥	٦.١	١٠.٨	٠.٩	١.٣	٠.٢	٧.٨	٢٧.١	–	٦٥.٧
١٩٨٠	٦.٧	١٦.١	١.٩	١.٥	٠.٦	٧.٩	٣٤.٧	٤.٩	٧١.٢
١٩٨٥	٨.٩	١٩.٨	٢.١	٢.١	٠.٧	٨.٧	٤٢.٣	٣.٩	٧٢.٨
١٩٩٠	١١.٩	٢١.٤	٢.٣	٢.٢	١.٢	١٠.٩	٤٩.٩	٣.٣	٧١.٣
١٩٩٥	١٥.٥	٢١.٩	٢.٤	٣.١	١.٥	١١.٨	٥٦.٢	٢.٤	٧٠.٨
٢٠٠٠	٢١.٤	٢٧.٨	٣.٢	٣.٥	١.٩	١٢.٥	٧٠.٣	٤.٥	٧٤.٥
٢٠٠٥	٢٥.٢	٢٥.٩	٣.٥	٤.٢	٢.٧	١٥.٩	٧٧.٤	١.٩	٧٠.٥
٢٠١٠	٣٠.٦	٢٨.١	٣.٥	٦.٤	٣.٢	١٨.٥	٩٠.٣	٣.١	٦٨.٧
٢٠١٥	٣٥.٩	٣١.٢	٤.٢	١٠.٣	٣.٨	٢١.٧	١٠٧.١	٣.٤	٦٦.٦
٢٠٢٠	٣٧.٦	٣١.٨	٤.٧	١٢	٥.١	٢٤.٧	١١٥.٩	١.٦	٦٣.٧
٢٠٢٤	٤١.٩	٣١.٨	٥.١	١٥.٩	٥.٣	٢٦.٤	١٢٦.٤	٢.٢	٦٢.٣

الطن = ٠.٩٥ متر مكعب المصدر:

وكالة الطاقة الدولية، الطلب العالمي على الهيدروجين، ٢٠٢٤. وأنظر أيضاً.IEA, 2019, 18



شكل (١) تغيرات إنتاج الهيدروجين بين عامي ١٩٧٥– ٢٠٢٤

(٢) تغيرات إنتاج الهيدروجين النقي:

ويتم استخدام الهيدروجين فقط في بعض المجالات ولا يسمح بإضافة مواد أخري إلا بكمية محدودة، وذلك للحد من الانبعاثات الملوثة للبيئة، وشهد إنتاج الهيدروجين النقي زيادة مستمرة، فقد ارتفع من ١٧.٨ مليون طن عام ١٩٧٥ إلى ٧٨.٨ مليون طن عام ٢٠٢٤، تمثل أكثر من ثلاثة أخماس إنتاج الهيدروجين، حيث تضاعف إنتاجه أكثر من ٣ مرات خلال الفترة المدروسة، وذلك للأسباب سالفة الذكر.

وشهدت نسبة إنتاج الهيدروجين النقي ارتفاعاً ملحوظاً من جملة الهيدروجين خلال الفترة المدروسة، وعلى الرغم من تذبذبها من سنة إلى أخري، ولكنها لم تنخفض عن

ثلاثة أخماس الإنتاج في أي سنة، فتراوحت بين ٦٢.٣٪ عام ٢٠٢٤ و٧٤.٥٪ عام ٢٠٠٠. وأهم مجالات استخدام الهيدروجين النقي هي:

- **تكرير البترول:**

والذي يستأثر حالياً بأكثر من نصف إنتاج الهيدروجين النقي (٤١.٩ مليون طن)، حيث يلاحظ أن هناك زيادة كبيرة عن سنة الأساس (١٩٧٥)، حيث كان يستحوذ على ثلث كمية الإنتاج (٦.١ مليون طن). وتضاعفت الكمية المستخدمة في تكرير البترول مرة واحدة خلال ١٥ عام خلال الفترة من ١٩٧٥ – ١٩٩٠، وتضاعفت مرة أخري خلال الفترة من ١٩٩٠ – ٢٠٠٥، وتضاعفت أكثر من ٥ مرات خلال الفترة المدروسة.

- **الأمونيا:**

وتعد الأمونيا إحدى المواد الرئيسة المستخدمة في صناعة الأسمدة الكيميائية، **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٥)** وشهدت زيادة مستمرة في الكمية المستخدمة من إنتاج الهيدروجين، فقد تضاعفت كمية الهيدروجين المستخدمة في إنتاجها ٣ مرات خلال الفترة المدروسة، فقد ارتفعت من ١٠.٨ مليون طن عام ١٩٧٥ إلى ٣١.٨ مليون طن عام ٢٠٢٤، واستحوذت على ثلاثة أخماس الإنتاج عام ١٩٧٥، وانخفضت هذه النسبة إلى خُمسي الإنتاج فقط عام ٢٠٢٤.

- **مجالات أخري:**

وشهدت نمو مستمر من ٠.٩ مليون طن عام ١٩٧٥ إلى ٥.١ مليون طن عام ٢٠٢٤، وتراوحت نسبتها بين ٥ – ٦.٤٪ من إنتاج الهيدروجين النقي، وأهم هذه المجالات: الاستخدامات المنزلية ووسائل النقل وتوليد الكهرباء. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٤ – ٢٣٥)**

(٣) تغيرات إنتاج الهيدروجين المختلط:

شهد الطلب العالمي على الهيدروجين المختلط تغيرات ارتبطت بالزيادة المضطردة في معدل الإنتاج، وتضاعفت كمية الطلب عليه من ٩.٣ مليون طن عام ١٩٧٥ إلى ١٧.٩ مليون طن عام ٢٠٠٠، أي استغرق ٢٥ عام ليتضاعف مرة واحدة، فيما تضاعف مرة أخري خلال ١٥ عام، حيث وصل إلى ٣٥.٨ مليون طن عام ٢٠١٥، فيما وصل إلى ٤٧.٦ مليون طن عام ٢٠٢٤، أي تضاعف ٤ مرات خلال الفترة المدروسة، وذلك للأسباب سالفة الذكر.

ويتم استخدام الهيدروجين كجزء من خليط من الغازات، لكي يتم استخدامهم كوقود أو مادة خام في بعض المجالات مثل إنتاج الحديد والصلب، والذي ارتفعت كمية الهيدروجين المستخدمة في إنتاجه من ٢٠٠ ألف طن عام ١٩٧٥ إلى ٥.٣ مليون طن عام ٢٠٢٤، حيث ارتفعت نسبته من الهيدروجين المختلط ٢.١٪ إلى ١١.١٪. والميثانول الذي استحوذ على ١.٣ مليون طن من الهيدروجين المختلط عام ١٩٧٥ بنسبة ١٤٪ منه، وارتفعت هذه الكمية إلى ١٥.٩ مليون طن عام ٢٠٢٤ بنسبة الثُلث منه، وغيرها من المجالات مثل الصناعات الثقيلة، والاستخدامات العسكرية. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٤ – ٢٣٥)**

(٤) معدل نمو إنتاج الهيدروجين:

بلغ معدل النمو ٣.٨٪ سنوياً خلال الفترة ١٩٧٥ – ٢٠٢٤، وارتفع معدل النمو عن المعدل العام خلال الفترة من ١٩٧٥– ١٩٨٥، حيث الطفرة الأولي للاهتمام بالهيدروجين، ومن ١٩٩٥ – ٢٠٠٠، حيث طفرة التسعينيات، فيما انخفض عن المعدل العام في باقي سنوات الدراسة، ووصلت أدناها خلال الفترة من ٢٠١٥– ٢٠٢٤ حيث بلغت ٢.٤٪ سنوياً. حيث إن زيادة كمية الإنتاج تستوجب زيادة المرافق والخدمات الخاصة بنقل وتوزيع

وتخزين الهيدروجين، ويحتاج ذلك إلى تكاليف مالية مما يجعل سرعة انتشار طاقة الهيدروجين ما زال محدود.

(٥) القطاعات المستهلكة للهيدروجين عام ٢٠٢٤:

يوصف الهيدروجين بإمكانية تعدد استخداماته في الوقت الحالي وزيادتها في المستقبل، والجدول (١)، والشكل (١) يلقيان الضوء على ملامح هذه الاستخدامات ومنهما يمكن استخلاص الآتي:

- يُعد القطاع الصناعي المستهلك الأكبر للهيدروجين بأكثر من خُمسي جملة الاستهلاك (٥٣ مليون طن)، إذ يُستعمل الهيدروجين في إنتاج الأمونيا التي تستهلك وحدها ٣١.٨ مليون طن من الهيدروجين، ويليها إنتاج الميثانول الذي يستهلك ١٥.٩ مليون طن. كما يستعمل القطاع الصناعي الهيدروجين مع الغاز الطبيعي في عملية الاختزال المباشر للحديد التي تستهلك ٥.٣ مليون طن، ليبلغ إجمالي استهلاك القطاع الصناعي من الهيدروجين ٤٢٪.
- ويشكل قطاع تكرير البترول ثاني أكبر قطاع مستهلك للهيدروجين، إذ بلغ الطلب على الهيدروجين في قطاع التكرير ٤١.٩ مليون طن، تمثل ثُلث جملة الاستهلاك (٣٣٪)، إذ يستعمل الهيدروجين في عدة عمليات داخل المصافي منها نزع الشوائب من المنتجات النفطية مثل المركبات الكبريتية عبر عملية نزع الكبريت بالهدرجة، وكذلك تحسين مواصفات المقطرات الثقيلة وتحويلها إلى خفيفة. وعادة ما يجري إنتاج الهيدروجين في المصافي مباشرة، سواء من خلال وحدات إنتاج مخصصة لإنتاج الهيدروجين أم الحصول عليه بصفته منتجًا ثانويًا من عمليات التكرير، ليُستعمل في عمليات تكرير النفط، وتم إنتاج ٨٠٪ من الهيدروجين المستهلك في قطاع التكرير داخل مصافي التكرير نفسها.

- كما يتم استعمال ربع إنتاج الهيدروجين (٢٥٪) في أغراض أخري منها: النقل، والقطاع السكني، وتوليد الكهرباء، والصناعات الثقيلة، والاستخدامات العسكرية، ويُعد قطاع النقل، المستهلك الأبرز ضمن التطبيقات الجديدة للهيدروجين، نتيجة التوسع في عدد السيارات العاملة بخلايا الوقود، التي تشهد نموًا مطردًا.

ثانياً: التوزيع الجغرافي لإنتاج طاقة الهيدروجين:

ينوي الكثير من دول العالم زيادة الاعتماد على الطاقة النظيفة والتوسع في استخدامها من خلال العديد من التقنيات الحديثة لتخزينها ونقلها واستخدامها، والتي من ضمنها الهيدروجين كخيار لتخزين الكهرباء. وفي هذا الإطار، وضعت دول كثيرة خطط أو استراتيجيات وطنية لتوطين إنتاج واستخدام الهيدروجين، واتجهت أيضًا إلى دراسة الفرص المتاحة لجذب الاستثمارات في صناعة إنتاج الهيدروجين، ودراسة الفرص المستقبلية وفتح أسواق في مختلف دول العالم. **(أوابك، ٢٠٢٢، ٢٣)**

(أ) التحليل المكاني لمشروعات إنتاج الهيدروجين في العالم:

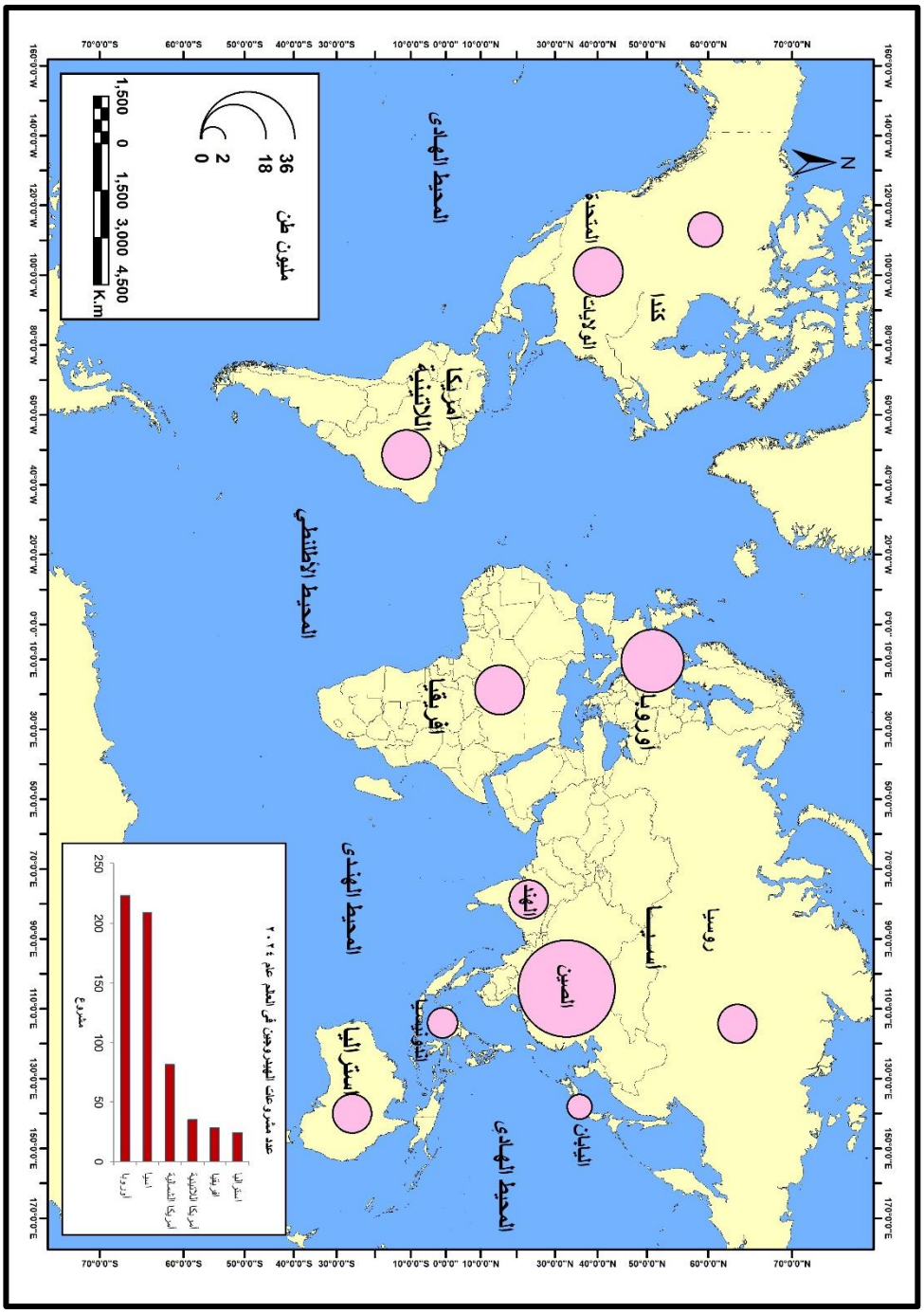
سعت الدول إلى توقيع اتفاقات وشراكات ومذكرات تفاهم أولية؛ بهدف ضمان حصص مستقبلية لها في التداول العالمي المتوقع للهيدروجين. وطبقًا للمؤشرات العالمية وعدد المشروعات الذي وصل إلى ٦٠٠ مشروع عالمي بإجمالي حجم استثمارات أكثر من ٥٣٠ مليار دولار، ووصل عدد الدول التي اهتمت بإعداد استراتيجيات وطنية وخطط تنموية لإنتاج الهيدروجين الأخضر ٤٦ دولة في عام ٢٠٢٤، في حين تعمل ٣٥ دولة أخرى على بناء إستراتيجياتها حاليًا؛ ما يفسّر تركز أغلب المشروعات الحالية في أسواق أميركا وأوروبا وأستراليا. **(أوابك، ٢٠٢٤، ٢٥)**

ويمكن تقسيم مناطق العالم المنتجة للهيدروجين إلى مجموعات حسب عدد مشروعات إنتاج الهيدروجين عام ٢٠٢٤، كما يتضح من الجدول (٢) والشكل (٢) كالتالي:

جدول (٢) مناطق إنتاج الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤

القارة	عدد المشروعات	الإنتاج	
		مليون طن	النسبة %
أوروبا	٢٢٣	١٧.٤	١٣.٨
آسيا	٢٠٩	٦٦.٥	٥٢.٦
أمريكا الشمالية	٨١	١٥.٦	١٢.٣
أمريكا اللاتينية	٣٥	١٠.٧	٨.٥
إفريقيا	٢٨	٩.٥	٧.٥
استراليا	٢٤	٦.٧	٥.٣
الجملة	٦٠٠	١٢٦.٤	١٠٠

المصدر: Hydrogen Council, McKinsey & Company, Hydrogen Insights, Anderlecht, Belgium, September 2024. P20.



المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على بيانات أوابك، ٢٠٢٤، ٢٥

شكل (٢) إنتاج الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤

- **مناطق كبيرة العدد في مشروعاتها (أكثر من ١٥٠ مشروع):**

وتبلغ عدد مشروعات هذه المناطق ٤٣٢ مشروع، تشكل أكثر من ثُلثي (٧٢٪) عدد المشروعات العالمية، وتأتي قارة أوروبا في المقدمة بعدد ٢٢٣ مشروع، بنسبة تقترب من خُمسي (٣٧.٢٪) عدد المشروعات في العالم، وتتوزع هذه المشروعات على الدول الأوربية، حيث تستحوذ ألمانيا على ٦١ مشروع، تشكل عُشر (١٠.١٪) عدد المشروعات العالمية، ثم بريطانيا وفرنسا والسويد وإسبانيا وهولندا وسويسرا والنرويج بنسب تتراوح بين ٣.٧ – ١.٧٪ على التوالي، ثم إيطاليا واستونيا والدنمارك وبولندا واليونان وسلوفينيا ورومانيا وليتونيا وأوكرانيا وبلجيكا والنمسا وفنلندا وايسلندا والمجر بنسب أقل من ١.٤٪ على التوالي.***(IEA, 2024)***

وتتركز باقي مشروعات إنتاج الهيدروجين في قارة آسيا، بعدد ٢٠٩ مشروع، تشكل ما يزيد قليلاً عن ثُلث (٣٤.٨٪) عدد المشروعات في العالم، واستحوذت روسيا على ٦٣ مشروع، تشكل عُشر (١٠.٥٪) عدد المشروعات العالمية، ثم الصين وعدد مشروعاتها ٥٦ مشروع، تمثل ما يقرب من عُشر (٩.٣٪) عددها، ثم الهند وعدد مشروعاتها ٢٨ مشروع، تشكل (٤.٧٪) عالمياً، ثم اليابان وعدد مشروعاتها ٢٤ مشروع، تمثل (٤٪) من اجمالي المشروعات في العالم، ثم مجموعة من الدول الواعدة والتي ينخفض فيها عدد المشروعات عن ١٪ مثل فيتنام والإمارات وسنغافورة واندونيسيا وماليزيا والسعودية وغيرها.

- **مناطق متوسطة العدد في مشروعاتها (١٥٠– ٧٥ مشروع):**

وتبلغ عدد مشروعات هذه المناطق ٨١ مشروع، تشكل ما يقرب من سُبع (١٣.٥٪) عدد المشروعات في العالم، وتتركز مشروعاتها في قارة أمريكا الشمالية، حيث تستأثر الولايات المتحدة بعدد ٥٤ مشروع، تمثل ما يقرب من عُشر (٩٪) عددها، ثم كندا وعدد مشروعاتها ٢٧ مشروع، تشكل (٤.٥٪) من عددها. (***IEA, 2024***)

- **مناطق صغيرة العدد في مشروعاتها (أقل من ٧٥ مشروع):**

وتبلغ عدد مشروعاتها ٨٧ مشروع، تشكل سبُع (١٤.٥٪) عدد مشروعات إنتاج الهيدروجين، ويتركز معظمها في قارة أمريكا اللاتينية بعدد ٣٥ مشروع، تشكل (٥.٨٪) من اجمالي المشروعات في العالم، وأهم دولها تشيلي والبرازيل وكولومبيا والمكسيك وباراجواي وبيرو. ثم قارة إفريقيا بعدد ٢٨ مشروع، تشكل (٤.٧٪) من اجمالي المشروعات في العالم، وأهم دولها جنوب إفريقيا ومصر والمغرب. وتتركز باقي المشروعات في قارة استراليا بعدد ٢٤ مشروع، تشكل (٤٪) من اجمالي مشروعات إنتاج الهيدروجين في العالم. ***(IEA, 2024)***

(ب) التحليل المكاني لإنتاج الهيدروجين في العالم:

بلغت كمية الهيدروجين ١٢٦.٤ مليون طن عام ٢٠٢٤، تتوزع على مناطق العالم كما يتضح من جدول (٢) وشكل (٢) كالتالي:

- **مناطق الإنتاج المرتفع:**

ويبلغ إنتاجها ٦٦.٥ مليون طن، تشكل أكثر من نصف الإنتاج العالمي (٥٢.٦٪)، ويتركز معظم الإنتاج بقارة آسيا، ويأتي إنتاجها من دول الصين بحجم إنتاج قدره ٣٨.٦ مليون طن، بنسبة (٣٠.٥٪) أي ما يقرب من ثُلث الإنتاج العالمي، تليها الهند وإنتاجها ٦.٤ مليون طن، بنسبة ٥.١٪ عالمياً، ثم روسيا وإنتاجها ٥.٤ مليون طن بنسبة ٤.٣٪، ثم اندونيسيا ٢.٨٪، واليابان ١.٦٪، أي أن إنتاج الهيدروجين يتركز في شرق وجنوب قارة آسيا. ***(IEA, 2024)***

- **مناطق الإنتاج المتوسط:**

ويبلغ إنتاج هذه المناطق ٣٣ مليون طن، تشكل أكثر قليلاً من ربع (٢٦.١٪) الإنتاج العالمي، ويأتي إنتاجها من قارة أوروبا بمقدار ١٧.٤ مليون طن، في المركز الثاني

عالمياً بنسبة تقترب من السبع (١٣.٨٪)، ويتركز إنتاجها في دول بريطانيا وإنتاجها ٤.٩ مليون طن، بنسبة (٣.٩٪) من الإنتاج العالمي، ثم ألمانيا وإنتاجها ٢.٨ مليون طن، بنسبة (٣.٦٪)، ثم هولندا وإنتاجها ٢.٥ مليون طن، بنسبة (٣.١٪)، ثم بولندا وإنتاجها ٠.٩ مليون طن، بنسبة (١.١٪)، ثم إيطاليا وفرنسا وإسبانيا بنسبة (٠.٧٪) لكل منهما. ***(European Hydrogen Observatory, 2024)***

ويأتي بقية إنتاج هذه المناطق من قارة أمريكا الشمالية التي تسهم بمقدار ١٥.٦ مليون طن، تشكل ثمن (١٢.٣٪) الإنتاج العالمي، ويتوطن الإنتاج بها في الولايات المتحدة الأمريكية بحجم إنتاج قدره ١٠.٦ مليون طن، يشكل ما يقرب من عُشر (٨.٤٪) الإنتاج العالمي، كثاني أكبر دول العالم إنتاجاً، ثم كندا وإنتاجها ٤.٩ مليون طن، بنسبة (٣.٩٪) من الإنتاج العالمي. ***(IEA, 2024)***

- **مناطق الإنتاج المنخفض:**

ويبلغ إنتاجها ٢٦.٩ مليون طن، تشكل أكثر قليلاً من خُمس (٢١.١٪) الإنتاج العالمي، ويمثلها قارة أمريكا اللاتينية، البالغ إنتاجها ١٠.٧ مليون طن، أي ما يشكل أقل من عُشر (٨.٥٪) الإنتاج العالمي، ويأتي الإنتاج فيها من دول البرازيل وتشيلي وكولومبيا وكوستاريكا وباراجواي وبيرو. ثم قارة إفريقيا وتسهم بإنتاج ٩.٥ مليون طن، تعدل ٧.٥٪ من الإنتاج العالمي لطاقة الهيدروجين عام ٢٠٢٤، ويأتي إنتاجها من دول جنوب إفريقيا ومصر والمغرب وناميبيا، ثم قارة أستراليا بحجم إنتاج قدره ٦.٧ مليون طن، يشكل ٥.٣٪ من إنتاج الهيدروجين على خريطة العالم.

ثالثاً: التوزيع الجغرافي لمناطق استهلاك الهيدروجين:

يعد الهيدروجين طاقة مستحدثة (Hydrogen Energy) تسعى كثير من دول العالم خاصة الصناعية إلى تعضيد إنتاجه واستهلاكه في مجالاتها التي تقوم على الطاقة،

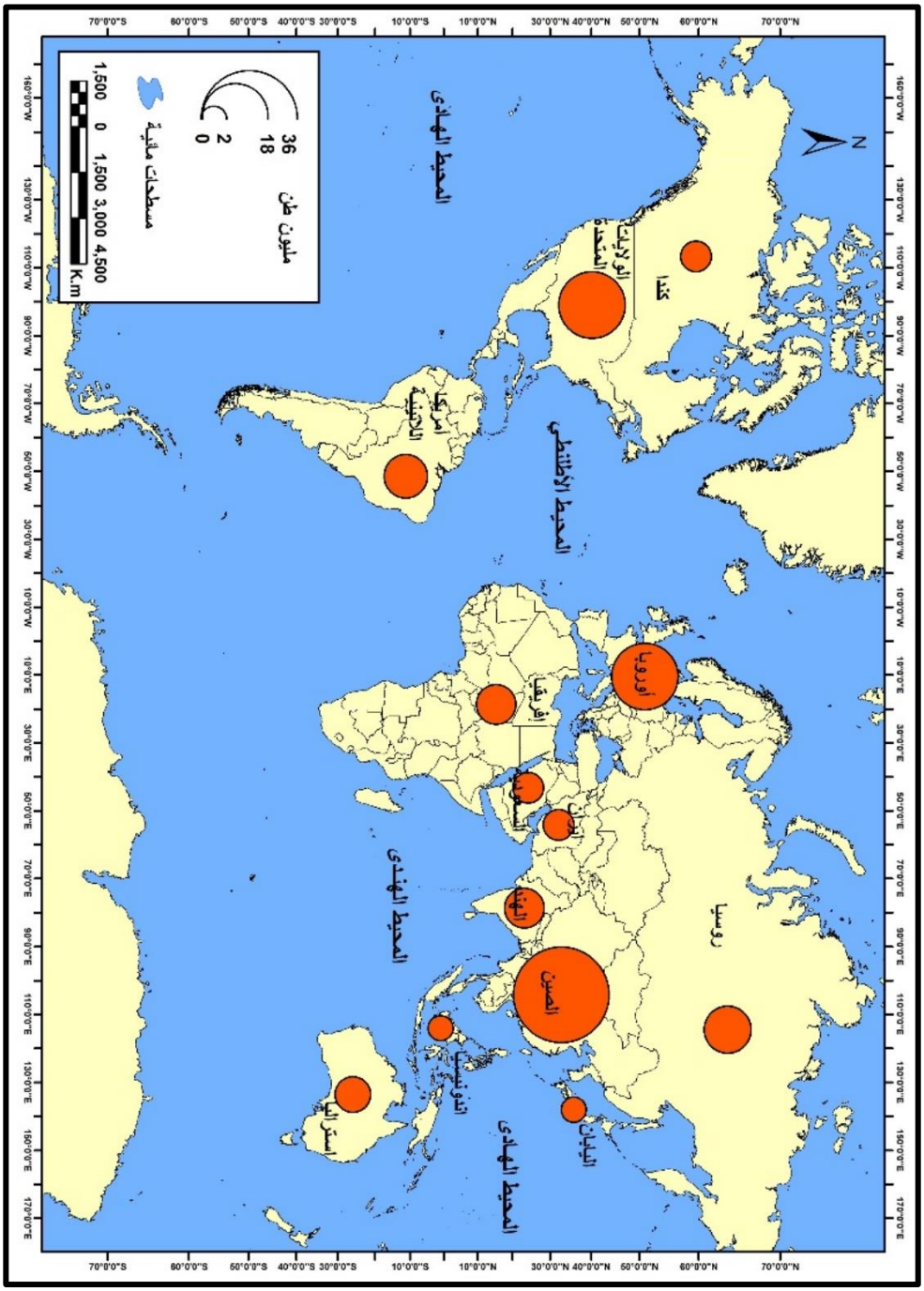
(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٢٩) وتتعدد مناطق الاستهلاك كما تعددت مناطق الإنتاج من قبل، وتلقي بيانات الجدول (٣) والشكل (٣) الضوء على التحليل المكاني لمناطق استهلاك الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤. حيث ينتج العالم ١٢٦.٤ مليون طن من الهيدروجين، وهى نفس كميات الاستهلاك المستخدمة حالياً، ولكن هناك تفاوت في كميات الإنتاج، صحبها تفاوت في الاستهلاك، مما عكس صورة الفائض والعجز بين مناطق الإنتاج ومناطق الاستهلاك كما سيتضح لاحقاً، وقد تفاوتت مناطق الاستهلاك على مستوى خريطة العالم كما يلي:

جدول (٣) مناطق الطلب العالمي على الهيدروجين عام ٢٠٢٤

القارة	الاستهلاك	
	مليون طن	النسبة %
آسيا	٦٤.٨	٥١.٢
أوروبا	٢٣.٤	١٨.٥
أمريكا الشمالية	٢١.٧	١٧.٢
أمريكا اللاتينية	٧.٣	٥.٨
إفريقيا	٥.٤	٤.٣
استراليا	٣.٨	٣.٠
الجملة	١٢٦.٤	١٠٠
المصدر: منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، نقل وتصدير الهيدروجين، أبوظبي، ٢٠٢٤.		

- **مناطق عالية الاستهلاك للهيدروجين:**

ويبلغ حجم استهلاكها ٦٤.٨ مليون طن، تشكل أكثر قليلاً من نصف (٥١.٢٪) الاستهلاك العالمي، ويأتي الطلب على الهيدروجين في هذه المناطق من قارة آسيا والتي تتصدر قارات العالم في استهلاكه. حيث تعد الصين المستهلك الأكبر له عالميًا، إذ بلغ استهلاكها ٣٦.٧ مليون طن، بنسبة تقترب من ثُلث (٢٩٪) الاستهلاك العالمي. وتعتمد الصين على الهيدروجين في عدة قطاعات كالقطاع الصناعي، وقطاع التكرير الذي يستحوذ وحده على أكثر من ٢٥ مليون طن سنويًا، **(أوابك، ٢٠٢٤، ٢٧)** تليها الهند واستهلاكها ٧.١ مليون طن، بنسبة (٥.٧٪)، ثم روسيا واستهلاكها ٦.٧ مليون طن بنسبة (٥.٣٪)، إذ تُعد نيودلهي من المناطق الرئيسة في إنتاج الحديد بنسبة الخمس من عدد مصانع الاختزال المباشر للحديد على مستوى العالم، **(أوابك، ٢٠٢٤، ٢٨)** وكذلك إيران والسعودية واليابان واندونيسيا بنسب (٢.٨٪، و٢.٧٪، و٢.١٪، و٢٪) لكل منهما على التوالي.



المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على بيانات بيانات أوابك ٢٠٢٤

شكل (٣) استهلاك الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤

- **مناطق متوسطة الاستهلاك للهيدروجين:**

ويبلغ حجم استهلاكها ٤٥.١ مليون طن، بنسبة أكثر من ثُلث (٣٥.٧٪) الاستهلاك العالمي، وتعد قارة أوروبا ثاني أكبر مستهلك للهيدروجين عالميًا بحجم استهلاك ٢٣.٤ مليون طن، بنسبة تقترب من خُمس (١٨.٥٪) الطلب العالمي، وفي مقدمة دولها هولندا واستهلاكها ٥.٨ مليون طن، تشكل (٤.٦٪) عالمياً، ثم بريطانيا واستهلاكها ٥.٢ مليون طن، تشكل (٤.١٪) عالمياً، ثم ألمانيا واستهلاكها ٤.٨ مليون طن، تشكل (٣.٨٪) عالمياً، ثم فرنسا واستهلاكها ٢.٤ مليون طن، تمثل (١.٩٪) عالمياً.

ويأتي باقي الاستهلاك من قارة أمريكا الشمالية بحجم استهلاك ٢١.٧ مليون طن، بنسبة أكثر من سدس (١٧.٢٪) إجمالي الطلب العالمي، إذ يستحوذ قطاع التكرير فيها على النصيب الأكبر من الطلب على الهيدروجين بإجمالي يفوق ١١ مليون طن، وتستحوذ الولايات المتحدة الأمريكية على ما يقرب من سُبع (١٣.٨٪) جملة استهلاك الهيدروجين كثاني دول العالم استهلاكاً له.

- **مناطق منخفضة الاستهلاك:**

ويبلغ حجم استهلاكها ١٦.٥ مليون طن، بما يقرب من سُبع (١٣.١٪) الاستهلاك العالمي، ويأتي معظم الطلب على الهيدروجين من قارة أمريكا اللاتينية بحجم استهلاك قدره ٧.٣ مليون طن، بنسبة (٥.٨٪) عالمياً، ويأتي الطلب فيها من دول البرازيل وتشيلي وكولومبيا وكوستاريكا وباراجواي وبيرو. ثم قارة إفريقيا وبلغ حجم الاستهلاك فيها ٥.٤ مليون طن، بنسبة (٤.٣٪) من الاستهلاك العالمي، ويأتي الطلب على الهيدروجين فيها من دول جنوب إفريقيا ومصر والمغرب وناميبيا. ويأتي باقي الطلب على الهيدروجين من قارة استراليا في المركز الأخير، بحجم استهلاك قدره ٣.٨ مليون طن، يشكل (٣٪) من حجم الاستهلاك العالمي.

رابعاً: التحليل المكاني لتوازن إنتاج الهيدروجين واستهلاكه في العالم:

يقصد بتوازن إنتاج الهيدروجين واستهلاكه، دراسة العلاقة بين فائض الإنتاج والعجز فيه، وفق قدرات الدول المنتجة والمستهلكة له، وتفيد بيانات الجداول (٢، ٣، ٤)، والأشكال (٢، ٣، ٤)، في إلقاء الضوء على تقييم الوضع الراهن لتجربة إنتاج الهيدروجين واستهلاكه على مستوي العالم في عام ٢٠٢٤، ومنهما يمكن تقسيم قارات العالم إلى مجموعات حسب توازن الإنتاج كالتالي:

جدول (٤) توازن إنتاج الهيدروجين واستهلاكه بالعالم عام ٢٠٢٤

القارة	الإنتاج بالمليون طن	الاستهلاك بالمليون طن	توازن الإنتاج
آسيا	٦٦.٥	٦٤.٨	١.٧
أوروبا	١٧.٤	٢٣.٤	٦-
أمريكا الشمالية	١٥.٦	٢١.٧	٦.١-
أمريكا اللاتينية	١٠.٧	٧.٣	٣.٤
إفريقيا	٩.٥	٥.٤	٤.١
استراليا	٦.٧	٣.٨	٢.٩
الجملة	١٢٦.٤	١٢٦.٤	٠

المصدر: من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات الجدولين (٢، ٣)

توازن الإنتاج = حجم الإنتاج – حجم الاستهلاك

- **مناطق الفائض في إنتاج الهيدروجين:**

وبلغ حجم الفائض في إنتاج الهيدروجين بها ١٢.١ مليون طن، تشكل عُشر (٩.٦٪) إنتاج الهيدروجين عام ٢٠٢٤، ويأتي معظم الفائض من قارة إفريقيا بكمية قدرها ٤.١

مليون طن، تشكل ثُلث (٣٣.٩٪) كمية الفائض، ثم أمريكا الجنوبية بفائض قدره ٣.٤ مليون طن، تشكل ما يقرب ثُلث (٢٨.١٪) فائض الإنتاج، ثم استراليا بفائض قدره ٢.٩ مليون طن، تمثل ما يقرب من ربع (٢٤٪) الفائض، ثم آسيا بفائض قدره ١.٧ مليون طن، تشكل سبُع (١٤.١٪) فائض إنتاج الهيدروجين بالعالم.

المصدر: من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات الجدول (٤).

شكل (٤) توازن إنتاج الهيدروجين بالعالم عام ٢٠٢٤

- **مناطق العجز في إنتاج الهيدروجين:**

وبلغ حجم العجز في إنتاج الهيدروجين بها ١٢.١ مليون طن، وهي نفس كمية فائض الإنتاج، وتتوزع مناطق العجز على قارة أمريكا الشمالية، والتي سجلت طلب على

الهيدروجين قدره ٦.١ مليون طن، تشكل أكثر قليلاً من نصف حجم العجز في الإنتاج، ثم قارة أوروبا بطلب قدره ٦ مليون طن، تشكل أقل قليلاً من نصف (٤٩.٦٪) حجم العجز في إنتاج الهيدروجين.

ويلاحظ من العرض السابق إنه يجري تداول الهيدروجين على نطاق ضيق، حيث يتم استهلاك معظم كمية الهيدروجين المنتجة في مناطق إنتاجه. ***(IEA, 2019.a, 137)*** ووصلت كمية الهيدروجين المنقولة إلى مناطق أخري إلى ١٢.١ مليون طن، تشكل عُشر (٩.٦٪) الكمية المنتجة عام ٢٠٢٤، فيما أن باقي الكمية وقدرها ١١٤.٣ مليون طن، تم استخدامها في داخل مناطق الإنتاج، وتشكل تسعة أعشار (٩٠.٤٪) الإنتاج عام ٢٠٢٤. كما أن الهيدروجين الذى يدخل في التجارة الدولية لا يتم نقله لمسافات طولية بسبب الصعوبات اللوجستية، وارتفاع التكاليف. ***(IRENA, 2022, 33)***

وتتصدر الدول المتقدمة قائمة الدول المنتجة والمستهلكة للهيدروجين، فيما تحتاج الدول النامية خاصة إلى بناء القدرات التقنية لأنظمتها الوطنية، بما يتفق مع معايير الهيدروجين العالمية، حتى تتمكن من الاندماج في الأسواق العالمية بسرعة ودون عقبات. كما يجب على الحكومات والشركات زيادة التنسيق الدولي لتعزيز التزامات استعمال الهيدروجين في القطاعات التي يُستعمل فيها هذا الوقود.

خامساً: كيفية استخدام الهيدروجين:

يتم استخدام طاقة الهيدروجين في وسائل النقل كوقود بطريقتين هما البطاريات أو خلايا الوقود، وكلاهما يقومان بتحويل الطاقة الكيمائية إلى طاقة كهربائية، وتعد الكهرباء طاقة الطاقات على أساس أن مصادر الطاقة الأخرى وأنواع الوقود المختلفة مثل الهيدروجين تحول إلى كهرباء. (**الديب**، ٢٠٠٩، ٦١) ويمكن العرض للطريقتين كالتالي:

- **البطارية:**

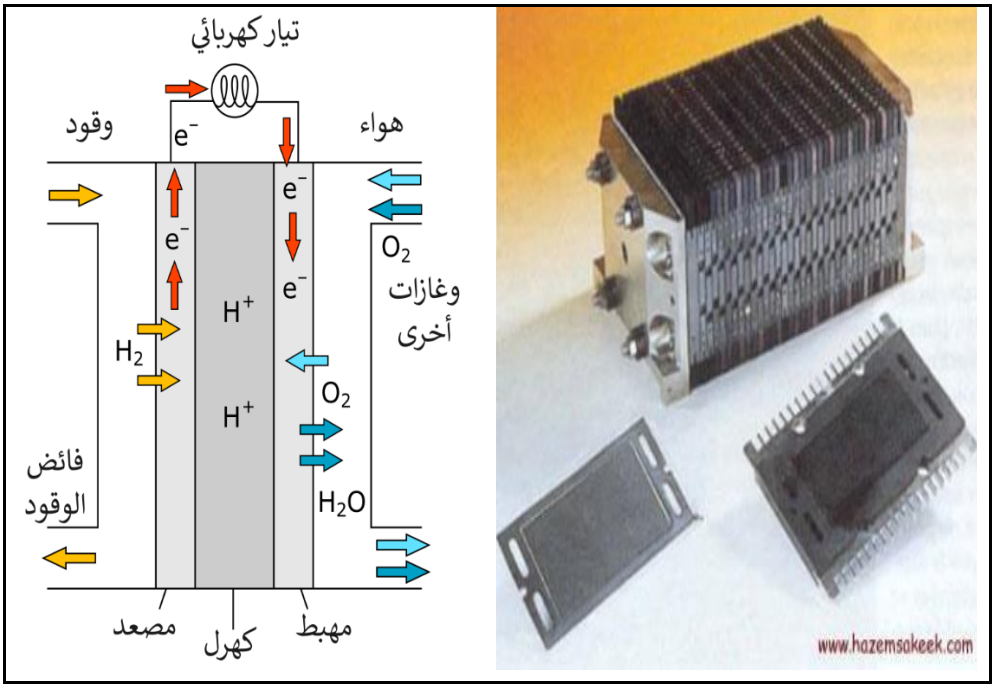
تتلخص طريقة عملها في أن يقوم التفاعل الكيميائي في البطارية بإطلاق الكترونات تتحرك للخارج نحو أطراف البطارية كطاقة كهربائية، **(الدليمي، ٢٠١٨، ٢١٧)** ولكن تستهلك البطارية بعد فترة زمنية لأنها نظام تخزين مغلق، ولكنها تنتج طاقة كثيرة قبل انتهاء عمرها الزمني، وبعد انتهاء عمرها الزمني يتم إعادة شحنها أو استبدالها من جهة أخري. ***(IEA, 2019, 17)***

- **خلايا الوقود:**

يرجع اختراع أول خلية وقود هيدروجين إلى عام ١٨٣٩ على يد العالم (وليم كروف)، وكانت تعمل بالطريقة ذاتها، عن طريق دمج الهيدروجين والأوكسجين وفى العملية تنتج الكهرباء، ولكنه لم يجد أي استعمال عملي لها، **(الدليمي، ٢٠١٨، ٢٢٨)** وظل الاختراع حبيس الأدراج، وعادت خلايا الوقود للحياة في ستينيات القرن العشرين، وذلك عندما طورت شركة "جنرال اليكتريك" خلايا تعمل على توليد الطاقة الكهربائية لاستخدامها في سفينتي الفضاء "جيمي وأبولو"، بالإضافة إلي توفير مياه نقية صالحة للشرب لرواد الفضاء. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣١)**

وخلايا الوقود الهيدروجيني عبارة عن محول طاقة يقوم بتحويل الهيدروجين والأوكسجين إلى ماء وفي العملية تنتج الكهرباء بتفاعل كهربائي كيميائي، أي عكس عملية تحليل المياه كما يوضحها الشكل (٥)، لذلك فهي تتطلب إعادة ملئها بالهيدروجين كلما فرغت كما يملأ خزان السيارة. **(الدليمي، ٢٠١٨، ٢١٧)** حيث يتم تزويد الخلية بغازي الأوكسجين والهيدروجين على نحو مستمر، أو يتم تخزين الهيدروجين تحت ضغط في أنابيب وتستمد الأوكسجين من الهواء، ويحدث تأكسد للهيدروجين إلى بروتونات عند

المصعد الذي يمد الخلية بالوقود، وإلكترونات عند المهبط إلى خارج الخلية، حيث يلتقي الجميع مع الأوكسجين الذي يختزل لتكوين الماء، وينتج التيار الكهربائي.



شكل (٥) خلايا الوقود وطريقة عملها

وتنتج النماذج البسيطة التي تصنع منها الخلية الهيدروجينية والمستخدمة في وسائل النقل ١.١٦ فولت، لذلك يتم وصل عدد كبير من الخلايا لتوليد الطاقة الكهربائية المطلوبة كما في شكل (٥). **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣١)** ويمكن استعمال الهيدروجين كوقود لوسائل النقل بإيجاد محركات الاحتراق الداخلي التي تعمل على الهيدروجين. وكانت شركة بي ام دبليو BMW من الشركات التي بدأت أبحاثها منذ عام ١٩٧٨، وطورت بالفعل عدة أنواع من محركات الاحتراق الداخلي التي تعمل بالهيدروجين. **(الدليمي، ٢٠١٨، ٢٢٨)**

سادساً: استخدامات الهيدروجين في النقل:

تؤدي الطاقة دوراً عظيماً في الحياة الحديثة، ويزداد استهلاك العالم منها سنوياً، ويستخدم خمسها في النقل. **(إبراهيم، ٢٠١٨، ١٩٢)** ويبرز قطاع النقل كأحد المصادر الرئيسة لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية المرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري، بنسبة تتراوح بين ٢٠ – ٣٠٪، حيث تساهم طاقة الوقود الأحفوري (النفط والغاز الطبيعي والفحم) بأربعة أخماس استهلاك الطاقة في العالم، **(أوابك، ٢٠٢٤، ١٩)** وتنتج أكثر من أربعة أخماس انبعاثات الكربون في العالم، وعلى الرغم من الزيادة المستمرة والمتوقعة لقطاع النقل، ***(IPCC, 2022, 21)***

ولكن لابد من تخفيض انبعاثات النقل بمعدل ٢٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠، وتحقيق هذا الهدف يعتمد على إمكانية وسرعة تطوير بدائل طاقة للنقل، وتعظيم الإنتاج التجاري للبدائل الحالية. **(هيئة الأمم المتحدة، ٢٠٢٢، ٣)** ويبرز الهيدروجين كأحد أهم بدائل الطاقة الذي يمكن استخدامه في النقل، حيث إن استخدامه حسن من نوعية الهواء كثيراً، خاصة في المناطق التي تعد أكثر تلوثاً في العالم مثل الصين، **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٨)** ويمكن العرض لمدي ملائمة الهيدروجين ومشتقاته لوسائل النقل المختلفة، سواء نقل جوي أم بري وبحري كالتالي:

(أ) استخدام الهيدروجين في وسائل النقل البري:

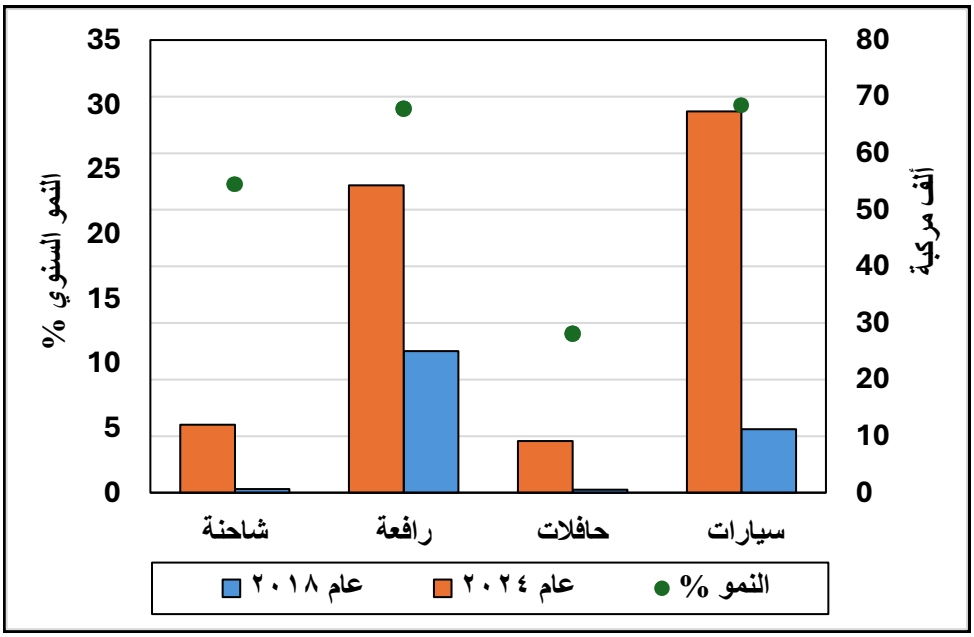
تحظي كافة مركبات النقل البري باهتمام عالمي عندما يتعلق الأمر بالاستخدام المباشر للهيدروجين أو مشتقاته في وسائل النقل، خاصةً وسائل النقل الخفيفة (السيارات)، ووصل الطلب العالمي على الهيدروجين في النقل البري أكثر من ٦٠ ألف طن في عام ٢٠٢٤، تشكل أقل من ٠.١٪ من حجم الطلب على الهيدروجين ***(IEA, 2024, 37)***

ويمكن العرض لاستخدام الهيدروجين في وسائل النقل البري، كما يوضحها الجدول (٥) والشكل (٦)، حيث وصل عدد المركبات التي تعمل بالهيدروجين في العالم إلى ١٤٢.٨ ألف مركبة في عام ٢٠٢٤، وكانت أعدادها ربع هذا الرقم عام ٢٠١٨ (٣٧.٤ ألف مركبة)، فيما أن بداية صناعتها لأول مرة تعود إلى عام ٢٠١٣ ***(IEA, 2021, 125)***. وبلغ معدل النمو السنوي في عدد المركبات إلي ١٩.٥٪ سنوياً خلال الفترة من ٢٠١٨-٢٠٢٤.

جدول (٥) تغير عدد المركبات الهيدروجينية خلال الفترة من ٢٠١٨ – ٢٠٢٤

نوع المركبة	العدد بالألف مركبة عام		معدل النمو السنوي %
	٢٠١٨	٢٠٢٤	
سيارة	١١.٢	٦٧.٤	٢٣.٨
حافلة	٠.٥	٩.١	٢٩.٧
رافعة	٢٥	٥٤.٣	١٢.٣
شاحنة	٠.٧	١٢	٢٩.٩
الجملة	٣٧.٤	١٤٢.٨	١٩.٥
المصدر: IEA, Global Hydrogen Review, Paris, 2024, p.39.			

وبدراسة التحليل المكاني لتوزيع مركبات الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤، كما يوضحها الجدول (٦)، والشكل (٧)، ومنهما نلاحظ أن الولايات المتحدة تصدرت دول العالم من حيث عدد المركبات التي تعمل بطاقة الهيدروجين في عام ٢٠٢٤ بعدد ٥٢.٥



المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على بيانات جدول (٥)

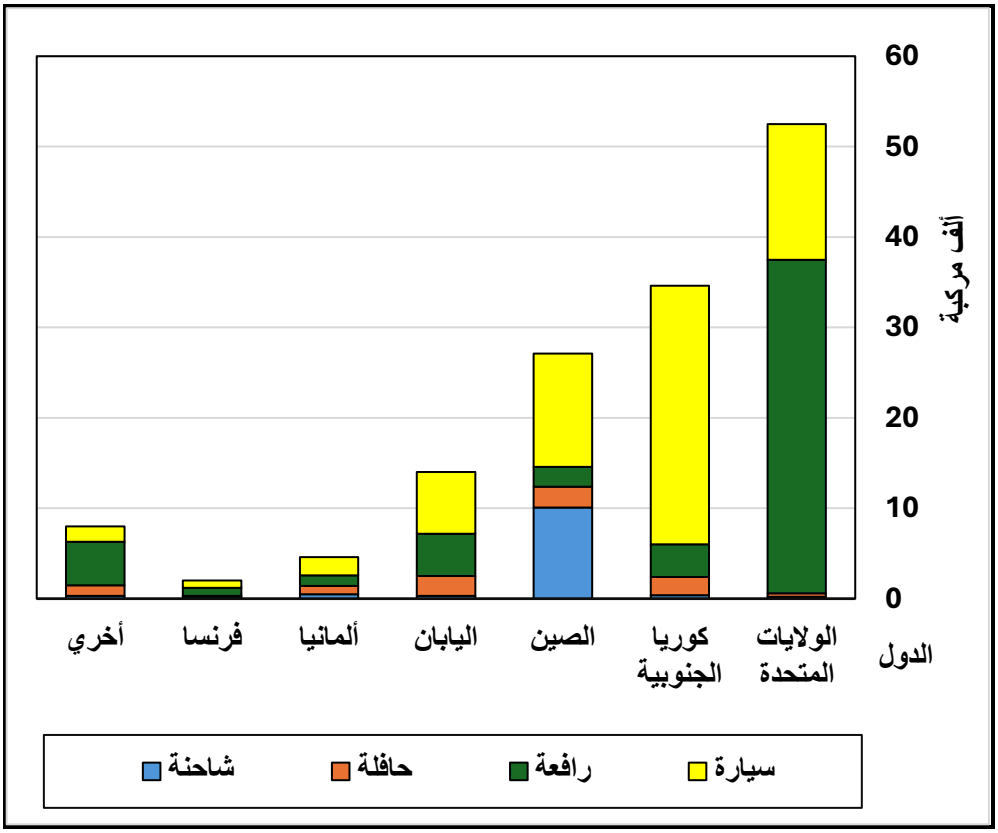
شكل (٦) معدل النمو السنوي في أعداد المركبات الهيدروجينية في العالم

جدول (٦) التوزيع الجغرافي لمركبات الهيدروجين بالدول الرئيسة عام ٢٠٢٤

الدولة / العدد بالألف مركبة	شاحنة	حافلة	رافعة	سيارة	الجملة	
					العدد	النسبة %
الولايات المتحدة	٠.٢	٠.٤	٣٦.٩	١٥	٥٢.٥	٣٦.٨
كوريا الجنوبية	٠.٤	٢	٣.٦	٢٨.٦	٣٤.٦	٢٤.٢
الصين	١٠.١	٢.٣	٢.٢	١٢.٥	٢٧.١	١٩
اليابان	٠.٣	٢.٢	٤.٧	٦.٨	١٤	٩.٨
ألمانيا	٠.٥	٠.٩	١.٢	٢	٤.٦	٣.٢
فرنسا	٠.٢	٠.١	٠.٩	٠.٨	٢	١.٤
أخري	٠.٣	١.٢	٤.٨	١.٧	٨	٥.٦
الجملة	١٢	٩.١	٥٤.٣	٦٧.٤	١٤٢.٨	١٠٠

المصدر: International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE), hydrogen Deployments, Canada, 2024.

ألف مركبة، بما يزيد عن ثلثهم (٣٦.٨٪)، ثم كوريا الجنوبية بعدد ٣٤.٦ ألف مركبة، بما يقرب من ربع (٢٤.٢٪) عددها، ثم الصين بعدد ٢٧.١ ألف مركبة، تشكل ما يقرب من الخمس (١٩٪)، ثم اليابان وألمانيا وفرنسا بنسب ٩.٨٪، و٣.٢٪، و١.٤٪ على التوالي، وسيتم تناولها في التالي. ***(IPHE, 2024)***



المصدر: من إعداد الباحث اعتماداً على بيانات جدول (٦)

شكل (٧) التوزيع الجغرافي لمركبات الهيدروجين بالدول الرئيسة عام ٢٠٢٤

(١) السيارات والحافلات:

يعد استخدام الطرق البرية بصفة عامة، هو استخدامها في النقل بالسيارات بكافة أنواعها (**عزالدين، ٢٠٠٥، ٣٤٤**)، ويمكن العرض للسيارات والحافلات كالآتي:

- **السيارات: Cars**

يعد النقل عن طريق السيارات وسيلة مهمة يزداد الاعتماد عليها من سنة إلى أخري، وذلك من خلال الاستجابة العالية التي تتصف بها لتلبية حاجات نقل الأفراد والبضائع. (**محمد، ٢٠١٩، ١٦٣**) وتأتي أهمية النقل بالسيارات من خلال الترابط السهل والسريع بين المناطق الجغرافية خاصة التي يصعب الوصول إليها بالوسائل الأخرى. (**الخفاجي، ٢٠٠٦، ١٨**) لذا تمثل السيارات الغالبية العظمي من طاقة خلايا الوقود المستخدمة في النقل البري.

وتم بيع ٤ ألاف سيارة هيدروجينية تعمل بخلايا الوقود في عام ٢٠١٨ ***(E4tech, 2018,25)***. ليصل إجمالي السيارات في العالم إلى ١١.٢ ألف سيارة، أي بزيادة قدرها ٥٦٪ عن عام ٢٠١٧***(AFC TCP, 2019)*** . وهذا الرقم صغيراً مقارنة بعدد السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطارية، فقد بلغ عددها ٥.١ مليون سيارة في عام ٢٠١٨، أو جملة عدد السيارات في العالم والتي تزيد عن مليار سيارة في عام ٢٠١٨ ***(IEA, 2019, 125)***. وبذلك فإن سيارات الهيدروجين تشكل ٠.٠٠١٪ من عدد السيارات في العالم في عام ٢٠١٨. ***(IEA, 2019, 126)***.

ووصل عددها إلى ٦٧.٤ ألف مركبة هيدروجينية تعمل بخلايا الوقود متداولة في جميع أنحاء العالم عام ٢٠٢٤، تشكل ٠.٠٠٥٪ من جملة عدد السيارات في العالم، ***(OICA, 2024)*** بمعدل نمو سنوي قدره ٢٣.٨٪ خلال الفترة من ٢٠١٨ – ٢٠٢٤،

ويمكن تقسيم دول العالم إلى فئات حسب عدد السيارات الهيدروجينية بها عام ٢٠٢٤ كالتالي:

- **دول تمتلك أكثر من ٢٠٪ من عدد السيارات الهيدروجينية:**

وتحتل كوريا الجنوبية صدارة دول العالم في عدد السيارات التي تعمل بطاقة الهيدروجين بعدد ٢٨.٦ ألف سيارة، تشكل أكثر من خُمسي (٤٢.٤٪) عدد السيارات، تليها الولايات المتحدة الأمريكية وعدد سيارتها ١٥ ألف، تمثل أكثر من خمس (٢٢.٣٪) عددها.

- **دول تمتلك من ١٠- ٢٠٪ من عدد السيارات الهيدروجينية:**

وتمتلك الصين ١٢.٥ ألف سيارة، تشكل ما يقرب من الخُمس (١٨.٥٪)، ثم اليابان بعدد ٦.٨ ألف سيارة، تشكل عُشر (١٠.١٪) عددها.

- **دول تمتلك أقل من ١٠٪ من عدد السيارات الهيدروجينية:**

وتمتلك أوروبا أكثر من ٤ آلاف سيارة، تشكل (٦٪) من عددها، وفى مقدمة دولها ألمانيا وفرنسا بنسب (٣٪، و١.٢٪) على التوالي، ثم باقي دول العالم بنسبة ٠.٧٪. ***(IEA, 2024, 39)***

- الحافلات (الأتوبيسات): Buses

بلغ عدد الحافلات التي تعمل بخلايا الوقود عام ٢٠١٨ أكثر من ٤٠٠ مركبة في الصين ***(AFC TCP, 2019; HongXiang, 2018, 13)***، و٥٠ مركبة في أوروبا، و٥٥ مركبة في الولايات المتحدة الأمريكية، نصفهم في ولاية كاليفورنيا ***(E4tech, 2018, 15)***. ويوجد حالياً ١١ شركة على مستوي العالم تقوم بتصنيع الحافلات التي تعمل بخلايا الوقود، وتتميز في إنها أفضل من الحافلات التي تعمل بالبطارية، حيث لا تحتاج لإعادة شحن، وبالتالي تقطع مسافة أطول خلال اليوم، وإعادة التزويد بالوقود أسهل وأسرع من إعادة شحن البطارية. ***(IEA, 2019, 127)***

ووصل عدد الحافلات الهيدروجينية عام ٢٠٢٤ إلى ٩.١ ألف حافلة تعمل بخلايا الوقود، بمعدل نمو ٢٩.٧٪ سنوياً خلال الفترة المدروسة (٢٠١٨– ٢٠٢٤)، كثاني أعلى معدل نمو سنوي في المركبات الهيدروجينية، ويمكن تقسيم دول العالم إلى فئتين حسب توزيع عدد الحافلات عام ٢٠٢٤ كالتالي:

- **دول تمتلك أكثر من ٢٠٪ من عدد الحافلات الهيدروجينية:**

وتمتلك الصين ٢.٣ ألف حافلة، تشكل ربع (٢٥.٣٪) عددها، تليها اليابان بعدد ٢.٢ ألف حافلة، تشكل ما يقرب من ربع (٢٤.٢٪) عددها، ثم كوريا الجنوبية بعدد حافلات قدره ألفين حافلة، تشكل أكثر من خمس (٢٢٪) عددها، وجميعها دول تقع في شرق آسيا.

- **دول تمتلك أقل من ٢٠٪ من عدد الحافلات الهيدروجينية:**

وتمتلك قارة أوروبا ١.٨ ألف حافلة، تشكل ما يقرب من خمس (١٩.٨٪) عددها، وفي مقدمة دولها ألمانيا والتي تمتلك ٠.٩ ألف حافلة، تشكل عُشر (٩.٩٪) عددها، تليها بريطانيا وفرنسا وهولندا، وتمتلك الولايات المتحدة الأمريكية ٠.٤ ألف حافلة، تشكل (٤.٤٪) من جملة عددها عالمياً. ثم باقي دول العالم بعدد ٠.٤ ألف حافلة، تشكل (٤.٣٪) من جملة عددها. ***(IEA, 2024, 42)***

(٢) استخدام الهيدروجين في مركبات البضائع:

- الرافعات الشوكية: Forklifts

إن استخدام الهيدروجين في الرافعات يعمل على تقليل الغازات الضارة المنبعثة من الرافعات، وتتميز الرافعات الهيدروجينية بأنها تحتاج إلى صيانة أقل بكثير من مثيلتها الكهربائية، بسبب تلف بطاريتها بسرعة وحاجتها إلى الشحن أو الاستبدال، لذا تعد خلايا الوقود ذات أداء ممتاز، بالإضافة إلى أنها لا تعاني من انخفاض الجهد الذي يحدث

عند تفريغ المدخرات الكهربائية. (إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٨) وصل عدد الرافعات الشوكية التي تعمل بخلايا الوقود الهيدروجينية إلى ٥٤.٣ ألف رافعة عام ٢٠٢٤، بعد أن كان عددها ٢٥ ألف رافعة في عام ٢٠١٨، بمعدل نمو ١٢.٣٪ سنوياً، ويمكن استخدامها كبديل للرافعات التي تعمل ببطارية ***(IEA, 2019, 126)***. ويمكن تقسيم دول العالم إلى فئتين حسب التوزيع الجغرافي لعدد الرافعات الهيدروجينية عام ٢٠٢٤ كالتالي:

- **دول تمتلك أكثر من ٢٠٪ من عدد الرافعات الهيدروجينية:**

وتستحوذ الولايات المتحدة الأمريكية على عدد قدره ٣٦.٩ ألف رافعة، تشكل أكثر من ثلثي (٦٨٪) جملتها عالمياً.

- **دول تمتلك أقل من ٢٠٪ من عدد الرافعات الهيدروجينية:**

وتمتلك هذه الفئة ١٧.٤ ألف رافعة، تشكل ما يقرب من ثلث (٣٢٪) جملتها، تتوزع على مجموعة من الدول في مقدمتها كندا واليابان وكوريا الجنوبية والصين وألمانيا وفرنسا، حيث تمتلك أعداد تتراوح بين ٥ – ٠.٩ ألف رافعة، بنسب تتراوح بين ٩.٢ – ١.٧٪ لكل منهما على التوالي. ***(IPHE, 2024)***

- **الشاحنات: Trucks**

قامت وزارة الطاقة الأمريكية بقياس الوقود السنوي وتكاليف الصيانة لشاحنة ثقيلة، وعند استعمال خلية وقود كوحدة كهرباء مساعدة، فوجدت أن خلايا الوقود توفر ٦٨٠ مليون جالون من وقود الديزل، ومليون طن من ثاني أوكسيد الكربون سنوياً، (إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٩) ويمكن للشاحنات المتطورة تشغيل العديد من الأجهزة الكهربائية التي تحملها على متنها مثل المكيفات والثلاجات. (إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٨)

وبلغ عدد الشاحنات الهيدروجينية ٧٠٠ شاحنة عام ٢٠١٨، واستحوذت الصين على معظمها، بعدد قدره ٤١٢ شاحنة كبيرة، و١٠٠ شاحنة صغيرة (Van) ***(AFC TCP,***

(2019)، وبدأت الولايات المتحدة الأمريكية في تجربتها، وكذلك أوروبا خاصةً فرنسا *(AFHYPAC, 2017)*. ووصل عددها عام ٢٠٢٤ إلى أكثر من ١٢ ألف شاحنة هيدروجينية تعمل بخلايا الوقود، بمعدل نمو ٢٩.٩٪ سنوياً، كأعلى معدل نمو سنوي في المركبات الهيدروجينية، ويمكن تقسيم دول العالم إلى فئات حسب التوزيع الجغرافي لعدد الشاحنات الهيدروجينية عام ٢٠٢٤، كالتالي:

- **دول تمتلك أكثر من ٢٠٪ من عدد الرافعات الهيدروجينية:** وتمتلك الصين ١٠.١ ألف شاحنة، تشكل أكثر من أربعة أخماس (٨٤.٢٪) جملتها عالمياً.
- **دول تمتلك أقل من ٢٠٪ من عدد الرافعات الهيدروجينية:** وتستحوذ دول هذه الفئة على ١.٩ ألف شاحنة، تشكل ما يقرب من سدس (١٥.٨٪) عددها عالمياً، ويأتي في مقدمة الدول التي تمتلك الشاحنات كلاً من ألمانيا وكوريا الجنوبية واليابان وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية بأعداد تتراوح بين ٥٠٠ – ١٧٠ شاحنة، وبنسب تتراوح بين (٤.٢ – ١.٧٪) عالمياً على التوالي. *(IEA, 2024, 40)*

(٣) التحليل المكاني لتغير محطات استخدام الوقود الهيدروجيني بالعالم:

إن استخدام الوقود الهيدروجيني ما زال محدود نسبياً على مستوي العالم في مجال الطاقة، خاصةً كوقود لوسائل النقل، ومع تطور إنتاجه واستخدامه تطورت معه أعداد محطات التزود بالهيدروجين، حيث قدرت أعدادها بمائة محطة عام ٢٠٠٥، **الدليمي**، ٢٠١٨، ٢٢٦)، فيما وصلت إلى ٣٨١ محطة عام ٢٠١٨، *(AFC TCP, 2019)* بمعدل نمو قدره ٩٪ سنوياً.

ووصلت أعدادها إلى ١٢٣١ محطة على مستوي العالم عام ٢٠٢٤، *(IEA, 2024, 29)* بمعدل نمو قدره ١٧.٦٪ سنوياً خلال الفترة المدروسة (٢٠١٨– ٢٠٢٤)، مما يعكس مدي سرعة نمو استخدام الهيدروجين في وسائل النقل البري، وتفيد بيانات الجدول

(٧) والشكل (٨)، في إبراز أهم ملامح التوزيع الجغرافي لمحطات التزود بالوقود الهيدروجين على مستوي العالم عام ٢٠٢٤، ويمكن تناولها كما يلي:

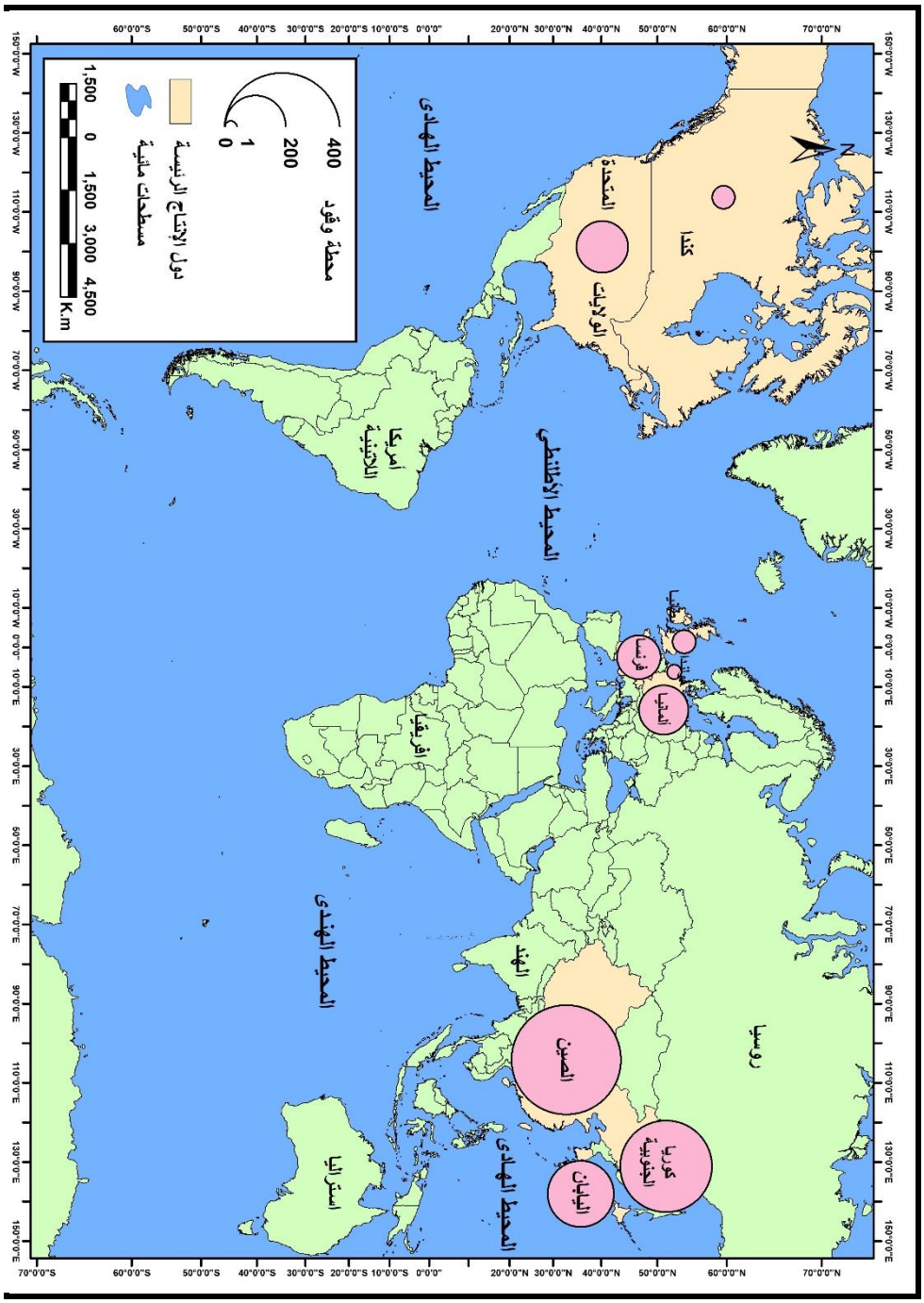
جدول (٧) تغير أعداد محطات الوقود الهيدروجيني خلال الفترة من ٢٠١٨– ٢٠٢٤

الدولة / العدد	عام ٢٠١٨	عام ٢٠٢٤		النمو %
		العدد	النسبة %	
الصين	١٩	٣٩٠	٣١.٧	٣٠.٢
كوريا الجنوبية	١٥	٢٨٦	٢٣.٢	٣٠.٠
الولايات المتحدة	٦٣	١٠٥	٨.٥	٨.٣
اليابان	١٠٠	١٦٢	١٣.٢	٧.٩
ألمانيا	٦٩	٩٧	٧.٩	٥.٦
فرنسا	٢٦	٧٨	٦.٣	١٦.٧
أخري	٨٩	١١٣	٩.٢	٤.٠
الجملة	٣٨١	١٢٣١	١٠٠	١٧.٦

المصدر: International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, hydrogen Deployments, Canada, 2024.

- **دول تمتلك أكثر من ٣٠٠ محطة:**

وتصدرت الصين دول العالم من حيث عدد محطات الهيدروجين، حيث تستحوذ على ٣٩٠ محطة، تشكل ما يقرب من ثُلث (٣١.٧٪) عددها، وبنسبة نمو ٣٠.٢٪ سنوياً خلال الفترة المدروسة (٢٠١٨– ٢٠٢٤)، فقد بلغت عدد محطاتها ١٩ محطة عام ٢٠١٨، حيث شهدت صناعة الهيدروجين في الصين ذروة تمويلية في السنوات الأخيرة، خاصة في الهيدروجين منخفض الكربون. ***(IEA, 2024, 195)***



المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على بيانات جدول (٧)

شكل (٨) التوزيع الجغرافي لأعداد محطات وقود الهيدروجين في العالم عام ٢٠٢٤

- **دول تمتلك ما بين ١٥٠ – ٣٠٠ محطة:**

يبلغ عدد محطاتها ٤٤٨ محطة، تشكل أكثر من ثُلث (٣٦.٤٪) عددها، وتستأثر كوريا الجنوبية بمعظمها بعدد ٢٨٦ محطة، تشكل ما يقرب من ربع (٢٣.٢٪) عددها، وبلغ معدل النمو السنوي بها ٣٠٪ خلال الفترة المدروسة (٢٠١٨– ٢٠٢٤)، كثاني أعلى معدل نمو سنوي بعد الصين، حيث كانت عدد محطاتها ١٥ محطة عام ٢٠١٨، وتتركز باقية المحطات في اليابان بعدد ١٦٢ محطة، تمثل ما يزيد على ثُمن (١٣.٢٪) عددها، وبمعدل نمو ٧.٩٪ سنوياً خلال الفترة ذاتها، حيث كان عدد محطاتها ١٠٠ محطة عام ٢٠١٨، أي أكثر من ربع (٢٦.٢٪) عددها.

- **دول تمتلك أقل من ١٥٠ محطة:**

وتتركز بها ٣٩٣ محطة، تشكل ما يقرب من ثُلث (٣١.٩٪) عددها، ويتركز معظمها في الولايات المتحدة الأمريكية، بعدد قدره ١٠٥ محطة، تشكل ما يقرب من عُشر (٨.٥٪) عددها، وبلغ معدل النمو بها ٨.٣٪ سنوياً خلال الفترة المدروسة (٢٠١٨– ٢٠٢٤)، حيث كان عدد محطاتها ٦٣ محطة عام ٢٠١٨. تليها ألمانيا وتتركز بها ٩٧ محطة، تشكل (٧.٩٪) عالمياً، وبلغ معدل النمو السنوي بها ٥.٦٪ خلال الفترة ذاتها، حيث بلغ عدد محطاتها ٦٩ محطة عام ٢٠١٨.

تليها فرنسا وتتركز بها ٧٨ محطة، تمثل (٦.٣٪)، وبلغ معدل النمو السنوي بها ١٦.٧٪، حيث كان عدد محطاتها ٢٦ محطة عام ٢٠١٨. فيما استحوذت باقي دول العالم على ١١٣ محطة، تشكل ما يقرب من عُشر (٩.٢٪) عدد المحطات، وبلغ معدل النمو السنوي بها ٤٪ سنوياً خلال الفترة ذاتها، ويأتي في مقدمة هذه الدول بريطانيا وكندا وهولندا بعدد محطات ٢٦، و٢٥، و١١ محطة على التوالي، بنسب ٢.١ – ٠.٩٪ من جملة عددها.

وما تزال أعداد محطات التزود بالوقود الهيدروجيني صغيرة مقارنة بأرقام المركبات الكهربائية، حيث يوجد ١٤٤ ألف شاحن سريع عام، و٣٩٥ ألف شاحن بطيء عام، و٤.٧ مليون شاحن خاص في العالم عام ٢٠١٨ ***(IEA, 2019a)***، بمتوسط ١٠ مركبات كهربائية لكل شاحن عام، ومركبة واحدة لكل شاحن خاص، ***(Robinius, M. Et Al., 2018, 20)*** عكس محطات الوقود الهيدروجيني، فقد سجلت ٩٨ مركبة لكل محطة، ووصلت إلى ١١٦ مركبة لكل محطة وقود عام ٢٠٢٤، ويتركز معظمها في دول شرق آسيا.

(٤) استخدام الهيدروجين في وسائل النقل بالسكك الحديدية:

تعد السكك الحديدية أرخص وسائل النقل، وهي وسيلة النقل الأكثر كهربة، **(رياض، ٢٠١٨، ٢١٩)** وما زالت تتزايد نسبة المسارات المكهربة باستمرار في معظم دول العالم، وبشكل عام فإن المسارات الأكثر استخداماً هي التي يتم كهربتها أولاً كما في فرنسا وألمانيا، فنجد أن الخطوط المكهربة تنقل أكثر من أربع أخماس حركة الركاب، على الرغم من إنها أقل من نصف شبكة السكك الحديدية ***(European Commission, 2016)***.

ويُعد القطار الهيدروجيني واحدًا من أهم الابتكارات الحديثة في مجال النقل المستدام، وذلك عبر توليد الطاقة اللازمة لتشغيل القطارات دون أي انبعاثات كربونية، حيث تعتمد على التفاعل الكيميائي للهيدروجين المُخزن على سطح القطار مع الأوكسجين داخل خلايا الطاقة التي تمثل قلب نظام القطارات الهيدروجينية، وبالتالي التخلص من الغازات الضارة التي تنتجها القطارات، **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٨)** وتنتج هذه العملية طاقة كهربائية تتجه إلى بطاريات الليثيوم لتخزينها، وتمد عجلات القطار بالطاقة اللازمة لتحريكها،

وتتميز تلك التقنية بأنها تعطي كفاءة الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري نفسها. بالإضافة إلى انخفاض تكلفة التشغيل مقارنة بالقطارات التقليدية. ***(IEA, 2019, 142)***

- **التجربة الأولي للقطارات الهيدروجينية:**

وبدأت التجارب المعتمدة الأولي للقطارات الهيدروجينية في عام ٢٠١٨ في ألمانيا، واستمرت حتى عام ٢٠٢٠، وبدأ التشغيل التجاري لنقل الركاب بهذا النوع من القطارات بشكل محدود في عام ٢٠٢٢ بين مدن كوكسهافن وبريمرهافن وبريمرفورد وبوكستهود في ألمانيا، كما توضحه الصورة (١)، حيث حلّ أسطول مكون من ١٤ قطارًا قدّمته شركة "ألستوم" الفرنسية لمنطقة ساكسونيا السفلى شمال البلاد، محل القطارات العاملة بالديزل على خطوط سكك حديد تمتدّ إلى مائة كيلومتر لكي تربط بين هذه المدن. ***(Alstom, 2022)***

وهكذا تسعي معظم الدول الأوربية إلى توسيع أسطول قطارات الهيدروجين مثل بريطانيا وفرنسا وإيطاليا والتي بدأت في إدخال أولي القطارات لديها في عام ٢٠٢٢. وتبقى البنية التحتية المناسبة لاستيعاب قطارات الهيدروجين في ألمانيا وف–ي أوروبا وسائر أنحاء العالم غير كافية، رغم إعلان برلين في العام ٢٠٢٠ عن خطة بقيمة سبع مليارات يورو لتُصبح من الدول الرائدة في مجال الهيدروجين، ***(Alstom, 2022)*** لذا فمن الصعب أن يحصل استبدال قطارات الديزل بقطارات هيدروجين بنسبة ١٠٠٪.

نقلاً عن Carmen Jaspersen/AFP, 2022

صورة (١) أول قطار يعمل بطاقة الهيدروجين في المانيا

وعلي أي حال يمكن أن تصبح قطارات الهيدروجين قادرة على المنافسة مع وسائل النقل الأخرى ذات التردد المنخفض الخاصة بخدمات نقل الركاب، وتعد قطارات الهيدروجين أكثر تنافسية مع وسائل النقل الأخرى للخدمات التي تتطلب حركة لمسافات طويلة للقطارات الكبيرة مع استخدام شبكة منخفضة التردد. كما يمكن الجمع بين استخدام الهيدروجين في قطارات السكك الحديدية واستخدامه في آلات السكك الحديدية الأخرى كالرافعات الشوكية، بالإضافة لاستخدامه في المراكز اللوجستية، مما ينعكس بالإيجاب على تقليل تكاليف النقل وتحسين مرونته. ***(IEA, 2019, 143)***

(ب) استخدام الهيدروجين في وسائل النقل الجوي:

تم استخدام الطائرة لأول مرة لأغراض النقل في ألمانيا عام ١٩١٩، وشهد النقل الجوي تطوراً تكنولوجياً دقيقاً وهائلاً وسريعاً في السنوات القليلة الماضية، خاصةً في الطائرات التي تمثل وسيلة النقل الجوي. (**السامرائي، ٢٠١٤، ٦٦**) ووصل حجم اسهام قطاع الطيران في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ٢.٨٪ عالمياً عام ٢٠١٧، ***(Schilo, 2009)*** ومن

المتوقع زيادة هذه النسبة مع زيادة أعداد الطائرات وكثرة استخدام النقل الجوي مستقبلاً، فمن المتوقع أن تتضاعف حركة المسافرين جواً إلى ما يقرب من ١٦ تريليون كيلومتر سنوياً بحلول منتصف القرن الحالي في ظل الاتجاهات الحالية. ***(DLR, 2016)*** ومن المفترض أن تؤدي تحسينات الكفاءة إلى تقليل استهلاك الطاقة وإبطاء زيادة الطلب عليها، ولكن ستكون هناك حاجة إلى أنواع وقود بديلة لتجنب زيادة الانبعاثات، ما يدعم الرؤى الخاصة بالتحول إلى الهيدروجين بدلاً من الوقود الأحفوري التقليدي. ***(Airbus, 2000)***

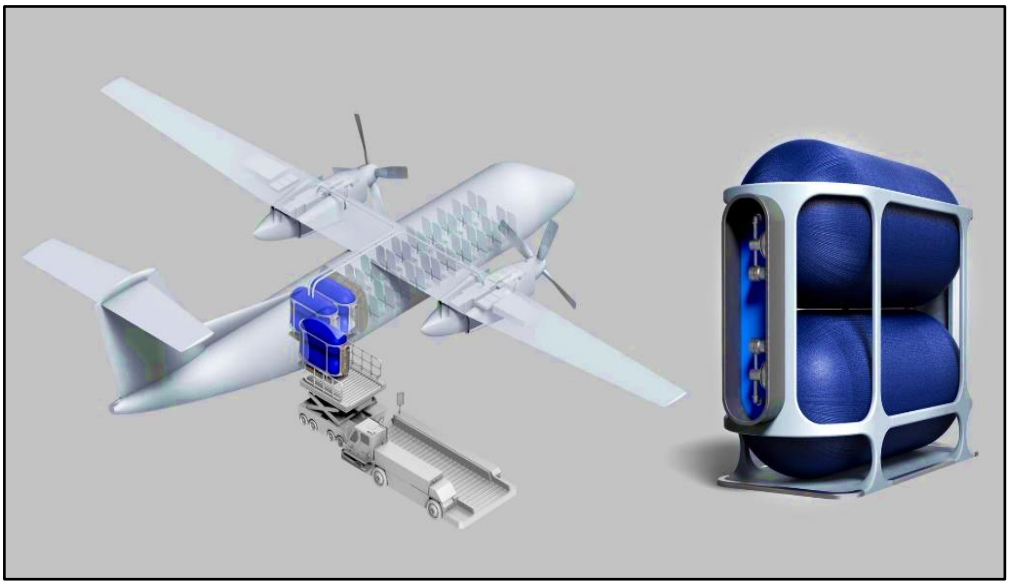
وتستخدم الطائرات الهيدروجينية وقود الهيدروجين العنصر الأكثر وفرة في الكون كمصدر للطاقة بدلاً من وقود الطائرات التقليدي الذي يتم تكريره من النفط الخام. ويمكن إما حرق الهيدروجين في محرك الطائرات أو أي شكل آخر من أشكال محركات الاحتراق الداخلي، أو يمكن استخدامه لتشغيل خلية وقود لتوليد الكهرباء لتشغيل الطائرة.

ويجب بناء الطائرات التي سوف تستخدم الهيدروجين للتشغيل بوجود خزانات خاصة مضغوطة لهذا الوقود داخل جسم الطائرة، كما في الصورة (٢)، وهو ما يختلف عن استخدام أجنحة الطائرة لتخزين الوقود مثلما هو الأمر في طائرات الوقود الأحفوري العادي. ويرجع ذلك إلى كثافة الطاقة المنخفضة للهيدروجين والحاجة إلى التخزين المبرد، فضلاً عن البنية التحتية الجديدة للتزود بالوقود والتخزين في المطارات. وتتطلب طائرة بوينج ٧٤٧ جامبو أكثر من مليون لتر من الهيدروجين لتقطع نفس المسافة التي تقطعها باستخدام ألف لتر من الوقود الأحفوري. ***(IEA, 2024, 109)***

- **التجربة الأولي للطائرات الهيدروجينية:**

قامت شركة بوينج في فبراير عام ٢٠٠٨ بإطلاق أول طائرة في العالم تعمل بالهيدروجين من مطار قرب مدريد في إسبانيا، لكن الطائرة ذات المقعدين كانت تعمل عبر خلية وقود تقوم بتحويل الطاقة الناتجة عن التفاعل الكيميائي للهيدروجين والأكسجين

إلى طاقة كهربائية. وأقلعت طائرة أخرى ذات ٤ مقاعد من مطار شتوتجارت في ألمانيا في عام ٢٠١٦، مع مساع لتحسين خلية الوقود الهيدروجيني لتطوير إمكانية استخدامه على متن طائرات إقليمية أكبر تحمل عدد ركاب يبلغ ١٩ راكباً. ***(IEA, 2019, 146)***



صورة (٢) خزان الهيدروجين بالطائرة

وأقلعت أول رحلة جوية تجارية تجريبية تعمل بالطاقة الهيدروجينية في العالم في سبتمبر ٢٠١٩ قبل أن تهبط بسلام في بيدفوردشير في بريطانيا. وكشفت شركة إيرباص في سبتمبر ٢٠٢٠ عن ثلاث تصميمات اختبارية محتملة لطائرات تعمل بالهيدروجين، على إنه من المتوقع أن تبدأ الرحلات التجارية بالطائرات الهيدروجينية بدايةً من عام ٢٠٣٥. ***(IEA, 2024, 110)***

(ج) استخدام الهيدروجين في وسائل النقل المائي:

يعد النقل المائي أرخص وسيلة لنقل البضائع لمسافات طويلة، **(الزوكة، محمد خميس، ٢٠٠٠، ١٨٠)** لذا يتم نقل ٩٠٪ من منتجات التجارة المادية العالمية عبر النقل البحري، وثُلث هذه المنتجات عبارة عن منتجات طاقة، لذا يستهلك النقل البحري ٥٪ من إنتاج النفط العالمي، وينتج عنه ٢.٥٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة عالمياً، مما يؤدي إلى تلوث الهواء لا سيما حول الموانئ. ***(IMO, 2014)***

لذا يعد استخدام الهيدروجين في النقل المائي خياراً رائداً لمواجهة تحديات النقل الدولي، حيث ستقلل الانبعاثات الضارة، كما يمكن استخدامه في الرافعات الشوكية والشاحنات وحركة البضائع داخل الموانئ وما حولها. ويسيطر الوقود التقليدي على النقل المائي، حيث إن استخدام الوقود المعتمد على الهيدروجين محدود للغاية، ويتم استخدامه للإشعال المشترك بخلط الهيدروجين مع الديزل في محركات الاحتراق الداخلي، أو كخلايا للوقود تستخدم مع بطاريات كهربائية، ويوجد عدة مشاريع تم تنفيذها في الولايات المتحدة وبعض دول أوروبا كبلجيكا وأيرلندا والنرويج. ***(AirClim, 2018)***

- **أبرز مشروعات النقل المائي:**

يعد مشروع إليكترا أحد المشروعات البارزة، وهو أول قارب دفع يعمل بخلايا وقود الهيدروجين في العالم، وقد بدأ العمل في عام ٢٠١٦، لنقل البضائع في الممرات المائية حول مدينة برلين بألمانيا، مع خطط لتمديد الاختبار إلى طرق أطول نحو مدينة هامبورج. ***(IEA, 2019, 125)***

وأسهمت المعرفة المكتسبة من هذه المشروعات في التحسين المستمر والاختبار الواقعي لتقنية خلايا وقود الهيدروجين، وبالفعل بدأت شركة نورليد النرويجية في عام ٢٠١٨، بالتعاون مع شركات أخرى، ببناء عبّارة ركّاب وسيارات تعمل بالهيدروجين السائل،

وأصبحت أول عبّارة في العالم تعمل بالهيدروجين السائل، وبدأت في العمل في مارس ٢٠٢٣، عبر الطريق بين مدن هجيلميلاند – سكيبيافيك – نيسفيك في النرويج. ***(IEA, 2024, 112)***

يتم تصميم أول سفينة هيدروجين لنقل البضائع، التي أعلنتها شركتا سامسكيب الهولندية وكوتشين الهندية، لإيجاد ممرات خضراء بين قارة أوروبا ومنطقة الدول الإسكندنافية، لتكون أول سفينة هيدروجين خالية من الانبعاثات لنقل البضائع في العالم؛ كونها ستعتمد على الهيدروجين الناتج من مصادر الطاقة المتجددة. ***(IEA, 2024, 112)***

ويبلغ طول أول سفينة هيدروجين لنقل البضائع ١٣٥ مترًا، وستحتاج إلى ٣.٢ ميجاوات من وقود خلايا الهيدروجين، لكنها ستحتوي على محركات وقود الديزل للتشغيل عند حدوث أيّ أعطال. وهما عبارة عن سفينتين من المقرر أن يبدأ تشغيلهما في الربعين الثالث والرابع من العام ٢٠٢٥. ***(IEA, 2024, 113)***

وهناك تجارب ناجحة في مجال سفن الهيدروجين، لكنها لأغراض الاستكشاف والأبحاث في الغالب. وأعلنت دول عديدة سياسات داعمة لوقود الهيدروجين، مثل روسيا والهند وبريطانيا وغيرها، مما يؤكد علي زيادة الاعتماد على سفن الهيدروجين مستقبلاً.

(د) مشكلات استخدام طاقة الهيدروجين وكيفية التغلب عليها:

يمكن العرض لبعض معوقات استخدام طاقة الهيدروجين في وسائل النقل، وكيفية التغلب عليها في النقاط التالية:

- **ضخامة خزان الوقود المستخدم في وسائل النقل:**

تتمثل أهم عوائق استخدام الهيدروجين في وسائل النقل في المساحة المخصصة لخلايا الوقود وتخزين الهيدروجين، فيحتاج إلى مساحة تصل حتى ٥ أضعاف حجم الوقود التقليدي، حيث إن الهيدروجين غاز خفيف الوزن، وتزيد المشكلة في النقل المائي، خاصة مع السفن الصغيرة (أقل من ٥ ميجاوات). وقد يتطلب ذلك إعادة تصميم وسيلة النقل،

أو تكون رحلات وسيلة النقل أقصر، أو إعادة التزويد بالوقود بشكل متكرر، أو تقليل أحجام البضائع. ويكون ذلك حسب أنواع وسائل النقل والبضائع وطرق النقل. ***(UMAS, 2018)***

بالتالي فإن المسافة الممكن قطعها بعبوة واحدة من الهيدروجين أقل من تلك التي يمكن الحصول عليها بتعبئة خزان الوقود بالنفط، فعلى الرغم من أن الهيدروجين يعطى طاقة أكثر من البنزين بضعفين، ولكن تنخفض كثافة الطاقة جداً بالنسبة للحجم في الهيدروجين السائل، فتنخفض عن طاقة البنزين ٤ مرات، حيث ينتج المتر المكعب ٢٣٦٠ كيلووات/ ساعة من الهيدروجين، في حين إنه ينتج ٨٧٦٠ كيلووات/ ساعة من البنزين، بالتالي لا بد من زيادة حجم خزان الوقود الهيدروجيني بوسائل النقل حتى تستطيع السير لمسافة أطول. ***(EIA, 2017, 86)***

- **محدودية انتشار محطات الوقود الهيدروجينية**

وصل عدد مركبات الوقود الهيدروجيني عام ٢٠٢٤ إلى ١١٦ مركبة لكل محطة وقود، ومعني هذا أن المحطات لا تعمل بكامل طاقتها، وبالتالي فإن تكاليف إنشاء المحطات وإنتاج الوقود، لا تقابلها المكاسب المرجوة من هذه المحطات، وبالتالي فإن ذلك سيؤثر على سرعة انتشار مركبات الوقود الهيدروجيني والبنية التحتية الخاصة بها، حيث لا يوجد حاجة إلي زيادة أعداد المحطات إلا مع زيادة عدد المركبات نفسها، لذا يجب العمل على زيادة أعداد المركبات الهيدروجينية، كما أن عدد محطات الوقود محدودة، حيث وصل عددها إلي ١٢٣١ محطة حتى الآن، وكذلك البنية التحتية اللازمة لمحطات التزود بالوقود لم تكتمل بعد. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٧)**

- **تكلفة الإنتاج المرتفعة:**

لا تزال تكاليف إنتاج الهيدروجين مرتفعة، وكذلك تكاليف النقل والتحويل والتخزين، حيث تتراوح تكلفة إنتاج ١ كجم هيدروجين بين ٠.٦ دولار إلى أكثر من ٥ دولار أمريكي/

كجم، وتتباين هذه التكلفة من دولة إلى أخري من دول العالم حسب الإمكانات البيئية والتكنولوجية المتاحة، وينتج الكيلوجرام هيدروجين ٤٠ كيلو وات ساعة، أو ١٤٢ ألف كيلو جول من الطاقة، مما يجعله يتفوق على مصادر الطاقة الأخرى، فهو بذلك يعطي طاقة أكثر من طاقة البنزين بضعفين (١٣ كيلو وات ساعة/ كجم). **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٢٩)**

- مشكلات أخري:

- ثمن المركبات الهيدروجينية باهظ لكونها تقنية جديدة، حيث توزع تكلفة الأبحاث على القطع المنتجة. **(إبراهيم، ٢٠٢١، ٢٣٧)**
- صعوبة تخزين الهيدروجين بشكل آمن سواء في محطات التزود به أو في السيارات.

(هـ) الطلب على الهيدروجين في النقل .. احتمالات المستقبل:

من المتوقع أن يتضاعف حجم الشحن الدولي أكثر من ثلاثة أضعافه، وذلك بحلول عام ٢٠٥٠، وقد يؤدي ذلك إلى زيادة الطلب على الوقود التقليدي، ليصل إلى ٦ مليون برميل يومياً، وبالتالي زيادة كمية الانبعاثات الضارة، ويأتي استخدام وقود الهيدروجين كأفضل الحلول للحد من هذه الانبعاثات، ولكنها ما زالت في حاجة لتوفير البنية التحتية للتزود بالوقود، وتعديلات على خزانات الوقود بوسائل النقل (الطائرة – السيارة – السفن – .....).

- مستقبل الهيدروجين في النقل البري:

إن مركبات الوقود الهيدروجيني هي مركبات لا تحتوي على انبعاثات من العوادم، وبالتالي تقليل تلوث الهواء، وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي فإن التوقعات المستقبلية على زيادة الطلب على الهيدروجين في النقل البري كبيرة جداً، ويمكن تشغيل أي وسيلة نقل بري باستخدام الهيدروجين، سواء مباشرة باستخدام خلايا الوقود أم عن طريق الوقود المعتمد على الهيدروجين في محركات الاحتراق الداخلي. وبالتالي يمكن

استبدال جميع وسائل النقل البري الموجودة على مستوي العالم إلى سيارات تعمل بالهيدروجين، وهو رقم كبير جدا، فقد وصل عدد السيارات في العالم عام ٢٠٢٤ أي ١.٤٥ مليار سيارة، ومن المتوقع أن يصل إلى ٢ مليار سيارة بحلول عام ٢٠٣٠ ***(IEA, 2024, 130).***

كما وصل معدل النمو السنوي في أعداد المركبات الهيدروجينية ١٩.٥٪ سنوياً في السنوات الأخيرة (٢٠١٨- ٢٠٢٤)، مما سيؤدي إلى تضاعف أعدادها أكثر من مرة بحلول عام ٢٠٣٠، وكذلك فإن معدل النمو السنوي في أعداد محطات الوقود الهيدروجينية ١٧.٦٪ خلال نفس الفترة، وبالتالي فإن أعدادها تتضاعف مع تضاعف أعداد المركبات الهيدروجينية.

- **مستقبل الهيدروجين في النقل المائي:**

تعد السفن وسائل نقل ضخمة، لذا تحتاج إلى طاقة عالية، حيث يصل احتياج السفينة من الطاقة إلى ١٣٠ ميجاوات لكل كيلومتر لأكبر سفن الحاويات، لذا فإن تغيير نوع الوقود يتحكم فيه مرافق التزويد بالوقود، والمعدات الموجودة على السفينة من خلايا وقود أو خزانات وقود وغيرها، ثم الوقود نفسه. وعند تنفيذ أي مشروع في النقل البحري لا بد من تقدير هذه العناصر، وتشير التقديرات أن البنية التحتية للهيدروجين السائل أكثر تكلفة بنسبة ٣٠٪ من الغاز الطبيعي المسال.

وتتمثل مكونات التكلفة الرئيسة في سفن التخزين والوقود، والتي يتم استخدامها لتزويد السفن بالوقود، فيجب زيادة أعدادها بالتوازي مع عدد السفن التي تتم خدمتها، وتكلفة خطوط أنابيب الهيدروجين، وتعد تكاليف السفن والبنية التحتية صغيرة نسبياً من إجمالي تكاليف الشحن على المدي البعيد (١٥ سنة مثلاً)، وتظل تكاليف الوقود نفسه أكبر بكثير. وقد تنخفض أسعارها مستقبلاً مع زيادة كمية إنتاجها، وزيادة المنافسة فيما بينها. وعلى أي حال فإن تمرير هذه التكاليف إلى المستهلك سيكون محدود لأن تكاليف النقل

تمثل حصة صغيرة، غالباً أقل من ١٪ من إجمالي سعر البضائع المشحونة. ***(ETC, 2018a)***

وتأتي الأمونيا كنوع من أنواع الوقود المعتمدة على الهيدروجين، ويتم استخدامها بالفعل عالمياً، ويوجد بعض البنية التحتية اللازمة لاستخدامها، ولكنها محدودة جداً، لذا ستحتاج إلي زيادة أعدادها من مرافق الموانئ والتوزيع والتخزين، ولتلبية الطلب على النقل البحري على المدى البعيد ستتطلب ٣٠ ضعف حجم الأمونيا المتداولة عالمياً حالياً، أي ٥٠٠ مليون طن. ***(IEA. 2024. 133)***

- **مستقبل الهيدروجين في النقل الجوي:**

لن يتطلب الوقود السائل المعتمد على الهيدروجين أي تغييرات في تصميم الطائرة أو البنية التحتية للتزود بالوقود في المطارات، ولكنه أغلي من الوقود الأحفوري التقليدي حالياً ب من أربعة إلي ستة أضعاف، وبالتالي سيؤثر على زيادة تكاليف تشغيل الطائرات، وربما أسعار التذاكر، وربما ارتفاع أسعار الوقود التقليدي مستقبلاً بسبب السياسات الدولية أو انخفاض الاحتياطي العالمي أو لأي سبب آخر، مما يعطي فرصة لزيادة استخدام وقود الهيدروجين. ***(Murphy et al., 2018)***

الخاتمة:

تعد ذرة الهيدروجين أبسط الذرات وأخفها وأكثرها شيوعاً في الكون، حيث تكون نحو ٩٠٪ من كتلة عناصر الكون، مما يعنى وجوده تقريباً في كل شيء عضوي. ويعد الهيدروجين ناقل للطاقة، فدوره يتشابه مع دور الكهرباء، فيمكن إنتاج كلاهما من مصادر الطاقة المختلفة. كما إنه حامل طاقة كيميائية، مما يسهل تخزينه لفترات طويلة، ونقله لمسافات بعيدة، مما يسهم بشكل كبير في مرونة نظام الطاقة العالمي.

وشهد الهيدروجين عدة محاولات لاستخدامه، ولكن لم تترجم أي منها إلى استثمار مستدام، إلي أن زاد الاهتمام به منذ سبعينيات القرن العشرين، بسبب تذبذب أسعار النفط والاهتمام العالمي بتلوث الهواء والأمطار الحمضية. فوصل معدل النمو السنوي للطلب على الهيدروجين خلال الفترة ١٩٧٥ – ٢٠٢٤ إلى ٣.٨٪ سنوياً. وتتصدر الدول المتقدمة قائمة الدول المنتجة والمستهلكة للهيدروجين، فنجد أن الصين هي المنتج الرئيسي له بنسبة ٣٠.٥٪ في عام ٢٠٢٤، وتعد كذلك المستهلك الأكبر له عالميًا، إذ بلغ استهلاكها منه ٢٩٪ من الطلب العالمي، وتستحوذ الولايات المتحدة على ٨.٤٪ من الإنتاج، و١٣.٨٪ من جملة استهلاك الهيدروجين كثاني دول العالم انتاجاً واستهلاكاً له.

أن الهيدروجين غير موجود كعنصر حر في الطبيعة إلا في حالات نادرة جدًا، ومن ثم فإنه موجود في شكل جزيء أو داخل مادة أخرى، ولا بد من استخلاصه منها. ويتم استخدام طاقة الهيدروجين في كافة أنماط النقل، إلا أن النقل البري يحظى بالأغلبية العظمي، وتتصدر الولايات المتحدة الأمريكية دول العالم بعدد السيارات التي تعمل بطاقة الهيدروجين بأكثر من ثُلث (٣٦.٨٪) عددها، تليها كوريا الجنوبية بنسبة تقترب من الربع (٢٤.٢٪)، ثم الصين بنسبة تقترب من الخمس (١٩٪)، ثم اليابان بنسبة العشر (٩.٨٪)، ثم الاتحاد الأوربي، وخاصة ألمانيا وفرنسا، ثم باقي دول العالم بنسبة (٥.٦٪).

وصل عدد المركبات التي تعمل بالهيدروجين في العالم إلى ١٤٢.٨ ألف مركبة في عام ٢٠٢٤، فيما أن بداية صناعتها لأول مرة تعود إلى عام ٢٠١٣. وبلغ معدل النمو في عدد المركبات ١٩.٥٪ سنوياً خلال الفترة من ٢٠١٨– ٢٠٢٤، وتتوزع أعداد المركبات على أنواع مختلفة من وسائل النقل، حيث وصل إجمالي سيارات الهيدروجين في العالم إلى ٦٧.٤ ألف مركبة هيدروجينية تعمل بخلايا الوقود متداولة في جميع أنحاء العالم، تشكل ٠.٠٠٥٪ من جملة عدد السيارات في العالم، ووصل عدد الحافلات التي تعمل بخلايا الوقود إلى ٩.١ ألف حافلة، و٥٤.٣ ألف رافعة شوكية، و١٢ ألف شاحنة.

ووصل عدد محطات الوقود إلى ١٢٣١ محطة عام ٢٠٢٤، بنسبة نمو ١٧.٦٪ سنوياً خلال الفترة من ٢٠١٨ – ٢٠٢٤، مما يعكس مدي سرعة نمو استخدام الهيدروجين في وسائل النقل البري، وتستأثر الصين بثلث عدد محطات الوقود (٣١.٧٪)، تليها كوريا الجنوبية واليابان بنسب ٢٣.٢، و١٣.٢٪ على التوالي، وتستحوذ كلا من الولايات المتحدة، وألمانيا، وفرنسا على نسب ٨.٥، و٧.٩، و٦.٣٪ من عدد المحطات، فيما استحوذت باقي دول العالم على ٩.٢٪ من عدد المحطات. وبلغ معدل النمو السنوي بها ٤٪ سنوياً، ويأتي في مقدمة هذه الدول هولندا وسويسرا.

إن مركبات الوقود الهيدروجيني هي مركبات لا تحتوي على انبعاثات من العوادم، وبالتالي تقليل تلوث الهواء، وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي فإن التوقعات المستقبلية على زيادة الطلب على الهيدروجين في النقل البري كبيرة جداً، ويمكن تشغيل أي وسيلة نقل بري باستخدام الهيدروجين، سواء مباشرة باستخدام خلايا الوقود أو عن طريق الوقود المعتمد على الهيدروجين في محركات الاحتراق الداخلي. وينسحب القول السابق على وسائل النقل الجوي والمائي، خاصة وأن نسبة اسهام الطائرات بانبعاثات ثاني الكربون وصل إلى ٢.٨٪ عالمياً عام ٢٠١٧، وينتج عن النقل المائي ٢.٥٪ من هذه الانبعاثات، كما يستهلك ٥٪ من إنتاج النفط العالمي.

التوصيات:

- إنشاء البنية التحتية اللازمة لتوفير وقود الهيدروجين، وتزويد وسائل النقل البرية والجوية والبحرية به، لأن ذلك سيؤدي إلى انخفاض أسعاره مع كثرة المعروض منه، مما سينعكس بالإيجاب على انتشار وسائل النقل التي تعمل بالهيدروجين.
- الهيدروجين حامل طاقة كيميائية، مما يسهل تخزينه لفترات طويلة، ونقله لمسافات بعيدة، مما يسهم في مرونة نظام الطاقة العالمي، لذا يجب العمل على زيادة استخدامه، وتوفير وسائل النقل التي تستخدمه للحصول على الوقود اللازم لحركتها.

- تتصدر الدول المتقدمة قائمة الدول المنتجة والمستهلكة للهيدروجين، لذا يجب على الدول النامية خاصة بناء القدرات التقنية لأنظمتها الوطنية، بما يتفق مع معايير الهيدروجين العالمية، حتى تتمكن من الاندماج في الأسواق العالمية بسرعة ودون عقبات. كما يجب على الحكومات والشركات زيادة التنسيق الدولي لتعزيز التزامات استعمال الهيدروجين في القطاعات التي يُستعمل فيها هذا الوقود.
- وصل إجمالي عدد سيارات الهيدروجين ٠.٠٠٥ من جملة عدد السيارات في العالم، تخدمها ١٢٣١ محطة تزود بالوقود في عام ٢٠٢٤، وهو رقم صغير جداً فلابد من زيادة عدد السيارات الهيدروجينية لضمان نجاح واستمرار محطات الوقود والبنية التحتية الخاصة بتوصل الهيدروجين.
- زيادة عدد محطات التزود بالوقود الهيدروجيني ووفرتها سيشجع على سهولة انتشار المركبات الهيدروجينية.
- زيادة أعداد القطارات الهيدروجينية حيث إنها وسيلة نقل خالية من الانبعاثات الضارة، وتكلفة تشغيلها منخفضة مقارنة بالقطارات التقليدية.
- بلغ حجم اسهام قطاع الطيران في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ٢.٨٪ عالمياً عام ٢٠١٧، ومن المتوقع زيادة هذه النسبة مع زيادة أعداد الطائرات وكثرة استخدام النقل الجوي مستقبلاً، مما يجعلها من أهم وساءل النقل التي يجب العمل على إحلال الطائرات الهيدروجينية محلها، لتقليل هذه الانبعاثات الكربونية.
- يستهلك النقل البحري ٥٪ من إنتاج النفط العالمي، وينتج عنه ٢.٥٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة عالمياً، مما يؤدي إلى تلوث الهواء لا سيما حول الموانئ. لذا يعد استخدام الهيدروجين في النقل المائي خياراً رائداً لمواجهة تحديات النقل الدولي، حيث ستقلل الانبعاثات الضارة، كما يمكن استخدامه في الرافعات الشوكية والشاحنات وحركة البضائع داخل الموانئ وما حولها.

قائمة المراجع

- **المراجع العربية:**

- أحمد السيد الزاملى، الموارد الاقتصادية، دار الثقافة العربية، القاهرة، ٢٠٠٨.
- صبحي أحمد الدليمي، جغرافية الطاقة، ط١، دار أمجد للنشر والتوزيع، عمان، الأردن، ٢٠١٨.
- عمر محمد على محمد، جغرافية النقل والتجارة، دار الوفاء، الإسكندرية، ٢٠١٩.
- فاروق كامل عزالدين، النقل أسس ومناهج وتطبيقات، ط٣، الأنجلو المصرية، القاهرة، ٢٠٠٥.
- فرج عبدالعظيم حسين الخفاجي، العلاقة بين النقل والموقع الصناعي دراسة تطبيقية على محافظة المثني، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية التربية للعلوم الإنسانية، جامعة المثني، العراق، ٢٠١٦.
- مجيد ملوك السامرائي، جغرافيا النقل المتقدمة، المطبعة المركزية، جامعة تكريت، العراق، ٢٠١٤.
- محمد خميس الزوكة، جغرافية النقل، دار المعرفة الجامعية، الإسكندرية، ٢٠٠٠.
- محمد رياض، جغرافيا النقل، مؤسسة هنداوي، القاهرة، ٢٠١٨.
- محمد محمود إبراهيم الديب، قضايا الطاقة في مصر، الجمعية الجغرافية المصرية، سلسلة بحوث جغرافية، ع ٢٥، القاهرة، ٢٠٠٩.
- مدونات البنك الدولي (worldbank.org)، مستقبل قطاع النقل في القرن الحادي والعشرين، ٢٠٢٤.
- منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، تطورات الغاز الطبيعي المسال والهيدروجين خلال الربع الأول من عام ٢٠٢٢، الكويت، ٢٠٢٢.

- ـــــــــ (أوابك)، نقل وتصدير الهيدروجين، الكويت، ٢٠٢٤.
- ـــــــــ (أوابك)، تطورات الغاز الطبيعي المسال والهيدروجين خلال الربع الأول من عام ٢٠٢٤، الكويت، ٢٠٢٤.
- ـــــــــ (أوابك)، مجلة النفط والتعاون العربي، مجلد ٥١، عدد ١٨٨، الكويت، ٢٠٢٤.
- هيئة الأمم المتحدة، اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا، استخدام الهيدروجين في قطاع النقل، الدورة الثالثة والعشرين للنقل واللوجستيات، مصر، ٢٠٢٢.
- وفيق محمد جمال الدين إبراهيم، الجغرافيا الاقتصادية الجديدة، ط٦، أم القري، القاهرة، ٢٠١٨.
- ـــــ، جغرافيا التعدين والطاقة، ط٥، أم القري، القاهرة، ٢٠٢١.
- ـــــ، المشكلات الاقتصادية، ط٧، أم القري، القاهرة، ٢٠٢١.
- وكالة الطاقة الدولية، الطلب العالمي على الهيدروجين، ٢٠٢٤.
- الوكالة الدولية الطاقة المتجددة، جيوسياسية تحول قطاع الطاقة – عامل الهيدروجين، أبوظبي، الإمارات، ٢٠٢٢.

- **المراجع الأجنبية:**

- Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programmer (AFC TCP), "AFC TCP Survey on the Number of Fuel Cell Electric Vehicles, Hydrogen Refueling Stations and Targets", provided to IEA by AFC TCP, 2019.
- AFHYPAC, 100 hydrogen vehicles deployed in the framework of the H2ME project, paris, 2017.
- Airbus, "Cryoplane – Hydrogen fuelled aircraft," Paris, 2000.

- AirClim, “Norway heading for zero-emission ships”, Goteborg, Sweden, 2018.
- Alstom, World premiere: Alstom’s hydrogen trains enter passenger service in Lower Saxony, paris, 2018.
- Carmen Jaspersen/AFP, Paris, France, 2022.
- DLR, “Zero-emission air transport – first flight of four-seat passenger aircraft HY4”, DLR German, 2016.
- E4tech, The Fuel Cell Industry Review, London, 2018.
- European Commission, “Electrified railway lines”, Mobility and Transport, Brussels, Belgium, 2016.
- European Hydrogen Observatory, Hydrogen production capacity, 2024.
  WWW.observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/hydrogen-production.
- HongXiang, Z., New Energy Auto Industry at Rugao, Rugao, China, 2018.
- Hydrogen Council, McKinsey & Company, Hydrogen Insights, Anderlecht, Belgium, September 2024.
- Energy International Administration (EIA), International Energy Annual, Paris, 2017.
- International Energy Agency (IEA). a, Global EV Outlook 2019: Overcoming the Challenges of Transport Electrification, Paris, 2019.
- IEA. b, The Future of Rail; Opportunities for Energy and the Environment, OECD/IEA, Paris, 2019.
- IEA. c, Perspectives for the Clean Energy Transition: The Critical Role of Buildings, OECD/IEA, Paris, 2019.
- International Energy Agency (IEA), The Future of Hydrogen Seizing today’s opportunities, for the G20, Japan, June 2019.
- International Energy Agency (IEA), Clean Energy Ministerial, and Electric Vehicles Initiative (EVI), Paris, 2021.

- IEA, Hydrogen production projects interactive map, Paris, 2024. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/hydrogen-production-projects-interactive-map
- IEA, World Energy Investment, Paris, 2024.
- IEA, Global Hydrogen Review, Paris, 2024.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of IPCC, Switzerland, 2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), Hydrogen from renewable power, Abu Dhabi, Emirates, 2018.
- IRENA, Hydrogen: A renewable energy perspective, Abu Dhabi, Emirates, 2019.
- IRENA, Reaching zero with renewables and its supporting briefs on industry and transport, Abu Dhabi, Emirates, 2020.
- IRENA, Green Hydrogen Supply A Guide To Policy Making, Abu Dhabi, Emirates, 2021.
- IRENA, Hydrogen Fuel Stations, Abu Dhabi, Emirates, 2024.
- IMO (International Maritime Organization), Third IMO GHG Study 2014, IMO, London, 2014.
- Murphy, A. et al., "Roadmap to decarbonising European aviation," European Federation for Transport and Environment, 2018.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacture (OICA), Paris, Preparing cars in the world, 2024.
- International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE), hydrogen Deployments, Canada, 2024.
- Robinius, M. et al., "Comparative analysis of infrastructures: Hydrogen fueling and electricity charging of vehicles", Energy and Environment, Vol. 408, Julich, Germany, 2018.

- Palmer, D, "Hydrogen in the Universe, NASA, USA, 13 September 1997.
- Schilo, C., Fuel Cell Application in a New Configured Aircraft, CELINA, European Commission, Brussels, Belgium, 2009.
- UMAS (University Maritime Advisory Services), Zero Emission Vessels: Transition Pathways, Lloyd's Register, London, 2018.
- World Economic Forum, Hydrogen in Numbers, Switzerland, 2024.
- Www.Energy.Gov.Eg, Hydrogen Properties, 2018.

Hydrogen Energy and Its Impact on Transport: A Geographical Study

Abstract

Hydrogen is an energy carrier, its role is like that of electricity, and developed countries top the list of countries producing and consuming hydrogen, so we find that China is the main producer of it by 30.5% in 2024, and is also the largest consumer of it globally, with consumption reaching 29% of global demand, followed by the United States of America.

The number of hydrogen-powered vehicles in the world reached 142.8 thousand vehicles in 2024, and the annual growth rate in their number reached 19.5% annually during the period from 2018-2024, with the United States of America leading the world with more than a third (36.8%) of its number, followed by South Korea with nearly a quarter (24.2%), China nearly a fifth (19%), and Japan a tenth (9.8%).

The number of gas stations reached 1231 stations in 2024, with a growth rate of 17.6% annually during the period from 2018 - 2024, with China accounting for a third (31.7%) of its number, followed by South Korea and Japan with 23.2% and 13.2% respectively.

Hydrogen fuel vehicles are vehicles that do not contain exhaust emissions, thus reducing air pollution, so future expectations on increasing demand for hydrogen in transportation are very large, and any means of transportation can be powered using hydrogen, either directly using fuel cells or by hydrogen-based fuels in internal combustion engines.

Keywords: Hydrogen Energy, Geography Transport, Hydrogen fuel cells, Hydrogen Vehicles.