منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول
أوابك

النفط والتعاون العربي

المجلد الحادي والخمسون 2024 - العدد 190

الابحاث

- نقل وتصدير الهيدروجين: الخيارات والتحديات

م. وائل حامد عبد المعطي

- تحويل زيوت المحركات المستهلكة إلى مشتقات نفطية مفيدة

أ.د. ياسر توفيق حورية

تقارير

- ندوة مسارات خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات البترولية التحويلية

د. ياسر محمد بغدادي

عرض كتاب

- معضلة أوبك ومستقبل النفط: بحث مسار صافي الانبعاثات الصفرية

المؤلف: رزاق وشاح

عرض : د. أحمد الكواز

النفط والتعاون العربي

مجلة فصلية محكمة تصدر عن الأمانة العامة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

الاشتراك السنوي : 4 أعداد (ويشمل أجور البريد)

البلـــدان العـربيـــة
للأفراد : 8 د. ك أو 25 دولاراً أمريكياً
للمؤسسات : 12 د.ك أو 45 دولاراً أمريكياً

البلدان الأخرى
للأفراد : 30 دولاراً أمريكياً
للمؤسسات : 50 دولاراً أمريكياً

الاشتراكات باسم : منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول

جميـع حقـوق الطبـع محفوظـة ويجوز الاقتبـاس مع ذكر اسم المجلة.

النفط والتعاون العربي

رئيس التحرير

م. جمال عيسى اللوغاني
الأمين العام لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

مدير التحرير

السيد/عبد الفتاح دندي
مدير الإدارة الإقتصادية والمشرف على إدارة الاعلام والمكتبة
منظمة أوابك

هيئة التحرير

م.عماد مكي
مدير إدارة الشؤون الفنية
منظمة أوابك

د. داوود باهزاد
مدير إدارة العلوم والتكنولوجيا
معهد الكويت للأبحاث العلمية

د. بلقاسم العباس
كبير المستشارين
المعهد العربي للتخطيط

قواعد النشر في المجلة

تعريف بالمجلة واهدافها

النفط والتعاون العربي مجلة فصلية محكمة تعنى بشؤون النفط والغاز والطاقة حيث تستقطب نخبة من المتخصصين العرب والأجانب لنشر أبحاثهم وتعزيز التعاون العلمي في المجالات التي تغطيها المجلة، كما تقوم على تشجيع الباحثين على إنجاز بحوثهم المبتكرة والإسهام في نشر المعرفة والثقافة البترولية وتلك المتعلقة بالطاقة وتعميمها والعمل على متابعة التطورات العلمية في مجال الصناعة البترولية.

الأبحاث

كافة الأبحاث التي تتعلق بالنفط والغاز والطاقة والتي تهدف إلى الحصول على إضافات جديدة في حقل الفكر الإقتصادي العربي.

مراجعة الأبحاث والكتب

تقوم المجلة بنشر المقالات التي تقدم مراجعة تحليلية لكتب أو دراسات تم نشرها حول صناعة النفط والغاز والطاقة عموماً، بحيث تكون هذه المقالات مرجعاً للباحثين حول أحدث وأهم الإصدارات المتعلقة بالصناعة البترولية.

التقارير

تتناول التقارير وقائع مؤتمر أو ندوة حضرها الكاتب، شريطة أن تكون مواضيعها ذات صلة بالنفط والغاز والطاقة، كما يشترط استئذان الجهة التي أوفدته للمؤتمر أو المؤسسات المشرفة عليه لكي تسمح له بنشرها في مجلتنا. وأن لا تزيد عدد صفحات التقرير عن 10 صفحات مع كافة الأشكال والخرائط والجداول إن وجدت.

شروط البحث

- نشر الأبحاث العلمية الأصيلة التي تلتزم بمنهجية البحث العلمي وخطواته المتعارف عليها دولياً ومكتوبة باللغة العربية.
- أن لا يتجاوز البحث العلمي المنشور على 40 صفحة، (متن البحث، الجداول والاشكال) بدون قائمة المراجع، ويرسل إلكترونيا كاملاً إلى المجلة على شكل word document.
- ترسل الأشكال، الخرائط والصور في ملف اضافي على شكل JPEG.
- استخدام خط Times New Roman في الكتابة وبحجم 12، وأن تكون المسافة بين الأسطر 1.5. وأن تكون تنسيق الهوامش الكلمات بطريقة Justified.
- أن يتم الإشارة الى مصادر المعلومات بطريقة علمية واضحة.

- عند اقتباس أي معلومات من أي مصدر (إذا كانت المعلومات رقميه أو رؤية معينة أو تحليل ما) يجب أن لا يتم الاقتباس الحرفي وإنما يتم أخذ أساس الفكرة وإعادة صياغتها بأسلوب الباحث نفسه، والإشارة إلى مصدر الإقتباس. أما في حالات الإقتباس الحرفي فتضع المادة المقتبسة بين علامتي الإقتباس (”...“).
- يفضل أن تذكر المدن ومراكز الأبحاث والشركات والجامعات الاجنبية الواردة في سياق البحث باللغة الانجليزية ولا تكتب باللغة العربية.
- إرفاق نسخة من السيرة العلمية للباحث مع البحث المرسل.
- تعبر جميع الأفكار المنشورة في المجلة عن آراء كاتبيها ولا تعبر بالضرورة عن وجهة نظر جهة الإصدار ويخضع ترتيب الأبحاث المنشورة وفقاً للاعتبارات الفنية.
- البحوث المرفوضة يبلغ أصحابها من دون ابداء الأسباب.

ترسل المقالات والمراجعات باسم رئيس التحرير، مجلة النفط والتعاون العربي، أوابك،
ص. ب: 20501 الصفاة- الرمز البريدي: 13066 دولة الكويت
الهاتف: 24959000 -00965 أو 24959779-00965
الفاكس: 24959755 - 00965
البريد الالكتروني oapec@oapecorg.org
موقع الأوابك على الانترنت www.oapecorg.org

المحتويات

الابحاث

نقل وتصدير الهيدروجين: الخيارات والتحديات
م. وائل حامد عبد المعطي ——— 7

تحويل زيوت المحركات المستهلكة إلى مشتقات نفطية مفيدة
أ.د. ياسر توفيق حورية ——— 107

التقارير

ندوة مسارات خفض الانبعاثات الكربونية
في الصناعات البترولية التحويلية
د. ياسر محمد بغدادي ——— 135

عرض كتاب

معضلة أوبك ومستقبل النفط:
بحث مسار صافي الانبعاثات الصفرية
المؤلف: رزاق وشاح ——— 187
عرض : د. أحمد الكواز

مجلة عربية تهتم بنشر المعرفة والثقافة البترولية وتلك المتعلقة بالطاقة وتعميمها والعمل على متابعة التطورات العلمية في مجال الصناعة البترولية

المقالات المنشورة في هذه المجلة تعكس آراء مؤلفيها ولا تعبر بالضرورة عن رأي منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول - أوابك

نقل وتصدير الهيدروجين: الخيارات والتحديات

م. وائل حامد عبد المعطي*

* خبير صناعات غازية - إدارة الشؤون الفنية ، أوابك - الكويت

الفصل الأول

المسارات المختلفة لنقل الهيدروجين

1-1: لمحة عامة عن الهيدروجين
2-1: مسارات نقل وتصدير الهيدروجين
3-1: مقارنة بين سمات المواد الحاملة للهيدروجين

1-1: لمحة عامة عن الهيدروجين

1-1-1: سلسلة القيمة لتصدير الهيدروجين

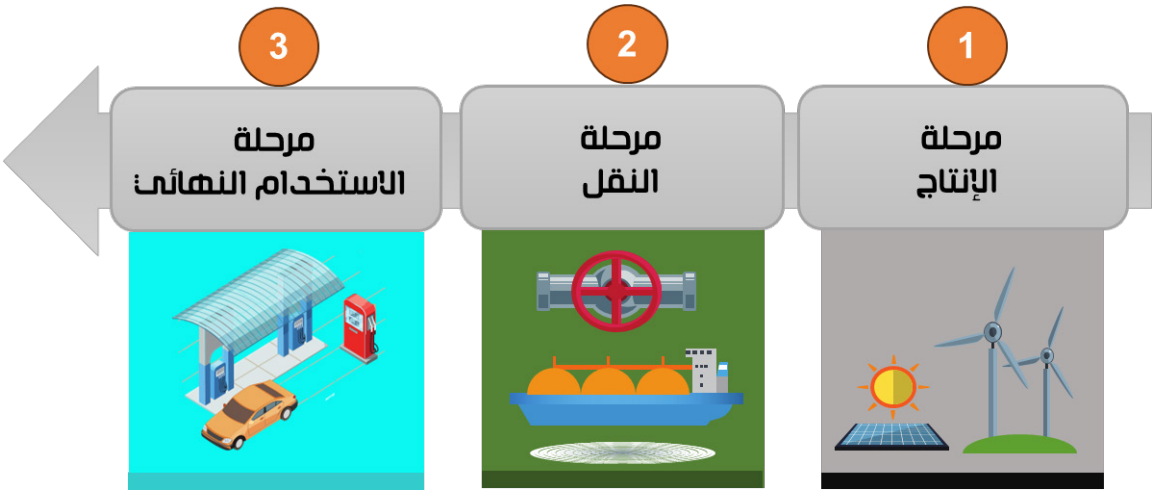
يعد الهيدروجين العنصر الأكثر وفرة في الكون، وهو يتواجد في معظم المركبات العضوية، كما أنه المكون الرئيسي للماء (إلى جانب الأكسجين) الذي يعتبر عصب الحياة. وقد شهدت السنوات الخمس الأخيرة اهتماماً متزايداً من عدة دول بالاستثمار في الهيدروجين، في ضوء السياسات الرامية نحو إيجاد بدائل للوقود الأحفوري تقلل أو تحد نهائياً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للحد من ظاهرة تغير المناخ.

ولكن لكي يتم اعتماد الهيدروجين كسلعة تجارية وتأسيس تجارة دولية على غرار تجارة النفط والغاز، فلا بد من تأسيس سلسلة قيمة متكاملة تتمتع بمرونة كافية لضمان وصوله إلى الأسواق التي سيستخدم فيها كوقود أو مادة خام (لقيم) لإنتاج منتجات أخرى. ويمكن تبسيط سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين إلى ثلاث مراحل رئيسية كما هو مبين بالشكل 1-1، والتي تبدأ بمرحلة الإنتاج. وحيث أن الهيدروجين لا يتواجد في الطبيعة كعنصر حر (إلا في حالات نادرة تم رصدها في بعض المناطق كتسربات من القشرة الأرضية)، فلا بد من إنتاجه من مواد أخرى مثل الغاز الطبيعي.

عالميا يوجد عدة طرق وتقنيات مستخدمة في إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي وأكثرها شيوعاً في الاستخدام طريقة إصلاح الميثان بالبخار (Steam Methane Reforming, SMR) وفيها يتم فصل الهيدروجين عن الميثان المكون الرئيسي للغاز الطبيعي، إلا أنها طريقة مضرة بالبيئة كونها تتسبب في إطلاق 11 كجم من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل واحد كجم يتم إنتاجه من الهيدروجين. ومن الطرق الأخرى المستخدمة في إنتاج

الهيدروجين عملية التحليل الكهربائي للماء لإنتاج ما يعرف عالمياً باسم الهيدروجين الأخضر. ولا ينتج عن هذه العملية أي انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون وذلك إذا ما استخدمت فيها الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة كطاقة الرياح والطاقة الشمسية.

الشكل 1-1: مراحل سلسلة القيمة لصناعة الهيدروجين



المصدر: من إعداد الباحث

وبانتهاء عملية إنتاج الهيدروجين وتخزينه في مواقع الإنتاج، تبدأ المرحلة الثانية وهي نقله وتصديره إلى الأسواق المستهدفة إذا كانت الكمية المنتجة كبيرة، وتعد مرحلة النقل بمثابة حلقة الوصل بين مواقع الإنتاج ومراكز الاستهلاك (الطلب)، وهي محور هذه الدراسة، تشكل تحدياً كبيراً من الناحية الاقتصادية لارتفاع تكلفة نقله لمسافات طويلة مقارنة بأنواع الوقود الأخرى. وتتم عملية نقل وتوزيع الهيدروجين عبر مسارات عدة، فقد يتم نقله إما باستخدام خطوط الأنابيب وهو في الحالة الغازية، أو بالناقلات بعد إسالته، أو تحويله إلى أمونيا ونقلها بالناقلات. أما في حالة نقل كميات صغيرة من موقع الإنتاج إلى منطقة أخرى قريبة، فيمكن استخدام مقطورات مخصصة لذلك.

أمـا المرحلـة الأخيـرة فهـي مرحلـة الاسـتهلاك أو الاسـتخدام النهـائي والتـي تضـم عـدداً مـن التطبيقـات التـي يمكـن اسـتخدام الهيـدروجين فيهـا كوقـود بشـكل مباشـر أو داخـل مـا يعـرف باسـم خلايـا الوقـود لتوليـد الكهربـاء كـالتي تسـتخدم فـي السـيارات الهيدروجينيـة أو اسـتخدامه كلقـيم لإنتـاج مـواد أخـرى مثـل الأمونيا أو الميثانول.

2-1-1: خواص الهيدروجين

تعـد دراسـة ومعرفـة خـواص الهيـدروجين الفيزيائيـة والكيميائيـة مـن النقـاط ذات الأهميـة فـي تحديـد إجـراءات الأمـن والسـلامة أثنـاء التعامـل معـه، وكـذلك لدراسـة الخيـارات الممكنـة لتخزينـه ونقلـه بكميـات كبيـرة تحقـق المرونـة اللازمة لضمان تشغيل منظومة الطاقة بفاعلية.

وتعـد كثافـة الطاقـة مـن أبـرز الخصـائص التـي يجـب معرفتهـا عنـد مقارنـة الخيـارات المختلفـة لنقـل الهيـدروجين. وتعـرف بأنهـا كميـة الطاقـة الكامنـة فـي الهيـدروجين لوحـدة الحجـم (بوحـدة الـ ميجـاجول لكـل متـر مكعـب أو ميجـاجول لكـل لتـر)، وتتغيـر بتغيـر ظـروف الضـغط والحـرارة التـي يُخـزن أو يُنقـل عنـدها الهيـدروجين. فكلمـا ارتفـع الضـغط، ارتفعـت قيمـة كثافـة الطاقـة ومـن ثـم يمكـن تخـزين ونقـل كميـات أكبـر مـن الهيـدروجين عبـر خطـوط الأنابيـب علـى سـبيل المثـال. كمـا ترتفـع قيمـة كثافـة الطاقـة كلمـا انخفضـت درجـة الحـرارة، ومـن ثـم يمكـن نقـل كميـات أكبـر مـن الهيـدروجين عبـر تبريـده إلـى درجـات حـرارة منخفضـة، حتـى يتحـول إلـى هيـدروجين مسـال وذلـك عنـد -253 درجـة مئويـة، ويـتم بعـد ذلـك نقـل الهيـدروجين المسـال عبـر النـاقلات، كمـا هـو الحـال مـع الغـاز الطبيعي المسال.

ويتسم الهيدروجين بتدني قيمة كثافة الطاقة له التي تعد الأقل مقارنة بباقي أنواع الوقود الأخرى، حيث تبلغ قيمة كثافة الطاقة وهو في حالته الغازية عند ضغط 1 بار نحو 0.01 ميجاجول/ لتر (10.05 ميجاجول/متر مكعب)، وهو ما يعادل نحو 30% من قيمة كثافة الطاقة للغاز الطبيعي (عند ضغط 1 بار) والتي تبلغ 0.03256 ميجاجول / لتر (32.56 ميجاجول / متر مكعب)، الجدول 1-1.

أما في حالة ضغط الهيدروجين عند 350 بار (ودرجة حرارة 15 درجة مئوية)، ترتفع قيمة كثافة الطاقة له بنحو 290 ضعف لتصل إلى 2.9 ميجاجول/ لتر. بينما إذا تم رفع الضغط إلى 700 بار (ودرجة حرارة 15 درجة مئوية)، سترتفع قيمة كثافة الطاقة بنحو 450 ضعف لتصل إلى 4.5 ميجاجول/ لتر.

الجدول 1-1: مقارنة كثافة الطاقة (**Energy Densiy**) للهيدروجين مع الغاز الطبيعي

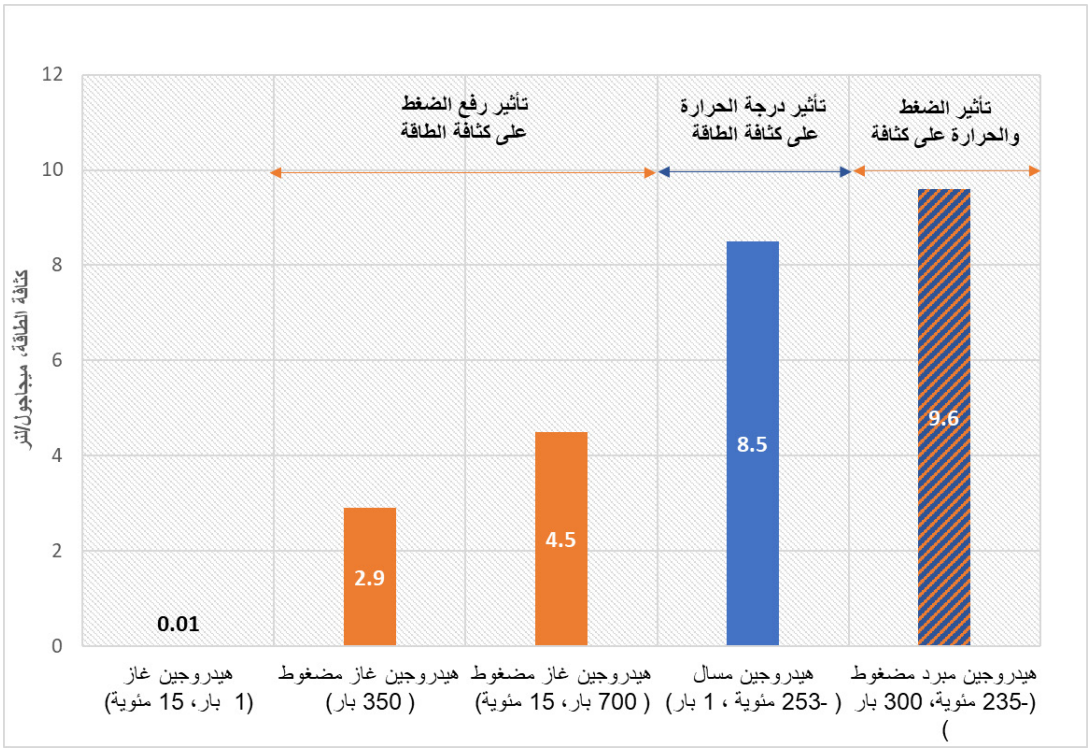
الوقود	الحالة	كثافة الطاقة، ميجاجول/لتر
الهيدروجين	الحالة الغازية، (ضغط 1 بار، 15 درجة مئوية)	0.0105
الغاز الطبيعي	الحالة الغازية، (ضغط 1 بار، 15 درجة مئوية)	0.03256
الهيدروجين المسال	الحالة السائلة، (ضغط عند 1 بار، -253 درجة مئوية)	8.5
الغاز الطبيعي المسال	الحالة السائلة، (ضغط عند 1 بار، -162 درجة مئوية)	20.92

مصر البيانات: إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA)

ولتغيير درجة الحرارة تأثير أكبر على كثافة الطاقة للهيدروجين، فبتبريد الهيدروجين إلى -253 درجة مئوية، سيتحول إلى الحالة السائلة، وترتفع قيمة كثافة الطاقة بمعدل 850 مرة لتصل إلى 8.5 ميجاجول/ لتر. وعلى سبيل المقارنة، فعند تبريد الغاز الطبيعي إلى -162 درجة مئوية، سيتحول إلى الحالة السائلة وترتفع قيمة كثافة الطاقة لتبلغ نحو 20.92 ميجاجول/لتر. وفي حالة تطبيق مزيج من العمليتين أي

ضغط الهيدروجين بعد تبريده إلى -253 درجة مئوية، فسترتفع قيمة كثافة الطاقة إلى 9.6 ميجاجول/لتر. كما يمكن الاستمرار بخفض درجة حرارة الهيدروجين إلى درجة تجمده (-259 درجة مئوية) والتي يصبح عندها عبارة عن مزيج من الحالة السائلة والحالة الصلبة أشبه بالجيلي (هيدروجين هلامي Slash Hydrogen)، وعندها تصل قيمة كثافة الطاقة إلى 9.8 ميجاجول/لتر. يبين الشكل 1-2، القيم المختلفة لكثافة الطاقة للهيدروجين عند ظروف مختلفة من الضغط ودرجة الحرارة.

الشكل 1-2: القيم المختلفة لكثافة الطاقة للهيدروجين عند ظروف مختلفة من الضغط (بار) ودرجة الحرارة (مئوية)



المصدر: من إعداد الباحث

ولا شك أن تطبيق العمليات سالفة الذكر سيتطلب تكاليف كبيرة، ففي حالة الضغط المرتفع، لابد من استخدام مواد أو سبائك (Alloys) بخصائص فريدة تتحمل الضغوط العالية. أما في حالة الهيدروجين المسال، فسيتطلب ذلك بناء ناقلات خاصة

بمواصفات عزل صارمة للحفاظ على درجة برودة الهيدروجين التي تصل إلى -253 درجة مئوية، علاوة على الطاقة المطلوبة في عملية الضغط أو التبريد.

ومن الخيارات الأخرى المستخدمة في رفع كثافة الطاقة للهيدروجين هي تحويله إلى مواد أخرى حاملة له (Hydrogen Carriers) مثل الأمونيا NH_3. وتعد طريقة Haber-Bosh الطريقة الأكثر انتشاراً في تحويل الهيدروجين إلى أمونيا، وفيها يتم تفاعل الهيدروجين مع النيتروجين في وجود عامل حفاز لإنتاج جزئ الأمونيا. والأمونيا تسمح بتخزين كميات كبيرة من الهيدروجين على مقياس الحجم، حيث يحتوي واحد متر مكعب من الأمونيا كمية من الهيدروجين تعادل نحو 1.7 مرة الكمية الموجودة داخل واحد متر مكعب من الهيدروجين المسال، علماً بأن واحد طن من الأمونيا يحتوي 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 -253 درجة مئوية في حالة تحويل الهيدروجين إلى هيدروجين مسال، وبالتالي تكون تكلفة نقل الأمونيا السائلة أقل من تكلفة الهيدروجين المسال، وأسهل في التداول.

وعلى النقيض من كون الهيدروجين الوقود الأدنى في كثافة الطاقة مقارنة بباقي أنواع الوقود الأحفوري، إلا أنه يعد الأعلى في محتوى الطاقة (كمية الطاقة لوحدة الكتلة) والتي تبلغ 119.93 ميجاجول/كجم، كونه الأخف في الوزن. ولذلك كان يعتمد عليه في برامج الفضاء التي نفذتها وكالة الفضاء الأميريكية "ناسا"، بسبب الحاجة إلى استخدام وقود مناسب يعطي طاقة الاحتراق المطلوبة بوزن أقل، لتخفيف الحمولة التي يحملها الصاروخ إلى أقل قدر ممكن. وعلى سبيل المقارنة، تبلغ قيمة محتوى الطاقة لغاز الميثان نحو 50.02 ميجاجول/كجم، بينما تصل في حالة الميثانول إلى 18.05 ميجاجول / كجم.

1-2: كيف يمكن نقل وتصدير الهيدروجين؟

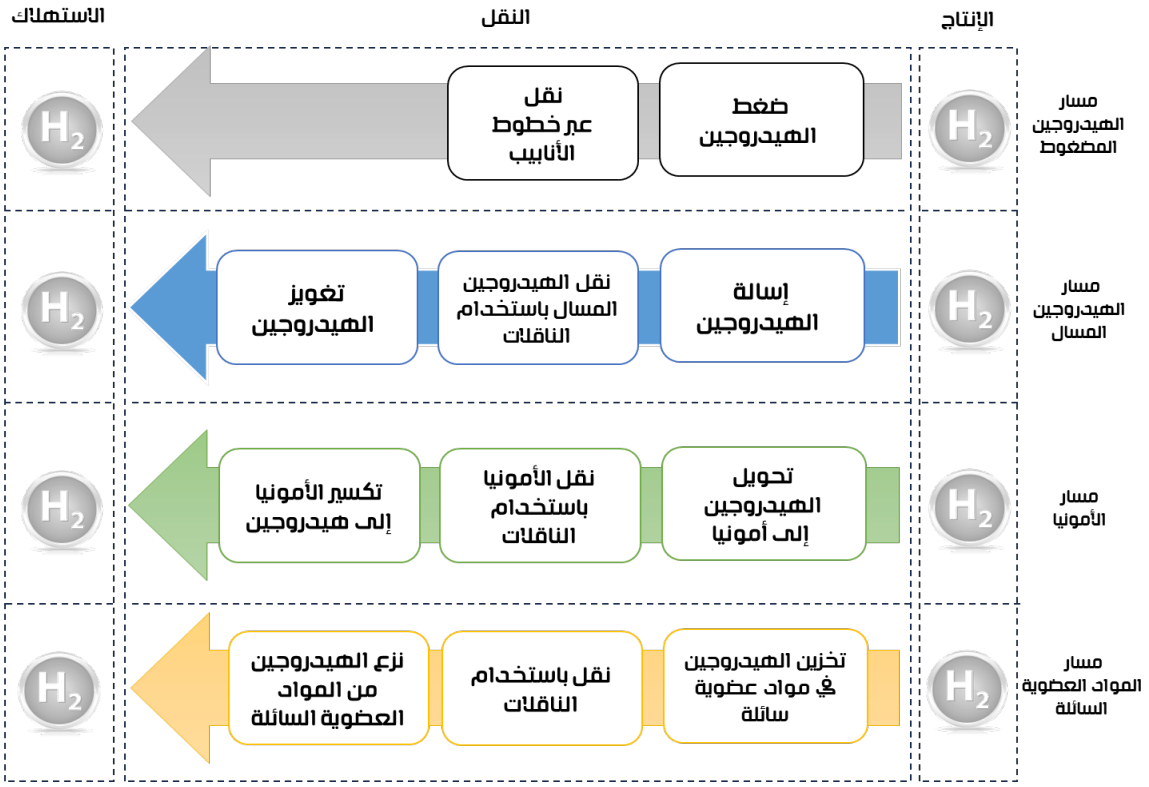
1-2-1: المسارات المختلفة لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية

يتطلب بناء سلسلة قيمة متكاملة للهيدروجين وجود حلول اقتصادية قابلة للتطبيق لنقل كميات كبيرة من الهيدروجين من مواقع الإنتاج وحتى مراكز الطلب أو الاستهلاك. وعلى هذا الأساس وبموجب الحلول التقنية المتاحة، يمكن تقسيم مسارات نقل وتصدير الهيدروجين في التجارة الدولية إلى أربعة مسارات وهي إما نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب بعد ضغطه (هيدروجين مضغوط) كما هو الحال في خطوط نقل الغاز الطبيعي، أو إسالته إلى هيدروجين مسال عند -253 درجة مئوية ونقله عبر الناقلات المخصصة لذلك حتى يصل إلى ميناء الاستقبال في السوق المستورد. كما يمكن تحويل الهيدروجين إلى أمونيا سائلة ونقله بالناقلات أيضاً إلى ميناء الاستقبال.

كما يمكن نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى مركبات عضوية سائلة (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHCs) ونقلها بالناقلات ثم نزع الهيدروجين منها في ميناء الاستقبال. ومن أمثلة تلك المواد مادة الميثيل سيكلو هكسان أو MCH.

وبخلاف نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب في حالته الغازية، تعد الطرق الثلاث الأخرى بمثابة مواد حاملة له، مما يتطلب إعادة تحويلها مجدداً إلى الهيدروجين في حالته الغازية ليكون جاهزاً للاستخدام، وهو الأمر الذي يستهلك طاقة إضافية ومن ثم تكاليف أعلى في التشغيل. يبين الشكل 1-1، المسارات المختلفة لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية.

الشكل 1-1: المسارات المختلفة لنقل الهيدروجين، بعد إنتاجه، في التجارة الدولية



1-2-2: نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب

تعد عملية نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب، الطريقة الأقل في التكاليف مقارنة بباقي المسارات الأخرى، وهي تقوم على استخدام ضواغط لرفع ضغط الهيدروجين ليسهل لنقله إلى مسافات أبعد. وبحسب بُعد مركز الطلب عن موقع الإنتاج، قد يتم إنشاء محطات إضافية لرفع الضغط على طول خط الأنابيب لضمان وصول الهيدروجين بضغط مرتفع ضمن الحدود الدنيا للتسليم في مركز الاستهلاك، وهي نفس الآلية المتبعة في نقل الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب.

ويفضل عند استخدام خطوط الأنابيب لنقل الهيدروجين، أن يتم تخزين الإنتاج في مواقع تخزين جيولوجية مثل كهوف الملح (Salt Caverns) أو مكامن نفط وغاز ناضبة (Depleted Oil & Gas Reservoirs) أو مكامن الماء (Aquifers) لتأمين كمية ملائمة لضمان سريان ضخ الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب إلى مراكز الطلب والتغلب على أي تذبذب في إنتاجه، خاصة إذا ما كان إنتاجه باستخدام مصادر الطاقة المتجددة.

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، حيث قامت عدة شركات من مشغلي خطوط أنابيب النفط والغاز باختبار جاهزية الشبكات لاستخدامها في نقل الهيدروجين سواء هيدروجين نقي (100% هيدروجين) أو خليط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي بنسب مختلفة (مثلا 20% هيدروجين مع 80% غاز طبيعي) وذلك لتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عند استخدام الخليط. وقد جاءت نتائج الدراسات التي أجرتها بعض الشركات المشغلة لشبكات الغاز إيجابية في حالة خلط الهيدروجين مع الغاز حتى نسبة 20%.

ومن أمثلة ذلك، الدراسة الفنية التي أعدتها هيئة شبكات الطاقة (Energy Network Association, ENA) التي تمثل مشغلي شبكة الغاز في بريطانيا، والتي أسفرت عن جاهزية استخدام شبكات نقل الغاز في بريطانيا لنقل خليط الهيدروجين حتى 20%، وأن ذلك سيوفر نحو 6-7% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استخدام الغاز الطبيعي في بريطانيا، وهو ما يعادل كمية قدرها 6 مليون طن/ السنة من ثاني أكسيد الكربون، التي تطلقها نحو 2.5 مليون سيارة[1].

وقد توصلت هيئة ENA البريطانية إلى هذه النتيجة بعد أن قامت بتنفيذ مشروع HyDeploy لتجربة استخدام خليط الهيدروجين مع الغاز بشكل عملي. وقد جرى تنفيذ مشروع HyDeploy على مرحلتين[2]، حيث شملت المرحلة الأولى تجارب ضخ خليط الهيدروجين مع الغاز في شبكة الغاز التابعة لجامعة Keele والتي تغذي نحو 100 منزل و30 مبنى تعليمي، لتحديد المستوى الآمن الذي يمكن ضخه من الهيدروجين في شبكة الغاز، دون الحاجة إلى إحداث أية تغييرات على الأجهزة المنزلية الحالية. وقد انتهت المرحلة الأولى بنجاح في مارس من عام 2021، واشتملت على جمع بيانات مهمة حول هذه التجربة. أما في المرحلة الثانية، والتي انطلقت في أغسطس من نفس العام (2021)، فقد تم اختبار ضخ الهيدروجين في شبكة عامة في منطقة Winlaton في بريطانيا، لمدة 12 شهر حتى انتهت رسمياً فترة التجربة في صيف 2022.

وبحسب بيان هيئة ENA [3]، فإن شبكة الغاز البريطانية مؤهلة للعمل بالخليط الجديد (20% هيدروجين و80%غاز طبيعي) بداية من عام 2023، دون أن يتطلب ذلك أية تعديلات في أنظمة التسخين أو التدفئة أو أجهزة الطهي المنزلية، كما يمكن لمحطات الكهرباء الغازية المتصلة بشبكة الكهرباء العمل بأمان بنفس الخليط دون الحاجة إلى تغيير التوربينات، الأمر الذي سيساهم في تحقيق جهود المملكة المتحدة لنزع الكربون من البنية التحتية القائمة.

أما في حالة زيادة نسبة الهيدروجين في الخليط مع الغاز عن 20%، فسيتطلب ذلك تغيير أجهزة التسخين الحالية حتى يمكنها التعامل مع نسب أعلى من الهيدروجين، وبالتالي فإن الحد الأقصى لخلط الهيدروجين مع الغاز في شبكة الغاز البريطانية هو 20%. ومن المتوقع أن تتخذ الحكومة البريطانية قراراً بخصوص اعتماد العمل بالخليط الجديد قبل نهاية عام 2023.

وللحكم على مدى جاهزية الشبكات القائمة لنقل الهيدروجين النقي مع الغاز، فلا بد من دراسة عدة عوامل (الشكل 1-3) ومراجعتها مع المواصفات القياسية الحالية الخاصة بخطوط نقل الهيدروجين، **وهي نوع المادة المستخدمة في بناء خط الأنابيب وخصائصها بالنظر إلى صلابة المعدن، ومقاومة التقصف الهيدروجيني (Hydrogen Embrittlement) وهي العملية التي تجعل المعدن مادة سهلة الكسر بسبب تخلل ذرات الهيدروجين داخل الصلب الكربوني (Carbon Steel)**، وهي المادة الرئيسية المستخدمة في تصنيع خطوط الأنابيب.

كما تتضمن الجوانب الواجب مراجعتها لتقييم جاهزية خط الأنابيب: أقصى ضغط تشغيل مسموح به (Max Allowable Working Pressure, MAWP)، ومواصفات الخط (القطر) لتحديد سعة النقل (Transport Capacity) التي سينقلها الخط عند إعادة استخدامه للهيدروجين، **وحالة الخط الداخلية ومدى تأثرها بالتآكل (حالة التآكل الداخلي)**، وعمر الخط، علاوة على إجراءات الأمن والسلامة المرتبطة بطبيعة المنتج الذي يتم نقله عبر الخط (سائل أم غاز) وكذلك المواقع ذات الكثافة السكانية التي يمر بها خط الأنابيب.

وتختص المواصفات القياسية رقم ASME 31.1، بوضع كافة المتطلبات والاشتراطات الخاصة بالخطوط المستخدمة في نقل الهيدروجين سواء في حالته الغازية أو مسالاً، ويتضمن ذلك المتطلبات العامة من المواد واللحامات، والمعالجة الحرارية، والتشكيل، والاختبار، والفحص، والصيانة، وهي نفس المواصفات التي يمكن مطابقتها عند تقييم جاهزية خطوط النفط والغاز القائمة لنقل الهيدروجين النقي أو خليطه مع الغاز.

الشكل 1-3: العوامل التي يجب مراجعتها لتقييم جاهزية خطوط أنابيب النفط والغاز القائمة لنقل الهيدروجين النقي أو خليطه مع الغاز

نوع مادة الإنشاء	تقييم خصائص مادة الإنشاء من حيث صلابة المعدن، ومقاومة التقصف الهيدروجيني
حالة الخط الداخلية	تقييم حالة الخط الداخلية ومتى تأثرها بالتآكل نتيجة ظروف التشغيل
سعة النقل	ستتحدد سعة النقل من خلال معرفة أقصى خط تشغيل مسموح به، وقطر الخط
عمر خط الأنابيب	وذلك للخطوط المتقادمة لتقييم حالة الإجهاد التي مر بها المعدن المستخدم في بناء الخط
مخاطر الأمن والسلامة	تقييم مخاطر الأمن والسلامة حسب طبيعة المنتج الحالي الذي يتم نقله عبر الخط (سائل أم غاز)، والمواقع ذات الكثافة السكانية التي يمر بها خط الأنابيب

المصدر: من إعداد الباحث

ومن أبرز الدراسات التي تناولت تقييم خطوط النفط والغاز القائمة لنقل الهيدروجين النقي (100% هيدروجين)، دراسة Re-Stream [4] التي أعدها ائتلاف عالمي مكون من شركة Carbon Limits وشركة DNV بغرض تقييم جاهزية شبكات نقل النفط والغاز في أوروبا، بمشاركة 67 شركة من مشغلي هذه الشبكات. وقد غطت الدراسة أكثر من 58,000 كم من خطوط أنابيب النفط والغاز في أوروبا (الشكل 1-4)، وتمثل نحو 50% و30% من إجمالي أطوال خطوط النفط والغاز البحرية والبرية في أوروبا على التوالي.

وقد جاءت نتائج هذه الدراسة، بعد الأخذ في الاعتبار المعايير المشار إليها، كالآتي:

- نحو 70% من إجمالي خطوط النفط والغاز البرية يمكن إعادة استخدامها لنقل الهيدروجين النقي (تحتاج النسبة المتبقية إلى مزيد من المراجعة والفحوصات لوضع تقييم نهائي).
- يمكن نقل الهيدروجين في غالبية خطوط النفط والغاز البحرية.
- العائق الفني الرئيسي أمام استخدام خطوط النفط والغاز القائمة لنقل الهيدروجين النقي هو التداعيات المحتملة التي قد يتسبب بها وأبرزها التقصف الهيدروجيني للصلب الكربوني المستخدم في تصنيع خطوط الأنابيب.

الشكل 1-4: خريطة أنابيب النفط والغاز في أوروبا التي تم تقييم قدرتها على نقل الهيدروجين النقي

المصدر: DNV and Carbon Limits

ولا شك أن استخدام خطوط أنابيب الغاز القائمة، بعد إعادة تأهيلها، سيوفر جانب كبير من التكاليف الرأسمالية المطلوبة لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية، حيث يبلغ مجموع أطوال شبكات تصدير ونقل الغاز الطبيعي أكثر من 1.4 مليون كيلومتر. لكن في حالة بناء خطوط جديدة ستكون التكاليف الرأسمالية مرتفعة، علاوة على أن تنفيذها سيستغرق فترات طويلة قد تمتد لعشرات السنين حتى يتم الوصول إلى تأسيس شبكة ضخمة لنقل الهيدروجين من مناطق الإنتاج وحتى مراكز الطلب.

وبالرغم من تلك المزايا التي توفرها خطوط الأنابيب القائمة، فقد لا يتمكن بعض القطاعات غير المتصلة بالشبكة القائمة من الحصول على الهيدروجين، ومن ثم ستكون هناك ضرورة لبناء شبكات جديدة لتوزيع وتوصيل الهيدروجين إلى مختلف المستهلكين، وهو ما سيتطلب استثمارات رأسمالية إضافية. يلخص الجدول 1-2، أبرز مزايا وعيوب نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب.

الجدول 1-2: مزايا وعيوب نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب

المزايا	العيوب
ستتطلب تكاليف رأسمالية أقل في حالة إعادة استغلال خطوط الغاز القائمة سواء لنقل خليط الهيدروجين مع الغاز أو الهيدروجين النقي	التكاليف الرأسمالية المرتفعة في حال بناء خطوط جديدة لنقل الهيدروجين
تكاليف تشغيل أقل مقارنة بباقي البدائل الأخرى لنقل الهيدرجين	سيستغرق بناء خطوط فترات طويلة قد تصل إلى أكثر من 10 سنوات
يمكن استخدام خط الأنابيب نفسه كوعاء تخزين للهيدروجين لضمان استقرار إمدادات الهيدروجين في حال تذبذب الإنتاج	بسبب المسار المحدود لخطوط الأنابيب، لا بد بناء شبكات توزيه لتوصيل الهيدروجين إلى المستهلكين غير المتصلين بالخط الرئيسي، وهو ما يعني ضخ استثمارات إضافية
لها سجل جيد في التشغيل في أوروبا والولايات المتحدة، ويصل طولها الإجمالي إلى عدة آلاف من الكيلومترات	قد تقيد مخاطر الأمن والسلامة التي يتسبب بها تسرب الهيدروجين من مروره عبر المناطق ذات الكثافة السكانية

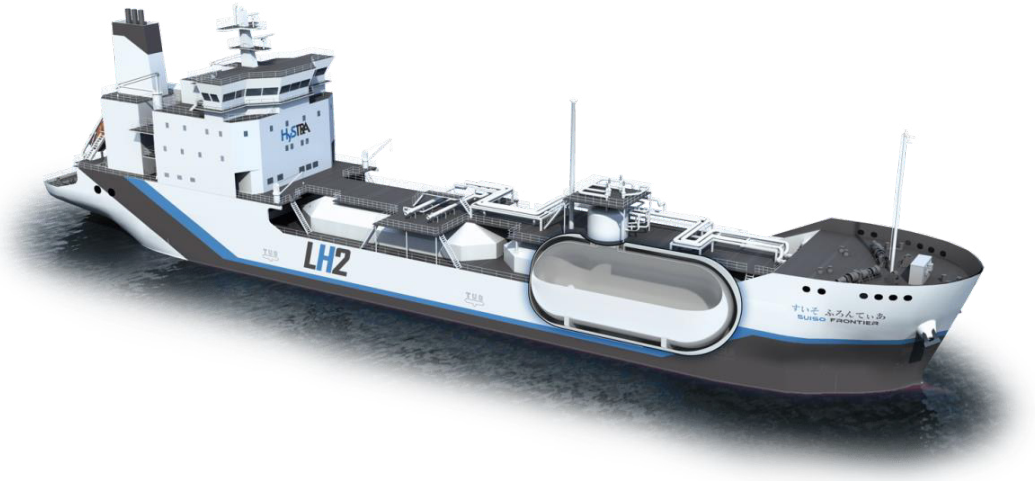
1-2-3: نقل الهيدروجين المسال عبر الناقلات

تهدف عملية إسالة الهيدروجين إلى تخفيض حجم الهيدروجين إلى أقل قدر ممكن عبر رفع كثافة التخزين الحجمية له (Volumetric Energy Density)، للحصول على أكبر كمية ممكنة لنقلها عبر الناقلات، إلا أن ذلك سيتطلب التبريد حتى -253 درجة مئوية للحصول عليه في الحالة السائلة. وبانتهاء عملية الإسالة، يتم تخزين الهيدروجين المسال في صهاريج مزدوجة الجدار معزولة جيداً لضمان عدم انتقال الحرارة إلى داخل الصهريج حتى لا ترتفع درجة حرارته ومن ثم يتبخر إلى هيدروجين غاز وهو ما يعرف باسم الغاز المتبخر (Boil-off Gas). ومن ثم تبدأ المرحلة التالية عبر نقل الهيدروجين المسال إلى الأسواق البعيدة باستخدام ناقلات مخصصة لذلك حتى تصل إلى ميناء الاستقبال في البلد المستورد، وبداخله يتم إعادة تبخير الهيدروجين المسال للحصول على الهيدروجين في حالته الغازية وضخه في الشبكة المحلية للوصول إلى المستهلكين. وتتشابه سلسلة القيمة للهيدروجين المسال مع سلسلة القيمة الخاصة بالغاز الطبيعي المسال، إلا أنها تتطلب شروطاً أعقد منها في التشغيل، وذلك بسبب درجات الحرارة المنخفضة المطلوبة للحفاظ على الهيدروجين في الحالة السائلة وذلك عند -253 درجة مئوية.

عالمياً، يتكون الأسطول العالمي من ناقلة واحدة للهيدروجين المسال هي الناقلة Suiso Frontier قامت بتصنيعها الشركة اليابانية لبناء السفن (Kawasaky Heavy Industries, KHI). وقد نقلت Suiso Frontier أول حمولة من الهيدرجين المسال من أستراليا لتصديرها إلى اليابان في فبراير 2022، لتسجل بذاك الخطوة الأولى من نوعها لتصدير الهيدروجين المسال عبر مسافات بعيدة[5]. والناقلة تضم صهريج واحد بحمولة 1250 متر

مكعب من الهيدروجين المسال[6]، ويبلغ طولها حوالي 116 متر، وعرض (اتساع) 19 متر، الشكل 1-5.

الشكل 1-5: الناقلة Suiso Frontier، أول ناقلة للهيدروجين المسال في السوق العالمي



المصدر: Kawasaky Heavy Industries, KHI

وتعد الناقلة Suiso Frontier اليابانية جزء من مشروع أسترالي ياباني مشترك يهدف إلى اختبار إنشاء سلسلة توريد لطاقة الهيدروجين، يعرف باسم (Hydrogen Energy Supply Chain, HESC). وهو مشروع متكامل يشمل استخراج الهيدروجين في أستراليا وإسالته ونقله إلى اليابان، ويقوم على تطويره ائتلاف ضخم يضم عدة شركات يابانية وأسترالية باستثمارات 355 مليون دولار. من جانبها، أكدت الشركة اليابانية أنها تعمل على تجميع البيانات أثناء عملية النقل والشحن والتفريغ لدراستها والاستفادة منها لضمان تحقيق نتيجة ناجحة للمشروع، كما تخطط الشركة لبناء أسطول من هذا النوع لبناء سلسلة توريد عالمية للهيدروجين[7].

وبالرغم من الإمكانية التقنية لإنتاج ونقل الهيدروجين المسال عبر الناقلات، إلا أنه يعد خياراً مكلفاً للغاية، حيث تستهلك عملية الإسالة قدراً كبيراً من الطاقة سواء أثناء مرحلة التبريد المسبق للهيدروجين أو إسالته إلى -253 درجة مئوية. كما أنه في حالة تخزين أو نقل الهيدروجين المسال لفترات طويلة، سترتفع الفواقد نتيجة التبخر، الأمر الذي يشكل خسارة كبيرة، ويقلل من مرونة التشغيل. يلخص الجدول 1-3، مزايا وعيوب نقل الهيدروجين المسال عبر الناقلات

الجدول 1-3: مزايا وعيوب نقل الهيدروجين المسال عبر الناقلات

المزايا	العيوب
تقنية الإسالة مستخدمة بشكل جيد، ولكن للمحطات ذات الطاقة التصميمية الصغيرة	تستهلك عملية الإسالة قدراً كبيراً من الطاقة سواء أثناء مرحلة التبريد المسبق للهيدروجين أو الإسالة
يعتبر الهيدروجين المنتج باستخدام هذه التقنية، عالي النقاوة	تعتبر عملية تخزين ونقل الهيدروجين عملية معقدة وتتطلب تسهيلات خاصة غير متوفرة حالياً
عملية إعادة تحويل الهيدروجين المسال إلى الحالة الغازية ليست معقدة، ولا تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة	في حالة تخزين أو نقل الهيدروجين المسال لفترات طويلة، سترتفع الفواقد نتيجة التبخر، الأمر الذي يشكل خسارة كبيرة، ويقلل من مرونة التشغيل
توجد عدة تطبيقات تعتمد على الهيدروجين المسال بشكل مباشر مثل قطاع الفضاء (وكالة ناسا)، ومحطات إعادة التحميل	تتطلب استثمارات باهظة على طول سلسلة القيمة مقارنة ببدائل نقل الهيدروجين الأخرى

المصدر: من إعداد الباحث

أما في حالة النقل إلى مناطق قريبة أو الحاجة إلى نقل كميات صغيرة إلى متوسطة من الهيدروجين، فيمكن استخدام المقطورات، وهي الطريقة الرئيسية المستخدمة حالياً على نطاق تجاري في نقل الهيدروجين إلى مناطق استهلاكه بسبب القرب بين مناطق الإنتاج والاستهلاك، منها ما يقوم بنقل الهيدروجين المضغوط (حتى 250-500 بار)، ومنها ما يقوم بنقل الهيدروجين المسال[8].

ويمكن للمقطورات نقل الهيدروجين المسال لمسافات تصل إلى 4,000 كيلومتر كحد أقصى لتلافي تبخر كميات كبيرة منه أثناء الرحلة، وعادة ما يتم تفريغ بخار الهيدروجين الذي تكون أثناء الرحلة عند الوصول إلى وجهة التسليم. وتستطيع مقطورة ذات حجم 45 متر مكعب، حمل ما يعادل نحو 3100 كجم من الهيدروجين المسال لارتفاع كثافته مقارنة بغاز الهيدروجين المضغوط، حيث تصل إلى 70.8 كجم/متر مكعب. لكنها في نفس الوقت ستتطلب صهاريج خاصة معزولة جيداً لضمان الحفاظ على برودة الهيدروجين.

عالمياً، تتوافر مقطورات الهيدروجين المسال بحمولات تتراوح بين 12000-17000 جالون أي ما يعادل نحو 45-65 متر مكعب من الهيدروجين المسال[9]، وهي تضم صهاريج ذات تصميم مماثل للصهاريج المستخدمة في تخزين الهيدروجين المسال في محطات الإنتاج الصغيرة وكذلك في مراكز الاستهلاك، الشكل 1-6.

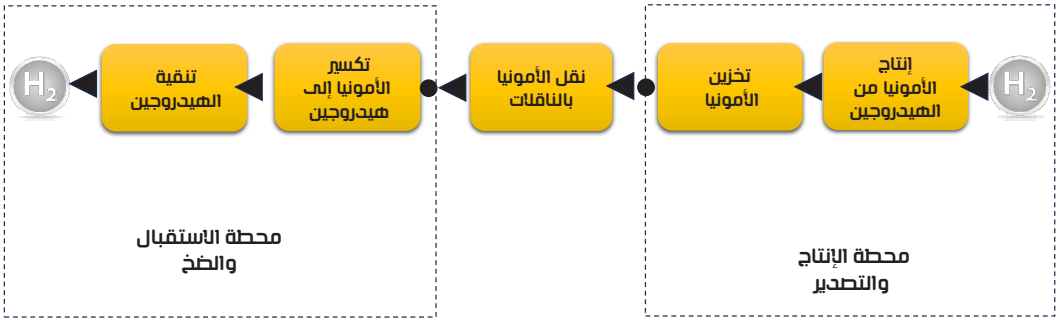
الشكل 1-6: مقطورة لنقل الهيدروجين المسال أثناء تفريغ حمولتها في أحد المواقع التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية

المصدر: Airproducts

1-2-4: تحويل الهيدروجين إلى الأمونيا

الأمونيا هي مادة كيميائية يتم تصنيعها من الهيدروجين، وتستخدم بشكل رئيسي في إنتاج الأسمدة الزراعية، لكن في نفس الوقت يمكن استخدامها كحامل للهيدروجين (وسط تخزيني له). ويتم ذلك من خلال تفاعل الهيدروجين، الذي يتم إنتاجه عبر التحليل الكهربائي للماء أو من الغاز الطبيعي، مع النيتروجين الذي يمكن الحصول عليه من الهواء الجوي ضمن تفاعل يعرف باسم Haber-Bosh والذي يؤدى إلى دمج الهيدروجين مع النيتروجين لتكوين جزئ الأمونيا (NH3)، وبعد انتهاء عملية الإنتاج، يتم تخزينها في صهاريج مبردة، ومن ثم نقلها باستخدام الناقلات حتى يتم تفريغها في ميناء الاستقبال. وتنتهي السلسلة بإعادة تكسير الأمونيا في وجود عامل حفاز (Catalyst)، ولكنها عملية تحتاج إلى قدر كبير من الطاقة كون التفاعل ماص للحرارة (Endothermic Reaction). وبتكسير الأمونيا يتم الحصول على الهيدروجين الذي يخضع في مرحلة تالية إلى عملية تنقية (Purification Process)، بينما يتم تصريف النيتروجين في الهواء الجوي. يوضح الشكل 1-7، مخطط سير عمليات نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى أمونيا وتكسيرها مجدداً للحصول عليه في مركز الطلب.

الشكل 1-7: مخطط سير عمليات نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى أمونيا



المصدر: من إعداد الباحث

عالمياً، تعتبر عملية تصنيع الأمونيا صناعة راسخة وقائمة في عدة مناطق، ولديها بنية تحتية قائمة من موانئ معدة لشحن وتفريغ الأمونيا، وناقلات مؤهلة لنقلها. كما أنها سلعة عالمية يتم تداولها بمواصفات واشتراطات قياسية، وهو ما سيسهل من تطبيقها كخيار لنقل الهيدروجين. لكن في نفس الوقت، تعد الأمونيا مادة سامة تتسبب في أضرار صحية خطيرة في حالة تسربها. كما أنها تسبب تلوث الهواء والتربة والبيئة البحرية وهو أمر بالغ الأهمية حيث قد يحد ذلك من نقلها وتداولها في المناطق السكانية. علاوة على ذلك، تستهلك عملية تحويل الهيدروجين إلى أمونيا وتكسيرها قدراً كبيراً من الطاقة تعادل 7-18% من طاقة الهيدروجين الذي يتم نقله، وهو ما يعد طاقة مهدرة تزيد من التكلفة النهائية للهيدروجين كسلعة عالمية. يلخص الجدول 1-4 أبرز مزايا وعيوب نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى أمونيا.

الجدول 1-4: مزايا وعيوب نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى أمونيا

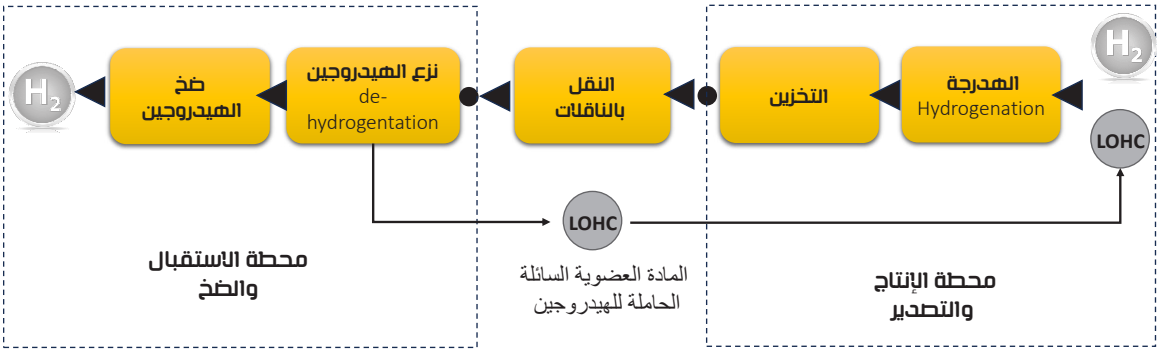
المزايا	العيوب
تعد عملية تصنيع الأمونيا صناعة راسخة وقائمة ولها سجل جيد في عدة مناطق	الأمونيا مادة سامة، كما أنها قد تتسبب في حالة تسربها في تلوث الهواء
البنية التحتية لتجارة الأمونيا متوفرة، ويشمل ذلك ناقلات الأمونيا، وموانئ التحميل والتفريغ، مما تتطلب تكليف رأسمالية أقل، علاوة على توافر المواصفات القياسية لنقل وتداول الأمونيا	في حالة تسرب الأمونيا أثناء النقل والتداول، ستسبب أضرارا خطيرة على الصحة العامة، والتربة، والمسطحات المائية، وبالتالي قد يحد ذلك من تطبيقاتها في المناطق السكنية
الأمونيا هي الأعلى في كثافة التخزين الحجمية وكثافة الطاقة مقارنة بباقي البدائل الأخرى لنقل الهيدروجين	لا تنتج هذه العملية هيدروجين ذو نقاوة عالية، مما يستلزم تنقيته قبل استخدامه
توجد عدة تطبيقات تعتمد على الأمونيا مثل الأسمدة الزراعية	تستهلك عملية تحويل الهيدروجين إلى أمونيا وتكسيرها قدرا كبيراً من الطاقة تعادل 7-18% من طاقة الهيدروجين المنتج

1-2-5: تحويل الهيدروجين إلى مواد عضوية سائلة حاملة له

بخلاف الطرق المعروفة سالفة الذكر، تعد المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOCHs) من الطرق التي يمكن استخدمها لنقل الهيدروجين وهي مركبات كيميائية يتم هدرجتها (Hydrogenation) من خلال عملية كيميائية تؤدي إلى ربط الهيدروجين مع المادة الكيميائية ثم تخزينها كمادة سائلة عند الضغط الجوي، في ظروف مماثلة لنقل وتخزين المنتجات البترولية السائلة. ثم يتم نقل المادة العضوية السائلة بالناقلات إلى ميناء الاستقبال في السوق المستورد، وبداخله تتم عملية نزع الهيدروجين منها (Dehydrogenation) عبر التسخين لتتحرر جزيئات الهيدروجين ومن ثم استخدامه. كما يمكن إعادة استخدام المادة العضوية السائلة المنزوع منها الهيدروجين مرة أخرى إلى ميناء التصدير لاستخدامها مجدداً في حمل الهيدروجين توفيراً للتكاليف.

تجارياً، يوجد العديد من المواد العضوية السائلة وبعضها يتم إنتاجه كمنتجات ثانوية في صناعة التكرير مثل التولوين (Toluene) الذي يتحول بعد هدرجته إلى الميثيل سيكلو هكسان (MCH). ولعل الميزة الأبرز للميثيل سيكلو هكسان مقارنة بباقي المواد العضوية السائلة الأخرى هو ارتفاع درجة غليانه التي تبلغ 101 درجة مئوية، ومن ثم يمكن تخزينه ونقله بكميات كبيرة دون الحاجة إلى إجراء عمليات إسالة أو ضغط تتطلب وجود تقنيات خاصة، كما هو الحال مع المنتجات البترولية السائلة. كما يمكن إعادة استخدام المادة العضوية السائلة مرة بنقلها إلى محطة الإنتاج بعد فصل الهيدروجين عنها، لهدرجتها مرة أخرى ضمن حلقة مغلقة (Closed Loop). يوضح الشكل 1-8، مخطط نقل الهيدروجين باستخدام المواد العضوية السائلة.

الشكل 1-8: مخطط سير عمليات نقل الهيدروجين باستخدام المواد العضوية السائلة الحاملة له (LOHC)



المصدر: من إعداد الباحث

لكن في المقابل، فإن الميثيل سيكلو هكسان هو الأقل في كثافة التخزين الحجمية وكثافة الطاقة مقارنة بباقي البدائل الأخرى لنقل الهيدروجين. ومن ثم فإنه سينقل كميات أقل من الهيدروجين لوحدة الحجم، حيث يحتوي واحد متر مكعب من الميثيل سيكلو هكسان على 47.1 كيلوجرام من الهيدروجين، مقارنة بنحو 120 كجم لواحد متر مكعب من الأمونيا على سبيل المثال. ومن ثم، سيتطلب نقل كميات كبيرة من الهيدروجين باستخدام الميثيل سيكلو هكسان بناء سلسلة قيمة ذات سعة تصميمية ضخمة بداية من إنتاجه مروراً بمرحلة نقله حتى الوصول إلى ميناء الاستقبال، وهو الذي سيتحول بالنهاية إلى تكاليف رأسمالية أكبر.

إلى جانب ما سبق، تتم عملية هدرجة المواد العضوية السائلة عند درجات حرارة عالية، والتي تستهلك قدراً كبيراً من الطاقة، من ثم تكاليف تشغيل عالية. علاوة على أنه إلى اليوم لم يتم بناء سلسلة قيمة كبيرة الحجم للمواد العضوية السائلة، للحكم على جدواها الفنية والاقتصادية بشكل تجاري. يضاف إلى ذلك، التكاليف الإضافية الناتجة عن إعادة نقل المادة العضوية السائلة إلى محطة الإنتاج لإعادة استخدامها في عملية الهدرجة.

يلخص الجدول 1-5، أبرز مزايا وعيوب المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين.

الجدول 1-5: مزايا وعيوب المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين

المزايا	العيوب
إمكانية التخزين والنقل بكميات كبيرة دون الحاجة إلى إجراء عمليات إسالة أو ضغط تتطلب وجود تقنيات خاصة	تتطلب استثمارات باهظة على طول سلسلة القيمة مقارنة ببدائل نقل الهيدروجين الأخرى
البنية التحتية لنقل بعض المواد العضوية السائلة الحامة للهيدروجين قائمة، ويشمل ذلك الناقلات، وموانئ التحميل والتفريغ، مما تتطلب تكليف رأسمالية أقل في حال استخدامها	التكاليف الإضافية الناتجة عن إعادة نقل المادة العضوية السائلة إلى محطة الإنتاج لإعادة استخدامها في عملية الهدرجة
إمكانية التخزين لفترات طويلة دون حدوث فواقد ناتجة عن تبخر المخزون في الصهاريج بسبب ارتفاع درجة غليانها التي تصل إلى 100 درجة مئوية في حالة الميثيل سيكلو هكسان	لم تشهد الصناعة بناء سلسلة قيمة كبيرة الحجم للمواد العضوية السائلة للحكم على جدواها الفنية والاقتصادية في الناحية العملية.
إمكانية التكامل بشكل أفضل مع محطات إنتاج الهيدروجين الأخضر ذات الإنتاج الغير المنتظم الناتج عن الطبيعة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة	تكاليف التشغيل المرتفعة بسبب متطلبات الطاقة في عملية الهدرجة

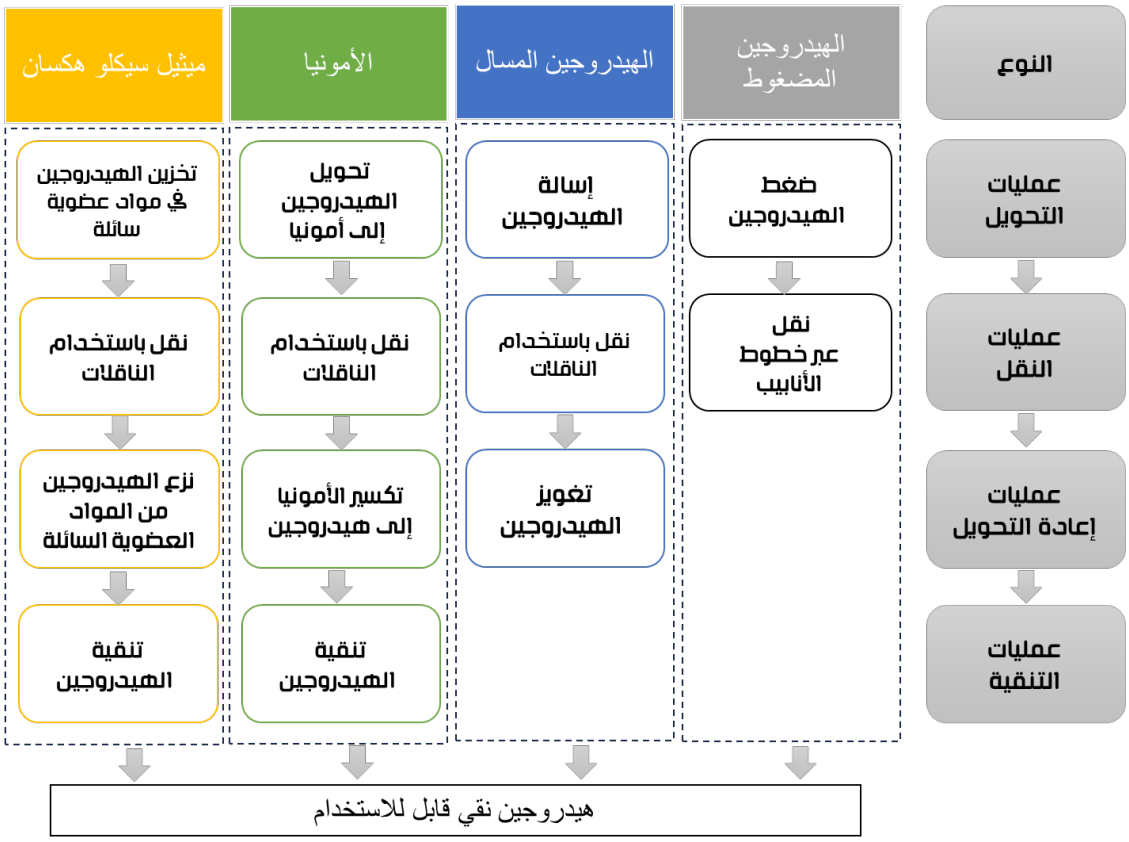
1-3: مقارنة بين سمات المواد الحاملة للهيدروجين

لا شك أن لكل طريقة من طرق نقل الهيدروجين مزايا خاصة وعيوب أيضاً قد تحد من التوسع في استخدامها، وذلك استناداً إلى كثافة التخزين، وكثافة الطاقة، وعدد العمليات المطلوبة التي تستهلك بدورها قدراً من الطاقة، ومن ثم تؤثر على كفاءة سلسلة توريد الهيدروجين إلى السوق المستورد. وبشكل عام فإن عدد العمليات يكون أقل في حالة نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب لعدم وجود عمليات إعادة تحويل (Reconversion) عند وصوله إلى السوق المستورد، حيث يتم ضخ الهيدروجين بضغط عال في الشبكة المحلية حسب المواصفات القياسية المتبعة، للوصول إلى القطاعات أو التطبيقات المستهلكة له.

أما في المسارات الأخرى الحاملة للهيدروجين، فيكون عدد العمليات أكبر في سلسلة التوريد بسبب وجود عمليات لتحويل الهيدروجين من صورة إلى صورة أخرى، ثم إعادة التحويل مجدداً في السوق المستورد، وقد تضم السلسلة في بعض الحالات عمليات تنقية، للحصول على الهيدروجين النقي القابل للاستخدام. وجميع تلك العمليات تحتاج إلى طاقة، وقد يصاحبها فقد نتيجة التبخر (Boiloff gas, BOG) أثناء عمليات التخزين والتداول، الشكل 1-9.

ففي حالة الهيدروجين المسال، تتم عملية التحويل عبر إسالته في منشأة التصدير، ثم إعادة التحويل بعد تبخيره في ميناء الاستقبال إلى هيدروجين في الحالة الغازية. كذلك في حالة الأمونيا والمواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين، يتم التحويل إلى أمونيا أو ميثيل سيكلو هكسان، ثم إعادة التحويل إلى هيدروجين في الحالة الغازية، يعقبها عملية تنقية للتخلص من الشوائب الموجودة مع الهيدروجين، بغية الحصول على منتج نقي مطابق للمواصفات.

الشكل 1-9: عمليات التحويل وإعادة التحويل على طول سلسلة التوريد الخاصة بالهيدروجين



المصدر: من إعداد الباحث

وتعد كثافة التخزين الحجمية من الخصائص الفيزيائية المهمة في المقارنة بين بدائل نقل الهيدروجين، والتي ستحدد الكمية التي يمكن نقلها من الهيدروجين لوحدة الحجم للمادة الحاملة له (1 متر مكعب)، ويعد الميثيل سيكلو هكسان الأقل في كثافة التخزين الحجمية، حيث يحتوي 1 متر مكعب منه على 47.1 كيلوجرام من الهيدروجين، وترتفع في حالة الهيدروجين المضغوط (ضغط 100 بار، ودرجة حرارة 25 درجة مئوية) إلى 49.4 كيلوجرام من الهيدروجين. بينما يحتوي واحد متر مكعب من الهيدروجين المسال على 70.8 كيلوجرام من الهيدروجين، أما في حالة الأمونيا، فيحتوي واحد متر مكعب منها على 120 كجم من الهيدروجين، وهي القيمة الأعلى مقارنة بباقي المواد الأخرى.

وبالرغم من هذا التفاوت في كثافة التخزين الحجمية، إلا أن ثمة عوامل وخصائص أخرى ضرورية في المقارنة بين هذه البدائل، ومنها درجة الغليان (عند الضغط الجوي) والتي ستحدد كمية فاقد التبخر أثناء تخزين ونقل الهيدروجين. فكلما ارتفعت درجة الغليان للمنتج، كلما قل فاقد التبخر منه أثناء النقل والتخزين.

وعلى الرغم من أن الميثيل سيكلو هكسان الأقل في كثافة التخزين الحجمية، إلا أنه الأعلى في درجة الغليان التي تبلغ 101 درجة مئوية، الأمر الذي يقلل بشكل فعال من فاقد التبخر على طول سلسلة التوريد الذي قد يتراوح بين 2.26-2.56% من كمية الهيدرجين المنقول على طول السلسلة، كونه يظل سائلاً في درجات الحرارة العادية. كما أن الميثيل سيكلو هكسان لا يحتاج إلى استهلاك طاقة للحفاظ عليه في حالته السائلة. بينما يرتفع فاقد التبخر إلى 0.14-4% في حالة الهيدروجين المسال، ويصل في حالة الأمونيا 1.42-2.66% [10].

كما يجب عند المقارنة بين بدائل نقل الهيدروجين الأخذ بعين الاعتبار الطاقة المستخدمة في عملية التحويل (الإسالة، الهدرجة، تصنيع الأمونيا) وإعادة التحويل (التبخير، نزع الهيدروجين، تكسير الأمونيا)، وعملية التحميل والتفريغ في الموانئ. وحتى تسهل المقارنة، يمكن الأخذ في الاعتبار كمية الطاقة المستخدمة (ميجاجول) لكل كيلوجرام من الهيدروجين المنتج. علماً بأن واحد كيلو جرام من الهيدروجين يحتوي على 119.93 ميجاجول.

ففي حالة نقل واحد كيلوجرام من الهيدروجين في صورة غاز مضغوط باستخدام خطوط الأنابيب، فإن إجمالي الطاقة المطلوبة لضخ الهيدروجين تقدر بنحو 10 ميجاجول لكل كجم هيدروجين، وهي القيمة الأقل مقارنة بباقي بدائل النقل

الأخرى. بينما يبلغ إجمالي الطاقة المطلوبة في حالة الهيدروجين المسال نحو 17.26-59.16 ميجاجول لكل كيلوجرام من الهيدروجين، بسبب الطاقة المستهلكة في مرحلة إسالة الهيدروجين، وتحميله على الناقلات، وفاقد التبخر أثناء الرحلة، والطاقة المطلوبة لإعادة تحويله مجدداً إلى الحالة الغازية في بلد الوصول. بينما يقدر إجمالي الطاقة المبذولة لنقل الهيدروجين على صورة أمونيا نحو 37.4 ميجاجول لكل كيلوجرام من الهيدروجين، وهي أعلى من الهيدروجين المضغوط لكنها أقل من نقله على صورة الميثيل سيكلوهكسان، والتي تحتاج إلى 45.17 ميجاحول لكل كجم من الهيدروجين كما هو مبين بالجدول 1-6.

الجدول 1-6: مقارنة بين سمات الطرق المختلفة لنقل الهيدروجين

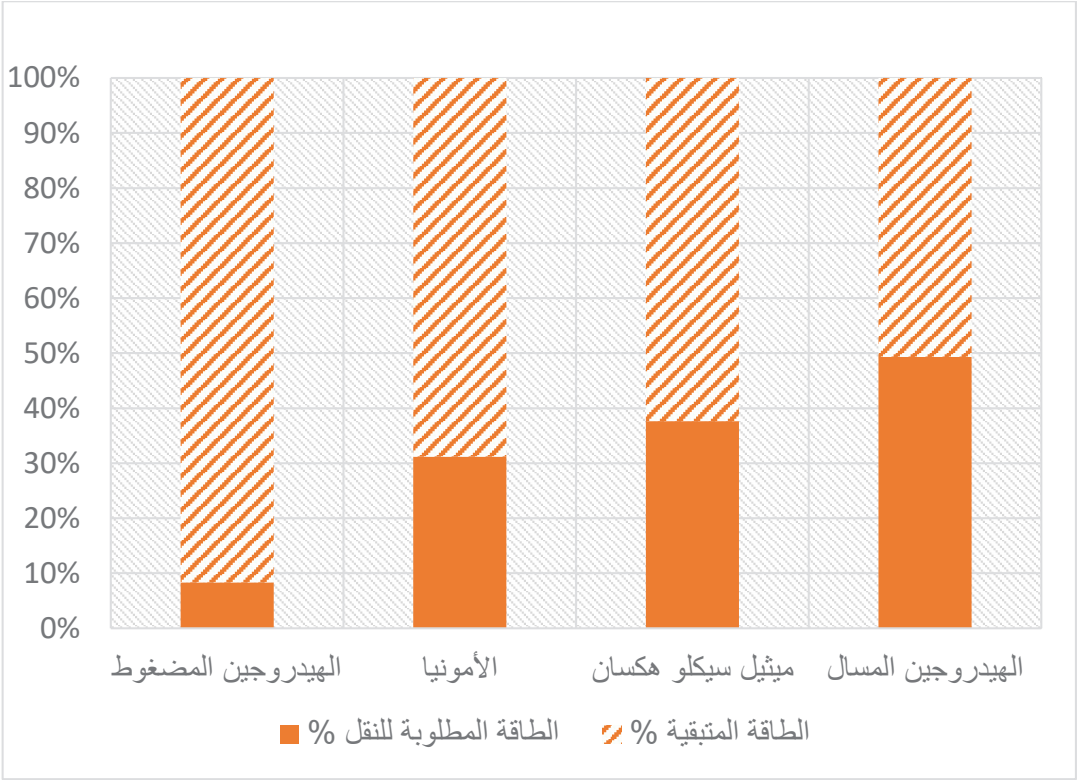
بند	الهيدروجين المضغوط	الهيدروجين المسال	الأمونيا	ميثيل سيكلو هكسان
الاختصار	**CGH_2**	**LH_2**	**NH_3**	**MCH**
درجة الغليان عند الضغط الجوي، درجة مئوية	252.87-	252.87-	33.34-	101
كثافة التخزين الحجمية (كجم هيدروجين لكل متر مكعب من المادة الحاملة)	49.4	70.8	120	47.1
إجمالي فاقد التبخر في النقل والتحميل والتفريغ (%)	لا يوجد	4-0.1414	2.677-1.42	2.62-2.56
الطاقة المستخدمة في التحويل (ميجا جول لكل كجم من الهيدروجين)	-	57-15.1	6.73	**1.8**
الطاقة المستخدمة في إعادة التحويل (ميجا جول لكل كجم من الهيدروجين)	لا يوجد	2.16	30.67	**43.38**
الطاقة المستخدمة في التحميل والتفريغ (ميجا جول لكل كجم من الهيدروجين)	-	0.00196	0.00196	0.00196
إجمالي احتياجات الطاقة في مرحلة النقل (ميجا جول لكل كجم من الهيدروجين)	10	**59.16-17.26**	**37.40**	**45.17**
أبرز المميزات	- هيدروجين عالى النقاوة - لا تحتاج إلى عمليات إعادة تحويل	- هيدروجين عالى النقاوة - تقنية الإسالة مستخدمة بشكل جيد في المحطات الصغيرة	-صناعة الأمونيا قائمة -كثافة تخزين مرتفعة	- سهولة التخزين والتداول - بنية تحتية قائمة
أبرز العيوب	- محدودية مسار خط الأنابيب	- فاقد التبخر في التخزين والنقل - تستهلك طاقة عالية في عملية الإسالة	- الحاجة إلى عمليات تنقية إضافية - تستهلك طاقة عالية في عملية تكسير الأمونيا	- تستهلك طاقة عالية في عملية نزع الهيدروجين - كثافة تخزين منخفضة، وتحتاج إلى وحدات كبيرة

المصادر : أوابك

-US DOE [11]
-Oxford Institute for Energy Studies [12]
- Roland Berger [13]

واستناداً إلى ما سبق، تشكل عملية نقل الهيدروجين عاملاً مؤثراً في اعتماد الهيدروجين مصدراً للطاقة في المستقبل بسبب احتياجات الطاقة الكبيرة التي تتطلبها والتي تشكل بالنهاية طاقة مهدرة للحصول على الهيدروجين، فلنقل واحد كجم من الهيدروجين (الذي يحتوي على 119.93 ميجا جول) عبر خطوط الأنابيب، سيتم استهلاك نحو 10 ميجاجول في مرحلة النقل، أي ما يعادل نحو 7% من طاقة الهيدروجين المنقول، وهي الأقل مقارنة بباقي البدائل، بينما يصل استهلاك الطاقة إلى 31% من طاقة الهيدروجين المنقول في حالة الأمونيا. أما في حالة الميثيل سيكلو هكسان، فتبلغ الطاقة المطلوبة نحو 37.6% من طاقة الهيدروجين المنقل، وتصل الطاقة المهدرة إلى أعلى قيمة لها في حالة الهيدروجين المسال والتي قد تصل إلى 49.3% من طاقة الهيدروجين المنقول، الشكل 1-10.

الشكل 1-10: الطاقة المطلوبة لنقل واحد كيلوجرام من الهيدروجين والمواد الحاملة له كحصة من طاقة الهيدروجين المنقول



المصدر: من إعداد الباحث

الفصل الثاني

نقل الهيدروجين في التجارة الدولية

2-1: العوامل المؤثرة على اختيار مسار نقل الهيدروجين في التجارة الدولية

2-2: التكاليف الحالية لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية

2-3: التوقعات المستقبلية للتكاليف الرأسمالية والتشغيلية لنقل الهيدروجين

1-2: العوامل المؤثرة على اختيار مسار نقل الهيدروجين في التجارة الدولية

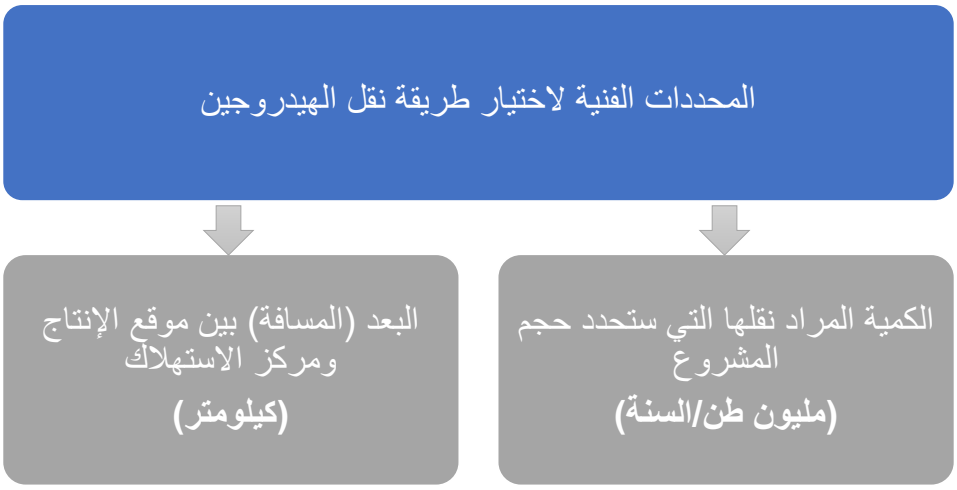
تعد القدرة على نقل الهيدروجين من مناطق إنتاجه بكميات كبيرة إلى مراكز الطلب المختلفة حول العالم بمرونة عالية ودون قيود فنية، شرطاً أساسياً للاعتماد عليه كوقود في منظومة الطاقة العالمية في المستقبل، كما هو الحال مع النفط والغاز. وحيث أن الهيدروجين الأخضر يعتمد في إنتاجه على استغلال الطاقة المتجددة المتوفرة في عدة دول، فستسمح تجارة الهيدروجين بنقل الطاقة النظيفة إلى أي منطقة حول العالم، الأمر الذي سيعزز من الأمن الطاقوي والتعاون الدولي في تقليل الانبعاثات والحد من تغير المناخ.

ولتحقيق ذلك، فلابد من إنتاج ونقل الهيدروجين بتكلفه ميسورة، حتى يمكن الاعتماد عليه في مزيج الطاقة. وتعتمد تكلفة نقل الهيدروجين وفق المسارات المختلفة للتجارة على عاملين رئيسين هما: الكمية المراد نقلها، والمسافة بين منطقة الإنتاج ومركز الطلب (الاستهلاك)، الشكل 2-1. وعادة كلما ارتفعت السعة التصميمية للتسهيلات المستخدمة في نقل الهيدروجين، كلما قلت التكلفة الإجمالية لوحدة الحجم، وهو ما يعرف باسم اقتصاد الحجم (Economy of Scale)، حتى يتم الوصول إلى السعة التصميمية القصوى للوحدة المستخدمة، ومن ثم يمكن إضافة وحدات إضافية تباعاً للوصول إلى الطاقة التصميمية الإجمالية للمشروع.

ومثال على ذلك من صناعة الغاز الطبيعي المسال، تبدأ عادة محطة الإسالة بوحدة إنتاج أو أكثر في المرحلة الأولى والتي يتم تصميمها بحيث تكون بأعلى طاقة ممكنة لتقليل التكاليف لوحدة الحجوم أو السعة التصميمية (دولار لكل طن في السنة)، ومن ثم يمكن إضافة وحدات إسالة أخرى في مراحل توسعية لرفع الطاقة التصميمية للمشروع إلى الإنتاج المستهدف. ومثال على ذلك محطة SabinePass LNG في الولايات المتحدة الأميركية وهي أول مشروع لإسالة الغاز وتصديره في ولاية

Louisiana الأمريكية، والذي بدأ التشغيل عام 2016 بوحدتي إسالة طاقة كل منهما 5 مليون طن/السنة (الطاقة التصميمية القصوى آنذاك)، ثم تمت إضافة وحدات إسالة أخرى في المشروع العملاق ليصل العدد إلى ست وحدات بطاقة إجمالية 30 مليون طن/السنة.

الشكل 2-1: العوامل المؤثرة على اختيار مسار نقل الهيدروجين في التجارة الدولية



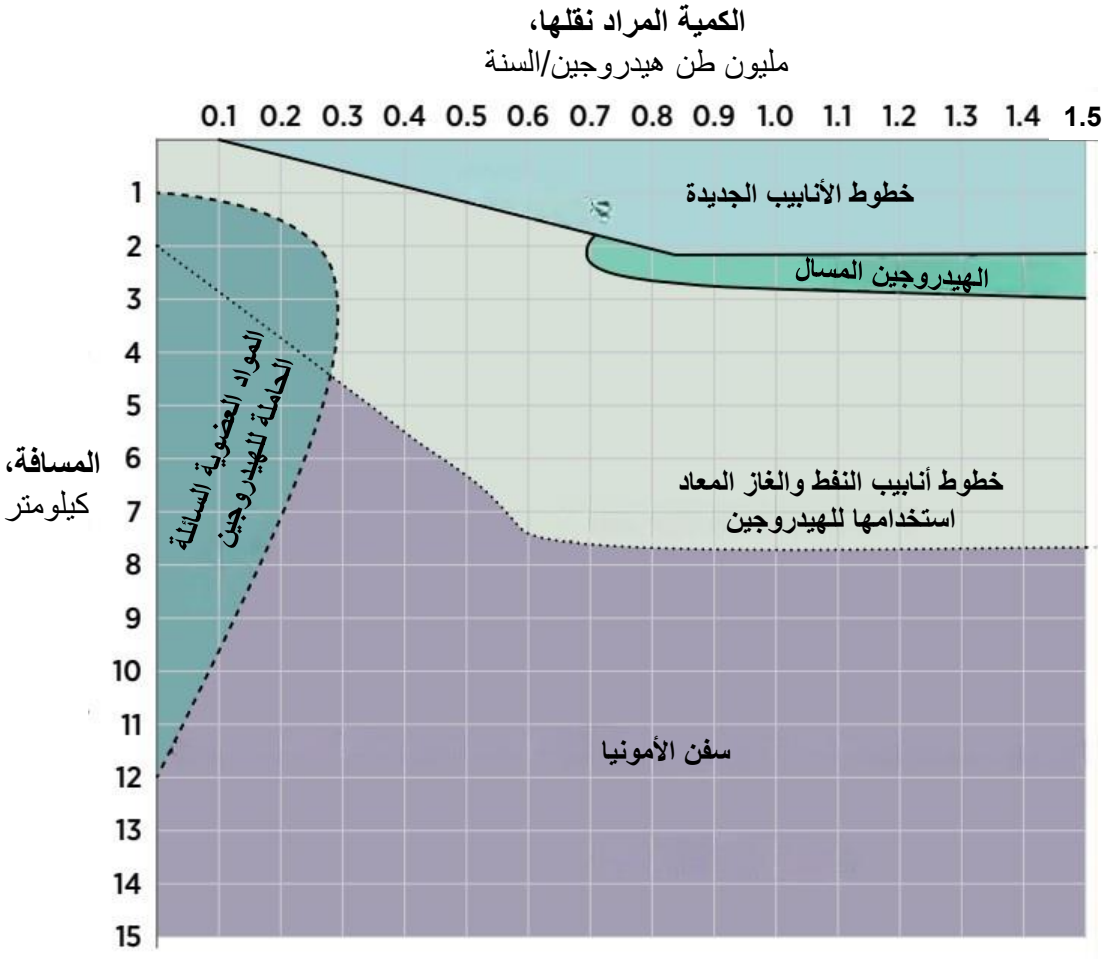
وبالمقارنة بين مسارات التجارة المختلفة التي من المتوقع أن تكون سائدة بحلول عام 2050، تبرز الأمونيا كخيار فعال عند نطاق واسع من عوامل المسافة والكميات المراد نقلها كما يبين الشكل 2-2، حيث يمكن استخدام سفن الأمونيا بشكل تجاري لنقل كمية بداية من 0.4 مليون طن/السنة من الهيدروجين، وحتى مسافات تصل إلى 15,000 كيلومتر.

أما بالنسبة لمسار نقل الهيدروجين عبر إنشاء خطوط أنابيب جديدة، فهي تبدو كخيار فعال بالنسبة للمسافات القصيرة نوعاً ما حتى 2,000 كيلومتر، مع إمكانية أي كمية من الهيدروجين سواء كانت صغيرة بداية من 0.1 مليون طن/السنة، أو كبيرة حتى 1.5 مليون طن/السنة. أما في حالة إعادة استخدام خطوط أنابيب النفط والغاز القائمة إن كانت متاحة ومؤهلة للعمل بحلول عام 2050، فيمكنها نقل الهيدروجين إلى

مسافات أبعد قد تصل إلى 8,000 كيلومتر، وبكميات متنوعة، لتكون أكثر تنافسية مع مسار نقل الهيدروجين بعد تحويله إلى أمونيا.

في المقابل، يبدو مسار نقل الهيدروجين باستخدام المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين (LCOH) فعالاً للكميات الصغيرة التي يمكن نقلها لمسافات قد تصل إلى أكثر 11,000 كيلومتر. كما يبدو نطاق الهيدروجين المسال محدوداً بالنسبة لعامل المسافة الملائمة له والتي تتراوح بين 2,000 و 3,000 كيلومتر، حتى لا تزداد الخسائر الناتجة عن التبخر أثناء النقل، وبكميات لا تقل عن 0.7 مليون طن هيدروجين/السنة وحتى 1.5 مليون طن هيدروجين/السنة.

الشكل 2-2: تحديد مسارات نقل الهيدروجين الأقل في التكلفة في التجارة الدولية بحلول عام 2050



المصدر: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة، أوابك

2-2: التكاليف الحالية لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية

بالنظر إلى المسارات المختلفة لنقل الهيدروجين في التجارة الدولية، تعد المسافة العامل الرئيسي المؤثر على التكلفة في حالة نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب، حيث كلما زادت المسافة، ارتفعت تكلفة الخط المراد تنفيذه بعلاقة تكون شبة طردية. أما بالنسبة للمسارات الأخرى لنقل الهيدروجين، تزداد تكلفة النقل لأنها تتطلب عمليات تحويل للحصول على الهيدروجين في صورة منتجات أخرى مثل عملية الإسالة للحصول على الهيدروجين المسال، أو التفاعلات الكيميائية للحصول على الأمونيا أو الميثيل سيكلو هكسان. كما تتطلب أيضاً عمليات لإعادة التحويل بعد الوصول إلى السوق المستهدف. وعادة تمثل تكلفة محطات التصدير والاستقبال، الحصة الأكبر في سلسلة القيمة لنقل الهيدروجين عبر هذه المسارات.

عالمياً، هناك تفاوت كبير في حساب تكلفة نقل الهيدروجين ومشتقاته من منطقة لأخرى[1] بسبب دخول عدة عوامل مؤثرة على التكلفة مثل حجم الكمية المراد نقلها ومدى بعدها عن السوق المستهدف، ومدى وجود بنية تحتية يمكن استغلالها، وطبيعة الاستخدام النهائي هل سيكون للهيدروجين أم لمشتقاته مثل الأمونيا، وبالتالي لا يمكن الحكم بشكل دقيق على الخيار الأنسب لنقل الهيدروجين وتطبيقه على كل المشاريع.

تعد تكلفة نقل (وتخزين) الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب الأقل مقارنة بباقي الطرق الأخرى، والتي تتراوح قيمتها بين 0.66 و0.72 دولار لكل كجم من الهيدروجين المراد نقله، يضاف إليها 0.06 دولار لكل كجم من الهيدروجين كتكلفة

[1] تكلفة النقل فقط، ولا يشمل ذلك تكلفة إنتاج الهيدروجين والتي تختلف حسب الطريقة المستخدمة في إنتاجه سواء كان عبر التحليل الكهربائي للماء باستخدام الطاقة المتجددة أو من الوقود الأحفوري أو أي طريقة إنتاج أخرى

لعمليات رفع الضغط، لتصل التكلفة الإجمالية لهذا المسار إلى نحو 0.78 دولار لكل كجم من الهيدروجين.

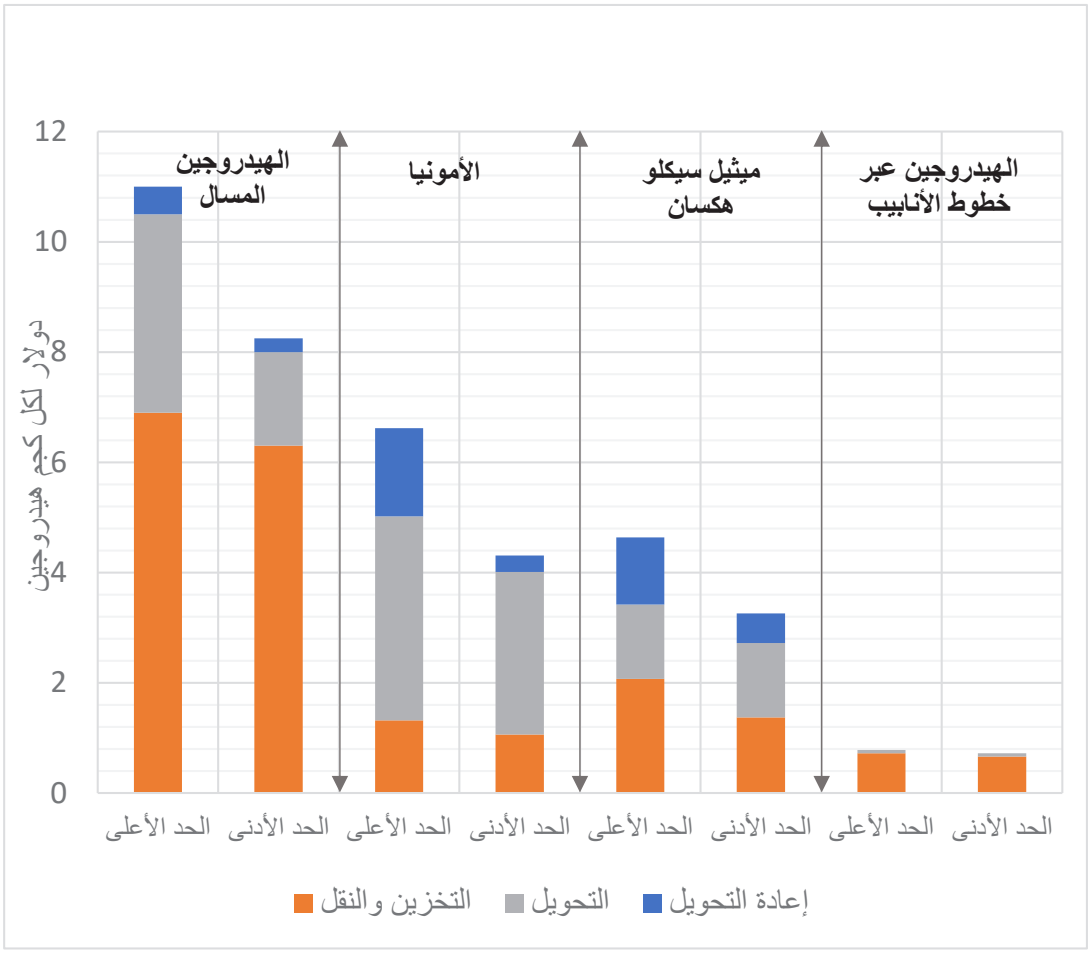
بينما في حالة استخدام الهيدروجين المسال، فقد تتراوح تكلفة النقل (والتخزين) بين 6.3 و 6.9 دولار لكل كجم من الهيدروجين، يضاف إليها تكلفة الإسالة التي قد تتراوح بين 1.7 و 3.6 دولار لكل كجم من الهيدروجين، وتكلفة تحويل الهيدروجين المسال إلى الحالة الغازية والتي تم احتسابها على الطاقة المستخدمة في العملية لتبلغ 0.25-0.5 دولار لكل كيلوجرام من الهيدروجين وبذلك تصل التكلفة الإجمالية لنقل الهيدروجين المسال بكافة العمليات المطلوبة إلى 8.25-11 دولار لكل كجم من الهيدروجين.

وفي حالة الأمونيا، فبالرغم من انخفاض تكلفة النقل (والتخزين) مقارنة بالهيدروجين المسال، حيث تقدر بنحو 1.06-1.32 دولار لكل كجم من الهيدروجين، إلا أن التكلفة الإجمالية ترتفع بسبب إضافة تكلفة تصنيع الأمونيا والتي تتراوح بين 2.95-3.7 دولار لكل كجم هيدروجين، وتكلفة تكسير الأمونيا والتي تقدر بنحو 0.3-1.6 دولار لكل كجم، لتصل التكلفة الإجمالية لنقل الأمونيا بكافة عمليات التحويل وإعادة التحويل إلى 4.31-6.62 دولار لكل كجم. وبذلك تكون كلفة عمليات التحويل وإعادة التحويل أعلى من تكلفة نقل الأمونيا نفسها عبر الناقلات.

أما في حالة استخدام الميثيل سيكلوهكسان كمادة عضوية سائلة حاملة للهيدروجين، فتصل تكلفة النقل إلى 1.37-2.07 دولار لكل كجم من الهيدروجين، ويضاف إليها تكلفة عملية الهدرجة حوالي 1.35 دولار لكل كجم، وتكلفة نزع الهيدروجين 0.54-1.22 دولار لكل كجم، لتصل التكلفة الإجمالية إلى 3.26-4.64 دولار لكل كجم، أي أن عمليات التحويل وإعادة التحويل تشكل أكثر من 50% من تكلفة النقل الإجمالية.

يبين الشكل 2-3، تكاليف نقل وتخزين الهيدروجين، مع الأخذ في الاعتبار تكاليف عمليات التحويل (الإسالة، الضغط، تخليق الأمونيا، الهدرجة) وإعادة التحويل (التبخير، تكسير الأمونيا، نزع الهيدروجين).

الشكل 2-3: تكاليف نقل وتخزين الهيدروجين، بالإضافة إلى تكاليف عمليات التحويل وإعادة التحويل حسب طرق النقل المختلفة



ملاحظات:

*التكلفة المبينة هي التكلفة المتوازنة (Levelized cost) التي تمكن من تأسيس سلسلة قيمة متكاملة للهيدروجين، وعلى مسافة أكبر من 1,000 كيلومتر بين مركز الإنتاج ومركز الاستهلاك
*تكلفة نقل الهيدروجين لا تشمل تكلفة إنتاجه من مصادره الأصلية
*يقصد بالتخزين عملية تخزين الهيدروجين أو مشتقاته في محطة التصدير قبيل البدء في عملية النقل
* تم احتساب تكلفة إسالة الأمونيا ضمن عملية التحويل أي تصنيع الأمونيا، حيث يتم نقل الأمونيا عبر الناقلات وهي في صورة سائلة

المصدر: أوابك، Oxford Institute for energy studies، Ammonia Energy association، EU's science and knowledge service

2-3: التوقعات المستقبلية للتكاليف الرأسمالية والتشغيلية لنقل الهيدروجين

2-3-1: العوامل المؤثرة على تكاليف نقل الهيدروجين

تعد تكاليف نقل الهيدروجين مرتفعة للغاية في الوقت الراهن، بل وتصل في بعض المسارات إلى أكثر من ضعف تكلفة إنتاج الهيدروجين نفسه كما هو الحال مع الهيدروجين المسال، إلا أن هذه التكلفة مرشحة للتراجع مع مرور الوقت استناداً إلى التقدم في ثلاث عوامل: تحسن اقتصاديات الحجم، تطور التقنيات المستخدمة في نقل الهيدروجين وتحسين كفاءتها، والتعلم عبر الممارسات المكتسبة من عمليات التشغيل، الشكل 2-4.

الشكل 2-4: العوامل التي ستساهم في تراجع تكاليف تقنيات نقل الهيدروجين وفق المسارات المختلفة

ويعد عامل اقتصاديات الحجم (حجم المشروع) من العوامل التي يمكن أن تساهم بشكل فعال في تخفيض التكلفة الرأسمالية للوحدات المستخدمة في عمليات التحويل وإعادة التحويل وكذلك النقل. فحتى اليوم، لا تزال غالبية المشاريع العاملة

في إنتاج ونقل الهيدروجين صغيرة الحجم، لا تتجاوز سعتها التصميمية بضعة أطنان في اليوم. وفي غالبية التقنيات المستخدمة في تحويل ونقل وإعادة تحويل الهيدروجين، يبلغ معامل السعة (Scale factor) حوالي 0.55-0.8 كما هو مبين بالجدول 2-1، وهو المعامل الذي يحدد مستوى الانخفاض المتوقع في التكاليف الرأسمالية مع زيادة السعة التصميمية للمنشأة المستخدمة، باستخدام منهجية التكلفة إلى المقياس (Cost to Scale Approach)[14]، وذلك على النحو التالي:

$$\left(\frac{C2}{C1}\right) = \left(\frac{Q2}{Q1}\right)^{x}$$

حيث:

- C1: تكلفة المنشأة رقم 1، ذات السعة التصميمية Q1
- Q1: السعة التصميمية للمنشأة رقم 1
- C2: تكلفة المنشأة رقم 2، بسعة تصميمية Q2
- Q2: السعة التصميمية للمنشأة رقم 2
- X: معامل السعة (0.55-0.65)

وعلى سبيل المثال، تبلغ التكلفة الرأسمالية لإنشاء وحدة لتصنيع الأمونيا من الهيدروجين بطاقة 600 طن/اليوم، نحو 350 مليون دولار[2] (على أساس التكلفة الرأسمالية 1600 دولار لكل طن أمونيا /السنة)[15]. أما في حالة مضاعفة الطاقة التصميمية للوحدة لتصبح 1,200 طن / اليوم، ستصبح التكاليف الرأسمالية المطلوبة للوحدة الجديدة بتطبيق معادلة التكلفة إلى المقياس، على النحو التالي:

التكلفة الرأسمالية للوحدة (1,200 طن/اليوم) =

350 (مليون دولار) * (1200 طن في اليوم/600 طن في اليوم) ^0.65 =549 مليون دولار

[2] [2] نفذت شركة Simplot محطة لإنتاج الأمونيا بسعة 600 طن/اليوم (200,000 طن/السنة) في ولاية Wyoming في الولايات المتحدة الأمريكية بتكلفة رأسمالية بلغت نحو 350 مليون دولار

وهي أقل من تكلفة بناء وحدتين جديدتين سعة كل منها 600 طن/اليوم، والتي ستبلغ نحو 700 مليون دولار، وبذلك فإن اقتصاديات الحجم ساهمت في خفض التكلفة بنحو 21%.

الجدول 2-1: قيم معامل السعة للتقنيات المستخدمة في تحويل ونقل وإعادة تحويل للهيدروجين ومشتقاته

	الهيدروجين المسال	الأمونيا	المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين
التحويل	0.8	0.65	0.667
النقل	0.58	0.58	0.58
إعادة التحويل	0.67	0.65	0.667

المصدر: IRENA [16]

على مستوى التقنيات المستخدمة في إنتاج ونقل الهيدروجين ومشتقاته ضمن مسارات النقل المختلفة، من المتوقع أن يكون تأثير عامل اقتصاديات الحجم محدوداً بالنسبة للأمونيا، كونها صناعة راسخة، وتعمل بشكل تجاري كامل بمحطات ذات سعة عالية، حيث يبلغ متوسط سعة الوحدة الإنتاجية الواحدة كبيرة الحجم نحو 3,000 طن/اليوم (1.1 مليون طن/السنة) وهو ما يعادل نحو 0.2 مليون طن/السنة من الهيدروجين[3]. لذلك فإن الوصول مستقبلاً بالسعة التصميمية لوحدات إنتاج الأمونيا إلى 5,000 طن/اليوم لإنتاج ما يصل إلى 0.35-0.4 مليون طن /السنة من الهيدروجين، سيكون له أثر محدود على التكاليف التي قد تشهد تراجعاً بنحو 10% فقط.

كما أن ناقلات الأمونيا منتشرة على نطاق واسع، بإجمالي 200 ناقلة بحمولة تتراوح بين 30,000 و 80,000 متر مكعب، من بينها نحو 40 ناقلة مخصصة بشكل

[3] يحتوي واحد طن من الأمونيا على نحو 177 كيلوجرام من الهيدروجين

كامل لنقل الأمونيا، بينما تستخدم الناقلات الأخرى لنقل الأمونيا ومنتجات بترولية أخرى مثل غاز البترول المسال.

وتشهد ناقلات الأمونيا تطوراً تقنياً من حيث حجم الحمولة، حيث بدأ مؤخراً تسجيل طلبيات في أحواض بناء السفن لبناء ناقلات للأمونيا ذات الحمولة الكبيرة جداً (Very Large Ammonia Carrier, VLAC) بسعة تصل إلى 93,000 متر مكعب. وفي هذا الصدد، أعلنت شركة بناء السفن Jiangnan الصينية في مايو 2023[17]، أنها أبرمت اتفاقية مع شركة الشحن البحري Eastern Pacific Shipping من سنغافورة لبناء أربع ناقلات للأمونيا كبيرة الحجم بسعة 93,000 متر مكعب، والتي تعد السعة الأكبر على مستوى العالم. والناقلات الجديدة ستكون بطول 230 متر، واتساع 36.6 متر، وعمق 22.5 متر، بينما يصل الغاطس الخاص بها إلى 13 متر، وهي ستخصص لنقل الأمونيا مع إمكانية استخدامها لنقل غاز البترول المسال، والبروبان التجاري والبيوتان التجاري. وقد أعقب هذا الاتفاق، الفريد من نوعه، اتفاقاً آخر بين نفس الشركتين تم توقيعه في شهر سبتمبر 2023[18] لبناء ناقلتين إضافيتين لنقل الأمونيا بنفس المواصفات للناقلات ضمن الاتفاق الأول، ليرتفع أسطول السفن المتعاقد عليها لشركة Eastern Pacific Shipping إلى ست ناقلات كبيرة الحجم.

وعلى سبيل المقارنة مع ناقلات الغاز الطبيعي المسال، تعد الناقلات القطرية كيو-ماكس، الأكبر في العالم، وتصل حمولتها إلى 266,000 متر مكعب أي ما يقارب نحو ثلاثة أضعاف أكبر ناقلة قيد الإنشاء لنقل الأمونيا. ويصل طول الناقلة "كيو-ماكس" إلى 345 متر، والاتساع 55 متر، بينما يبلغ الغاطس 12 متر، الشكل 2-5.

وتشكل ناقلات الأمونيا الجديدة الجاري بناؤها خطوة مهمة نحو التوسع في نقل الأمونيا مستقبلاً في التجارة الدولية، والمساهمة في بناء سلسلة توريد تمكن من نقل كميات كبيرة الحجم من الهيدروجين من مناطق الإنتاج إلى مراكز الطلب المحتملة في أوروبا وآسيا.

الشكل 2-5: مقارنة بين ناقلات الأمونيا وناقلات الغاز الطبيعي المسال الأكبر في الحمولة عالمياً

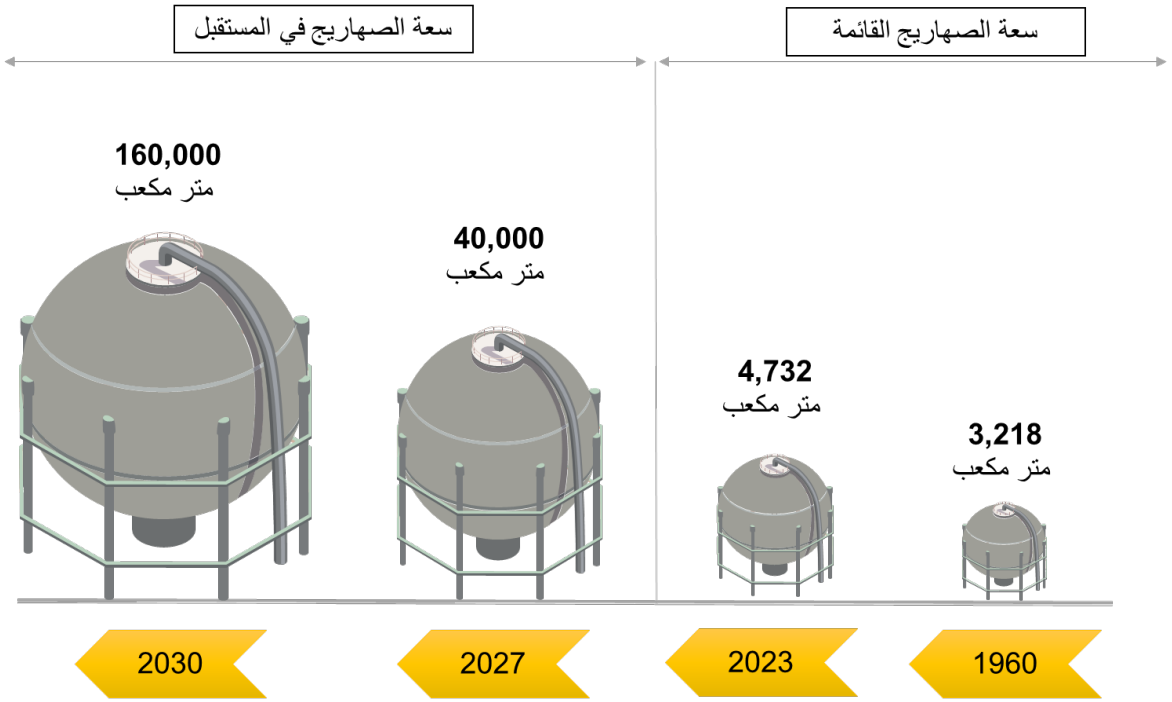
	ناقلة الأمونيا ذات الحمولة الكبيرة جداً (VLAC)	الناقلة القطرية كيو-ماكس (Q-max)
الحمولة	93,000 متر مكعب	266,000 متر مكعب
الطول	230 متر	345 متر
العرض	36.6 متر	55 متر
الغاطس	13 متر	12 متر

المصدر: من إعداد الباحث

أما في حالة الهيدروجين المسال، فمن المتوقع أن يكون تأثير اقتصاديات الحجم كبيراً، كون محطات إسالة الهيدروجين لا تزال بسعات محدودة في الوقت الراهن، وينحصر استخدامها في تطبيقات محددة مثل رحلات الفضاء، وهو الأمر الذي من المتوقع أن يؤدي إلى انخفاض كبير في التكاليف الرأسمالية مع التطوير المستمر. عالمياً، بلغت الطاقة الإنتاجية للهيدروجين المسال نحو 500 طن/اليوم[19] نهاية عام 2021، ومن ثم فإن التحسين المستمر في هذه التقنية سيساهم في بناء وحدات أكبر في الطاقة الإنتاجية وبتكاليف أقل لوحدة الحجوم. كذلك لا تزال صهاريج تخزين الهيدروجين المسال المستخدمة في الوقت الراهن ذات سعات صغيرة، حيث تبلغ السعة التخزينية التشغيلية لأكبر صهريج لتخزين الهيدروجين المسال في العالم نحو 4,732

متر وهو الذي نفذته شركة CB &I لصالح وكالة الفضاء الأمريكية "ناسا" في مركز جون كنيدي للفضاء[20]. والصهريج الجديد أكبر من الصهريج الأساسي الذي كانت تعتمد عليه الوكالة منذ ستينيات القرن الماضي في دعم رحلات الفضاء، وتصل سعته التخزينية إلى 3,800 متر مكعب، وكان يعد الأكبر في العالم طيلة عقود. ومن ثم فإن نمو إنشاء محطات كبيرة لإسالة الهيدروجين سيحتاج إلى زيادة سعة صهاريج التخزين في المستقبل. وقد بدأت عدة شركات في الإعلان عن تصميمات لصهاريج تخزين الهيدروجين بسعات أعلى بكثير من الصهريج الأكبر حالياً التابع لوكالة "ناسا". ففي ديسمبر من عام 2021، أعلنت McDermott's CB&I Storage Solutions تصميم صهريج كروي الشكل لصالح إحدى شركات الإنتاج الكبرى بموجب عقد فازت به الشركة لتخزين الهيدروجين المسال بسعة تخزينية 40,000 متر مكعب[21]، أي ما يزيد عن ثمانية أمثال الصهريج التابع لوكالة "ناسا"، كما هو مبين بالشكل 2-6.

الشكل 2-6: تطور السعة التخزينية لصهاريج الهيدروجين المسال منذ عام 1960، والتوقعات حتى عام 2030



المصدر: من إعداد الباحث

وقد حصل تصميم McDermott's CB&I Storage Solutions لنظام الهيدروجين المسال على اعتماد من شركة DNV النرويجية في أغسطس 2023 بنظام موافقة على المبدأ (Approval in Principle)[4]، بمعدل فاقد من الغاز المتبخر من المخزون في حدود 0.05% يومياً.

وبخلاف إعلان شركة McDermott's CB&I Storage Solutions، أعلنت عدة شركات أخرى عن تصميم صهاريج للهيدروجين المسال بسعات مختلفة تصل إلى 160,000 متر مكعب، على أن تكون جاهزة للعمل بشكل تجاري قبل عام 2030، كما هو مبين بالجدول 2-2.

الجدول 2-2: بعض التصميمات المعلنة لصهاريج تخزين الهيدروجين المسال

الشركة المصنعة	الموافقة على المبدأ (Approval in Principle)	الحجم (متر مكعب)
Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Hyundai Mipo Dockyard	Korean Register of Shipping	20,000
Samsung Heavy Industries, (SHI)	American Bureau of Shipping	20,000
C-Job Naval Architects, LH2 Europe	-	37,500
McDermott's CB&I Storage Solutions	DNV	40,000
Kawasaki Heavy Industries (KHI)	Nippon Kaiji Kyokai	160,000
Samsung Heavy Industries, (SHI)	Lloyd’s Register	160,000

المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية IEA[22]

[4] الموافقة على المبدأ هو تقييم مستقل من الشركات المتخصصة على أن التصميم الابتكاري الجديد ممكن من الناحية الفنية دون أي معوقات تحول دون تنفيذ التصميم في الواقع

جدير بالذكر أن سعة الصهاريج المستخدمة في صناعة الغاز الطبيعي المسال تتراوح في المتوسط بين 40,000 و200,000 متر مكعب، ومع استمرار التقدم في تصميم وبناء صهاريج الغاز الطبيعي المسال، بدأت الشركات في تنفيذ سعات أكبر، ومن بينها شركة CNOOC الصينية التي أعلنت في عام 2022 البدء في بناء أكبر صهريج للغاز الطبيعي المسال في العالم بسعة تخزينية 270,000 متر مكعب[23].

وعلى غرار الهيدروجين المسال، من المتوقع أن يساهم عامل اقتصاد الحجم بشكل فعال في تقنيات المواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين، كونها لا تزال بسعات محدودة، ومن ثم يمكن تقليل التكاليف الرأسمالية المطلوبة في حالة بناء محطات بسعات إنتاج عالية.

أما **العامل الثاني** وهو تطور التقنيات المستخدمة وتحسين كفاءتها، فهو سيساهم بشكل فعال في تقليل الطاقة المستخدمة في كل حلقة من حلقات سلسلة القيمة الخاصة بالهيدروجين ومشتقاته. ففي حالة الهيدروجين المسال، يشكل استهلاك الطاقة الكهربائية المستخدمة في عملية الإسالة نحو 30-35% من الطاقة التي يحتويها الهيدروجين (تقريبا 10 كيلو وات ساعة لكل كجم من الهيدروجين لمحطات الإسالة ذات الكفاءة العالية).

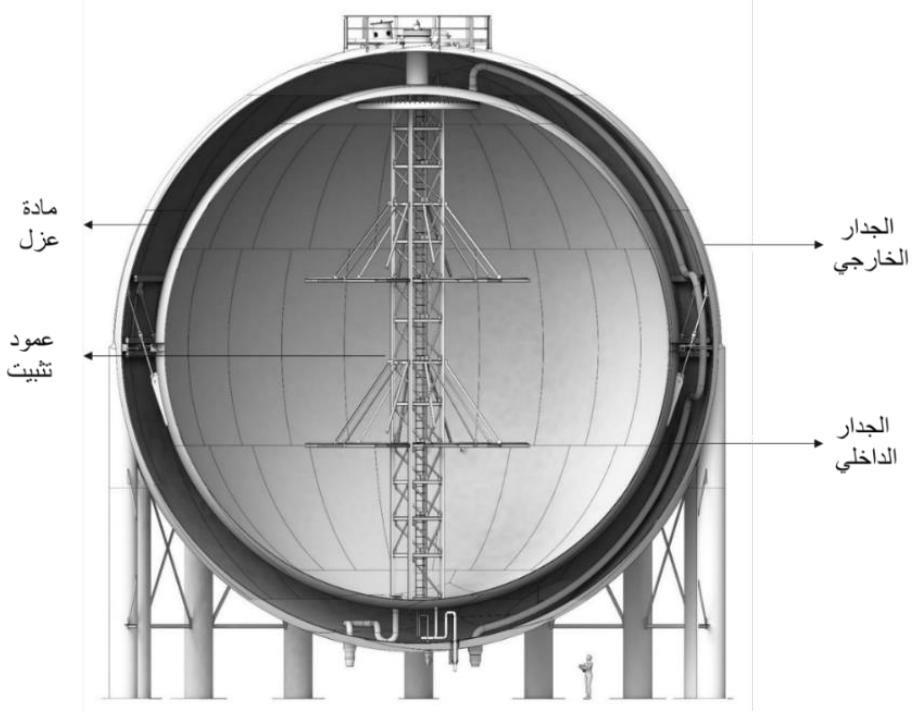
وفي هذا الصدد، من المتوقع أن تسفر عمليات البحث والتطوير المستمرة في تحسين كفاءة عملية الإسالة، ليصل استهلاك الطاقة المستخدمة في العملية إلى 6-8 كيلو وات ساعة لكل كجم من الهيدروجين بحلول عام 2030، أي تحسن بنسبة 20-40%، وهو ما سينعكس بالطبع على تقليل تكاليف النقل.

كما قد يساهم التقدم التقني المتوقع في تقليل الفاقد المتبخر (Boiloff Rate) من الهيدروجين المسال داخل صهاريج التخزين سواء في محطة الإنتاج أو الاستهلاك أو حتى أثناء نقله عبر الناقلات. وهي إحدى الإشكاليات الكبيرة للهيدروجين المسال كون درجة غليانه منخفضة للغاية (-252.9 درجة مئوية)، وهي أقل بكثير من درجة غليان الغاز الطبيعي المسال التي تبلغ -162 درجة مئوية، ومن ثم فإن عملية نقل وتخزين الهيدروجين المسال ليست بالعملية بالسهلة، وسيصاحبها ارتفاع معدل الفاقد المتبخر مع طول فترة التخزين.

وقد أجرت وكالة الفضاء الأمريكية "ناسا" عدة أبحاث بغية تحسين كفاءة العزل الحراري المستخدم في عزل صهاريج الهيدروجين المسال للحفاظ على برودة المخزون وتقليل فاقد التبخر إلى أقل معدل ممكن، باستخدام مواد عزل حراري مختلفة في الفراغ بين جداري صهريج التخزين الذي عادة ما يكون تحت ضغط تفريغي (Vacuum Pressure)، حيث عادة ما يتم تصميم صهريج الهيدروجين المسال كثنائي الجدار (Double-Walled) لاحتواء المنتج وتقليل انتقال الحرارة من الوسط الخارجي إلى الصهريج، كما هو مبين بالشكل 2-7.

وقد توصلت تجارب وكالة "ناسا" الأمريكية التي أجريت على صهريج اختبارات صغير الحجم، إلى أن استخدام الفقاعات الزجاجية (Glass Bubbles) كمادة للعزل الحراري سيساهم في تقليل معدل الفاقد المتبخر من صهاريج التخزين بنسبة 44%، مقارنة باستخدام بودرة (مسحوق) من مادة البرليت (Perlite)، المبينة بالشكل 2-8. واستخدمت وكالة "ناسا" في هذه التجربة صهريج بسعة 190 متر مكعب، وتم ملء الصهريج بالهيدروجين المسال حتى مستوى 80%، والذي تراجع مستواه إلى 66% بعد مرور فترة ستة أشهر من التخزين بسبب فاقد التبخر المرتفع.

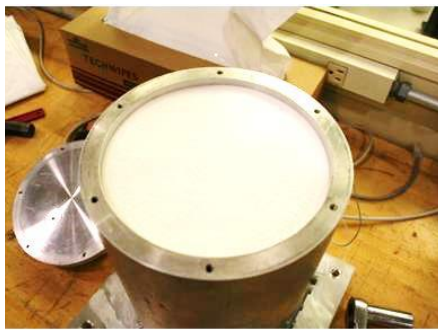
الشكل 2-7: صهريج الهيدروجين المسال ثنائي الجدار (Double-Walled Tank)



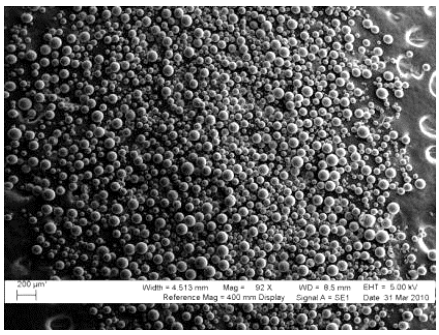
المصدر: وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا)

يلخص الجدول 2-3، قيم معدل الفاقد المتبخر من الهيدروجين المسال، باستخدام الفقاعات الزجاجية ومسحوق البرليت كمواد عزل حراري لصهريج التخزين المستخدم في التجربة سعة 190 متر مكعب.

الشكل 2-8: أمثلة من مواد العزل الحراري المستخدمة في عزل صهاريج الهيدروجين المسال



بوردرة (مسحوق) البيرليت
Perlite Poweder



الفقاعات الزجاجية
Glass Bubbles

المصدر: وكالة الفضاء الأمريكية ناسا [24]

الجدول 2-3: معدل الفاقد المتبخر من صهريج الهيدروجين المسال حسب نوع مادة العزل الحراري المستخدمة

نوع مادة العزل الحراري	مسحوق البرليت Perlite powder	الفقاعات الزجاجية glass bubbles	ملاحظات
معدل الفاقد	0.18% /اليوم	0.10%/اليوم	44% نسبة التخفيض
كمية الفاقد*	386 لتر/اليوم	216 لتر/اليوم	
ضغط التفريغ (بين جداري الصهريج)	4.5 باسكال	1.3 باسكال	

*أجريت التجربة على صهريج سعة 190 متر مكعب، مملوء حتى مستوى 80%

المصدر: وكالة الفضاء الأمريكية ناسا [25]

وفي حالة الأمونيا والمواد السائلة الحاملة للهيدروجين، والتي تحتاج إلى طاقة حرارية عالية في حالة تكسير الأمونيا أو نزع الهيدروجين من المواد العضوية السائلة، والتي يمكن تقليلها عبر التحسن المستمر في كفاءة التقنيات المستخدمة في هذه العمليات حتى 35-55%، ومن ثم تقليل التكلفة الإجمالية للنقل.

أما العامل الثالث وهو **التعلم عبر الممارسات**، فهو سيساهم في اكتساب الخبرات والتحول من بناء وحدات صغيرة الحجم في مشاريع تجريبية إلى وحدات كبيرة الحجم في مشاريع تجارية، في مسار مشابه لما مرت به صناعة الغاز الطبيعي المسال وذلك عبر الإجراءات التالية:

1. بناء وحدات نموذجية كاملة (Modular Units) في ورش التصنيع، ونقلها مباشرة إلى موقع المشروع المراد تنفيذه لتقليل تكاليف الإنشاء، وأجور العمالة.

2. توحيد المواصفات القياسية في التصميم، لتقليل مصاريف الأعمال الهندسية والتركيبات.
3. الاستثمار في المشاريع الإنتاجية الكبيرة، وسلاسل الإمداد الطويلة، لتشجيع الشركات المتخصصة في تصنيع المكونات الصغيرة على تصنيع مكونات أكبر. ومن أمثلة الشركات المتخصصة في تصميم وتنفيذ صهاريج وأنظمة احتواء الهيدروجين المسال شركة McDermott's CB&I، والتي نجحت في تصنيع السعات الصغيرة لوكالة الفضاء الأمريكية "ناسا" بكفاءة عالية، ثم انتقلت إلى تصميمات لسعات أكبر بناء على حاجة السوق.

2-3-2: توقعات تكاليف نقل الهيدروجين في المدى المتوسط والمدى البعيد

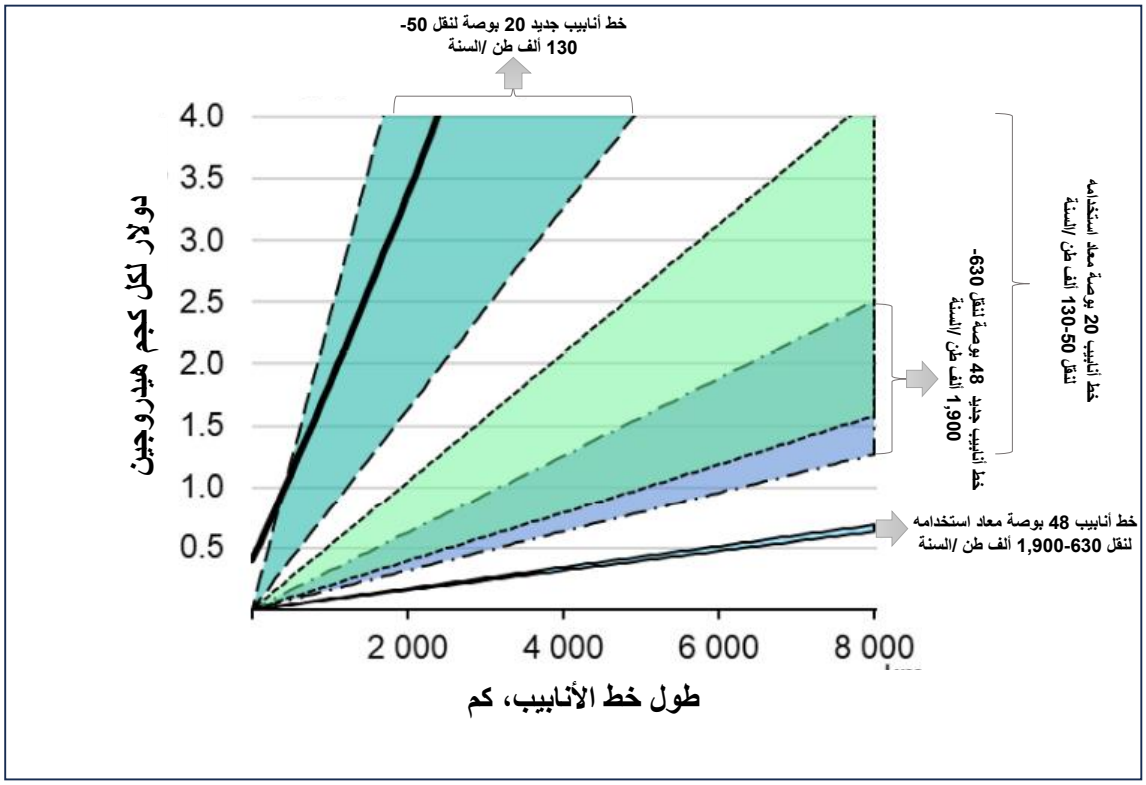
لا شك أن التقدم في العوامل الثلاثة سالفة الذكر سيحدد ملامح الآفاق المستقبلية لتكلفة نقل الهيدروجين، وبالأخص التجارة العابرة للحدود (Cross-Border Trade)، على المديين المتوسط والطويل.

وفي هذا الصدد، برزت عدة توقعات لتكاليف نقل الهيدروجين سواء كان في حالته الغازية أو بعد تحويله إلى الحالة السائلة، والمواد الحاملة له (الأمونيا، المواد العضوية السائلة)، وتشير كافة التوقعات التي جمعتها الدراسة إلى إمكانية حدوث تراجع في التكاليف التشغيلية لنقل الهيدروجين مع انطلاق مرحلة التشغيل التجاري بسعات كبيرة. وهو مسار متوقع، مرت به كافة التقنيات الناضجة اليوم مع خضوعها إلى التطوير المستمر، بعد أن كانت تقنيات وليدة لم تصل إلى الحالة التجارية الكاملة. لكن هناك تباين بين هذه التوقعات حول القيمة التي ستبلغها تكلفة الهيدروجين ومشتقاته. وبشكل عام فإن توقعات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة تفترض حدوث تراجع في تكاليف نقل الهيدروجين ومشتقاته بقيم أعلى من التكلفة المتوقعة التي قدرتها وكالة الطاقة الدولية.

وعلى قمة الخيارات الأقل في التكلفة لنقل الهيدروجين في المدى المتوسط بحلول عام 2030، تبرز خطوط الأنابيب كخيار فعال التكاليف لنقل كميات من الهيدروجين لمسافات متوسطة في حدود 2,000-2,500 كم، وبمعدلات 600 ألف طن/السنة. ويمكن أن تكون تلك الخطوط برية أو بحرية حسب حالة كل مشروع. وبالرغم من إمكانية استخدام خطوط أنابيب لنقل الهيدروجين لمسافات أطوال (أعلى من 2,500 كم) بتكلفة أرخص من مسارات النقل الأخرى، إلا أن ذلك سيتطلب نقل كميات أكبر من الهيدروجين لتحقيق الجدوى الاقتصادية من الاستثمار في بناء خط أنابيب بسعة كبيرة. لكن ربما يكون من الصعب في المدى المتوسط خلق طلب كبير على الهيدروجين ضمن الرقعة الجغرافية التي سيمر عبرها خط الأنابيب.

كما يمكن إعادة تهيئة خطوط الأنابيب القائمة المستخدمة في نقل الغاز الطبيعي لنقل الهيدروجين، والتي ستكون خياراً يقلل من تكلفة بناء خطوط أنابيب جديدة، خاصة أن ذلك سيضمن الاستفادة من خطوط الغاز كبنية أساسية في إطار عملية تحول الطاقة التي تتبناها عدة دول. ومن المتوقع أن تكون تكلفة نقل الهيدروجين حتى مسافة 2,000-2,500 كم عبر خطوط الأنابيب الجديدة قطر 20 بوصة، أعلى من 2 دولار لكل كجم من الهيدروجين في أفضل السيناريوهات، وتقل إلى 0.5-1.25 دولار لكل كجم من الهيدروجين بالنسبة للخطوط القائمة المعدل استخدامها لنقل الهيدروجين. أما للخطوط الجديدة قطر 48 بوصة، فمن المتوقع أن تكون التكلفة في حدود 0.5-1 دولار لكل كجم من الهيدروجين وترتفع بعلاقة طردية مع المسافة كما يبين الشكل 2-9، وتقل التكلفة في حالة استخدام خطوط قائمة (قطر 48 بوصة) لتصبح أقل من 0.5 دولار لكل كجم من الهيدروجين.

الشكل 2-9: التكلفة المتوازنة (Levelized Cost) لنقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب بحلول عام 2030



المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

أما مسار نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى أمونيا، فتشير توقعات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) إلى أن تكلفة نقلها ستتراجع إلى 2.5-4.5 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ في المدى المتوسط بحلول عام 2030، بينما تضع وكالة الطاقة الدولية سيناريو أكثر تفاؤلاً يفترض تراجع تكلفة نقل الأمونيا إلى 1.9-2.2 دولار فقط لكل كجم من الهيدروجين المكافئ المنقول بحلول عام 2030.

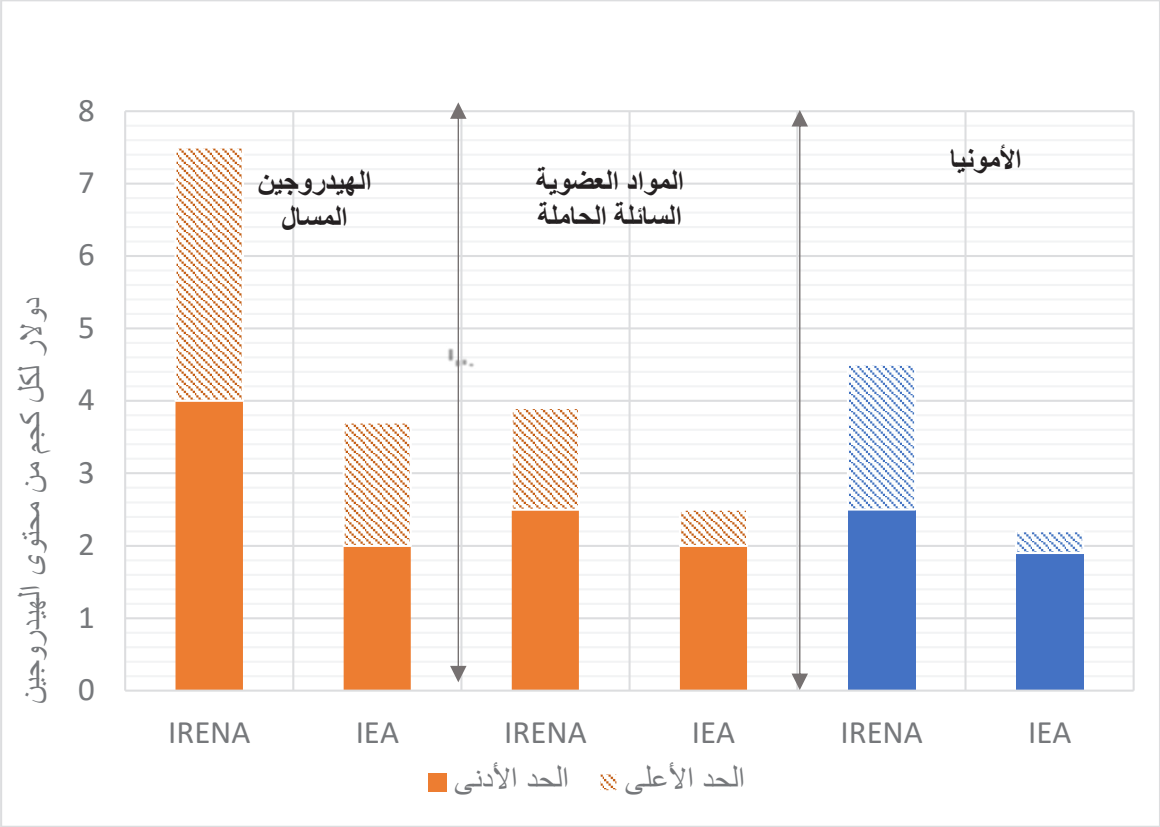
أما للمواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين، فتشير توقعات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة إلى إمكانية تراجع تكلفة نقلها إلى 2.5-3.9 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ في المدى المتوسط بحلول عام 2030، بينما

تفترض وكالة الطاقة الدولية تراجع التكلفة إلى 2-2.5 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ المنقول بحلول عام 2030.

ولكافة التوقعات، سيظل الهيدروجين المسال المسار الأعلى في التكلفة بحلول عام 2030 ليسجل 2-3.7 دولار لكل كجم من محتوى الهيدروجين المنقول حسب وكالة الطاقة الدولية، ونحو 4-7.5 دولار لكل كجم من الهيدروجين حسب تقديرات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة. وبذلك يمكن استنتاج أن يكون خياري الأمونيا والمواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين الأقل في التكاليف بنسبة قد تصل إلى أكثر من 60%، مقارنة بالهيدروجين المسال الذي سيظل في حاجة إلى مزيد من التطوير في سلسلة القيمة الخاصة به، حتى يصل إلى النضوج المطلوب الشكل 2-10.

أما على المدى البعيد بحلول عام 2050، وبعد أن تحقق صناعة الهيدروجين النضوج الكافي، وتتحول إلى الحالة التجارية الكاملة (Full Commercialization)، فمن المتوقع أن تشهد تكاليف نقل الهيدروجين مزيداً من الانخفاض لتسجل أقل من 1 دولار لكل كجم من الهيدروجين بالنسبة للأمونيا والهيدروجين المسال، ونحو 1.2 دولار لكل كجم من الهيدروجين في حالة المواد العضوية السائلة.

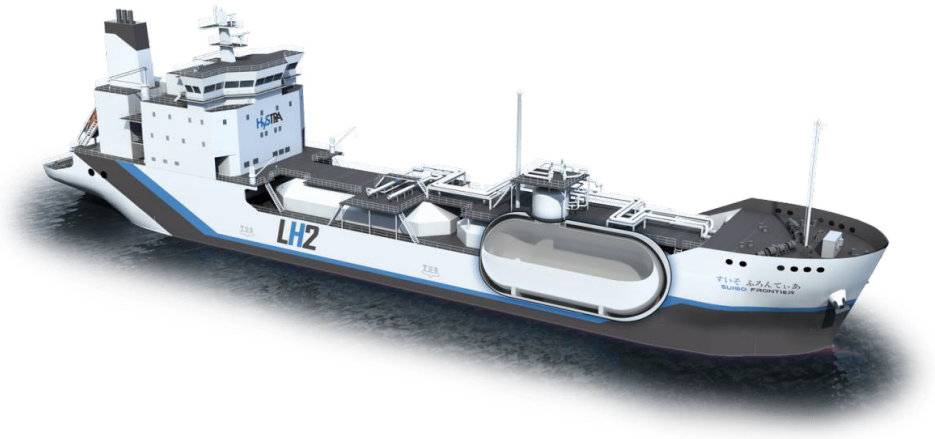
الشكل 2-10: توقعات تكلفة نقل الهيدروجين وفق مسارات النقل المختلفة بحلول عام 2030



المصدر: أوابك استنادا إلى بيانات وكالة الطاقة الدولية (IEA) والوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)

الفصل الثالث

آفاق نقل الهيدروجين



3-1: السوق الحالي للهيدروجين

3-2: الآفاق المستقبلية لتجارة الهيدروجين

3-3: خطط ومشاريع الدول العربية في مجال نقل وتصدير الهيدروجين

1-3: السوق الحالي للهيدروجين

يعد السوق الحالي للهيدروجين سوقاً ضخماً ومتنامياً، لتعدد القطاعات التي تعتمد عليه، فوفقاً لأحدث البيانات الصادرة عام 2023، بلغ إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين نحو 95 مليون طن في عام 2022، بمعدل نمو 3% عن عام 2021، إلا أنه قائم على استخدام الهيدروجين كمادة خام وليس كمصدر للطاقة، وهو الغرض الذي تقوم عليه الخطط والمبادرات الدولية ضمن مساعيها نحو تحول الطاقة.

ويعد القطاع الصناعي المستهلك الأكبر للهيدروجين بحصة تناهز الـ 55% من إجمالي الاستهلاك. حيث يستخدم الهيدروجين في إنتاج الأمونيا التي تستهلك وحدها نحو 31.8 مليون طن من الهيدروجين، يليها إنتاج الميثانول الذي يستهلك نحو 15.9 مليون طن، بالإضافة إلى استخدام الهيدروجين مع الغاز الطبيعي في عملية الاختزال المباشر للحديد (Direct Reduction of Iron, DRI) [5] التي تستهلك نحو 5.3 مليون طن، ليبلغ استهلاك القطاع الصناعي ككل نحو 53 مليون طن.

بينما يمثل قطاع التكرير ثاني أكبر قطاع مستهلك للهيدروجين، حيث بلغ الطلب قرابة 41.9 مليون طن، حيث يستخدم الهيدروجين في عدة عمليات داخل المصافي منها نزع الشوائب من المنتجات البترولية مثل المركبات الكبريتية عبر عملية نزع الكبريت بالهدرجة (Hydrodesulfurization)، وكذلك تحسين مواصفات القطفات الثقيلة (Heavy Ends) وتحويلها إلى قطفات خفيفة (Light Ends).

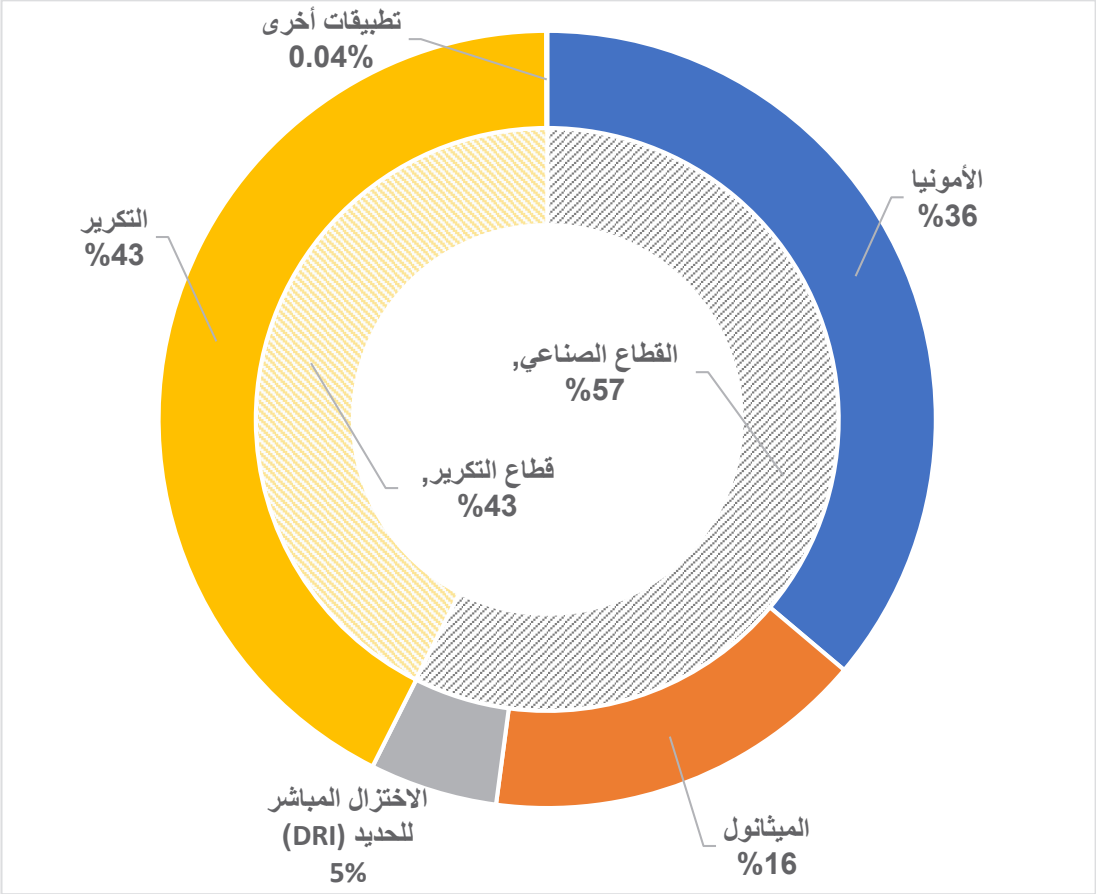
[5] الاختزال المباشر للحديد هي عملية يتم فيها اختزال الحديد عبر نزع الأوكسجين من عروق الحديد أو المواد الحاملة لها وهي في الحالة الصلبة دون إذابة الحديد، ويستخدم فيها خليط الهيدروجين مع أول أكسيد الكربون كعامل اختزال

وعادة يتم إنتاج الهيدروجين في المصافي مباشرة ليستخدم في العمليات سالفة الذكر. ففي عام 2022، تم إنتاج نحو 80% من الهيدروجين المستهلك في قطاع التكرير داخل المصافي نفسها سواء من خلال وحدات إنتاج مخصصة لإنتاج الهيدروجين أو الحصول على الهيدروجين كمنتج ثانوي من عمليات التكرير مثل وحدات تهذيب النافثا Naphtha Reforming، بينما تم توفير الـ 20% المتبقية من خلال شركات إنتاج المواد الكيماوية والغازات الصناعية التي تملك المحطات المتخصصة لإنتاج الهيدروجين، وتقوم ببيعه ونقله عبر شبكات الأنابيب التابعة لها إلى مصافي التكرير القريبة.

بينما لا يزال استخدام الهيدروجين محدوداً للغاية في التطبيقات الجديدة مثل النقل، والقطاع السكني، وتوليد الكهرباء، والصناعات الثقيلة، حيث لا تتجاوز حصته في هذه التطبيقات مجتمعة 0.04% من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين، بما يعادل نحو 35 ألف طن فقط. ويعد قطاع النقل، المستهلك الأبرز ضمن التطبيقات الجديدة للهيدروجين حيث بلغ استهلاكه عام 2022 نحو 32 ألف طن، نتيجة التوسع في عدد السيارات العاملة بخلايا الوقود، والتي تشهد نمواً مطرداً، وبلغ الأسطول العالمي لها نحو 80,000 سيارة منتصف عام 2023، وهي تنتشر في الصين وكوريا الجنوبية على وجه الخصوص. يبين الشكل 3-1، توزيع الطلب العالمي على الهيدروجين وفق القطاعات والصناعات المختلفة لعام 2022.

على مستوى المناطق، تعد الصين المستهلك الأكبر للهيدروجين عالمياً، حيث بلغ استهلاكها نحو 27.5 مليون طن عام 2022 بحصة 29% من الطلب العالمي، والصين تعتمد على الهيدروجين في عدة قطاعات كالقطاع الصناعي، وقطاع التكرير الذي يستحوذ وحده على أكثر من 9 مليون طن.

الشكل 3-1: توزيع الطلب العالمي على الهيدروجين وفق القطاعات المختلفة، عام 2022



المصدر: أوابك استناداً إلى بيانات وكالة الطاقة الدولية

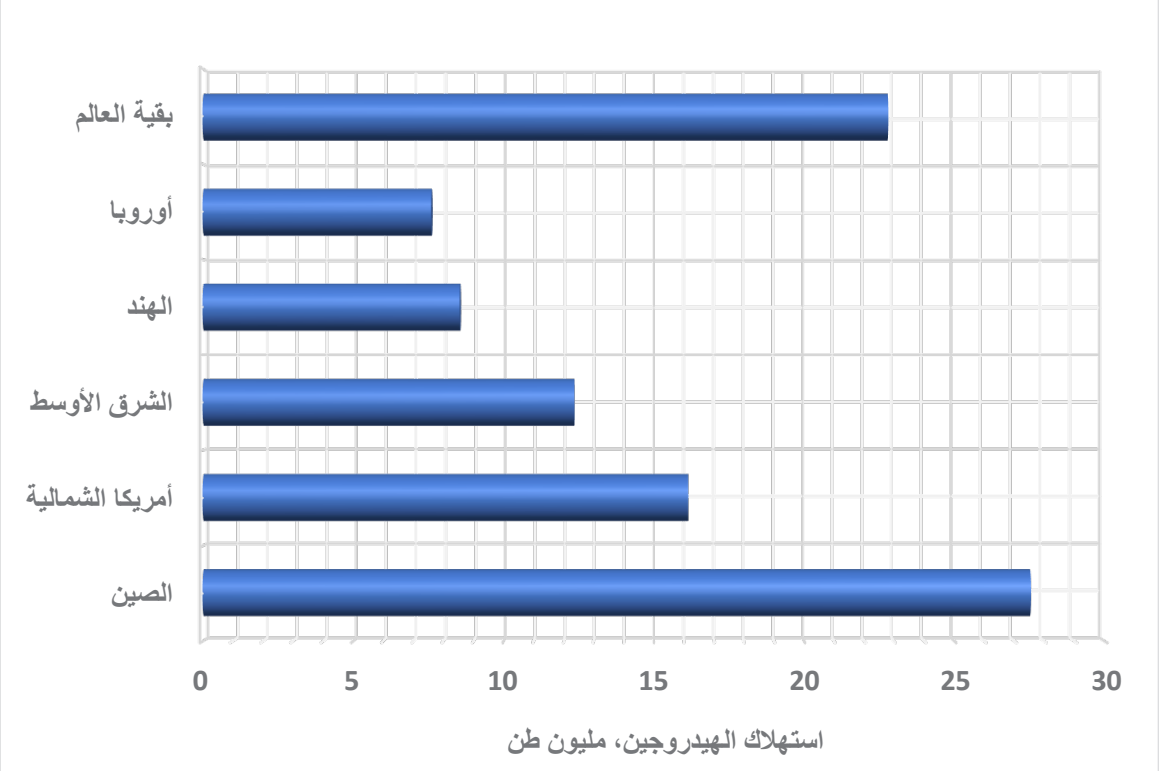
وتأتي أمريكا الشمالية كثاني أكبر مستهلك للهيدروجين عالمياً بإجمالي 16 مليون طن، بحصة 17% من إجمالي الطلب العالمي. ويستحوذ قطاع التكرير في أمريكا الشمالية على النصيب الأكبر من الطلب على الهيدروجين بإجمالي يفوق 10 مليون طن.

وتعد منطقة الشرق الأوسط ثالث أكبر مستهلك للهيدروجين عالمياً بإجمالي 12.35 مليون طن، بحصة 13% من إجمالي الطلب العالمي، حيث يعتمد عليه بشكل أساسي في قطاع التكرير، والقطاع الصناعي لإنتاج الأمونيا، والميثانول وكذلك الاختزال المباشر للحديد حيث تستحوذ منطقة الشرق الأوسط على نحو 40% من

مصانع الاختزال المباشر للحديد على مستوى العالم. بينما يصل الطلب على الهيدروجين في الهند إلى نحو 8.55 مليون طن وحصة 8.5%، وتعد الهند من المناطق الرئيسية في إنتاج الحديد بحصة 20% من مصانع الاختزال المباشر للحديد على مستوى العالم.

وتأتي أوروبا في المرتبة الخامسة بنحو 7.6 مليون طن وحصة 8% من إجمالي الطلب العالمي، ويتوزع الطلب المتبقي في بقية دول العالم، كما هو مبين بالشكل 3-2.

الشكل 3-2: توزيع الطلب العالمي على الهيدروجين وفق المنطقة، عام 2022

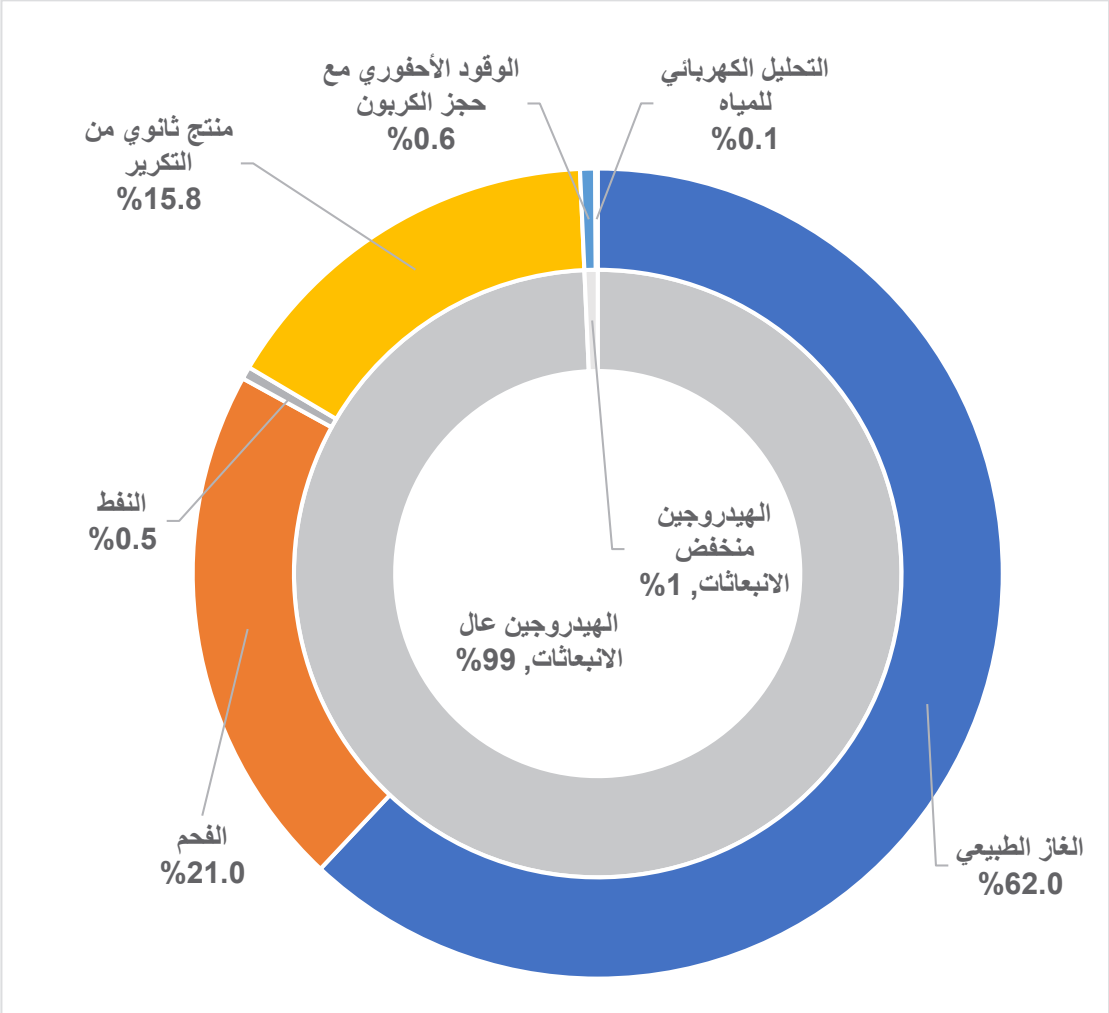


المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

أما من جانب الإنتاج، والذي بلغ 95 مليون طن في عام 2022، فيعد الوقود الأحفوري المصدر الرئيسي لإنتاج الهيدروجين، حيث يساهم الغاز الطبيعي بحصة 62% من الإنتاج العالمي، يليه الفحم الذي يساهم بنحو 21% من الإنتاج العالمي، حيث تعتبر الصين المصدر الرئيسي لإنتاج الهيدروجين القائم على استخدام الفحم، بينما يساهم النفط بنحو 0.5% من الإنتاج العالمي، وبذلك يشكل الوقود الأحفوري (الغاز الطبيعي والفحم والنفط) نحو 83.5% من الإنتاج العالمي للهيدروجين، علماً بأن هذا الإنتاج يصاحبه إطلاق انبعاثات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون.

كما يشكل إنتاج الهيدروجين كمنتج ثانوي في مصانع التكرير ومحطات البتروكيماويات، والذي عادة ما يستخدم مباشرة في عمليات التحويل داخل مصافي التكرير، حصة 15.8% من الإنتاج العالمي. أما الهيدروجين منخفض الانبعاثات (Low Emission Hydrogen)، ويشمل الهيدروجين الذي يتم انتاجه من الوقود الأحفوري مع تطبيق تقنية التقاط وتخزين الكربون وهو ما يعرف باسم الهيدروجين الأزرق، وكذلك الهيدروجين الأخضر والذي يتم إنتاجه عبر التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة، فقد بلغت حصته الإجمالية نحو 0.7% من الإنتاج العالمي. ويشكل الهيدروجين الأزرق الحصة الأكبر من الهيدروجين منخفض الانبعاثات، بينما لا يشكل إنتاج الهيدروجين الأخضر سوى حصة محدودة للغاية، حيث بلغ إنتاجه عام 2022 نحو 100 ألف طن، بما يعادل نحو 0.1% من الإنتاج العالمي من الهيدروجين. يبين الشكل 3-3، توزيع إنتاج الهيدروجين حسب المصدر، وذلك عام 2022.

الشكل 3-3: توزيع إنتاج الهيدروجين حسب المصدر، عام 2022

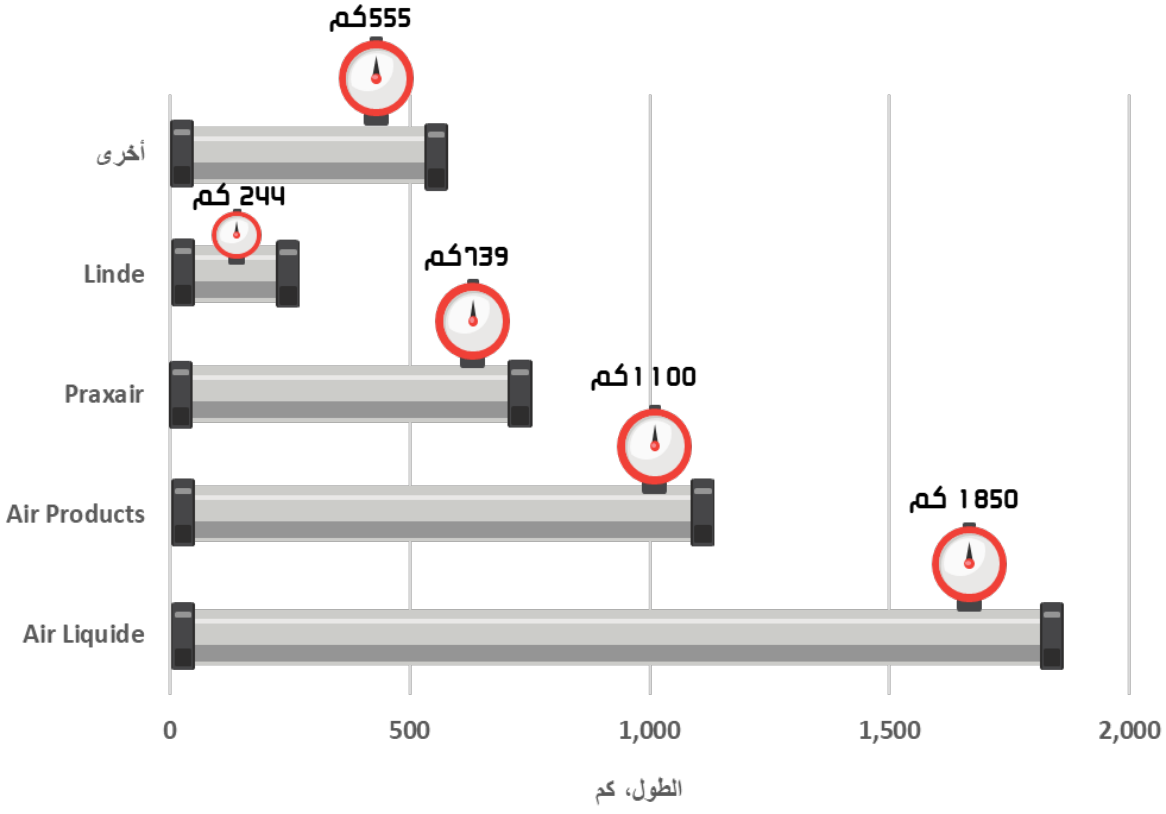


المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

عالمياً، لا يعد الهيدروجين سلعة تجارية وليس له سعر بيع محدد، ولم تنشأ بعد تجارة دولية له على غرار النفط والغاز الطبيعي المسال وباقي السلع التجارية الأخرى، بل يستهلك القسم الأكبر منه في مواقع الإنتاج، ويتم تسويق جزء آخر من الإنتاج من خلال شركات المواد الكيماوية والغازات الصناعية مثل Linde و Airproducts و Airliquide. وتقوم تلك الشركات بإنتاج الهيدروجين في مواقع قريبة جداً من مناطق استهلاكه كمصافي التكرير ومصانع إنتاج الأمونيا والميثانول، وكذلك محطات إعادة التعبئة

بالهيدروجين، ومن ثم تمتلك هذه الشركات البنية التحتية القائمة لنقل الهيدروجين من مناطق الإنتاج وحتى مراكز الطلب، ويشكل ذلك شبكات خطوط أنابيب الهيدروجين، ومقطورات لنقل الهيدروجين سواء في الحالة الغازية أو السائلة. وقد وصل مجموع أطوال شبكات نقل الهيدروجين التي تمتلكها هذه الشركات في الولايات المتحدة وكندا وأوروبا وغيرها إلى قرابة 4,500 كم وفق ما أحصته الدراسة، تتصدرهم شركة Airliquide كما هو مبين بالشكل 3-4.

الشكل 3-4: توزيع ملكية خطوط أنابيب نقل الهيدروجين حسب الشركة المالكة لها



المصدر: من إعداد الباحث استناداً إلى بيانات الشركات المشغلة لخطوط نقل الهيدروجين

وبخلاف شبكات خطوط الأنابيب، تنتشر مقطورات لنقل الهيدروجين سواء في الحالة الغازية أو السائلة في بعض المناطق، مثل الولايات المتحدة الأمريكية، وذلك لنقل الهيدروجين إلى مراكز الطلب مثل محطات إعادة التعبئة بالوقود.

وبخلاف تجارة الهيدروجين القائمة على شبكات صغيرة من خطوط الأنابيب، تعد تجارة الأمونيا منتشرة حول العالم، وتغطي نحو 10% من إجمالي الطلب العالمي، إلى أن استخدامها لا يزال محصوراً كمادة خام في صناعات المواد الكيماوية. كذلك تعد تجارة الميثانول، كنوع من أنواع المواد الحاملة للهيدروجين، منتشرة حول العالم وتغطي نحو 20% من الطلب العالمي، إلا أن استخدامه لا يزال محصوراً في الصناعة الكيميائية كمادة خام. وبالتالي فلا يمكن اعتبار التجارة الحالية للأمونيا والميثانول ضمن مسارات نقل الهيدروجين كونها لا تستهدف نقل الهيدروجين لاستخدامه كوقود في منظومة الطاقة، بل كمواد خام في الصناعة الكيميائية.

3-2: الآفاق المستقبلية لتجارة الهيدروجين

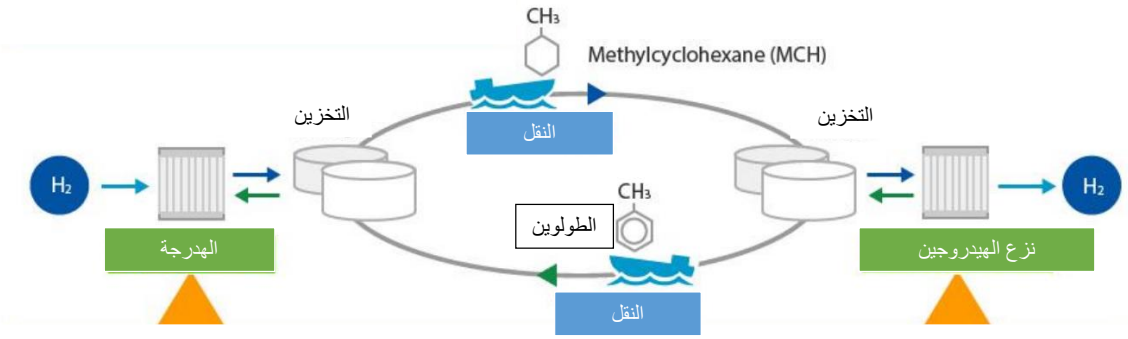
3-2-1: المشاريع الصغيرة التي دخلت حيز التشغيل التجريبي

بدأت بعض الشركات المهتمة بالاستثمار في الهيدروجين في تنفيذ مشاريع تجريبية بغرض التصدير وبناء تجارة دولية بين الدول المصدرة والمستوردة له على غرار تجارة النفط والغاز. وخلال الفترة 2020-2023، تم تشغيل عدة مشاريع تجريبية، وتصدير شحنات تجريبية منها إلى الأسواق المحتملة. حيث تم تصدير شحنات تجريبية من الهيدروجين المسال والمواد العضوية السائلة الحاملة للهيدروجين من أستراليا، وسلطنة بروناي، إلى اليابان بالإضافة إلى شحنة من الجازولين الصناعي (Synthetic Gasoline).

ومن أمثلة الشحنات التجريبية التي تم تصديرها من الهيدروجين والمواد الحاملة له، شحنة مادة الميثيل سيكلوهكسان التي أنتجتها شركة Chiyoda من التولوين (Toluene) في إحدى المحطات التابعة لها بسلطنة بروناي، لاستخدامها كمادة حاملة للهيدروجين، ومن ثم نقلها باستخدام ناقلة مواد كيماوية (Chemical Tanker) إلى مصفاة تكرير في اليابان، لنزع الهيدروجين منها وإعادتها مرة أخرى إلى سلطنة بروناي، لإعادة استخدامها في نقل الهيدروجين.

وبحسب Chiyoda، فقد تم تحميل الناقلة من سلطنة بروناي، ثم وصلت مصفاة التكرير في اليابان في الرابع من شهر فبراير 2022، حيث يتم عمل نزع للهيدروجين، لدراسة التأثير الكامل لهذا النوع من المسارات الحاملة للهيدروجين، وتقييم إمكانية إنشاء سلسلة توريد كبيرة الحجم للميثيل سيكلو هكسان في المستقبل [26]، الشكل 3-5.

الشكل 3-5: سلسلة توريد الهيدروجين باستخدام الميثيل سيكلو هكسان كمادة حاملة له



المصدر: Chiyoda

وقد وصفت Chiyoda هذه الخطوة بأنها حدث بارز كونه الأول من نوعه عالمياً لنقل الهيدروجين عبر تحويله إلى الميثيل سيكلو هكسان ثم نقله باستخدام ناقلة مواد كيمائية. يبين الشكل 3-6، الناقلة Uranus Crane التي

استخدمت في نقل شحنة الميثيل سيكلو هكسان التجريبية من سلطنة بروناي إلى مصفاة تكرير في اليابان.

الشكل 3-6: الناقلة Crane Uranus التي استخدمت في نقل الميثيل سيكلو هكسان من سلطنة بروناي إلى اليابان عام 2022

المصدر: Chiyoda

وبخلاف الشحنة التجريبية للميثيل سيكلو هكسان، شهد العالم في مارس من عام 2023، تصدير أول شحنة من الجازولين الصناعي (Synthetic Gasoline) من تشيلي إلى شرق إنجلترا، والتي بلغت نحو 2,600 لتر وتم تحميلها على ناقلة في رحلة بحرية استغرقت حوالي شهر، ولمسافة 16,800 كم.

وهذه الشحنة التجريبية تم تصنيعها في مشروع Haru Oni التجريبي لإنتاج الوقود الصناعي الكهربائي (E-Fuels)، باستخدام الهيدروجين المنتج عبر التحليل الكهربائي للمياه باستخدام طاقة الرياح[27]، ومن المخطط أن تستخدمها شركة Porsche كوقود للسيارات ضمن مشروع تجريبي لاستخدام هذا النوع من الوقود.

ويعد مشروع Haru Oni الذي يقع في تشيلي، الأول من نوعه لإنتاج الجازولين الصناعي حيادي الكربون، وهو يعتمد على استخدام توربينة رياح بقدرة 3.4 جيجاوات لإنتاج الكهرباء اللازمة في التحليل الكهربائي للمياه لإنتاج الهيدروجين (الشكل 3-7)، بينما يتم التقاط غاز ثاني أكسيد الكربون من الجو، ومن ثم يتفاعل مع الهيدروجين لإنتاج ما يعرف باسم الغاز الاصطناعي (Syngas) الذي يستخدم في مرحلة تالية في إنتاج الميثانول عبر تفاعل كيميائي باستخدام عامل حفاز. أما المرحلة الأخيرة، فيتم من خلالها تبخير الميثانول وتسخينه إلى درجات حرارة عالية ومن ثم تحويله في وجود عامل حفاز إلى جازولين صناعي.

الشكل 3-7: مشروع Haru Oni في تشيلي لإنتاج الوقود الصناعي باستخدام الكهرباء

المصدر: Siemens Energy [28]

وتصل تكلفة الجازولين المنتج من هذا المشروع إلى 100 ضعف تكلفة الجازولين العادي المنتج من الوقود الأحفوري، مما يجعل منه بديل غير تنافسي في الوقت الراهن.

ويخطط الشركاء (Siemens و Porsche) في المشروع لرفع الطاقة الإنتاجية له من 130 ألف لتر إلى 55 مليون لتر في السنة بحلول عام 2025، ضمن خططهم التوسعية لاختبار هذا النوع من الوقود.

وبخلاف شحنات الهيدروجين المسال والوقود الصناعي، تم تحميل عدة شحنات من الأمونيا الزرقاء إلى الأسواق المحتملة في أوروبا وآسيا، لاستخدامها في تطبيقات متنوعة مثل صناعة الأسمدة وتوليد الكهرباء.

وبالرغم من محدودية عدد الشحنات التجريبية لنقل الهيدروجين، إلا أنها كانت بمثابة اللبنة الأولى لاختبار نقل الهيدروجين وفق المسارات المختلفة، كما أنها أعطت نتائج أولية مهمة حول جدوى نقل الهيدروجين لمسافات طويلة وتأثير ذلك على التكلفة وحجم الشحنة المنقولة، وذلك للاستفادة منها في تحسين كفاءة العمليات وتطوير أداء سلسلة القيمة بداية من الإنتاج وحتى وصول الهيدروجين في صورته النهائية إلى قطاعات الاستخدام النهائي في السوق المستورد.

ومن الملاحظ أن اليابان كانت الوجهة الرئيسية لغالبية الشحنات التجريبية من الأمونيا الزرقاء، والهيدروجين المسال والميثيل سيكلو هكسان، حيث تعد اليابان من الدول التي تولي أهمية كبرى في مجال الهيدروجين، ونظراً لمحدودية قدرتها على إنتاج الهيدروجين بما يكفي لتلبية الطلب المحلي عليه مستقبلاً، فستحتاج اليابان إلى استيراد الهيدروجين والمواد الحاملة من الدول المصدر له. يلخص الجدول 3-1 الشحنات الحاملة للهيدروجين التي تم تصديرها من مشاريع تجريبية لإنتاج الأمونيا، والهيدروجين المسال، والميثيل سيكلو هكسان خلال الفترة 2020-2023.

الجدول 3-1: الشحنات الحاملة للهيدروجين التي تم تصديرها من مشاريع تجريبية لإنتاج الأمونيا، والهيدروجين المسال، والمواد العضوية السائلة

آليه تصدير الهيدروجين	مسار الرحلة		نوع الشحنة	حجم الشحنة	التاريخ
	الدولة المصدرة	الدولة المستوردة			
ناقلة أمونيا	المملكة العربية السعودية	اليابان	أمونيا زرقاء	40 طن	2020
ناقلة أمونيا	المملكة العربية السعودية	كوريا الجنوبية	أمونيا زرقاء	25 ألف طن	2022
ناقلة أمونيا	دولة الإمارات العربية المتحدة	ألمانيا	أمونيا زرقاء	13 طن	2022
ناقلة أمونيا	المملكة العربية السعودية	اليابان	أمونيا زرقاء	5,000 طن	2023
ناقلة أمونيا	المملكة العربية السعودية	الهند	أمونيا زرقاء	25 ألف طن	2023
ناقلة أمونيا	المملكة العربية السعودية	الصين	أمونيا زرقاء	25 ألف طن	2023
ناقلة كيماويات	سلطنة بروناي	اليابان	ميثيل سيكلوهكسان	102 طن	2020
ناقلة كيماويات	سلطنة بروناي	اليابان	ميثيل سيكلوهكسان	102 طن	2022
ناقلة هيدروجين مسال	أستراليا	اليابان	الهيدروجين المسال	75 طن	2022
سفينة حاويات	تشيلي	المملكة المتحدة	جازولين صناعي	2,600 لتر	2023

المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

3-2-2: المشاريع المستقبلية لتصدير الهيدروجين

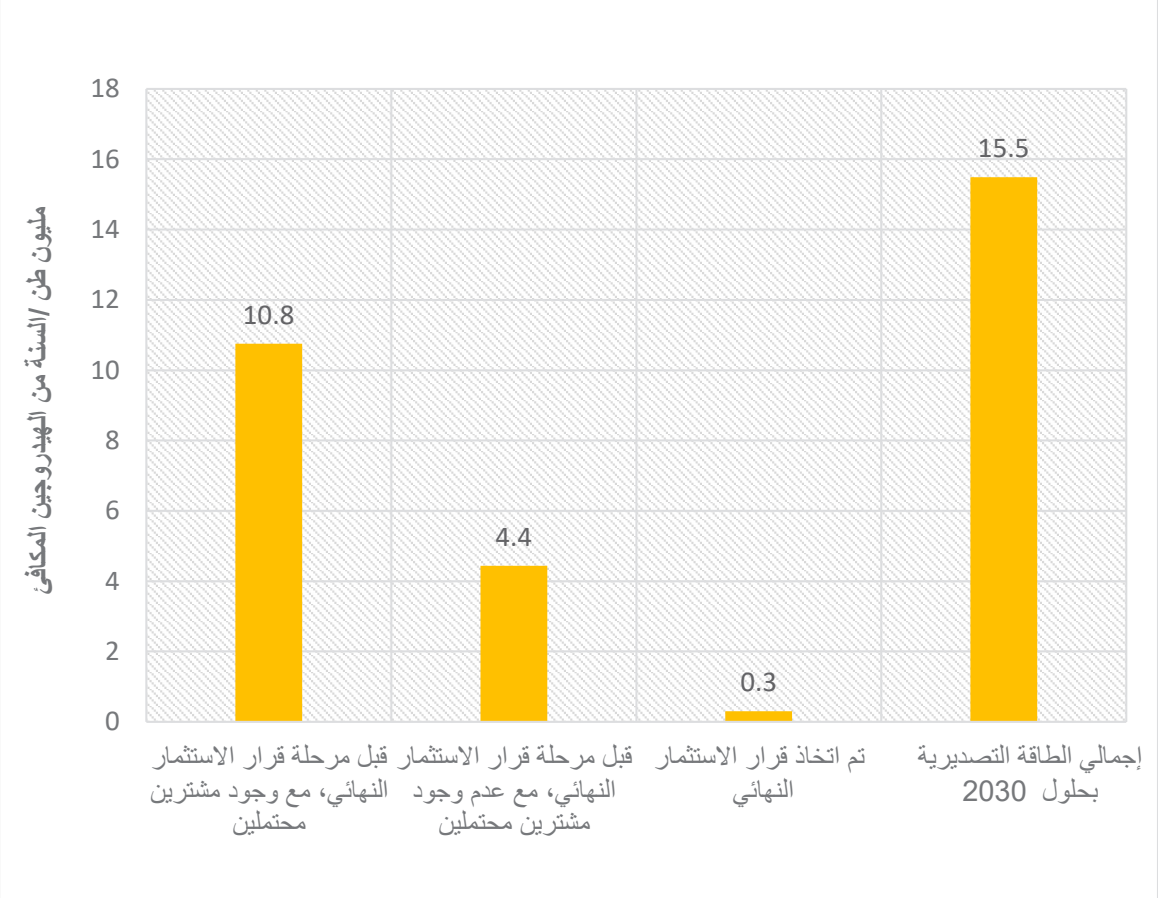
من المتوقع أن يلعب الهيدروجين دوراً رئيسياً في منظومة الطاقة العالمية مستقبلاً للمساهمة في تحقيق الحياد الصفري للانبعاثات (Net-zero Emissions). وعلى هذا الأساس، من المتوقع أن يشهد الطلب على الهيدروجين نمواً كبيراً خلال العقود الثلاثة المقبلة، انطلاقاً من مستوياته الحالية التي بلغت نحو 95 مليون طن في عام 2022.

ولتلبية نمو الطلب المتوقع على الهيدروجين في المناطق التي ستحتاج إلى استيراده، أعلنت عدة دول عن رغبتها في الدخول في سوق الهيدروجين من منطلق التصدير إلى الأسواق المحتملة مستقبلاً، مستفيدة من المقومات التنافسية التي ستمكنها من المنافسة والريادة في هذا السوق الواعد. وقد أسفر ذلك عن الإعلان عن عدة مشروعات بغرض التصدير، التي ستساهم-حال تنفيذها- في تصدير نحو 15.5 مليون طن مكافئ من الهيدروجين سنوياً بحلول عام 2030، أي ما يعادل نحو 40% من الإنتاج المتوقع من الهيدروجين منخفض الانبعاثات بحلول عام 2030، والمقدر بنحو 38 مليون طن/السنة بحسب المشاريع المعلنة للإنتاج، حتى منتصف عام 2023.

وبالرغم من العدد الكبير للمشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها خلال السنوات القليلة المقبلة، إلا أن الغالبية العظمى منها (حوالي 75% من عدد المشاريع) لا تزال في مراحل مبكرة جداً من التطوير ولم تصل بعد إلى مرحلة اتخاذ قرار الاستثمار النهائي، التي تعد المرحلة الرئيسية لتحويل أي مشروع من مرحلة التخطيط إلى مرحلة التنفيذ. أما المشاريع التي تمثل حصة الـ 25% المتبقية، فمنها ما وصل إلى مرحلة اتخاذ قرار الاستثمار النهائي مع أو بدون توقيع اتفاقيات بيع ملزمة مع المشترين أو جاري الانتهاء من إعداد دراسة الجدوى. وإجمالا، فقد بلغ إجمالي الطاقة التصديرية للمشاريع التي تم اتخاذ قرار الاستثمار

النهائي لها حوالي 0.3 مليون طن/السنة من الهيدروجين (مكافئ)، بينما لا يزال أكثر من 15.2 مليون طن/السنة من مشاريع تصدير الهيدروجين في مرحلة ما قبل اتخاذ قرار الاستثمار النهائي. يلخص الشكل 3-8، توزيع المشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها تباعاً حتى عام 2030، حسب الموقف الراهن لها.

الشكل 3-8: توزيع المشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها تباعاً حتى عام 2030، حسب الحالة



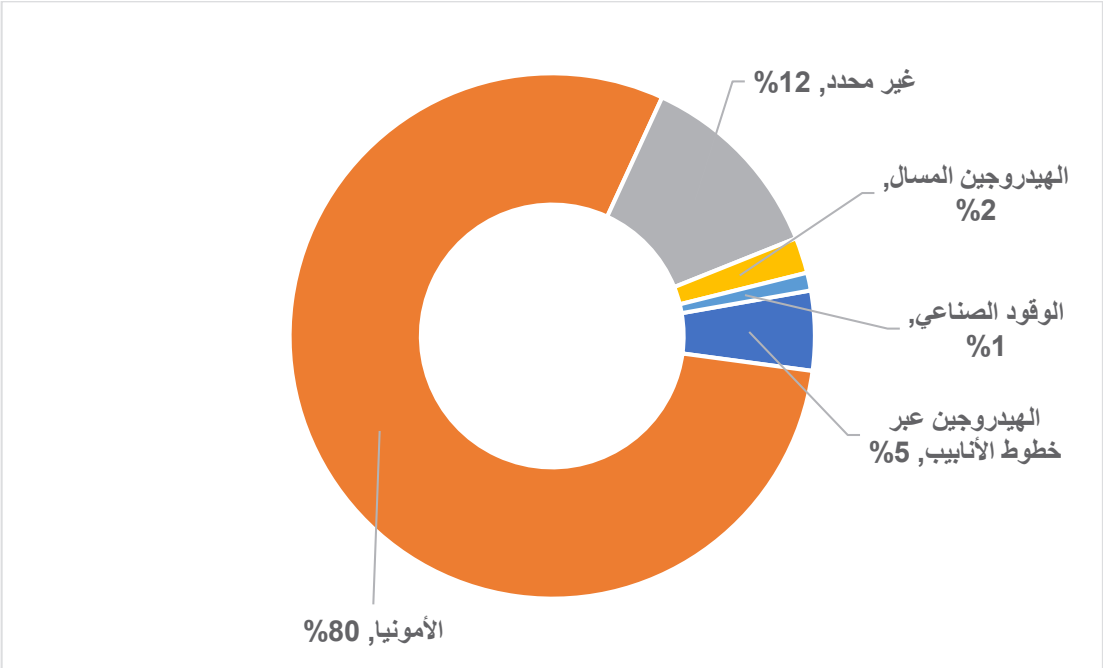
المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

أما عن توزيع هذه المشاريع المعلنة على أساس نوع المسار المستخدم في نقل الهيدروجين، فتتصدر الأمونيا القائمة بحصة 80% من إجمالي الطاقة التصديرية بحلول عام 2030، بينما يحل مسار

نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب في المرتبة الثانية بحصة 5%، والهيدروجين المسال بحصة 2%، أما الوقود الصناعي المنتج باستخدام الكهرباء فيشكل نحو 1%، ولا يزال نحو 12% من المشاريع لم يتحدد بعد الطريقة التي ستستخدم في تصدير الهيدروجين، كما هو مبين بالشكل 3-9.

ويمكن تفسير سبب الزخم الدولي حول مشاريع تصدير الأمونيا التي من المتوقع أن يكون لها الحصة الغالبة في تجارة الهيدروجين بحلول عام 2030، إلى إمكانية استخدامها كمادة خام في صناعة المبيدات الحشرية، أو كوقود في محطات التوليد المشترك للطاقة الكهربائية (Co-generation power plants)، وبالتالي لن تكون هناك حاجة إلى نزع الهيدروجين عنها في السوق المستورد ومن ثم تقليل التكاليف التشغيلية.

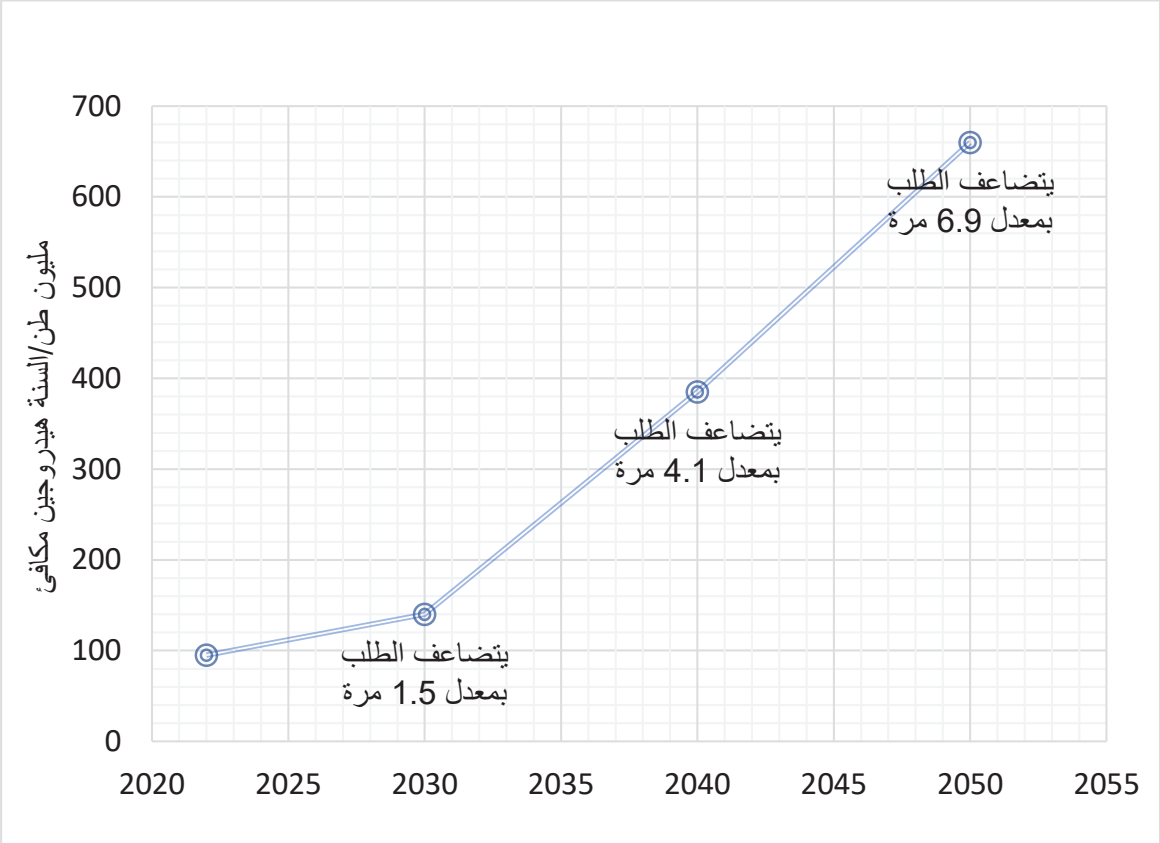
الشكل 3-9: توزيع المشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها تباعاً حتى عام 2030 حسب نوع المسار المستخدم



المصدر: أوابك، وكالة الطاقة الدولية

أما على المدى البعيد بحلول عام 2050، فمن المتوقع أن يستمر الطلب على الهيدروجين في النمو بشكل مضطرد، وذلك في سبيل تحقيق الحياد الكربوني في عدة قطاعات كالقطاع الصناعي، وقطاع النقل، وقطاع توليد الكهرباء، ليبلغ قرابة 385 مليون طن بحلول عام 2040، ثم يستمر في النمو ليبلغ 660 مليون طن بحلول عام 2050، أي ما يزيد عن سبعة أمثال الطلب الحالي على الهيدروجين، كما هو مبين بالشكل 3-10.

الشكل 3-10: توقعات الطلب العالمي على الهيدروجين خلال الفترة 2022-2050

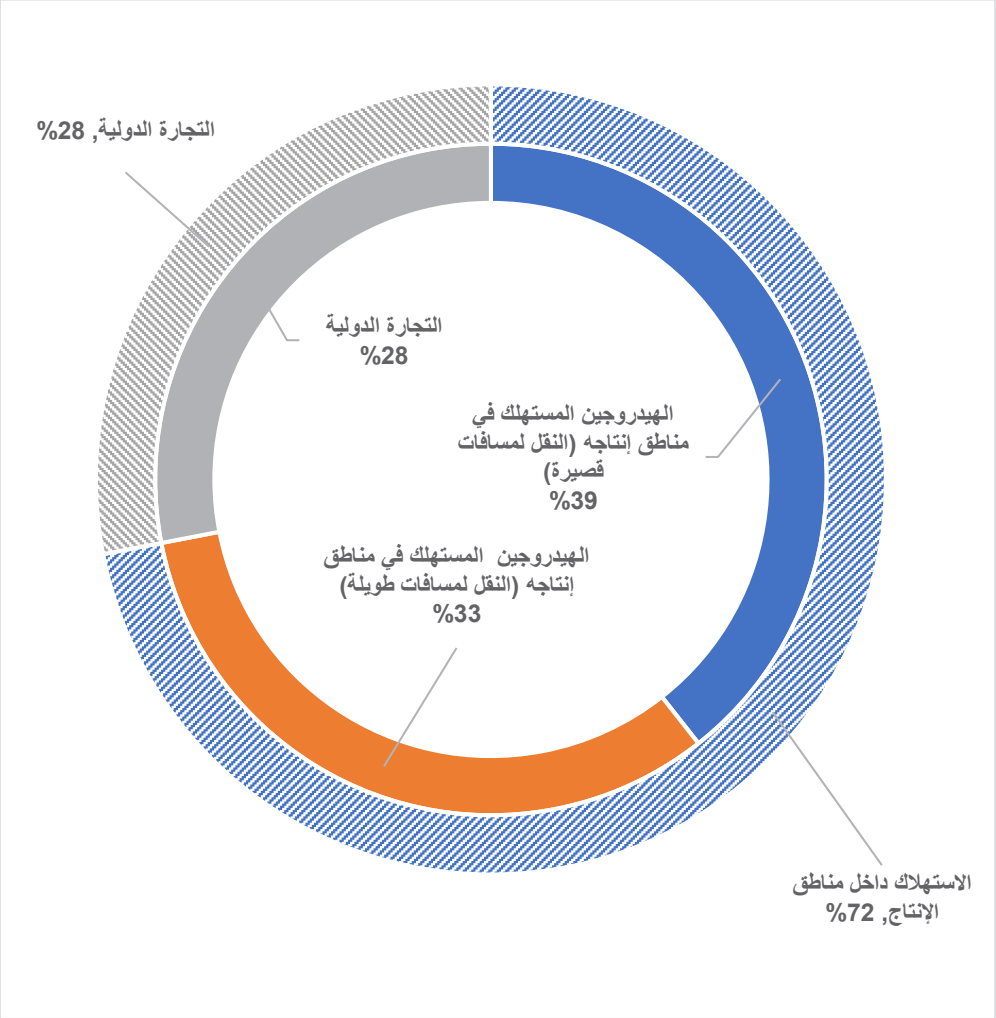


المصدر: من اعداد الباحث استناداً إلى بيانات مجلس الهيدروجين

وفي ضوء هذا السيناريو المتوقع لنمو الطلب العالمي على الهيدروجين، من المتوقع أن تلعب تجارة الهيدروجين دوراً مهما في ربط مواقع الإنتاج التي تتسم بانخفاض تكلفة إنتاج الهيدروجين، بمراكز الطلب التي ستحتاج إلى واردات الهيدروجين ومشتقاته المختلفة بأسعار تنافسية تكون أقل من تكلفة إنتاجه لديها. وفي هذا الصدد، من المتوقع أن يبلغ حجم تجارة الهيدروجين والمواد الحاملة له ومشتقاته كالوقود الصناعي الذي يتم تصنيعه من الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون نحو 185 مليون طن/السنة بما يعادل نحو 28% من إجمالي الطلب العالمي المقدر بنحو 660 مليون طن في عام 2050، أما النسبة المتبقية فهي للهيدروجين الذي سيستهلك محلياً في مناطق إنتاجه والمقدر بنحو 475 مليون طن/السنة، الأمر الذي سيحتاج إلى تأسيس بنى تحتية ضخمة تسمح بنقله وتداوله عبر شبكات ضخمة كما هو الحال مع شبكات الغاز الطبيعي والتي بلغ مجموع أطوالها عالمياً نحو 1.4 مليون كيلومتر حتى نهاية عام 2022، علما بأن الشبكات الحالية لنقل الهيدروجين لا تتجاوز الـ 5,000 كيلو متر.

وهذا الإنتاج الذي سيستهلك محلياً سينقسم إلى جزأين، جزء سيتم إنتاجه ونقله لمسافات قصيرة أقل من 1,000 كم بين مواقع الإنتاج ومواقع الاستهلاك ويقدر بنحو 260 مليون طن/السنة، وجزء آخر سيتم نقله لمسافات طويلة تزيد عن 1,000 كم، وذلك داخل حدود الدول ذات الجغرافية الممتدة مثل الصين، روسيا، وكندا، وهو يقدر بنحو 215 مليون طن/السنة، كما هو مبين بالشكل 3-11.

الشكل 3-11: حصة التجارة الدولية من إجمالي الطلب العالمي على الهيدروجين بحلول عام 2050

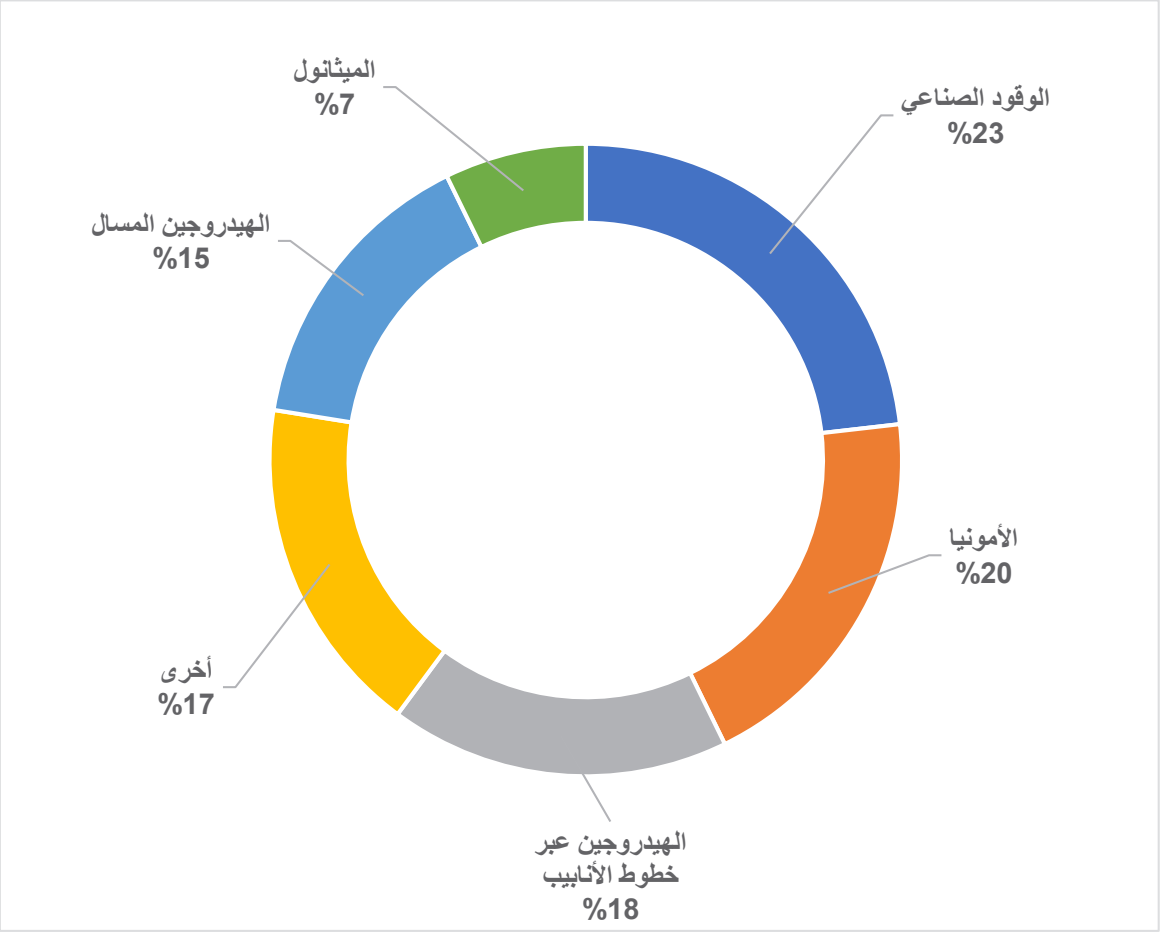


المصدر: مجلس الهيدروجين [29]

أما عن توزيع التجارة الدولية على أساس نوع المسار المستخدم في نقل الهيدروجين ومشتقاته، فمن المتوقع أن تساهم تجارة الوقود الصناعي بحصة 23%، بينما تحل تجارة الأمونيا في المرتبة الثانية بحصة 20%، وسيشكل مسار نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب حصة 18% من إجمالي حجم التجارة العالمية.

بينما من المتوقع أن تشكل تجارة الهيدروجين المسال حصة قدرها 15% من إجمالي التجارة العالمية، أما الميثانول كأحد المواد العضوية الحاملة للهيدروجين فيساهم بنحو 7%، كما هو مبين بالشكل 3-12.

الشكل 3-12: توزيع التجارة الدولية للهيدروجين ومشتقاته بحلول عام 2050



المصدر: أوابك استناداً إلى بيانات مجلس الهيدروجين

3-3: خطط ومشاريع الدول العربية في مجال نقل وتصدير الهيدروجين

3-3-1: مقومات الدول العربية في مجال إنتاج وتصدير الهيدروجين

كانت الدول العربية في صدارة المشهد العالمي للاستثمار في الهيدروجين ومشتقاته، من خلال الإعلان عن عدة مشاريع لإنتاج الهيدروجين بأنواعه سواء الأخضر أو الأزرق، وكذلك الأمونيا الخضراء والزرقاء، بالإضافة إلى الاستثمار في تطبيقات لاستخدامه مثل قطاع النقل عبر السيارات العاملة بخلايا الوقود وكذلك تطبيقات تموين السفن بالأمونيا أو الميثانول.

وتتمتع الدول العربية بعدة عوامل تمكنها من الريادة في سوق الهيدروجين، والظفر بحصة سوقية مهمة في التجارة الدولية له لتضيف دوراً مهماً، بجانب دورها التاريخي كمصدر رئيسي للنفط والغاز منذ عقود الشكل 3-13.

الشكل 3-13: أبرز المقومات التي تملكها الدول العربية للمنافسة في سوق الهيدروجين مستقبلاً

- **توافر بنية تحتية ضخمة للغاز الطبيعي**

تتميز الدول العربية بأن لديها صناعة غازية كاملة قائمة على بنية تحتية ضخمة من حقول منتجة للغاز، ومحطات معالجة، وشبكات نقل وتوزيع، بالإضافة إلى محطات لإسالة الغاز. كما تملك بعض الدول العربية مثل الجزائر وليبيا خطوط أنابيب لتصدير الغاز إلى الأسواق الأوروبية مثل إيطاليا وإسبانيا. علاوة على وجود خطوط أنابيب لتجارة الغاز بين الدول العربية مثل خط الغاز العربي الذي يربط بين مصر والأردن وسوريا ولبنان، وخط غاز دولفين الذي يقوم بنقل الغاز من دولة قطر إلى دولة الإمارات وسلطنة عمان.

وتستطيع الدول العربية استغلال البنية التحتية القائمة لاستغلالها في نقل الهيدروجين بعد إعادة تأهيلها والتأكد من جهوزيتها، وكذلك استغلال خطوط تصدير الغاز لإعادة استغلالها لتصدير الهيدروجين أو خليط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي إلى الأسواق الأوروبية.

وبخلاف خطوط الأنابيب، يوجد المئات من آبار النفط والغاز الناضبة التي يمكن استغلالها للتخزين الجوفي للهيدروجين، وهي أحد الطرق التي تستخدم في تخزين كميات من الهيدروجين لتوفير مخزون كبير للضخ لتلبية الطلب في أوقات الذروة أو تذبذب الإنتاج.

- **توافر مصادر لإنتاج الهيدروجين قليل الانبعاثات بتكلفة منخفضة**

تلعب تكلفة الهيدروجين دوراً محورياً في رسم خريطة التجارة العالمية مستقبلاً عبر تحديد الدول المصدرة والدول المستوردة، فالدول التي لديها مقومات لإنتاجه بأسعار تنافسية هي

التي ستتمكن من تصدير الفائض من إنتاجها إلى الأسواق ذات التكلفة العالية في إنتاج الهيدروجين.

وتعد 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 (المادة الخام المستخدمة في إنتاج الهيدروجين)، 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 [30].

كما تزخر المنطقة العربية بمصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وتعد من بين المناطق ذات الأفضلية لتنفيذ مشروعات الطاقة المتجددة بسبب السمات المتميزة لتلك المصادر، حيث تتمتع الدول العربية بكثافة عالية للإشعاع الشمسي تتراوح بين 2,200-2,550 كيلووات /م^2، وتصل سرعة الرياح في بعض المناطق إلى 9-11 متر/الثانية، وهو ما يضمن تشغيل المحللات الكهربائية المستخدمة في إنتاج الهيدروجين الأخضر، بمعدلات تشغيل مرتفعة تقلل من التكاليف التشغيلية لإنتاج الهيدروجين.

- **الموقع الجغرافي المتميز الذي يتوسط الأسواق المحتملة للهيدروجين**

تتميز المنطقة العربية بموقعها الجغرافي الفريد الذي يقع على مقربة من الأسواق المحتملة للهيدروجين مثل السوق الأوروبي والسوق الآسيوي، وهو الأمر الذي سيقلل من تكاليف نقل الهيدروجين الذي يشكل النصيب الأكبر من السعر النهائي للهيدروجين في الأسواق المستوردة له. ويعد كل من السوق الأوروبي والسوق الآسيوي من الأسواق الواعدة التي تشهد نمواً مستمراً في الطلب على الطاقة منخفضة الكربون، وستحتاج إلى إمدادات من خارج حدودها لتلبية احتياجاتها من الهيدروجين، وهو ما يضمن للمنطقة العربية وجود طلب مستقبلي على الهيدروجين، ومن ثم تستطيع هي بدورها إنتاجه وتصديره إلى هذه الأسواق.

- **الخبرات المتراكمة ورأس المال البشري**

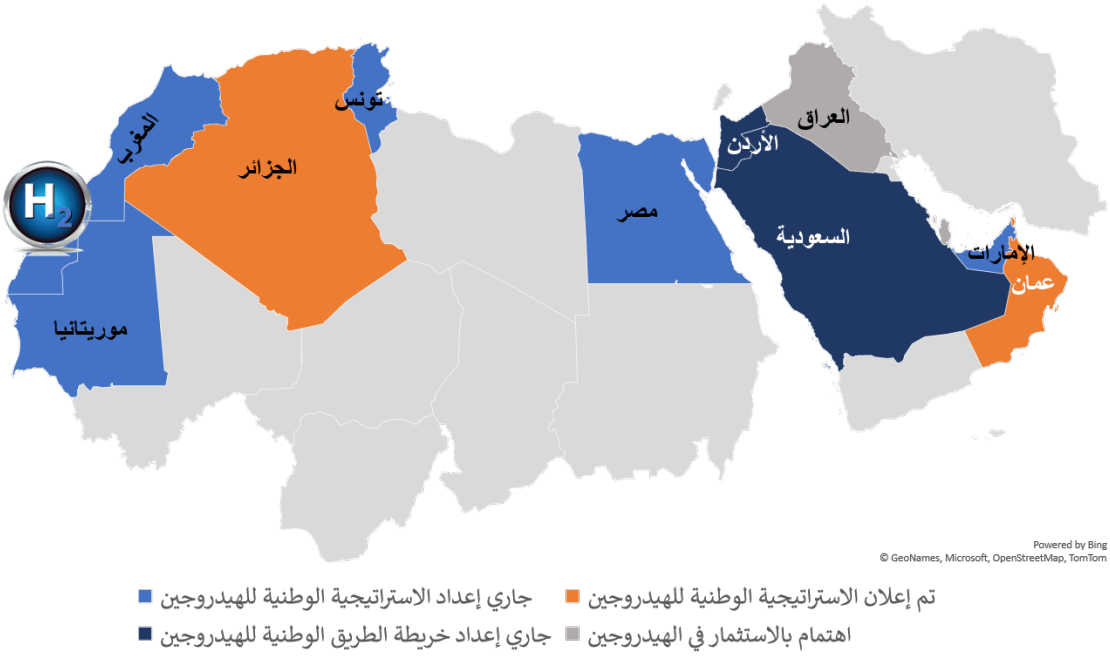
بخلاف الموارد الطبيعية، تزخر أيضاً المنطقة العربية بالكوادر البشرية المؤهلة لبناء اقتصاد للهيدروجين، وهي الكوادر العاملة في قطاع النفط والغاز، حيث يمكن توظيف الخبرات المكتسبة والمتراكمة، والدروس المستفادة لتأسيس هذا القطاع الواعد.

3-3-2: خطط واستراتيجيات الدول العربية في مجال الهيدروجين

اتخذت عدة دول عربية خطوات هامة للبدء في بناء اقتصاد الهيدروجين، وإدماجه ضمن سياسات الطاقة الوطنية، حيث شرع البعض في إعداد وتطوير رؤى وخرائط طريق واستراتيجيات تقوم على تحديد أفضل المسارات (حسب الأولوية الوطنية) لتوفير إمدادات الهيدروجين، وتحديد المجالات والتطبيقات التي يمكن أن يستخدم فيها الهيدروجين.

كما قامت بعض الدول التي تمتلك مقومات لإنتاج الهيدروجين بأسعار تنافسية بدراسة 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. وقد بلغ عدد الدول العربية المهتمة ببناء اقتصاد الهيدروجين (أي تأسيس قطاع متكامل له في الاقتصاد المحلي)، حوالي 9 دول عربية، من بينها الجمهورية الجزائرية وسلطنة عمان التي أعلنت كل منهما عن الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين مؤخراً. كما أنه من المتوقع أن تنتهي كل من دولة الإمارات العربية المتحدة، وجمهورية مصر العربية والمملكة المغربية من إعداد ومراجعة الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين والإعلان عن أهدافها خلال الشهور القليلة المقبلة، الشكل 3-14.

الشكل 3-14: موقف استراتيجيات الهيدروجين في الدول العربية حتى نهاية سبتمبر عام 2023



المصدر: من إعداد الباحث

وقد انعكس هذا الاهتمام من قبل الدول العربية، من خلال وضعها أهداف محددة بأطر زمنية لقدرات إنتاج الهيدروجين والحصة المستهدفة من السوق العالمية، الأمر الذي يعكس حرصها على التواجد في هذا السوق الواعد مستقبلاً والظفر بحصة سوقية مهمة. يبين الجدول 3-1، الأهداف التي وضعتها الدول العربية المهتمة بالاستثمار في إنتاج وتصدير الهيدروجين ومشتقاته.

الجدول 3-1: الأهداف التي وضعتها الدول العربية المهتمة بالاستثمار في إنتاج وتصدير الهيدروجين ومشتقاته

الدولة	الأهداف
الإمارات العربية المتحدة	• 25% من السوق العالمي للهيدروجين بحلول عام 2030 • ضمن أكبر 10 دول منتجة للهيدروجين بحلول عام 2031
المملكة العربية السعودية	• إنتاج الهيدروجين (الأخضر والأزرق) بمعدل 2.9 مليون طن/السنة بحلول عام 2030، ويصل إلى 4 مليون طن/السنة بحلول عام 2035 • إنتاج 11 مليون طن/السنة من الأمونيا الزرقاء بحلول عام 2030
الجمهورية الجزائرية	• إنتاج 40 تيراواط ساعة بحلول عام 2040، أي ما يعادل واحد مليون طن عند تحويله إلى الهيدروجين
جمهورية مصر العربية	• 5% من السوق العالمي للهيدروجين بحلول عام 2040
سلطنة عمان	• إنتاج الهيدروجين الأخضر بمعدل 1-1.25 مليون طن/السنة بحلول عام 2030 • إنتاج الهيدروجين الأخضر بمعدل 3.25-3.75 مليون طن/السنة بحلول عام 2040 • إنتاج الهيدروجين الأخضر بمعدل 7.5-8.5 مليون طن/السنة بحلول عام 2050
المملكة المغربية	• إنتاج الهيدروجين بمعدل 4 تيراواط ساعة للسوق المحلي، بالإضافة إلى 10 تيراواط ساعة بغرض التصدير بحلول عام 2030، وسوف يتطلب ذلك 6 جيجاواط من مصادر الطاقة المتجددة. • 4% من السوق العالمي للهيدروجين بحلول عام 2030، وفق استراتيجية وزارة التنمية المستدامة

المصدر: أوابك

3-3-3: مشاريع تصدير الهيدروجين التي دخلت حيز التشغيل التجريبي

بدأت بعض الدول العربية المهتمة بالاستثمار في الهيدروجين في تنفيذ مشاريع تجريبية بغرض اختبار التصدير إلى الأسواق المستهدفة، وبناء تجارة دولية له على غرار تجارة النفط والغاز. وخلال الفترة 2020-2023، تم تشغيل عدة مشاريع صغيرة (بالأخص الأمونيا الزرقاء)، وتصدير شحنات تجريبية منها إلى اليابان وكوريا الجنوبية والصين والهند.

وقد بدأت باكورة هذه المشاريع في المملكة العربية السعودية حيث قامت أرامكو بتنفيذ مشروع استرشادي (Demonstration Project) لإنتاج الأمونيا الزرقاء بالتعاون مع شركة سابك ومعهد اقتصاديات الطاقة في اليابان (IEEJ). وقد تم تصدير أول شحنة تجريبية من المشروع إلى اليابان في شهر أيلول/سبتمبر 2020 بحمولة 40 طن من الأمونيا الزرقاء 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 [31، 32].

وللحصول على الاعتماد الدولي بأن شحنات الهيدروجين والأمونيا المنتجة قليلة الانبعاثات، حصلت كل من أرامكو السعودية وسابك للمغذيات الزراعية في أغسطس 2022، على أول اعتماد في العالم من شركة TUV rheinland ومقرها ألمانيا، وهي تعد جهة تفتيش محايدة، حيث منحت TUV rheinland هذه الشهادة إلى شركة سابك للمغذيات الزراعية لإنتاج نحو 37,800 طن من الأمونيا الزرقاء، وإلى شركة "ساسرف" المملوكة بالكامل لشركة أرامكو لإنتاج 8,075 طن من الهيدروجين الأزرق[33].

وقد تم تصدير أول شحنة تجريبية حمولة 25 ألف طن حاصلة على شهادة معتمدة كأمونيا منخفضة الانبعاثات في نوفمبر 2022، والتي تسلمتها شركة Lotte Fine Chemical (LFC) في كوريا الجنوبية[34]، ، كما تم تصدير شحنة أخرى معتمدة من الأمونيا الزرقاء، لم يتم الإفصاح عن حجمها، إلى شركة Fuji Oil Company (FOC) في أبريل من عام 2023 لاستخدامها وقودًا لتوليد الكهرباء في مصفاة Sodegaura في اليابان[35]. كما قامت المملكة العربية السعودية بتصدير شحنات تجريبية أخرى من الأمونيا الزرقاء وصلت إلى أسواق آسيوية أخرى من بينها الصين [36]، والهند [37].

أما في دولة الإمارات العربية المتحدة، فقد قامت شركة بترول أبوظبي الوطنية (أدنوك) بتصدير عدة شحنات تجريبية من محطة "فرتيل" الذي تديره شركة Fertiglobe (مشروع مشترك بين شركة أدنوك وشركة OCI)، حيث تم تصدير الشحنة التجريبية الأولى من الأمونيا الزرقاء في أغسطس 2021 إلى شركة Itchu اليابانية لاستخدامها في إنتاج الأسمدة، في إطار الجهود المشتركة لتعزيز التعاون الصناعي بين دولة الإمارات واليابان، ودعم تطوير سلاسل توريد جديدة للأمونيا الزرقاء بين البلدين. وقد أعقب ذلك تصدير عدة شحنات تجريبية من الأمونيا إلى شركات يابانية [38] خلال عامي 2021و2022 لاستخدامها في تطبيقات مختلفة مثل توليد الكهرباء.

وفي إطار سعيها لتوسيع شراكتها الاستراتيجية في مجال الطاقة لتشمل جميع مكونات وجوانب سلسلة القيمة للهيدروجين، قامت أدنوك بتحميل شحنة تجريبية أخرى من الأمونيا منخفضة الكربون وتصديرها إلى ألمانيا في سبتمبر 2022، وذلك لصالح شركة Aurubis التي تعد واحدة من الشركات الكبرى في إعادة تدوير النحاس على مستوى العالم، ويقع مقرها الرئيسي في

هامبورغ بألمانيا[39]. وتعد هذه الشحنة الأولى من نوعها ضمن عدة شحنات تجريبية تعتزم "أدنوك" تصديرها لعملائها في ألمانيا.

يلخص الجدول 3-2 الشحنات التي تم تصديرها من مشاريع تجريبية لإنتاج الأمونيا في الدول العربية إلى الأسواق الأوروبية والآسيوية.

الجدول 3-2: الشحنات التي تم تصديرها من مشاريع تجريبية لإنتاج الأمونيا في الدول العربية

الدولة المصدرة	الدولة المستوردة	الشحنة	حجم الشحنة	مجال الاستخدام	تاريخ الشحنة
المملكة العربية السعودية	اليابان	أمونيا زرقاء	40 طن	توليد الكهرباء	سبتمبر 2020
	كوريا الجنوبية	أمونيا زرقاء (معتمدة)	25 ألف طن	تصنيع الكيماويات	نوفمبر 2022
	اليابان	أمونيا زرقاء (معتمدة)	لم يتم الإفصاح	الحرق المشترك مع الفحم لتوليد الكهرباء	أبريل 2023
	الهند	أمونيا زرقاء	5,000 طن	المبيدات الحشرية	مايو 2023
	الصين	أمونيا زرقاء	25,000 طن	تصنيع الكيماويات	مايو 2023
دولة الإمارات العربية المتحدة	اليابان	أمونيا زرقاء	لم يتم الإفصاح	الأسمدة	أغسطس 2021
	اليابان	أمونيا زرقاء	لم يتم الإفصاح	-	2021
	اليابان	أمونيا زرقاء	لم يتم الإفصاح	-	أغسطس 2021
	اليابان	أمونيا زرقاء	لم يتم الإفصاح	توليد الكهرباء	يونيو 2022
	ألمانيا	أمونيا زرقاء	13 طن	مادة خام، ووقود لتوليد الكهرباء	سبتمبر 2022

المصدر: من إعداد الباحث

3-3-4: الآفاق المستقبلية لمشاريع تصدير الهيدروجين في الدول العربية

أبدى العديد من الدول العربية الاهتمام بالاستثمار في تنفيذ مشاريع تجارية على نطاق واسع لتصدير الهيدروجين والمواد الحاملة له مثل الأمونيا والميثيل سيكلوهكسان إلى الأسواق المحتملة في آسيا وأوروبا. والتي كانت في مجملها أكثر من عدد المشاريع التي استهدفت إنتاج وبيع الهيدروجين في السوق المحلي واستخدامه في بعض القطاعات مثل قطاع النقل والقطاع الصناعي.

وإجمالا فقد بلغ عدد المشروعات المعلنة والمقترحة في الدول العربية بغرض التصدير (Export Oriented) حتى نهاية شهر سبتمبر 2023، نحو 47 مشروعاً من إجمالي 82 مشروعا معلناً للاستثمار في إنتاج وتصدير الهيدروجين وتطبيقات استخدامه. وبالرغم من العدد الكبير للمشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها خلال السنوات القليلة المقبلة، إلا أن القسم الأكبر لا يزال في مراحل مبكرة من التطوير، ولم يصل بعد إلى مرحلة اتخاذ قرار الاستثمار النهائي، التي تعد المرحلة الرئيسية لتحويل أي مشروع من مرحلة التخطيط إلى مرحلة التنفيذ.

على مستوى الدول، تتصدر **جمهورية مصر العربية** قائمة الدول العربية في عدد مشاريع تصدير الهيدروجين والأمونيا بإجمالي 14 مشروعاً، منها 12 مشروع لتصدير الأمونيا ومشروعين لتصدير الميثانول. وقد شهدت مصر خلال عام 2022، قفزة في عدد الاتفاقيات الموقعة مع شركات إقليمية وعالمية لتنفيذ مشروعات لإنتاج الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء بلغ مجموعها نحو 16 مذكرة تفاهم واتفاقية إطارية، حيث تم توقيع 9 اتفاقيات على هامش فعاليات قمة المناخ (COP27)، التي انعقدت في مدينة شرم الشيخ المصرية.

ومن المشاريع التي تم توقيعها، مشروع لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المنطقة الاقتصادية لقناة السويس ينفذه تحالف تقوده شركة "مصدر" الإماراتية ويضم شركة" حسن علام" المصرية وشركة Infinity Power. حيث وقع التحالف المسؤول عن المشروع على الاتفاقية الإطارية مع الحكومة المصرية في نوفمبر 2022. وبحسب الاتفاقية، سيبرم التحالف الاتفاق الملزم مع صندوق مصر السيادي، وشركة نقل الكهرباء، وهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة لوضع الشروط العامة لتنفيذ المشروع. ويخطط التحالف أن يتم تشغيل المرحلة الأولى من المشروع بحلول عام 2026، باستخدام 2 جيجاوات المحللات الكهربائية، على أن يتم رفع طاقتها إلى 4 جيجاوات بحلول عام 2030 ضمن برنامج التحالف الذي سيشمل مشروع آخر على ساحل البحر الأبيض المتوسط، ليصل إنتاج المشروعين معاً إلى 480 ألف طن/السنة من الهيدروجين الأخضر، ونحو 2.3 مليون طن من الأمونيا الخضراء المعدة للتصدير إلى جانب تزويد الصناعات المحلية بالهيدروجين الأخضر[40].

وتحل **المملكة العربية السعودية** في القائمة في المرتبة الثانية بسبعة مشاريع كبرى لتصدير الهيدروجين ومشتقاته مثل الأمونيا، وفي مقدمتها مشروع "نيوم" للهيدروجين الأخضر، لإنتاج 650 طن/اليوم من الهيدروجين الأخضر، و1.2 مليون طن/السنة من الأمونيا الخضراء. وقد تم توقيع اتفاق تطوير المشروع بين الشركاء (شركة نيوم، وشركة أكوا باور، وشركة Airproducts) في يوليو 2020، وتم إتمام الإغلاق المالي للمشروع عند 8.4 مليار دولار، حسب ما أعلنته شركة نيوم للهيدروجين الأخضر، الشركة المطورة للمشروع، في مايو 2023 [41].

بينما تحل **دولة الإمارات** في المرتبة الثالثة عربياً بإجمالي ستة مشاريع مخصصة للتصدير من بينها مشروع مقترح لتصدير الهيدروجين إلى اليابان بعد تحويله إلى الميثيل سيكلو هكسان كمادة حاملة له. حيث وقعت شركة بترول أبو ظبي الوطنية (أدنوك) مذكرة تفاهم لتقييم جدوى المشروع الفنية والاقتصادية مع كل من

ENEOS وMitsui اليابانيتين لتقييم إمكان تحويل الهيدروجين الذي ينتج كمنتج ثانوي من عمليات "أدنوك" في مجال التكرير والبتروكيماويات في منطقة الرويس الصناعية إلى ميثيل سيكلو هكسان (MCH) ضمن المرحلة الأولى من المشروع، على أن يتم في المرحلة الثانية استخدام الغاز الطبيعي من مشروع جديد لإنتاج الهيدروجين الأزرق مع تطبيق تقنية التقاط وتخزين الكربون. وقد اتفقت الأطراف على إعداد دراسة الجدوى والتصميمات الهندسية للمشروع المقترح، بطاقة أولية 50 ألف طن /السنة، ثم إعداد دراسة جدوى أخرى لتقييم إمكانية رفع الطاقة الإنتاجية للمشروع بشكل تجاري إلى 200 ألف طن/السنة[42].

أما **سلطنة عمان**، فتحل في المرتبة الرابعة بستة مشروعات معلنة مخصصة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته مثل الأمونيا، حيث تولي سلطنة عمان أهمية كبرى للاستثمار في الهيدروجين الأخضر لما لديها من موارد للطاقة المتجددة كطاقة الرياح والطاقة الشمسية بخصائص مميزة كارتفاع سرعة الرياح في بعض المناطق إلى حدود كافية لتشغيل أجهزة التحليل الكهربائي للمياه بمعدلات تشغيل مرتفعة.

ومن أمثلة المشاريع المعلنة في هذا الصدد، مشروع هايبورت الدقم (Hyport Duqm)، وهو مشروع لإنتاج الأمونيا الخضراء بطاقة 330 ألف طن خلال المرحلة الأولى من تطوير المشروع باستخدام 1.3 جيجاوات من مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. على أن يتم رفع الطاقة الإنتاجية إلى 650 ألف طن /السنة من الأمونيا الخضراء خلال المرحلة الثانية من المشروع باستخدام 2.7 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وقد وقعت كل من شركة أو كيو العمانية وشركة DEME البلجيكية اتفاقية تطوير المشروع في يونيو 2023 [43].

وتعد **المملكة المغربية** من الدول العربية التي أبدت رغبة كبيرة بالاستثمار في الهيدروجين الأخضر، لما يتوافر لديها من مصادر كافية لإنتاجه بمعدلات تشغيل عالية، حيث بلغ عدد المشروعات المعلنة بغرض التصدير نحو ثلاثة مشاريع. ويعد مشروع Amun بإقليم كلميم واد نون جنوب المغرب، أكبر مشروع لإنتاج الهيدروجين الأخضر في المغرب بطاقة 900 ألف طن/السنة، باستخدام 15 جيجاوات من مصادر الطاقة المتجددة. وبحسب الشركة المطورة للمشروع CWP، فسيتم تنفيذ المشروع على مرحلتين، حيث سيتم خلال المرحلة الأولى بناء 6 جيجاوات من طاقة الرياح والطاقة الشمسية، ثم إضافة 9 جيجاوات أخرى في المرحلة الثانية، على أن يتم تنفيذ مرحلة ثالثة في المستقبل بعد الانتهاء من الدراسات اللازمة[44]. ولدراسة أفضل خيار لتصدير الهيدروجين من المشروع، وقعت CWP على مذكرة تفاهم مع شركة Hydrogenious LOHC في مايو 2023، لتنفيذ دراسة جدوى مشتركة بغية تقييم إمكانية تصدير 500 طن/اليوم من الهيدروجين إلى أوروبا عبر تحويله إلى مواد عضوية سائلة حاملة له باستخدام تقنيات شركة Hydrogenious LOHC المتخصصة في هذا المجال[45].

وفي **الجمهورية الجزائرية**، بلغت حصيلة المشاريع المعلنة والمخطط دراستها للتصدير نحو ثلاثة من بينها دراسة مشروع إنشاء خط أنابيب جديد لتصدير الهيدروجين من الجزائر إلى إيطاليا، حيث تم توقيع مذكرة التفاهم الخاصة بدراسة المشروع بين شركة سوناطراك وشركة Eni الإيطالية في يناير 2023. وتعد الجزائر من الدول العربية التي أعلنت عن الاستراتيجية الوطنية للهيدروجين وذلك في شهر مارس 2023. وهي تخطط لإنتاج 40 تيراوات ساعة بحلول عام 2040، أي ما يعادل واحد مليون طن عند تحويله إلى الهيدروجين. وبحسب اللجنة الوطنية لتطوير الهيدروجين، فإن الجزائر تسعى لإنتاج هذه الكمية وتوجيهها نحو التصدير خاصة إلى الأسواق الأوروبية بسعر تنافسي، بهدف تغطية نحو 10% من الواردات المتوقعة

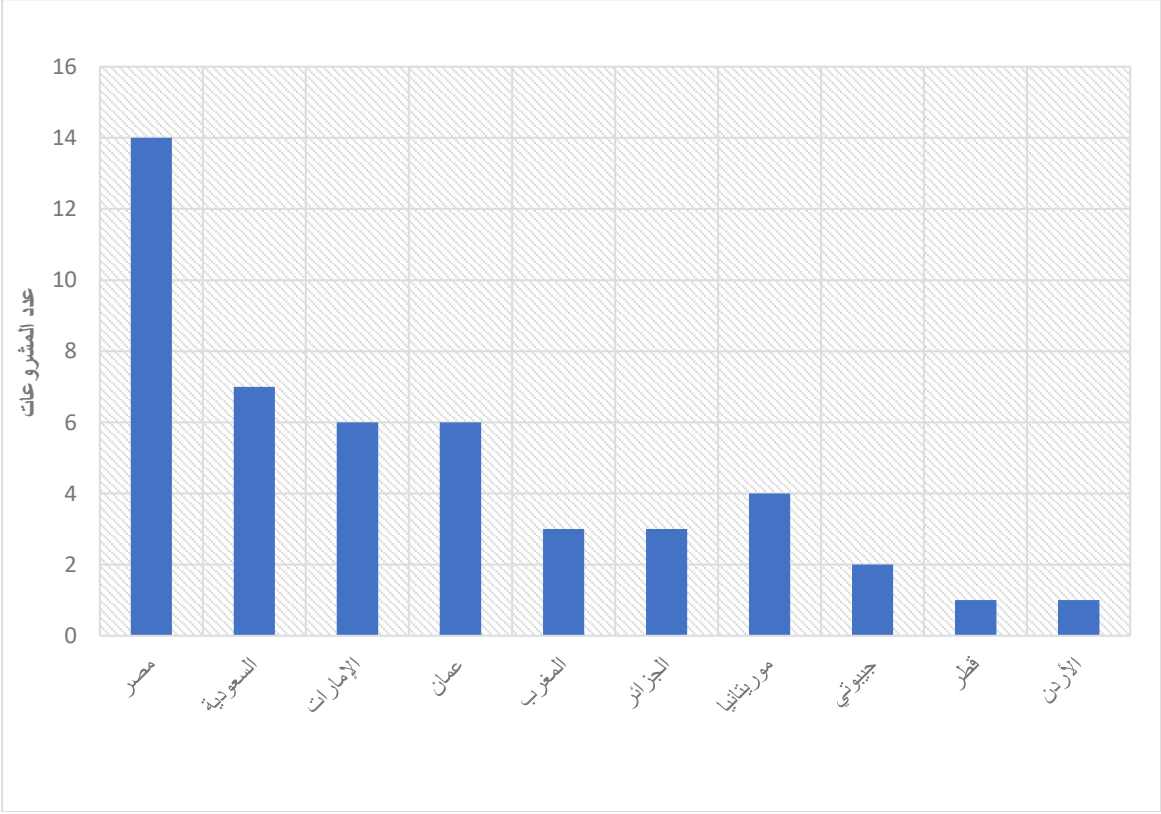
للسوق الأوروبي والمقدرة بنحو 10 مليون طن/السنة، وذلك بحلول عام 2040 .كما رصدت وزارة الطاقة والمناجم موازنة بين 25 و 30 مليار دولار لاستغلال الهيدروجين الأخضر في الجزائر.

أما في **دولة قطر**، فقد تم الإعلان في أغسطس 2022، عن مشروع ضخم لإنتاج الأمونيا الزرقاء في مدينة مسيعيد الصناعية، ستقوم بتنفيذه كل من شركة "قطر للطاقة للحلول المتجددة" وشركة "قطر للأسمدة الكيماوية (قافكو)"، التابعتان لشركة "قطر للطاقة". وقد تم توقيع اتفاقيات تنفيذ المشروع بطاقة إنتاج تبلغ 1.2 مليون طن/السنة من الأمونيا الزرقاء، على أن يدخل طور الإنتاج في الربع الأول من عام 2026، ويعد المشروع المقترح في دولة قطر أكبر منشأة لتصنيع الأمونيا الزرقاء في العالم من حيث الطاقة الإنتاجية.

وفي موريتانيا، بلغت حصيلة المشاريع المعلنة للتصدير نحو أربعة مشاريع من بينها مشروع " نور" للهيدروجين الأخضر، الذي يعد أحد أكبر مشاريع الهيدروجين الأخضر المقترحة في أفريقيا، حيث سيمتد على مساحة 8,600 كيلومتر مربع، ويقوم على استخدام نحو 10 جيجاوات من مصادر الطاقة المتجددة، بما يكفي لإنتاج 1.2 مليون طن/السنة من الهيدروجين الأخضر بحلول عام 2030. وبحسب دراسة الجدوى الأولية التي أعلنتها Chariot في مايو 2022، يمكن أن يصبح مشروع "نور" للهيدروجين الأخضر من أكثر المشروعات تنافسية في العالم بسبب وفرة الموارد الطبيعية في موريتانيا. ولضمان تنفيذ المشروع وتوفير التمويل اللازم له، أبرمت شركة Chariot البريطانية المطورة للمشروع في سبتمبر من عام 2022 اتفاق شراكة مناصفة مع شركة Total Eren لتنفيذ المشروع وإجراء دراسة جدوى متعمقة، ودراسة إمكانية تصدير الهيدروجين إلى أوروبا[46].

وتعد **جيبوتي**، أحدث الدول العربية التي أعلنت عن نيتها الدخول في مجال الهيدروجين لما يتوافر لديها من مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية إلى جانب البنية التحتية للموانئ، مما يجعلها موقعًا جذابًا لإنتاج الهيدروجين الأخضر. ويوجد في جيبوتي مشروعان مقترحان لتصدير الهيدروجين الأخضر، من بينهما مشروع لإنتاج الهيدروجين الأخضر ستقوم بتنفيذه شركة Fortescue Future Industries (FFI)، والتي وقعت على اتفاقية إطارية مع الحكومة في عام 2022، لإجراء الدراسات اللازمة لتقييم تنفيذ المشروع.

الشكل 3-15: المشاريع المعلنة والمقترحة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته في الدول العربية، حتى نهاية سبتمبر 2023



المصدر: من إعداد الباحث

أما عن توزيع مشاريع التصدير المعلنة والمقترحة في الدول العربية على أساس نوع المسار المستخدم في نقل الهيدروجين ومشتقاته، فقد شكلت

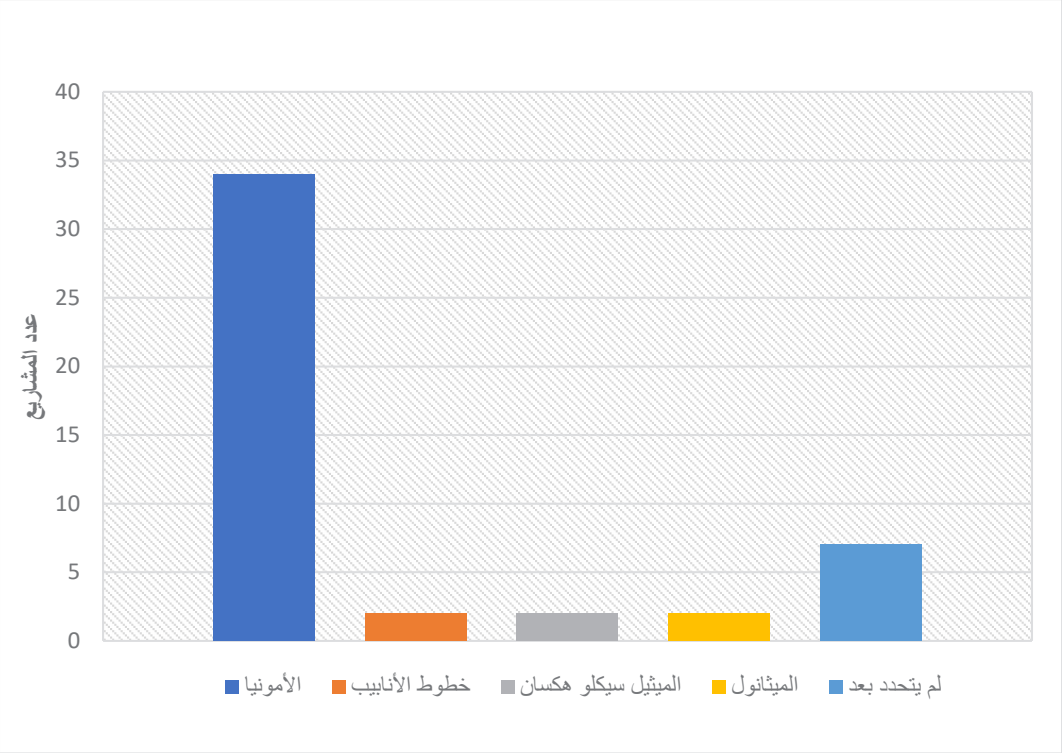
الأمونيا الحصة الكبرى من هذه المشاريع، مع مشروعين للميثيل سيكلو هكسان أحدهما في دولة الإمارات التي كانت أول من بدأ دراسة إنشاء سلسلة لتوريد الهيدروجين إلى اليابان عبر تحويله إلى الميثيل سيكلو هكسان، ومشروع آخر قيد الدراسة في المملكة المغربية.

كما تشمل المشاريع والدراسات المقترحة للتصدير مشروعين مقترحين لنقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب في الجمهورية الجزائرية التي تتميز بموقعها الجغرافي الفريد القريب من السوق الأوروبي، والروابط التاريخية معه كون الجزائر أحد أكبر الدول المصدرة للغاز الطبيعي إلى أوروبا. ومن الملفت أن حزمة المشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين في الدول العربية لا تضم أي مشاريع للهيدروجين المسال، التي لا تزال غير جاذبة للاستثمار بسبب التكاليف الرأسمالية والتشغيلية العالية، علاوة على أن التقدم التكنولوجي في إنتاج ونقل الهيدروجين المسال لا يزال بحاجة إلى مزيد من التطوير خلال العقود المقبلة.

كما تضم القائمة مشاريع أخرى مقترحة للتصدير ولكن لم يتحدد بعد الطريقة التي ستستخدم لنقل الهيدروجين، وإن كان على الأرجح ستكون عبر تحويل الهيدروجين إلى أمونيا.

يلخص الشكل 3-16، توزيع المشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته في الدول العربية على أساس نوع المسار المستخدم في نقل الهيدروجين حتى نهاية سبتمبر 2023.

الشكل 3-16: توزيع المشاريع المعلنة والمقترحة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته في الدول العربية على أساس نوع المسار المستخدم في نقل الهيدروجين



المصدر: من إعداد الباحث

الخلاصة والاستنتاجات

تعد القدرة على نقل الهيدروجين من مناطق إنتاجه بكميات كبيرة إلى مراكز الطلب المختلفة حول العالم بمرونة عالية ودون عوائق، شرطاً أساسياً للاعتماد عليه كوقود في منظومة الطاقة العالمية في المستقبل. وحيث أن الهيدروجين الأخضر يعتمد في إنتاجه على استغلال الطاقة المتجددة المتوفرة في عدة دول، فستسمح تجارة الهيدروجين بنقل الطاقة النظيفة إلى أي منطقة حول العالم، الأمر الذي سيعزز من الأمن الطاقوي والتعاون الدولي في تقليل الانبعاثات والحد من تغير المناخ.

وبموجب الحلول التقنية المتاحة، **قسمت الدراسة** مسارات نقل وتصدير الهيدروجين في التجارة الدولية إلى أربعة مسارات وهي إما نقل الهيدروجين بعد ضغطه عبر خطوط الأنابيب (هيدروجين مضغوط)، أو إسالته إلى هيدروجين مسال عند -253 درجة مئوية ونقله باستخدام الناقلات. كما يمكن تحويل الهيدروجين إلى أمونيا ونقله بالناقلات. وكذلك يمكن نقل الهيدروجين عبر تحويله إلى مركبات عضوية سائلة مثل الميثيل سيكلو هكسان ونقلها بالناقلات. وبخلاف نقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب التي ينقل فيها في حالته الغازية، تعد الطرق الثلاث الأخرى بمثابة مواد حاملة له، مما يتطلب إعادة تحويلها مجدداً إلى الهيدروجين في حالته الغازية ليكون جاهزاً للاستخدام.

وتتدخل عدة عوامل في المقارنة بين بدائل نقل الهيدروجين، من بينها كثافة التخزين الحجمية، والتي ستحدد الكمية التي يمكن نقلها من الهيدروجين لوحدة الحجم للمادة الحاملة له (1 متر مكعب)، ويعد الميثيل سيكلو هكسان الأقل في كثافة التخزين الحجمية، حيث يحتوي 1 متر مكعب منه على 47.1 كيلوجرام من الهيدروجين، وترتفع في حالة الهيدروجين المضغوط (ضغط 100 بار، ودرجة حرارة 25 درجة مئوية) حيث يحتوي واحد متر مكعب على 49.4 كيلوجرام من الهيدروجين. بينما

يحتوي واحد متر مكعب من الهيدروجين المسال على 70.8 كيلوجرام من الهيدروجين، أما في حالة الأمونيا، فيحتوي واحد متر مكعب منها على 120 كجم من الهيدروجين، وهي القيمة الأعلى مقارنة بباقي المواد الأخرى.

كما يجب عند المقارنة لاختيار البديل المناسب لنقل الهيدروجين الأخذ بعين الاعتبار الطاقة المستخدمة في عملية التحويل (الإسالة، الهدرجة، تصنيع الأمونيا) وإعادة التحويل (التبخير، نزع الهيدروجين، تكسير الأمونيا)، وعملية التحميل والتفريغ في الموانئ. **وقد توصلت الدراسة إلى** أن عملية نقل الهيدروجين تستهلك قدراً كبيراً من الطاقة، والتي تشكل بالنهاية طاقة مهدرة للحصول على الهيدروجين، وبالتالي فإنها تشكل عاملاً مؤثراً في اعتماد الهيدروجين كمصدر للطاقة في المستقبل. ففي حالة الهيدروجين المضغوط، تبلغ احتياجات الطاقة المطلوبة لنقله عبر خطوط الأنابيب نحو 10 ميجاجول لكل كجم هيدروجين أي ما يعادل 7% من طاقة الهيدروجين المنقول وهي الأقل مقارنة بباقي البدائل، بينما تصل إلى 31% من طاقة الهيدروجين المنقول في حالة الأمونيا. أما في حالة الميثيل سيكلو هكسان، فتبلغ الطاقة المطلوبة نحو 37.6% من طاقة الهيدروجين المنقل، وتصل الطاقة المهدرة إلى أعلى قيمة لها في حالة الهيدروجين المسال والتي قد تصل إلى 49.3% من طاقة الهيدروجين المنقول.

وعن التكلفة الحالية لنقل الهيدروجين والمواد الحاملة له، بعد الأخذ في الاعتبار تكاليف عمليات التحويل (الإسالة، الضغط، تخليق الأمونيا، الهدرجة) وإعادة التحويل (التبخير، تكسير الأمونيا، نزع الهيدروجين)، فقد قدرتها الدراسة بنحو 0.78 دولار لكل كجم من الهيدروجين في حال استخدام خطوط الأنابيب، بينما تصل إلى أعلى قيمة لها في حالة الهيدروجين المسال لتبلغ 8.25-11 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ. بينما تشكل تكلفة نقل الأمونيا نحو 4.31-6.62 دولار لكل كجم من

الهيدروجين المكافئ، وتبلغ في حالة الميثيل سيكلوهكسان إلى 26-4.64 دولار لكل كجم

تعد تكاليف نقل الهيدروجين مرتفعة للغاية في الوقت الراهن، بل وتصل -في بعض المسارات-إلى أكثر من ضعف تكلفة إنتاج الهيدروجين نفسه كما هو الحال مع الهيدروجين المسال، إلا أن هذه التكلفة مرشحة للتراجع مع مرور الوقت استناداً إلى التقدم في ثلاث عوامل: تحسن اقتصاديات الحجم، تطور التقنيات المستخدمة في نقل الهيدروجين وتحسين كفاءتها، والتعلم عبر الممارسات المكتسبة من عمليات التشغيل.

وفي هذا الصدد، تشير كافة التوقعات التي توصلت إليها الدراسة إلى إمكانية حدوث تراجع في التكاليف التشغيلية والرأسمالية لنقل الهيدروجين مع انطلاق مرحلة التشغيل التجاري بسعات كبيرة. وهو مسار متوقع، مرت به كافة التقنيات الناضجة اليوم مع خضوعها للتطوير المستمر، بعد أن كانت تقنيات وليدة لم تصل إلى الحالة التجارية الكاملة. وعلى هذا الأساس، تبرز خطوط الأنابيب على قمة الخيارات الأقل في التكلفة لنقل الهيدروجين في المدى المتوسط بحلول عام 2030، تليه الأمونيا بتكلفة قد تصل في أفضل الحالات إلى حدود 2 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ. وسيظل خيار الهيدروجين المسال، الخيار الأعلى في التكلفة والذي قد يتخطى 7.5 دولار لكل كجم من الهيدروجين المكافئ.

في سياق آخر، توصلت الدراسة إلى أن عدد المشاريع المعلنة بغرض التصدير ستساهم-حال تنفيذها- في خلق تجارة دولية للهيدروجين ومشتقاته تبلغ نحو 15.5 مليون طن مكافئ من الهيدروجين بحلول عام 2030، أي ما يعادل نحو 40% من الإنتاج المتوقع من الهيدروجين منخفض الانبعاثات خلال نفس الفترة، والمقدر بنحو 38 مليون طن/السنة بحسب المشاريع المعلنة. لكن وبالرغم من هذا الحجم الضخم من المشاريع، لم يتم اتخاذ قرار الاستثمار النهائي سوى لحوالي 0.3 مليون

طن/السنة من الهيدروجين (مكافئ)، بينما لا يزال أكثر من 15.2 مليون طن/السنة من مشاريع تصدير الهيدروجين في مرحلة ما قبل اتخاذ قرار الاستثمار النهائي، **الأمر الذي يشير إلى أن خطط الاستثمار في تصدير الهيدروجين لا تسير بالشكل المأمول.**

على الصعيد العربي، أبدى العديد من الدول العربية الاهتمام بالاستثمار في تنفيذ مشاريع تجارية على نطاق واسع لتصدير الهيدروجين والمواد الحاملة له مثل الأمونيا والميثيل سيكلوهكسان إلى الأسواق المحتملة في آسيا وأوروبا.

وبحسب ما قدرته الدراسة، فقد بلغ عدد المشروعات المعلنة والمقترحة في الدول العربية بغرض التصدير حتى نهاية شهر سبتمبر 2023، نحو 47 مشروعاً من إجمالي 82 مشروعا معلناً للاستثمار في إنتاج وتصدير الهيدروجين وتطبيقات استخدامه. وتمثل الأمونيا الحصة الكبرى من هذه المشاريع، مع مشروعين للميثيل سيكلو هكسان أحدهما في دولة الإمارات التي كانت أول من بدأ دراسة إنشاء سلسلة لتوريد الهيدروجين إلى اليابان عبر تحويله إلى الميثيل سيكلو هكسان، ومشروع آخر قيد الدراسة في المملكة المغربية. كما تشمل القائمة مشروعين مقترحين لنقل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب في الجمهورية الجزائرية. ومن الملفت أن حزمة المشاريع المعلنة لا تضم أي مشروع للهيدروجين المسال، الذي لا يزال خياراً باهظ التكاليف، علاوة على أن التقدم التكنولوجي في إنتاج ونقل الغاز الهيدروجين المسال لا يزال بحاجة إلى مزيد من التطوير خلال العقود المقبلة. كما تضم القائمة مشاريع أخرى مقترحة للتصدير لم يتحدد بعد الطريقة التي ستستخدم لنقل الهيدروجين، وإن كان على الأرجح ستكون عبر تحويل الهيدروجين إلى أمونيا. وبالرغم من هذا العدد الكبير للمشاريع المعلنة لتصدير الهيدروجين ومشتقاته المزمع دخولها خلال السنوات القليلة المقبلة، إلا أن القسم الأكبر لا يزال في مراحل مبكرة من التطوير، ولم يصل بعد إلى مرحلة اتخاذ قرار الاستثمار النهائي، التي تعد المرحلة الرئيسية لتحويل أي مشروع من مرحلة التخطيط إلى مرحلة التنفيذ.

التوصيات

تعد تكاليف نقل الهيدروجين مرتفعة للغاية في الوقت الراهن، وهي عامل مؤثر في اعتماد الهيدروجين كوقود في مزيج الطاقة في المستقبل، ولتقليل التكاليف وتعزيز الدور الذي يمكن أن يقوم به الهيدروجين في المستقبل، توصي الدراسة بما يلي:

- استغلال خطوط أنابيب النفط والغاز القائمة-بعد إعادة تقييمها- لنقل الهيدروجين، خاصة أن ذلك ممكناً من الناحية الفنية، بعد مطابقتها للشروط والمواصفات الفنية القياسية، حيث سيساهم ذلك في تقليل التكاليف الرأسمالية الضخمة المطلوبة لبناء خطوط أنابيب جديدة أو سلسلة توريد جديدة لنقل الهيدروجين على صورة مواد حاملة له مثل الميثيل سيكلو هكسان أو الهيدروجين المسال.
- بناء وحدات نموذجية كاملة في ورش التصنيع، ونقلها مباشرة إلى موقع المشروع المراد تنفيذه لإنتاج وتصدير الهيدروجين، لتقليل تكاليف الإنشاء، وأجور العمالة.
- توحيد المواصفات القياسية في التصميم، ويشمل ذلك تصميمات أجهزة التحليل الكهربائي، ووحدات إسالة الهيدروجين، وصهاريج تخزين الهيدروجين المسال، وغيرها.
- الاستثمار في المشاريع الإنتاجية الكبيرة، وسلاسل الإمداد الطويلة، لتشجيع الشركات المتخصصة في تصنيع المكونات الصغيرة على تصنيع مكونات أكبر.
- استمرار دعم عمليات البحث والتطوير لتحسين كفاءة عمليات التحويل وإعادة التحويل في نقل الهيدروجين، والذي سينعكس إيجاباً على تقليل تكلفة نقل الهيدروجين.
- أهمية إبرام عقود بيع ملزمة مع المشترين المحتملين، تشكل ضمانة لجدوى الاستثمار في مشاريع تصدير الهيدروجين في الدول العربية.

المراجع

[1] SP GLOBAL;" UK's gas grid ready for 20% hydrogen blend from 2023: network companies"
https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/electric-power/011422-uks-gas-grid-ready-for-20-hydrogen-blend-from-2023-network-companies

[2] ITM Power;" HyDeploy project: Establishing the blending of up to 20% Green Hydrogen into the normal gas supply
https://itm-power.com/projects/hydeploy

[3] Pipeline Technology Journal (PTJ); "Britain's Gas Grid to Accept 20% Hydrogen Blend by 2023, Preparations Underway"; February 2022.
https://www.pipeline-journal.net/news/britains-gas-grid-accept-20-hydrogen-blend-2023-preparations-underway

[4] DNV and Carbon Limits;" Restream: Study on the reuse of oil and gas infrastructure for hydrogen and CCS in Eurpe"; October 2021. Available;
https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2021/10/Re-stream-key-figures-October-2021.pdf

[5] Offshore Energy;" World's 1st LH2 shipment exported via Suiso Frontier"; February 14, 2022
https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-lh2-shipment-exported-via-suiso-frontier/

[6] hydrogen Energy Supply Chain (HESC); " The Suiso Frontier: facts"
https://www.hydrogenenergysupplychain.com/supply-chain/the-suiso-frontier/

[7] Offshore Energy;" Suiso Frontier brings world's 1st LH2 shipment to Japan"; February 25, 2022.
https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan/

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

[9] Airproducts;" Liquid hydrogen: Safety program"; 2014.
https://www.airproducts.com/industries/hydrogen-energy/hydrogen-fuel-safety

[10] Oxford Institute for Energy Studies (OIES);" Global trade of hydrogen: what is the best way to transfer hydrogen over long distances?"; September 2022.

[11] US department of energy (DOE)"" DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record"; 2009.

[12] نفس المصدر رقم 10

[13] Roland Berger;" Hydrogen Transportation: The key to unlocking the clean hydrogen economy"; October 2021.

https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Transporting-the-fuel-of-the-future.html

[14] evcvaluation; The Cost-to-Capacity Method and Scale Factors"; July 2015.
https://evcvaluation.com/the-cost-to-capacity-method-and-scale-factors/

[15] Ammonia Energy association;"The capital intensity of small-scale ammonia plants; January 19, 2018.

https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-capital-intensity-of-small-scale-ammonia-plants/

[16] IRENA;" Global Hydrogen Trade To Meet The 1.5°C Climate Goal: Part II- Technology review of hydrogen carriers"; 2022.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf?rev=3d707c37462842ac89246f48add670ba

[17] Offshore Energy Magazine;" EPS, Jiangnan ink deal for construction of world's largest ammonia carriers"; May 8, 2023.

https://www.offshore-energy.biz/eps-jiangnan-ink-deal-for-construction-of-four-worlds-largest-ammonia-carriers/

[18] Offshore Energy Magazine;" Eastern Pacific pens deal for world's largest ammonia carrier pair, orders up to 10 more ships from different yards"; September 6, 2023.
https://www.offshore-energy.biz/eastern-pacific-pens-deal-for-worlds-largest-ammonia-carrier-pair-orders-u-to-ten-more-ships-from-different-yards/#:~:text=The%20latest%20order%20brings%20Eastern,Jiangnan%20Shipbuilding%20in%20May%202023.

[19] IEA;" Energy Technology Perspective 2023"; January 2023.

[20] NASA;" World's Largest Liquid Hydrogen Tank Nearing Completion"; March 11, 2022.
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220004276/downloads/Cold%20Facts_LH2%20Sphere%20Update.pdf

[21] McDermott's CB&I Storage Solutions;" McDermott's CB&I Storage Solutions Completes Conceptual Design for World's Largest Liquid Hydrogen Sphere"; December 12, 2021.
https://s22.q4cdn.com/787409078/files/doc_news/2021/08/26/McDermotts-CBI-Storage-Solutions-Completes-Conceptual-Design-for-Worlds-Largest-Liquid-Hydrogen-Sphere.pdf

[22] نفس المصدر رقم 18

[23] maritime-executive;" China's CNOOC is Building the World's Largest LNG Storage Tanks"; Feb 22, 2022.
https://maritime-executive.com/article/china-s-cnooc-is-building-the-world-s-largest-lng-storage-tanks

[24] James E. Fesmire and Adam Swanger; NASA;" Overview of the New LH2Sphere at NASA Kennedy Space Center"; August 18th, 2021

[25] نفس المصدر السابق

[26] Chiyoda corp.; Hydrogen transportation in the form of MCH by chemical tanker"; February 8, 2022.
https://www.chiyodacorp.com/media/20220208_E_R1.pdf

[27] Hydrogen Insight;" First batch of e-fuel, made from green hydrogen and captured CO2, heading from Chile to UK for Porsche testing"; March 24, 2023.
https://www.hydrogeninsight.com/transport/first-batch-of-e-fuel-made-from-green-hydrogen-and-captured-co2-heading-from-chile-to-uk-for-porsche-testing/2-1-1425160

[28] CNET;" Construction starts on sustainable, synthetic eFuel plant in Chile"; September 10, 2021.

https://www.cnet.com/roadshow/news/synthetic-efuel-plant-porsche-siemens-energy/

[29] Hydrogen council;" Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization"; October 2022.

https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf

[30] وائل حامد عبد المعطي، الهيدروجين ودوره في عملية تحول الطاقة، مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد السابع والأربعون، 2021، العدد 179.

[31] 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

[32] 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

[33] Aramco;" Aramco and SABIC Agri-Nutrients receive world's first TÜV certificate of accreditation for "blue" hydrogen and ammonia products"; August 2022.

https://www.aramco.com/en/news-media/news/2022/aramco-and-sabic-agri-nutrients-receive-worlds-first-tuv-certificate

[34] SABIC;" SABIC AGRI-NUTRIENTS, SAUDI ARAMCO AND LOTTE FINE CHEMICALS COORDINATE ARRIVAL OF WORLD'S FIRST COMMERCIAL SHIPMENT OF CERTIFIED CLEAN (BLUE) AMMONIA IN SOUTH KOREA FROM SAUDI ARABIA"; December 12, 2022.

https://www.sabic.com/en/news/38365-sabic-agri-nutrients-saudi-aramco-and-lotte-fine-chemicals-coordinate-arrival-of-world-s-first-commercial-shipment-of-certified-clean-blue-ammonia-in-south-korea-from-saudi-arabia

[35] أرامكو، "تصدير أول شحنة أمونيا قليلة الانبعاثات معتمدة لتوليد الطاقة من المملكة إلى اليابان"، أبريل 2023

https://www.aramco.com/ar/news-media/news/2023/low-carbon-ammonia-shipment

[36] Ma'aden ;" Ma'aden blue ammonia exports to China and major markets helping to cut carbon emissions globally"; May 18, 2023.
https://www.maaden.com.sa/en/news/details/577#:~:text=Saudi%20Arabian%20Mining%20Company%20(Ma,carbon%20emissions%20from%20supply%20chains.

[37] ZAWYA;" SABIC Agri-Nutrients exports first shipment of low-carbon ammonia to India"; May 4, 2023.
https://www.zawya.com/en/business/energy/sabic-agri-nutrients-exports-first-shipment-of-low-carbon-ammonia-to-india-va88fvxq

[38] S &P global commodity insights;" INPEX, two other Japanese companies transport clean ammonia from UAE's ADNOC"; June 30, 2022.
https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/063022-inpex-two-other-japanese-companies-transport-clean-ammonia-from-uaes-adnoc

[39] ADNOC;" ADNOC Sends First Low-Carbon Ammonia Shipment from the UAE to Germany"; September 1, 2022.
https://adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2022/adnoc-sends-first-low-carbon-ammonia-shipment-from-the-uae-to-germany

[40] CISION;" Masdar-led consortium strengthens partnership to advance landmark 4 GW green hydrogen program in Egypt"; November 16, 2022.
https://www.prnewswire.com/news-releases/masdar-led-consortium-strengthens-partnership-to-advance-landmark-4-gw-green-hydrogen-program-in-egypt-301680393.html

[41] NEOM;" NEOM GREEN HYDROGEN COMPANY COMPLETES FINANCIAL CLOSE AT A TOTAL INVESTMENT VALUE OF USD 8.4 BILLION IN THE WORLD'S LARGEST CARBON-FREE GREEN HYDROGEN PLANT"; May 22, 2023

https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment

[42] Offshore Energy Magazine;" ADNOC, ENEOS, Mitsui to look into clean hydrogen supply chain between UAE and Japan"; June 7, 2022.

https://www.offshore-energy.biz/adnoc-eneos-mitsui-to-look-into-clean-hydrogen-supply-chain-between-uae-and-japan/

[43] DEME;" HYPORT DUQM CONSORTIUM SIGNS A MAJOR AGREEMENT WITH HYDROM FOR THE DEVELOPMENT OF GREEN HYDROGEN"; June 21, 2023.
https://www.deme-group.com/news/hyport-duqm-consortium-signs-major-agreement-hydrom-development-green-hydrogen

[44] ICIS;" CWP Global, Hydrogenious LOHC ink MoU for ammonia export from Morocco to Europe"; May 4, 2023.
https://www.icis.com/explore/resources/news/2023/05/04/10882019/cwp-global-hydrogenious-lohc-ink-mou-for-ammonia-export-from-morocco-to-europe/

[45] Hydrogenious;" CWP Global and Hydrogenious LOHC Technologies explore green hydrogen transport chain from Morocco to Europe in feasibility study"; May 4 2023.
https://hydrogenious.net/cwp-global-and-hydrogenious-lohc-technologies-explore-green-hydrogen-transport-chain-from-morocco-to-europe-in-feasibility-study/

[46] Chariot;" PROJECT NOUR"
https://chariotenergygroup.com/operations/green-hydrogen/

البحث الثاني

تحويل زيوت المحركات المستهلكة إلى مشتقات نفطية مفيدة

أ.د. ياسر توفيق حورية *

(البحث يعكس رأي المؤلف ولا يعبر بالضرورة عن رأي منظمة أوابك)
(The article reflects the opion of the author and not necessarily that of OAPEC)

* استاذ في كلية هندسة البترول في الجامعة السورية الخاصة - دمشق - سورية

تحويل زيوت المحركات المستهلكة الى مشتقات نفطية مفيدة

Transforming Used Lubricating Motor oils to Useful Petroleum products

(البحث يعكس رأي المؤلف ولا يعبر بالضرورة عن رأي منظمة أوابك)
(The article reflects the opion of the author and not necessarily that of OAPEC)

ملخص:

تم تحويل زيوت االمحركات المستهلكة (UMO) الى مشتقات نفطية مفيدة جاهزة للاستخدام المباشر بدون أية معالجات لاحقة، وتحقق المواصفات البريطانية، حيث تم جمع الزيت المستهلك (المحروق) بأنواعه كافة من محطات وورش تبديل زيوت محركات السيارات، ومن ثم نقلها إلى خزان حيث تم ترقيدها لعدة أيام فانفصلت الشوائب وفتات المعادن والاسفلتينات التي ترسبت في قعر الخزان.

سخن الزيت الرائق المُرقد حتى الدرجة (200 °C) لفصل آثار الماء والمواد الخفيفة، ثم خضع لعملية تقطير تحت الفراغ (10 mmHg)، وتم أخـــذ القطـفة التي درجة غليانها مـا بيـن (263 – 565°C) وكان مردودها (80 %wt.) وعُدت من قبلنا المادة **الخام الأساسـية** التي خضعت لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف في وحدة مخبرية نصف صناعية مصممه لهذا الغرض.

استخدم وسيطين صلبين مستخدمين في مصافي النفط، وتمت عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف بوجود الهيدروجين الناتج عن عملية تحسين النفتا وعند الشروط المُثلى المُحددة من قبلنا، وتم اخذ عينات من الغازات الناتجة وتحليلها، أما المواد السائلة المُتكاثفة الناتجة فقد خضعت الى عملية تقطير جوي حيث تم فصلها بحسب درجات غليانها إلى القطفات المرغوبة.

دلت النتائج التي حصلنا عليها في الشروط المثلى المحددة من قبلنا لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف وباستخدام أي من الوسيطين المستخدمين في هذا البحث أنه يمكن الحصول على القطفات النفطية المرغوبة حسب مجال درجات غليانها وبما يحقق المواصفات التجارية المطلوبة، وأمكن الحصول على (3-4% وزناً) غاز مسال (LPG) و(10-12% وزناً) نفتا و (11-13% وزناً) كيروسين و (24-29 % وزناً) مازوت و (32-40%وزناً) مخلفات(فيول)، وأن محتوى النفتا من المركبات العطرية بلغ (18% وزناً) وأن باقي الخصائص تشير الى إمكانية استخدام هذه القطفات مباشرة بدون أية معالجات لاحقة لأنها حققت الخصائص المحددة وفق المواصفات البريطانية، وأن نسبة الكبريت وآثار المعادن كانت ضمن الحدود المقبولة.

Key words: Used lubricating motor oils, Catalytic mild hydrocracking, Catalysts, Liquid petroleum gases, Naphta, kerosene, gas oil; residuals fuel.

1- المسح المرجعي: Literature review

تشكل زيوت تزليق المحركات المستهلكة (UMO) مشكلة بيئية كبيرة للهواء والماء والتراب في العالم الحديث والمتطور، وتركزت الأبحاث وعلى مدى عقود عدة لإيجاد طرق تقنية لتحويل زيوت المحركات المستهلكة الى مازوت أو الى مشتقات نفطية مفيدة بهدف الاستفادة من هذه الزيوت واسترجاع المركبات الهيدروكربونية ولمعالجة أثر هذه الزيوت على البيئة [1,2].

يقدر أن كميات الزيوت المستهلكة في العالم بلغت حوالي 20 مليون طن سنوياً [3] وهذا يدل على الحاجة الى إدارة هذه النفايات بشكل مستدام ولحماية البيئة، وإن مثل هذه التقنيات سوف تحقق فائدة اقتصادية لأن هذه الزيوت المستهلكة تعد مصدراً هاماً للطاقة وهي مركبات هيدروكربونية قيّمة ولا يجوز هدرها بطرق عشوائية لا تحقق معايير التنمية المستدامة ولا تنسجم مع قوانين حماية البيئة.

تحتوي الزيوت المستهلكة على مواد ضارة، مثل المعادن الثقيلة والمركبات العطرية متعددة الحلقات (PAHs)، ومواد كيميائية أخرى تسبب ضرراً للبيئة والصحة [2]، ووثقت شواهد على أنها مسرطنة وتسبب طفحات جلدية [3,4]، وقد حظرت إدارة السلامة والصحة المهنية الأميركية (OSHA)استخدام الزيوت المستهلكة وعدتها فضلات يجب معالجتها بأية طريقة كانت [5,6].

اعتُمدت طرق تقنية عديدة لمعالجة (UMO) وأبسطها حرقها للاستفادة من الطاقة الحرارية المتولدة عنها في الغلايات وفي التدفئة، وبالرغم من أن حرقها مفيد الا أنه مكلف وأضراره البيئية أكبر [7] وهذا جعل هذا الخيار أقل فائدةً. جرت محاولات عديدة لاسترجاع زيوت الأساس من (UMO) واستخدمت طرق بدائية كالمعالجة بحمض الكبريت وهي منتشرة في دول شرق آسيا ولكنها لم تنتج زيوتاً بنوعية جيدة.

توجد طرق كيميائية عديدة أخرى لتحويل (UMO) الى مازوت أو زيت أساس مجدد، فقد سجلت براءة اختراع [8] لتحويل الزيت المستهلك كيميائياً الى مازوت وزيت مجدد وذلك بترشيحه ومن ثم إضافة محلول ماءات الصوديوم والماء الأكسجيني مع التسخين حتى الدرجة (80-90 ^{o}C) ولمدة (8-12 h) فتنفصل طبقة عليا تصفى وتؤخذ لجهاز التقطير الجوي للحصول على المازوت، وعند الوصول الى الدرجة (286-310 ^{o}C) يوقف التقطير الجوي ويضاف مركب أميني ويتابع التقطير تحت الفراغ فينتج زيت تزليق مُجدد. تم كذلك تحويل (UMO) الى وقود سائل (ديزل) بديلاً عن الديزل الناتج من النفط [9] في مفاعل مخبري صغير (حوجلة) سعة (70 cm^3) عند الدرجة (375 - 425 ^{o}C) وعند ضغط هيدروجين (1-4 Mpa) وزمن تفاعل (10-90 min.) بوجود وسيط كبريتات الزركونيوم، وتم الحصول على منتجات نفطية مثل النفتا والكيروسين والمازوت الخفيف والثقيل ومخلفات، كما جرت محاولات لتحويل (UMO) الى وقود ذو نوعية أفضل، وتم ذلك عن طريق

تكسير الزيت وتغيير تركيب مكوناته كيميائياً بإضافة متفاعلات متنوعة. من الطرق الأخرى للمعالجة ما قام بـه البروفيسور (Chase Howard) أستاذ الهندسة الكيميائية الحيوية في جامعة كامبردج وزملائه [10] بتحويل 90% من (UMO) الى وقود وذلك بتعريض خليط من الزيت الى أشعة المايكروويف بوجود ماصة لهذه الأشعة وأنتجوا مزيجاً معروفاً من البنزين ووقود الديزل ويقولون: " إن استعادة الزيت باستخدام هذه الطريقة أظهر ميزاتها بالمقارنة مع طرق معالجة الزيت المستهلك الأخرى وينصحون بتحويلها الى مشروع تجاري". سُجلت كذلك براءة اختراع لتقنية تحويل (UMO) كيميائياً الى مازوت أو كيروسين [11] ، وتمت هذه العملية على ثمانية مراحل شملت تحضير خلطة التفاعل التي تركبت من كحول وأساس (قلوي)، ثم أضيف الخليط الى الزيت المستهلك مع التحريك لتشكيل مزيج التفاعل، يتلوه تسخينه حتى الدرجة (107-121 °C) مع التحريك المستمر، ومن ثم تبريد مزيج التفاعل الى الدرجة العادية من الحرارة، حيث يضاف بعدها مركب غني بالنيترات مثل نترات الأمونيوم أو أي مركب مشابه، وبعدها يضاف حمض أميني مثل التورين أو الميثونين مع استمرار التحريك وهذا التفاعل ناشر للحرارة ويجب أن يستمر حتى تمام التفاعل ومن ثم يُبرد المزيج الى درجة حرارة الغرفة، حيث يتم تمرير تيار من الأوزون عبر مكوناته وبعدها يبرد الى الدرجة (-1 °C) فنتج ثلاثة أطوار فوق بعضها البعض وتطلب الأمر حوالي 24 ساعة : الطور العلوي هو حمض الكبريت، والطور في الوسط هو مازوت أو كيروسين (بحسب الأمين المستخدم)، والطور السفلي هو الاسفلت.

عدت طريقة معالجة (UMO) بالبيروليزا أكثر فعالية حيث تم الحصول على منتجات قابلة للاستخدام مثل الغازات والقطفات النفطية ومخلفات (فيول) والتي تستخدم كوقود [12]. البيروليزا المشتركة هي أيضاً خيار آخر لأجل المعالجة المشتركة للمركبات غير المرغوبة في الزيت المستهلك، مثلاً Arilla-Suarez ورفاقه [13] قاموا باستخدام الكمامات الجراحية والزيت المستهلك ومواد حيوية أخرى وحصلوا على مردود عالٍ من منتج زيتي هيدروكربوني في مجال غليان الديزل، وبعد إجراء تحاليل لهذا المنتج تبين بأن مواصفاته تشبه المواصفات المعروفة للديزل مثل القيمة الحرارية العالية واللزوجة والكثافة ومحتوى الكبريت. توجد أمثلة أخرى ناجحة أيضاً منشورة في المراجع هي البيروليزا المشتركة للزيوت المستهلكة ومخلفات البولي اتلن منخفض الكثافة [14].

إن التكسير الوسيطي هو تقنية متقدمة للبيروليزا ويقدم إيجابيات أكثر لمعالجة (UMO)، وهكذا فإن الدراسة الجيدة تسمح بتكسير المخلفات الثقيلة الغنية بالمركبات الهيدروكربونية ذات الوزن المولي الكبير لانتاج مركبات أخف ومحتوى بالكبريت أقل [15]. استخدمت وسائط صلبة لمعالجة (UMO) قوامها الفخار والسيليكا اللابلورية (الامورف) والزيوليت حيث أظهرت فعالية لانتاج مواد هيدروكربونية خفيفة، وبشكل خاص السيلكا ذات مسامات الميزوبور التي أظهرت إيجابية في انتشار المواد الهيدروكربونية في المسامات ولذلك استخدمت في عملية التكسير الوسيطي فأظهرت انتقائية للمركبات

الهيدروكربونية ذات السلاسل الهيدروكربونية الأقصر [16,17] وهي مرغوبة لإمكانية تعديل السطح النوعي للوسيط والتحكم بتوزع المسامات فيه، واستخدمت بشكل واسع لتعديل البنية النسيجية والاصطفاف المسامي ودرجة الحموضة كما استخدمت كحامل لتشريب المعادن عليه لزيادة الفعالية، وبشكل خاص معادن مثل (Zn و Ni و Cu)، ومؤخراً حُمّل الزنك على حامل من الزيوليت ZSM-5 وأظهر فعالية كبيرة للتكسير الوسيطي لزيت الكاميلينا (Camelina) وتحويله الى وقود هيدروكربوني [18] .

إن تقنية التكسير الوسيطي للزيوت المستهلكة قدمت أملاً كبيراً وأنتجت حلولا للمشاكل البيئية والصحية المتعلقة بصرف الزيوت المستهلكة، وأكثر من ذلك وبالمقارنة مع طرق المعالجة الحرارية (البيروليزا)، فإن طريقة التكسير الوسيطي أظهرت طاقة تنشيط أقل وزيادة في مردود القطفات السائلة من (63% الى 90%) وبرهنت من الناحية التقنية مخبرياً فعالية طريقة التكسير الوسيطي وبالطبع هذا يتعلق بنوعية الوسيط وشروط العملية ويمكن أن تنتج وقوداً بنوعية عالية تمكننا من استخدامه في المحركات الحالية بدون أي تعديل، وبشكل عام فإن هذه التقنية تظهر قيمة وفعالية التكسير الوسيطي كطريقة لمعالجة الزيت المستهلك وإنتاج الوقود، كما أنها تمكننا من التحكم بنوعية المنتج المرغوب وخصائصه، وتُخفّض الطلب على النفط الخام وتقدم حلاً مستداماً يساهم في حماية البيئة وتوفير الطاقة .

مما تقدم نرى أن معظم الطرق التقنية لمعالجة (UMO) المنشورة في المراجع تركزت على استرجاع زيت الأساس بطرق متنوعة وعلى المعالجة الكيميائية أو الفيزيائية بطرق شتى لانتاج وقود الديزل كمنتج رئيسي، وتبقى تقنية المعالجة الوسيطية طريقة واعدة لانتاج مشتقات نفطية بنوعية أفضل ومردود أعلى ويمكن من خلال تصنيع وسائط مناسبة التحكم بنوعية القطفات وخصائصها، وهي مازالت في مرحلة البحث والتجريب.

2- مقدمــة:

يتم الحصـــول على زيوت التزليق النفطية الجديدة بمختلف أنواعها من بواقي التقطير الجوي للنفط الخام، وتتضـــمن عملية الإنتاج ثلاثة مراحل أســـاســـية هي التقطير التخلخلي (تحت الضـــغط الفراغي) للحصـــول على القطفات الزيتية الخام، ويتم في هذه المرحلة الحصـــول على قطفات زيتية مختلفة اللزوجة وعلى بواقي التقطير التخلخلي الذي يعد مادة أولية لإنتاج الزيوت الثقيلة (Bright Stock)، ومن ثم تتم عملية تنقية القطفات الزيتية الخام لاستبعاد المركبات غير المرغوبة وللحصـول على زيوت الأساس.

يتم انتاج الزيوت التجارية بأنواعها كافة بمزج زيوت الأساس مع بعضـها بنسب محددة للحصول على زيوت بمواصـــفات تحقق الغرض منها، وتمزج معها كذلك الإضـــافات اللازمة بنســـب محددةً

لتحسين خواصها التشغيلية ولإكسابها خواصاً جديدة تتناسب مع مجالات استخدامها فنحصل على الزيوت التجارية المتداولة في الأسواق بأنواعها كافة [19,20].

تُعدُّ زيوت المحركات المستهلكة مصدراً للمُركبات الهيدروكربونية القيّمة والمتنوعة والتي لا يجوز هدرها أو تصريفها بشكل يضر بالبيئة، وهي مركبات كيميائية معقدة يحتوي بعضها على (20-60) ذرة كربون ومتوسط كتلتها المولية (300-750 كغ/كيلو مول) ومجال درجات غليانها (300-650 م^{O}) ، وتحتوي على مركبات هيدروكربونية برافينية بشكل سلاسل شبه مستقيمة (chains) متعددة الأطوال أو سلاسل متفرعة (iso) ، كما تحتوي على حلقات عطرية – نفتينية أحادية ومتعددة الحلقات لها سلاسل برافينية جانبية إلى جانب مركبات الإضافات المُحسّنة لأداء الزيوت [21].

ازداد الطلب على زيوت تزليق المُحركات بالتزامن مع التوسع باستخدام الآليات والآلات بأنواعها كافة، وارتفعت أسعار النفط ومعها جميع المشتقات النفطية بما فيها زيوت تزليق المحركات الجديدة والمُجددة، وهذا شجّع الباحثين على استخدام طرق تقنية عقلانية لإصلاح أو استرجاع زيوت المحركات المستهلكة التي تُعدُّ مصدراً هاماً من مصادر الطاقة، وتدل الدراسات على أن توفر زيوت المحركات المستهلكة سيتأثر قليلاً بسبب ضجة انتشار الآليات الكهربائية التي تحتاج لكميات قليلة من الزيوت ، ولكنها سوف تبقى متوفرة لعقود قادمة.

اجتهد الكثيرون لاستنباط طرائق جديدة تقوم على استرجاع زيت الأساس من زيوت المُحركات المستهلكة [22,23,28] وصنع زيوت مجددة من زيوت مستهلكة عن طريق تخليصها من الشوائب وأهمها المركبات الأكسجينية وذلك بمعالجتها بحمض الكبريت ومن ثم تعديلها وتحسين لونها بالامتزاز باستخدام مواد مازة مناسبة وهي طريقة بدائية تنتج زيوت تزليق ذات جودة متدنية وهي شائعة في دول شرق آسيا، كما انتشرت بشكل واسع طرق لمعالجة (UMO) كيميائياً بغاية الحصول على المازوت أو الكيروسين بشكل رئيسي إضافة الى الطرق الامتزازية وطرق الاستخلاص والهدرجة بعد تنقية الزيت وذلك لتلبية الطلب على زيوت الأساس أو تحويلها الى المنتجات المرغوبة في الأسواق.

إن هدف هذا البحث هو تحويل (UMO) الى منتجات نفطية قابلة للاستخدام عن طريق اخضاعها لتفاعلات التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف باستخدام وسائط صلبة معروفة صناعياً ومستخدمة حالياً في مصافي النفط في عمليات الهدرجة والمركبة من حامل مشرّب بالنيكل والموليبدنيوم، إضافة الى تخليص البيئة من هذه الزيوت التي عُدت نفايات.

3- التجارب العملية:

3-1- العينات وترقيد الزيت:

جُمعت عينات من زيوت تزليق المحركات المستهلكة (UMO) من محطات وورش تبديل زيوت المحركات بأنواعها كافة، **وتم** ترقيد الزيت المستهلك لعدة أيام وهي كافية لفصل الشوائب الفيزيائية مثل بعض الماء وفتات المعادن وبعض المركبات الاسفلتينية حيث ترسبت في قعر الخزان.

3-2- تنقية الزيت المُرقد:

إن الهدف من هذه العملية هو الحصول على عينة زيت خام جافة ونقية وخالية من آثار الشوائب مثل الماء والمواد الهيدروكربونية الخفيفة الطيارة (Light fuel)، وتمّت بتسخين الزيت إلى الدرجة (200 م°) حيث تبخرت آثار الماء والهيدروكربونات الخفيفة التي شكلت نسبة تقارب (1,5 % وزناً).

نبين في **الجدول (1)** أهم خصائص زيت التزليق المُستهلك والمنقى بالترقيد والتي حُددت من قبلنا وفق طرق تحليل معيارية (Standard) كما تم تحديد محتواها من المعادن باستخدام جهاز الامتصاص الذري مقدرة بجزء من المليون [22,24,25,26,27].

الجدول (1): أهم خصائص الزيت المُستهلك والمُرقد

Property		***value***	***Test Method***
Sp. Gr. (d_4^{15})		*0.8933*	*ASTM D 4052*
Conradson carbon, % wt		*2.1943*	*ASTM D 189*
Viscosity at 40°C	*m Pa. s*	*107.57*	*ASTM D 5133*
	cSt	*122.64*	-
Flash Point (Open Cup), °C		*196*	*ASTM D 92*
Fire Point (Open Cup), °C		*248*	*ASTM D 92*
Pour Point, °C		*- 19*	*ASTM D 5985*
Water Content, %Vol		*0.6*	*ASTM D1796*
Ash Content, % wt		*1.485*	*ASTM D 874*
Metals Content, ppm			***ASTM D 4628***

Na	*Ni*	*Pb*	*Fe*	*Cu*	*Zn*	*Cd*
1.18	*0.99*	*51.14*	*20.21*	*8.95*	*51.04*	*0.38*

3-3- عملية تقطير عينة الزيت المُنقى والمُرقد تحت الفراغ:

استخدمت وحدة تقطير أتوماتيكية مصنوعة من الستنلس ستيل لتقطير عينة زيت التزليق المُرقد والمُنقى تحت الفراغ (10 مم زئبق) وسجلت النتائج بشكل آلي وتبين أنه يمكن الحصول منها على الآتي:

أ-**قطفة وقود خفيف:** في مجال الغليان (200 –263 °C) وبمردود (0.36 wt%).

ب- **قطفة زيتية:** تم الحصول على قطفة زيتية خالية من الشوائب ناتجة عن التقطير التخلخلي (تحت الفراغ) وحدد مجال غليانها (263 – 565°C) محسوباً عند الضغط الجوي النظامي، والنتائج يوضحها **(الجدول-2).**

الجدول (2): نتائج عملية تقطير عينة الزيت المُنقاة الناتجة عن التقطير تحت الفراغ (10 مم زئبق).

Method: ASTM D 1160			
Vol. %	***ACT (°C)***	***AET (°C)***	***AET (°F)***
0	*114.7*	*263.4*	*506*
5	*213.9*	*384.5*	*724*
10	*240.1*	*415.3*	*780*
15	*254.1*	*431.9*	*809*
20	*264.6*	*444.1*	*831*
25	*273.8*	*454.9*	*851*
30	*281.7*	*464.0*	*867*
35	*289.0*	*472.4*	*882*
40	*296.0*	*480.4*	*897*
45	*302.6*	*487.9*	*910*
50	*309.6*	*495.9*	*925*
55	*317.1*	*504.3*	*940*
60	*325.0*	*513.5*	*956*
65	*334.0*	*523.5*	*974*
70	*345.1*	*536.0*	*997*
75	*357.7*	*550.0*	*1022*
80	*370.3*	*563.9*	*1047*
81.8	*371.7*	*565.4*	*1050*

وأما نتائج الموازنة المادية الحجمية والوزنية للمعالجة الأولية لهذه القطفة الزيتة فيوضحها **(الجدول -3)** الذي يبين أن مردود هذه القطفة هو (80 %wt)، وهذه هي عينة الزيت التي خضعت لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف،

الجدول (3): الناتج الوزني والحجمي من معالجة عينة زيت المحركات المستهلك.

ت-

Substance		Weight, gr	wt%	Vol. ml	% vol.
Used motor oil		*180.805*	*100*	*202.4*	*100*
water	(200°C)	*1.685*	*0.93*	*1.65*	*0.62*
Light fuel		*0.637*	*0.35*	*0.75*	*0.32*
Vacuum distillation cut		*178.483*	*98.72*	*200.0*	*99.06*
Light fuel (200 – 263°C)		*0.646*	*0.36*	*0.75*	*0.09*
Used oil cut sample (263 – 565°C)		*144.303*	*79.81*	*163.7*	*81.04*
Vacuum distillation residuals (+565°C)		*33.534*	*18.55*	*35.55*	*17.93*

وجميع خصائص هذه القطفة حددت وفق الطرق المعيارية وهي موضحة في **(الجداول 4-5-6-7).**

الجدول (4): التقطير الجوي

ASTM D 1160	
% Vol.	*Temp., °C*
IBP	*263*
5 %	*360*
10 %	*404*
50 %	*481*
90 %	*544*
95 %	*555*
EP	*565*

الجدول (5): محتوى المعادن

ASTM D 4628	
Metal	*ppm*
Na	*0.49*
Ni	*0.16*
Pb	*0.07*
Fe	*0.08*
Cu	*0.03*
Zn	*0.54*
Cd	*0.05*

الجدول (6): تحليل العناصر

ASTM D 5291	
Element	*% wt.*
C	*84.13*
H	*14.41*
S	*0.52*
N	*0.049*
O	*0.891*
-	-
-	-

الجدول (7): خصائص عينة الزيت الناتجة عن التقطير تحت الفراغ

Property	***Value***	***Test Method***
Sp. Gr. d_4^{15}	*0.8815*	*ASTM D 4052*
Sp. Gr. d_{15}^{15}	*0.8823*	*ASTM D 4052*
Conradson carbon, % wt	*0.04*	*ASTM D 189*
Viscosity at 40°C, cSt	*48.08*	*ASTM D 445*
Viscosity at 100°C, cSt	*6.978*	*ASTM D 445*
Viscosity Index	*101*	*ASTM D 2270*
Color	*6.0*	*ASTM D 1500*
Flash Point (Open Cup), °C	*204*	*ASTM D 92*
Fire Point (Open Cup), °C	*240*	*ASTM D 92*
Cloud Point, °C	*-5*	*ASTM D 2500*
Pour Point, °C	*-6*	*ASTM D 5985*
C_5 Insoluble's, %wt.	*< 0.01*	*ASTM D 4055*
Ash Content, % wt	*< 0.005*	*ASTM D 874*
Mw, Kg l Kmol	*480*	(a)
High Heating value, Kj/Kg	*46250*	(b)
Net Heating Value, Kj/Kg	*43050*	

(a)& (b) calculated

ث- بواقي التقطير (Residuals): هي مخلفات ثقيلة لا تزال تحتوي على نسبة لا بأس بها من الزيت أو المواد الهيدروكربونية ويمكن استرجاعها بطرق أخرى، أو أن تستخدم كوقود في الغلايات بعد نزع آثار المعادن منها، ولها درجـــة غليان (+565 °C)، ومردودها الوزني قارب (33.53 wt.%) وجميع خصائصها موضحة في (**الجدول-8**)

الجدول (8): خصائص عينة مخلفات التقطير تحت الفراغ

Property			***Value***	***Test Method***		
d_4^{15}			*0.9433*	*ASTM D 4052*		
API			*18.37*	*-*		
$d_{50°C}$, Kg /m^3			*922.9*	*ASTM D 4052*		
Conradson carbon, %wt			*12*	*ASTM D 189*		
Viscosity at 50°C, mPa.s			*320.80*	*ASTM D 5133*		
Viscosity at 50°C, cSt			*347.6*	*-*		
Flash Point (Open Cup), °C			*298*	*ASTM D 92*		
Fire Point (Open Cup), °C			*352*	*ASTM D 92*		
Ash Content, % wt			*7.915*	*ASTM D 874*		
Metals Content, ppm				***ASTM D 4628***		
Na	*Ni*	*Pb*	*Fe*	*Cu*	*Zn*	*Cd*
4.20	*4.60*	*272*	*107*	*47.6*	*269.7*	*1.81*

3-4- التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لقطفة الزيت المقطرة تحت الفراغ:

أ- **العينة:** هـــي عينة زيت التزليق الناتجة عـن عملية التقطير تحت الفراغ والموصوفة فـــي الفقرة (3-3- ب).

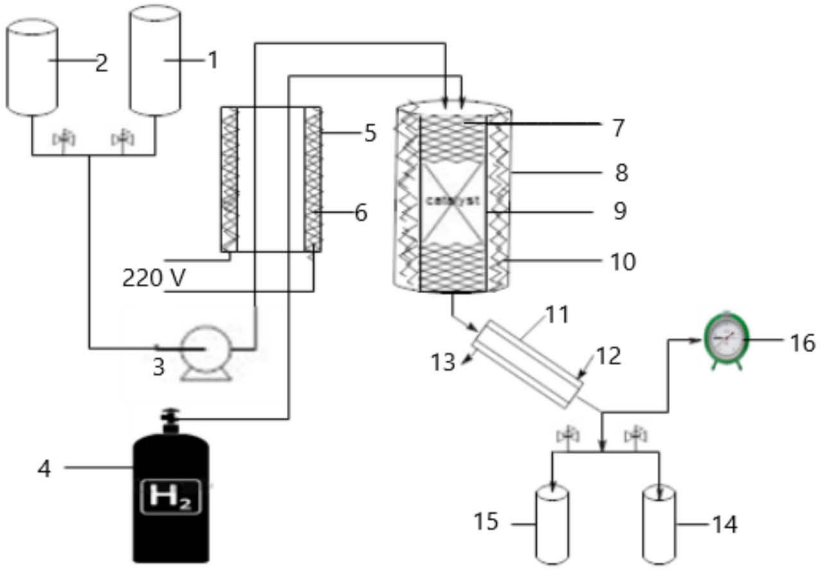
ب- **الهيدروجين المستخدم:** هو هيدروجين صناعي تم إحضاره من شركة مصفاة حمص (سورية) وهو ناتج عن تفاعل وسيطي لتحسين النفتا بالبخار، مواصفاته وتركيبة موضحة (**بالجدول-9**).

الجدول (9): تركيب غاز الهيدروجين الناتج من وحدة تحسين النفتا بالبخار والمستخدم في جميع التجارب.

Compound	*% Vol.*
H_2	*80.9*
C_1	*8.9*
C_2	*6.9*
C_3	*2.4*
$i\text{-}C_4$	*0.5*
$n\text{-}C_4$	*0.3*
$i\text{-}C_5$	*0.1*
$n\text{-}C_5$	–

3-5- وحدة التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف:

تم استخدام وحدة تكسير وسيطي هيدروجيني مخبرية نصف صناعية (Laboratory pilot plant) مصنوعة من الستنلس ستيل ومزودة بكل وسائل القياس والتحكم مع مضخة عيارية (Dozing pump)، ومخرج لأخذ العينات الغازية مع عداد لكمية الغازات الخارجة، ومكثف للمواد الهيدروكربونية السائلة، وتمت جميع التجارب عند الشروط المثلى (Optimum Conditions) التي تم تحديدها من قبلنا بعد اجراء تجارب عديدة [27]، ومخطط الوحدة المبسط موضح في (**الشكل-1**).



الشكل (1): مخطط مبسط لوحدة مخبرية نصف صناعية

1- خزان عينة الزيت الناتجة عن عملية التقطير تحت الفراغ للزيت المستهلك والمنقى والمرقد.
2- خزان مازوت غير مهدرج.
3- مضخة الزيت العيارية.
4- أسطوانة هيدروجين.
5- مسخن أولي للمواد الداخلة.
6- وشائع تسخين.
7- حشوة خاملة.
8- مفاعل أنبوبي.
9- طبقة الوسيط الثابتة.
10- وشائع تسخين وتحكم الكتروني وقياس درجات الحرارة.
11- مبرد مائي.
12- ماء تبريد داخل.
13- ماء تبريد خارج.
14- خزان النواتج المتكاثفة الأول.
15- خزان النواتج المتكاثفة الثاني.
16- عداد كمية الغازات الخارجة.

3-6- طريقة العمل:

يوضع الوسيط بالحجم المحدد في المفاعل الأنبوبي بشكل طبقة ثابتة وهو يتموضع بين طبقتين من حشوة خاملة أسفله وأعلاه، ثم يختبر مدى احكام الوحدة والتأكد من عد وجود تهريب عن طريق ضغطها وكسحها بغاز النيتروجين الى القيمة (70 bar) لعدة ساعات وللتخلص من الأكسجين الموجود في أجزاء الوحدة كافة.

يملأ الخزان (2- الشكل-2) بالمازوت غير المهدرج بهدف تنشيط الوسيط وتُشغّل مجموعة تسخين المفاعل والمسخن الأولي (الشكل-2)، ويضبط ضغط النيتروجين في الوحدة على القيمة المطلوبة في عملية تنشيط الوسيط.

يضخ المازوت غير المهدرج إلى المفاعل ويتم تعيير مضخة التغذية (3-الشكل-2) عند التدفق المطلوب لتنفيذ عملية تنشيط الوسيط حسب تعليمات الشركة الصانعة للوسيط، وقبل البدء بتنفيذ التجارب المخططة، ويتم مراقبة الضغط طيلة فترة التشغيل ويضبط عن طريق صمام يدوي يتحكم بكمية الغاز الداخلة.

طريقة تنشيط الوسيط: استخدم في عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف نوعان من الوسائط وتمت عملية تنشيط الوسيطين المستخدمين حسب تعليمات الشركة الصانعة وفق الخطوات الرئيسية الآتية:

ترطيب الوسيط (Catalyst Prewetting): عند تعريض الوسيط الجاف الطازج إلى المواد الهيدروكربونية السائلة لأول مرة، ترتفع درجة حرارة الوسيط نتيجة امتزاز الهيدروكربونات على سطحه، كما أن المعادن المحملة على الوسيط الجديد تكون بالشكل الأكسيدي وهي فعالة جداً ولهذا فإن درجة الحرارة سوف ترتفع بسرعة إذا ما تم التماس بجو من الهيدروجين، ولهذا تتم أولاً عملية الترطيب بجو من النيتروجين لتخفيف هذه الظاهرة.

وتمت عملية الترطيب بضغط الوحدة بغاز النيتروجين ثم رفع درجة الحرارة تدريجياً يتلوها ضخ مازوت غير مهدرج كمادة غسيل إلى المفاعل بسرعة فراغية ودرجة حرارة محددتين ويُرفع الضغط إلى (60 bar) ويستمر الترطيب لمدة (12 h) ويتم بهذه العملية إزالة الغبار والصدأ والقشور من دارة التفاعل.

سلفرة الوسيط: الغاية منها تحويل المعادن المحملة على الوسيط من الشكل الأكسيدي إلى الشكل الكبريتي، حيث تمت إضافة ثنائي كبريت الكربون CS_2 إلى مازوت الغسيل بحيث لا تزيد نسبة الكبريت فيه عن(2 %wt.) وترفع درجة الحرارة تدريجياً ويستمر ضغط الوحدة بالنيتروجين عند (60 bar) . يتم إيقاف عملية السلفرة عندما ترتفع نسبة H_2S في الغازات الخارجة بشكل ملحوظ، عن طريق أخذ عينات من الغاز بشكل دوري للتحليل، ثم يستبدل مازوت الغسيل بزيت المحركات المراد اختباره وتدويره لمدة (36 h) قبل البدء بتنفيذ التجارب المطلوبة[33] .

3-7- طريقة تنفيذ التجارب المخططة: بعد الانتهاء من عملية تنشيط الوسيط تم في هذه الوحدة كسح النيتروجين وادخال الهيدروجين من أسطوانة الهيدروجين (4) ليحل مكانه بتدفق محدد بحيث يؤمن الضغط اللازم ولرفع درجة حرارته في المسخن الأولي قبل دخوله الى المفاعل الأنبوبي (8) الذي يحوي الوسيط (9)، وبنفس الوقت تُرفع درجة حرارة المفاعل والوسيط الى الدرجة المطلوبة في جو من الهيدروجين. يضخ بعدها الزيت المراد اخضاعه للتفاعل الوسيطي من خزان الزيت (1-الشكل-2) المتصل مع مضخة عيارية (3) تقوم بضخ كميات محددة منه الى المسخن الأولي (5) الذي يقوم برفع درجة حرارة الزيت والهيدروجين قبل دخولهما الى المفاعل

(8) حيث تتم التفاعلات في طبقة الوسيط (9) وتخرج نواتج التفاعل الغازية من أسفل المفاعل الى المبرد المائي (11) فتسيل المواد المتكاثفة وتجمع في المستقبل أو خزان النواتج المتكاثفة (14أو 15) حيث وتوزن، أما الغازات فهي تدخل عبر تفريعة الى مقياس كمية الغازات (16) (Rotameter)، وتؤخذ عينات منها الى جهاز الكروماتوغرافيا الغازية لغرض التحليل.

3-8- الشروط المثلى لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف وللوسيطين المستخدمين:

يوضح (**الجدول-10**) مجال الشروط المثلى التي تم الحصول عليها وتم اعتمادها نتيجة تجارب عديدة نفذت لهذا الغرض.

الجدول (10): الشروط المثلى لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لعينة الزيت المستهلك والناتجة عن التقطير تحت الفراغ وطبقت على الوسيطين المستخدمين.

Optimum operating conditions	Value
Temperature, °C	405 – 415
Pressure inside the reactor, bar	58 – 70
Space velocity, (LHSV) h^{-1}	1.15 – 1.25
Hydrogen partial pressure, bar	46.9 – 56.6
H_2 , N m^3/HC m^3	339 - 340

3-9- الوسيط:

استخدم **نوعان** من الوسائط الصلبة وهما مستخدمان في عمليات الهدرجة في مصافي النفط وكلاهما يتركب من حامل الألوموسيليكات المشرّبة بمعدني النيكل والموليبدنيوم (Ni ,Mo /) Al_2O_3 SiO_2ومواصفاتهما موضحة في (**الجدول -11**)، (بعض الشركات تمتنع عن إعطاء الخصائص البنيوية للوسيط)، وهما:

1- وسيط هدرجة صلب (HTH 548)، من صنع الشركة الفرنسية (Procatalys or Axion).

2- وسيط هدرجة صلب (MCH 10) وهو من صنع شركة UOP الأميركية.

الجدول (11): مواصفات الوسيطين المستخدمين في تفاعل التكسير الهيدروجيني المخفف.

Property	HTH 548 (Axens)	MHC 10 (UOP)	Unit
Form	Cylindrical extrudate	Cylindrical extrudate	-
Diameter	1.2	-	mm
Average length	5	-	mm
Loss on ignition at 550 °C	2 max	-	Wt.%
Sock loading density	0.75	0.685*	kg/l
Dense loading density	0.86	-	Kg/l
Bulk crushing strength	1.5	-	MPa
Surface area	160	213*	m^2/g
Bulk density	0.71	-	g/cm^3
Pore volume	1.58	-	cm^3/g
NiO	2.9	-	wt.%
MoO_3	16.5	-	wt.%
Note: * means that the value has been determined experimentally for the lack of information. Surface area (BET) was measured using a Gemini III 2375 Instrument.			

3-10- نواتج عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف:

أ- **الغازات:** تم الحصول على غازات وحُسبت كمياتها، كما تم تحديد تركيبها باستخدام تقنية الكروماتوغرافيا الغازية مع مطياف الكتلة (GC-mass) والنتائج موضحة في (**الجدول-12**).

ب- **قطفات سائلة:**

1) تم جمع النواتج السائلة من أسفل المُبرد في وحدة التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف، وبعد ذلك تم إخضاعها لعملية تقطير جوي بهدف فصلها إلى قطفات عـــدة، حسب مجالات الغليان المطلوبة .

2) حُدد مجال الغليان لكل قطفة بحسب نوعية القطفات المطلوبة، وقد اعتمدت مجالات غليان القطفات الموضحة في (**الجدول-12**) آخذين بالحسبان حاجة السوق المحلية في سورية، وهي النفتا والكيروسين والمازوت والمخلفات (الفيول)، وإن مجال غليان كل قطفة والنسبة المئوية الوزنية موضحة في (**الجدول-12**).

الجدول (12): نتائج التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لعينة الزيت الناتجة عن التقطير تحت الفراغ الموصوفة في الفقرة (3-3- ب).

Substance/Yield	Boiling range, °C	Value, Wt%
H_2S	-	0.5
$C_1 - C_2$	-	0.5
$C_3 - C_4$	-	3.6
Naphtha	(C_5 – 200)	12 – 13
Kerosene	(200 – 260)	13 – 14
Gas oil	(260 – 360)	29 - 30
Hydrocracking residuals	+360	39.8 – 42.7
Total		**101.3 – 101.4**
Chemically Hydrogen wt.% consumed		1.3 – 1.4

3-11- خصائص نواتج عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف:

إن أهم خصائص نواتج عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف يوضحها (**الجدول-13**)، وللوسيطين المستخدمين. ونظراً لأن المازوت منتج مُهم ومطلوب في السوق السورية، فقد أوردنا في (**الجدول-14**) مقارنة بين مواصفات المازوت المنتج بالطريقة التقانية المقترحة في هذا البحث والمواصفات السورية ولكلا الوسيطين المستخدمين.

الجدول (13): مقارنة بين المواصفات والمردود لعينة الزيت الناتجة عن التقطير تحت الفراغ، ولنواتج قطفات عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف وللوسيطين المستخدمين

Used Lubricating oils Properties, wt%	100	
Specific gravity, d_4^{15}	0.8933	
Properties of Vacuum distillation products	**Values**	
Yield, wt%	80.0	
Specific gravity, d_4^{15}	0.8815	
Distillation, (ASTM D1160), (°C)	**Values**	
5 %	360	
50 %	481	
95 %	555	
Catalyst used in Mild Hydrocracking	**HTH 548**	**MHC 10**
Operating conditions	**Values**	
Temperature, (°C)	412 – 430	405 – 415
Pressure inside the reactor, (bar)	60 – 63	58 – 70
Partial pressure of hydrogen, (bar)	48.5 - 55	46.9 – 56.6
Liquid hourly space, LHSV, h^{-1}	1.0 – 1.3	1.15 – 1.25
H_2 , N m^3/HC m^3	339 – 340	339 – 340
Yield, (wt%)	**Values**	
H_2S	0.4	0.4
$C_1 – C_2$	0.32	0.4
$C_3 – C_4$	2.24	2.88
Naphtha	8 – 9.6	9.6 – 10.4
Kerosene	8.8 – 10.4	10.4 – 11.2
Gas oil	22.4 – 24	23.2 – 24
Residuals	32.08 – 36.96	31.8 – 34.2
Total	80.88 – 80.96	81.04 – 81.12
Hydrogen chemical consumption	0.88 – 0.96	1.04 – 1.12

Products properties		
Naphtha	**Values**	
specific gravity, d_4^{15}	0.755 - 0.7575	0.753
Boiling range, (°C)	50 – 200	50 – 200
Sulfur content, (ppm)	20 max.	14 max.
P/N/A (%vol)	69/13/18	68.5/12.5/19
Kerosene	**Values**	
specific gravity, d_4^{15}	0.830	0.830
Boiling range, (°C)	200 – 260	200 – 260
Sulfur content, (ppm)	50 max.	30 max.
Smoking number, (mm)	20 – 21	19 – 20
Sat./Ar.(%vol.)	73/27	75/25
Gas oil	**Values**	
specific gravity d_{15}^{15}	0.845 – 0.855	0.855
Boiling range, (°C)	260 – 360	260 – 360
Sulfur content, (ppm)	0.022 max.	0.012 – 0.025
Pour point, (°C)	– 8	– 10
Viscosity at 37.8°, (cSt)	3.9 – 5.9	5.8 – 6
Diesel index, DI	53 – 58	54 – 58
Cetan index, CCI	56 – 63	58 – 60
Residuals, (+360°C)	**Values**	
Specific gravity, d_4^{15}	0.874	0.875
Sulfur content, (wt%)	0.045 – 0.085	0.045 – 0.085
Pour point, (°C)	0	– 6
Viscosity index	106 – 125	113 – 116

الجدول (14): مقارنة بين مواصفات عينة المازوت الناتجة عن عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف المقترحة ولكلا الوسيطين والمواصفات المعيارية للمازوت السوري.

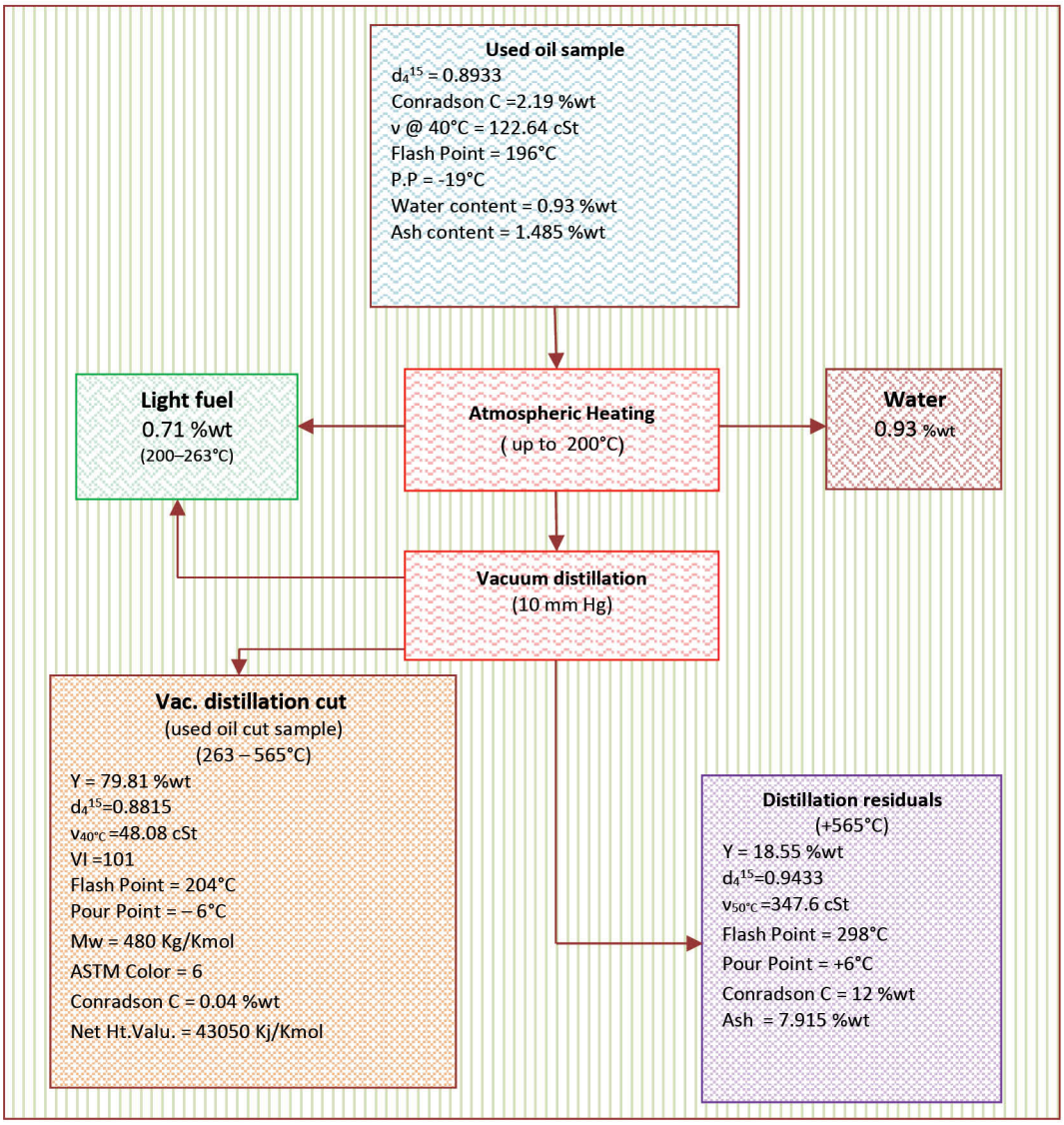
Test	Syrian Standard	Diesel produced using	
		Catalyst MHC 10	Catalyst HTH 548
Sp. Gr. @ 60/60 °F	*0.820– 0.850*	*0.855*	*0.845 – 0.855*
Color	*3.0 max.*	*1 – 1.2*	*1 – 1.2*
Flash Point P.M. Closed	*140 min.*	-	-
Total Sulfur, %wt	*0.5 max.*	*0.025*	*0.022*
Viscosity @100°F, cSt	*1.6 – 6.0*	*5.8 - 6*	*3.9 – 5.9*
Pour Point, °C	*25 / -4 max.*	*– 10*	*– 8*
Cloud Point, °C	*32 / 0 max.*	*– 6*	*– 4*
Diesel Index	*53 min.*	*54 - 58*	*53-58*
Cetan Index	*50 min.*	*58 - 60*	*56-63*
Conradson carbon, %wt	*0.2 max.*	*0.022*	*0.020*
Distillation (% vol. Recovery @ 357°C)	*90*	*96*	*97*

4- **مخطط العملية:**

توضح وتلخص المخططات الصندوقية رقم (3-4-5) مراحل انجاز البحث لكامل العملية التقانية، وهي:

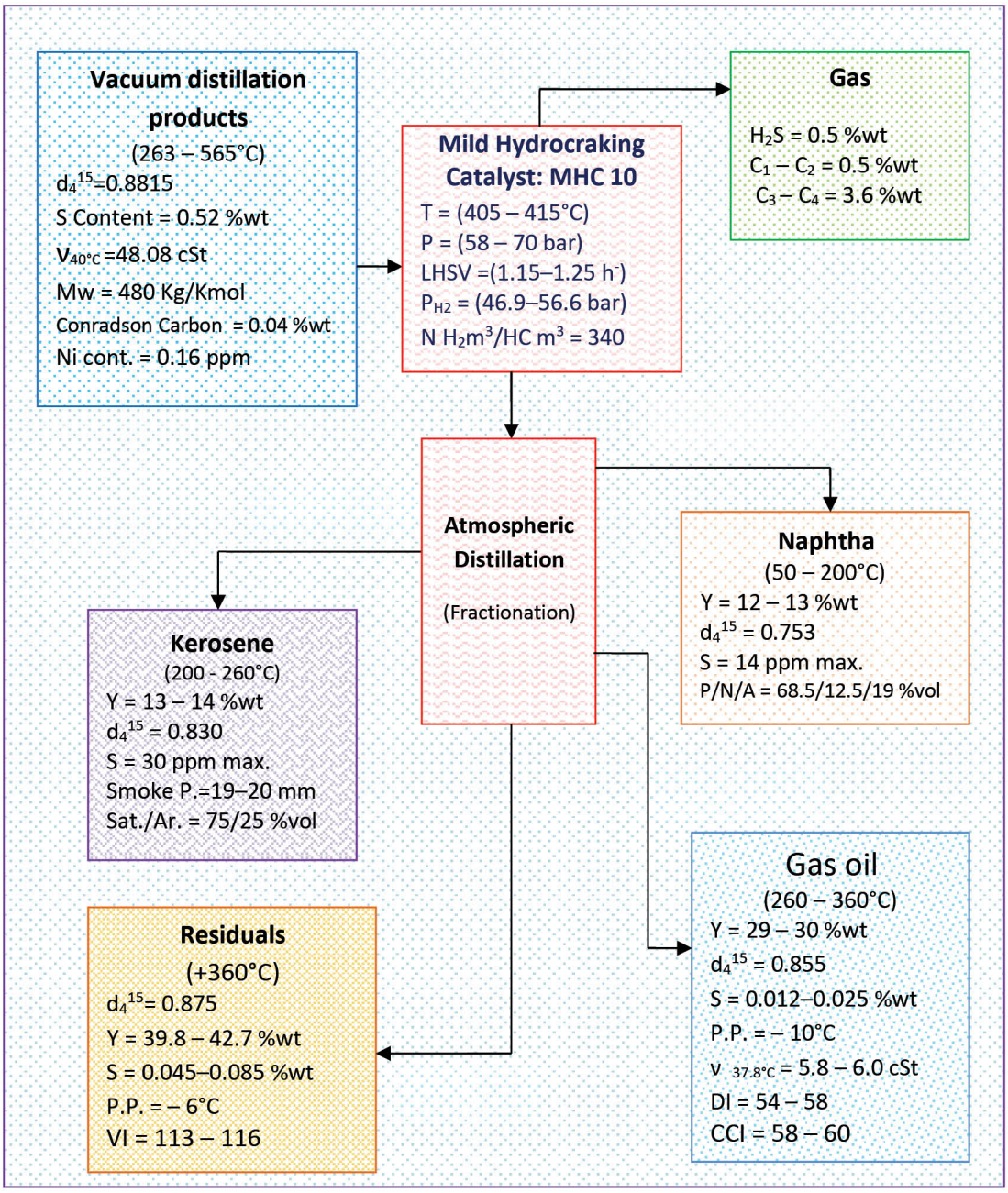
- **المرحلة الأولى**: عملية ترقيد الزيت المستهلك، ومن ثم تنقيته بالتسخين لإزالة آثار الماء والهيدروكربونات الخفيفة، وبعدها اخضاع العينة الناتجة لعملية التقطير تحت الفراغ (10 mmHg)، مع مردود كل خطوة ومواصفات كل عينة، ويوضحها (المخطط 3-).

(المخطط - 3): مختصر عملية معالجة الزيت المستهلك، يوضح المراحل والمنتجات وأهم خصائصها.



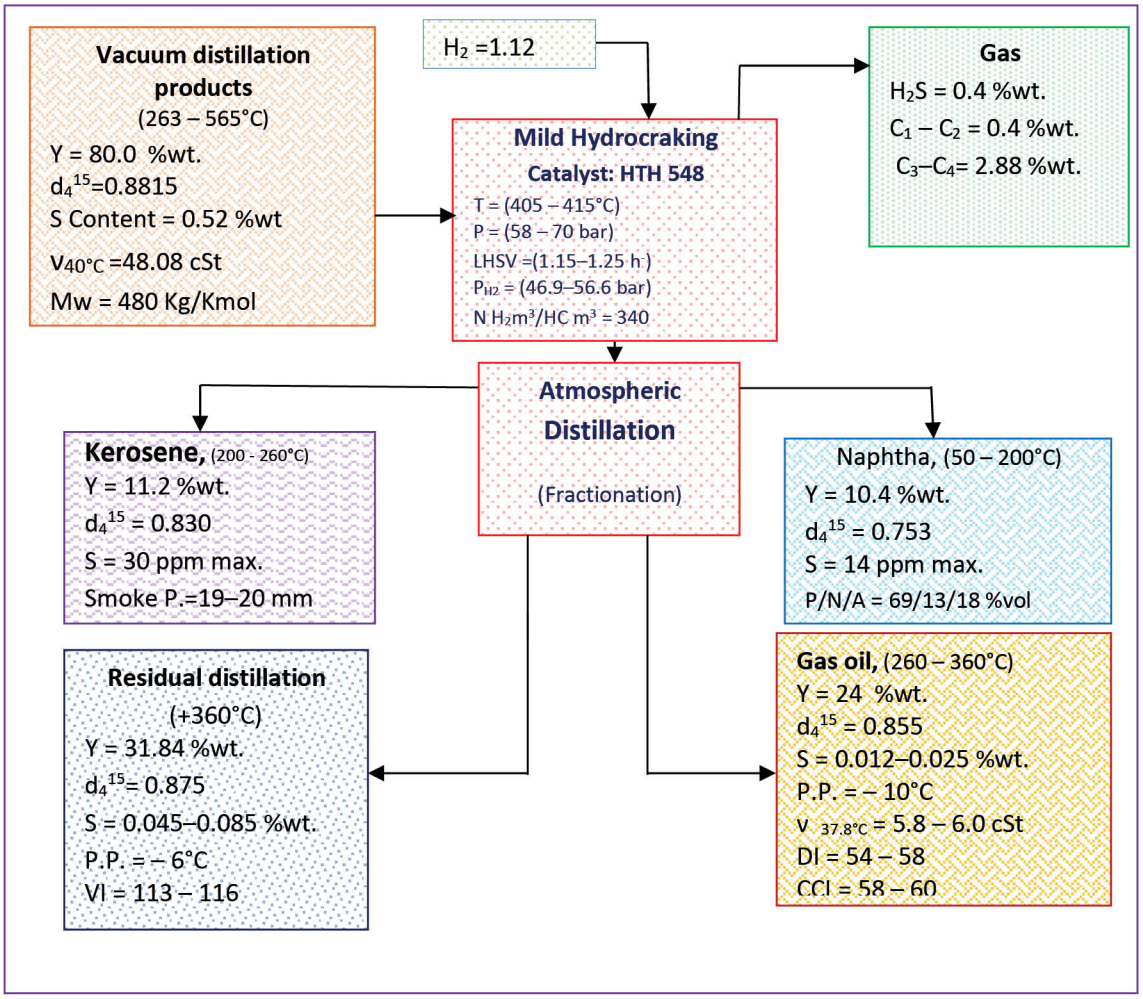
- **المرحلة الثانية:** عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لعينة الزيت الخام الناتجة عن عملية التقطير تحت الفراغ باستخدام الوسيط (MHC 10) بوجود الهيدروجين، مـــع أهـم شروط التشغيل والمردود لكل خطوة، ويوضحها (**المخطط** - 4).

(المخطط - 4): عملية التكسير الهيدروجيني المخفف للزيت المُنقى باستخدام الوسيط (MHC 10)، عند الشروط المثلى.



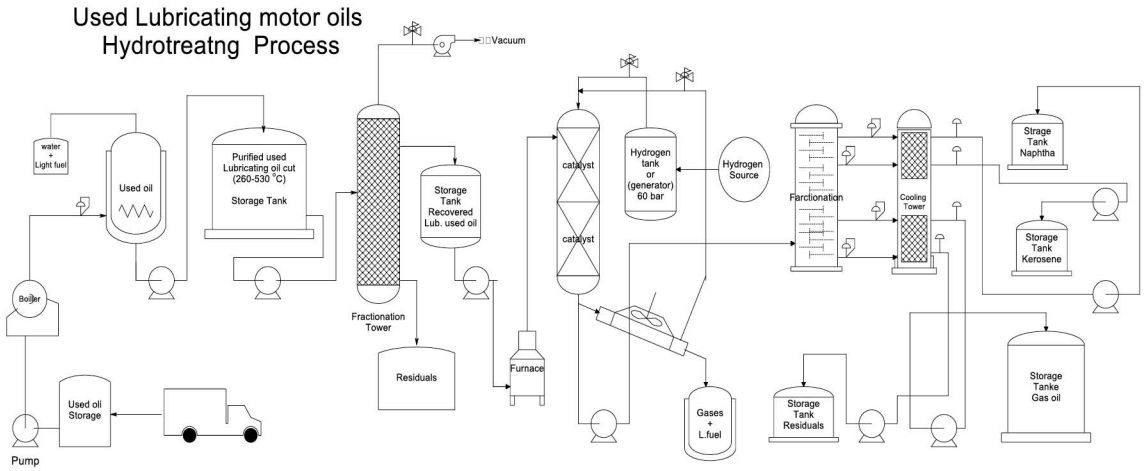
- **المرحلة الثالثة:** عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لعينة الزيت الخام الناتجة عن عملية التقطير تحت الفراغ باستخدام الوسيط (HTH 548) بوجود الهيدروجين، مـــع أهـم شروط التشغيل والمردود لكل خطوة، ويوضحها (**المخطط - 5**).

(المخطط - 5): عملية التكسير الهيدروجيني المخفف للزيت المُنقى باستخدام الوسيط (HTH 548) عند الشروط المثلى.



- **المخطط التكنولوجي المقترح** لكامل عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لزيوت تزليق المحركات المستهلكة. ويوضحها (**المخطط-6**).

(المخطط-6): المخطط التقاني المقترح لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف لزيوت تزليق المحركات المستهلكة.



4- النتائج والمناقشة:

إن هدف هذا البحث هو تحويل زيوت المحركات المستهلكة الى مشتقات (قطفات) نفطية مفيدة (مثل : غاز – وقود خفيف - نفتا – كيروسين – مازوت – فيول أو مخلفات) للاستفادة من المواد الهيدروكربونية التي تحويها ولحماية البيئة، وشملت هذه التقنية عمليات ترقيد وتنقية الزيت المستهلك، ومن ثم تقطيره تحت الفراغ بهدف الحصول على قطفة زيتية تصلح للاختبارات اللاحقة التي شملت عملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف باستخدام وسيطين صلبين من مصدرين مختلفين، ومن ثم تقطير السوائل المتكاثفة الناتجة للحصول على القطفات المناسبة والجاهزة للتسويق التجاري، ونبين أهم ما تضمنه البحث من نتائج وأفكار.

1) إن تحويل زيوت المحركات المستهلكة الى مشتقات نفطية مفيدة وذات جودة عالية وفق المواصفات العالمية والمحلية المطلوبة ممكنة وتساهم في الحفاظ على الطاقة الاحفورية وتوظيفها في التنمية المستدامة.
2) تخليص البيئة من الآثار السلبية للاستخدام الجائر للزيوت المستهلكة نتيجة صرفها بطرق تضر بالبيئة وتخالف القوانين السائدة في معظم البلدان المتطورة.
3) أمكن الحصول على 80% وزناً من قطفة الزيت المرقد والمنقى والمقطرة تحت الفراغ، وهي القطفة التي خضعت للاختبارات الموضحة في هذا البحث.

4) الوسيطان المستخدمان في هذه التقانة مستخدمان في المصافي النفطية لغاية الهدرجة وتحسين مواصفات المنتجات النفطية، وتم استخدامهما لأول مرة في هذا البحث لغاية التكسير الوسيطي الهيدروجيني المخفف لزيوت تزليق المحركات المستهلكة.

5) قطفات الوقود التي حصلنا عليها ومجالات غليانها ومواصفاتها يمكن التحكم بها لتلبية احتياج الأسواق المحلية والعالمية، وهي **صالحة للاستخدام المباشر بدون أية معالجات إضافية لاحقة** أو مزجها مع مقطرات أخرى مشابهة، وهذا أمر مهم جداً يساهم في اختصار مراحل الإنتاج وكلفها.

6) الوسيطين المستخدمين في التقنية المقترحة لعملية التكسير الهيدروجيني الوسيطي المخفف مصنعان من شركات عالمية معروفة، وتبين لنا الآتي:

أ- أظهر الوسيط (MHC 10) مردوداً أكبر في نسبة الغازات المُسالة (LPG) وفي نسب كل من النفتا والكيروسين والديزل والمخلفات بالمقارنة مع الوسيط (HTH 548) .

ب- أظهر الوسيطان المستخدمان نسب متقاربة في كميات البرافينات والنفتينات والعطريات (P/N/A) في قطفة النفتا وكذلك في نسبة المركبات الهيدروكربونية المشبعة والعطريات (Sat/Ar) في قطفة الكيروسين.

7) إن نسبة الكبريت في كل القطفات السائلة الناتجة كانت في الحدود الدنيا المقبولة، الأمر الذي يؤهل هذه القطفات للاستخدام المباشر بدون أية معالجات لاحقة.

8) انخفضت نسب المعادن في قطفة الزيت المرقد والمنقى والمقطرة تحت الفراغ بشكل كبير وكانت في الحدود المقبولة [34] صناعياً وبيئياً.

References:

1. Bhattacharya, M.; Biswas, D.; Sana, S.; Datta, S. Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1. *3Biotech* **2015**, *5*, 807–817. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version]
2. Abioye, O.P.; Agamuthu, P.; Abdul Aziz, A.R. Biodegradation of Used Motor Oil in Soil Using Organic Waste Amendments. *Biotechnol. Res. Int.* **2012**, *2012*, 587041. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version]
3. Daniela Almeida Streitwieser ; Arturo Arteaga ; Alvaro Gallo-Cordova ; Alexis Hidrobo ; Sebastian Ponce; Chemical Recycling of Used Motor Oil by Catalytic Cracking with Metal-Doped Aluminum Silicate Catalysts; Department of Chemical Engineering, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Diego de Robles s/n y Av. *Sustainability* **2023**, *15*(13), 10522; https://doi.org/10.3390/su151310522
4. Husaini, A.; Roslan, H.A.; Hii, K.S.Y.; Ang, C.H. Biodegradation of aliphatic hydrocarbon by indigenous fungi isolated from used motor oil contaminated sites. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **2008**, *24*, 2789–2797. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Lam, S.S.; Liew, R.K.; Jusoh, A.; Chong, C.T.; Ani, F.N.; Chase, H.A. Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *53*, 741–753. [Google Scholar] [CrossRef]
6. European Commission. Waste Oil. Available online: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil_xsum.pdf (accessed on 3 November 2022).
7. Nyashina, G.S.; Vershinina, K.Y.; Shlegel, N.E.; Strizhak, P.A. Effective incineration of fuel-waste slurries from several related industries. *Environ. Res.* **2019**, *176*, 108559. [Google Scholar] [CrossRef
8. CN101362982 A - Regeneration method of used oil(2009).
9. Amnat Permsubscul, Tharapong Vitidsant & Somsak Damronglerd; (2007) Catalytic cracking reaction of used lubricating oil to liquid fuels catalyzed by sulfated zirconia; Korian journal of chemical engineering, vol 24, p(37-42).
10. Lam, S.S.; Liew, R.K.; Cheng, C.K.; Chase, H.A. Catalytic microwave pyrolysis of waste engine oil using metallic pyrolysis char. *Appl. Catal. B Environ.* **2015**, *176–177*, 601–617. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version
11. European Patent Office; EP2836574A1; Inventor Philip Allen Boe; (2015); Methods for converting motor oil into fuel.

12. Mishra, A.; Siddiqi, H.; Kumari, U.; Behera, I.D.; Mukherjee, S.; Meikap, B.C. Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *150*, 111446. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Ardila-Suárez, C.; Pablo Villegas, J.; de Barros Neto, E.L.; Ghislain, T.; Lavoie, J.-M. Waste surgical masks to fuels via thermochemical co-processing with waste motor oil and biomass. *Bioresour. Technol.* **2022**, *348*, 126798. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
14. Mishra, A.; Siddiqi, H.; Kumari, U.; Behera, I.D.; Mukherjee, S.; Meikap, B.C. Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *150*, 111446. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Fahim, M.A.; Alsahhaf, T.A.; Elkilani, A. *Thermal Cracking and Coking*; Chapter 6; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2010; pp. 123–152. ISBN 978-0-444-52785-1. [Google Scholar]
16. Ishihara, A.; Negura, H.; Hashimoto, T.; Nasu, H. Catalytic properties of amorphous silica-alumina prepared using malic acid as a matrix in catalytic cracking of n-dodecane. *Appl. Catal. A Gen.* **2010**, *388*, 68–76. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Giraldo, L.F.; López, B.L.; Pérez, L.; Urrego, S.; Sierra, L.; Mesa, M. Mesoporous Silica Applications. *Macromol. Symp.* **2007**, *258*, 129–141. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Zhao, X.; Wei, L.; Cheng, S.; Huang, Y.; Yu, Y.; Julson, J. Catalytic cracking of camelina oil for hydrocarbon biofuel over ZSM-5-Zn catalyst. *Fuel Process. Technol.* **2015**, *139*, 117–126. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Gorman, W.A. (2005) Recovering base oils from lubricants", Petroleum Technology Quarterly, (4), 85-88.
20. El-Fadel, M. Khoury, R. (2001) Strategies for vehicle waste-oil management: a case study", Resources, Conservation and Recycling, 33, 75-91.
21. "Technical guidelines on used oil re-refining or other re-use of previously used oil, 3rd Meeting of the Conference of the Parties to the Basel Convention, Geneva, Switzerland, Sept.(1995).
22. DENIS, J., BRIANT, J., HIPEAUX, J.C., (2000)- Lubricant Properties Analysis & Testing. Editions Technip, Paris.
23. Langlois G.E., Sullivan R.F. (1970) Chemistry of hydrocracking. *Advan. Chem. Ser., No.* 97, 38
24. Thomas Bliss Stillman; Examination of lubricating oils, (2009).
25. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing & Materials, 1973, Philadelphia, USA.
26. Thonon C. (1972) In: Wuithier P., Le Pétrole. Raffinage et genie chimique, 2nd Edn., tome I, ch. III.9. Éditions Technip, Paris.

27. Montgomery, D. C. (1996). ; Design & Analysis of Experiments, Jon Wiley & Sons Ltd, 4th Edition, Arizona USA
28. Technical guidelines on used oil re-refining or other re-use of previously used
oil, 3rd Meeting of the Conference of the Parties to the Basel Convention, Geneva, Switzerland, Sept (1995).
29. Firas Awaja , Dumitru Pavel; Design Aspects of used lubricating oil Re-Refining, (2006).
30. Mol group report (2010) ; Possibilities for processing of used lubricating oils, part 2 .
31. Thorsten Bartels et al.(2005) "Lubricants and Lubrication" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim. doi:10.1002/14356007.a15_423 .
32. Kramer G. M., McVicker G.B., Ziemiak J.J. (1984) On the question of carbonium ions as intermediates over silica-alumina and acidic zeolites. *J. Cat.* 92, 355-363.
33. UOP, (1992)- UNICRACKING/MHCTM PROCESS TECHNOLOGY, p 210.
34. Boadu K O; Joel O F; Essumang D K; Evbuomwan B O; (2019); A Review of Methods for Removal of Contaminants in Used Lubricating Oil, Chemical Science International Journal, 26(4),p(1-11).

المراجع العربية

1- أ.د.أحلام عماد، أ. د. يوسف جوهر (1998)-هندسة التكرير (1)- منشورات جامعة البعث.
2- أ. د. فاروق الصوفي (1991) ، المدخل إلى تكنولوجيا النفط- جامعة دمشق.
3- أ.د. عدنان غاتا، أ.د. ياسر حورية، م. شهاب الملحم، (1994)، رفع نوعية منتج قطفة النفتا السورية المحسنة، منشورات جامعة البعث، كلية الهندسة الكيميائية والبترولية، سورية-حمص (أطروحة دكتوراه)،
ص (60-76) ، (101-103) .
4- أ. د ياسر حورية (1984)، اختبار وتقويم النفط ومنتجاته- منشورات وزارة النفط والثروة المعدنية (سورية)، (الجزء الأول + الجزء الثاني).

جدول بأهم المصطلحات المستخدمة في هذا البحث

UMO , Used Motor oils	زيوت المحركات المستهلكة
Base oil	زيت الأساس
Catalyst	وسيط أو (حفاز)
Vacuum distillation	تقطير تخلخلي (تحت الفراغ)
Refinery catalyst	وسيط مستخدم في مصافي النفط
Space velocity	السرعة الحجمية
Lubricating oils	زيوت التزليق (التزييت)
Bright Stock	زيت نفطي ثقيل
Light fuel	وقود خفيف
Laboratory pilot plant	وحدة مخبرية نصف صناعية
Optimum Conditions	الشروط المثلى
Dozing pump	مضخة تغذية عيارية.
Vacuum distilled lubricating oil cut	قطفة زيت تزليق مقطرة تحت الفراغ
Occupational Safety and Health Administration (OSHA)	إدارة السلامة والصحة المهنية الأميركية
Diesel-like-fuels (DLFs)	وقود يشبه المازوت (الديزل)
ACT (°C)	درجة حرارة المقطرات المقاسة تحت الفراغ
AET (°C)	درجة حرارة المقطرات المحسوبة عند الضغط (760 mmHg)
(Sat/Ar)	نسبة المركبات الهيدروكربونية (المشبعة / العطريات)
(PAHs)	المركبات العطرية متعددة الحلقات
Catalyst Prewetting	ترطيب الوسيط
Rotameter	عداد كمية الغاز

ندوة مسارات خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات البترولية التحويلية

د. ياسر محمد بغدادي*

* خبير أول صناعات نفطية - إدارة الشؤون الفنية ، أوابك - الكويت

مقدمة

نظمت الأمانة العامة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك) بالتعاون مع وزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية ومركز التعاون الياباني للبترول والطاقة المستدامة (JCCP) ندوة بعنوان **"مسارات خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات البترولية التحويلية "**، خلال الفترة 25-26 يونيو 2024م، في فندق كراون بلازا الرياض أر دي سي - الرياض – المملكة العربية السعودية.

هدفت الندوة إلى تسليط الضوء على المسارات المحتملة لتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في صناعات التكرير والبتروكيماويات، واستعراض جهود الدول الأعضاء في منظمة أوابك في مجال خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات البترولية التحويلية.

شارك في الندوة أكثر من 150 مشاركاً من مختلف شركات ومؤسسات ومعاهد أبحاث وجامعات ومؤسسات تعنى بشؤون الطاقة والاستدامة من الدول الأعضاء في منظمة أوابك، إضافة إلى العديد من الشركات اليابانية والهيئات المتخصصة في مجال تكنولوجيا الطاقة المستدامة، مملكة البحرين، الجمهورية الجزائرية، والمملكة العربية السعودية، وجمهورية العراق، ودولة الكويت، وجمهورية مصر

العربية عبر الاتصال المرئي، ومن مركز التعاون الياباني للبترول (JCCP) والشركات اليابانية، والاتحاد الخليجي للتكرير، ومن شركات خدمات نفطية عالمية، ومن جامعة قناة السويس، علاوة على وفد الأمانة العامة. (مرفق قائمة بأسماء المشاركين).

المحاور الرئيسية للجلسات

تضمنت الندوة خمس جلسات، وحلقة نقاشية، قدمت خلالها 24 ورقة فنية.

تناولت المحاور الرئيسية التالية:

- التقنيات الحديثة في خفض انبعاثات الكربون وفرص تشجيع انتشارها.
- دور الوقود المتجدد في تقليل انبعاثات الكربون في الصناعات التحويلية.
- دور تحسين كفاءة الطاقة في تقليل انبعاثات الكربون في الصناعات التحويلية البترولية.
- معوقات التوسع في تقنيات إزالة الكربون، ودور احتجاز الكربون في اقتصاد الهيدروجين.
- المبادرات والجهود المبذولة للحد من انبعاثات الكربون.
- أمثلة عملية ودراسة حالات مطبقة في العالم والدول العربية.

يمكن تنزيل المقاطع المرئية لمحاضرات الندوة من خلال مسح رمز الاستجابة السريعة التالي:

جلسات اليوم الأول

جلسات اليوم الثاني

ولمزيد من المعلومات والاستفسارات يمكن زيارة الموقع الإلكتروني للمنظمة على الرابط التالي:

www.oapecorg.org

جلسة الافتتاح

افتتح الندوة سعادة الدكتور خالد المهيد نائب سمو وزير الطاقة للاستدامة والتغير المناخي في المملكة العربية السعودية الذي رحب بالمشاركين، وأكد على أهمية موضوع الندوة في إطار التطورات التي تشهدها المملكة العربية السعودية في مجال مواجهة التغيرات المناخية والعمل على الحد من الانبعاثات الكربونية، مشيراً إلى أن كافة التوقعات تشير إلى أن الطلب على النفط سيستمر لعقود عديدة قادمة، وبالتالي علينا أن نستهلك المصادر الهيدروكربونية بطريقة مقبولة ومتوافقة مع المعايير الدولية من خلال تطبيق الاقتصاد الدائري الذي يعتمد على إدارة وترشيد استهلاك الطاقة وتشجيع إنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة بأنواعها. كما أكد سعادته على دور التكنولوجيا الحديثة وأهميتها في تطبيق متطلبات التشريعات الخاصة بالحد من الاحتباس الحراري. في ختام كلمته استعرض سعادة الدكتور المهيد مبادرات المملكة العربية السعودية في مجال مواجهة التغير

المناخي مثل مبادرة المملكة العربية السعودية الخضراء ومبادرة الشرق الأوسط الأخضر، إضافة إلى العديد من الأنشطة التي تنفذها المملكة لتخفيض الانبعاثات الكربونية.

بدوره أشاد سعادة السيد / سيشوي ناكاي، الرئيس التنفيذي لمركز التعاون الياباني للبترول والطاقة المستدامة JCCP بعلاقة التعاون المثمرة بين المركز الياباني ومنظمة أوابك وأشار إلى أهمية موضوع الندوة التي ينظمها الجانبان بالتعاون مع وزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية، لمناقشة المسارات المختلفة نحو انتقال الطاقة وصولاً إلى الحياد الكربوني، والتي تعد فرصة جيدة لتبادل الآراء والخبرات بين المختصين، والخبراء ومراكز البحث العلمي والشركات المتخصصة في مجال تكنولوجيا إزالة الكربون، واحتجاز وتخزين الكربون واستعماله، والوقود المتجدد.

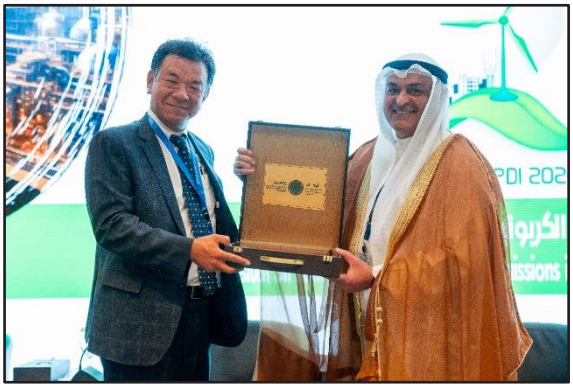
كما تقدم السيد / كواهارا القائم بأعمال السفير االياباني في المملكة العربية السعودية في كلمته بالتهنئة لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (OAPEC) ، ومركز التعاون الياباني للبترول والطاقة المستدامة على نجاح تنظيم الفعالية التي تعتبر السادسة منذ بدء التعاون الثنائي بين الجانبين، متمنياً تعميق العلاقة بما يسهم في تطوير التعاون في مجال الطاقة، وخاصة مع التوجهات العالمية الجديدة والمتزايدة نحو خفض الانبعاثات الكربونية في الصناعات البترولية، وأعرب عن شكره لوزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية على استضافتها للندوة. كما أثنى على العلاقات الثنائية السعودية اليابانية المتميزة، والتي توسعت في السنوات الأخيره، وتحديداً بعد إطلاق الرؤية السعودية اليابانية 2030.

استهل سعادة المهندس جمال عيسى اللوغاني الأمين العام لمنظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول "أوابك" كلمته بالإشادة بجهود وزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية، وخاصة الدعم الكبير الذي قدمه صاحب السمو الملكي الأمير عبد العزيز بن سلمان بن عبد العزيز آل سعود، وزير الطاقة لإنجاح هذه الندوة. كما أشار سعادته إلى أن الندوة تأتي في إطار التزام منظمة أوابك بمتابعة التطورات، والمبادرات

الدولية والإقليمية لخفض الانبعاثات الكربونية، وصولاً إلى الحياد الكربوني وتلبية المتطلبات الدولية لمكافحة التغيرات المناخية، وسلط الضوء على جهود الدول الأعضاء في منظمة أوابك للوفاء بالاتفاقيات الدولية بشأن تحقيق الأهداف المناخية للوصول إلى صفر الانبعاثات بحلول منتصف القرن الحالي، وأكد على أهمية التعاون بين شركات التكنولوجيا ومراكز الأبحاث، لتطوير حلول لإنتاج الوقود المنخفض الكربون من النفط، وخفض انبعاثات الكربون في جميع مراحل سلسلة القيمة في الصناعة النفطية.

وفي هذا السياق أشار سعادته إلى أن الدول الأعضاء في منظمة أوابك نفذت مبادرات مختلفة تهدف إلى الحد من انبعاثات الكربون، واستعرض عدداً من الأمثلة البارزة على هذه المبادرات. وفي ختام كلمته وجه الشكر إلى جميع القائمين على تنظيم الندوة، وخص بالذكر أصحاب السمو ومعالي وزراء البترول والطاقة وأعضاء المكتب التنفيذي لمنظمة الأوابك على دعمهم المستمر، وكذلك مركز التعاون الياباني للبترول والطاقة المستدامة (JCCP)، وفريق العمل في وزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية.

في ختام جلسة الافتتاح تم تبادل الهدايا التذكارية.



وقائع الجلسات الفنية

الجلسة الفنية الأولى بعنوان "التقنيات الحديثة وقصص النجاح في خفض انبعاثات الكربون، ترأس الجلسة الدكتور كاتسوهيرو تيشيزاوا من شركة تويو اليابانية، وتضمنت استعراض خمس أوراق فنية، كما يلي:

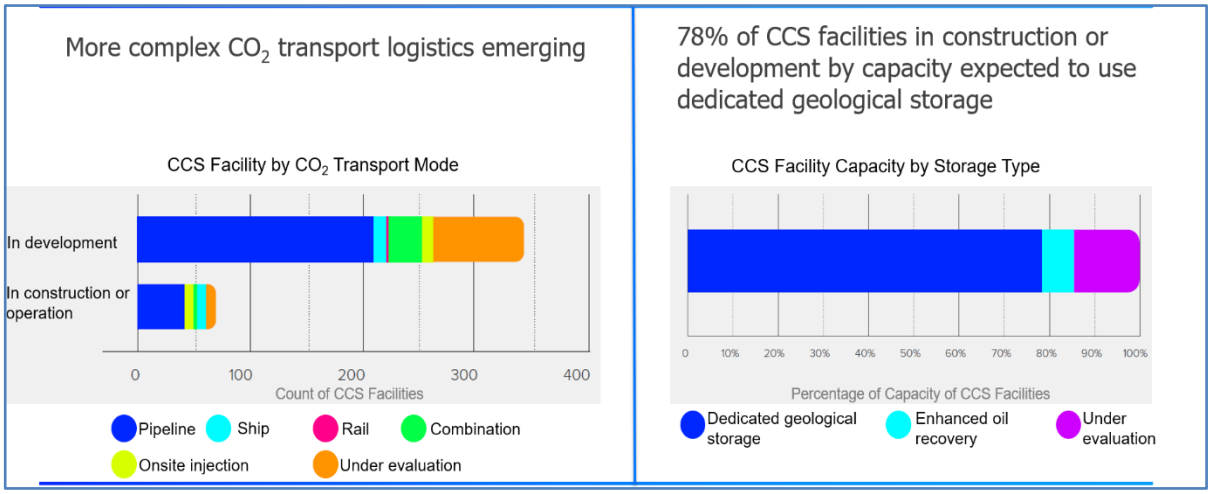
قدم الدكتور أبو زهرة في البداية نبذة عن المعهد العالمي لاحتجاز الكربون وخزينه، وأشار إلى أن المعهد يعد مؤسسة فكرية عالمية رائدة في مجال تقنية احتجاز الكربون وتخزينه، ومهمته الرئيسية هي تسريع استخدام وتطبيق هذه التقنية حول العالم باعتبارها جزء أساسي ومهم لمجابهة التغيرات المناخية وتحقيق الحياد الكربوني. تشمل عضوية المعهد أكثر من 200 عضو من الحكومات والشركات والهيئات البحثية، ومنظمات غير حكومية،

وأشار المتحدث إلى أن تقنية احتجاز الكربون وتخزينه بدأت في التوسع والانتشار، حيث بلغ إجمالي طاقة المشاريع قيد التطوير والبناء والتشغيل في عام 2023 نحو 361 مليون طن سنوياً، بزيادة قدرها 50 % تقريباً مقارنة بعام 2022.

كما لفت المتحدث إلى ظهور العديد من الشركات الجديدة التي تسعى إلى الاستفادة من توفير خدمات لاحتجاز الكربون وتخزينه، وخاصة في مجال نقل و / أو تخزين ثاني أكسيد الكربون، مدفوعة بنتائج دراسات البحث والتطوير التي ترعاها الحكومات على مدار عقود، والالتزام بتحقيق الحياد الكربوني في القطاع الصناعي، وتوقعات بتطبيق سياسة مناخية أكثر صرامة. كما أصبح احتجاز الكربون وتخزينه سمة بارزة في السياسة العامة للدول، وتعزيز التعاون فيما بينها، حيث أنجزت أول عملية نقل لثاني أكسيد الكربون عبر الحدود عن طريق السفن للتخزين الجيولوجي بين بلجيكا والدنمارك في عام 2023. وتعد جميع هذه التطورات مؤشرات مشجعة على التقدم. إلا أن العديد من التقارير تشير إلى أن تحقيق أهداف اتفاقيات الحد من ظاهرة المناخ يتطلب معدلات تخزين سنوية لثاني أكسيد الكربون تبلغ نحو 1 مليون جيجا طن سنوياً بحلول عام 2030، وأن ترتفع إلى نحو 10 ملايين جيجا طن سنوياً بحلول عام 2050.

من جهة أخرى أشار المتحدث إلى أن السياسات الداعمة التي تؤكد على قيمة الكربون وتخزينه، وتمنح حوافز ضريبية مقنعة وتكميلية، ستساعد على تسهيل إقامة مراكز نقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون. يبين الشكل (1) مشاريع نقل وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم.

الشكل (1): مشاريع نقل وتخزين غاز ثاني أكسيد الكربون حول العالم



وبالتوازي مع ذلك، فإن تشجيع تبادل الخبرات والمعارف بين المشاريع، وتوفير المزيد من الدعم لتقنية احتجاز الكربون وتخزينه، وتسهيل التفاعل الوثيق بين الممولين ومقدمي البنية التحتية، وتعزيز المشاركة العامة والمجتمعية سيساهم في ضمان تقدم المشاريع بنجاح وصولاً إلى قرار الاستثمار النهائي

ومن ثم تشييد المشروع. ولحسن الحظ، حدثت تطورات مهمة جداً في مجال السياسة العامة في السنوات القليلة الماضية مكنت من تسريع الاستثمار في مشاريع احتجاز الكربون وتخزينه، منها على سبيل المثال:

- صدور قانون " الحياد الكربوني للقطاع الصناعي " في الاتحاد الأوروبي، الذي يهدف إلى تطوير طاقة تخزين الكربون لتصل إلى 50 مليون طن سنوياً بحلول عام 2030.
- توقعات " خارطة الطريق للاستثمارات في مجال تحقيق الحياد الكربوني " في المملكة المتحدة زيادة في طاقة احتجاز الكربون وتخزينه التي يتم تركيبها بمقدار 20 إلى 30 مليون طن سنوياً بحلول عام 2030.
- صدور قانون "خفض معدل التضخم " في الولايات المتحدة الذي من المتوقع أن يساهم في زيادة قدرة احتجاز الكربون وتخزينه في الولايات المتحدة بمقدار 200 إلى 250 مليون طن سنوياً بحلول عام 2030.
- الإعلان عن خارطة طريق اليابان طويلة الأجل لاحتجاز الكربون وتخزينه وتحديد يناير 2023 هدفاً لبدء تشغيل أول مرافق تجارية بحلول عام 2030 سعياً لتخزين 240 مليون طن سنويا من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2050.
- إعلان المملكة العربية السعودية عن هدفها لاحتجاز وتخزين 44 مليون طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2035.

أما على نطاق المشروعات في منطقة الشرق الأوسط وأفريقيا، فقد أشار المتحدث إلى أن هذه المنطقة تمثل مرافقها نحو 8 % من إجمالي قدرات مرافق احتجاز وتخزين الكربون في العالم. وتعهدت الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية بالالتزام بأهداف تحقيق الحياد الكربوني خلال الفترة 2050 -2060. تعمل هذه الأهداف الطموحة كمحفزات لاعتماد تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه بشكل سريع، كما أنها ترسم خريطة للإنتقال نحو مستقبل منخفض الكربون، مشيراً إلى المشاريع التي هي قيد التطوير والإنشاء والتشغيل في كل من قطر والمملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة وسلطنة عمان بقدرة احتجاز بلغت 19.5 مليون طن سنوياً، وفي قطر، تقوم شركة قطر غاز باحتجاز 2.1 مليون طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون من محطة راس لفان لتسييل الغاز، وتخطط لزيادة قدرة الاحتجاز لتصل إلى 5 ملايين طن سنوياً بحلول عام 2025 مدفوعة بالإعلان عن توسعة حقل الشمال الذي يعد أكبر مشروع للغاز الطبيعي المسال في العالم.

وفي المملكة العربية السعودية، تقوم شركة أرامكو السعودية باحتجاز 0.8 مليون طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون من مصنع سوائل الغاز الطبيعي بالحوية مستخدمة ثاني أكسيد الكربون المحتجز لإثبات جدوى الاستخلاص المعزز للنفط في حقل نفط العثمانية ،ويمثل مركز الجبيل الصناعي لاحتجاز الكربون وتخزينه بالمملكة العربية السعودية ثمرة تعاون بين أرامكو السعودية و شركة SLB، وشركة Linde و يهدف إلى احتجاز و تخزين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من المنشآت الصناعية، ويتوقع أن يحتجز 9 ملايين طن سنوياً بحلول عام 2027 و 44 مليون طن سنوياً بحلول عام 2035. كما أطلقت المملكة مبادرات تهدف إلى المحافظة على البيئة وتعزيز التنمية المستدامة مثل مبادرة السعودية الخضراء ومبادرة الشرق الأوسط الأخضر، وأكدت شركات مثل أرامكو السعودية على تحقيق الاستدامة في عملياتها ونشرت تقارير استدامة شاملة تحدد التزامها باحتجاز الكربون وتخزينه مع هدف معلن يتمثل في احتجاز 11 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً بحلول عام 2035.

أما في دولة الإمارات العربية المتحدة، فتقوم شركة أدنوك بتنفيذ عدد من مشاريع احتجاز الكربون وتخزينه على عدة مراحل، حيث يتم احتجاز 0.8 مليون طن سنويا من ثاني أكسيد الكربون في منشاة "الريادة" من مصنع حديد الإمارات في أبو ظبي كمرحلة أولى. وتقدر أدنوك الكميات التي سيتم احتجازها خلال المرحلتين الثانية والثالثة بنحو 5 مليون طن متري من الكربون قبل 2030، وذلك من عدة مصادر انبعاثات تشمل مصنع "شاه" للغاز الحامض 2.3 مليون طن سنوياً، ومصنع "باب" لمعالجة الغاز 1.9 مليون طن سنوياً.

من جهة أخرى سلط المتحدث الضوء على امتلاك منطقة الشرق الأوسط وأفريقيا لقدرات تمكنها من الاستفادة من الطلب العالمي المتزايد على الهيدروجين النظيف، وذلك من خلال الاستفادة من تقنية احتجاز وتخزين الكربون في وحدات إنتاج الهيدروجين، حيث تستطيع المنطقة أن توفر بشكل سريع كميات تجارية من الهيدروجين المنخفض الكربون.

وفي الختام أشار المتحدث إلى أن المعهد العالمي لاحتجاز الكربون وتخزينه يتتبع الآن 43 مشروعاً قيد التشغيل و521 قيد التطوير على مستوى العالم، مع الإعلان عن مشاريع جديدة أسبوعياً، وهذا يؤكد الاهتمام المتزايد بمشاريع احتجاز الكربون وتخزينه في العديد من المناطق وعبر القطاعات الصناعية.

ورقة بعنوان

نهج متعدد المسارات لمحايدة الكربون

Multi-Pathway Approach for Carbon Neutral

Mr. Nobuyuki Takemura

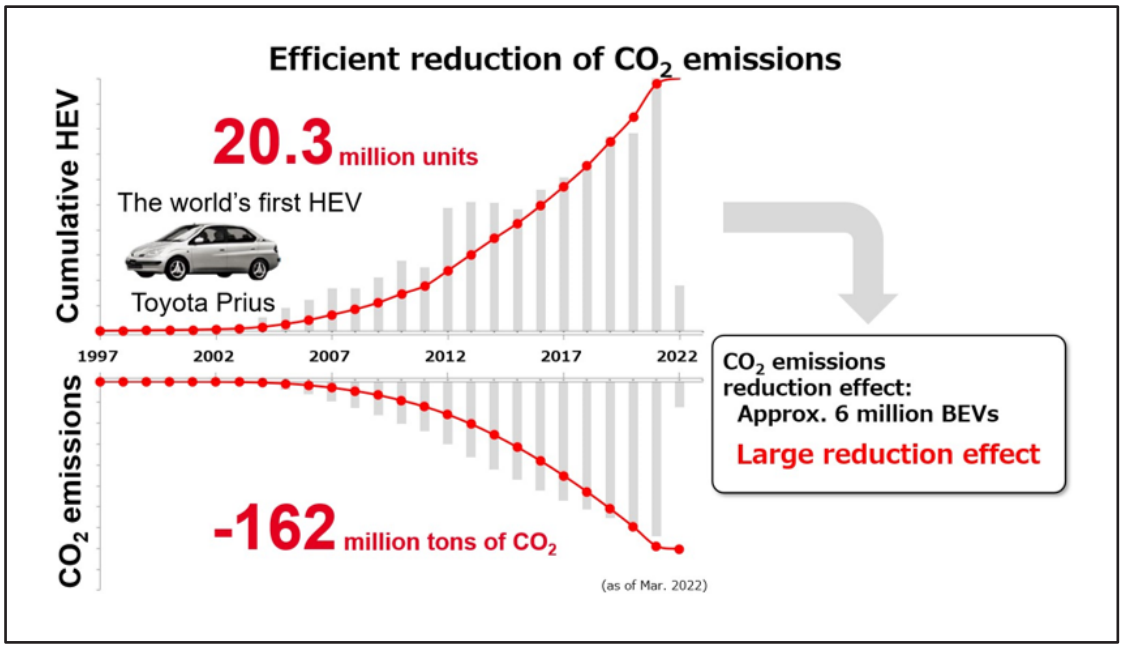
Middle East Office Chief Representative, Middle East Div,
Toyota Motor Corporation

بدأ المتحدث باستعراض المعايير التي قدمتها **شركة تويوتا** بشأن السياسات العامة المهمة المتعلقة بالمناخ والمبادرات البيئية والأنشطة التي انتهجتها في هذا الشأن منذ عام 1992 حيث نشرت الشركة لأول مرة ميثاق تويوتا للأرض وقامت بتحديثه في عام 2000، والذي أعلن لأول مرة عن السياسات العامة المتبعة للمساهمة في خدمة المجتمع، وتطبيق التقنيات البيئية، والإعلان عن مبادئ توجيهية واسعة النطاق للعمل على تصميم وتصنيع المنتجات الصديقة للبيئة، وهو الإعلان الذي تم في عام 2015 بشأن خطة تويوتا لعام 2050، والذي يهدف إلى إنتاج سيارة ذات صفر انبعاثات كربونية، وتقليل استخدام المياه، وإنشاء أنظمة قائمة على إعادة التدوير. وتهدف تلك المبادرات إلى إنتاج الهيدروجين من الطاقات المتجددة، وإنتاج الوقود الإصطناعي المنتج من ثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن إنتاج الوقود الحيوي.

كما أشار المتحدث إلى أن شركة تويوتا ساهمت في خفض الانبعاثات الكربونية العالمية من خلال التوسع في إنتاج السيارات الكهربائية بما في ذلك السيارات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات (BEVs) والمركبات الكهربائية الهجينة (PHEVs) كأحد مسارات شركة تويوتا لخفض الانبعاثات الكربونية، حيث قامت الشركة ببيع إجمالي تراكمي من السيارات الكهربائية المتنوعة بما يزيد عن 20.3 مليون سيارة كهربائية منذ عام 1997. وقد ساهم ذلك في منع نحو 162 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون من دخول الغلاف الجوي حتى عام 2023، كما هو مبين في الشكل (2).

وفي الختام أشار المتحدث إلى أنه من المبكر أن يتم التوصل لأفضل الحلول لتحديد المسار المناسب للوصول إلى الحياد الكربوني، ولكن شركة تويوتا تقدم حلولاً متنوعة للعملاء حسب احتياجاتهم.

الشكل (2): مساهمة شركة تويوتا في خفض الانبعاثات الكربونية

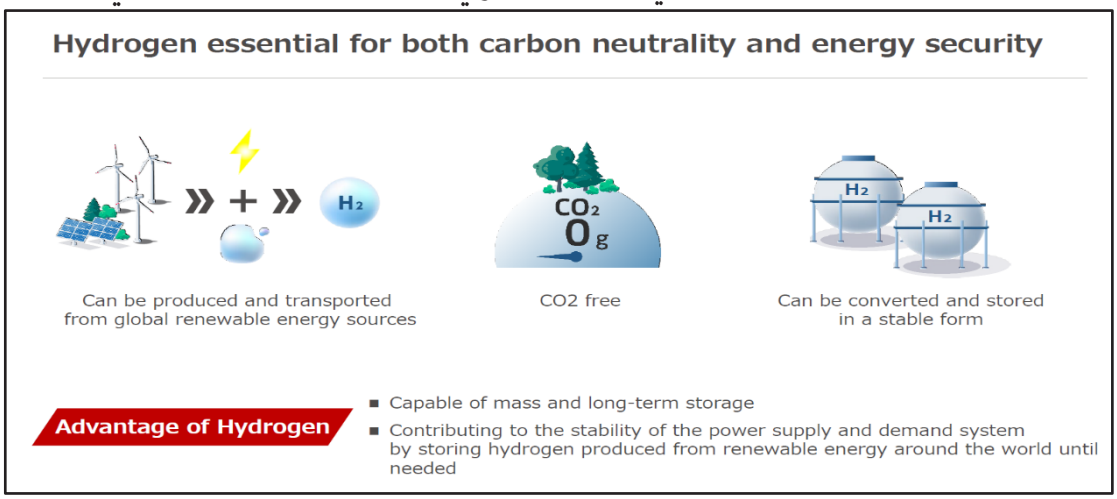


قدم المتحدث نبذة عن شركة كاوساكي، والتي أنشئت في عام 1878، في نشاط بناء السفن في طوكيو، وفي عام 1911 تمكنت من تصنيع أول قاطرة بخارية محلياً مما ساهم في إنتشار السكك الحديدية في اليابان، وفي عام 1918، تم البدء بأعمال الطيران، ليتم إطلاق أول روبوت في عام 1968، لخدمة المجتمع وتقليل أعباء العمل من خلال الأتمتة. وفي عام 1976 تم إنشاء منشأة لتوليد الطاقة بتوربينات الغاز لأول مرة في اليابان. وفي عام 1981 تم تسليم أول ناقلة للغاز الطبيعي المسال.

كما أشار المتحدث إلى أنه قد شهد العامان الماضيان اهتماماً متزايداً بوقود الهيدروجين. ووفقاً لمجلس الهيدروجين، فقد تم الإعلان عن أكثر من 1040 مشروعاً واسع النطاق لإنتاج الهيدروجين، بنحو 320 مليار دولار من الاستثمار المباشر حتى عام 2030. وأشار إلى أن اليابان تستثمر نحو تريليوني ين

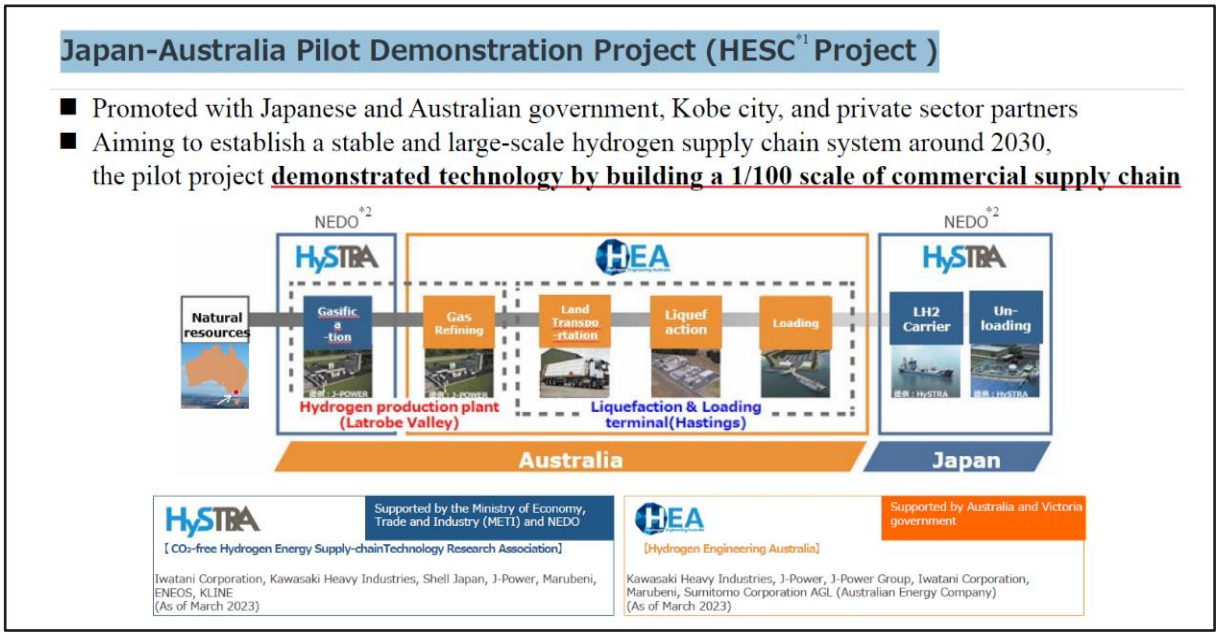
(13.5 مليار دولار) لدعم سلاسل قيمة الهيدروجين المسال باعتبار أن الهيدروجين يعد أحد المسارات الهامة للوصول إلى الحياد الكربوني، وضمان أمن الطاقة العالمي، كما هو مبين في الشكل (3).

الشكل (3): دور الهيدروجين في الحياد الكربوني، وضمان أمن الطاقة العالمي



ومن جانب آخر سلط المتحدث الضوء على المشروع التجريبي لسلسلة إمداد الطاقة الهيدروجينية (HESC)، والذي تم الإنتهاء منه بنجاح، وتزامن ذلك مع وصول الناقلة Suiso Frontier، وعلى متنها شحنة من الهيدروجين المسال المستخرج من فحم وادي لاتروب. أثبت هذا الإنجاز الجدوى الفنية للمشروع، والمتوقع أن يسهم في تقليل الانبعاثات الكربونية بمقدار 1.8 مليون طن سنوياً. كما هو موضح في الشكل (4).

الشكل (4): مخطط المشروع التجريبي الياباني – الأسترالي المشترك لإنتاج الهيدروجين المسال



أشار المتحدث إلى أن جمعية الهيدروجين اليابانية هي هيئة تؤمن بأن الهيدروجين له القدرة على تغيير المستقبل، حيث إنه منتج صديق للبيئة، وتسعى لبناء مجتمع الهيدروجين من خلال تنفيذ مشروعات في اليابان على المستوى الحكومي والخاص، ومراكز البحث والتطوير، وكذلك تطوير البنية التحتية لينافس أنواع الوقود الأخرى المستخدمة. تضم الجمعية في عضويتها نحو 453 شركة من الشركات المحلية والدولية، كما هو موضح في الشكل (5).

الشكل (5): الشركات المحلية والدولية الأعضاء في جمعية الهيدروجين اليابانية

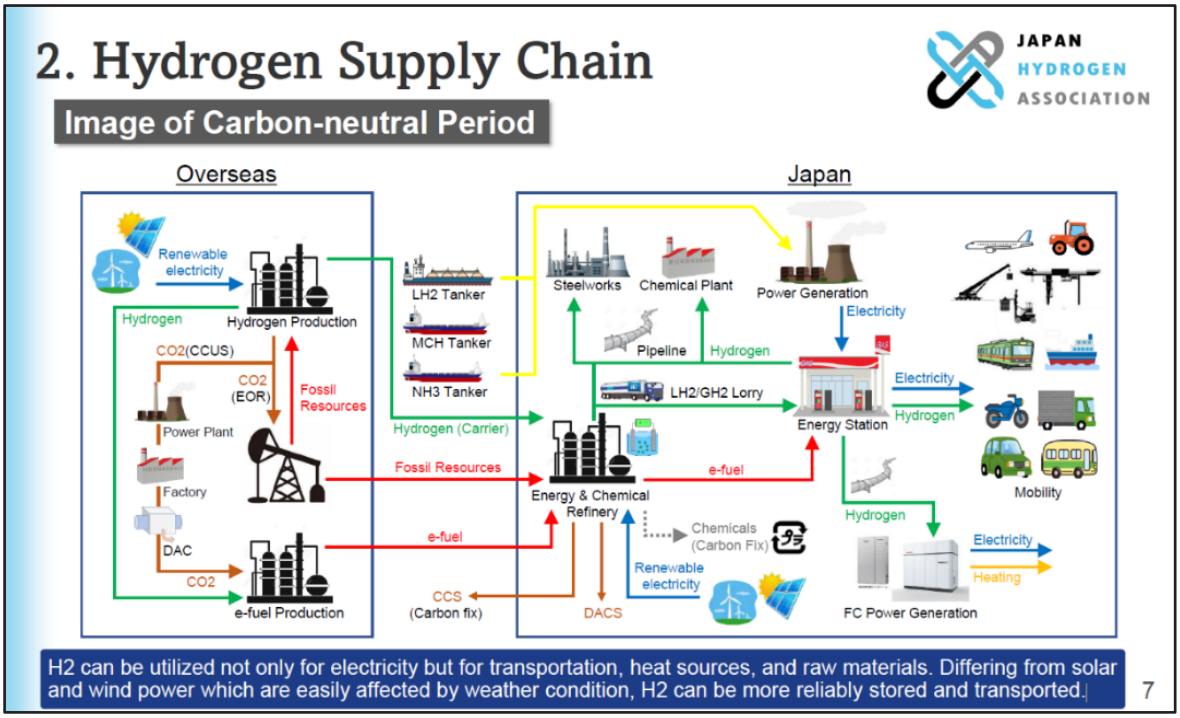
كما استعرض المتحدث سلسة الإمداد للهيدروجين على النطاق الدولي واستخداماته في اليابان في إنتاج الكهرباء، ونقل الطاقة الحرارة، وكمادة أولية للعديد من الصناعات، مشيراً إلى أن الهيدروجين يتميز بسهولة نقله وتخزينه بطرق أكثر موثوقية مقارنة بالطاقات المتجددة الأخرى مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، والتي تتأثر بشكل مباشر بحالة الطقس المتغيرة. يبين الشكل (6) سلاسل الإمداد للهيدروجين.

من جانب آخر سلط المتحدث الضوء على أهم طرق لإنتاج الهيدروجين سواءً بإستخدام الكتلة الحيوية بمخلف أنواعها من سماد الماشية او من مياة الصرف الصحي، للإستخدام كوقود للمحركات

والناقلات، وأيضاً لتشغيل توربينات إنتاج الكهرباء، وكمادة خام لإنتاج الأمونيا، وغنتاج الخلايا المختلفة في السيارات ووسائل النقل الجماعية. يوضح الشكل (7) استخدامات الهيدروجين في وسائل النقل.

الشكل (6): سلاسل الإمداد للهيدروجين

الشكل (7): استخدامات الهيدروجين في وسائل النقل المختلفة



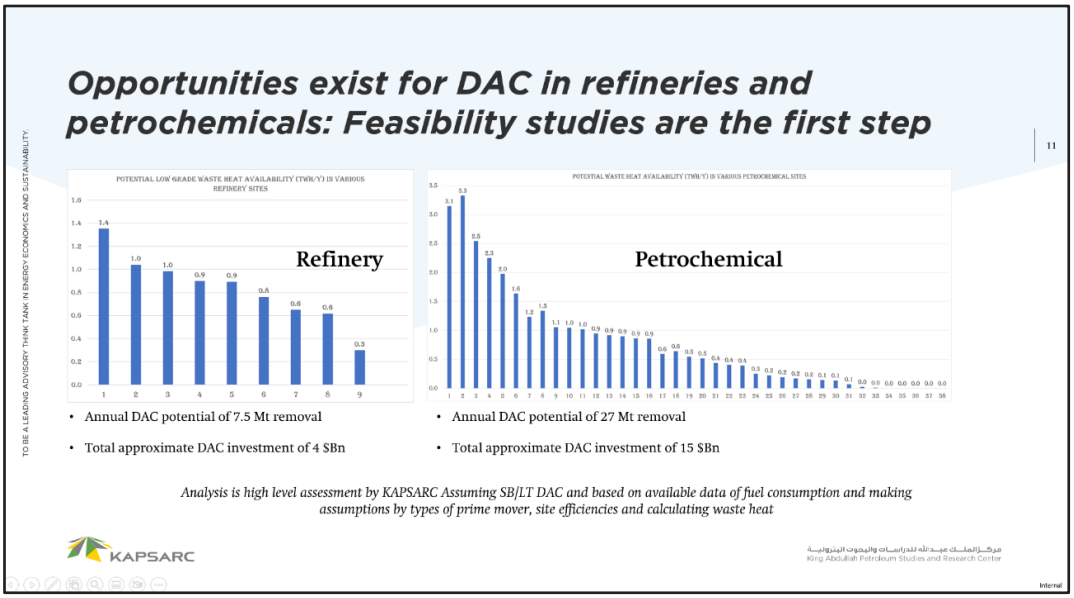
اختتم المتحدث عرضه التقديمي باستعراض أهم الاستنتاجات، مشيراً إلى دور جمعية الهيدروجين اليابانية في توحيد آراء أصحاب المصلحة والتواصل مع الحكومات، والعمل على زيادة النشاط في مجال إنتاج الهيدروجين لتحقيق أهداف الحياد الكربوني، والتأكيد على أهمية تكامل كافة مراحل سلاسل الإمداد من الإنتاج وصولاً إلى الاستخدام النهائيوتعزيز التعاون والتشارك مع الآخرين للإستفادة من الجهود السابقة في خفض النفقات الاستثمارية، وتطبيق نظم المحاكاة في إعداد تصاميم مشروعات إنتاج الهيدروجين.

في البداية قدم الدكتور ناصر نبذة عن مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية KAPSARC، والذي يعد مركزاً استشارياً بحثياً في مجال اقتصاديات الطاقة والإستدامة العالمية، من خلال الخبراء المتخصصين في مجال التحليلات الاستراتيجية والمعلوماتية. ويقوم المركز بإجراء البحوث العلمية، ودعم المواهب المتميزة في قطاع الطاقة.

استعرض المتحدث التقنيات الحديثة لإزالة ثاني أكسيد الكربون، ومنها تقنية الالتقاط المباشر من الهواء، أو ما يعرف بتقنية Direct Air Capture (DAC)، وتعد هذه التقنية من التقنيات الأساسية على مستوى القطاعات المختلفة، وخاصة في القطاع النفطي بهدف خفض نسب الانبعاثات الكربونية. كما تساعد هذه التقنية في تحقيق خطة صافي انبعاثات صفرية، من خلال إزالة نفس القدر الذي نطلقه من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. وهذا أمر ضروري للمحافظة على كوكب أخضر نظيف، بالإضافة إلى المساعدة في حماية التنوع البيولوجي، وتحسين الإنتاجية الزراعية، واستعادة النظم البيئية المتدهورة.

وتتميز هذه التقنية بإمكانية تطبيقها على النطاق الصناعي في كل من معامل التكرير وصناعة البتروكيماويات، والتي يلزم لها إجراء دراسات جدوى كخطوة أولى للتحقق من جدواها. حيث أشارت نتائج الدراسات أن تطبيق هذه التقنية في معامل التكرير يمكن أن تزيل نحو 7.5 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وبتكلفة استثمارية تقدر بنحو 4 مليار دولار، في حين تحتجز نحو 27 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً في صناعة البتروكيماويات، بتكلفة استثمارية تقدر بنحو 15 مليار دولار، كما هو موضح في الشكل (8).

الشكل (8): الفرص المتاحة لتطبيق تقنية الإلتقاط المباشر للكربون من الهواء في معامل التكرير وصناعة البتروكيماويات



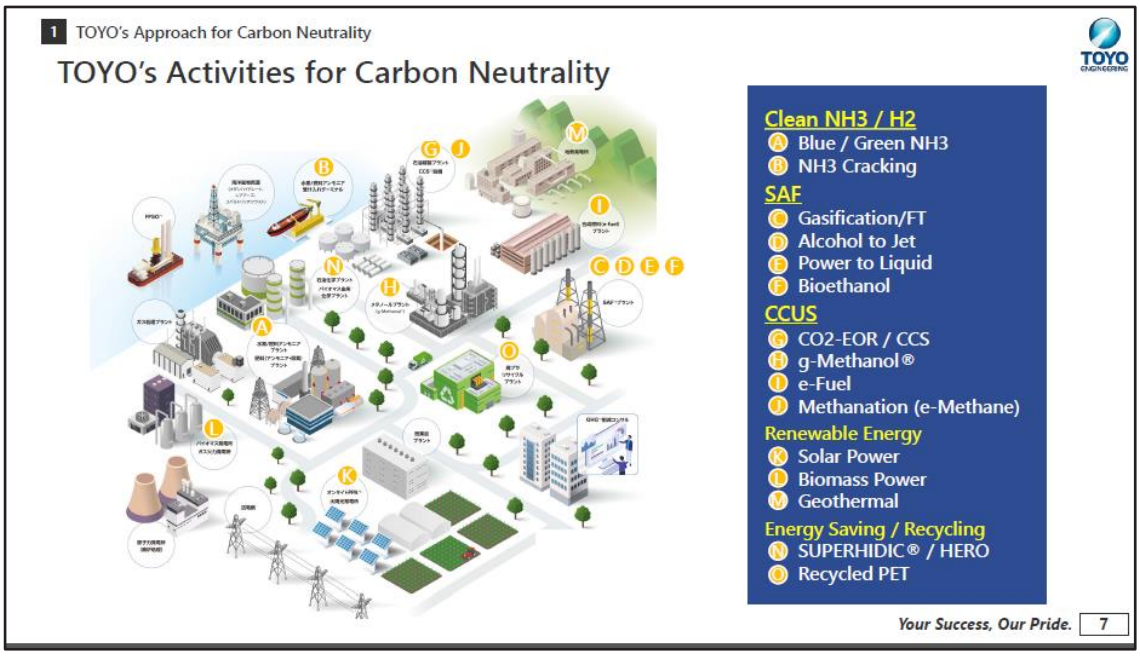
واختتم المتحدث عرضه بالتأكيد على أنه يمكن لقطاع الطاقة في المملكة العربية السعودية إزالة كميات تتراوح مابين 30- 25 مليون طن سنوياً من ثاني أكسيد الكربون من خلال تطبيق تقنيات الالتقاط المباشر للكربون من الهواء، وتقنيات التقاط واستخدام وتخزين الكربون.

الجلسة الثانية بعنوان "دور الوقود المتجدد والبحث العلمي في تقليل انبعاثات الكربون في الصناعات التحويلية، ترأس الجلسة المهندس عماد مكي مدير إدارة الشؤون الفنية في منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول " أوابك" وتضمنت أربعة أوراق فنية، كما يلي:

بدأ المتحدث عرضه التقديمي بنبذة عن شركة Toyo Engineering، والتي أنشئت في عام 1961، برأسمال قدره 0.14 مليار دولار، ويقع مقرها في مدينة طوكيو – اليابان، وتتركز أنشطتها في تقديم خدمات الهندسة والتوريد والبناء EPC لقطاع النفط والغاز، والتكرير، ومصانع إنتاج العطريات، والبتروكيماويات، والاسمدة، والميثانول، والأمونيا، بالإضافة إلى المنصات البحرية، الإضافة إلى مشروعات إنتاج الطاقات المتجددة (الخلايا الكهروضوئية، والكتلة الحيوية، وأيضاً مشروعات إنتاج الحرارة الأرضية Geothermal، فضلاً عن إنتاج المواد الكيميائية الصيدلانية الدقيقة، والمواد الزراعية. وأشار المتحدث بأن الشركة ترتبط بعلاقات تجارية وثيقة مع الدول الأعضاء في منظمة أوابك، مثل الجزائر، ومصر، وسوريا، والعراق، والسعودية، والإمارات، وقطر، والكويت حيث ساهمت في تقديم خدمات المساعدة الفنية لعدد من مشروعات الغاز، والتكرير، والبتروكيماويات.

وأشار المتحدث إلى أن استراتيجية الشركة على المدى القصير تتركز في مشاريع البيئة والطاقة، والحياد الكربوني في إطار جهود مكافحة ظاهرة الاحتباس الحراري، وتطوير تقنيات التقاط واستخدام وتخزين الكربون CCUS، وتقنيات إنتاج الغاز الاصطناعي، وإنتاج وقود الطيران المستدام SAF، فضلاً عن مشروعات إنتاج الميثانول الأخضر، و وقود الأمونيا Fuel Ammonia ، والذي يعد وقوداً نظيفاً للصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، وإنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر، والإيثانول الحيوي، وإعادة تدوير النفايات البلاستيكية، وخاصة من منتج البولي إيثيلين تيرفيثالايت PET. كما هو موضح في الشكل (9).

الشكل (9): استرايجية شركة TOYO في مجال مشروعات الحياد الكربوني



بعد ذلك استعرض المتحدث بعض الأمثلة على التقنيات التي تعتمدها الشركة مثل إنتاج الميثانول باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون كمادة خام، وإنتاج وقود الطيران المستدام SAF، الذي يعتمد في إنتاجه على تقنية فيشر تروبش لتحويل الكتلة الحيوية من الأخشاب، والنفايات البلدية إلى وقود طيران مستدام.

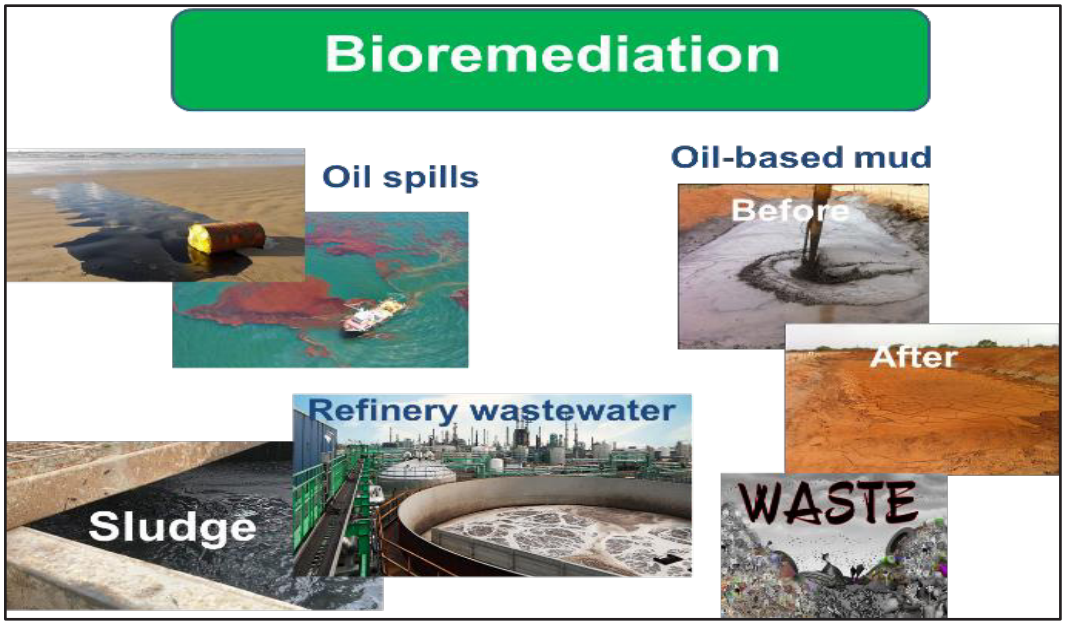
اختتم المتحدث عرضه التقديمي، بالتأكيد على ضرورة التعاون في عملية التحول الطاقوي بين مزودي التكنولوجيا، والممولين.

في مقدمة حديثه أشار الدكتور المسلماني إلى أن وكالة الطاقة الدولية أعلنت أن العمليات المرتبطة بالنفط والغاز ساهمت بمقدار 15% من الانبعاثات الكربونية في العالم لعام 2022 أو ما يعادل 5.1 مليار طن من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، مما يستدعي ضرورة اتخاذ بعض التدابير والإجراءات

اللازمة لخفض البصمة الكربونية للنفط والغاز وابتكار تقنيات لتحسين العائد الاقتصادي من النفط الخام ومشتقاته والحد من الآثار البيئية الضارة لعمليات الاستكشاف والتكرير.

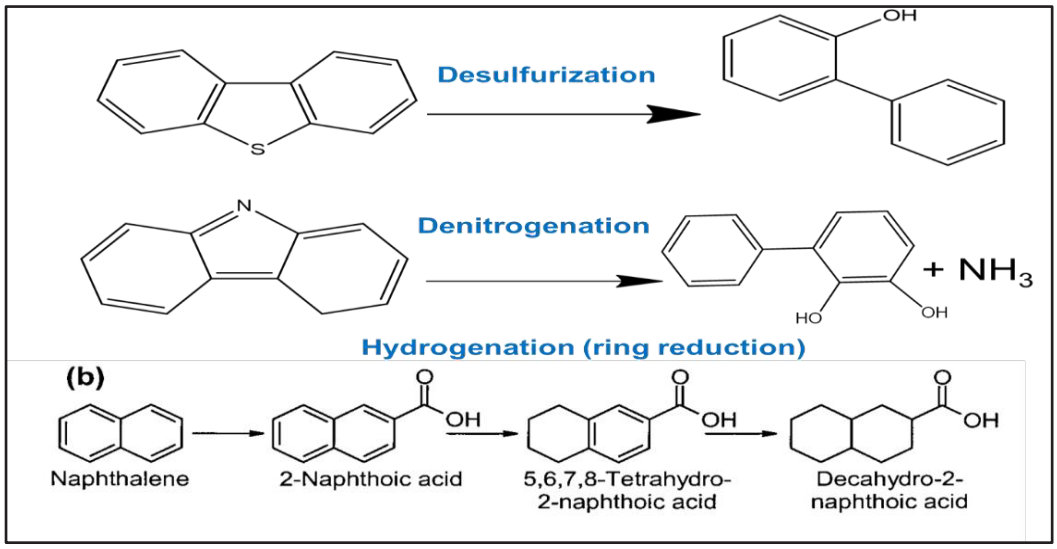
كما أشار المتحدث إلى أن إنتاج مركبات كيمائية من النفط عادة ما يتم عن طريقة التقنيات الحرارية والكيميائية التي تكون عالية التكلفة وملوثة للبيئة نتيجة انبعاثات الكربون، وبالتالي هناك حاجة إلى تقنيات خضراء تتميز بالاستدامة والكفاءة العالية للحفاظ على البيئة وتحسين عمليات تحويل النفط الخام ويمكن إدماجها ضمن عمليات التكرير القائمة حالياً. وتعتبر التقنيات الحيوية وتطبيقاتها في صناعة النفط من التقنيات الواعدة التي تحظى باهتمام متزايد، حيث أنها تعتمد على مجموعة خاصة من الميكروبات التي يمكنها القيام بالعديد من عمليات المعالجة البيولوجية لفصل الكبريت، والنيتروجين، والمعادن، وتكسير المركبات العطرية . ومقارنة بالتقنيات التقليدية تتميز التقنيات الحيوية بأنها صديقة للبيئة وتعمل بكفاءة تحت ظروف تفاعل خفيفة مما يساعد على خفض التكاليف. كما أنه من المعروف أن التقنية الحيوية لها تطبيقات عديدة في صناعة النفط وخاصة في مجال معالجة النفايات والتلوث النفطي ومخلفات التكرير، كما هو مبين في الشكل (10).

الشكل (10): استخدام التقنيات الحيوية في معالجة النفايات والتلوث النفطي



كما تطبق تقنية المعالجة الحيوية في دراسة تحسين جودة الخام وتغيير خصائصه كتخفيض نسبة الكبريت، كما هو مبين في الشكل (11).

الشكل (11): إزالة الكبريت والنيتروجين من الخام والديزل بإستخدام التقنيات الحيوية



واختتم المتحدث عرضه التقديمي بأنه يمكن الاستفادة من تطبيقات الكيمياء الحيوية لتحويل النفط الخام الثقيل ومشتقاته المنخفضة القيمة إلى منتجات ذات قيمة عالية بهدف تخفيف البصمة الكربونية لعمليات التكرير.

أشارت الدكتورة المغربي في البداية إلى أنه على الرغم من وجود مخططات مختلفة لعمليات التقاط و تخزين و استخدام الكربون (CCS) ، إلا أن 75% من التكلفة تستخدم في عملية فصل غاز ثاني أكسيد الكربون فقط. وبالتالي فإنه من وجهة نظر صناعة الطاقة يجب خفض تكلفة فصل غاز ثاني اكسيد الكربون لكي تحظى بالقبول . وهناك العديد من الطرق المستخدمة لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون مثل الإمتصاص باستخدام مذيبات مختلفة، والإمتزاز باستخدام الزيولايت، والفصل بالتبريد العميق، وتقنية الاغشية .ولكن تعاني هذه الطرق من العديد من السلبيات.

أشارت المتحدثة إلى أنه في حالة التركيزات المنخفضة إلى المتوسطة من غاز ثاني أكسيد الكربون، تُفضل **طريقة الامتصاص الكيميائي**. في هذه الحالة يتم استخدام المذيبات القاعدية مثل المذيبات القائمة على الأمين لالتقاط غاز ثاني أكسيد الكربون من التيارات الغازية. ومع ذلك، في هذه الطريقة، تنخفض كفاءة الفصل عند التعامل مع تيارات الغاز التي تحتوي على تركيز عالي من غاز ثاني أكسيد الكربون. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي استهلاك المذيبات المستخدمة إلى وجود نفايات عضوية ملوثة للبيئة وتشكل عبئاً مادياً وبيئياً عند التخلص منها .

ويمكن **لعملية الفصل باستخدام الأغشية** التعامل مع تيارات غاز ثاني أكسيد الكربون ذات التركيز العالي، ولكن نقاء غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج ليس مرتفعاً، حيث يتراوح بين 60 إلى 90%. ويعتبر هذا عيباً جوهرياً نظراً لأنه حتى يتم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون في عمليات لاحقة، يجب أن يكون بدرجة نقاء عالية، أعلى من 98%.

بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم تقنية **الفصل بالتبريد العميق** لفصل غاز ثاني أكسيد الكربون عن الخليط الغازي الآخر عند درجة التجمد باستخدام دورات من الضغط والتبريد وتقليل الضغط. ومن خلال هذه التقنية، يمكن إنتاج غاز ثاني أكسيد الكربون مباشرة دون الحاجة إلى أي إضافات أو مواد. ومع ذلك، فهي تقنية تستهلك طاقة كبيرة للتبريد / الضغط، بالإضافة إلى ذلك، تظهر مشاكل تجمد ثاني أكسيد الكربون عند درجات الحرارة المنخفضة.

وأوضحت المتحدثة أن هناك حاجة إلى طريقة جديدة يمكنها فصل غاز ثاني أكسيد الكربون بشكل فعال من التيارات الحاوية على تركيزات مرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون وإنتاج ثاني أكسيد الكربون عالي النقاء، واشارت في هذا الصدد إلى أنه في المرحلة فوق الحرجة، يكون ثاني أكسيد الكربون أكثر كثافة من النيتروجين والهيدروجين. لكي يصل ثاني أكسيد الكربون إلى المرحلة فوق الحرجة، يجب أن تكون درجة الحرارة والضغط أعلى من 31 درجة مئوية و8.73 بار على التوالي.

سلطت المتحدثة الضوء على طريقة جديدة لفصل ثاني أكسيد الكربون من مخاليطه مع النيتروجين أو الهيدروجين عند تركيزات مختلفة للمرحلة فوق الحرجة. فنجد أنه باستخدام الفرق في الخصائص الفيزيائية، تم الحصول على تيارين نقيين من ثاني أكسيد الكربون من الاسفل وتيار النيتروجين أو الهيدروجين من الأعلى. وقد تمت دراسة ذلك معملياً وحساب التكاليف المترتبة على تطبيق هذه العملية في مصنع الأمونيا بالتكامل مع مصنع اليوريا على المستوى الصناعي باستخدام برنامج Aspen Hysys. وتبين من خلال هذه العملية، يُبقي ثاني أكسيد الكربون عند أو بالقرب من المرحلة فوق الحرجة حيث سيكون له كثافة تشبه السائل، ولكن في درجة حرارة أقل بكثير، كما هو موضح في الجدول 1.

جدول 1: كثافة الغازات المختلفة في الصورة فوق الحرجة

الخواص	ثاني أكسيد الكربون	النيتروجين	الهيدروجين
درجة الحرارة الحرجة (درجة مئوية)	30.9782	-146.958	-240.005
الضغط الحرج (بار)	73.733	33.958	12.964
الكثافة (كجم/متر مكعب)	850.32	203.54	13.927

وأشارت إلى أنه في مثل هذه الظروف فوق الحرجة، سيكون ثاني أكسيد الكربون أكثر كثافة من غازي النيتروجين والهيدروجين، لذلك يمكن فصله من أسفل برج الفصل، بينما سيتم فصل غازي النيتروجين والهيدروجين من أعلى البرج . وأفادت المتحدثة بأنه عندما يتم إدخال الخليط الغازي المحتوي على 20% من ثاني أكسيد الكربون إلى المفاعل عند 38 °م، و200 بار، في ظروف قريبة من الظروف فوق الحرجة، يتم تحقيق مستوى عالٍ من الفصل. كانت العينة من أعلى المفاعل عالية النقاء، في حالة خليط غازي ثاني أكسيد الكربون / نيتروجين، كان تركيز النيتروجين في العينة العلوية 91٪، وفي حالة خليط غازي ثاني أكسيد الكربون / هيدروجين، تم الوصول إلى تركيز غاز هيدروجين بنسبة 96.6 ٪ في العينة. ومع ذلك، تحتوي العينة السفلية من المفاعل على تركيز من ثاني أكسيد الكربون يزيد قليلاً عن 70٪، لذلك يلزم مرحلة أخرى من الفصل فوق الحرجة للوصول إلى ثاني أكسيد الكربون عالي النقاء. في المرحلة الثانية للفصل، يتم إدخال خليط غازي يحتوي على 70٪ من ثاني أكسيد الكربون إلى المفاعل.

أشارت المتحدثة أنه عند مقارنة رأس المال التشغيلي (CAPEX) وتكاليف التشغيل (OPEX) المرتبطة بتكامل الطريقة الجديدة للفصل في مصنع الأمونيا مع مصنع الأمونيا التقليدي الذي يحتوي على

وحدات استخلاص المذيبات التقليدية لثاني أكسيد الكربون، وجدنا أنه يوجد وفورات بنسبة 62٪ و43٪ في تكاليف رأس المال التشغيلي وتكاليف التشغيل على التوالي، عند استخدام الطريقة الجديدة. حيث يتم تحقيق خفض في التكلفة يقدر بـ 3.39 × 107 دولار في رأس المال التشغيلي، بينما تم تحقيق وفورات في تكاليف التشغيل بقيمة 2.98 × 108 دولار عند استخدام طريقة الفصل الجديدة.

يعود هذا الانخفاض في التكلفة إلى إزالة وحدات استخلاص ثاني أكسيد الكربون إلى استخدام ضاغط واحد. كما أن هذه الطريقة لا تحتاج إلى تسخين، مما أدى إلى خفض التكلفة الإجمالية لوحدة فصل ثاني أكسيد الكربون بمقدار 1.90 × 108 دولار، وهو ما ساهم بشكل أكبر في إجمالي الوفورات المحققة. تتجه تكلفة التشغيل في هذه الطريقة الجديدة بشكل رئيسي إلى تشغيل الضاغط. بشكل عام، تم تحقيق وفورات إجمالية قدرها 3.32 × 108 دولار عند دمج طريقة فصل الطور الفائق في مصنع إنتاج الأمونيا واليوريا.

وفي نهاية العرض التقديمي أشارت المتحدثة إلى بعض الاستنتاجات، أهمها:

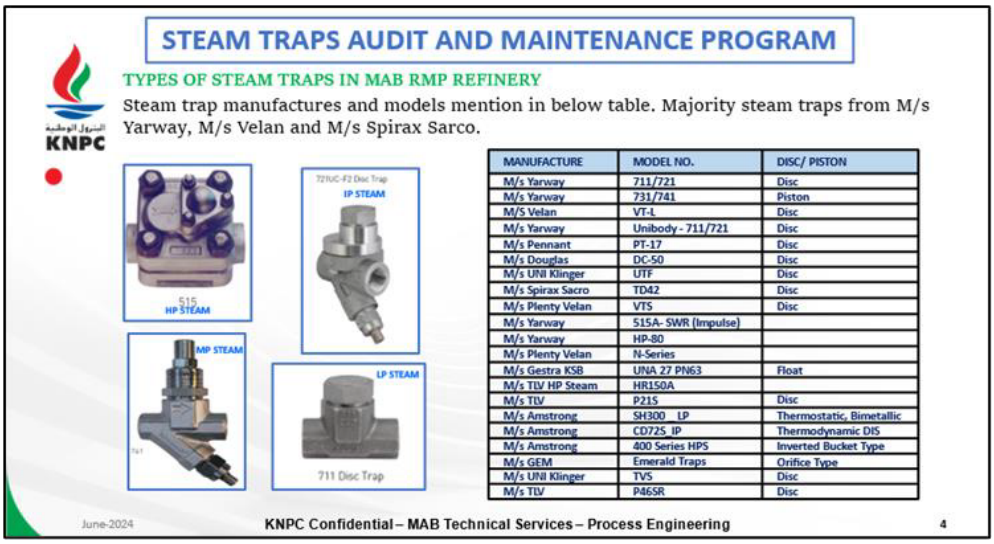
- تمكنت طريقة الفصل فوق الحرجة من فصل ثاني أكسيد الكربون بشكل فعال من مخاليطه مع النيتروجين والهيدروجين.
- الغازات الناتجة من هذه العملية تكون عالية النقاء ومضغوطة، مما يسمح باستخدامها مباشرة في النقل والشحن والتخزين.
- لا تشكل التكلفة قيداً عند دمجها في العمليات ذات الضغط العالي، مثل عملية تصنيع الأمونيا واليوريا، ونقل وتخزين ثاني أكسيد الكربون.
- يمكن استخدام هذه الطريقة في إنتاج الطاقة من غازات ما قبل الاحتراق والحرق باستخدام الاكسجين النقي، وتكنولوجيات إنتاج الهيدروجين الحيوي، وغيرها من الصناعات عالية الضغط ذات الانبعاثات المرتفعة.
- تعتبر طريقة فصل ثاني أكسيد الكربون فوق الحرجة أكثر اقتصادية وصديقة للبيئة بالمقارنة بالطرق التقليدية الأخرى. في هذه الطريقة لا يتم تصريف أي نفايات إلى البيئة ولا يتم استخدام أي مواد كيميائية وتستهلك طاقة أقل مقارنة بعمليات فصل ثاني أكسيد الكربون الأخرى عند دمجها في عمليات الضغط العالي؛ وبالتالي، سيتم تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.

الجلسة الفنية الثالثة بعنوان " دور كفاءة الطاقة في تقليل انبعاثات الكربون في الصناعات البترولية النهائية"، ترأس الجلسة الدكتور وائل المسلماني، وتضمنت استعراض أربعة أوراق فنية، كما يلي:

استعرضت المتحدثة أفضل الممارسات لتقليل استخدام الطاقة في مصفاة شركة البترول الوطنية – ميناء عبد الله، حيث أن تصميم المصفاة يتميز بالعديد من الخصائص الموفرة للطاقة مثل الغلايات والسخانات عالية الكفاءة، وموازنة التوربينات لتقليل تقليل البخار من خلال صمامات خفض الضغط في العديد من سيناريوهات التشغيل، وتوربينات استعادة الطاقة ذات الضغط العالي، والتكامل الحراري العالي بين الوحدات لتقليل التبريد/التدفئة، وإدارة مصائد البخار، وغيرها.كما اعتمدت المصفاة مؤشر Solomon لكثافة الطاقة (EII) كمعيار لرصد كفاءة الطاقة وضمان التحسين المستمر.

سلطت المتحدثة الضوء على تطبيق برنامج فحص وصيانة مصائد البخار Steam Traps Audit and Maintenance Program، حيث تحتوي المصفاة على أكثر من 8500 مصيدة بخار، ويمثل النوع الديناميكي الحراري نحو 95% من إجمالي المصائد، بينما يمثل النوع الترموستاتي المتوازن نحو 5%. يمثل الشكل (12) أنواع مصائد البخار المستخدمة في مصفاة ميناء عبد الله.

الشكل (12): أنواع مصائد البخار المستخدمة في مصفاة ميناء عبد الله



MANUFACTURE	MODEL NO.	DISC/ PISTON
M/s Yarway	711/721	Disc
M/s Yarway	731/741	Piston
M/S Velan	VT-L	Disc
M/s Yarway	Unibody - 711/721	Disc
M/s Pennant	PT-17	Disc
M/s Douglas	DC-50	Disc
M/s UNI Klinger	UTF	Disc
M/s Spirax Sacro	TD42	Disc
M/s Plenty Velan	VTS	Disc
M/s Yarway	515A- SWR (Impulse)	
M/s Yarway	HP-80	
M/s Plenty Velan	N-Series	
M/s Gestra KSB	UNA 27 PN63	Float
M/s TLV HP Steam	HR150A	
M/s TLV	P215	Disc
M/s Amstrong	SH300 LP	Thermostatic, Bimetallic
M/s Amstrong	CD725 IP	Thermodynamic DIS
M/s Amstrong	400 Series HPS	Inverted Bucket Type
M/s GEM	Emerald Traps	Orifice Type
M/s UNI Klinger	TVS	Disc
M/s TLV	P46SR	Disc

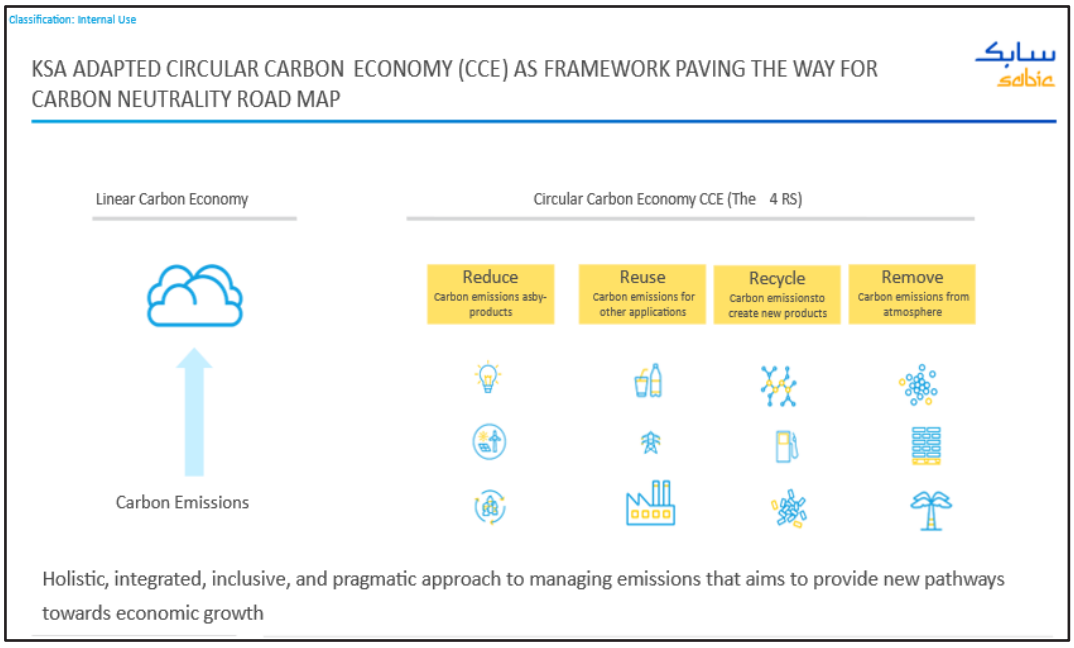
كما أشارت المتحدثة إلى الفوائد التي تم الحصول عليها نتيجة تطبيق البرنامج من حيث خفض استهلاك البخار، وتحسين عملية استرجاع المياه المتكاثفة، وتحسين كفاءة معدات عملية نقل الحرارة، والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 29 ألف طن سنوياً، وتوفير نحو 2 مليون دولار سنوياً من تكلفة الصيانة للمصائد، بالإضافة إلى زيادة الموثوقية والسلامة التشغيلية.

استعرض المتحدث خطط شركة سابك في مجال خفض الانبعاثات الكربونية، والتحول الطاقوي باستثمارات ضخمة خلال 15 عام القادمة، أو ما يمثل نحو 20 % من إجمالي الاستثمارات العالمية في المسارات المختلفة لخفض الانبعاثات، وفي مجال إنتاج الطاقات المتجددة فتمثل نحو 37 %.

تأتي برامج تحسين كفاءة الطاقة في مقدمة المسارات الهامة في مجال الحياد الكربوني في قطاع النفط والغاز وتمثل نحو 4 % من التقنيات المستخدمة للحياد الكربوني على مستوى العالم، والتي يمكن أن يخفض ما قيمتة نحو 5-6 جيجا طن سنوياً من غاز ثاني أكسيد الكربون وذلك طبقاً للعديد من الدراسات العالمية في هذا الشأن.

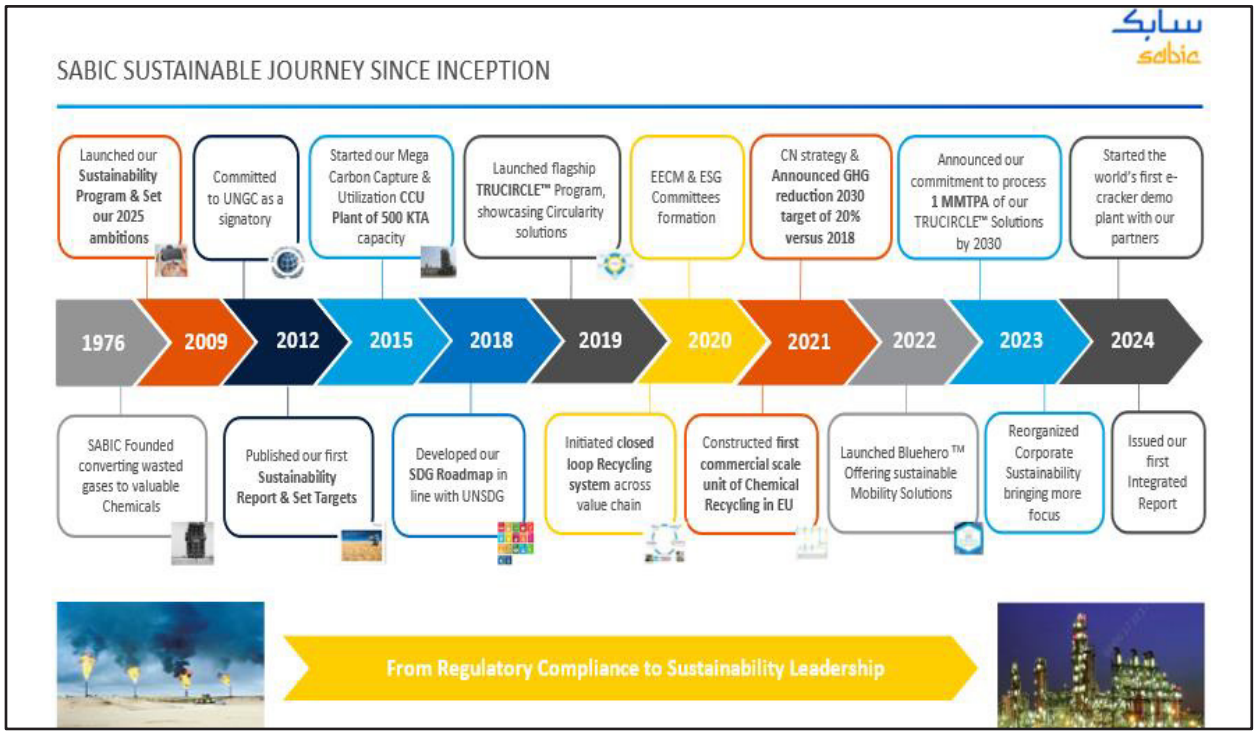
كما أشار المتحدث إلى استراتيجية المملكة ورؤيتها لعام 2030، بشأن خفض الانبعاثات الكربونية من خلال مبادرة الاقتصاد الدائري للكربون، حيث يمثل هذا النهج طريقة مستدامة اقتصادياً لإدارة الانبعاثات باستخدام استراتيجيات التخفيض، وإعادة الاستخدام، والتدوير، والإزالة، الشكل (13).

الشكل (13): مبادرة الاقتصاد الدائري للكربون للمملكة العربية السعودية لخفض انبعاثات الكربون



وفي مجال صناعة البتروكيماويات بدأت الشركة بخفض البصمة الكربونية لمنتجاتها منذ عام 1976 عندما عملت على الإستفادة من تحويل الغازات المهدرة إلى كيماويات ذات قيمة مضافة، وفي عام 2009 كان أول تقرير للشركة في مجال الإستدامة، ثم في عام 2018 كانت بداية خارطة الطريق لأهداف التنمية المستدامة SDG، ثم خطط إعادة التدوير في عام 2019، وتشغيل أول وحدة لإعادة التدوير على النطاق التجاري في عام 2020، وصولاً إلى إعادة صياغة أهداف الشركة بأن تصبح الشركة العالمية الرائدة المفضلة في مجال الكيماويات بحلول 2025. يبين الشكل (14) مبادرات شركة سابك نحو الإستدامة.

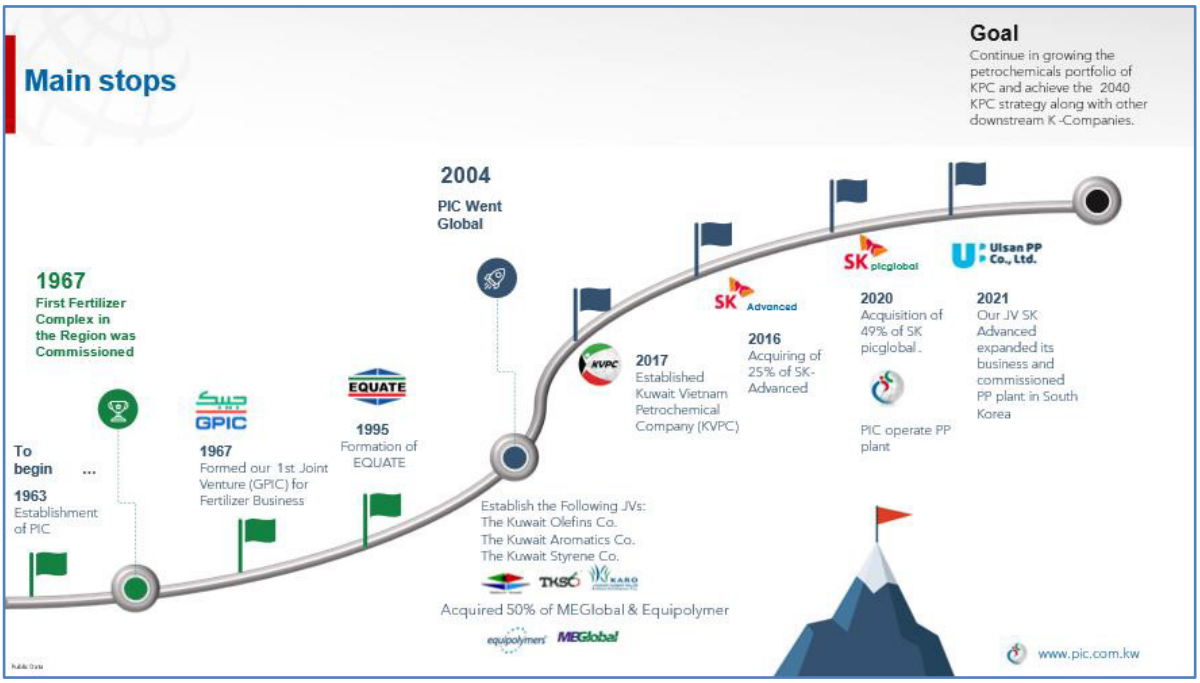
الشكل (14): مبادرات شركة سابك نحو الإستدامة



أشار المهندس/ محمد العنزي في بداية العرض التقديمي إلى أن شركة صناعة الكيماويات البترولية هي إحدى الشركات التابعة لمؤسسة البترول الكويتية، وهي شركة رائدة في صناعة الكيماويات البترولية في الكويت والشرق الأوسط وحول العالم، ولها خبرة في إنتاج البتروكيماويات تزيد عن 50 عام، حيث أنشئت الشركة في عام 1963، وفي عام 1967 أنشأت الشركة مصنع إنتاج الأسمدة، كما ساهمت في إنشاء شركة "جيبك" في البحرين.

بعد ذلك بدأت الشركة بتأسيس شركات عالمية لتكون على مقربة من الأسواق سريعة النمو في آسيا وأفريقيا وكندا وأوروبا الشرقية، مثل شركة MEG Global في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2019، وشركة MEG Global في عام 2004 في كندا لإنتاج الإيثلين جلايكول، و شركة MEG Global في ألمانيا في عام 2004 لإنتاج البولي إيثيلين تيرفيثالايت PET، ثم طورت الشركة اعمالها في كوريا الجنوبية من خلال شركة SK PLCGlobal في عام 2020 لإنتاج البروبيلن أوكسيد، والبولي جلايكول. واخيراً في عام 2021 شاركت في تأسيس شركة لإنتاج البولي بروبيلين في كوريا الجنوبية. يبين الشكل (15) تطور أعمال شركة صناعة الكيماويات البترولية على المستوى المحلي والدولي.

الشكل (15): تطور أعمال شركة صناعة الكيماويات البترولية على المستوى المحلي والدولي



من جانب آخر تطرق **المهندس محمد العنزي** إلى تعريف الاقتصاد الدائري ومزاياه مقارنة بالاقتصاد الخطي، ودوره في إعادة تدوير المنتجات البتروكيماوية، واستخدام المواد المعاد معالجتها في انتاج مواد جديدة، مما يحد من نسبة الانبعاثات الكربونية.

كما سلط المتحدث الضوء على أبرز الطرق الحديثة المستخدمة في تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري التي يمكن ان تتبناها الشركة في مشاريعها المستقبلية، ومن أبرزها إعادة التدوير الميكانيكية والكيميائية.

وقائع جلسات اليوم الثاني

الجلسة الفنية الرابعة (جلسة نقاشية):

أدار الحلقة النقاشية الدكتور محمد ابوزهرة رئيس منطقة الشرق الأوسط وأفريقيا_ معهد احتجاز الكربون العالمي، وشارك في الحلقة النقاشية ثلاثة متحدثين، هم:

- السيد/ كازونوري كويكي- شركة JGC
- الأستاذة/ كيكوكو شينشي – معهد بحوث ميتسوبيشى
- الدكتور / ناصر عودة – شركة سوناطراك

افتتح الدكتور محمد أبو زهرة الجلسة النقاشية باستعراض المحاور الرئيسية التالية:

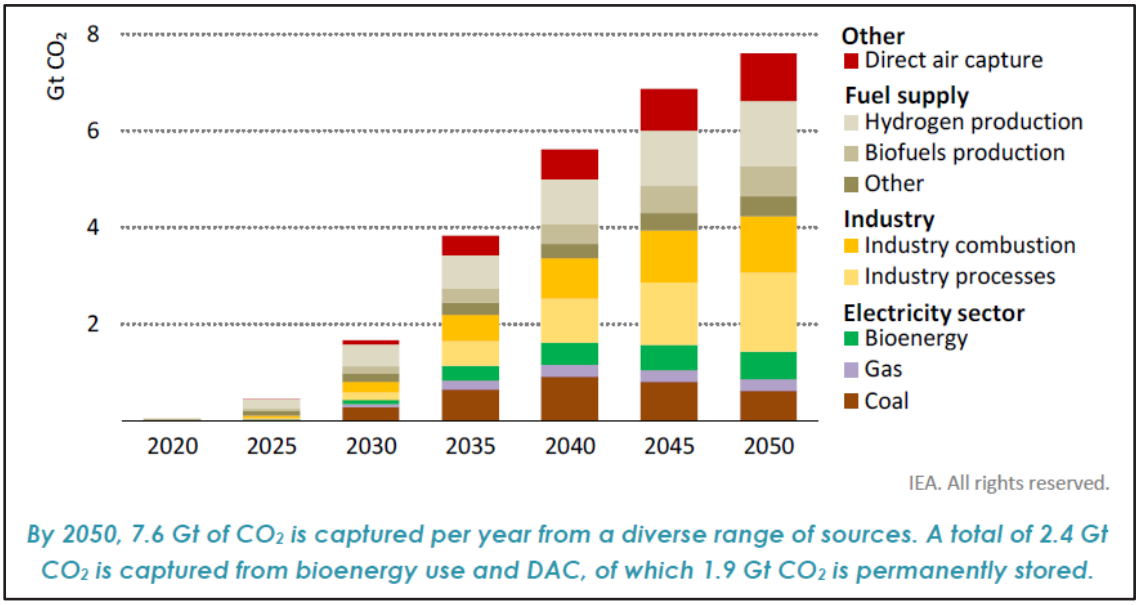
- دور تقنية التقاط وخزن الكربون في تحسين اقتصاديات إنتاج الهيدروجين بطريقة أكثر ملاءمة للشروط البيئية
- تأثير السياسات الدولية والحكومية والحوافز على تبني تقنية التقاط وتخزين الكربون في عملية إنتاج الهيدروجين .
- تحديات وفرص تطبيق تقنية التقاط وتخزين الكربون في عملية إنتاج الهيدروجين.
- فرص التعاون بين الدول العربية واليابان في مجال إنتاج وتصدير الكربون والهيدروجين.

بعد ذلك أعطى المجال للمتحدثين لتقديم مداخلاتهم

أكد السيد /كويكي في مداخلته على أهمية عملية دمج تقنية احتجاز الكربون مع إنتاج الهيدروجين

في إطار السعي لتحقيق الهدف الذي حددته وكالة الطاقة الدولية للوصول إلى صفر انبعاثات بحلول عام 2050، مشيراً إلى أن العالم في عام 2023 قد نجح في تخزين نحو 49 مليون طن سنوياً (0.049 جيجا طن سنوياً) من غاز ثاني أكسيد الكربون من خلال عدد من المشروعات في كل من أمريكا الشمالية، وامريكا الجنوبية، والشرق الأوسط، وأوروبا، وآسيا والمحيط الهادي، وأن التقديرات تشير إلى أنه يجب إضافة نحو 250 منشأة سنوياً خلال الفترة 2030-2050 حتى تتحقق الهدف المعلن. يبين الشكل (16) كميات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون المطلوب احتجازها لتحقيق صفر انبعاثات بحلول 2050.

الشكل (16): كميات احتجاز غاز ثاني أكسيد الكربون المطلوب احتجازها لتحقيق صفر انبعاثات بحلول 2050



By 2050, 7.6 Gt of CO_2 is captured per year from a diverse range of sources. A total of 2.4 Gt CO_2 is captured from bioenergy use and DAC, of which 1.9 Gt CO_2 is permanently stored.

كما أشار المتحدث إلى أن الدول الأعضاء في أوابك من المناطق الواعدة لمشروعات احتجاز الكربون نظراً لوجود مصادر الإنبعاثات من صناعتي التكرير والبتروكيماويات، فضلاً عن وجود السعات التخزينية والتشكيلات الجيولوجية المناسبة.

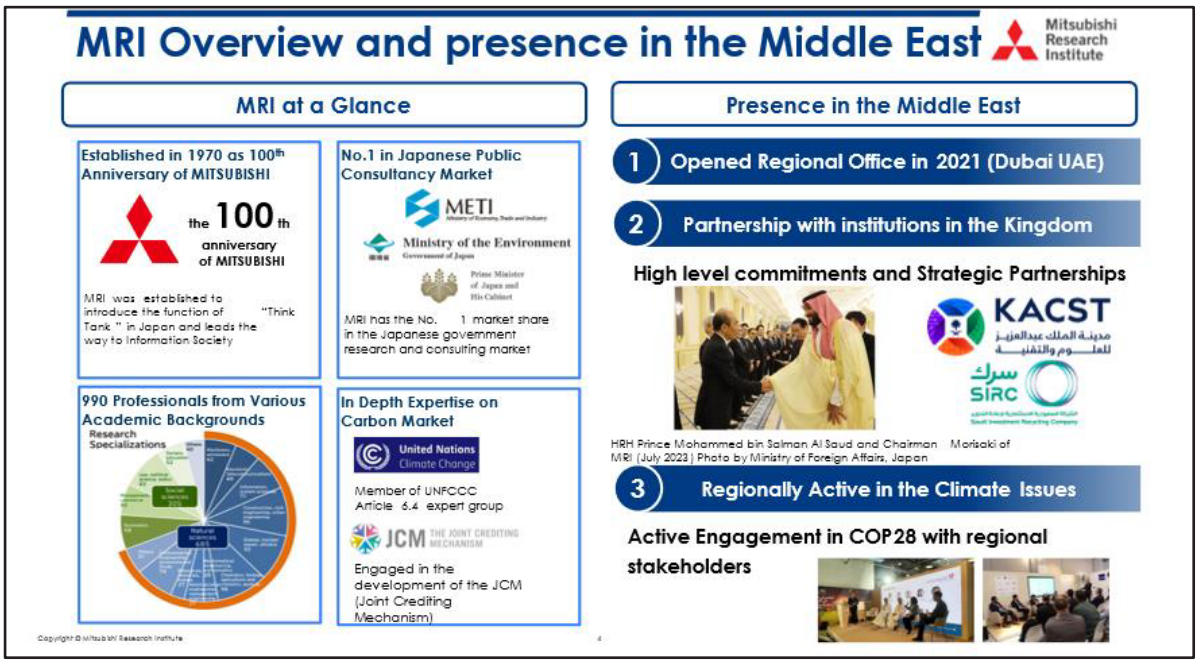
ومن جانب اخر سلط المحدث الضوء على بعض التحديات التي تواجة احتجاز الكربون عوادم غاز المداخن " بعد الاحتراق" مقارنة باحتجاز الكربون في تقنيات ما قبل الاحتراق " الغاز الاصطناعي" ، حيث يتعرض الأمين المستخدم في احتجاز الكربون بعد الاحتراق إلى ظروف تشغيلية قاسية بسبب الأوكسجين المستخدم وانخفاض الضغوط التشغيلية ، وانخفاض نسب الكربون في غازات العوادم، فضلاً

عن وجود العديد من الملوثات من أكاسيد النتروجين، مما يؤثر ذلك على ارتفاع النفقات الرأسمالية التشغيلية بشكل كبير في تقنيات مابعد الاحتراق مقارنة بتقنيات ما قبل الاحتراق.

أما السيدة / كيكوكو شينشي Kikuko Shinchi، من معهد متسوبيشي للأبحاث MRI، فاستهلت

مداخلتها بنبذة عن المعهد، وأفادت بأنه مؤسسة بحثية يابانية تأسست عام 1970 ويهدف إلى حل المشكلات المجتمعية في اليابان وفي جميع أنحاء العالم من خلال مركز الأبحاث والاستشارات التابع للمعهد. ويضم المعهد شبكة واسعة ومتعددة التخصصات من الصناعة والأوساط الأكاديمية والحكومة. كما أن للمعهد فرع في كل من دولة الإمارات، والمملكة العربية السعودية، وتعاون في مجال البحثي مع مدينة الملك عبد العزيز للعلوم التقنية KACST. يبين الشكل (17) نشأة مركز ميتسوبيشي للأبحاث، ومجالات العمل المختلفة المحلية والدولية.

الشكل (17): نشأة مركز ميتسوبيشي للأبحاث، ومجالات العمل المختلفة المحلية والدولية



بعد ذلك استعرض الدكتور ناصر عودة أهم التحديات التي تواجه اقتصاد الهيدروجين من حيث الإنتاج والنقل والاستخدام، والتي يمكن تلخيصها على النحو التالي:

- تعتبر تقنية الهيدروجين حديثة نسبياً مقارنة بأنواع الطاقة الأخرى.

- صعوبات نقل الهيدروجين عبر الأنابيب نظراً للطبيعة التآكلية للهيدروجين، مما يستدعي تغيير خطوط النقل الحالية أو إنشاء خطوط أنابيب جديدة ذات خصائص تتناسب مع طبيعة الهيدروجين.
- إجراءات السلامة الصارمة الواجب اتباعها من قبل المنتج أو الناقل أو المستهلك.
- نقص الخبرة المتعلقة بإجراءات استخدام الهيدروجين كوقود في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

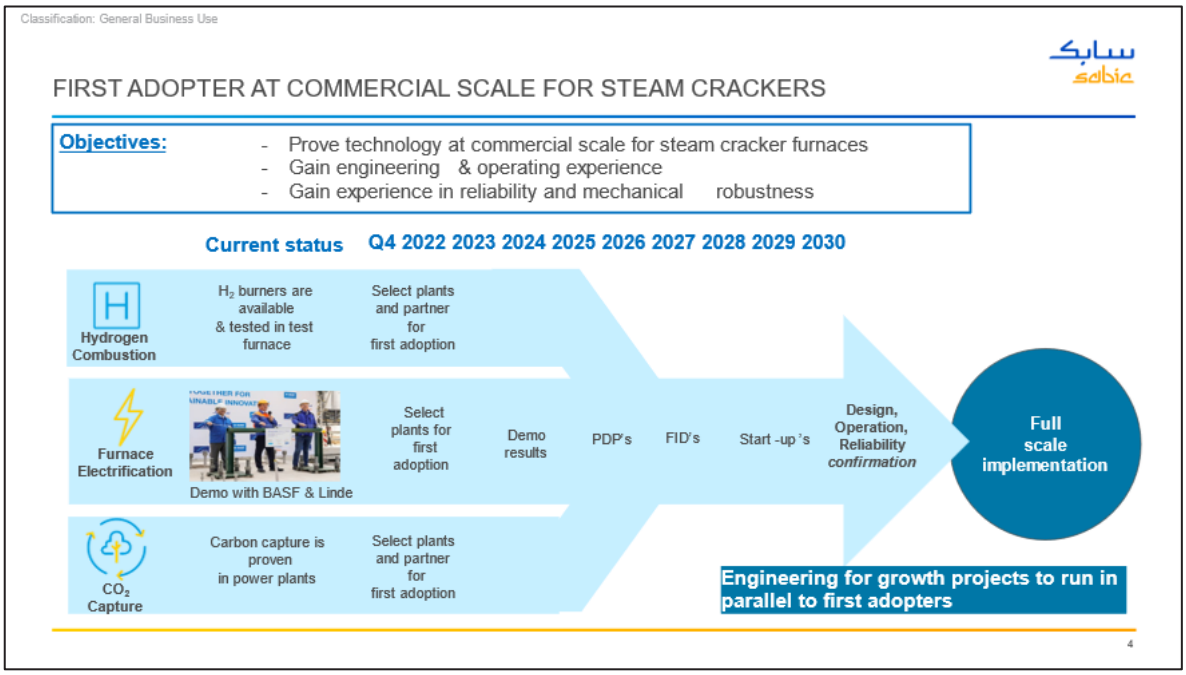
واختتم الدكتور ناصر مداخلته بأنه على الرغم من أهمية اقتصاد الهيدروجين كأحد الحلول المطروحة للوصول إلى الحياد الكربوني إلا أن هناك العديد من الصعوبات والتحديات التي يجب التغلب عليها.

الجلسة الفنية الخامسة بعنوان " المبادرات والجهود لخفض الانبعاثات الكربونية"، ترأس الجلسة السيد كازوكي ياماورا ، وتضمنت استعراض الأوراق التالية:

أشار المتحدث بأن عرضة التقديمي سوف يركز على مفهوم استخدام غاز الهيدروجين كوقود نظيف في مفاعلات التكسير البخاري في إنتاج البتروكيماويات، حيث تستهلك مفاعلات التكسير البخاري في شركة سابك نحو 20 % من إجمالي استهلاك الطاقة بالشركة.

وأفاد المتحدث بأن شركة سابك هي من أكبر الشركات المنتجة للمواد الكيمياوية التي تعهدت بخفض انبعاثات الكربون حتى الوصول الى الحياد الكربوني عام 2050 قد بدأت العمل على إيجاد حلول لهذه المشكلة. ومن هذه الحلول ايجاد مصدر للطاقة الحرارية لا يسبب انبعاثات الكربون وهو الهيدروجين بالإضافة الى حلول أخرى. حيث بدأت الشركة بتنفيذ أول مشروع لاستعمال الهيدروجين كوقود نظيف لإنتاج الاوليفينات الذي سيتم تشغيله في 2028/2027. يبين الشكل (18) مراحل تطور مشروع شركة سابك لاستخدام الهيدروجين كوقود في وحدات التكسير البخاري.

الشكل (18): تطور مشروع شركة سابك لاستخدام الهيدروجين كوقود في وحدات التكسير البخاري



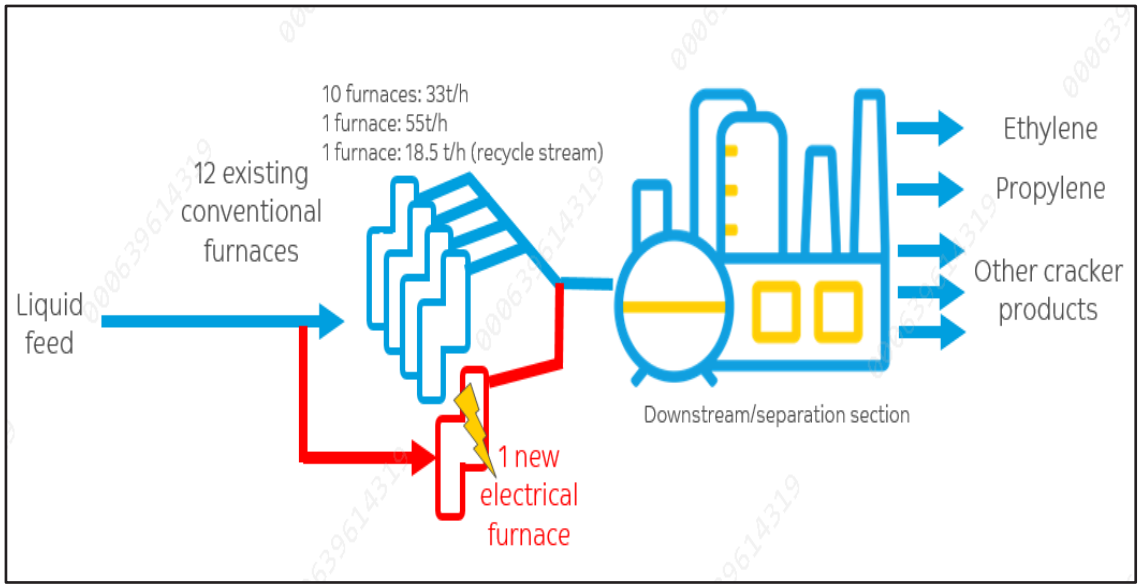
وأشار المتحدث إلى أن انخفاض المحتوى الحراري الحجمي للهيدروجين مقارنة بنفس الحجم من الغاز الطبيعي يستدعي تعديل معدات الاحتراق بما في ذلك النظام الهيدروليكي. حيث يحتاج الهيدروجين لكميات اقل من هواء الاحتراق، بالإضافة إلى ان سرعة لهب الهيدروجين اعلى من سرعة لهب الغاز الطبيعي، وأيضاً فإن حرارة لهب الهيدروجين اعلى من حرارة لهب الغاز الطبيعي مما قد يتسبب في تجاوز الحد الأعلى لتحمل مواد الفرن الانشائية وأيضا تجاوز الحد المسموح به لانبعاثات أكسيد النتروجين. وقد قامت سابك بالبحث عن أفضل الحلول لمواجهة التحديات المذكورة.

في إطار خطة شركة سابك للالتزام بخفض الانبعاثات الكربونية وفق استراتيجية المملكة 2050، وصولاً إلى الحياد الكربوني تسعى الشركة كمرحلة أولى إلى خفض انبعاثاتها الكربونية بنسبة 20 % بحلول عام 2030. ولتحقيق هذا الهدف اتجهت الشركة إلى عدة خيارات منها استخدام الكهرباء المنتجة من

المصادر المتجددة في تشغيل الأفران بدلاً من الوقود الأحفوري، بالإضافة إلى استخدام تقنيات احتجاز الكربون المنبعث من مفاعلات التكسير بالبخار، وإنتاج الهيدروجين الأزرق والأخضر واستخدامه في إنتاج الأمونيا والميثانول منخفض الكربون.

وأشار المتحدث بأن الشركة شرعت في تشغيل مصنع تجريبي باستخدام النوعية الجديدة من مفاعلات التكسير البخاري بالتعاون مع شركة ليندي، وBSF، وصولاً إلى التطبيق على النطاق التجاري بحلول 2028. كما يهدف المشروع إلى اكتساب الخبرات في هذا المجال وتطبيق في كافة المرافق التابعة للشركة. يبين الشكل (19) نموذج لأحد الأفران التجريبية التي تعمل بالكهرباء، والجاري تجربته في شركة سابك.

الشكل (19): نموذج لأحد الأفران التجريبية التي تعمل بالكهرباء والجاري تجربته في شركة سابك

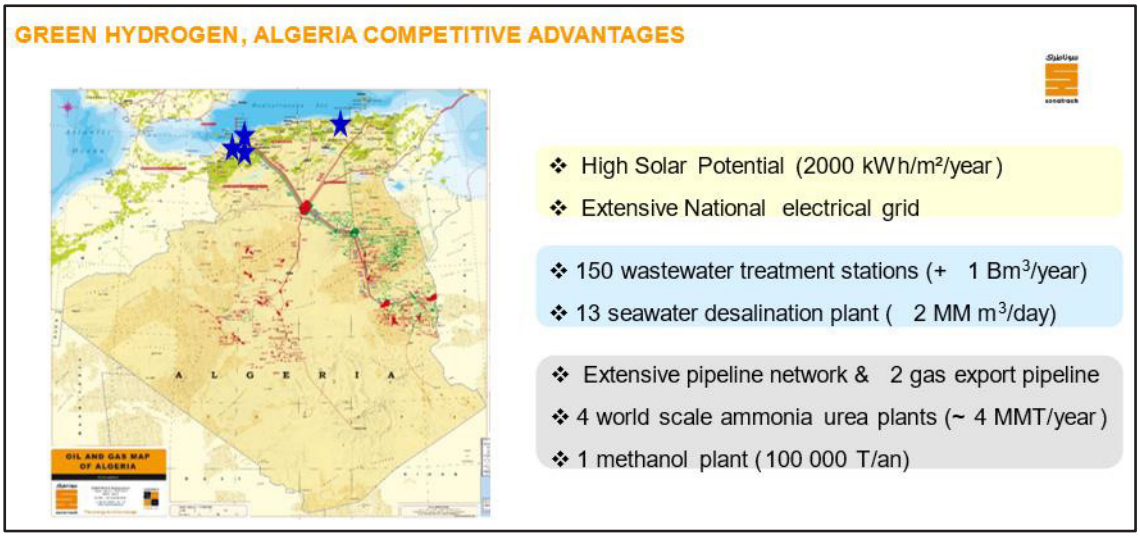


استعرض المتحدث جهود شركة سوناطراك نحو التحول الطاقوي، والتي تعتمد على أربعة محاور رئيسية وهي: خفض انبعاثات غازات الشعلة، وتحسين كفاءة الطاقة، وإنتاج مواد جديدة حاملة للطاقة من الهيدروجين ومشتقاته، بالإضافة إلى إنتاج الطاقات المتجددة، وخاصة الشمسية والرياح واستخدامها في قطاع البترول والغاز.

تعمل الشركة على تنفيذ عدد من مشروعات إنتاج الطاقات المتجددة، وخاصة محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية في مواقع الإنتاج المؤهلة الموجودة في المناطق الجنوبية من الجزائر والتي تتمتع بمستويات عالية من الإشعاع الشمسي، مما يسمح لسوناطراك بالحد من بصمتها الكربونية في استهلاك الغاز الطبيعي، وخفض تكاليف الكهرباء. وقد تم بالفعل تشغيل محطة للطاقة الشمسية الكهروضوئية، وهناك العديد من المحطات الأخرى التي تستخدم أحدث تقنيات الألواح ثنائية الجانب.

ومن خلال الاستفادة من المزايا التنافسية للجزائر مثل الإمكانات الشمسية العالية والبنية التحتية القائمة (الموارد المائية وشبكة الأنابيب ومصانع البتروكيماويات)، أطلقت سوناطراك برنامجاً طموحاً للهيدروجين الأخضر، ويتبع البرنامج نهجا مرحليا - بدءاً بمشاريع تجريبية لاختبار مختلف عمليات الإنتاج والتخزين والاستخدام عبر سلسلة القيمة، حيث ستمهد هذه المرحلة لمشاريع على نطاق تجاري أكبر في المستقبل. يبين الشكل (20) المزايا التنافسية لشركة سوناطراك في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر.

الشكل (20): المزايا التنافسية لشركة سوناطراك في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر



استكمل المهندس عمر استعراض جهود شركة سابك في مجال خفض الانبعاثات الكربونية، والتي تم تسليط الضوء عليها من خلال في الأوراق الفنية التي تم استعراضها خلال يومي الندوة. وإشار إلى أن

الورقة تسلط الضوء على جهود شركة سابك في مجال احتجاز ثاني أكسيد الكربون من وحدات التكسير البخاري، والتي مازالت قيد التطوير، وتعد شركة سابك من أوائل الشركات التي اعتمدت هذه التقنيات من خلال عدد من المشروعات على النطاق التجريبي. وقد استعرض المتحدث المكونات الرئيسية لهذه التقنيات والتحديات التي تواجه عملية تشغيلها والوسائل المتبعة لمواجهة هذه التحديات.

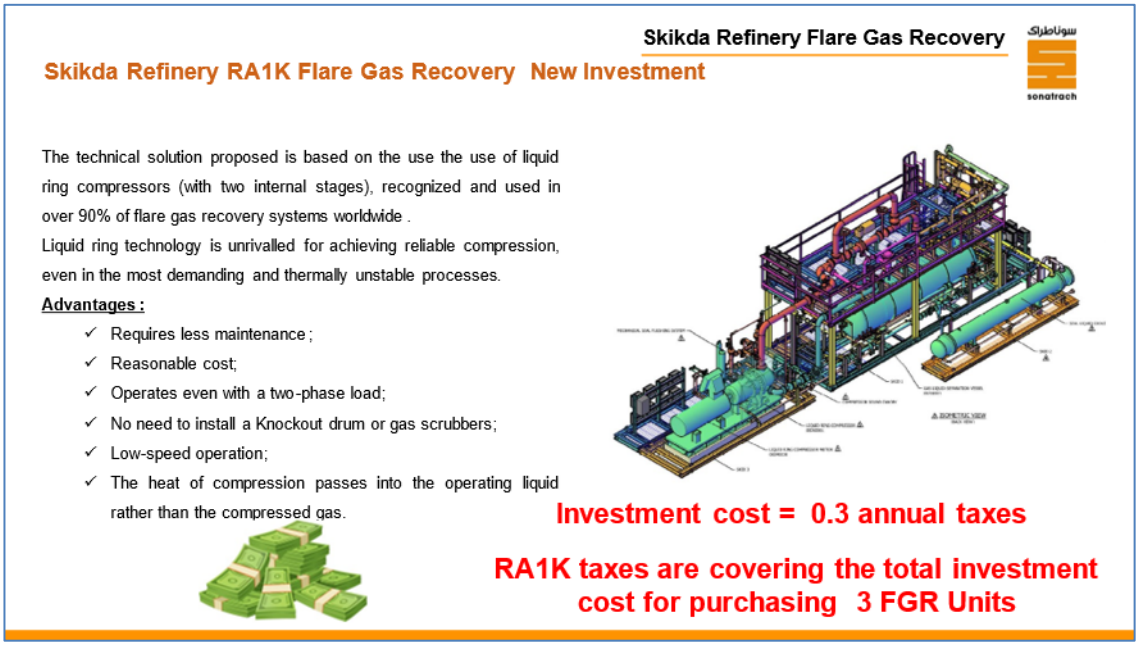
الجلسة الفنية السادسة بعنوان "المبادرات والجهود لخفض الانبعاثات الكربونية"، وترأس الجلسة الدكتور ناصر عودة من مركز الملك عبد الله للدراسات والأبحاث البترولية KAPSARC وتضمنت استعراض أربعة أوراق فنية، كما يلي:

استعرض المتحدث في بداية عرضه التقديمي نبذة عن مصفاة سكيكدة التابعة لمجمع سوناطراك، وتعد أكبر مصفاة في الجزائر بطاقة تكريرية تقدر ب 16,5 مليون طن سنو يا. تنتج المصفاة الغازات البترولية المسالة، الجازولين، الكيروسين، السولار، زيت الوقود الثقيل، النافتا البتروكيماوية، العطريات (البنزين العطري، الطولوين، خليط الزايلين، بارا الزايلين) والإسفلت.

ثم سلط الضوء لى مكونات المصفاة من الوحدات المختلفة من وحدات الفصل و التحويل والمعالجة، وأشار إلى أن المصفاة تحتوي على وحدتين للتقطير الجوي (الإبتدائي) ، ثلاث وحدات لمعالجة وفصل الغازات البترولية المسالة، ووحدتين للتهذيب بالعامل الحفاز، وحدة فصل العطريات، وحدة فصل البار زايلين، وحدة لأزمرة الزايلين، وحدة لتنقية الهيدروجين، ووحدتين لأزمرة النافتا الخفيفة، ووحدة التقطير الفراغي، وحدتين لإنتاج أبخرة الماء، النيتروجين، الهواء، ماء التبريد، ووحدة معالجة المياه الصناعية، ووحدة تخزين المنتجات البترولية.

ثم استعرض المتحدث خطط المصفاة في خفض الانبعاثات الكربونية من خلال عدد من المسارات، منها إنشاء وحدة لاسترجاع غازات الشعلة التي تصل كفاءتها إلى نحو 56% من إجمالي الإنبعاثات الغازية للمصفاة، وجاري العمل لرفع طاقتها باستخدام ضواغط متطورة. يبين الشكل (21) وحدة إسترجاع الغازات الجديدة في مصفاة سكيكدة.

الشكل (21): وحدة إسترجاع الغازات الجديدة في مصفاة سكيكدة



أشار المتحدث إلى أن شركة مصفاة (ساسرف) هي شركة تكرير سعودية رائدة مملوكة بالكامل لشركة أرامكو السعودية، تأسست في عام 1981، وهي من أكبر المصافي في المملكة العربية السعودية والتي تقع في مدينة الجبيل الصناعية. تبلغ طاقتها التكريرية 300 ألف برميل/ يوم.

تعمل المصفاة على خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من خلال رؤيتها التي تتوافق مع رؤية المملكة بالوصول إلى الحياد الكربوني بحلول 2050، وذلك من خلال تطبيق مبدأ الاقتصاد الدائري للكربون بمكوناته الأربع (الخفض، وإعادة الإستخدام، وإعادة التدوير، والإزالة).

أشار المتحدث بأن إجمالي كمية انبعاثات الكربون قدرت بنحو 2.11 مليون طن مكافئ سنوياً وذلك طبقا لنتائج التقديرات في عام 2022. كما تم تحديد كافة مصادر الإنبعاثات الكربونية في المصفاة من وحداتها المختلفة، مثل عمليات التكرير ومنظومة الشعلة، ووحدات توليد الطاقة الكهربائية وبخار الماء، وإنتاج الهيدروجين. تستهدف الخطة خفض نحو 5 % من إجمالي الانبعاثات بحلول عام 2035، وبكميات

تقدر بنحو 0.15 مليون طن سنوياً، من خلال تطبيق مبادرات قصيرة وطويلة المدى تعتمد على مبدأ الإقتصاد الدائري للكربون، وبرامج تحسين كفاءة الطاقة، وتقنيات احتجاز الكربون. يبين الشكل (22): مبادرات مصفاة ساسرف نحو إزالة الكربون بحلول 2035

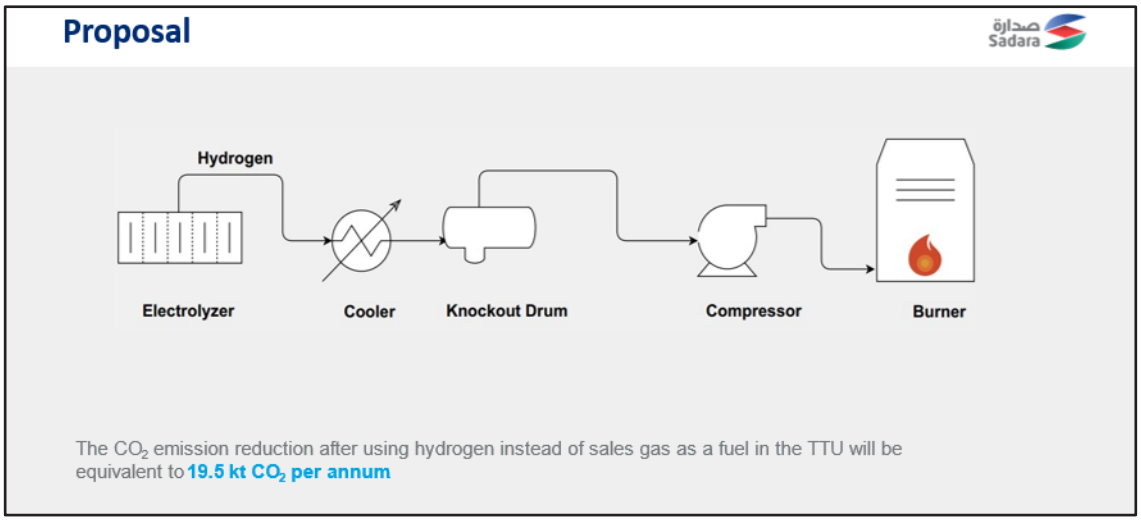
الشكل (22): مبادرات مصفاة ساسرف نحو إزالة الكربون بحلول 2035

كما استعرض المتحدث خطة الشركة لإنتاج الوقود المنخفض الكربون كأحد الحلول لخفض البصمة الكربونية للمنتجات مثل وقود الطيران المستدام SAF. كما نجحت الشركة في إنتاج الهيدوجين الأزرق بتطبيق تقنيات احتجاز الكربون، وبالتعاون والتكامل مع شركة سيبكم في إنتاج الميثانول.

تناولت الورقة إمكانية الاستفادة من الهيدروجين الذي يتم تنفيسه إلى الغلاف الجوي من المحلل الكهربائي للكلور القلوي (CA) في وحدة الكلور في شركة صدارة، وأنه وفقاً لأفضل ممارسات الصناعة، يمكن استخدام هذا الهيدروجين في إنتاج حمض الهيدروكلوريك بتركيز 32%، أو كوقود. وتتمثل الفكرة داخل الشركة في الوقت الحالي في استخدام الهيدروجين كوقود في وحدة المعالجة الحرارية (TTU)، مما يقلل من

استهلاك الغاز المستخدم لتشغيل الوحدة. ويتميز استخدام الهيدروجين كوقود في خفض الانبعاثات الكربونية، حيث من المتوقع أن تنخفض كمية الإنبعاثات الكربونية بنحو 20 ألف طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً نتيجة تطبيق المشروع في الوحدة. كما استعرض المتحدث مستلزمات جمع الهيدروجين وتنقيته، وذلك عن طريق تركيب مبرد لإزالة المكثفات، واسطوانة تفريغ، وضاغط لضغط الهيدروجين إلى الضغط المطلوب. يبن الشكل (23) مخطط استخدام الهيدروجين الفائض كوقود بدلاً من الغاز الطبيعي.

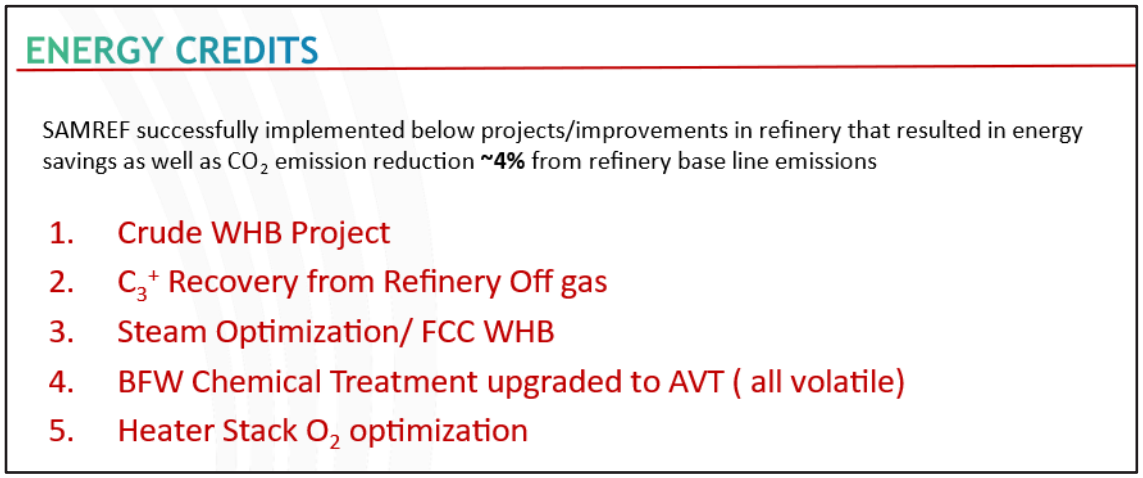
الشكل (23): مخطط استخدام الهيدروجين الفائض كوقود بدلاً من الغاز الطبيعي



قدم المهندس حامد في البداية نبذة عن الشركة، حيث أشار إلى أن شركة سامرف مشروع مشترك مملوك بالتساوي بين شركة أرامكو السعودية وشركة موبيل ينبع للتكرير (شركة فرعية مملوكة بالكامل لشركة إكسون موبيل). وتعد سامرف إحدى المصافي الرائدة في الشرق الأوسط، حيث تقوم بتكرير أكثر من 400 ألف برميل يومياً من النفط الخام العربي الخفيف. تنتج سامرف مجموعة كاملة من المنتجات بما في ذلك البروبان والعديد من أصناف زيت الديزل للسيارات (ADO)، ونوعين من زيت الوقود البحري الثقيل (MHFO) والكبريت.

استعرض المتحدث عدد من المبادرات التي نفذتها المصفاة خلال السنوات الخمس الأخيرة، والتي أدت إلى خفض انبعاثات الكربون بنحو 4% عن خط الأساس للمصفاة، وشملت عدد من المشاريع والمبادرات. يبين الشكل (24) المبادرات التي نفذتها مصفاة سامرف لخفض الإنبعاثات الكربونية خلال الخمس سنوات السابقة.

الشكل (24): المبادرات التي نفذتها مصفاة سامرف لخفض الإنبعاثات الكربونية خلال الخمس سنوات السابقة



الجلسة الختامية

ألقى المتحدثون الضوء على المسارات المتعددة والمحتملة للحد من انبعاثات الكربون في الصناعات التحويلية. ومنها بعض الحلول المتاحة والقابلة للتطبيق الفوري والمتاحة على النطاق التجاري، والتي لايزال البعض الآخر منها في المراحل الأولى من التطوير، وتحتاج لمزيد من الدراسة والاستثمارات الرأسمالية الكثيفة. وتشمل هذه الخيارات تحسين كفاءة استخدام الطاقة، واستخدام الطاقة المتجددة بدلاً من الأحفورية، والكهرباء بدلاً من الوقود، والتوسع في تطبيق تقنيات احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه (CCUS). وتوصل المشاركون إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:

- تعتبر عمليات تحسين كفاءة الطاقة هي المفضلة على المدى القصير، على الرغم من بعض القيود على الأداء. وتشمل عمليات تحسين كفاءة الطاقة كل من: استرداد الحرارة المفقودة. واستعادة الغازات

الفائضة من المصفاة، وإصلاح شكات بخار الماء، وتحديث المبادلات الحرارية والمعدات الدوارة. وتحسين العزل الحراري حيثما كان ذلك مناسبا. بالإضافة إلى تكامل العمليات.

- ستظل هناك حاجة إلى حلول طويلة المدى، والتي تأتي مع تكاليف استثمارية إضافية، مثل: احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه، واستخدام مصادر الطاقة المتجددة كمصدر للطاقة في توليد الطاقة وفي الصناعة التحويلية.
- تعزيز التعاون بين القطاع الأكاديمي وصناعة البتروكيماويات من خلال إنشاء فريق عمل مشترك.
- زيادة تنظيم اجتماعات ومؤتمرات منتظمة حول هذا الموضوع المهم سيعزز تبادل المعرفة ويدفع عجلة التقدم في هذا المجال.
- تمتلك المنطقة العربية قدرات جيدة تمكنها من الاستفادة من الطلب العالمي المتزايد على الهيدروجين المنخفض الكربون من خلال تطبيق تقنية احتجاز الكربون وتخزينه.
- يعد التصدي للتحديات في تطوير التكنولوجيا وإنشاء سلسلة القيمة أمراً ضرورياً للحد من انبعاثات الكربون.
- يعتمد التنفيذ الناجح لتقنيات خفض الانبعاثات وإنشاء سلاسل القيمة على استراتيجيات تجارية ومجتمعية وحكومية منسقة.
- تلعب الحكومات دوراً أساسياً في صياغة السياسات الرامية إلى تحفيز الاستثمار.
- ضرورة عقد هذه الندوة بشكل سنوي نظراً لأهمية الموضوع الذي تعالجه والحاجة إلى المزيد من تبادل الآراء والخبرات في هذا المجال الحيوي.
- يمكن الاستفادة من تطبيقات الكيمياء الحيوية لتحويل النفط الخام الثقيل ومشتقاته المنخفضة القيمة إلى منتجات ذات قيمة عالية بهدف تخفيف البصمة الكربونية لعمليات التكرير.

Japan Cooperation Center for Petroleum and Sustainable Energy

وزارة الطاقة
MINISTRY OF ENERGY

برنامج الندوة

Monday, 24 June 2024	
17:00 – 19:00	Registration
DAY ONE: Tuesday, 25 June 2024	
08:00 – 09:00	Registration
Opening Session and Keynote Speeches	
09:00 – 9:45	• **Safety Notes** • **Speech of H.E. Mr. Khalid Almehaid** Deputy Minister of Sustainability and Climate Change, KSA • **Speech of H.E. Mr. Tsuyoshi Nakai** Chief Executive Officer , JCCP • **Speech of H.E. Mr. Fumio Iwai** Ambassador of Japan, Saudi Arabia, delivers it on his behalf **H.E. Mr. Kazutaka Kawahara** Minister, Deputy Chief of Mission • **Speech of Mr. Faisal bin Dulaim Al-Otaibi** Director of the Research and Development Center Administration, ARAMCO • **Speech of H.E. Eng. Jamal Al Loughani, Secretary General of OAPEC** • **VIPs Recognition**
9:45-10:00	**Break**

DAY ONE: Tuesday,25 June 2024	
Session I: Modern Technologies & Success Stories of Carbon Emissions Reduction	
Chairperson	**Dr. Katsuhiro Nishizawa, Toyo Engineering Corporation**
10:00- 10:20	**Advancing Carbon Capture and Storage (CCS) Globally: Status and Potential for Emission Reduction** **Prof. Dr. Mohammad Abu Zahra**, Head of Middle East and Africa (MEA) Region- **Global CCS Institute.**
10:20- 10:40	**Multi Pathway Approach for Carbon Neutral** **Mr. Nobuyuki Takemura**, Middle East Office Chief Representative, Middle East Div,**Toyota Motor Corporation**
10:40-11:00	**Toward Carbon Neutrality International Liquefied Hydrogen Supply Chains** Mr. Eiichiro Miyazoe, Managing Director, Kawasaki Heavy Industries Middle East FZE , **Kawasaki Heavy Industries, LTD.**
11:00-11:20	**JH2A Activities to Realize a Hydrogen Society** **Mr. Kazuki Yamamura**, General manager,**Japan Hydrogen Association.**
11:20-11:40	**Opportunities and Challenges for Direct Air Capture (DAC) in Saudi Arabia: A case Study for DAC Deployment with Waste Heat Recovery** **Dr.** Naser Odeh, The **King Abdullah Petroleum Studies and Research Center** (KAPSARC)
11:40-12:10	Coffee Break

Session II: **The Role of Renewable fuel & Scientific Research in Reducing Carbon Emissions in downstream industries**	
Chairperson	**Eng. Imad Makki -OAPEC**
12:10 – 12:30	**e-fuel Production Technologies for Energy transition** **Dr. Katsuhiro Nishizawa**, Deputy Division Director, Carbon Neutral Division and General Manager, Value Chain & Business Investment Department, **Toyo Engineering Corporation**
12:30-12:50	**The Need for Collaboration to Accelerate Carbon Emission Mitigation and Achieve CCUS Goals** **Dr. Faisal Al-Humaidan and Dr. Mamun Halabi- KISR- Kuwait**
12:50-13:10	**Carbon-Neutral Transformation of Crude Oil and Low-Grade Refining Streams to Specialty Products** **Prof .Dr. Wael Ahmed Ismail Elmoslimany**, **Arabian Gulf University**. Bahrain
13:10-13:30	**CO_2 Capturing Techniques with a focus on our New Supercritical Capturing Method** **Dr. Rehab El Maghraby**, **Faculty of Petroleum and Mining Engineering- Suez University**. Egypt
13:30-14:30	Lunch- hosted by **OAPEC**

DAY ONE: Tuesday,25 June 2024	
Session III: The Role of Energy Efficiency in Reducing Carbon Emissions in Petroleum Downstream Industries	
Chairperson	**Prof .Dr. Wael Ahmed Ismail Elmoslimany**
14:30 – 14:50	**Adoption of Energy Efficient Technology and Best Practices to Reduce Energy Usage and carbon emissions at KNPC- MAB Refinery.** **Eng. Fatemah Waheed Abbas Al-Amir**, Process Engineer-MAB- KNPC
14:50 – 15:10	**Energy efficiency efforts undertaken by SABIC** **Eng. Othman Al-Zahrani, SABIC**
15:10 – 15:30	**The Role of Real-Time Energy Optimizer for Energy-Efficient and Sustainable Operation** **Muneef Alshameeri and Mohamed Jaber-** Bapco Refining
15:30 – 15:50	**Circular Economy in Reducing Carbon Footprint** **Eng. Mohammad Alenezi & Eng. Talal Ali – PIC**- Kuwait
End of day one	

DAY TWO: Wednesday, 26 June 2024	
Session IV: Panel Discussion: Obstacles of Decarbonization Technologies Expansion, and The Role of Carbon Capture in Hydrogen Economy	
Moderator	**Prof. Dr. Mohammad Abu Zahra. Global CCS Institute**
9:00-10:00	**Integrating Carbon Capture with Hydrogen Production** Mr. Kazunori Koike, Deputy Manager, Process Engineering Department, Project Solutions Center, **JGC Corporation**. **Current Status, Opportunities and Challenges of Carbon Market** **Ms. Kikuko Shinchi,** Research Director, Energy and Sustainability Division, **Mitsubishi Research Institute** **" SONATRACH Sustainability Approach. A pathway Towards an Affordable and clean Energy"** **Abdelkader FODIL CHERIF -SONATRACH**
10:00-10:15	**Break**

DAY TWO: Wednesday, 26 June 2024	
Session V: Initiatives and Efforts to Reduce Carbon Emissions	
Chairperson	Mr. Kazuki Yamamura
10:15-10:35	H_2 Combustion as clean fuel in crackers, SABIC First Adopter project Eng.Salem Al-Dahami - Sabic
10:35-10:55	E- Furnace 1 st adaptor Projects Eng. Nasser Al-Dalaan -Sabic
10:55-11:15	SONATRACH Energy Transition Projects Mr Djallal BOUCHENEB - SONATRACH
11:15-11:35	Carbon Capture for Steam Crackers Eng. Omar Badros -Sabic
11:35-11:50	Coffee Break

DAY TWO: Wednesday,26 June 2024	
Session IV: Initiatives and Efforts to Reduce Carbon Emissions	
Chairperson	Dr. Naser Odeh, King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC)
11:50-12:10	Skikda Refinery Flare Gas Recovery Mr. SASSANE Mohamed Lamine - SONATRACH
12:10-12:30	SASREF Decarbonizations Road Map Mr. Muhammad Al -Shahrani - SASREF
12:30-12:50	Vent hydrogen recovery and its utilization Mr. Abdulaziz bin Talal Malaeb - Sadara
12:50-13:10	SAMREF Energy Initiative CO_2 Reduction Mr. Hamed Khalaf & Abdul Rahman Al -Mukhtar - Samref
13:10-13:30	Conclusion and Closing Remarks
13:30-14:30	Lunch Hosted By JCCP
End of day two	

قائمة المتحدثين
Mr. Djallal BOUCHENEB -SONATRACH
Mr. Abdelkader FODIL CHERIF -SONATRACH
Mr. SASSANE Mohamed Lamine -SONATRACH
Eng. Fatemah Waheed Al-Amir - KNPC- Kuwait
Eng. Mohammed Jaber -Bapco Refining – Bahrain
Eng. Muneef AlShameeri -Bapco Refining – Bahrain
Dr. Yasser Boghdadi -OAPEC
Eng. Imad Makki -OAPEC
Eng.Talal Ali -PIC
Eng. Mohammad Ali Alenezi -PIC
Naser Odeh -KAPSARC
Eng. Andul Aziz Bin Talal Malaeb - Sadara Chemical Company
Eng. Mohammad Al Shahrani -SASREF
Eng. Hamid Khalaf -SAMREF
Eng. Abdul Rahman Al Mukhtar -SAMREF
Eng. Othman Al Zahrani -SABIC
Eng. Omar Badrous -SABIC
Dr. Naser Al Dhalaan -SABIC
Eng. Salem Al Dahami -SABIC
Eng. NASSER ALDALAAN -SABIC
Mr. Eiichiro Miyazoe -Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
Mr. Nobuyuki Takemura -TOYOTA MOTOR CORPORATION
Mr. Kazuki Yamamura -Japan Hydrogen Association (JH2A)
Ms. Kikuko Shinchi-Mitsubishi Research Institute
Mr. Kazunori Koike -JGC Corporation
Dr. Katsuhiro Nishizawa -Toyo Engineering Corporation
Dr. Eiji Iwamatsu -JCCP
Mr. Tsyoshi Nakai -JCCP
Dr. Mohammad Abu Zahra -Global CCS Institute
Prof. Dr. Wael Ahmed El-Moslimany -Arabian Gulf University
Dr. Rehab El- Maghraby -Suez University
Dr. Mamun Halabi -KISR

قائمة المشاركين

SAUDI ARABIA

Abdul Aziz Daabash -**Chemanol Company**
Abdul Aziz Al Hamid -**Chemanol Company**
Yousif Al Saadi -**Chemanol Company**
Dr. Abdul Rahman Al Faraaj -**Tasnee**
Mohammad Al Zahrani -**Tasnee**
Saleh Al Ghamdi - **Aramco**
Hamza Al Anizan -**Nama Chemical Co.**
Naser Al Daghen -**Nama Chemical Co.**
Abdul Rahman Al Oufi -**Petro Rabigh**
Yaser Al Raiqi -**Petro Rabigh**
Ahmad Bin Hasin Al Ghamdi -**Sadara Chemical Company**
Awad Bin Dakheel Al Malki -**Sadara Chemical Company**
Sayer Bin Hasini Al Shamari -**Advanced Petrochemical Company**
Raed Bin Saleh Al Mahmadi -**Advanced Petrochemical Company**
Ibrahim Bin Mohammad Al Shahrani **The Saudi Aramco Total Refining and Petrochemical** Company **(**SATORP**)**
Sheikha Bint Farhan Al Dhefiri -**The Saudi Aramco Total Refining and Petrochemical** Company **(**SATORP**)**
Haitham Salem Bahshwan -**Yanbu Aramco Sinopec Refining Company Ltd. (YASREF)**
Fahad Bakri -**Yanbu Aramco Sinopec Refining Company Ltd. (YASREF)**

Mohammad Al Dhouki -**Yanbu Aramco Sinopec Refining Company Ltd. (YASREF)**
Ali Al Kanani -**Saudi Aramco Jubail Refinery Company (SASREF)**
Mohammad Al Shahrani -**Sipchem - Sahara International Petrochemical Company**
Abdullah Al Marfouie -**Sipchem - Sahara International Petrochemical Company**
Abdullah Al Mutairi -**SABIC**
Abdul Rahman Omar -**SABIC**
Mishaal Al Dhalaan -**SABIC**
Mansour Al Shareef -**SABIC**
Mohammad Ibrahim Al Amer -**ARAMCO**
Rami Bin Abdullah Bamqaeen -**ARAMCO**
Nawal Bint Saad Al Hajiri -**ARAMCO**
Victor Calimoqoqo -**ARAMCO**
Abdullah Jamal Omar -**Petrochem**
Ahmad Al Juwaisri -**Petrochem**
Tomi Di Giacomo -**Salus Solutions, Inc.**
Fahad M Bakri **Yanbu Aramco Sinopec Refining Company Ltd. (YASREF)**

Kuwait

Abdulaziz Alahmed -KNPC
Sara AlShaiji -KNPC
Bader Alkhaldi -PIC
Muneerah Abdulla Alatrozi -PIC
Qutaibah Abdulrahman -KNPC
Talal Ali -PIC
Mohammad Ali Alenezi -PIC
Abdulla Zakaria -KOTC
Mohammad AlSaleh -KOC

Iraq

Hassan Omar Marouf- Petroleum Training Institute- Kirkuk
Walid Globe Kazem- Petroleum Training Institute- Baghdad
Kamal inside Jaber- Petroleum Training Institute- Basra
Abdullah Muhammad Ali- Petroleum Training Institute- Peggy
Haider Hadi Yahya- Petroleum Training Institute- Maysan

ALGERIA

Belabed Wassil-Mouffok -**MINISTRY OF ENERGY AND MINES**
FARID CHAIB -**MINISTRY OF ENERGY AND MINES**
Mr. SELLES SMAIN -**SONATRACH**

EGYPT

Eng. Al Motaz Bellah Kamal -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Dr. Khalid Ismael Abdul Majeed Shehata -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Dr. Mohammad Ahmad Abu Shusha -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Rehab Ahmad Salem -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Rabab Ali Ahmad -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Mohammad Atef Badour -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Dr. Eng. Ahmad Bahaa -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Ahmad Al Kurdi -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Mohammad Al Shurbaji -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Ahmad Misbah -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Mahmoud Maher El Sayed Ahmad -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Dr. Eng. Mohammad Majdo El Eishi -Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Eng. Ibrahim Abdel Kader Makki -Egyptian Petrochemicals Holding Company - ECHEM
Eng. Mohammad Abdel Monem Saleh -Egyptian Petrochemicals Holding Company - ECHEM
Eng. Mohammad Ali Abdai -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Chemist. Mohammad Hassan Al Tazi -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Noha Maher Al Sharaki -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Hani Kamal Al Roubi -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Chemist. Sahar Nabel Al Deeb -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Dr. Eng. Waleed Sayed Khadrawi -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Dr. Chemist. Ashraf Abu Zaid -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Chemist. Rania Abu Neama -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Hussam Hussein Ali -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Omar Hamouda -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Dr. Chemist. Wael Abbas -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Hiba Bishr Nasir -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Mohammad Abdullah Ibrahim -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS
Eng. Mohammad Abadi -Egyptian Natural Gas Holding Co. - EGAS

Dr. Eng. Motaz Khalil -Ganope Petroleum Company
Eng. Mohammad Saleem -Ganope Petroleum Company
Eng. Amro Mohammad -Ganope Petroleum Company
Geologist. Mohammad Abdul Rahim -Ganope Petroleum Company
Geologist. Mahmoud Al Saeed -Ganope Petroleum Company
Eng. Maher Asham -Ganope Petroleum Company
Eng. Mohammad Taalat Mohammad -Egyptian General Petroleum Corporation
Eng. Yaser Najati -Egyptian General Petroleum Corporation
Eng. Ashraf Ibrahim PETROMAINT
Dr. Alia Hussain -PETROMAINT
Chemist. Dina Hussam Al Deen -AMOC
Eng. Mohammad Abdul Salam -AMOC
Eng. Khalid Salah Hassam -EMC - Egyptian Maintenance Co
Eng. Mostafa Al Mansi -JASCO
Eng. Hamdi Al Zaheri -JASCO
Eng. Mohammad Nasr -Rashid Petroleum
Chemist. Mohammad Adel Mahmoud -Rashid Petroleum
Eng. Sherif Yaseen -GASTEC
Eng. Mohammad Jabr -*Pharaonic Petroleum* Company
Eng. Mohammad Al Bawab -*Pharaonic Petroleum* Company
Eng. Ahmad Dabour -El Wastani Petroleum Company
Eng. Ashraf Mohammad -El Wastani Petroleum Company
Eng. Rabee Suliman Mohammad ,NOSPCO
Eng. Islam Kharboush -Eshpetco - Esh El Mallaha Petroleum
Eng. Shady Magdi -Eshpetco - Esh El Mallaha Petroleum
Eng. Mahmoud Abdul Salam -Eshpetco - Esh El Mallaha Petroleum
Eng. Mohammad Essa -Eshpetco - Esh El Mallaha Petroleum
Eng. Hatem Farouk -*Magawish Petroleum Co.*
Dr. Eng. Mohammad Kamal Jaber -*Petrojet*

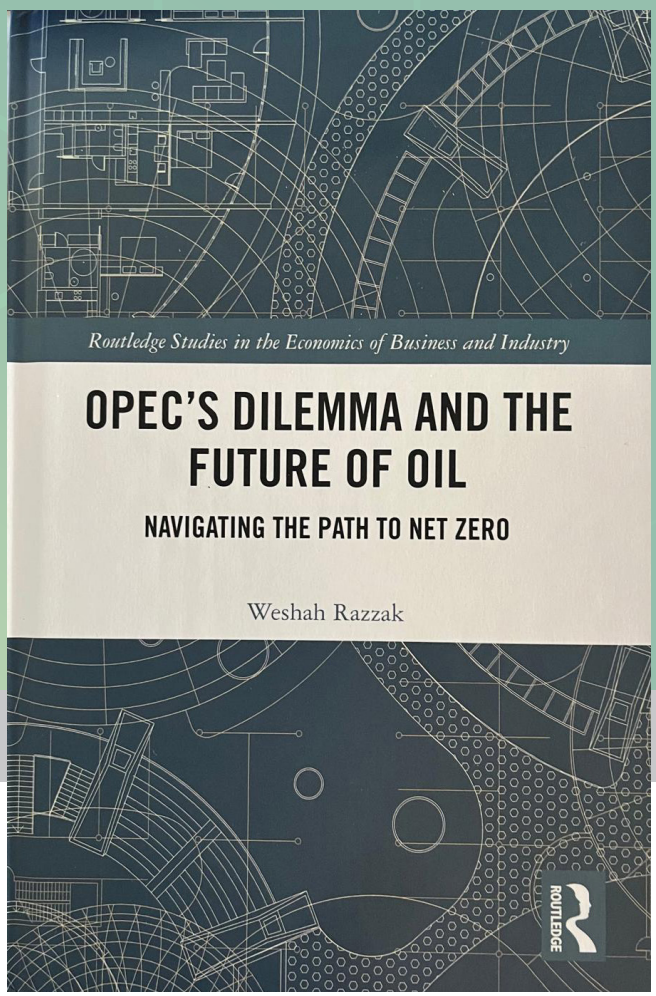
Yuta Naito -Toyota Motor Corporation
Takashi Endo -Mitsubishi Research Institute
AKIHIRO HIROSE -Mitsubishi Research Institute
Hiroki MORI -Embassy of Japan – Saudi Arabia
MISHO HIROKAZU -Embassy of Japan – Saudi Arabia
MASAYUKI KUSUDA -Embassy of Japan – Saudi Arabia
Kazutaka KAWAHARA -Chargé d'affaires a.i, Embassy of Japan to the Kingdom of Saudi Arabia
Noritada Hayashi -JETRO Riyadh Office
Koji Anamizu -Mizuho Bank
Mr. Hideki Miyazaki -JAPAN COOPERATION CENTER FOR PETROLEUM AND SUSTAINABLE ENERGY
Toshiki Nagano -JAPAN COOPERATION CENTER FOR PETROLEUM AND SUSTAINABLE ENERGY
Yoshisumi Okamoto -JAPAN COOPERATION CENTER FOR PETROLEUM AND SUSTAINABLE ENERGY
ATSUHIRO SUGANO -Mizuho Saudi Arabia Company
Yuichi Ogawa -Sumitomo Corporation Saudi Arabia Ltd
Yuki Mizunoe -Mizuho Bank, Ltd
Yoshitaka Miyauchi -Japan Cooperation Center for the Middle East (JCCME) -(Saudi Arabia office)
Koji Muto - -(Saudi Arabia office)

JCCP delegates

يمكن تنزيل المقاطع المرئية لمحاضرات الندوة من خلال مسح رمز الاستجابة السريعة التالي:

جلسات اليوم الأول

جلسات اليوم الثاني



عرض كتاب

معضلة أوبك ومستقبل النفط: بحث مسار صافي الانبعاثات الصفرية

المؤلف: رزاق وشاح

عرض : د. أحمد الكواز*

* أستاذ الاقتصاد

عنوان الكتاب:

معضلة أوبك ومستقبل النفط:
بحث مسار صافي الانبعاثات الصفرية

OPEC's Dilemma and the Future of Oil: Navigating the Path to Net Zero

المؤلف : Weshah Razzak

wrazzak@masey.ac.nz , razzakwa@gmail.com

دار النشر: Routledge, Taylor & Francis Group, 2024

عرض: د. أحمد الكواز

أستاذ الاقتصاد

aalkawaz@gmail.com

يهتم الكتاب، محل العرض، في اختبار مدى تأثير التزام دول أوبك بتنفيذ هدف الأمم المتحدة بخفض الإنبعاث البيئية المضّرة الى 1.5 درجة مئوية عام 2050، على الدخل الدائم Permanent Income. وشمل قياس التأثير الدول المنتجة للنفط التالية: الجزائر، وأنغولا، والكونغو، وغابون، وإيران، والعراق، والكويت، ونيجيريا، والسعودية، والإمارات، وفنزويلا. وذلك بالإعتماد على سلاسل زمنية للفترة 1970 – 2019. وتمّ أخذ قيم متغيرات الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي، والرقم القياسي لرأس المال البشري، ورصيد رأس المال من الجداول العالمية لجامعة بنسلفانيا World Penn Table (وفقا لآخر إصدار لهذا الجدول 10.01، تعتبر سنة 2019 هي آخر سنة متاح عنها بيانات، أحمد الكواز). في حين تم الإعتماد على إحصاءات شركة النفط البريطانية للحصول على الأسعار النفطية، ومؤشرات التنمية العالمية WDI لتغطية إحصاءات قوة العمل.

ويتضمن الكتاب ستة فصول: تحديد المعضلة Dilemma وبعض الحقائق عن إقتصادات دول أوبك والأهداف، وإستراتيجية إختبار الضغط Stress Test، وخصائص السلاسل الزمنية لدول أوبك، وتقدير الدخل الدائم للدول، ,وتصميم الإستراتيجيات وتطبيقات إختبار الضغط، وأخيرا الفصل الخاص بمحدودية الخيارات والتحديات.

ويشير الفصل الأول، تحديد المعضلة وبعض الحقائق، الى الخلفيات السياسية والاعتبارات الجيوسياسية، والى حقيقة الملكية العامة للأنشطة النفطية في دول أوبك، والى الغنى النفطي إحتياطا وإنتاجا، والى الطبيعة

الريعية لدول أوبك، والى الاعتماد الكبير على النفط في مكونات الناتج المحلي الإجمالي والموازنة العامة للدول والصادرات أساسا. ثم ينتقل الفصل الى العلاقة بين الانبعاثات، والإنتاج النفطي، والاستهلاك النفطي، عالميا.

وهنا يتطرق الى السؤال الذي يحاول الكتاب أن يجيب عليه، وهو: هل بمقدور دول أوبك أن تحقق هذه وضع الكربون الصفري Zero – Carbon، عام 2050، في ظل الامتلاك العام للقطاع النفطي، حيث تحدد الدولة كمّية الإنتاج، وسعر برميل النفط ؟ ويعتقد المؤلف بأهمية هذا السؤال من خلال الرجوع الى أدبيات نظرية الأسعار في الاقتصاد الجزئي Microeconomics، والقائلة إنه في حالة تعرض بلد لصدمة طلب سالبة Negative Demand Shock فأن البلد الذي تسود به الملكية العامة للقطاع النفطي سوف يخفّض كمّية الإنتاج، بهدف رفع السعر، أكبر التخفيض في الحالة التي تسود بها آلية الملكية الخاصة لهذا السوق (سوق تنافسي). ويستشهد هنا بالتخفيضات التي أجرتها أوبك OPEC والبلدان المستقلة المنتجة للنفط OPEC + عامي 2022 و2023، وتمديد سياسة خفض الإنتاج النفطي. ويترتب على هذا الخفض (الكبير) أن يتأثر الناتج المحلي الإجمالي سلبا لاعتماده شبه المطلق على مساهمة القطاع النفطي، سواء الناتج المحتسب بطريقة الإنتاج (القيمة المضافة)، او المحتسب بطريقة الإنفاق (الإنفاق على الاستهلاك الحكومي والعائلي، والاستثمار العام والخاص، والتغير بالمخزون، والصادرات، والواردات). ولغرض إختبار مدى التأثير على الناتج يستخدم المؤلف طريقة إختبار الضغط التي اقترحها في ورقة سابقة منشورة عام 2022. وتستلزم هذه الطريقة سيناريوهات الأوضاع الافتراضية Counterfactual Scenarios، وفي ظل فروض قوية (يشير المؤلف الى أنها مدعّمة واقعيا).

وأول هذه الفروض هو المرتبط بخفض الانبعاثات الى الصفر عام 2050. حيث يعتقد بعض الخبراء بانخفاض الطلب على النفط، خلال الثلاثين سنة القادمة (صدمة الطلب المعاكسة)، وأن الولايات المتحدة خصصت 4 تريليون دولار لدعم القطاعات التي سوف تتأثر بخفض الهيدروكربون. كما أشارت وكالة الطاقة الدولية IEA في أحد تقاريرها، عام 2021، الى أن العالم سيستغني عن السيارات المستخدمة للمنتجات النفطية عام 2035، وسوف يحقق قطاع الكهرباء، عالميا، هدف الخفض الصفري للكربون عام 2024. وضمن الفرض الأول، أيضا، يستشهد المؤلف بانخفاض الاستثمار في قطاع الطاقة مستقبلا، بما في ذلك الصين، اعتمادا على تقارير مثل وكالة الطاقة، وبلومبيرغ، ومجلة الاقتصادي البريطانية. ويقتبس المؤلف من تقرير حديث لوكالة الطاقة صادر عام 2023، بالقول أن "التسارع في استخدام الطاقة النظيفة هو العامل الأهم وراء انخفاض الطلب

على الوقود الأحفوري Fossil Fuel بحوالي 25%، خلال العقد الحالي. ويعرّف هذا الافتراض بسيناريو الانبعاث الصافي الصفري (NZE).

الفرض الثاني، هو الخاص بكميّة الخفض بالإنتاج النفطي لكل بلد. وتعتمد تقديرات المؤلف للخفض على ذلك اللازم للمحافظة على سعر برميل النفط عند مستوى سعر تعادل Breakeven Price معين بالنسبة الى الخفض بالاستهلاك العالمي للنفط من قبل البلد المعني. وقد وجد المؤلف، من خلال تقديراته، أنه للمحافظة على استقرار السعر عند مستوى تعادل معين، فأن خفض الاستهلاك العالمي للنفط بنسبة 1% يقابل بأكبر من 1% انخفاضا بالإنتاج النفطي. وتترجم هذه الانخفاضات في الإنتاج النفطي بانخفاضات تفوق التخفيضات المحددة ضمن سيناريو الانبعاث الصافي الصفري، المشار اليه أعلاه.

الفرض الثالث، يفترض المؤلف سعر تعادل برميل النفط عند 80 دولار/ برميل لأوبك. وقد اعتمد المؤلف عند تقدير متوسط أسعار التعادل المالي لبرميل النفط لكل من الجزائر وإيران والعراق والكويت والسعودية والإمارات، وللفترة 2000 – 2023 اعتمد على تقديرات صندوق النقد الدولي، وذلك عند سعر 84.2 دولار / برميل، وعند سعر 96.15 دولار / برميل إذا تم شمول سنة 2024 الواردة في تنبؤات الصندوق. أما سعر التعادل الخاص ببقية دول أوبك فتم افتراضه عند 80 دولار / برميل، لعدم توفر التنبؤات الخاصة بهذه الدول.

وقد تمّ استخدام هذه الفروض لبناء سلسلة سيناريوهات افتراضية مختلفة للكميات والأسعار النفطية لتقدير الدخل الدائم، في ظل الملكية العامة للقطاع النفطي. كما تمّ استخدام مجموعة أخرى من الفروض لتقدير الدخل الدائم في ظل ملكية تنافسية للقطاع النفطي.

ينتقل المؤلف، بعد ذلك، الى الإطار النظري الذي اعتمده لتقييم السناريوهات المختلفة. ويعتمد هذا الإطار على نظرية الأسعار في الاقتصاد الجزئي، التي يعرضها من خلال آلية استجابة الكميات والأسعار لصدمة الطلب في ظل سيناريو قائم على سوق نفطي عام، وسوق نفطي قائم على التنافسية. وما يترتب على هاتين الاستجابتين من تأثير على الدخل الدائم. ووفقا لهذه النظرية، يتحدد سعر، والكمية المنتجة من النفط، المملوك ملكية عامة، من خلال تقاطع منحنى الإيرادات الحدّية مع التكلفة الحدّية. أما في حين يتحدد التوازن التنافسي من خلال تقاطع سعر، والكمية المنتجة من النفط، الطلب والتكلفة الحدّية، عند مستوى أقل من السعر، والكمية. وعند وجود صدمة، على شكل انخفاض في الطلب على النفط، ينخفض منحنى الطلب. وتعتمد قدرة السوق

النفطي العام على خفض كمية الإنتاج النفطي لمنع انخفاض سعر برميل النفط أقل من السعر قبل الصدمة، تعتمد هذه الفقرة على درجة الانخفاض في الطلب، ودرجة مرونة منحنى الطلب. وحتى في الحالة التي ينخفض بها السعر أقل من مستواه فبل الصدمة، فأن هذا السعر يجب أن يكون أعلى من السعر السوقي (التنافسي). ويقوم المنتج الذي يعمل في سوق نفطي تنافسي باستخدام السعر الأقل، وينتج كمية أقل. وعليه، وفقا لهذا النوع من التحليل الجزئي للأسعار، يكون سعر المنتج، العامل في ظل الملكية العامة، أكبر ممن المنتج العامل في ظل سوق تنافسي، مقابل انتاج كمية إنتاج نفطي، في سوق عام، أقل من كمية أنتاج نفطي في سوق إنتاج تنافسي.

بعد هذا التوصيف النظري، على المستوى الجزئي، ينتقل المؤلف الى تقدير استجابات الأسعار والكميات النفطية لهذين النوعين من الأسواق النفطية (العامة والتنافسية) للصدمات الطلب، على مستوى الاقتصاد الكلي.

وبشكل أكثر تحديدا، يستهدف المؤلف قياس:

1. أثر الخفض الحاد في استهلاك النفط العالمي، المتجسّد في تحقيق سيناريو الانبعاث الصافي الصفري على الناتج المحلي الإجمالي المتوقع للفترة 2020 – 2050.
2. أثر الخفض في استهلاك النفط العالمي على الناتج المحلي الحقيقي لنفس للفترة 2020 – 2050، ولكن في ظل سوق نفطي تنافسي.

وكما يشير المؤلف، فأنه يعتبر الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي هو المقياس للدخل الدائم. وحتى يتم التقييم الكمّي لقياسي الأثرين (1) و (2)، أعلاه، لابد من بناء سلاسل زمنية افتراضية لكل من: أسعار برميل النفط، وما يقابل هذا السعر من كميات في سوق عام للسنوات المعنية. وبناء نفس السلاسل الزمنية الافتراضية في سوق نفطي تنافسي ولنفس السنوات. وخدمة لذلك، يتطلب الأمر بعض الافتراضات والمعلومات حول حجم استجابة الإنتاج النفطي للانخفاض المفترض في استهلاك النفط العالمي. وهو الأمر الذي يتطلب بناء نموذج يأخذ بنظر الاعتبار كل هذه الاعتبارات.

ويتبنى المؤلف نموذج دالّة كوب دوجلاس Cobb – Douglas لاختبار نظرية الأسعار، واختبار الضغط. حيث يعتمد الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي، في الدالّة، على التطور التكنولوجي، ورصيد رأس المال، وقوة العمل (قوة العمل من السكان بين 15 – 64 سنة)، ومعامل الخطأ. ويتم الافتراض، هنا، بالاعتماد التطور التكنولوجي

على قيمة الإيرادات النفطية (السعر الحقيقي لبرميل النفط بأسعار 2021، مضروبا في عدد براميل الإنتاج المنتجة يوميا). وتستخدم دول عوائد النفط لتمويل التعليم والصحة ومشروعات البنية الأساسية وغيرها من البنود المرتبطة بالتطور التكنولوجي. ويعتبر رأس المال البشري (ينظر المؤلف لهذا النوع من رأس المال باعتباره رقم قياسي يعتمد على متوسط عدد سنين الدراسة، ومعدل العائد على التعليم) متغيرا مفسرا للتطور التكنولوجي، أيضا، بالإضافة الى قيمة الإيرادات النفطية المشار اليها أعلاه.

بعد ذلك يقوم المؤلف بدمج دالة الإنتاج ودالة التطور التكنولوجي، والتي، بعد دمجها إما أن تكون مساوية أو أقل من الناتج المحلي الإجمالي بطريقة الإنفاق (التي أشرنا اليها سابقا). ثم ينتقل المؤلف الى، أولا، عرض آلية تقدير المعادلة المدمجة بعد تحويلها الى معادلة لوغاريثمية (ومن خلال تقدير جانب الإنتاج فقط لكون الكمية والسعر هما المتغيران الأساسيان الضروريان لإجراء إختبار الضغط). ثانيا، يقوم باختبار خصائص السلاسل الزمنية، وثالثا، القيام بتقدير متجه الانحدار الذاتي المرجعي Baseline Vector Autoregression (VAR) وذلك بهدف تلخيص ديناميكية المتغيرات لأجل القيام بالتقديرات الاحتمالية Stochastic Projections للناتج المحلي الإجمالي الحقيقي، والذي يستخدمه المؤلف، كما أشرنا، كمقياس للدخل الدائم، او الدخل المتوقع.

وبعد قيام المؤلف بتقديرات متجه الانحدار الذاتي المرجعي للدول، ينتقل الى إعادة تقدير هذه الانحدارات باستخدام السناريوهات الافتراضية، للسلاسل الزمنية الخاصة بالكمية في ظل ملكية عامة للقطاع النفطي، وملكية قائمة على سوق تنافسي. وتوضح النتائج، حسب افتراضات وتقديرات المؤلف، تباين بين تقديرات الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي (الدخل الدائم الحقيقي) المقدر في ظل نمطي الملكية، خلال فترة التقديرات، 2020 – 2050. وعرض المؤلف شكلا بيانيا، لكل بلد من البلدان الأحد عشر المشمولة في التقدير، يوضح أن الدخل الدائم المتوقع هو أعلى في، عموما، حالة سيادة السوق النفطي التنافسي.

وبقدر تعلق الأمر بتحقيق هدف الأمم المتحدة الخاص بخفض الانبعاثات بدول أوبك لتحقيق هدف خفض درجة حرارة الكون الى 1.5 درجة مئوية عام 2050، يستنتج المؤلف، بناء على نتائج التقديرات، بأن خفض مستويات الإنتاج النفطي لأوبك، حتى تصل الأسعار الى 80 دولار / برميل، سيترتب عليه خسارة في الدخل الدائم للدول الأعضاء بالمنظمة. وسيكون هذا الخفض أقل في حالة سيادة سوق تنافسي. بعبارة أخرى، فأن دول أوبك تكسب على أساس رفع الإيرادات النفطية، الاّ إنها تخسر على أساس الناتج المحلي الإجمالي المتوقع

الحقيقي. وتسري هذه النتيجة، من وجهة نظر المؤلف، على حالة الجزائر، أيضا، رغم أن مصدر عوائدها هو الغاز الطبيعي، وليس النفط.

والآن ما هو التأثير على الاستهلاك؟ ويتجسد الغرض من قياس هذا التأثير هو انه طالما أن الدخل الدائم ينخفض بمستوى أكبر مما يتطلبه تنفيذ هدف الأمم المتحدة الإنتاج النفطي (بسبب الملكية العامة، حسب رأي المؤلف)، فلابد أن ينخفض الاستهلاك (أحد مكونات الناتج المتوقع الذي يعبر عن الدخل الدائم) أيضا. ويعرض المؤلف، لتقييم التأثير على الاستهلاك، متوسط نسب الاستهلاك / الناتج المحلي الإجمالي التاريخية، للفترة 1970 - 2019، للدول لأعضاء بأوبك. وتصل أعلى نسبة في حالة فنزويلا (1.08. ويمكن الإشارة الى أحد التفسيرات المقدمة لارتفاع الاستهلاك عن الناتج المحلي الإجمالي هو أن ارتفاع صافي الواردات، بشكل كبير، بسبب المساعدات. وتنعكس هذه المساعدات في بيانات الاستهلاك، ولا تنعكس في بيانات الناتج. وما يترتب على ذلك من تجاوز قيمة الاستهلاك لقيمة الناتج، أحمد الكواز).

ولبيان سلوك هذه النسبة خلال الفترة 1980 - 2019، قام المؤلف بتقدير دالة الاستهلاك، لجميع الدول المشمولة، باعتبارها دالّة في الدخل الدائم الحقيقي (وفقا لنظرية دالة الاستهلاك لفريدمان، أحد أبرز إقتصاديي مدرسة شيكاغو في الاقتصاد، أحمد الكواز)، في الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي خلال الفترة المذكورة، و باستخدام نفس النموذج، أي متجه الانحدار الذاتي VAR. وعرض أشكال بيانية توضح سلوك الاستهلاك الحقيقي، والناتج المحلي الحقيقي، والدخل الدائم.

وفي مجال تحليله للنتائج، أشار المؤلف الى أن الشكل الخاص بالجزائر أوضح استهلاكا حقيقيا أقل من كلا من الاستهلاك الجاري، والدائم. ونفس الاستنتاج، في حالة أنغولا، ماعدا فترة 1990 – 2001 حيث الاستهلاك بالدخل الجاري. كما أن الاستهلاك أكثر ارتباطا مع الدخل الجاري في حالة الكونغو. أما في حالة الغابون، فقد كان سلوك الاستهلاك نفس سلوك الدخل الدائم والدخل الجاري، وكان الاستهلاك أقل بكثير من الدخل خلال الفترة 1980 -2004. في حين أن حالة العراق كانت شبيهه بحالة الجزائر والدول الأفريقية الأعضاء في أوبك، من حيث كون الاستهلاك أقل بكثير من مقياسي الدخل الدائم والجاري. وعكس الاستهلاك في الكويت اتجاها أقل من الدخل الدائم، ومرتبط بالدخل الجاري، كما أن هذا لا يتسق مع النظرية الاقتصادية خلال حرب الخليج الأولى، ويفسر المؤلف ذلك بخطأ في قياس المتغيرات. أما في حالة نيجيريا، والسعودية، والإمارات، فيتمتعون بنفس النمط الخاص بانخفاض الاستهلاك، كثيرا، عن الدخل. ويرتبط استهلاك فنزويلا ارتباطا قويا

بالدخل الجاري. وبناء على ذلك، يعتقد المؤلف بأن المتغيرات الثلاثة، الدخل الدائم والجاري والاستهلاك الدائم، يشتركون بنفس الاتجاهات في كافة الدول المشمولة. الاّ انه، وكمتوسط، يتجه الاستهلاك ليكون أقل من الدخل. ولا يعني ذلك أن دول أوبك تعتبر مدّخر صافي، بل يعني، من وجهة نظر المؤلف، أن هنا خطأ بقياس الاستهلاك. علما بأن المؤلف اختبر طبيعة اتجاه الاستهلاك قبل أن يقوم بتقدير الميل الحدّي للاستهلاك. واستخدم في هذا الاختبار عدد كبير من الاختبارات الإحصائية، وعدد من مواصفات الانحدار Regression Specifications.

وقد خلص المؤلف، حسب منهجيته، وفي الفصل الأخير، الى أنه في ظل فرضية الملكية العامة للقطاع النفطي التي يتم وفقها خفض الإنتاج عند التعرض لصدمات نفطية سالبة بهدف المحافظة على سعر أعلى لبرميل النفط (سعر التعادل)، يترتب في ظل هذه الفرضية، انخفاضا كبيرا في الاستهلاك الجاري، وكنتيجة لذلك خسارة في الرفاه.

ويختتم المؤلف كتابه ببيان ان خيارات أوبك محدودة وتتسم بالتحديات.، وأن توزيع الثروة النفطية على المواطنين (كما تقترح عدد من مؤسسات التمويل الدولية من خلال الدخل الأساسي الشامل Universal Basic Income, UBI، أحمد الكواز) هو خيار تواجهه العديد من القيود.

ويستطرد المؤلف بأن اقتصادات الخليج تتصف باعتمادها على النفط، وغير مصّنعة، وحسّاسية الإنتاج النفطي للاستهلاك العالمي من النفط، وتأثر الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي والإنفاق الحكومي بتطورات السوق النفطي. كما أن الدول الأعضاء الغنية في أوبك، مثل السعودية والإمارات والكويت إضافة الى العراق وإيران، تتمتع بسعر تعادل مرتفع لبرميل النفط. ويضيف المؤلف بأن أسعار النفط تتصف بالتقلب لأن سلوكها يشبه أسعار الأصول التي تخضع للصدمات المستمرة. وعليه، فأن المحافظة على أسعار تعادل مرتفعة بشكل دائم هو أمر صعب.

ويعود المؤلف، هنا، الى إعادة طرح التزام دول أوبك بتنفيذ هدف خفض الانبعاثات للأمم المتحدة بحوالي 45% عام 2030، والى الصفر عام 2050. ويطرح المؤلف، في هذا لمجال، السؤال الخاص بكيفية تمكن هذه الدول بتحقيق هذا الهدف، وبنفس الوقت تعظيم الإيرادات النفطية، والاستمرار بانتهاج برامج اقتصادية تعتمد على النفط والغاز كمصدر رئيسي للدخل؟

ويؤكد المؤلف مرة أخرى، هنا، على أن هدف الأمم المتحدة بالتخفيض الصفري سيخفض من الطلب العالمي، وكذلك الاستهلاك العالمي على النفط. الأمر الذي سيزيد من الضغوط على الأسعار باتجاه الانخفاض، ويقلل الصادرات النفطية، وبالتالي الناتج المحلي الإجمالي، المعبّر عن الدخل الدائم، وبالتالي الاستهلاك. وهذا هو الوضع الذي يصفه المؤلف بالمعضلة Dilemma، في ظل التواضع الشديد في تنويع مصادر الدخل، واستمرار الاعتماد على النفط كمصدر وحيد، أو شبه وحيد، للدخل.

ويمكن أن تحل هذه المعضلة، من وجهة نظر المؤلف، مؤقتا، في حالة انهيار هدف الأمم المتحدة. الاّ أن هذا الخيار افتراضي وغير محتمل بسبب الدعم الدولي والحكومي للهدف. كما أن مستقبل الاعتماد على النفط غير مضمون لعدة أسباب منها عدم الاستقرار السياسي العالمي، والبدائل المحتملة للنفط. وعليه، يطرح المؤلف السؤال الخاص بالبديل المتاح أمام أوبك.

ويشير في معرض إجابته عن هذا السؤال بأن اختبارات الضغط أشارت بأن الناتج المحلي الإجمالي (الدخل الدائم)، خلال الفترة 2020 – 2050، سينخفض بشكل كبير، في ظل الملكية العامة للقطاع النفطي الحالية. بنفس الوقت الذي لم يشهد فيه هذا الناتج (الدخل) اتجاها للانخفاض في ظل فرضية القطاع التنافسي، الذي يتم فيه خفض الإنتاج ولكن وبمستويات أقل (أي بالقدر الذي يحتاجه تحقيق هدف الأمم المتحدة، وليس أكثر)، والأهم بأسعار سوق أقل. أن التحول للقطاع النفطي التنافسي، القائم على الملكية الخاصة، يتطلب سيادة حقوق الملكية، ومؤسسات سوقية Market Institutions، وحريات اقتصادية وأخرى.

ويؤكد المؤلف أهمية التحيّز للتصنيع، كأحد البدائل لتنويع مصادر الدخل، بدل الاستمرار في التحيز للأنشطة التجارية، وما يترتب عليها من تعاظم الواردات على حساب الصادرات غير النفطية. وذلك من خلال تعزيز الملكية الخاصة للأصول. ويستشهد المؤلف بالتغيرات في نمط الملكية التي تحققت في أوربا الشرقية (مثل روسيا، وبولندة وهنغاريا، وغيرها)، حيث يمكن للعديد من الدول الأخرى أن تحذو نفس الحذو، حسب رأي المؤلف.

بعض الملاحظات:

1. يعتبر الكتاب من الإسهامات الثرية، فنيا، من حيث استخدام خبرة المؤلف الطويلة في الاقتصاد الكلي، والاقتصاد القياسي، في مجال مدى استدامة القطاع النفطي، في دول أوبك، مع الإشارة الخاصة

لالتزامات هذه الدول بتحقيق هدف الأمم المتحدة عام 2050. وذلك في ظل طبيعة الملكية العامة الحالية للمورد النفطي.

2. أسهم الكتاب في مسح الأدبيات، التي تؤيد وجهة نظر المؤلف، في مجال أهمية الخصائص التنافسية للأسواق، ومنها السوق النفطي، بالاعتماد على نظرية الأسعار الجزئية.
3. كان للعرض المفصّل للاختبارات الإحصائية، وكذلك العرض المفصّل لنتائج معادلات الانحدار، واتجاهات تقديرات الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي (الدخل الدائم)، من خلال الأشكال لكل بلد، كان لهذا العرض إسهام مهم.
4. أشار المؤلف بأنه استخدم البيانات الواردة في الجداول العالمية لجامعة بنسلفانيا، اللازمة لتقديرات دوال الإنتاج لدول أوبك (خصص المؤلف، مشكورا، الملحق 3.3 لعرض مصادر البيانات). ويعتبر استخدام هذه البيانات من مصدر واحد هو أمر مطلوب ومحبّذ لضمان عدم اختلاف المنهجية المتبعة من مصادر مختلفة، وتأثير ذلك على النتائج. علما بأن مؤشرات التنمية الدولية WDI (التي اعتمدها المؤلف لتجميع بيانات قوة العمل) تصدر أيضا إحصاءات هذا الناتج معدّلا بنفس القوة الشرائية. أن عدم تشتت مصادر المعلومات يحتسب لصالح منهجية المؤلف في مجال قواعد البيانات. أضف الى ذلك، فأن الجهد الكبير في تجميع وتصنيف وتنقية البيانات لكافة المتغيرات المشمولة بدوال الإنتاج، والبيانات الأخرى، لكافة الدول المشمولة بالكتاب، لابد أن يكون محل تقدير خاص.
5. ومن ضمن الملاحظات التي نود الإشارة لها، والتي لا تقلل بأي حال من الأحوال، من مساهمات المؤلف القيّمة، هي الإشارات المتكررة لتقديرات وكالة الطاقة الدولية الخاصة بتقديراتها، المعروفة بالتشاؤم والتسييس، للطلب العالمي المتوقع على النفط مستقبلا، والتي تتضارب جذريا مع تقديرات منظمة أوبك (انظر التقرير الصادر عام 2023: OPEC, world Oil outlook 2045). حيث تمّ تقدير نمو الطلب (العالمي) على النفط بين 2022 – 2045 بحوالي 16.4 مليون برميل / يوم، مع انخفاض هذا المعدل في حالة بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD بحوالي -9.5، وارتفاعه بنحو 25.7 مليون برميل/ يوم في الدول غير الأعضاء بالمنظمة.

كما حدد التقرير مصادر الارتفاع بالطلب على النفط، خلال 2027 – 2045، بثلاث مصادر أساسية، هي: النقل البري (4.6 مليون برميل / يوم)، و 4.6 مليون برميل / يوم طلب البتروكيمياويات، و 4.1 مليون برميل / يوم طلب قطاعات الطيران. أما فيما يتعلق بدور السيارات الكهربائية في تقليل الطلب

على المنتجات النفطية، فأن التقديرات المتاحة تشير الى أن عددها، الفعلي، عام 2022 بالعالم هو في حدود 30.3 مليون، ومتوقع أن يصل العدد عام 2045 الى حوالي 601.5 مليون، وبمعدل نمو بين هذين العامين بنحو 571.2 مليون. مقارنة بعدد سيارات الركاب المستخدمة للمنتجات النفطية عام 2022 البالغ 1368.8 مليون، والمتوقع أن يصل عام 2045 الى حوالي 2102.8 مليون، وبمعدل نمو بين هذين العامين يبلغ نحو 571.2 مليون. وتعتبر الصين من أكثر البلدان استخداما للسيارات الكهربائية، التي نمت مساهمتها في إجمالي السيارات المستخدمة من صفر عام 2015 الى حالي 26% عام 2022. الاّ أن هذا العدد لا يستخدم بالكامل البطاريات الكهربائية Battery Electrical Vehicles (BEVs)، بل مدعم بعدد يبلغ حوالي 1.5 مليون من السيارات الهجينة القابلة للشحن Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) (OPEC, Ibid). علما بأن مستقبل السيارات الكهربائية يعتمد، ضمن اعتبارات أخرى، على مدى استمرار الدعم الضخم، خاصة في الصين.

6. كما تفضل المؤلف بالإشارة الى اتجاه الاستثمارات النفطية نحو الانخفاض، اعتمادا على تقرير لوكالة الطاقة. في حين أشار تقرير أوبك الى نمو الاستثمارات المتوقعة في القطاع النفطي الإستخراجي العالمي، بين 2023 – 2045، بحوالي 11.1 تريليون دولار، أي بنحو 480 مليار دولار سنويا. أما حصة أوبك من هذه الاستثمارات، ولنفس الفترة، فتقفز من 35 مليار دولار عام 2022 الى 136 مليار دولار عام 2045.

7. وبناء على ماورد في الملاحظات 6 و7، كان يفضل مناقشة تقديرات أوبك الخاصة بالطلب، والاستثمارات، ومقارنتها مع تقديرات وكالة الطاقة، للوصول الى نتائج محايدة، اعتمادا على تقديرات جهات أخرى.

8. إن قدرة أوبك لم تعد كما كانت في السابق ذات تأثير شبه مطلق في تحديد الأسعار عندما كان السوق النفطي سوق بائعين الى حد بعيد. وحتى عند اتباع أوبك والبلدان المنتجة للنفط المستقلة، أوبك +، سياسة خفض الإنتاج، فإن السعر الناتج لا يمكن وصفه بالاحتكاري لعدم السيطرة الكاملة لهذه البلدان على سلوك السعر، الذي يشهد انخفاضا، مؤخرا، رغم خفض الإنتاج. كما أن أوبك تصبح آخذ للسعر في فترات عند تآكل طاقة الإنتاج النفطي، وبالتالي يحدث التكيّف في السوق من خلال ارتفاع السعر. وفي حالة وجود طاقة إنتاج فائضة تزداد كثافة الضغط على الأسعار في الانخفاض. معنى ذلك أن اعتبارات السوق ليست غائبة عن أوبك بالكامل عن تحديد آليات عمل السوق النفطي. فعلى سبيل

المثال ما كان لارتفاع الأسعار عام 1973 أن يتحقق لو كان السوق راكد Slack Market، وما كان انهيار الأسعار عام 1986 ليحصل في ظل شروط سوق متشددة Tight Market Conditions. معنى ذلك أن النفط، وتسعيره، كان ولا يزال يتأثر بشروط السوق.

9. لم يناقش المؤلف وضع القطاع النفطي المملوك ملكية عامة في مملكة النرويج. علما بأن الدولة هناك تمتلك، بالإضافة لذلك، حصص في الكثير من الشركات الكبرى. وهل كان نمط الملكية يمثل عائق أمام استدامة القطاع النفطي في المملكة.

10. أما فيما يتعلق بالاعتماد على فرضية التنافسية ودورها في تحقيق الأسعار المثلى للنفط، اعتمادا على آليات السوق، كبديل عن الاعتماد على التحديد العام، أو الإداري للإسعار، فتحتاج الى وقفة للتحقق من مدى صلاحية آلية السوق واقعيا، وليس وفقا لافتراضات نظرية الأسعار الجزئية. حيث لا يخفى بأن مؤيدي السوق الحر Free Marketeers ينطلقون من المقولة التاريخية الاقتصادية " عدم التدخل Laissez Faire". ويعتمد هذا السوق على قرارات الإنتاج والتوزيع وأسعار المنتجات التي يتم التنسيق بينها من خلال قوى العرض والطلب، وغير معوّقة بأي إجراء تنظيمي حكومي، وبالتالي لا يوجد دور للحكومة في النشاط الاقتصادي. ويتحدث مؤيدو آلية السوق الحر عن قوى العرض والطلب بثقة عالية كثقة علماء الفيزياء، وهو أمر صعب قبوله في علم اجتماعي كعلم الاقتصاد (تخضع قراراته لتأثيرات العوامل الاجتماعية والثقافية والبيئية وغيرها). ويستند المؤيدون على مفهوم الكفاءةEfficiency، وأن القطاع الخاص هو دائما أكفأ من بقية القطاعات. ولا يبدو أن هناك سوقا تعمل قراراته الخاصة بالعرض والطلب بحرية كاملة لتحديد السعر. ولا يبدو أن هذا هو المكان المناسب للتوسع في خبرات الأسواق، في عدد من الدول، وما مدى سيادة المنافسة التامة فيها. وكما أشار J.Stiglitz، أحد الفائزين بجائزة نوبل للاقتصاد عام 2001، والذي أشار المؤلف الى أحد أوراقه في أحد الدوريات الاقتصادية، من إن السوق مهم الاّ أن دور الحكومة لا يستغنى عنه لعدم إمكانية الأسواق لوحدها على تحقيق الإهداف، وبتعبيره : Markets by Themselves Do Not Deliver (Stiglitz, Inequalities and Globalization: An Interview). ومن المهم أيضا الإشارة الى إسهام أحد إقتصاديي جامعة كمبرج البريطانية (Change, Kicking Away the Ladder: Development Strategy in Historical Prospects, Anthem Press, 2002) الذي

يستعرض خبرات الدول المتقدمة الآن، النامية سابقا، وفيما إذا كانت قد انتهجت آليات السوق الحرّة في مساراتها التنموية، أم آليات لا تخلوا من التدخل الحكومي، وأساليب أخرى، لخلق وتعزيز الأسواق.

11. من الأوراق المنشورة، في مجال اهتمام الكتاب، تلك المهتمة بما يطلق عليه بالسعر الاحتكاري للنفط. حيث تمّ بناء نموذج يختبر ما أسموه بالسوق الاحتكاري على السعر. ووصلوا الى نتيجة مفادها أن استمرار تحديد السعر من قبل المنتجين غير مقبول، لارتفاعه، وأن المعرفة التامة بالأسعار المستقبلية هو أمر غير واقعي. واقترحوا أن يكون السعر مقارب للسعر المحدد من قبل المنتجين (Cremer, Martin and Weitzman, 1976, OPEC and Monopoly Price of World Oil, European Economic Review). ومن المستحسن مناقشة نتائج مثل هذه الأوراق.

12. ونشر البنك المركزي الأوربي ورقة عمل تتضمن تطوير نموذجين، قائمين على منهجية متجه الانحدار الذاتي VAR، نفس منهجية المؤلف، واعتمادا على السيناريوهات الافتراضية Counterfactual، المشار اليها بعرض الكتاب، وباستخدام بيانات للفترة 1995 - 2020 (ECB, The Influence of OPED+ on Oil Price: A Quantitative Assessment, Working Paper Series No. 2467, 2020). وقد وصلت الورقة الى عدة استنتاجات، منها أن قدرة أوبك على تحديد السعر تختلف حسب الزمن، خاصة بعد دخول الولايات المتحدة كمنافس في سوق الإنتاج، وأن الأسعار لو تركت لآلية السوق ستكون أقل بأربعة دولارات، فقط، عن الأسعار المحددة من قبل أوبك. وكان من المفضل أن تتم مقارنة فرضيات ونتائج المؤلف مع فرضيات ونتائج نموذجي البنك المذكور.

ختاما، فأن خبرة المؤلف المتراكمة، خاصة في مجال الاقتصاد القياسي، قد قدمت لمكتبة أدبيات الاقتصاديات النفطية التطبيقية إسهاما مهما، قائما على إختبار شروط سوق مختلفة وتأثيرها على أسعار برميل النفط مستقبلا، وتأثير ذلك على التزامات دول أوبك لتحقيق هدف الأمم المتحدة المشار اليه أعلاه. وأن اختلاف وجهات النظر في الآليات الأكثر ملائمة لاختبار هذه الشروط، ومدى واقعيتها، هو أمر طبيعي، ويجب أن ينظر اليها كأحد مجالات إثراء المناقشات المهنية في هذا المجال. ولابد من توجيه الشكر والتقدير، هنا، لمنظمة الأقطار العربية المصدّرة للبترول (أوابك) على موافقتها الكريمة بعرض هذا الكتاب في مجلتها الدورية.

نبذة عن المؤلف وعرض الكتاب:

حصل مؤلف الكتاب على درجة البكالوريس من جامعتي بغداد 1976، وجامعة كونكورديا، كندا، عام 1986، ودرجة الماجستير من نفس الجامعة الكندية، عام 1987، والدكتوراه من جامعة شمال كورولينا، في الاقتصاد، الولايات المتحدة الأمريكية، عام 1994. ويتركز اهتمام المؤلف في الاقتصاد الكلي، والاقتصاد القياسي، وسوق العمل، والسياسة النقدية. وعمل في العديد من الجهات، منها: بنك عمان المركزي، ووزارة الخزانة ووزارة العمل والبنك المركزي بنيوزلندا، والمعهد العربي للتخطيط – الكويت. ويعمل حاليا كزميل باحث شرف في مدرسة الاقتصاد والتمويل، جامعة ميسي Massey University، نيوزلندا. ونشر حوالي 98 ورقة محكّمة وأوراق عمل، وغيرها من أشكال النشر، وثلاث كتب صادرة من دار النشر المشار اليها أعلاه

Abstract

Transforming Used Lubricating Motor oils to Useful Petroleum products

Professor. Yasser Hourieh *

The used Lubricating Motor oils (UMO) were converted into useful petroleum derivatives which are ready for direct use without any subsequent treatments, as they meet British specifications. All types of the used oil were collected from car engine oil change services stations, and then transferred to a tank where it was settled for several days, so the impurities, metal particulates and asphaltenes that settled at the bottom of the tank were separated.

The clear settled oil was heated to (200 °C) to separate the traces of water and light materials, then it was subjected to a distillation process under vacuum (10 mmHg). The fraction with boiling point between (263 - 565 °C) was taken and its yield was (80% wt.) We prepared the basic raw material that was subjected to the mild hydrocracking process in a semi-industrial laboratory unit designed for this purpose.

Two solid catalysts used in oil refineries were used, and the mild hydrocracking process was carried out in the presence of hydrogen produced in the naphtha reforming process and at the optimal conditions specified by us. Samples of the resulting gases were taken and analyzed, while the resulting condensed liquid materials were subjected to an atmospheric distillation process, where to be separated into the desired fractions.

The results that we obtained under the optimal conditions specified by us for mild hydrocracking process and using any of the two catalysts used in this research indicated that the desired oil fractions can be obtained according to the range of their boiling points and in a way that achieves the required commercial specifications. It was possible to obtain (3-4% by weight) liquefied gas (LPG), (10-12% by weight) naphtha, (11-13% by weight) kerosene, (24-29% by weight) diesel, and (32-40% by weight) residue (fuel). The aromatic compounds content in the produced naphtha of reached (18% by weight) and the rest of the specifications indicate the possibility of using these fractions directly without any subsequent treatments because they achieved the characteristics specified according to the British specifications, as the percentage of sulfur and traces of metals were within acceptable limits.

* Professor at the Faculty of Petroleum Engineering at the Syrian Private University - Damascus - Syria

Abstract

Hydrogen Transportion & Export: Options and Challenges

Eng. Wael Hamed A. Moati

In recent years, there has been a growing interest from various countries in investing in hydrogen as a low-carbon energy source. This interest has been primarily driven by climate change policies that seek to reduce or eliminate carbon dioxide emissions and lower the dependence on traditional fossil fuels.

For hydrogen to become a viable and tradable commodity on an international scale, it is essential to establish an integrated value chain. This value chain would begin with the production and storage of hydrogen in the producing country or region, followed by its transportation to target markets, and ultimately its distribution to consuming sectors.

The transportation and export of hydrogen, which serves as the crucial link between exporting and importing countries, presents a significant challenge due to its very low energy density compared to traditional fossil fuels. This involves the use of large tankers or large capacity pipelines to transport substantial quantities of hydrogen efficiently.

In practical terms, the energy density of hydrogen can be increased by either raising the pressure, as seen in compressed hydrogen (CGH2), for transportation through pipelines, or by lowering the temperature, as in the case of liquefied hydrogen (LH2) at -252.9 °C, for transportation via tankers. A combination of these processes can also be utilized to transport compressed liquefied hydrogen or to convert hydrogen into liquid carriers such as ammonia, which is commonly transported by tankers.

All the above-mentioned operations require a significant amount of energy, resulting in high operating costs in addition to the expenses associated with hydrogen production process. Therefore, when investing in hydrogen, it is crucial to carefully consider the most efficient option for exporting hydrogen on a case-by-case basis. Factors such as the quantity to be transported and the distance from demand centers should be considered carefully to determine the optimal approach for maximizing profitability and minimizing costs.

This study aims to review the potential paths to export hydrogen and its derivatives to identify the technical and economic characteristics of each path, and the challenges to apply. The study also addresses the prospects for hydrogen transport in the international trade, and the projects to be implemented in the Arab countries to export hydrogen to European and Asian markets.

The General Secretariat of the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC) is pleased to present this technical study as part of its ongoing efforts to monitor the latest developments in low-carbon energy and hope that the findings of this study will prove valuable to specialists, experts, and decision-makers in the energy sector.

*Gas Industries Expert, - Technical Affairs Department, OAPEC - Kuwait

Contents

Articles

Hydrogen Transportion & Export: Options and Challenges 7

Eng. Wael Hamed A. Moati Abstract 7

Transforming Used Lubricating Motor oils to Useful Petroleum products 107

Professor. Yasser Hourieh Abstract 8

Reports

Symposium on Pathways to Reduce Carbon Emissions in the Petroleum Downstream Industries

Dr. Yasser Mohammed Zaki Boghdadi 135

Book Review

OPEC's Dilemma and the Future of Oil: Navigating the Path to Net Zero 187

Author : Weshah Razzak
Review : Dr. Ahmed Alkawaz

Oil and Arab Cooperation is an Arab journal aiming at spreading petroleum and energy knowledge while following up the latest scientific developments in the petroleum industry

Articles published in this journal reflect the opinions of their authors and not necessarily those of OAPEC.

- Articles should not exceed 40 pages (including text, tables, and figures) excluding the list of references. The full text of the article should be sent electronically as a Word document.
- Figures, maps, and pictures should be sent in a separate additional file in JPEG format.
- "Times New Roman" should be used with font size 12. Line spacing should be 1.5. Text alignment should be "justified".
- Information sources and references should be referred to/enlisted in a clear academic method.
- When citing information from any source (digital, specific vision, or analysis), plagiarism should be avoided. Such information should be rephrased by the researcher's own words while referring to the original source. For quotations, quotation marks ("…") should be used.
- It is preferred to write the foreign names of cities, research centres, companies, and universities in English not Arabic.
- The researcher's CV should be attached to the article if it was the first time he/she cooperates with the journal.
- Views published in the journal reflect those of the authors and do not necessarily represent the views of OAPEC. The arrangement of the published articles is conditioned by technical aspects.
- Authors of rejected articles will be informed of the decision without giving reasons.
- The author of any published article will be provided with 5 complementary copies of the issue containing his/her article.

Articles and reviews should be sent to:
The Editor-in-Chiref, Oil and Arab Cooperation Journal, OAPEC

P.O.Box 20501 Safat -13066 Kuwait
Tel.: (+965) 24959000 - (+965) 24959779
Fax : (+965) 24959755
E-mail : oapec@oapecorg.org - www.oapecorg.org

PUBLICATION RULES

DEFINITION AND PURPOSE

OIL AND ARAB COOPERATION is a refereed quarterly journal specialized in oil, gas, and energy. It attracts a group of elite Arab and non- Arab experts to publish their research articles and enhance scientific cooperation in the fields relevant to the issues covered by the journal. The journal promotes creativity, transfers petroleum and energy knowledge, and follows up on petroleum industry developments.

RESEARCH ARTICLES

The journal welcomes all research articles on oil, gas, and energy aiming at enriching the Arab economic literature with new additions.

BOOK AND RESEARCH REVIEWS

The journal publishes articles presenting analytical reviews on books or studies published on oil, gas, and energy in general. These reviews work as references for researchers on the latest and most important petroleum-industry-related publications.

REPORTS

They tackle a conference or seminar attended by the author on the condition that they are relevant to oil, gas, and energy. Also, the author should obtain the permission of the institution that delegated or sponsored him/her to attend that event allowing him/her to publish their article in our journal. The report should not exceed 10 pages including figures, charts, maps, and tables if available.

RESEARCH CONDITIONS

- Publication of authentic research articles in Arabic which observe internationally recognized scientific research methodology.

OIL AND ARAB COOPERATION

Editor - in - Chief

Eng. Jamal Essa Al Loughani

Secretary General, Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)

Managing Editor

Mr. Abdulfattah Dandi

Director of Economics Dept. and Supervisor of Media and Library Dept.
OAPEC

Editorial Board

Eng. Imad Nassif Makki

Director of Technical Affairs Dept.
OAPEC

Dr. Dawwod Bahzad

Director Science and Technology Dept.
Kuwait Institute for Scientific Research

Dr. Belkacem L aabas

Chief Economist
Arab Planning Institute

Prices

Annual Subscription (4 issues including postage)

Arab Countries:
Individuals: KD 8 or US $25
Institutions: KD 12 or US$45

Other Countries:
Individuals: US$ 30
Institutions: US$ 50

All Correspondences should be directed to:
Editor-in-Chief of Oil and Arab Cooperation Journal

OIL AND ARAB COOPERATION

Refereed Journal Published Quarterly by the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)

ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES
OAPEC

OIL & ARAB COOPERATION

Volume 51 - 2024 - Issue 190

Articles

- Hydrogen Transport & Export: Options and Challenges

  Eng. Wael Hamed A. Moati

- Transforming Used Lubricating Motor oils to Useful Petroleum products

  Professor. Yasser Hourieh

Reports

- Symposium on Pathways to Reduce Carbon Emissions in the Petroleum Downstream Industries

  Dr. Yasser Mohammed Zaki Boghdadi

Book Review

- OPEC's Dilemma and the Future of Oil: Navigating the Path to Net Zero

  Author : Weshah Razzak

  Review : Dr. Ahmed Alkawaz

Refereed Journal Published Quarterly by the Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (OAPEC)