



به نام ایزد یکتا

آینده می‌سید روشن

تهیه کنندگان:

علی ابراهیمی محمد عرفان دکی

استاد مربوطه:

دکتر رجایی

بهمن 1400

چکیده:

اگر جوامع بخواهند به قرداد های بین المللی که به منظور کاهش آلاینده ها و گازهای گلخانه ای (مانند قرارداد پاریس) پایبند باشند، سوخت پاک معنی جز هیدروژن و سوخت های مبتنی بر هیدروژن نمی تواند داشته باشد. براساس این تحقیق هیدروژن در بعضی از بخش ها پتانسیل بیشتری نسبت به بقیه دارد که به ترتیب اولویت عبارت اند از: بخش حمل و نقل جاده ای ، کاربرد های صنعتی و گرمایش بخش خانگی. آینده ی هیدروژن را می توان گفت: همواره به هزینه های تولید، انتقال و ذخیره سازی آن بستگی دارد. در حال حاضر هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی توانایی رقابت با سایر حامل های انرژی را به دلیل صرفه اقتصادی ندارد، مگر اینکه در آینده با استفاده از تکنولوژی های جدیدتر هزینه های بخش تولید، انتقال و ذخیره سازی را کاهش داد و یا با اعمال سیاست هایی در کاهش آلاینده ها و گازهای گلخانه ای ، جوامع را به سمت استفاده از هیدروژن علاقه مند کرد.

فهرست مطالب

5.....	مقدمه
5.....	هیدروژن چیست
5.....	انرژی هیدروژن
6.....	چرا هیدروژن
8.....	تاریخچه
9.....	هیدروژن به عنوان سوخت
9.....	عرضه هیدروژن
9.....	تولید هیدروژن در سال 2020
11.....	سهیم هیدروژن تولید شده توسط روش‌های کم کربن در سال 2020
11.....	تقاضا آب در تولید هیدروژن
11.....	تقاضا هیدروژن
12.....	پالایشگاه‌ها
13.....	صنعت
13.....	تقاضا به تفکیک منطقه
14.....	ملاحظات هزینه
14.....	تولید هیدروژن چگونه است
15.....	تولید هیدروژن از گاز طبیعی
16.....	گزینه‌های فناوری برای تولید هیدروژن کم کربن از گاز طبیعی
17.....	هزینه تولید هیدروژن از گاز طبیعی
18.....	تولید هیدروژن از آب و برق (روش الکتrolیز)
18.....	گزینه‌های فناوری برای تولید هیدروژن از طریق الکتrolیز

- 19.....الکترولیز قلیایی.....
- 19.....الکترولیز غشایی.....
- 20.....الکترولیز اکسید جامد.....
- 21.....هزینه تولید هیدروژن از برق و آب (الکترولیز).....
- 22.....تولید هیدروژن از طریق زغال سنگ.....
- 22.....گزینه‌های فناوری برای تولید هیدروژن کم کربن از زغال سنگ.....
- 22.....هزینه تولید هیدروژن از زغال سنگ.....
- 23.....تولید هیدروژن از زیست توده.....
- 23.....تبدیل هیدروژن به آمونیاک.....
- 24.....تجزیه متان توسط اصلاح پلاسما.....
- 24.....ذخیره، انتقال و توزیع هیدروژن.....
- 24.....ذخیره سازی هیدروژن.....
- 25.....ذخیره سازی طبیعی.....
- 26.....تانک‌های ذخیره سازی هیدروژن.....
- 26.....انتقال و توزیع هیدروژن.....
- 26.....ترریق هیدروژن به شبکه‌های گاز طبیعی.....
- 28.....زیرساخت جدید انتقال هیدروژن.....
- 28.....انتقال هیدروژن به مسافت‌های طولانی.....
- 28.....خط لوله.....
- 29.....حمل با کشتی.....
- 30.....توزیع محلی هیدروژن.....
- 30.....کامیون‌ها برای توزیع محلی.....
- 31.....خط لوله برای توزیع محلی.....

- 31.....کاربردهای صنعتی فعلی و بالقوه هیدروژن
- 31.....هیدروژن در پالایشگاههای نفت
- 32.....چرا امروزه پالایشگاهها از هیدروژن استفاده می کنند
- 33.....منابع و قیمت هیدروژن برای استفاده در پالایشگاهها
- 34.....پتانسیل برای تقاضا آینده هیدروژن در پالایش نفت
- 34.....برآوردن تقاضای هیدروژن در آینده در پالایش نفت و در عین حال کاهش انتشار
- 35.....رقابت پذیری قیمت تولید هیدروژن کم کربن
- 36.....استفاده از هیدروژن در بخشهای شیمیایی
- 36.....امروزه چگونه از هیدروژن در بخشهای شیمیایی استفاده میشود؟
- 37.....پتانسیل برای تقاضای آینده هیدروژن در بخشهای شیمیایی
- 38.....برآوردن تقاضای هیدروژن در آینده در بخشهای شیمیایی و در عین حال کاهش انتشار
- 39.....رقابت پذیری قیمت روش های پاک تولید هیدروژن
- 40.....هیدروژن در تولید آهن و فولاد
- 40.....امروزه چگونه از هیدروژن در صنعت آهن و فولاد استفاده میشود؟
- 41.....پتانسیل برای تقاضای هیدروژن در آینده صنعت آهن و فولاد
- 41.....استفاده از هیدروژن برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد فولاد و در عین حال کاهش انتشار دی اکسید کربن
- 42.....هیدروژن برای دستیابی به گرمای با دمای بالا
- 42.....فرصت هایی برای استفاده هیدروژن در حمل و نقل، ساختمان و تولید برق
- 42.....هیدروژن به عنوان سوخت پاک برای حمل و نقل
- 43.....حمل و نقل جاده ای
- 43.....امروزه چگونه از هیدروژن برای حمل و نقل جاده ای استفاده میشود
- 43.....کاربرد هیدروژن در اتوبوس، کامیون و وسایل جابه جایی کالا
- 44.....ایستگاه های سوخت رسانی هیدروژن
- 45.....تقاضای بالقوه هیدروژن در آینده حمل و نقل جاده ای

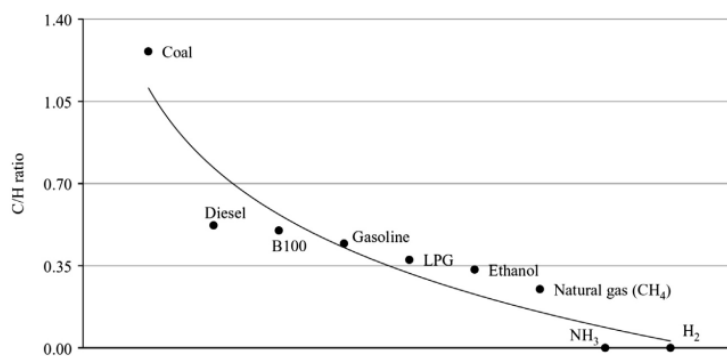
- 46.....هزینه های زیرساخت سوخت رسانی و پتانسیل کاهش هزینه ها
- 46.....هزینه مخزن ذخیره و پتانسیل کاهش هزینه
- 46.....هزینه پیل سوختی و پتانسیل کاهش هزینه
- 47.....بخش دریایی: کشتی ها و بنادر
- 47.....امروزه چگونه هیدروژن در بخش دریایی استفاده میشود؟
- 47.....پتانسیل سوخت های مبتنی بر هیدروژن در بخش دریایی
- 48.....راه آهن و هیدروژن
- 48.....هوایمایی و هیدروژن
- 49.....هیدروژن به عنوان سوخت برای تامین حرارت در ساختمان
- 49.....امروزه چگونه بخش ساختمان از هیدروژن استفاده میکند؟
- 50.....پتانسیل تقاضای هیدروژن در آینده برای بخش ساختمان
- 50.....ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی برای گرمایش خانگی
- 51.....استفاده 100 درصدی هیدروژن برای گرمایش ساختمان
- 52.....سیستم های تولید برق منعطف
- 54.....منابع

هیدروژن چیست؟

هیدروژن [1] سبک ترین عنصر جدول مندلیوف با عدد اتمی یک و آزادترین عنصر جهان است. این عنصر روی زمین فقط در ترکیبات موجود است. آزادسازی هیدروژن از این ترکیبات به انرژی نیاز دارد. به طور خلاصه، ریشه تولید هیدروژن در اقتصاد انرژی هیدروژن است. و می توان آن را به عنوان «سوخت همیشگی» در نظر گرفته می شود، زیرا مانند برق، انرژی ثانویه است و میتواند از هر انرژی اولیه ای تولید شود. به علت تغییر آب و هوا و گرمایش زمین توسعه هیدروژن سبز و هیدروژنی که از انرژی های تجدید پذیر به دست بیاید؛ بسیار جذاب است. هیدروژن آخرین ترکیب گم شده انرژی جهان است. [2]

انرژی هیدروژن

با بررسی سوخت هایی مانند چوب، ذغال سنگ، نفت، گاز... و مقایسه انرژی حرارتی ویژه آنها با یکدیگر می-توان دریافت که چوب با ترکیب شیمیایی پیچیده تر گرمای ویژه ای کمتر (20.6) از ذغال سنگ دارد (23.9) دارد. و همچنین ذغال سنگ ترکیب شیمیایی پیچیده تر و انرژی حرارتی ویژه کمتری نسبت به نفت (45.5) دارد، اولین چیزی که با بررسی این روند قابل توجه است روند کاهش کربن در سوخت هاست؛ کربن در ترکیب های چوب، ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی کاهش یافته است. همچنین روند افزایشی هیدروژن موجود در ترکیبات این سوخت ها از چوب تا گاز طبیعی شگفت انگیز است (شکل 1). از همین رو توجه ها به سوخت جدید نامحدود، بدون کربن، و با انرژی حرارتی بسیار بالا (142.2) یعنی هیدروژن جلب شد.

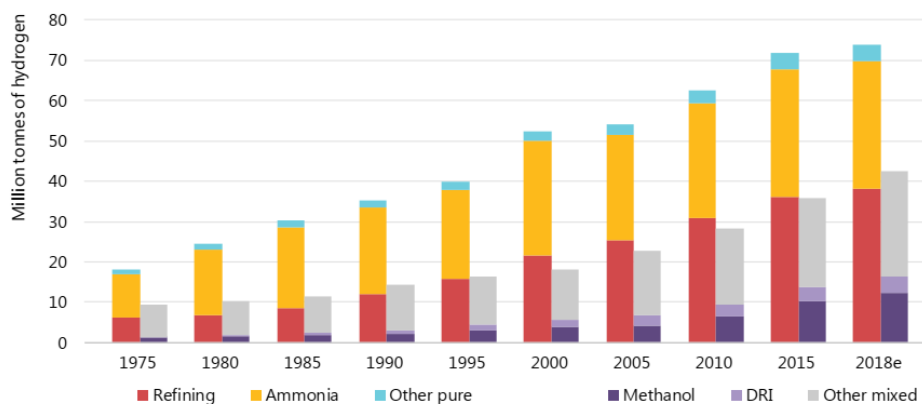


شکل 1 نسبت کربن به هیدروژن در سوخت های انتخاب شده به گرمای ویژه [3]

انرژی هیدروژنی از روش های تولید و بهره برداری انرژی دائمی و پایدار برای برآوردن تمام نیازهای جامعه بشری رونمایی می کند. این انرژی نشان دهنده فرصتی برای استفاده از مواد اولیه گوناگون برای بدست آوردن سوختی با راندمان بسیار بالا و با تولید الودگی بسیار کم است [4]، انرژی هیدروژن شامل استفاده از هیدروژن و/یا ترکیبات حاوی هیدروژن برای تولید انرژی با راندمان بالا است. جهان در حال حاضر در حال آزمایش انرژی هیدروژن در تمام بخش هایی است که شامل

تولید، ذخیره و توزیع انرژی می شود مانند: برق، گرما و سرمایش ساختمان ها و خانه ها؛ صنعت؛ حمل و نقل؛ و ساخت مواد اولیه و...

هیدروژن به عنوان انرژی وکتور¹ شناخته می شود زیرا به عنوان ماده خالص در طبیعت یافت نمی شود و بیشتر در ترکیباتی مانند آب بیومس ها وجود دارد، بنابراین هیدروژن مانند نفت و زغال سنگ از میان ماده های معدنی استخراج نمی شود. تامین هیدروژن برای کاربران صنعتی اکنون یک تجارت بزرگ در سطح جهانی است. تقاضا برای هیدروژن از سال 1975 تا به اکنون سه برابر شده است و همچنان این تقاضا در حال افزایش است. تقاضا برای هیدروژن در فرم خالص خود اکنون چیزی حدود 70 میلیون بشکه در سال است (شکل 2). تقریباً تمام این هیدروژن اکنون از سوخت های فسیلی تولید می شود. (6٪ گاز طبیعی و 2٪ زغال سنگ) و همین باعث می شود تا تولید هیدروژن اکنون در حدود 830 میلیون تن کربن دی اکسید در سال تولید کند.

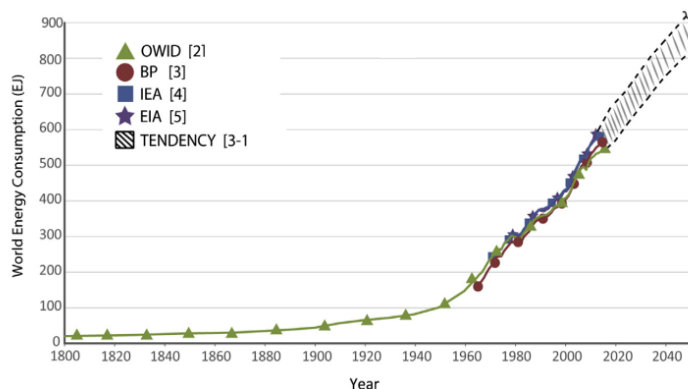


شکل 2 تقاضا برای هیدروژن، منبع: آژانس بین المللی انرژی

چرا هیدروژن [5]؟

نمودار زیر مصرف انرژی جهان را طبق آمارگیری های مختلف نشان می دهد و گویای این است که مصرف انرژی همواره در هر زمانی افزایشی است. بیشتر این انرژی مصرفی از سوزاندن سوخت های فسیلی تامین می شود. [4]

¹ energy vector



شکل 3 مصرف انرژی جهانی از دیدگاه آژانس‌های مختلف [4]

سال هاست بشر از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یک حامل انرژی در بخش‌های مختلف برای رفع نیازهای خود استفاده می‌کند. سوزاندن سوخت‌های فسیلی علاوه بر انرژی، گازهایی را منتشر می‌کند مانند کربن منواکسید، دی‌اکسید کربن و غیره که این گازها به دلیل اثر گلخانه‌ای تا مدتی زیادی حرارت را در خود نگه می‌دارند و امروزه اضافه شدن بیش از حد گازهای گلخانه‌ای به جو زمین باعث افزایش دمای زمین شده است. از اصلی‌ترین پیامدهای گرمایش زمین تغییرات اقلیمی است که در زمان حال بسیار ملموس شده است.

یکی دیگر از پیامدهای سوزاندن سوخت‌های فسیلی آلودگی هوا است که ناشی از تولید گازهای اکسیدهای نیتروژن^۲ و اوزون^۳ است. افزایش سطح بالای این آلاینده‌ها باعث شیوع بیماری‌های مزمن و حاد می‌باشد. در زیر لیست بیماری‌ها و عارضه‌هایی که آلودگی هوا یک عامل بسیار موثر آن است را می‌توان نام برد:

- بیماری‌های تنفسی مانند آسم و سرطان ریه
- بیماری‌های قلبی و عروقی
- مرگ و میر زودرس
- زایمان زودرس

یکی از راه‌حل‌ها برای این موضوع استفاده از سوخت جایگزین است. می‌توان گفت بهترین سوخت جایگزین، هیدروژن می‌باشد. بخش حمل‌ونقل را می‌توان هدف اصلی استفاده از هیدروژن دانست چرا که تقریباً 50 درصد آلاینده‌های تولیدی در جهان مربوط به بخش حمل‌ونقل می‌باشد. هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک (در صورتی که توسط منابع پاک تولید شود) مزایای گسترده‌ای دارد از جمله:

1. هیدروژن هیچ آلاینده‌ای تولید نمی‌کند. در سلول سوختی‌های هیدروژن یک واکنش الکتروشیمیایی با اکسیژن برای تولید الکتریسیته، حرارت و آب انجام می‌دهد. در این صورت از انتشار گازهای گلخانه‌ای در هوا ناشی از حمل‌ونقل جلوگیری می‌کند.

^۲ NO_x

^۳ O₃

2. هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی ثانویه که از هر منبع اولیه انرژی (در دسترس محلی) تولید می شود. این مورد برای کشورهایی که فاقد منابع سوخت های فسیلی هستند ایجاد امنیت انرژی خواهد کرد.
 3. هیدروژن می تواند به عنوان یک سیستم ذخیره ساز انرژی برای الکتریسته متناوب باشد که به شدت مورد نیاز سیستم های تولید برق از انرژی های تجدید پذیر مانند خورشید، باد و امواج دریا است.
 4. استفاده از هیدروژن در وسایل حمل و نقل عملکرد بهینه تری را خواهد داشت چرا که سلول های سوختی هیدروژن راندمان تبدیل بالاتری نسبت به موتورهای احتراق داخلی دارند.
 5. با استفاده از خودروهای که سوخت آنها هیدروژن است میتوان انتشارات محلی، ذرات معلق، اوزون و باران اسیدی را به طور قابل توجهی کاهش داد.
 6. با جایگزینی خودرو های هیدروژنی انتشار گوگرد دی اکسید⁴ و اکسیدهای نیتروژن را می توان 70 الی 80 درصد کاهش داد به خصوص در مناطق پرجمعیت و کلان شهرها که در حال حاضر تعداد آنها رو به افزایش است.
 7. میزان هزینه های خارجی یک خودرو را بین 1000 تا 1500 دلار آمریکا در مقایسه با خودرو های معمولی کاهش خواهد داد.
 8. میزان صداهای خودروها به علت تولید کمتر آلودگی صوتی در واکنش هیدروژن با اکسیژن به نسبت سوختن سوخت های فسیلی به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت.
- با این حال توجیه استفاده از هیدروژن به تنهایی دشوار است زیرا هیدروژن یک منبع انرژی خودبه خودی نیست؛ بلکه از یک منبع انرژی اولیه تولید می شود. هرگونه مزیت هیدروژن به عنوان سوخت به نحوه تولید آن بستگی دارد، مثلاً اگر از منبعی مانند زغال سنگ تهیه شود، امنیت انرژی برای آن کشور افزایش می یابد ولی تولید دی اکسید کربن افزایش می یابد (مگر اینکه به صورت مستقیم کربن از هوا جذب شود).
- اگر هیدروژن از منابع غیر فسیلی (مانند انرژی هسته ای و انرژی های تجدید پذیر) تولید شود هم امنیت انرژی افزایش می یابد و همچنین تولید آلاینده ها مانند دی کسید کربن کاهش خواهد یافت. ولی این مسئله را هم باید در نظر داشت که خود منبع تجدیدپذیر، توان تبدیل شدن مستقیم به برق را داشته است و باید تحلیل هزینه فرصت انجام شود. این یعنی هرگونه ارزیابی از فضایل تغییر به هیدروژن به عنوان سوخت، شامل تعداد زیادی فرضیه در مورد تحول بلندمدت سیاست انرژی است.

تاریخچه

در سال 1766 هنری کاوندیش⁵ برای اولین بار گاز هیدروژن را به عنوان ماده مجزا تشخیص داد. در سال 1783 انتونی لایوسر⁶ برای اولین این گاز را هیدروژن خواند. لغت هیدروژن به معنی تولید کننده آب است.

⁴ SO₂

⁵ Henry Cavendish

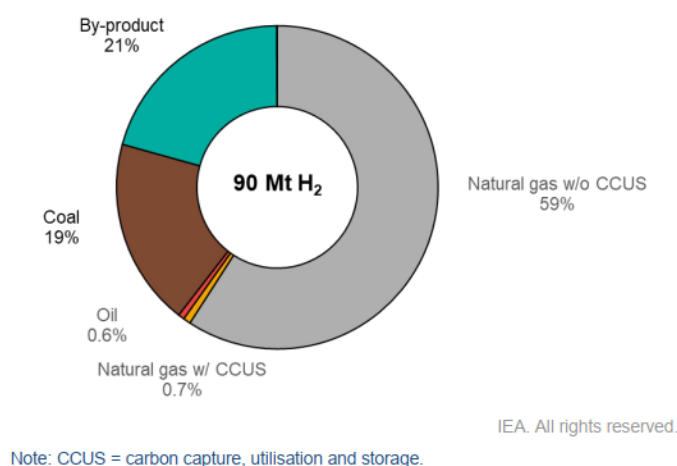
⁶ Antoine Lavoisier

هیدروژن به عنوان سوخت

هیدروژن به عنوان سوخت از دهه ها پیش استفاده می شد. ناسا برای اولین بار فهمید که از گاز هیدروژن می توان به عنوان سوخت موشک برای ارسال فضاوردان و ماهواره ها به فضا در سال 1958 استفاده کند. تا دهه 1960 در بسیاری از کشورها هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی برای روشنایی خیابان ها و همچنین بخش خانگی (پخت و پز، روشنایی، گرمایش) استفاده می شد. ایده ی سیستم های انرژی مبتنی بر هیدروژن در دهه 1970 پس از بحران های نفتی سال 1973 و 1979 شکل گرفت. هیدروژن یک ماده اولیه مهم نیز در صنعت بوده؛ که برای مثال، برای هیدروژنه کردن نفت خام یا سنتز آمونیاک استفاده می شده است. فناوری پیل سوختی که در اواخر دهه 1970 اختراع شد، را می توان دلیل اصلی روی آوردن به سمت هیدروژن دانست.

عرضه هیدروژن [6]

تولید هیدروژن در سال 2020



شکل 4 منابع تولید هیدروژن در سال 2020

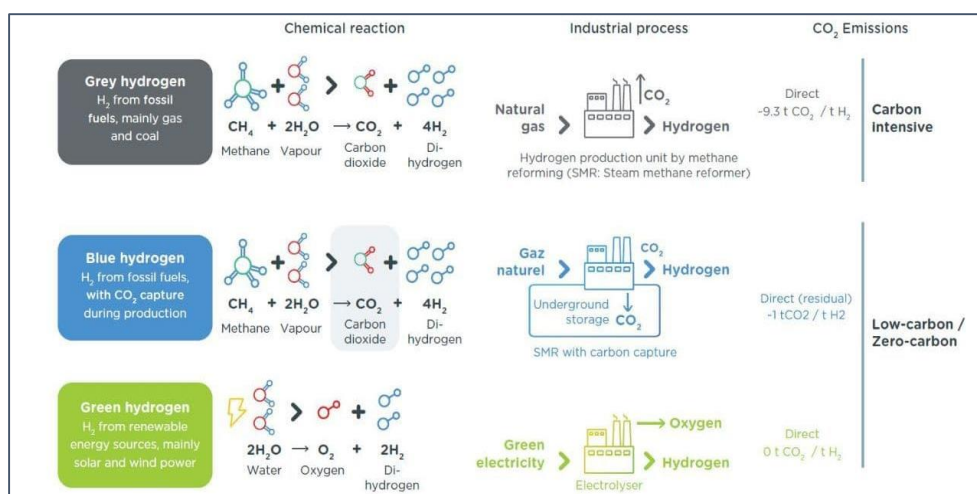
تقاضای جهانی هیدروژن در سال 2020 مقدار 90 میلیون تن برآورد شده است که تقریباً می توان گفت کل تولید آن مبتنی بر سوخت های فسیلی بوده است. در شکل 4 مشاهده می شود که گاز طبیعی بیشترین منبع استفاده شده برای تولید هیدروژن است و به ترتیب هیدروژن تولید شده به عنوان محصول جانبی و زغال سنگ. این سه منبع را میتوان منابع اصلی تولید هیدروژن در سال 2020 دانست. 72 میلیون تن هیدروژن (79%)، از واحدهایی که تولید اصلی آنها هیدروژن است؛ تامین شده و 21 درصد باقی مانده آن از واحدهایی که هیدروژن به عنوان یک محصول جانبی برای آنها به حساب می آید؛ تولید شده است. عمدتاً پالایشگاه هایی که نفت⁷ را تبدیل به بنزین می کنند، هیدروژن نیز تولید می کنند. واکنش انجام شده در این فرآیند منجر به تولید هیدروژن می شود.

⁷ Naphtha به طبقه ای از سوخت های مایع هیدروکربنی با فراریت و اشتغال پذیری بالا گفته می شود که در برج تقطیر پالایش نفت خام بین () Naphtha و نفت های سبک و نفت سفید قرار می گیرد

تقاضای هیدروژن خالص عمدتاً برای تولید آمونیاک و پالایش نفت است؛ که سهم 79 درصدی (72 میلیون تن هیدروژن) را به خود اختصاص داده اند، درحالی که 21 درصد (18 میلیون تن هیدروژن) همراه ترکیب با گازهای دیگر برای تولید متانول⁸ و آهن اسفنجی⁹ استفاده شده است.

240 میلیارد متر مکعب گاز طبیعی (6 درصد تقاضای جهانی گاز طبیعی) و 115 میلیون تن زغال سنگ (2 درصد تقاضای جهانی زغال سنگ) برای تولید هیدروژن در سال 2020 استفاده شده است. تولید هیدروژن از سوخت های فسیلی باعث تولید مستقیم 900 میلیون تن آلایندگی کربن می باشد، که این مقدار 2.5 درصد کل آلایندگی کربن تولیدی در بخش انرژی و صنعت می باشد. تقریباً آلایندگی ناشی از تولید هیدروژن با جمع آلایندگی تولیدی دو کشور اندونزی و انگلیس برابری می کند. برای گذار به انرژی های پاک این مقدار بسیار بالا است و باید کاهش یابد.

رنگ های اختصاص داده شده به هیدروژن به چه معناست؟



شکل 5 رنگ بندی تولید هیدروژن

همانطور که طبق شکل 5 مشاهده می شود سه نوع رنگ بندی مختلف براساس نحوه تولید هیدروژن وجود دارد

1. هیدروژن خاکستری: هیدروژن تولید شده از منابع سوخت های فسیلی، عمدتاً گاز و زغال سنگ، در این دسته قرار می گیرند. هیدروژن خاکستری دارای بیشترین مقدار آلایندگی می باشد و همانطور که در بالا مشاهده شد تقریباً تمام مقدار هیدروژن تولید شده در سال 2020 از این روش بود.
2. هیدروژن آبی: روش تولید این نوع هیدروژن با هیدروژن خاکستری تفاوتی ندارد؛ بلکه یک واحد جاذب و ذخیره ساز کربن به آن اضافه می گردد. این روش جز روش های تولید هیدروژن کم کربن به حساب می آید.

⁸ CH₃OH

⁹ DRI Steel

3. هیدروژن سبز: این نوع هیدروژن دو تفاوت با روش های بالا دارد. تفاوت اول در ماده اولیه برای تولید هیدروژن است که فقط آب استفاده می شود و همچنین انرژی استفاده شده برای تولید از منابع پاک تامین می شود. این نوع تولید بهترین روش تولید هیدروژن از لحاظ آلاینده ای است؛ زیرا هیچ آلاینده ای طی این روش تولید نمی شود.

سهم هیدروژن تولید شده توسط روش های کم کربن در سال 2020

هیدروژن تولید شده از سوخت فسیلی همراه با جاذب کربن در این سال 0.7 میلیون تن (تقریباً 0.7 درصد کل هیدروژن تولیدی) و همچنین هیدروژن تولیدی از روش الکترولیز فقط 30 کیلو تن می باشد (تقریباً 0.03 درصد کل هیدروژن تولیدی). سهم هیدروژن تولیدی توسط روش های کم کربن به 1 درصد هم در مجموع نمی رسد.

تقاضای آب در تولید هیدروژن

تولید هیدروژن علاوه بر انرژی نیازمند به آب است. مقدار آب مورد نیاز برای تولید 1 کیلوگرم هیدروژن در روش الکترولیز تقریباً 9 کیلوگرم است. در روش مبتنی بر سوخت های فسیلی و جاذب کربن، اگر سوخت مورد استفاده گاز طبیعی باشد؛ برای هر 1 کیلوگرم هیدروژن، تقریباً 13 الی 18 کیلوگرم آب مورد نیاز است. و اگر سوخت زغال سنگ باشد؛ این مقدار به 45 الی 85 کیلوگرم می رسد. که این مقدار بسیار وابسته به مقدار آب مصرف شده برای استخراج زغال سنگ است.

در سناریو انتشارات خالص صفر¹⁰، تقاضای جهانی آب برای تولید هیدروژن به 5800 میلیون متر مکعب می رسد (تقریباً 12 درصد آب مصرفی بخش انرژی). در حال حاضر تقاضای آب برای تولید هیدروژن در مجموع مقداری نسبتاً کم است؛ ولی این مقدار در آینده برای واحدهای بزرگتر تولید هیدروژن قابل توجه است به ویژه در مناطقی که با کمبود آب شیرین مواجه هستند. استفاده از آب دریا میتواند یک روش جایگزین باشد در حالی که شیرین کردن آب به روش اسمز معکوس¹¹ نیازمند 3 الی 4 کیلووات ساعت برق به ازای 1 مترمکعب آب است. این کار قیمت هیدروژن تولیدی را تقریباً 0.01 تا 0.02 دلار در هر کیلوگرم افزایش می دهد همچنین استفاده آب دریا به صورت مستقیم در الکترولیز باعث خوردگی تجهیزات و تولید کلر¹² می شود. پروژه های تحقیقاتی مختلف در حال بررسی برای استفاده آسان تر آب دریا در الکترولیز در حال انجام است.

تقاضا هیدروژن [6]

تقاضا جهانی هیدروژن در سال 2020 حدود 90 میلیون تن بود. و این تقاضا از آغاز هزاره تا کنون 50 درصد رشد داشته است و تقریباً تمام این تقاضا مربوط به پالایشگاه ها و موارد صنعتی می شود. اما پذیرش هیدروژن برای کاربردهای جدید بسیار کند بوده است. با بررسی دهه گذشته میتوان دریافت زمانی که اسقرار خودروهای پیل سوختی¹³ آغاز شد و پروژه های آزمایشی شروع به

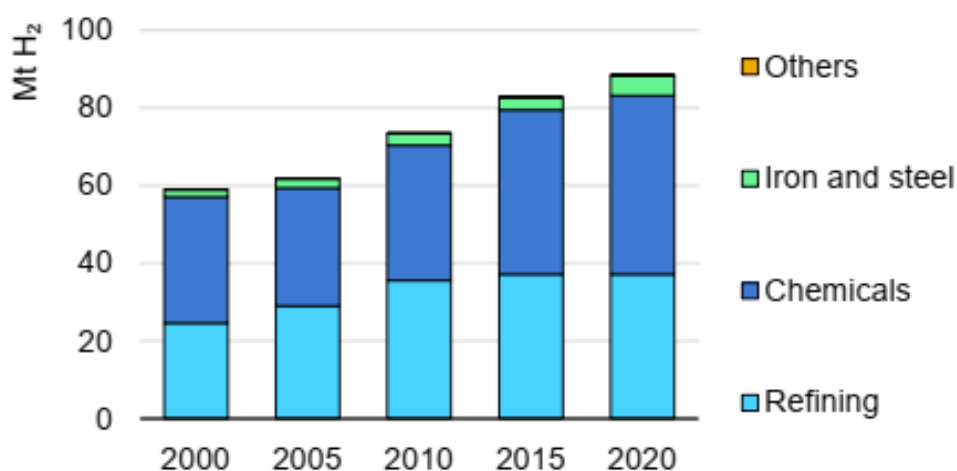
¹⁰ zero emission

¹¹ Reverse Osmosis

¹² Chlorine

¹³ FCEV

تزریق هیدروژن به شبکه‌های گاز و استفاده از آن برای تولید برق کردند. نتایج مثبتی بدست آمد؛ و نتایج مثبت حاصل از این تجربیات، توسعه برخی از فناوری‌های هیدروژن را تا مرز تجاری سازی سوق داد. به موازات آن نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی شدت گرفت و دولت‌ها و صنایع تصمیم جدی‌ایی برای کاهش تولید آلودگی گرفتند. با شتاب گرفتن بیشتر رشد هیدروژن در صنایع و کاربردهای جدید، همچنان تقاضا در این زمینه‌ها ناچیز است؛ به عنوان مثال در حمل و نقل، تقاضای سالانه هیدروژن کمتر از 20 کیلو تن هیدروژن است که تنها 0.02 درصد از کل تقاضا موجود در جهان را شامل می‌شود. همان‌طور که در نقشه راه آرژانس بین‌المللی انرژی تا سال 2050^{۱۴} نشان داده شده است، دستیابی به اهداف کربن زدایی دولت‌ها مستلزم تغییر در سرعت گسترش فناوری‌های هیدروژن در بسیاری از بخش‌های انرژی است. که در زیر به بررسی مفصل تر تقاضا هیدروژن در بخش‌های پالایشگاه‌ها و صنعت پرداخته شد و سپس به تفکیک منطقه تقاضا هر بخش را بررسی شده است.



شکل 6 تقاضا هیدروژن در صنایع مختلف

پالایشگاه‌ها

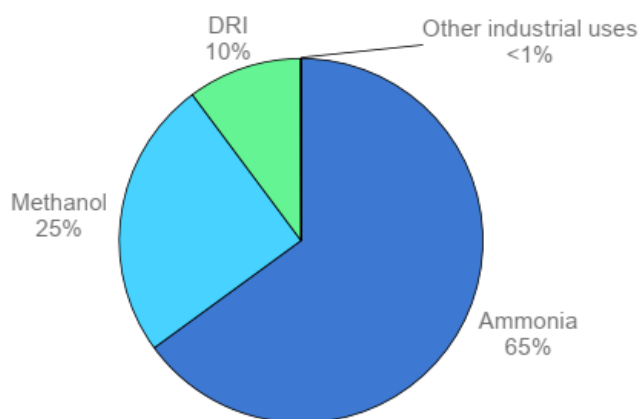
چیزی در حدود نصف تقاضا هیدروژن در پالایشگاه‌ها با سایر فرایندها در پالایشگاه یا از فرایندهای پتروشیمیایی در بعضی از پالایشگاه‌های خاص تامین می‌شود و مابقی از تولید اختصاصی هیدروژن در محل یا استفاده از هیدروژن تجاری وارد شده تامین می‌شود.

اکثر تولیدات در محل بر اساس تولید از گاز طبیعی هستند؛ با وجود برخی استثناها همچون استفاده از فرایند گاز سازی زغال‌سنگ که تقریباً 20 درصد تولیدات هیدروژن در چین را شامل می‌شود. در سال 2020 تولید هیدروژن برای پاسخ به نیاز پالایشگاه‌ها، مسئول تولید دی‌اکسید کربن در حدود 200 میلیون تن بود. با اینحال؛ برخی از تلاش‌های حاضر برای کاهش این انتشارات در حال حاضر عملیاتی شده است. مانند: 6 نیروگاه تولید هیدروژن در جهان به جاذب دی‌اکسید کربن مجهز شده‌اند و دوتای دیگر از اکترولیز برای تولید هیدروژن استفاده می‌کنند و حداقل 30 پروژه در دست ساخت است.

¹⁴ Net zero by 2050

صنعت

با توجه به نیاز 38 درصدی از کل انرژی نهایی دنیا، صنعت بزرگترین مصرف کننده انرژی و مسئول انتشار 26 درصد از کل دی اکسید کربن موجود است. در این بخش 6 درصد از کل نیاز به انرژی، برای تولید هیدروژن است. که در درجه اول به عنوان ماده اولیه برای تولید مواد شیمیایی عمل می کند، تقاضا هیدروژن در صنعت برای سال 2020، 21 میلیون تن بوده است. توسعه اقتصادی و رشد جمعیت مستلزم تولید بیشتر صنایعی است که در حال حاضر از هیدروژن استفاده می کنند. و در نتیجه مستلزم افزایش تولید هیدروژن است.



شکل 7 تقاضا هیدروژن در صنعت به تفکیک بخش

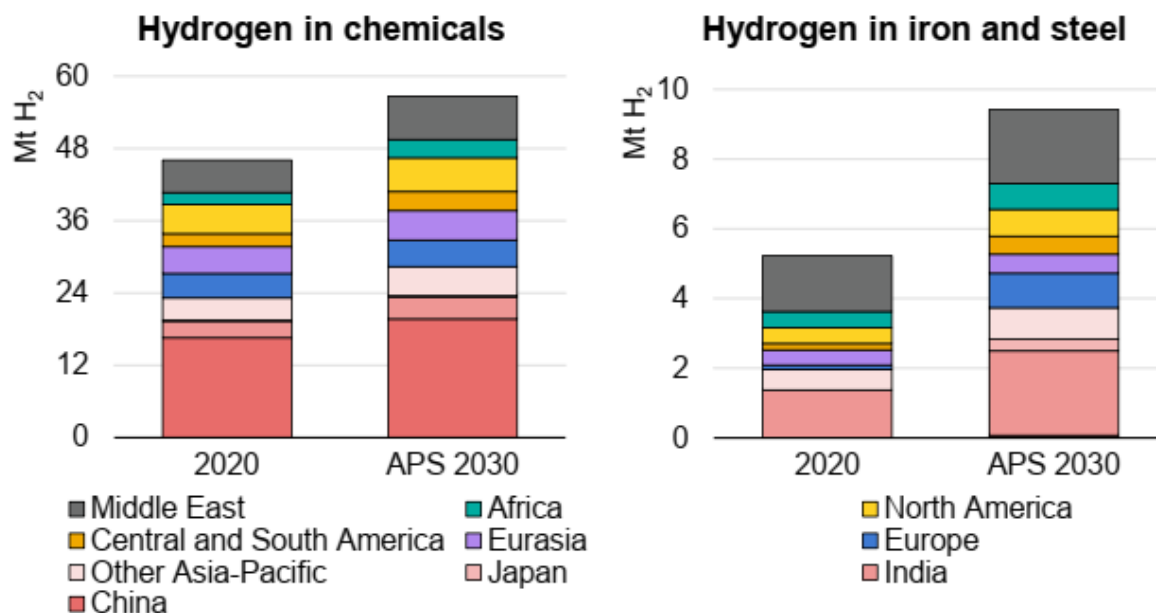
در مفهوم انرژی پاک؛ یک تغییر اساسی، حرکت به سمت هیدروژن کم کربن است (تولید هیدروژن با استفاده از الکترولیز یا ادامه تولید هیدروژن با استفاده از سوخت های فسیلی اما در کنار فناوری های جذب کربن از هوا^{۱۵}). در سال 2020، صنعت 0.3 میلیون تن هیدروژن کم کربن که بیشتر آن با فناوری های جذب کربن اتفاق افتاده بود، تولید کرد.

تقاضا به تفکیک منطقه

منطقه آسیا و اقیانوسیه در حال حاضر بیش از نصف تقاضا جهانی برای انرژی را شامل شده است. چین به تنهایی سهم عمده ای را برای تولید آمونیاک و متانول در اختیار دارد (17 میلیون تن هیدروژن)، هند در این منطقه دومین مشتری پر تقاضا برای هیدروژن به علت تولید آمونیاک و متانول و همچنین فرآیند کاهش مستقیم مبتنی بر زغال سنگ^{۱۶} است (4 میلیون تن هیدروژن). منطقه خاورمیانه نیز دومین منطقه متقاضی هیدروژن در جهان است (7 میلیون تن هیدروژن در سال 2020). در اینجا نیز بیشتر تقاضا به علت تولید آمونیاک و متانول است (شکل 8)

¹⁵ Carbon capture

¹⁶ Coal-based DRI



شکل 8 تقاضا هیدروژن به تفکیک مناطق

ملاحظات هزینه

امروزه، سوخت‌های فسیلی ارزان ترین منبع انرژی موجود برای صنعت به حساب می‌آیند. اما با افزایش قیمت کربن در چندین بازار و کاهش سریع هزینه‌های تولید برق از انرژی‌های تجدید پذیر، روش‌های استفاده از هیدروژن کم کربن برای تولید آهن و فولاد و همچنین مواد شیمیایی با مسیرهای تجاری‌ایی که در پیش گرفته اند به آستانه رقابت نزدیک می‌شوند. رقابت پذیری هیدروژن کم کربن در صنعت از لحاظ قیمت، عمدتاً با هزینه‌های سرمایه‌ایی و هزینه‌های انرژی (به ویژه گاز طبیعی و برق) تعیین می‌شود. برای هر دو کاربرد هیدروژن در آمونیاک و تولید فولاد، می‌توان از هیدروژن کم کربن تولید شده از گاز طبیعی یا الکتریسیته استفاده کرد.

تولید هیدروژن چگونه است؟ [7]

عبارت تولید هیدروژن اشاره به صنعتی دارد که منجر به تولید هیدروژن می‌شود. امروزه فناوری غالب در تولید هیدروژن، اصلاح بخار^{۱۷} هیدروکربن‌ها است. روش‌های بسیاری در تولید هیدروژن وجود دارد از جمله روش‌هایی مانند: شامل برق‌کافت^{۱۸} و گرماکافت^{۱۹}. در سال 1999 بیشتر هیدروژن تولیدی (95%) از راه اصلاح بخار سوخت‌های فسیلی با اکسایش جزئی متان و گاز زغال سنگ بدست آمده است. سهم اندکی از تولید هیدروژن به روش‌های الکترولیز و گازی سازی زیست توده^{۲۰} مربوط می‌شود. در زمان حال نیز تقریباً همانطور که مشاهده شد مقدار هیدروژن تولیدی از روش‌های الکترولیز و گازی سازی زیست توده همچنان کم می‌باشد. هدف نهایی در اقتصاد هیدروژن پیدا کردن روش‌های اقتصادی با کمترین میزان خسارت به محیط زیست، در تولید

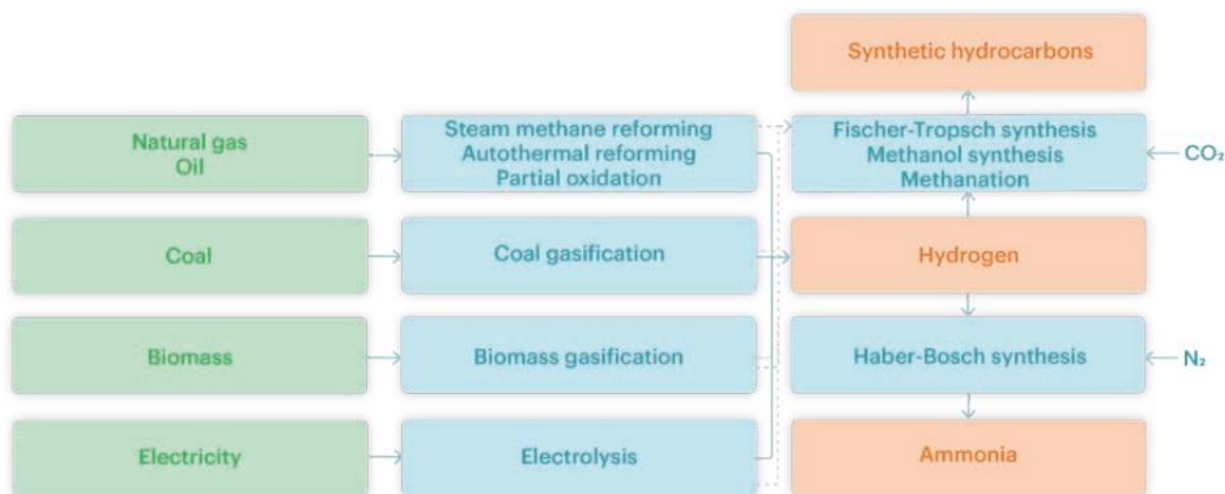
¹⁷ Steam reforming

¹⁸ Electrolysis

¹⁹ Thermolysis

²⁰ Biomass

هیدروژن است. در شکل زیر مسیرهایی را که دارای پتانسیل بیشتری برای تولید هیدروژن و محصولات مبتنی بر هیدروژن مشاهده می‌شود.



شکل 9 پتانسیل موجود برای تولید هیدروژن و محصولات مبتنی بر هیدروژن (فرآیند فیشر-تروپش²¹ مجموعه ای از واکنش های شیمیایی است که مخلوطی از مونواکسیدکربن و هیدروژن با گازآب را به هیدروکربن های مایع تبدیل می‌کند. سپس فرآیند فیشر-تروپش به روغن روانکاری مصنوعی و سوخت مصنوعی تبدیل می‌کند. فرآیند هابر-بوش²² که فرآیند تولید آمونیاک هابر یا آمونیاک مصنوعی نیز نامیده می‌شود، روشی برای سنتز مستقیم آمونیاک از هیدروژن و نیتروژن است که توسط شیمی‌دان آلمانی فریتز هابر²³ توسعه یافته است.)

تولید هیدروژن از گاز طبیعی

همانطور که گفته شد تولید هیدروژن از روش اصلاح بخار متان²⁴، ارزان ترین و کاربردی ترین روش تولید هیدروژن از گاز طبیعی است. ولی روش اصلاح حرارتی خودکار²⁵ نیز همچنین استفاده می‌شود. در جریان فرآیند اصلاح بخار در حضور یک کاتالیزگر و بخار، به گاز گرما می‌دهیم در اثر این واکنش گرماگیر، مولکول های متان شکسته شده و در مقابل مونوکسید کربن و هیدروژن گازی آزاد می‌شود. با عبور مونوکسید کربن از اکسید آهن یا هر نوع اکسیدی دیگری می‌توان به واکنش جابه‌جایی آب-گاز رسید و مونوکسید کربن را از هیدروژن جدا کرد، این واکنش علاوه بر جدایی مونوکسید کربن خود نیز گاز هیدروژن تولید می‌کند. مشکل این روش محصولات فرعی آن است که مونوکسید کربن و دی‌کسید کربن است که هردو جزء گازهای گلخانه ای هستند. در روش اصلاح بخار متان گرمای موردنیاز واکنش از یک مشعل خارجی یا دیگ بخار تامین می‌شود ولی در روش اصلاح حرارتی خودکار مقداری متان قبل از انجام فرآیند سوزانده می‌شود و تامین حرارت می‌کند. تولید مناسب در کوتاه مدت، بازدهی اقتصادی مطلوب و همچنین پروژه های در دسترس احداث تولید هیدروژن از روش اصلاح بخار گویای این است که این روش، فناوری غالب برای تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ خواهد بود.

²¹ Fischer-Tropsch Process

²² Haber-Bosch process

²³ Haber Fritz

²⁴ Steam Methane Reforming (SMR)

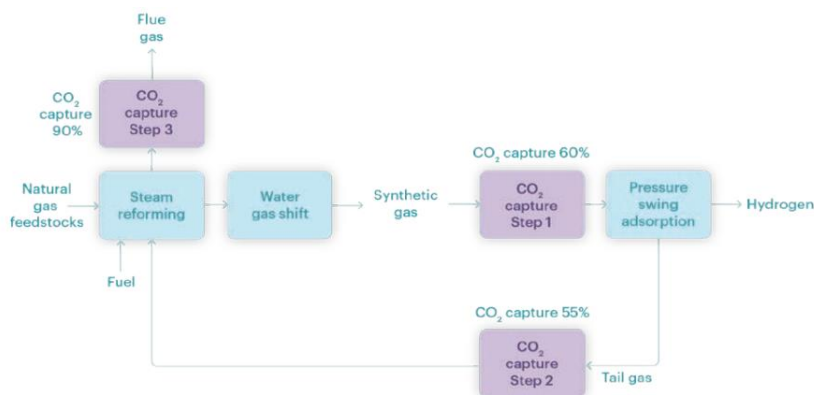
²⁵ Auto Thermal Reforming (ATR)

گزینه های فناوری برای تولید هیدروژن کم کربن از گاز طبیعی

جداسازی دی اکسید کربن و ذخیره سازی آن^{۲۶} را میتوان به سیستم های تولید هیدروژن مبتنی بر اصلاح بخار متان و اصلاح حرارتی خودکار اضافه کرد. این کار می تواند منجر به کاهش انتشار کربن تا 90 درصد شود؛ اگر که به دو قسمت تولید انرژی و بخش فرآیند اضافه شوند. کارخانه های مبتنی بر اصلاح بخار متان و جداسازی دی اکسید کربن و ذخیره سازی آن در حال حاضر فعال هستند و تقریباً نیم میلیون تن هیدروژن در سال تولید می کنند.

ذخیره سازی دی اکسید کربن می تواند در دو مرحله انجام شود. مرحله اول جداسازی در بخش پرفشار انجام می شود و حدود 60 درصد جذب می شود و مرحله دوم از گاز رقیق شده دودکش جذب انجام می شود که باعث جداسازی 90 درصدی خواهد شد. در واحد های که هیدروژن محصول اصلی آنها می باشد مرحله اول تقریباً 53 دلار برای هر تن دی اکسید کربن هزینه دارد و با انجام مرحله دوم این هزینه به 80 دلار در تن دی اکسید کربن خواهد رسید. این هزینه در واحدهایی که هیدروژن محصول فرعی آنها است به 115 دلار در تن دی اکسید کربن می رسد (بر اساس قیمت گاز طبیعی در اروپا).

فناوری اصلاح حرارتی خودکار نیز یک فناوری جایگزین است که در آن گرمای مورد نیاز در خود فرآیند تامین می شود. یعنی جذب بیشتر کربن از خود راکتور فراهم می سازد؛ پس نرخ جذب کربن این فناوری از روش اصلاح بخار متان بیشتر خواهد بود. همچنین هزینه جذب کربن کمتر خواهد بود زیرا دی اکسید کربن در این فناوری متمرکزتر است و جذب آن راحت تر خواهد بود. تحقیقات نشان داده که هزینه این روش 90 درصد کمتر نسبت به اصلاح بخار متان خواهد بود.



Source: IEAGHG (2017a), "Reference data and supporting literature reviews for SMR based hydrogen production with CCS".

شکل 10 فرآیند تولید هیدروژن از گاز طبیعی همراه با جذب و ذخیره ساز کربن

²⁶ Carbon capture, Utilization and storage (CCUS)

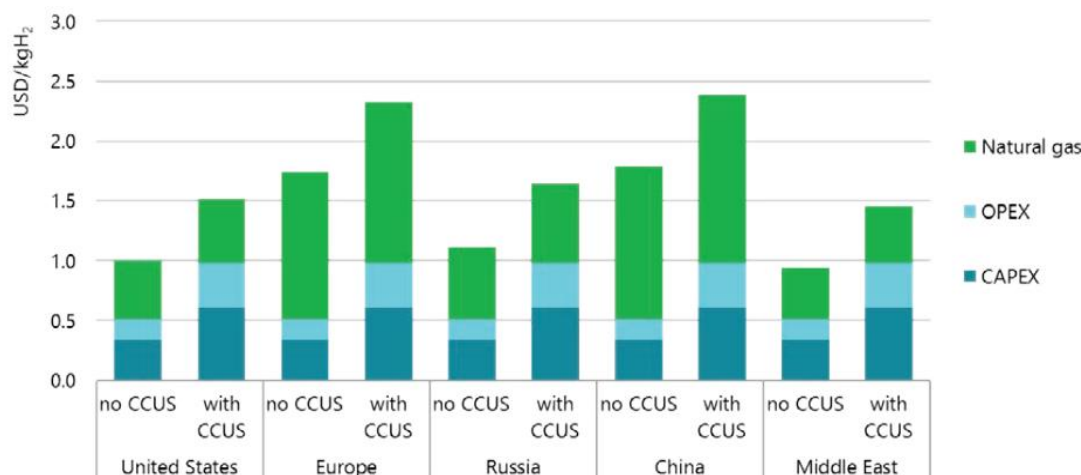
هزینه تولید هیدروژن از گاز طبیعی

هزینه تولید هیدروژن از گاز طبیعی تحت تاثیر عوامل اقتصادی و فنی می‌باشد که دو مورد تاثیر بسزایی دارند عبارتند از:

1. قیمت گاز مصرفی در محل کارخانه

2. هزینه های سرمایه ای^{۲۷}

هزینه سوخت مصرفی بیشترین تاثیر را با 45 تا 75 درصد در کل مخارج دارد. پایین بودن قیمت گاز در منطقه خاورمیانه، روسیه و آمریکای شمالی باعث کاهش هزینه تولید هیدروژن طبق نمودار 1 خواهد شد و کشورهایی مانند هند، ژاپن و چین که واردکننده گاز هستند هزینه تولید هیدروژن از گاز طبیعی برای آنها افزایش می‌یابد. در دسترس بودن گاز کم هزینه یک عامل تعیین کننده مهم برای تولید هیدروژن از گاز طبیعی است.



نمودار 1 قیمت تولید هیدروژن از گاز طبیعی در مناطق مختلف در سال 2018

اضافه کردن واحد جذب و ذخیره سازی کربن باعث افزایش 50 درصدی هزینه های سرمایه ای و افزایش 100 درصدی هزینه های عملیاتی بخاطر هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی کربن و همچنین افزایش 10 درصدی برای سوخت (که تقریباً این مقدار بسته به نوع طراحی متغیر است) خواهد شد. با توجه به نمودار 1 تولید هیدروژن از گاز طبیعی به روش اصلاح بخار متان و واحد جذب و ذخیره سازی کربن برای مناطقی که قیمت گاز پایین است استراتژی خوبی برای اقتصاد هیدروژن به حساب خواهد آمد.

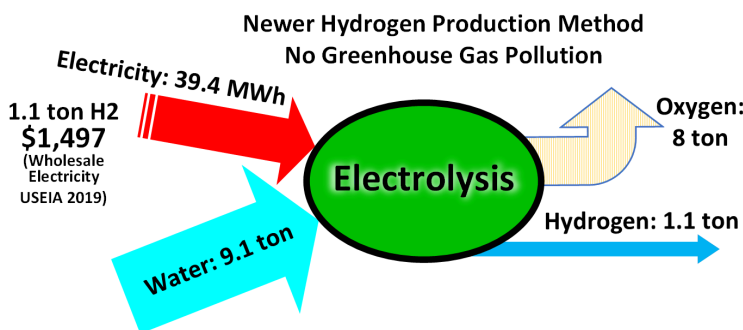
²⁷ Capital expenditures (CAPEX)

تولید هیدروژن از آب و برق (روش الکترولیز)

الکترولیز آب یک فرآیند الکتروشیمیایی است که آب را تجزیه به هیدروژن و اکسیژن می‌کند. تقریباً 0.03 درصد کل هیدروژن تولیدی در سال 2020 یعنی 30 کیلو تن از این طریق تولید شده است. و هیدروژن تهیه شده از این روش در بازارهایی که خلوص بالا نیازمند هستند، عرضه می‌شود. برای مثال در صنعت الکترونیک، علاوه بر این مقدار تقریباً 2 درصد از کل هیدروژن جهانی، به عنوان محصول جانبی الکترولیز کلر بدست می‌آید.

با کاهش هزینه های تولید برق تجدید پذیر به ویژه از نیروی باد و سیستم های فتوولتائیک²⁸ علاقه به تولید هیدروژن الکترولیتی افزایش یافته است. پروژه های سال های اخیر بسته به نوع فناوری و ضریب بار راندمان بین 60 تا 81 درصد را برای سیستم های الکترولیز نشان می‌دهند.

برای تولید 1 کیلوگرم هیدروژن از طریق الکترولیز نیازمند تقریباً 9 کیلوگرم آب هستیم که این فرآیند تقریباً 8 کیلوگرم اکسیژن به عنوان محصول جانبی تولید می‌کند. (این اکسیژن در مقیاس کوچک می‌تواند در حوزه سلامت و در مقیاس بزرگ میتواند در صنعت استفاده شود). طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی²⁹ در سال 2019 مقدار 70 میلیون تن هیدروژن تولید شده است که اگر می‌خواستیم از طریق الکترولیز این مقدار را تولید کنیم تقریباً 617 میلیون مترمکعب آب نیازمند بودیم. تقریباً این مقدار دوبرابر مصرف آب برای تولید هیدروژن در همان سال است. چالش های دسترسی به آب شیرین و همچنین شیرین سازی آب دریا در مناطق ساحلی برای تولید هیدروژن از این روش نیز مشکل ساز خواهد بود ولی تحقیقات و پروژه ها در این زمینه ادامه دار می‌باشد.



شکل 11 نمودار سنکی تولید هیدروژن از روش الکترولیز

گزینه های فناوری برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیز

امروزه سه نوع سلول الکترولیز وجود دارد:

- الکترولیز قلیایی
- الکترولیز غشایی و تبادل پروتون (الکترولیز غشایی)
- الکترولیز اکسید جامد (الکترولیز اکسید جامد)

²⁸ Photovoltaic

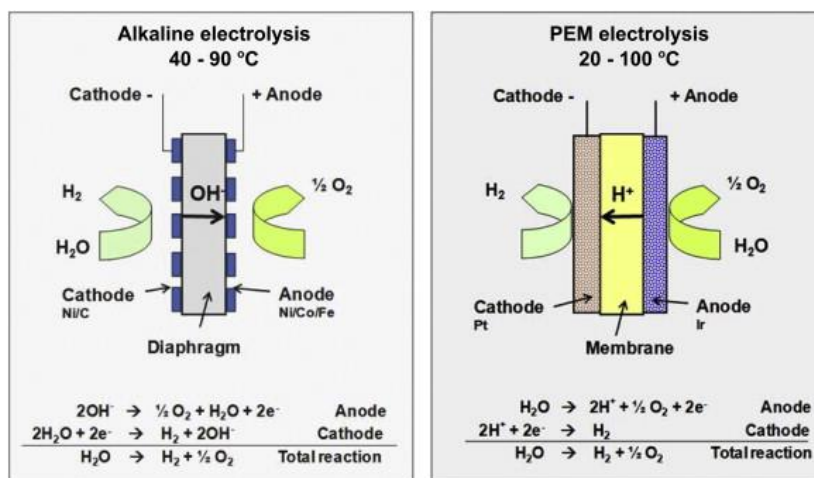
²⁹ International Energy Agency (IEA)

الکترولیز قلیایی^{۳۰}

الکترولیز قلیایی را میتوان قدیمی ترین نوع الکترولیز دانست که یک فناوری بالغ و تجاری است. این نوع روش برای تولید هیدروژن به ویژه برای صنایع کود و کلر استفاده می‌شود. طیف وسیعی از این نوع الکترولیز از نوع حداقل 10 درصد بار تا ظرفیت کامل طراحی می‌شوند. در قرن اخیر الکترولیز قلیایی حتی تا 165 مگاوات نیز در کشورهایی مانند کانادا و زیمبابوه طراحی و استفاده شده اند اگرچه تقریباً همه آنها پس از فناوری اصلاح بخار (اصلاح بخار متان) دیگر استفاده نشدند. الکترولیز قلیایی به دلیل نداشتن مواد گرانبها نیاز به هزینه سرمایه‌گذاری کمتری نسبت به بقیه روش های الکترولیز دارد.

الکترولیز غشایی^{۳۱}

سیستم های الکترولیز غشایی اولین بار در دهه 1960 در جنرال الکتریک با هدف غلبه بر برخی معایب عملیاتی الکترولیز قلیایی معرفی شدند. از مزایای این روش می‌توان کوچک بودن تجهیزات فنی در حجم، خلوص هیدروژن بالا، مصرف انرژی پایین، راندمان بالا، ایمنی بالای عملکرد و اینکه کل فرآیند بدون آلودگی طی می‌شود نام برد. این سیستم از آب خالص برای تولید هیدروژن استفاده می‌کند؛ در نتیجه از بازیابی و بازیافت پتاسیم هیدروکسید^{۳۲} خودداری می‌کند، که همین امر باعث جلوگیری از خوردگی می‌شود. این نوع الکترولیزها قادر به تولید هیدروژن فشرده برای تولید و ذخیره‌سازی غیرمتمرکز هستند (ایستگاه های سوخت رسانی فشار 30-60 بار بدون کمپرسور در مقایسه با فشار 1 تا 30 باری سیستم الکترولیز قلیایی مزیت بسیار بزرگ این روش می‌باشد). قابلیت انعطاف پذیری بالا در طراحی و تولید نیز یکی از مزایای این نوع سیستم ها به شمار می‌آید. از معایب سلول های الکترولیز غشایی میتوان عمر کوتاه تر نسبت به الکترولیز قلیایی، تجهیزات گران تر که به طور عمده دلیل آن گرانبها بودن کاتالیزور (که در اکثر کشورها از پلاتین استفاده می‌کنند) نام برد.



شکل 12 مقایسه نحوه کارکرد الکترولیز غشایی و قلیایی

³⁰ Alkaline Electrolysis

³¹ Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

³² Potassium Hydroxide (KOH)

الکترولیز غشایی	الکترولیز قلیایی
مزیت‌ها	
هیدروژن با چگالی بالا بازده‌ایی بالا ساختار ساده سیستم طراحی کوچک و فشرده	تکنولوژی ثابت شده عدم نیاز مندی به فلزات نجیب پایداری بلند مدت قابلیت ایجاد با توان بالا هزینه سرمایه‌گذاری کم
چالش‌ها:	
کم کردن هزینه ساخت افزایش پایداری بلند مدت ساخت با ظرفیت بالاتر	افزایش چگالی هیدروژن خروجی اندازه و پیچیدگی سیستم کم کردن نیاز به خالص‌سازی گاز

جدول 1 مقایسه الکترولیز غشایی و الکترولیز قلیایی

الکترولیز اکسید جامد^{۳۳}

الکترولیز اکسید جامد نسبت به دو فناوری دیگر کمتر توسعه پیدا کرده و هنوز تجاری سازی نشده است. اگر چه شرکت‌هایی به صورت خصوصی، قصد وارد کردن این فناوری را به بازار دارند. الکترولیز اکسید جامد از سرامیک به عنوان الکترولیت استفاده می‌کند و همین باعث کاهش قیمت مواد مصرفی می‌شود. این فناوری در دمای بالا و راندمان الکتریکی بالا کار می‌کند و بخاطر اینکه از بخار برای الکترولیز استفاده می‌کنند نیاز به یک منبع حرارتی دارند.

اگر بتوانیم این هیدروژن را برای تولید سوخت‌های مصنوعی استفاده کنیم (مانند فرآیند فیشر-تروپش) از پسماند حرارتی ناشی از تولید سوخت مصنوعی، می‌توان برای تهیه بخار مورد نیاز فرآیند الکترولیز اکسید جامد استفاده کرد. همچنین می‌توان از منابع گرمایی تجدیدپذیر مانند: انرژی زمین گرمایی، انرژی خورشیدی و انرژی هسته‌ای بعنوان منبع حرارتی این فناوری استفاده کرد. برخلاف فناوری‌های الکترولیز غشایی و الکترولیز قلیایی، الکترولیز اکسید جامد توانایی معکوس کردن فرآیند را نیز دارد، یعنی می‌توان هیدروژن را از طریق این سلول به برق تبدیل کرد و از این فناوری برای بالانس کردن خدمات انرژی به شبکه از طریق یک سیستم ذخیره ساز هیدروژن استفاده کرد. چالش کلیدی الکترولیز اکسید جامد، تخریب مواد بخاطر دمای کاری بالا است، که هنوز محققان این حوزه در پی راهی برای برطرف کردن آن هستند.

³³ Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC)

	Alkaline electrolyser			PEM electrolyser			SOEC electrolyser		
	Today	2030	Long term	Today	2030	Long-term	Today	2030	Long term
Electrical efficiency (% LHV)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
Operating pressure (bar)	1-30			30-80			1		
Operating temperature (°C)	60-80			50-80			650 - 1 000		
Stack lifetime (operating hours)	60 000 - 90 000	90 000 - 100 000	100 000 - 150 000	30 000 - 90 000	60 000 - 90 000	100 000 - 150 000	10 000 - 30 000	40 000 - 60 000	75 000 - 100 000
Load range (% relative to nominal load)	10-110			0-160			20-100		
Plant footprint (m ² /kW _e)	0.095			0.048					

جدول 2 خصوصیات های فنی-اقتصادی انواع روش های الکترولیز

هزینه تولید هیدروژن از برق و آب (الکترولیز)

در محاسبه هزینه تولید هیدروژن از طریق فناوری الکترولیز چند عامل فنی و اقتصادی بسیار مهم است که عبارتند از:

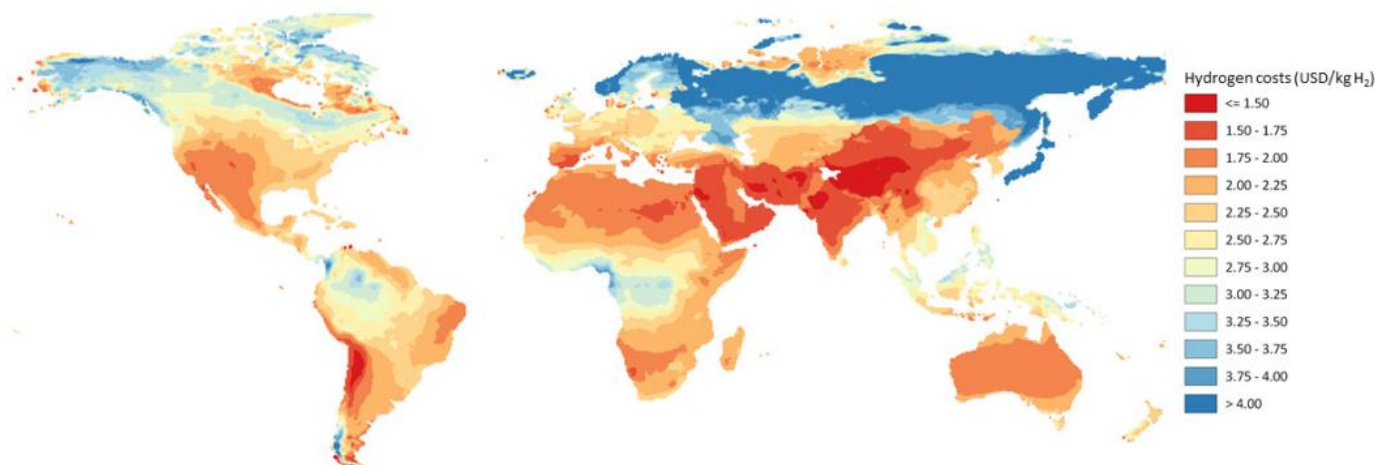
1. هزینه های سرمایه ای (هزینه های سرمایه ای)
2. راندمان تبدیل
3. ساعت کاری سیستم
4. هزینه برق

همانطور که ساعت کار الکترولیز افزایش می یابد، تاثیر هزینه های سرمایه ای کاهش می یابد و تاثیر هزینه های برق افزایش می یابد. تولید برق اختصاصی از منابع تجدید پذیر یا انرژی هسته ای روش جایگزینی به جای استفاده از برق شبکه می باشد. با کاهش هزینه های برق خورشیدی و برق بادی، ساخت الکترولیزور ها در مکان هایی که شرایط مناسبی از جهت منابع تجدید پذیر دارند میتواند گزینه مناسبی برای تولید هیدروژن ارزان باشد.

طبق شکل 13 مناطق دارای پتانسیل تولید هیدروژن از طریق ترکیب سیستم برق خورشیدی فتوولتاییک و برق بادی مستقر در خشکی را در سال 2030 دارند عبارت اند از: نیوزلند، شمال آفریقا، خاورمیانه، بخشی از چین و تقریباً تمام قاره استرالیا. پروژه های زیادی برای کاهش هزینه تولید هیدروژن طی این ترکیب در حال آماده سازی یا معرفی شده اند.

در شکل 13 مقادیر به این صورت لحاظ شده است:

- ✓ هزینه سرمایه ای برای الکترولیزر: 450 دلار برای هر 1 کیلووات انرژی برق ورودی
- ✓ بازده برحسب ارزش حرارتی پایین: 74 درصد
- ✓ هزینه سرمایه ای برای برق خورشیدی PV: 400-1000 دلار برای هر کیلووات
- ✓ هزینه سرمایه ای برای برق بادی در خشکی: 2500-900 دلار برای هر کیلووات
- ✓ نرخ تنزیل^{۳۴}: 8 درصد



شکل 13 هزینه تولید هیدروژن از روش هیبرید سیستم فتوولتائیک و سیستم بادی

تولید هیدروژن از زغال سنگ

تولید هیدروژن از زغال سنگ گازی، یک فناوری جا افتاده است که چندین دهه در صنایع شیمیایی و تولید کود برای تولید آمونیاک استفاده می‌شود. در سراسر جهان حدود 130 نیروگاه گازی زغال سنگ فعال هستند که بیش از 80 درصد آنها در کشور چین وجود دارند. تولید یک تن هیدروژن از گاز زغال سنگ^{۳۵} باعث تولید 19 تن دی‌اکسیدکربن می‌شود؛ تقریباً دوبرابر گاز طبیعی.

گزینه‌های فناوری برای تولید هیدروژن کم کربن از زغال سنگ

اگر بخواهیم تولید هیدروژن از زغال سنگ را در آینده هیدروژن ببینیم، به دلیل تولید آلاینده بالا فقط همراه با بخش جاذب و ذخیره ساز کربن قابل اجرا خواهد بود.

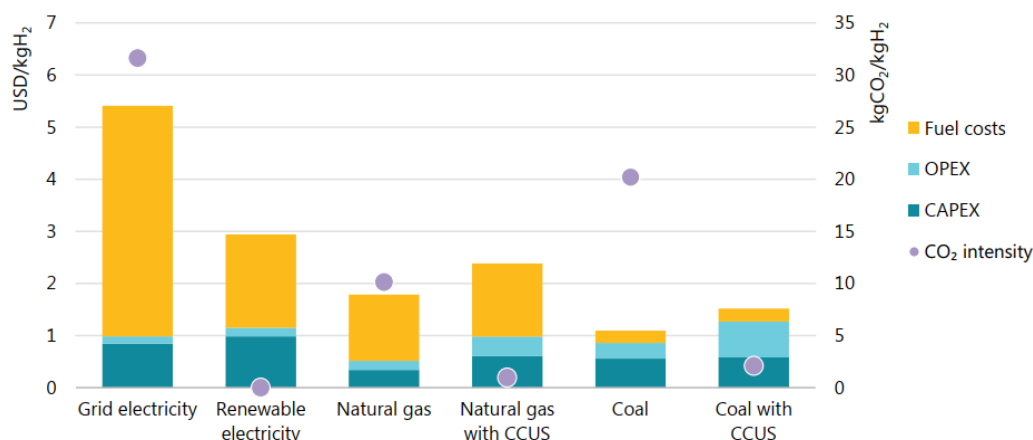
هزینه تولید هیدروژن از زغال سنگ

هزینه سرمایه ای تقریباً 50 درصد کل هزینه تولید هیدروژن از زغال سنگ و سوخت 10 الی 15 درصد را شامل می‌شود. در دسترس بودن و هزینه زغال سنگ نقش مهمی را در پروژه های تولید هیدروژن از زغال سنگ

³⁴ Discount Rate

³⁵ Coal Gas

تعیین می‌کند. در نمودار 2 هزینه تولید هیدروژن از هر روش را در کشور چین نشان می‌دهد. به علت پایین بودن هزینه تولید هیدروژن از زغال سنگ، این کشور سهم بیشتر تولید خود را از این روش تامین می‌کند.



نمودار 2 هزینه تولید هیدروژن در کشور چین

کاهش انتشار کربن ناشی از تولید هیدروژن با زغال سنگ یک عامل حیاتی برای این روش می‌باشد. افزودن جاذب دی‌اکسید کربن و ذخیره‌سازی آن به این روش، باعث افزایش 5 درصدی هزینه سوخت و افزایش 130 درصدی هزینه های سرمایه ای می‌شود. با توجه به این هزینه ها، تولید هیدروژن پاک تر از زغال سنگ به نظر به صرفه نخواهد آمد.

تولید هیدروژن از زیست توده:

هیدروژن از زیست توده به روش های مختلفی می‌تواند تولید شود. در فرآیند های بیوشیمی، میکروارگانیسم^{۳۶} ها با انجام کار روی مواد آلی تولید گاز زیستی می‌کنند. (که به این فرآیند هضم بی‌هوازی^{۳۷} نیز می‌گویند). زیست توده تولید شده توسط تبدیل گازی ترموشیمی (مانند زغال سنگ که به گاز زغال سنگ تبدیل می‌شود) در این مرحله به متان، دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن و هیدروژن تبدیل خواهد شد. البته این تکنولوژی به طور کامل گسترش نیافته است و طی این فرآیند ممکن است کاتالیست مسموم شود و فرآیند تولید هیدروژن انجام نشود. هنوز این مشکل به طور کامل حل نشده است.

تبدیل هیدروژن به آمونیاک:

آمونیاک که ترکیبی از هیدروژن و نیتروژن است هنگام سوختن دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کند و در دما و فشار معمولی به صورت گاز موجود است ولی با سرد کردن آن تا دمای 33- درجه سلسیوس به حالت به مایع درمی‌آید که رسیدن به چنین دمایی آنچنان دشوار نیست. آمونیاک مایع 50 درصد چگالی انرژی بیشتری نسبت به هیدروژن دارد.

³⁶ Microorganisms

³⁷ Anaerobic digestion

از 170 سال پیش از آمونیاک به عنوان مبرد، همچنین به عنوان ماده اولیه برای کود های نیتروژن دار و مواد منفجره طی یک قرن استفاده شده. آمونیاک می تواند به عنوان سوخت برای تامین انرژی استفاده شود (به عنوان مثال برای احتراق مشترک در نیروگاه های زغال سنگ). اما هیچ یک از این کاربردها به صورت تجاری مورد استفاده قرار نمی گیرند. آمونیاک یک نوع گاز سمی است، یعنی نیاز به رسیدگی و محدود سازی دارد. این عیب باعث می شود که پتانسیل فنی - اقتصادی آن را محدود سازد. اکنون پروژه های جدیدی برای تولید آمونیاک از انرژی های تجدیدپذیر در حال احداث می باشد. برای مثال یک کارخانه تولید آمونیاک با ظرفیت تولید 50 تن آمونیاک در روز و الکترولیزی با ورودی 30 مگاوات برق در پورت لینکلن³⁸ در جنوب استرالیا در حال ساخت می باشد.

تجزیه متان توسط اصلاح پلاسما

تجزیه متان همواره یک راه جدید بالقوه برای تولید هیدروژن از گاز طبیعی به ما ارائه می دهد. اصلاح پلاسما به عنوان یک فناوری جدید از سال 1990 توسعه یافته است. این اصلاح از متان به عنوان ماده اولیه و الکتروسیته به عنوان منبع انرژی استفاده می کند و محصولات آن هیدروژن و کربن جامد است و هیچ گونه انتشار دی اکسید کربن را به همراه ندارد. تجزیه متان نیازمند به پلاسما با دمای حرارتی بسیار بالا است که اینکار تلفات حرارتی را کاهش می دهد. این روش نیازمند 3 تا 5 برابر از روش الکترولیز برق کمتر مصرف می کند و گاز طبیعی بیشتری را مصرف می کند ولی از طرفی فروش محصول جانبی یعنی کربن جامد می تواند درآمد بیشتری را تولید کند. (کربن جامد یا کربن سیاه را برای مثال میتوان به لاستیک خودرو تبدیل کرد).

شرکت آمریکایی مانولیت متریالز³⁹ که دارای یک کارخانه آزمایشی تجزیه متان است در حال ساخت یک کارخانه تولید هیدروژن کم کربن در نبرسکا⁴⁰ است که قصد دارد هیدروژن تولیدی را به نیروگاه محلی نبرسکا با ظرفیت تولید 125 مگاوات برق به فروش برساند. این نیروگاه در حال حاضر با زغال سنگ کار می کند ولی سوخت هیدروژن به آن مزیت تولید کربن صفر را خواهد داد. اگر گاز مصرف شده برای تولید هیدروژن به طور مستقیم در نیروگاه استفاده می شد؛ بازده بالاتر می رفت. ولی از انتشار آلودگی آن نمی توان جلوگیری کرد.

ذخیره سازی ، انتقال و توزیع هیدروژن [7]

ذخیره سازی هیدروژن

امروزه هیدروژن بیشتر بصورت گاز یا مایع در تانکرها برای مقیاس های کوچک ذخیره می شود؛ اما تحول هیدروژن و وارد شدن آن به مقیاس های بزرگتر و بالا رفتن ارزش هیدروژن در آینده، نیاز به گزینه های بیشتری برای ذخیره سازی حس می شود. به عنوان مثال در پایانه های صادرات، ذخیره سازی هیدروژن ممکن است برای مدت کوتاهی قبل از حمل و نقل مورد نیاز باشد. ساعت ها ذخیره سازی هیدروژن در ایستگاه های سوخت گیری خودرو مورد نیاز است، مدت زمان های بسیار بیشتری برای ذخیره سازی نیاز است اگر که هیدروژن به عنوان سوخت کمکی در نیروگاه ها برای

³⁸ Port Lincoln

³⁹ Monolith Materials

⁴⁰ Nebraska

زمانی که تقاضا برق بالا می‌رود، بکار گرفته شود. مناسب‌ترین محیط ذخیره‌سازی به عواملی مانند: حجم ذخیره سازی، مدت زمان ذخیره‌سازی، سرعت مورد نیاز تخلیه و در دسترس بودن جغرافیایی گزینه‌های مختلف بستگی دارد. اما به طور کلی، ذخیره سازی طبیعی^{۴۱} بهترین راه‌حل برای ذخیره برای مدت زمان طولانی و در مقیاس بالا است؛ در حالی که مخازن برای ذخیره سازی کوتاه مدت و در مقیاس کوچک مناسب هستند.

ذخیره‌سازی طبیعی

غارهای نمکی^{۴۲}، مخازن و سفره‌های زیر زمینی گاز طبیعی یا نفت تخلیه شده، همه گزینه‌های ممکن برای ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس بزرگ و طولانی مدت هستند [8]. در حال حاضر از آنها برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی استفاده می‌شود و کاملاً از نظر اقتصادی بصره می‌باشند. پس احتمالاً آنها کم‌هزینه‌ترین گزینه موجود برای ذخیره سازی هیدروژن، حتی با توجه به اینکه هیدروژن چگالی انرژی پایینی در مقایسه با گاز طبیعی دارد، می‌باشند.

غارهای نمکی برای ذخیره سازی هیدروژن با جداکننده شیمیایی در انگلیس از سال 1970 و در آمریکا از سال 1980 استفاده می‌شوند. به طور هزینه این روش کمتر از 0.6 دلار بر هر کیلوگرم هیدروژن است و بازدهایی برابر با 98 درصد دارد [9]. فشار بالا آنها باعث بهره‌مندی از ضریب تخلیه بالا می‌شود و در نتیجه آنها را برای کاربردهای صنعتی و نیروگاه‌ها جذاب می‌کند. از آنجایی که ذخیره‌سازی در غارهای نمکی به عنوان مجموعه ایی از غارها در مخاورت هم کار می‌کنند؛ میتوان با افزایش مصرف هیدروژن به صورت یک به یک تاسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی را یک به یک به هیدروژن تبدیل کرد و هزینه‌های اولیه را کاهش داد.

مخازن تخلیه شده نفت و گاز معمولاً بزرگ‌تر از غارهای نمکی هستند، اما در عوض نفوذپذیری بیشتری دارند و حاوی آلاینده‌هایی هستند که باید این آلاینده‌ها از هیدروژن، قبل از استفاده حذف شوند. سفره‌های آب زیرزمینی در بین سه گزینه موجود برای ذخیره‌سازی طبیعی کمترین بلوغ را دارند؛ اما شواهد مختلفی برای مناسب بودن آنها موجود دارد (البته از آنها سال‌ها پیش برای ذخیره سازی گاز شهر با 50 تا 60 درصد هیدروژن استفاده می‌شده است). اما از آنجایی که قبلاً برای استفاده تجاری با هیدروژن خالص مورد بررسی قرار نگرفته‌اند؛ بسیاری از سفره‌های آب نیز متحمل هزینه‌های اکتشاف و توسعه خواهند شد. مانند نفت و گاز، موانع طبیعی قریب به اتفاق هیدروژن را در اعماق زمین به دام می‌اندازد. اما واکنش دادن با میکروارگانیسم‌ها، مایعات و صخره‌ها می‌تواند باعث هدررفت هیدروژن شود. اگر بتوان به چالش‌های آن غلبه کرد و قابل دوام و اطمینان بودن آنها در نبود غارهای نمکی ثابت شود؛ امکان سنجی و برآورد هزینه ذخیره‌سازی هیدروژن در مخازن و سفره‌های زیرزمینی ثابت شده است.

⁴¹ Geological storage

⁴² Salt caverns

اگرچه ذخیره‌سازی طبیعی بهترین چشم انداز را برای ذخیره‌سازی دراز مدت و مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد؛ اما توزیع جغرافیایی، اندازه بزرگ و حداقل فشار موردنیاز مخزن‌ها آنها را برای ذخیره‌سازی کوتاه مدت در مقیاس کوچک نامناسب می‌کند و برای این کاربردها، تانکرها امیدوار کننده ترین گزینه هستند.

تانک‌های ذخیره‌سازی هیدروژن

تانکرها هیدروژن را بصورت فشرده یا مایع و با ضریب تخلیه بالا و بازدهایی 99 درصد ذخیره می‌کنند. این قابلیت آنها را برای مقیاس کوچک که در آن انبار محلی سوخت یا ماده اولیه باید به راحتی در دسترس باشد، مناسب می‌کند. هیدروژن فشرده (در فشار 700 بار) تنها 15 درصد چگالی انرژی بنزین را دارد؛ بنابراین به فضایی هفت برابر فضای مورد نیاز برای بنزین در یک ایستگاه سوختگیری خودرو نیاز است.

آمونیاک چگالی انرژی بیشتری دارد و بنابراین نیاز به چنین مخازن بزرگی را کاهش می‌دهد، اما این مزایا باید با تلفات انرژی و تجهیزات تبدیل و باز تبدیل سنجیده شود، زمانی که در استفاده نهایی به هیدروژن خالص نیاز دارد.

تحقیقات در این زمینه برای پیدا کردن راه‌حل کاهش دادن اندازه مخازن و تانکرها ادامه دارد؛ که میتواند در مناطق با تراکم جمعیتی بسیار بالا کاربردی باشد. این موضوع شامل بررسی تانک‌های زیرزمینی که می‌توانند تا فشار 800 بار، هیدروژن را فشرده کنند؛ می‌شود. ذخیره‌سازی هیدروژن در مواد حالت جامد مانند هیدروژن‌های فلزی و شیمیایی در مراحل اولیه توسعه است؛ اما به طور بالقوه می‌تواند تراکم‌های بیشتری از هیدروژن را در فشار اتمسفر ذخیره کند.

انتقال و توزیع هیدروژن

چگالی کم هیدروژن نشان‌گر این است که انتقال آن در طول مسافت‌های طولانی می‌تواند بسیار گران باشد. با این وجود، تعدادی از گزینه‌های ممکن برای غلبه بر این مانع، از جمله فشرده‌سازی، مایع‌سازی یا ادغام هیدروژن در مولکول‌های بزرگ‌تر که می‌توانند با سهولت بیشتری به صورت مایع منتقل شوند، در دسترس هستند. در بسیاری از کشورها، شبکه خط لوله گاز طبیعی گسترده‌ای وجود دارد که می‌تواند برای انتقال و توزیع هیدروژن استفاده شود. همچنین می‌توان زیرساخت‌های جدیدی را توسعه داد، با خطوط لوله اختصاصی و شبکه‌های کشتیرانی که به طور بالقوه امکان حمل و نقل هیدروژن در مقیاس بزرگ را فراهم می‌کنند. هر یک از گزینه‌های ممکن دارای مزایا و معایب مختلفی است و ارزانتترین انتخاب بر اساس جغرافیا، مسافت، مقیاس و استفاده نهایی مورد نیاز هیدروژن متفاوت خواهد بود.

تزریق هیدروژن به شبکه‌های گاز طبیعی موجود

توسعه یک زنجیره ارزش هیدروژن جدید منوط به تکمیل موفقیت آمیز و اتصال زیرساخت‌های تولید، انتقال، توزیع، ذخیره‌سازی و استفاده نهایی است. این امر مستلزم سرمایه‌گذاری‌های بسیار است و اجرای آن می‌تواند چالش برانگیز باشد. در نتیجه تزریق هیدروژن به زیرساخت‌های گاز طبیعی موجود، از هزینه‌های

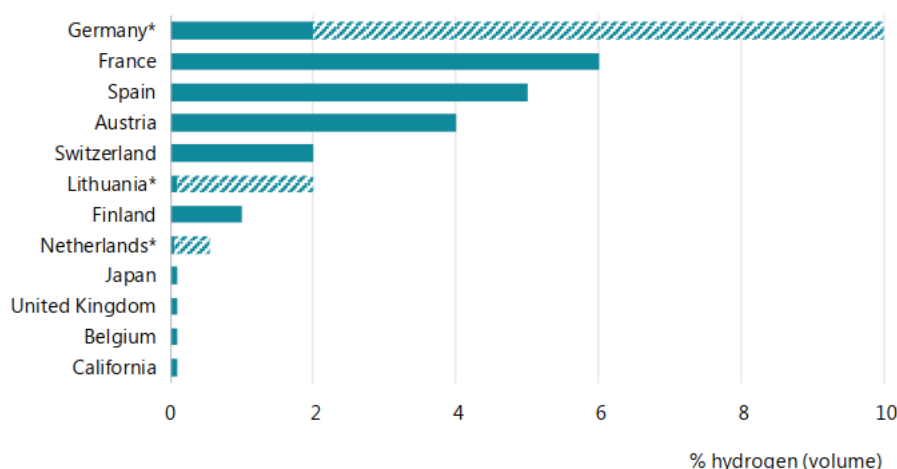
سرمایه‌ایی قابل توجه در توسعه زیرساخت‌های انتقال و توزیع جدید جلوگیری می‌کند. اما این موضوع زمانی توجیه دارد که هزینه گاز طبیعی رسیده به دست مصرف کننده نهایی در مقابل هیدروژن بالا باشد.

در حال حاضر حدود 3 میلیون کیلومتر خط لوله و تقریباً 400 میلیارد متر مکعب ظرفیت ذخیره سازی گاز طبیعی در سراسر جهان و همچنین یک زیرساخت ایجاد شده برای حمل و نقل بین المللی گاز طبیعی مایع⁴³ وجود دارد [10]. اگر بتوان از برخی از این زیرساخت ها برای حمل و نقل و استفاده از هیدروژن استفاده کرد، می تواند کمک بزرگی برای توسعه هیدروژن باشد.

با این حال، تزریق هیدروژن به شبکه‌های گاز موجود با تعدادی چالش مواجه است از جمله:

- 1- چگالی انرژی هیدروژن در حدود یک سوم گاز طبیعی است و بنابراین این ترکیب، محتوای انرژی گاز تحویلی را کاهش می دهد: یک ترکیب با هیدروژن 3 درصد در یک خط لوله انتقال گاز طبیعی، انرژی را که خط لوله انتقال می دهد تا حدود 2 درصد کاهش می دهد. [11]. در این صورت هر مصرف کننده به حجم بیشتری از گاز برای بدست آوردن انرژی مورد نیازش دارد.
- 2- هیدروژن سریع‌تر از گاز می‌سوزد. این امر خطر گسترش شعله را افزایش می دهد. شعله هیدروژنی نیز هنگام سوختن زیاد روشن نیست و آشکارسازهای شعله جدید احتمالاً برای نسبت‌های اختلاط بالا مورد نیاز خواهند بود.
- 3- تغییر در حجم هیدروژن مخلوط شده در جریان گاز طبیعی تاثیر نامطلوبی بر عملکرد تجهیزات طراحی شده برای گنجاندن محدوده محدودی از مخلوط‌های گازی خواهد داشت. همچنین این تغییر می‌تواند در کیفیت نهایی محصول بعضی از فرایندهای صنعتی اثرگذار باشد.

شکل 14 تعدادی از کشورهایی که هم‌اکنون از این روش به صورت محدود استفاده می‌کنند را نشان می‌دهد (قسمت هاشور خورده، در شرایط خاص است).



شکل 14 درصد اختلاط هیدروژن با گاز طبیعی به تفکیک کشورهای استفاده کننده از این روش

⁴³ LNG

زیرساخت جدید انتقال و توزیع هیدروژن

می توان تعدادی گزینه جدید برای انتقال هیدروژن از نقطه تولید به مصرف کنندگان نهایی ایجاد کرد. مانند گاز طبیعی، هیدروژن خالص را می توان قبل از انتقال به مایع تبدیل کرد تا چگالی آن افزایش یابد. با این حال، مایع سازی هیدروژن نیاز دارد که تا دمای منفی 253 درجه سانتیگراد خنک شود. اگر از خود هیدروژن برای تامین این انرژی استفاده شود، بین 25 تا 35 درصد از مقدار اولیه هیدروژن مصرف می شود (مطابق تکنولوژی های در حال حاضر) [12]. که بسیار بیشتر از انرژی مورد نیاز برای مایع سازی گاز طبیعی است (10 درصد گاز برای مایع سازی آن مصرف می شود).

یک امکان جایگزین، ترکیب هیدروژن در مولکول های بزرگ تر است که می توانند راحت تر به صورت مایع منتقل شوند. گزینه ها عبارتند از آمونیاک و مایع های حمل کننده هیدروژن⁴⁴. این کار باعث می شود که انتقال هیدروژن بسیار ساده تر شود؛ اما از آنها به عنوان ماده نهایی برای تولید انرژی نمی توان استفاده کرد و با اینکار دو گام تبدیل هیدروژن به آمونیاک و مایع های حمل کننده هیدروژن ها و بعد از انتقال، بازتبدیل آن به هیدروژن قبل از مصرف نهایی، نیاز است. (به جز آمونیاک در بعضی موارد که می توان به صورت نهایی از آن استفاده کرد). این فرایندها انرژی و هزینه ی اضافی ای را دربردارند که باید با هزینه پایین انتقال متعادل شود.

طبق بررسی آژانس بین المللی انرژی، انتقال هیدروژن به وسیله لوله تا 1500 کیلومتر ارزان ترین روش است و برای مسافت های طولانی تر آمونیاک و مایع های حمل کننده هیدروژن، توصیه می شود.

انتقال هیدروژن به مسافت های طولانی

انتقال انرژی، زمانی که انرژی سوخت شیمیایی باشد، راحت تر است نسبت به زمانی که انرژی، الکتریسته باشد. مواد شیمیایی از چگالی انرژی بالایی برخوردارند و در حین انتقال هدر رفت انرژی ایی ندارند. بیشتر نفت و گاز طبیعی با استفاده از لوله و کشتی ها به سراسر جهان در مقیاس بزرگ انتقال می یابد و از هر دو این گزینه ها می توان برای هیدروژن نیز استفاده کرد. حتی انتقال هیدروژن با قطار نیز می تواند برای بعضی مناطق سودمند باشد. هر چند که نسبت به انتقال با قطار هزینه بر تر است.

خطوط لوله

امروزه حدود 5000 کیلومتر خط لوله هیدروژن، در مقایسه با 3 میلیون کیلومتر خط لوله گاز، در سراسر جهان قرار دارد. خطوط لوله هیدروژن موجود، بیشتر برای تحویل هیدروژن به کارخانه های شیمیایی استفاده می شوند. آمریکا 2600 کیلومتر، بلژیک 600 کیلومتر و آلمان حدود 400 کیلومتر خط لوله هیدروژن دارد [13].

⁴⁴ Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs)

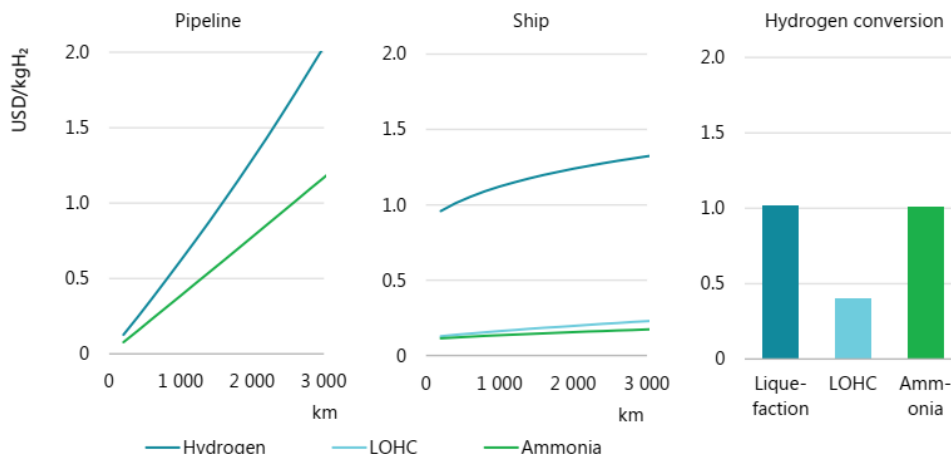
خطوط لوله هزینه‌های جاری کمی دارند و عمر آنها حدود 40 تا 80 سال است. دو اشکال اصلی آنها هزینه‌های بالای سرمایه و نیاز به کسب حق تقدم است. این بدان معناست که اگر بخواهد خط لوله جدیدی تاسیس شود؛ اطمینان از تقاضای هیدروژن در آینده و حمایت دولت ضروری است. مطالعات اخیر در هلند نشان داده است که از شبکه گاز طبیعی موجود با تغییرات کمی می‌توان برای انتقال هیدروژن استفاده کرد [14]. چالش اصلی این است که اینبار به حجم بیشتری از گاز برای رسیدن به همان مقدار انرژی ایی که از گاز طبیعی دریافت می‌شود، نیاز است؛ از این رو افزایش حجم ذخیره‌سازی و انتقال برای خطوط لوله گاز موجود نیاز است. آمونیاک نیز با خطوط لوله قابل انتقال است. و حتی تاسیس خطوط لوله برای آمونیاک از خطوط لوله با هیدروژن خالص ارزان‌تر است. انتقال مایع‌های حمل‌کننده هیدروژن از طریق لوله بسیار به انتقال نفت و گازوئیل شباهت دارد؛ اما نیاز است که مایع حمل‌کننده بعد از تحویل هیدروژن، دوباره به محل اولیه برای بارگیری مجدد باز گردد (با کامیون‌ها یا خطوط لوله موازی). که باعث می‌شود این روش را برای انتقال گران-قیمت و پیچیده کند.

حمل با کشتی

واردات هیدروژن زمینه متنوع سازی سبد وارداتی انرژی کشورها را فراهم می‌کند و یکی از نتایج آن علاقه قابل توجه استفاده از کشتی‌ها برای انتقال هیدروژن است. در حال حاضر کشتی ایی وجود ندارد که بتواند هیدروژن خالص را حمل کند. چنین کشتی‌هایی تقریباً شبیه کشتی‌های حمل گاز مایع هستند و نیاز دارند که هیدروژن قبل از حمل و نقل مایع شود. در حالی که هر دو کشتی‌ها و فرآیند مایع سازی هزینه‌های قابل توجه‌ای را به دنبال دارند، تعدادی از پروژه‌ها به طور فعال به دنبال توسعه کشتی‌های مناسب هستند. انتظار می‌رود که این کشتی‌ها از هیدروژنی که خود حمل می‌کنند به عنوان سوخت در طول سفر استفاده کنند. و کشتی‌ها باید از مقصد خالی برگردند مگر اینکه مایعی با ارزش بالا را بتوان در جهت مخالف همان کشتی حمل کرد.

در میان حامل‌های هیدروژن، توسعه یافته‌ترین آن‌ها از نظر انتقال بین قاره‌ای، آمونیاک متکی بر تانکرهای یخچالی و نیمه یخچالی گاز مایع، است. مایع‌های حمل‌کننده هیدروژن احتمالاً ساده‌ترین روش حمل هیدروژن برای انتقال با کشتی هستند. زیرا می‌توان از تانکرهای نفت برای حمل آن‌ها استفاده کرد اگرچه هزینه تبدیل هیدروژن و بازتبدیل آن در مقصد نیز باید در نظر گرفته شود و همچنین کشتی‌ها در صورت استفاده از مایع‌های حمل‌کننده هیدروژن، باید برای بازگرداندن مایع به مبدا بازگردند.

در تمام موارد، زنجیره‌های تامین حمل و نقل با کشتی نیازمند زیرساخت‌های لازم از جمله مخازن ذخیره‌سازی، کارخانه‌های مایع‌سازی و گازی‌سازی مجدد، و کارخانه‌های تبدیل و تبدیل مجدد هستند که در پایانه‌های بارگیری و دریافت در صورت لزوم ساخته شوند (نمودار 3).



نمودار 3 هزینه تمام شده انتقال هیدروژن با استفاده از خطوط لوله و کستی به تفکیک روش تبدیل هیدروژن

توزیع محلی هیدروژن

زمانی که هیدروژن به پایانه‌های واردات یا مراکز انتقال رسید؛ توزیع محلی آن برای رسیدن هیدروژن به مصرف کننده نهایی ضروری است. همانند انتقال، بهترین گزینه برای انجام این کار، آمونیاک و مایع‌های حمل کننده هیدروژن هستند که استفاده از آن‌ها به حجم، فاصله و نیازهای کاربر نهایی بستگی دارد.

کامیون‌ها برای توزیع محلی

امروزه هیدروژن برای مسافت‌های کمتر از 300 کیلومتر بیشتر با کامیون‌های حمل گاز فشرده جابجا می‌شود. در جاهایی که تقاضای قابل اعتمادی وجود دارد و هزینه‌های مایع سازی را می توان با هزینه های کمتر واحد حمل و نقل هیدروژن جبران کرد، اغلب به جای کامیون‌های گاز فشرده از کامیون هایی با تانکر هیدروژن مایع استفاده می شود. در هر دو روش از لوله‌هایی که روی تریلرها قرار دارند بارگذاری می‌شوند. از کامیون‌ها می‌توان برای توزیع آمونیاک یا مایع‌های حمل هیدروژن هم به روشی تقریباً مشابه استفاده کرد.

در تئوری، یک تریلر گاز فشرده می‌تواند تا 1100 کیلوگرم هیدروژن را در سیلندرهای کامپوزیتی سبک نگه دارد (در فشار 500 بار). این مقدار هم‌اکنون در عمل نیز بدست آمده است اما مقررات وضع شده در سراسر جهان فشار، ارتفاع، عرض و وزن تریلرهای حمل هیدروژن را محدود می‌کنند. به عنوان مثال در ایالات متحده، محدودیت فشار برای تریلر حداکثر 280 کیلوگرم هیدروژن است (اگر چه وزارت حمل و نقل ایالات متحده اخیراً ساخت و استفاده از مخازن با فشار بالاتر را تایید کرده است).

کامیون‌های برودتی بسیار عایق⁴⁵ می‌توانند تا 4000 کیلوگرم هیدروژن مایع را حمل کنند و امروزه معمولاً برای سفرهای طولانی تا 4000 کیلوگرم استفاده می‌شوند. این کامیون ها برای حمل و نقل بالاتر از این فاصله مناسب نیستند زیرا هیدروژن گرم می شود و باعث افزایش فشار می شود.

⁴⁵ Highly insulated cryogenic tanker trucks

حدود 5000 کیلوگرم هیدروژن به شکل آمونیاک یا 1700 کیلوگرم به شکل مایع حمل کننده هیدروژن می تواند در یک تانکر جاده ای⁴⁶ جابجا شود. در مورد مایع های حمل کننده هیدروژن، کامیون بعد از تحویل بار باید برای برگرداندن مایع حامل به مبدا، بازگردد.

خطوط لوله برای توزیع محلی

بسیاری از لوله های مدرن توزیع گاز کم فشار از پلی اتیلن یا پلیمر تقویت شده با الیاف ساخته شده اند و به طور کلی برای انتقال هیدروژن با برخی ارتفاع های جزئی مناسب هستند. در بریتانیا تقریباً کل شبکه لوله های توزیع که حدود 14 برابر طول شبکه انتقال گاز این کشور است، به عنوان بخشی از برنامه ارتقاء زیرساخت گاز با لوله های پلاستیکی در حال جایگزینی است. خطوط لوله توزیع جدید اختصاصی هیدروژن می تواند هزینه سرمایه قابل توجهی دربر داشته باشد، به ویژه در مقیاس مورد نیاز برای تامین هیدروژن برای گرمایش ساختمان ها.

توزیع آمونیاک توسط لوله در فواصل طولانی هزینه کمتری خواهد داشت، اما با توجه به هزینه های تبدیل آمونیاک به هیدروژن قبل از استفاده، تنها در صورتی جذاب خواهد بود که تقاضای زیادی برای آمونیاک وجود داشته باشد. همانند انتقال، توزیع مایع های حمل کننده هیدروژن توسط خط لوله با توجه به نیاز به بازگشت مولکول های حامل به محل مبدا خود در پایان فرآیند، احتمالاً غیرعملی است.

کاربردهای صنعتی فعلی و بالقوه هیدروژن[7]

بیشتر هیدروژن امروزه در سه بخش از صنعت استفاده می شوند: پالایشگاه نفت، تولید مواد شیمیایی و فولاد. تولید هیدروژن برای رفع نیاز این بخش ها در فاز تجاری است و تقریباً به صورت کامل از گاز طبیعی، زغال سنگ و نفت ک تأثیرات منفی بر روی محیط زیست دارند تامین می شود. با این حال، فناوری هایی برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از استفاده از سوخت فسیلی برای تولید و تامین هیدروژن کم کربن در دسترس هستند و در برخی موارد این جایگزین ها در جایی که سیاست گذار حمایت می کند، استفاده می شوند. در ادامه به تقاضا هیدروژن در بخش های پالایشگاه نفت، تولید مواد شیمیایی و صنعت فولاد بررسی شده و بازارهای احتمالی آینده هیدروژن در صنعت مورد بحث قرار گرفته است.

هیدروژن در پالایشگاه نفت

پالایش نفت (تبدیل نفت به مواد مفید برای مصرف نهایی مثل بنزین) یکی از بزرگترین مصرف کننده های حال حاضر هیدروژن است (در حدود 38 میلیون تن هیدروژن بر سال یا 33 درصد از کل تقاضا جهانی هیدروژن). که به عنوان خوراک و منبع انرژی توسط پالایشگاه ها مصرف می شود. حدود دو سوم این هیدروژن در تاسیسات اختصاصی در پالایشگاه ها تولید می شود یا از تامین کنندگان خارجی تهیه می شود. هیدروژن در این پالایشگاه ها مسئول انتشار سالیانه 230 میلیون تن دی اکسید کربن است. تقاضای موجود در مقیاس بزرگ پالایشگاه ها برای هیدروژن با تشدید مقررات

⁴⁶ Road tanker

مربوط به محتوای گوگرد فرآورده های نفتی افزایش می یابد، که این موضوع یک بازار اولیه بالقوه برای هیدروژن از روش های پاک تر فراهم می کند، که می تواند شدت انتشار آلاینده ها را کاهش دهد.

چرا امروزه پالایشگاه ها از هیدروژن استفاده می کنند؟

تصفیه هیدروژنی^{۴۷} و هیدروکراکینگ^{۴۸} فرآیندهای اصلی مصرف کننده هیدروژن در پالایشگاه ها هستند. تصفیه هیدروژنی برای حذف ناخالصی ها، به ویژه گوگرد (اغلب به سادگی به عنوان گوگرد زدایی^{۴۹} از آن یاد می شود) استفاده می شود و سهم بزرگی از مصرف هیدروژن پالایشگاهی در سطح جهان را به خود اختصاص می دهد. امروزه، با توجه به افزایش نگرانی ها در مورد کیفیت هوا، فشار نظارتی رو به رشدی برای کاهش بیشتر محتوای گوگرد در محصولات نهایی پالایشگاه ها وجود دارد. از این رو، پالایشگاه ها حدود 70 درصد گوگرد طبیعی را از نفت خام با استفاده از این روش حذف می کنند به عنوان مثال در سال 2020، علیرغم رشد مداوم تقاضا، 40 درصد گوگرد کمتر در محصولات تصفیه شده نسبت به سال 2005 مجاز است.

هیدروکراکینگ فرآیندی است که از هیدروژن برای ارتقاء نفت های باقیمانده سنگین به محصولات نفتی با ارزش بالاتر استفاده می کند. تقاضا برای محصولات تقطیر سبک و متوسط رو به رشد است و تقاضا برای نفت سنگین باقی مانده در حال کاهش است، از این رو استفاده از هیدروکراکینگ افزایش یافته است. علاوه بر تصفیه هیدروژنی و هیدروکراکینگ، مقداری از هیدروژنی که توسط پالایشگاه ها استفاده یا تولید می شود، از نظر اقتصادی قابل بهره وری نیست و از طریق مخلوط شدن با گازهای زائد دیگر به عنوان سوخت سوزانده می شود.

ایالات متحده، چین و اروپا بزرگترین مشتری هیدروژن برای صنعت پالایش نفت می باشند. این سه منطقه حدود نیمی از کل مصرف هیدروژن پالایشگاهی را شامل می شوند که نشان دهنده حجم نفت خامی که به این مناطق وارد می شود و سخت گیری استانداردهای کیفیت محصول آنها است.

هیدروژن همچنین برای ارتقاء شن های نفتی^{۵۰} و تصفیه سوخت های زیستی استفاده می شود. برای شن های نفتی، مقدار هیدروژن مورد نیاز برای حذف گوگرد از قیر آسفالت^{۵۱}، بسته به فناوری ارتقاء و کیفیت نفت خام مصنوعی^{۵۲} تولید شده، به طور قابل توجهی متفاوت است. به طور کلی حدود 10 کیلوگرم هیدروژن برای هر تن قیر فرآوری شده استفاده می شود. نفت خام مصنوعی حاصل، هنوز باید در یک پالایشگاه با استفاده از هیدروژن پالایش شود. برای سوخت های زیستی، تصفیه هیدروژنی، اکسیژن را حذف می کند و با افزایش کیفیت سوخت روغن های گیاهی و چربی های حیوانی فرآوری شده، آنها را به جایگزین های دیزل تبدیل می کند.

⁴⁷ Hydro-treatment

⁴⁸ Hydro-cracking

⁴⁹ Desulphurisation

⁵⁰ Oil Sands

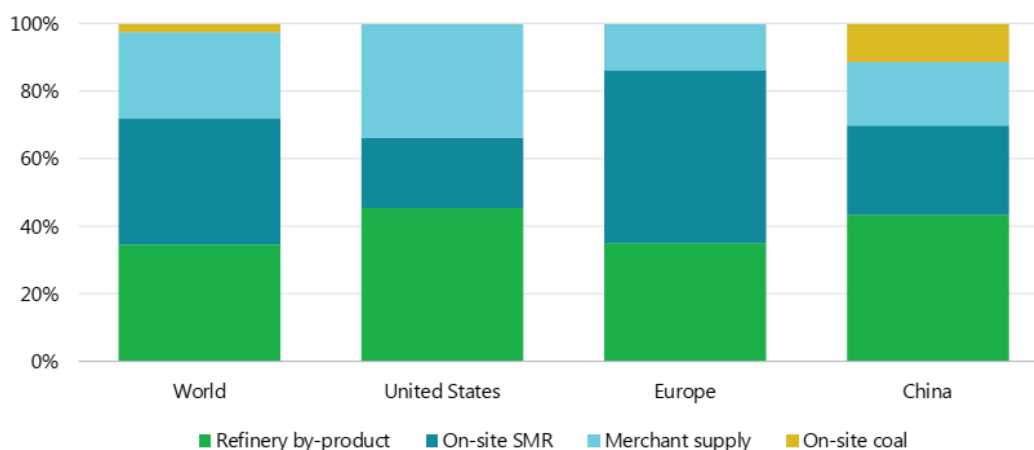
⁵¹ Raw Bitumen

⁵² Synthetic crude

این فرآیند به حدود 38 کیلوگرم هیدروژن به ازای هر تن بیودیزل تولید شده نیاز دارد، اما در مراحل بعدی پالایش به هیدروژن بیشتری نیاز نیست.

منابع و قیمت هیدروژن برای استفاده در پالایشگاه‌ها

در سطح جهانی، تقاضای هیدروژن پالایشگاه از طریق استفاده از محصولات جانبی در محل^{۵۳}، تولید اختصاصی در محل، یا عرضه تجاری تامین می‌شود. هیدروژن به عنوان محصول محصول جانبی در محل، عمدتاً از اصلاح پالایشی نفتا به دست می‌آید، فرآیندی که اجزای ترکیبی بنزین با اکتان بالا و همزمان هیدروژن تولید می‌کند. پالایشگاه‌هایی با عملیات یکپارچه پتروشیمی نیز هیدروژن را به عنوان محصول جانبی از کراکینگ بخار استخراج می‌کنند. با این حال، تولید هیدروژن به عنوان محصول جانبی در محل قادر به پوشش کامل نیاز هیدروژن پالایشگاه نیست، مگر در پالایشگاه‌های کوچکی که با نفت خامی با گوگرد بسیار کم کار می‌کنند. به طور متوسط، هیدروژن محصول جانبی تولید در محل یک سوم نیاز هیدروژن پالایشگاه را برآورده می‌کند. این اختلاف نیاز هیدروژن، یا با تولید اختصاصی در محل (حدود 40٪ در سطح جهانی) یا خرید از تامین کنندگان تجاری (حدود یک چهارم) باید برآورده شود.



نمودار 4 روش های تامین تقاضا هیدروژن در مناطق مختلف

بیشتر تولیدات اختصاصی در محل از خوراک گاز طبیعی استفاده می‌کنند، اما بخش‌های سبک تقطیر نفت و مواد اولیه سنگین‌تر کک نفتی و زغال سنگ نیز در برخی مناطق استفاده می‌شوند. استفاده از مواد اولیه سنگین‌تر عمدتاً به هند و چین محدود می‌شود، جایی که گاز نیاز به واردات دارد. تولید گاز از زغال سنگ^{۵۴} به طور معمول در تاسیسات پالایشگاهی جدید در چین به عنوان واحد اصلی یا کمکی تولید هیدروژن گنجانده می‌شود.

⁵³ On-site by-Products

⁵⁴ Coal gasification

تامین هیدروژن توسط واردات یک گزینه در مناطق صنعتی متراکم است که زیرساخت های توسعه یافته خط لوله هیدروژن وجود دارد، مانند سواحل خلیج آمریکا. همانند تولید اختصاصی در محل، هیدروژن تجاری بیشتر به وسیله گاز طبیعی تولید می شود، اگرچه مقدار مشخصی نیز به عنوان محصول جانبی در عملیات هایی مانند کراکینگ بخار و تولید کلر است. در مناطقی مانند ساحل خلیج آمریکا، هیدروژن تجاری می تواند بیش از یک سوم کل تقاضای هیدروژن را تامین کند. هزینه های تولید هیدروژن به طور گسترده ای متناسب با قیمت گاز طبیعی هر منطقه، متفاوت است. هزینه تولید هیدروژن در آمریکا، در میان کمترین هزینه های تولید هیدروژن در جهان و از آسیا و اروپا به طور قابل توجهی کمتر است (با قیمت 1.1 دلار بر هر کیلوگرم هیدروژن).

پتانسیل برای تقاضای آینده هیدروژن در پالایش نفت

در دهه های اخیر، تقاضای هیدروژن برای پالایشگاه ها به دلیل افزایش فعالیت های پالایشی و افزایش نیاز به تصفیه هیدروژنی و هیدروکراکینگ به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این روند قرار است همچنان ادامه یابد زیرا استانداردهای سوخت در سطح جهانی، سطوح قابل قبول گوگرد را روز به روز کاهش می دهد. به عنوان مثال، بسیاری از کشورها، از جمله چین، قبلاً الزامات محتوای گوگرد در سوخت های حمل و نقل جاده ای مانند بنزین یا گازوئیل را به کمتر از 0.0015 درصد کاهش داده اند و به زودی سایر کشورها نیز به این استانداردها روی می آورند. سازمان بین المللی دریانوردی همچنین مقررات جدیدی برای سوخت های نفتی معرفی کرده است که میزان گوگرد سوخت های دریایی را در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۰.۵ درصد محدود کرد (طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی). و این احتمالاً منجر به افزایش قابل توجه نیاز به هیدروژن برای تولید سوخت دریایی می شود و حتی با توجه به اینکه تقاضای هیدروژن نیز تابعی از محتوای گوگرد ذاتی در نفت خام است و کیفیت متوسط عرضه نفت خام در سال های اخیر سبک تر و شیرین تر شده است (عمدتاً به دلیل افزایش تولید نفت آمریکا) و این احتمالاً نیاز به هیدروژن را تا حدودی تعدیل می کند و با در نظر گرفتن تمام این موارد طبق پیش بینی آژانس بین المللی انرژی تقاضا کلی هیدروژن در پالایشگاه ها با رشد 7 درصدی در سال 2030 به 41 میلیون تن هیدروژن در سال خواهد رسید.

فراتر از سال 2030، روندها و سیاست های کنونی نشان می دهد که سرعت رشد تقاضای هیدروژن کاهش می یابد، زیرا دامنه تشدید استانداردهای کیفیت محصول کاهش می یابد و تقاضای نفت برای سوخت های حمل و نقل تحت تأثیر ترکیبی از بهبود بازده و استفاده از الکتریسیته قرار می گیرد. پالایشگاه ها همچنین احتمالاً کارایی بازیافت هیدروژن از گازهای اتلافی پالایشگاه را افزایش می دهند و با این کار نیاز به تولید هیدروژن اضافی کاهش می یابد. همچنین بخاطر قرار داد پاریس و اهداف آن با تأثیر گرفتن از استفاده کمتر از نفت، تقاضا پالایشگاه ها برای هیدروژن کم خواهد شد.

برآوردن تقاضای هیدروژن در آینده در پالایش نفت و در عین حال کاهش انتشار

تولید هیدروژن (مگر اینکه به عنوان محصول جانبی عملیات پالایش عرضه شود) در حال حاضر منجر به انتشار قابل توجهی دی اکسید کربن می شود. انتشار دی اکسید کربن برای تولید هیدروژن پالایشگاهی

اکنون حدود 230 میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال است که حدود 20 درصد از کل انتشار جهان را شامل می‌شود. اگر رشد تقاضای آینده با استفاده از زغال سنگ برآورده شود، که به طور گسترده در چین استفاده می‌شود، تقاضا و انتشار گازهای گلخانه‌ای همگی در آینده افزایش خواهند یافت. بنابراین تولید هیدروژن به روشی پاک‌تر برای دستیابی به کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات پالایش حیاتی است.

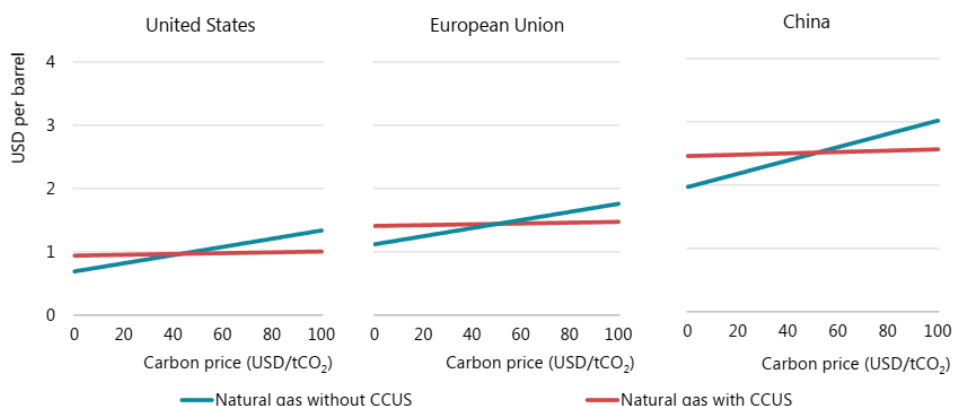
اقدامات کلیدی (مانند بهره‌وری انرژی و تغییر سوخت از سوخت‌های پراکنش) قبلاً به طور گسترده در بسیاری از پالایشگاه‌ها اتخاذ شده است و فرصت‌ها را برای کاهش بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای محدود می‌کند. در برابر این پس زمینه، همراه با تقاضای قابل توجهی که در حال حاضر وجود دارد، صنعت پالایش یک بازار اولیه بالقوه برای هیدروژن کم کربن در آینده ارائه می‌دهد.

رقابت پذیری قیمت تولید هیدروژن کم کربن

دو روش اصلی تولید هیدروژن کم کربن برای پالایشگاه‌ها وجود دارد: تجهیز تأسیسات تولید هیدروژن مبتنی بر گاز طبیعی یا زغال سنگ به جاذب‌های کربن⁵⁵. و با استفاده از هیدروژن الکترولیتی از الکتریسیته کم کربن. با توجه به اینکه عمده تقاضای هیدروژن در آینده از پالایشگاه‌های موجود می‌آید و بیشتر پالایشگاه‌ها قبلاً به واحدهای تولید هیدروژن مجهز هستند، تولید هیدروژن از گاز طبیعی یا زغال سنگ با جاذب کربن نسبت به الکترولیز مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، مسیر واضح‌تری برای هیدروژن کم کربن در آینده ارائه می‌دهد. هزینه‌های افزایشی برای تولید هیدروژن کم کربن به تجهیزات مورد نیاز برای جاذب‌های کربن محدود می‌شود، که باعث می‌شود تولید هیدروژن کم کربن از این طریق رقابتی‌تر از گزینه‌های مبتنی بر برق باشد و جذب انتشار دی‌اکسید کربن در واحدهای تولید هیدروژن از طریق گاز طبیعی یکی از کم هزینه‌ترین فرصت‌ها برای استفاده از جاذب‌های کربن در یک پالایشگاه است.

با این حال علی‌رغم کاهش مداوم هزینه‌های فناوری برای جاذب‌های کربن، پذیرش در مقیاس بزرگ این فناوری‌ها در واحدهای تولید هیدروژن پالایشگاه‌ها به کمک سیاست‌گذاران، به‌ویژه با توجه به حاشیه‌های کم و ماهیت بسیار رقابتی صنعت پالایش نیاز دارد؛ زیرا افزودن جاذب‌های کربن چیزی در حدود 0.25 دلار به ازای هر بشکه را اضافه می‌کند که بالاتر از قیمت کربن امروزی (0 تا 0.1 دلار در هر بشکه طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی) است و از این رو پالایشگاه‌ها بیشتر تمایل دارند که خود بهای دی‌اکسید کربن را بپردازند تا اینکه تلاش خود را برای جذب کربن متمرکز کنند. قیمت‌های کربن بالاتر یا مشوق‌های سیاستی معادل، می‌تواند این تصویر را تغییر دهد. به عنوان مثال، قیمت کربن بالاتر از 50 دلار بر هر تن دی‌اکسید کربن، تولید هیدروژن از طریق گاز طبیعی با استفاده از جاذب‌های کربن را در بیشتر مناطق از نظر اقتصادی جذاب می‌کند.

⁵⁵ carbon capture, utilization and storage: CCUS



نمودار 5: مقایسه قیمت هیدروژن با استفاده از فناوری جاذب های کربن و بدون آن در مناطق مختلف بر اساس قیمت کربن

استفاده از هیدروژن در بخش های شیمیایی

امروزه بخش شیمیایی دومین منبع بزرگ تقاضا برای هیدروژن است: تولید آمونیاک 31 میلیون تن هیدروژن بر سال و متانول 12 میلیون تن بر سال طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی، هیدروژن نیاز دارد. همچنین این بخش یک تولیدکننده هیدروژن فرعی است که هیدروژن تولیدی هم در خود بخش مصرف می شود و هم برای استفاده در جاهای دیگر توزیع می شود. اکثریت قریب به اتفاق هیدروژنی که بخش شیمیایی مصرف می شود، مانند هیدروژن پالایشگاه ها، با استفاده از سوخت های فسیلی تولید می شود و این باعث انتشار مقادیر قابل توجهی گازهای گلخانه ای می شود کاهش دادن سطح انتشار نشان دهنده یک چالش مهم برای پایداری استفاده از انرژی در این بخش و فرصتی قابل توجه برای استفاده از هیدروژن کم کربن است.

امروزه چگونه از هیدروژن در بخش های شیمیایی استفاده می شود؟

بخش شیمیایی مجموعه پیچیده ای از خروجی ها مانند: پلاستیک، کود، حلال، مواد منفجره و محصولات گوناگون دیگری را تولید می کند. این بخش عمدتاً روی آمونیاک، متانول و به میزان کمتری روی اتیلن⁵⁶، پروپیلن⁵⁷، بنزن⁵⁸، تولوئن⁵⁹ و زایلین⁶⁰های مخلوط تمرکز دارد. این هفت مواد شیمیایی اولیه حدود دو سوم مصرف انرژی بخش شیمیایی و بیشتر تقاضای آن برای محصولات انرژی به عنوان ورودی مواد خام را تشکیل می دهند (اصطلاحاً مواد اولیه).

هیدروژن بخشی از ساختار مولکولی تقریباً تمام مواد شیمیایی صنعتی است، اما فقط برخی از مواد شیمیایی اولیه به مقادیر زیادی هیدروژن اختصاصی برای استفاده به عنوان مواد اولیه، به ویژه آمونیاک و متانول

⁵⁶ C₂H₄

⁵⁷ C₃H₆

⁵⁸ C₆H₆

⁵⁹ C₇H₈

⁶⁰ C₈H₁₀

نیاز دارند. بیشتر از 31 میلیون تن هیدروژن در سال برای تولید آمونیاک و بیشتر از 12 میلیون تن هیدروژن در سال برای تولید متانول نیاز است (طبق گزارش آژانس بین‌المللی در سال 2020).

سوخت‌های فسیلی از دیرباز منبع مناسب و مقرون به صرفه‌ای از هیدروژن و کربن برای تولید آمونیاک و متانول بوده‌اند. در سال 2018 حدود 270 میلیون تن سوخت فسیلی برای تولید هیدروژن مورد استفاده این دو محصول استفاده شده است که تقریباً معادل تقاضا ترکیبی نفت برزیل و روسیه می‌باشد. (طبق گزارش آژانس بین‌المللی در سال 2020).

آمونیاک بیشتر در ساخت کودهایی مانند اوره^{۶۱} و نیترات آمونیوم استفاده می‌شود (حدود 80 درصد). سهم باقیمانده برای کاربردهای صنعتی مانند مواد منفجره، الیاف مصنوعی و سایر مواد ویژه استفاده می‌شود. متانول برای طیف متنوعی از کاربردهای صنعتی، از جمله ساخت فرمالدهید^{۶۲}، متیل متاکریلات^{۶۳} و حلال‌های مختلف استفاده می‌شود. متانول همچنین در تولید چندین ماده شیمیایی صنعتی دیگر، و برای فرآیند متانول به بنزین که بنزین را از گاز طبیعی و زغال سنگ تولید می‌کند، استفاده می‌شود که در مناطقی با ذخایر زغال سنگ یا گاز فراوان، اما دارای ذخایر نفت داخلی کم، جذاب است.

پتانسیل برای تقاضای آینده هیدروژن در بخش‌های شیمیایی

با افزایش تقاضا برای آمونیاک و متانول، طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضا برای هیدروژن برای تولید مواد شیمیایی اولیه از 44 میلیون تن در سال امروز، به 57 میلیون تن در سال تا سال 2030 افزایش خواهد یافت و تقاضا برای متانول برای کاربردهای موجود بین سال‌های 2018 تا 2030 به میزان 3.6 درصد در سال رشد خواهد کرد.

با اقدامات بهره‌وری انرژی، استراتژی‌های بهره‌وری مواد که یک راه مهم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوهای کربن زدایی آژانس بین‌المللی انرژی^{۶۴} است، می‌تواند این افزایش تقاضا را کاهش دهد؛ همچنین بازیافت و استفاده مجدد از پلاستیک و سایر مواد و بهبود کارایی استفاده از کود می‌تواند میزان تولید شیمیایی اولیه مورد نیاز در آینده را کاهش دهد، اگرچه این امر احتمالاً تأثیر کمتری بر تقاضای آمونیاک و متانول نسبت به تقاضا برای سایر مواد شیمیایی اولیه مانند اتیلن خواهد داشت. همچنین وجود سیاست‌های خاص در برخی کشورها برای محدود کردن مصرف کود، مانند هدف برای رشد صفر از سطوح فعلی در چین^{۶۵}، مزید بر علت کاهش این تقاضا خواهد شد.

در مقابل، اگر این مواد شیمیایی به عنوان حامل انرژی برای انتقال، توزیع و ذخیره هیدروژن، تسهیل استفاده از آن در کاربردهای جدید، یا به عنوان سوخت به خودی خود استفاده شوند، تقاضا برای آمونیاک و

⁶¹ CH₄N₂O

⁶² OCH₂

⁶³ (C₅O₂H₈)_n

⁶⁴ IEA, 2019b; Allwood and Cullen, 2012

⁶⁵ Shuqin and Fang, 2018

متانول ممکن است بیشتر افزایش یابد (در بخش‌های قیل به تفصیل این موضوع پرداخته شده است). اگر این برنامه‌های جدید گسترده شوند، بخش شیمیایی می‌تواند در نقشی که امروزه پالایشگاه‌ها در تأمین انرژی برای کاربران پایین دست ایفا می‌کنند، بازی کند.

بدون هیچ تغییری در اقتصاد فعلی یا مقررات تولید، مسیرهای رشد فعلی برای محصولات شیمیایی احتمالاً منجر به رشد تولید هیدروژن از گاز طبیعی و زغال سنگ بدون استفاده از جاذب‌های کربن می‌شود. با پیش‌بینی روندهای فعلی، این رشد باعث می‌شود که انتشار مستقیم کربن دی اکسید از تولید آمونیاک و متانول حدود 20 درصد بین سال‌های 2018 و 2030 افزایش یابد.

برآوردن تقاضای هیدروژن در آینده در بخش‌های شیمیایی و در عین حال کاهش انتشار

تولید جهانی آمونیاک و متانول در حال حاضر باعث انتشار در حدود 630 میلیون تن هیدروژن در سال می‌شود. میانگین جهانی شدت انتشار مستقیم تولید آمونیاک 2.4 تن دی‌اکسید کربن در هر تن آمونیاک است (طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی).

فناوری‌های جایگزین می‌توانند تقاضای رو به رشد برای مقادیر زیادی مواد اولیه هیدروژن اختصاصی در بخش شیمیایی برای آمونیاک و متانول را برآورده کنند و در عین حال انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهند. سه گزینه اصلی فناوری روش پاک تر عبارتند از: استفاده از جاذب‌های کربن برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با سوخت‌های فسیلی، استفاده از هیدروژن مشتق شده از الکترولیز (با فرض منبع برق تجدید پذیر). و استفاده از مواد اولیه زیست توده (با فرض تأمین پایدار انرژی زیستی) که امروزه همه این گزینه‌ها نسبت به استفاده از سوخت‌های فسیلی بدون جاذب کربن پرهزینه‌تر هستند. استفاده از زیست توده برای تولید آمونیاک و متانول به طور قابل توجهی نسبت به سایر گزینه‌ها پرهزینه‌تر و قدرت رقابتی کم‌تر به نظر می‌رسد. بنابراین تمرکز در تجزیه و تحلیل در این بخش بر استفاده از گاز طبیعی با جاذب‌های کربن و استفاده از هیدروژن الکترولیتی است.

پاسخگویی به تقاضای آمونیاک و متانول در آینده به طور کامل از این مسیرهای پاک تر، تقاضا برای انرژی ورودی به بخش شیمیایی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. اگر تقاضای آینده در مسیر متناسب با قرارداد پاریس به طور کامل با هیدروژن تولید شده از گاز طبیعی با جاذب‌های کربن برآورده شود، حدود 320 میلیارد متر مکعب گاز طبیعی تا سال 2030 مورد نیاز خواهد بود که تقریباً نیمی از آن به عنوان خوراک استفاده خواهد شد. این مقدار چیزی حدود 10 درصد تقاضا امروزه است. و همچنین در حدود 450 میلیون تن کربن در سال باید توسط جاذب‌های کربن، جذب شود. و حدود یک سوم این مقدار کربن می‌تواند برای تولید اوره استفاده شود. بزرگترین جاذب کربنی که تا امروز نصب شده است؛ توانایی جذب 1 میلیون تن کربن را در سال دارد. جذب 450 میلیون به حدود 450 پروژه جدید در این اندازه نیاز دارد تا این هدف در این تاریخ عملیاتی شود.

اگر تقاضای آینده به طور کامل از هیدروژن الکترولیتی برآورده شود، طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، تا سال 2030 به حدود 3020 تراوات ساعت الکتریسیته اضافی در سال نیاز خواهد داشت که معادل

حدود 11 درصد از تولید برق جهانی امروزی است. همچنین بسته به سطوح بازده و فاکتورهای ظرفیت، به 350 تا 450 گیگاوات ظرفیت الکترولیز نیاز دارد. بزرگترین الکترولیزهای منفرد که در حال حاضر در حال توسعه هستند در مقیاس 100 مگاوات هستند، به این معنی که 3500 تا 4000 از چنین تاسیساتی تا سال 2030 باید ساخته شود. حدود 0.6 میلیارد متر مکعب در سال آب نیز به عنوان ماده اولیه برای الکترولیز مورد نیاز است که حدود 1٪ از کل مصرف آب در بخش انرژی امروزی است و حدود 0.5 گیگاتن در سال اکسیژن به عنوان محصول جانبی تولید می شود که می تواند در سایر فرآیندهای صنعتی استفاده شود.

روش الکترولیز از بخشی از دی اکسید کربن برای تولید اوره و متانول استفاده می کند. برای جلوگیری از استفاده از سوخت فسیلی در سنتز متانول در سال 2030، 200 میلیون تن دی اکسید کربن در سال باید از منابع بیوژنیک یا جوی تهیه و جذب شود. 170 میلیون تن دی اکسید کربن در سال یا معادل آن برای اوره مورد نیاز است.

رقابت پذیری قیمت روش های پاک تولید هیدروژن

روش های پاک تر تولید آمونیاک و متانول هزینه های بالاتری نسبت به روش هایی که امروزه به صورت تجاری در دسترس هستند، دارند. در مکان هایی با کمترین هزینه برق تجدیدپذیر (به عنوان مثال در شیلی، مراکش و چین)، هیدروژن الکترولیتی از نظر هزینه با گاز طبیعی و زغال سنگ برای تولید آمونیاک و متانول رقابتی است، حتی اگر از جاذب کربن استفاده نکنند. در حالی که این مکان ها تا حدودی از مراکز تقاضای امروزی برای این محصولات فاصله دارند، ممکن است سرمایه گذاری داخلی آینده را جذب کنند؛ اگرچه هزینه های اضافی برای ذخیره سازی بافر⁶⁶ و سایر استراتژی ها برای مقابله با متناوب بودن انرژی های تجدیدپذیر متغیر، می تواند هزینه های فوق را افزایش دهد. انتقال برق تجدیدپذیر به مراکز تقاضای اصلی گزینه دیگری است، اما هزینه های اضافی را نیز در بر خواهد داشت

بسیاری از فناوری و تجهیزات مورد نیاز برای روش های پاک تر در بخش شیمیایی از جمله پمپ ها، کمپرسورها و واحدهای جداسازی مورد نیاز برای جذب دی اکسید کربن در حال حاضر به طور گسترده در سراسر صنعت استفاده می شوند. الکترولیزها در گذشته در مقیاس های بالاتر از 100 مگاوات ساخته شده اند و تلاش های قابل توجهی برای کاهش بیشتر هزینه های آنها انجام شده است. متغیرهای کلیدی موثر بر اقتصاد تولید از طریق الکترولیز و گاز طبیعی با جاذب کربن، قیمت گاز طبیعی و برق است. الکترولیز با گاز طبیعی همراه با جاذب کربن در محدوده قیمتی 15 تا 50 دلار آمریکا در هر مگاوات ساعت برق برای آمونیاک و در محدوده 10 تا 65 دلار در مگاوات ساعت برق برای متانول، با فرض قیمت گاز 3 تا 10 دلار بر مگاوات ساعت، رقابت می کند. با این حال، برای رقابت با گاز طبیعی بدون جاذب کربن در این قیمت های گاز، قیمت برق باید به 10 تا 40 دلار در هر مگاوات ساعت برای آمونیاک و 5 تا 50 دلار در مگاوات ساعت برای متانول کاهش یابد.

⁶⁶ Buffer

هیدروژن در تولید آهن و فولاد

آهن اسفنجی روشی برای تولید فولاد از سنگ آهن است. این فرآیند امروزه سومین منبع بزرگ تقاضای هیدروژن را تشکیل می‌دهد. پس از پالایش نفت، آمونیاک و متانول. بر اساس روندهای فعلی، تقاضای جهانی فولاد تا سال 2030 حدود 6 درصد افزایش خواهد یافت و تقاضا برای زیرساخت‌ها و جمعیت رو به رشد در مناطق در حال توسعه کاهش را در جاهای دیگر جبران می‌کند. مانند بخش‌های قبلی، بخش آهن و فولاد مقدار زیادی هیدروژن مخلوط با گازهای دیگر را به عنوان محصول جانبی تولید می‌کند (به عنوان مثال، گاز کوره کک). که بخشی از آن در داخل بخش مصرف می‌شود و بخشی از آن برای استفاده در جاهای دیگر توزیع می‌شود و تقریباً تمام این هیدروژن از زغال سنگ و سایر سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. برای کاهش انتشار، تلاش‌هایی برای آزمایش تولید فولاد با استفاده از هیدروژن به عنوان عامل کاهش دهنده کلیدی (در مقابل مونوکسید کربن حاصل از سوخت‌های فسیلی) در حال انجام است و اولین طرح‌ها در مقیاس تجاری در دهه 2030 انتظار می‌رود که آماده بهره‌وری شوند. در همین حال، هیدروژن کم کربن را می‌توان در فرآیندهای موجود که در حال حاضر بر پایه گاز طبیعی و زغال سنگ هستند ترکیب کرد تا شدت انتشار دی‌اکسید کربن کلی آنها کاهش یابد.

امروزه چگونه از هیدروژن در صنعت آهن و فولاد استفاده می‌شود؟ [15]

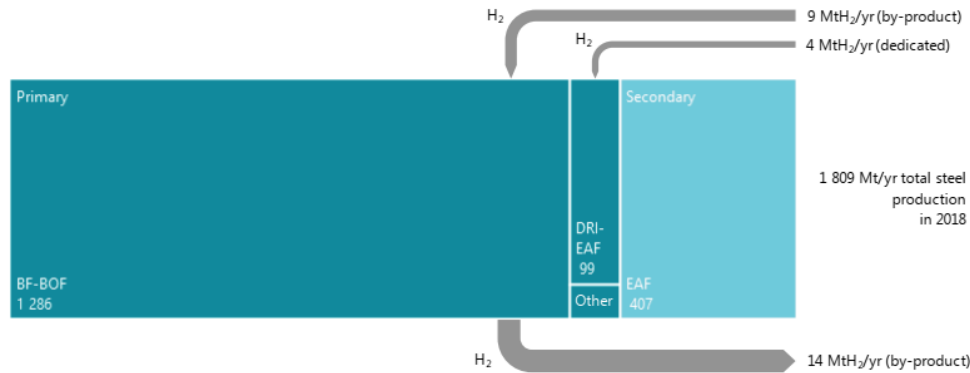
بیش از سه چهارم تقاضای جهانی فولاد امروزه با استفاده از روش‌های تولید اولیه که سنگ آهن را به فولاد تبدیل می‌کنند، بر خلاف مسیر تولید ثانویه، که از منابع محدودی از ضایعات بازیافتی استفاده می‌کند، برآورده می‌شود. دو مسیر اصلی تولید اولیه فولاد در حال حاضر شامل مقداری تولید و مصرف هیدروژن است:

- ✓ فولادسازی به روش اکسیژن قلیایی⁶⁷ مسیر حدود 90 درصد از تولید اولیه فولاد در سطح جهان را تشکیل می‌دهد. در این روش هیدروژن به عنوان محصول جانبی در استفاده از زغال سنگ به اصطلاح "گازهای ناشی از کار"⁶⁸ و در مخلوط با گازهای دیگر مانند مونوکسید کربن تولید می‌شود. گازهای ناشی از کار برای اهداف مختلف، در محل استفاده می‌شود، اما همچنین برای استفاده در بخش‌های دیگر از جمله تولید برق و در چین، تولید متانول نیز بکار گرفته می‌شوند.
- ✓ فولادسازی به روش کاهش مستقیم مسیر کوره قوس الکتریکی⁶⁹ 7 درصد از تولید اولیه فولاد در سطح جهان را تشکیل می‌دهد و از مخلوطی از هیدروژن و مونوکسید کربن به عنوان یک عامل کاهنده استفاده می‌کند. هیدروژن در این روش در تاسیسات اختصاصی از حدود سه چهارم گاز طبیعی (فرمینگ) و بقیه با استفاده از زغال سنگ (گاز سازی) تولید می‌شود.

⁶⁷ blast furnace-basic oxygen furnace

⁶⁸ works-arising gases (WAG)

⁶⁹ direct reduction of iron-electric arc furnace (DRI-EAF)



نمودار 6 مصرف و تولید هیدروژن در بخش آهن و فولاد به تفکیک روش تولید در حال حاضر

پتانسیل برای تقاضای هیدروژن در آینده صنعت آهن و فولاد

بدون مداخله سیاست، انتظار می رود تقاضا برای تولید هیدروژن اختصاصی در فولادسازی از سطح فعلی 4 میلیون تن هیدروژن در سال تقریباً مطابق با مسیر کاهش مستقیم مسیر کوره قوس الکتریکی مبتنی بر گاز افزایش یابد. در حالی که روش قوس الکتریکی می تواند از لحاظ مصرف انرژی بصره تر از روش اکسیژن قلیایی باشد، روش اکسیژن قلیایی از تجهیزات ساده تر و ارزان تر استفاده می کند. به ترجیه استفاده از کدام بیشتر بستگی به قیمت نفت و زغال سنگ در هر منطقه دارد.

دو عامل اصلی برای تأثیرگذاری بر تقاضای اختصاصی هیدروژن در آینده برای تولید فولاد عبارتند از: سهم مسیر قوس الکتریکی در ساخت فولاد اولیه و تقسیم بین تولید فولاد اولیه و ثانویه در تولید کلی. با توجه به پویایی ذخایر فولاد ساخته شده، بر اساس روندهای فعلی، پیش بینی می شود که سهم تولید مبتنی بر قراضه (تولید ثانویه) در کل تولید فولاد از حدود 23 درصد امروز به 25 درصد در سال 2030 افزایش یابد. در این شرایط، مسیر تجاری مبتنی بر گاز با قوس الکتریکی می تواند 14 درصد تقاضای اولیه فولاد را تامین کند که باعث دو برابر شدن استفاده از هیدروژن نسبت به سطح تقاضا امروز آن برای این روش، می شود. در همین حالت، اگر سهم تولید فولاد ثانویه به افزایش (به 29 درصد تا سال 2050) ادامه دهد و از مسیر گازی با قوس الکتریکی برای برآوردن 100 درصد تقاضای فولاد اولیه استفاده شود، تقاضای هیدروژن در این بخش طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی که در سال 2018 منتشر شد می تواند از نظر تئوری به 62 میلیون تن هیدروژن در سال برسد.

استفاده از هیدروژن برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد فولاد و در عین حال کاهش انتشار دی-اکسید کربن

در حال حاضر به طور متوسط، تولید یک تن فولاد خام حدود 1.4 تن دی اکسید کربن تولید می کند. از این رو چندین روش پاک تر در حال توسعه هستند که به طور قابل توجهی انتشار دی اکسید کربن را برای تولید آهن و فولاد اولیه کاهش می دهند که می توان آنها را به دو دسته تقسیم کرد:

- مسیرهای اجتناب از دی اکسید کربن که به دنبال جلوگیری از بیشتر انتشار دی اکسید کربن به طور کامل با استفاده از منابع انرژی کم کربن و عوامل کاهش دهنده، معمولاً با استفاده از هیدروژن هستند.
 - روش‌های مدیریت دی اکسید کربن که هدف این روش‌ها بازیابی و مدیریت دی اکسید کربن مرتبط با روش‌های سنتی مبتنی بر سوخت فسیلی، معمولاً از طریق کاربرد مستقیم جاذب‌های کربن است.
- پروژه‌های مختلفی در سراسر جهان برای توسعه این فرآیندها به سمت تجاری سازی در حال انجام است. اما همچنان این روش‌ها در مراحل اولیه توسعه و تحقیق هستند و نسبت به بخش شیمیایی که قبلاً بررسی شد، از لحاظ تجاری سازی، عقب‌تر اند.

هیدروژن برای دستیابی به گرمای با دمای بالا

گرمای صنعتی با دمای بالا منبع بالقوه‌ای برای رشد تقاضای هیدروژن در آینده است، اما امروزه عملاً هیچ هیدروژن اختصاصی برای این کاربرد تولید نمی‌شود. صنعت از گرما برای اهداف مختلف، از جمله ذوب، گاز، خشک کردن، و بسیج طیف گسترده‌ای از واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کند. گرما را می‌توان هم به طور مستقیم مثلاً در یک کوره یا به طور غیرمستقیم استفاده کرد، مثلاً ابتدا بخار را بالا آورده و سپس آن را برای نیازهای گرمایشی منتقل می‌کند. سه محدوده دمایی اصلی برای گرمای صنعتی وجود دارد: دمای پایین (کمتر از 100 درجه سانتیگراد)، دمای متوسط (بین 100 تا 400 درجه سانتیگراد) و دمای بالا (بیشتر از 400 درجه سانتیگراد). امروزه سوخت‌های فسیلی منبع اصلی گرمای با دمای بالا هستند (حدود 65٪ از زغال سنگ، 20٪ گاز طبیعی و 10٪ از نفت)، اگرچه مقادیر کمی از زیست توده و زباله در بخش‌های خاصی استفاده می‌شود. الکتریسیته همچنین به طور گسترده برای تولید گرما با دمای بالا در کاربردهای خاص، به طور مستقیم (مانند کوره‌های قوس الکتریکی و القایی در صنعت فولاد) یا به طور غیرمستقیم (به عنوان مثال برای ایجاد واکنش‌های الکتروشیمیایی در ذوب آلومینیوم) استفاده می‌شود. بخاری‌های مقاوم‌تری در تولید فیبر کربن استفاده می‌شوند که به دمای 1800 درجه سانتیگراد می‌رسند، و راه‌هایی برای استفاده از فناوری‌های گرمایشی الکترومغناطیسی (مانند میکروویو و مادون قرمز) برای دستیابی به دماهای مشابه برای سایر کاربردهای گرمایشی خاص وجود دارد. [16] با این حال، چندین فرآیند در مقیاس بزرگ، مانند کراکرهاي بخار^{۷۰} و کوره‌های سیمان، برای برق‌رسانی چالش‌برانگیز باقی می‌مانند، اگرچه مطالعات امکان‌سنجی و نمایشی در هر دوی این مناطق در حال انجام است.

فرصت‌هایی برای استفاده هیدروژن در حمل و نقل، ساختمان و تولید برق [7]

هیدروژن به عنوان سوخت پاک برای حمل و نقل

هیدروژن از گذشته به عنوان سوختی پاک برای حمل و نقل معرفی شده است، همچنین به عنوان جایگزین کم کربن برای فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی، برق و سوخت‌های زیستی می‌توان از آن استفاده کرد. خودروهای هیدروژنی پیل سوختی مانند خودروهای الکتریکی هیچ نوع انتشار آلاینده‌گی ندارند و در کاهش آلودگی محلی می‌توانند

⁷⁰ Steam Crackers

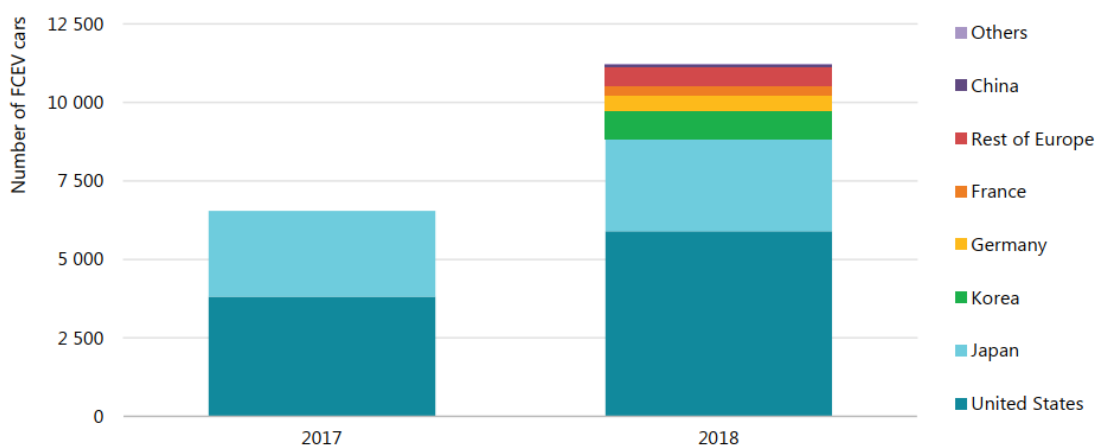
بسیار موثر باشند. همانطور که در قبل گفته شد هیدروژن را می‌توان به سوخت های مبتنی بر هیدروژن تبدیل کرد مانند: آمونیاک، متان مصنوعی، و سوخت های مایع مصنوعی که دارای پتانسیل زیادی برای بخش حمل و نقل می‌باشند.

حمل و نقل جاده ای :

وقتی از استفاده مستقیم هیدروژن صحبت می‌کنیم، خودروهای پیل سوختی سبک وزن توجه همه را جلب می‌کند. خودرو های مبتنی بر پیل سوختی را نیز میتوان برای کاربرد های جابه جایی نیز مانند لیفتراک، اتوبوس و کامیون نیز استفاده کرد.

امروزه چگونه از هیدروژن برای حمل و نقل جاده ای استفاده می‌شود؟

خودرو ها بیشترین سهم استفاده از هیدروژن در حمل و نقل جاده ای را به خود اختصاص می‌دهند. تقریباً 4000 دستگاه خودروی پیل سوختی در سال 2018 به فروش رسید. این رقم افزایش 50 درصدی فروش را نسبت به سال 2017 نشان می‌دهد، در مجموع 11200 عدد از این نوع خودرو تا سال 2018 در جهان عرضه شده است.



نمودار 7 تعداد خودروهای پیل سوختی در سال 2018

کاربرد هیدروژن در اتوبوس، کامیون و وسایل جابه‌جایی کالا:

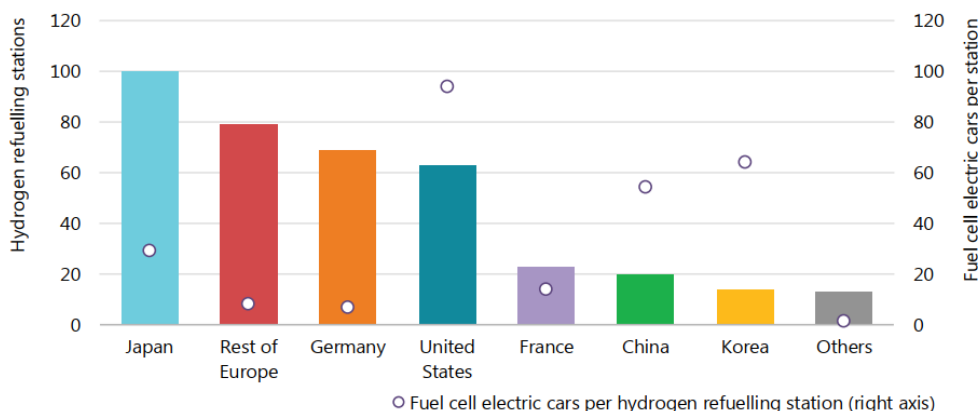
لیفتراک های پیل سوختی در حال حاضر به عنوان جایگزین برای لیفتراک های موجود هستند زیرا از نظر تجاری با دوام تر هستند. تعداد لیفتراک های پیل سوختی در جهان 25000 دستگاه تخمین زده می‌شود. در مورد اتوبوس های پیل سوختی کشور چین بیشترین استفاده را گزارش کرده است. با بیش از 400 اتوبوس در چین، 50 دستگاه در اروپا و 55 دستگاه در ایالت متحده تا پایان سال 2018 گزارش شده است. پروژه اتوبوس های پیل سوختی در ژاپن و کره در حال راه اندازی هستند و به شدت مورد استقبال قرار گرفته اند.

در سطح جهان حداقل 11 شرکت در حال حاضر اتوبوس پیل سوختی تولید می‌کنند. زیرا این نوع اتوبوس ها برای استفاده روزانه مناسب هستند یعنی به طور کلی نیاز به شارژ طی روز ندارند. همچنین ایستگاه های سوخت گیری آنها بسیار ساده تر و ارزان تر از ایستگاه های شارژ اتوبوس های برقی می‌باشد. مدل های جدید

کامیون و اتوبوس های برقی در حال حاضر خریداری و وارد عملیات شده اند، رشد این نوع اتوبوس ها در ناوگان های که استفاده روزانه دارند مانند اتوبوس های شهری بیشتر بوده است. اما صاحبان ناوگان های بین شهری و اپراتور ها این نوع اتوبوس ها و کامیون ها را به دلیل محدود بودن مسافت طی شده در طول هربار شارژ را مناسب نمی دانند. از این رو اتوبوس ها و کامیون های پیل سوختی مزایای رقابتی در برابر موتورهای الکتریکی را دارند. همچنین پروژه ای در کشور فرانسه برای افزایش مسیری طی شده طی هر بار شارژ ماشین های الکتریکی در حال انجام است که در آنها پیل سوختی این وظیفه را به عهده دارد.

ایستگاه های سوخت رسانی هیدروژن:

نصب زیرساخت های سوخت گیری هیدروژن تا به امروز نسبتاً محدود بوده است، ولی در چند سال گذشته شتاب گرفته است. ایستگاه های سوخت گیری هیدروژن جمعا تا پایان سال 2018 به تعداد 381 عدد رسیده است. با این حال این عدد در مقایسه با ایستگاه های شارژ ماشین های الکتریکی که 144000 ایستگاه است مقدار بسیار کمی می باشد.



نمودار 8 تعداد ایستگاه های سوخت رسانی هیدروژن (توضیح نمودار: تعداد ایستگاه های سوخت رسانی هیدروژن شامل ایستگاه های در دسترس عموم و خصوصی است و تعداد وسایل پیل سوختی فقط تعداد خودرو های سبک در نظر گرفته شده است)

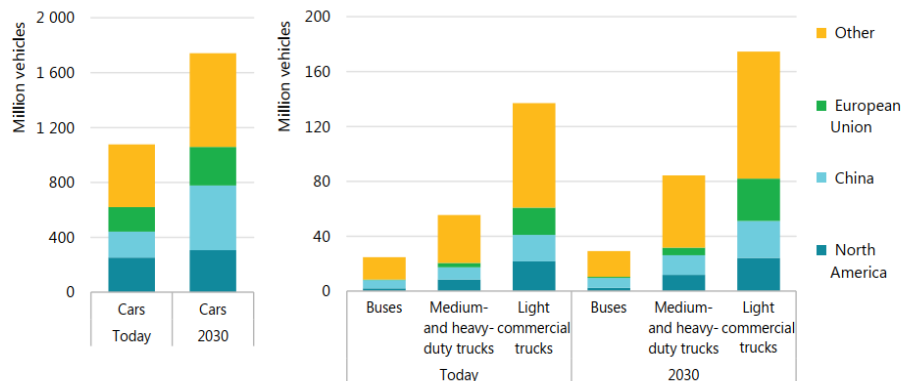
قیمت هیدروژن تحویلی به خودرو ها بسیار زیاد به مقدار استفاده از ایستگاه های تحویل هیدروژن دارد. برای مثال با نسبت هر 10 خودرو برای هر جایگاه (همانطور که در اروپا وجود دارد) پمپ هر ایستگاه کوچک که توان سوخت رسانی 50 کیلوگرم در روز را دارد؛ کمتر 10 درصد از هرروز را کار می کند. این انتقال هزینه زیاد 15-25 دلار به ازای هر کیلوگرم هیدروژن را دارد. اگر هزینه های ساخت و بهره برداری جایگاه سوخت با فروش سوخت در طول عمر یک جایگاه بازپرداخت شود. نسبت بالاتر خودرو به ایستگاه های سوخت مستلزم هماهنگی بهتر بین وسایل نقیه و زیرساخت های جایگاه های سوخت است. با این حال کشورهایی که نسبت بالایی دارند بیشتر خودرو های پیل سوختی مسیرهای ثابتی را طی می کنند؛ مانند وسایل نقلیه عمومی، این عمل باعث می شود که نیازمند استقرار گسترده جایگاه های سوخت هیدروژن نباشیم. این طرح در کشورهایی مانند فرانسه و چین اجرایی شده است.

تغییرپذیری این نسبت میان کشورهای مختلف نشان دهنده دیدگاه های متفاوت نسبت به ریسک های ساخت جایگاه سوخت رسانی هیدروژن است. ساخت این جایگاه ها در کشور چین 6 ماه طول می کشد، ولی به طور کلی 2 سال زمان نیاز دارد. رویکرد هایی برای کاهش مشکل هماهنگی و تاخیر زمانی مربوط به زیرساخت ها شامل: استفاده از ایستگاه های سوخت رسانی در نزدیکی محل تولید هیدروژن در حال بررسی است. (مانند خدمات اختصاصی مانند اتوبوس ها و تاکسی ها)

تقاضای بالقوه هیدروژن در آینده حمل و نقل جاده ای:

خودرو های الکتریکی و خودرو های پیل سوختی تنها وسایلی هستند که تولید آلودگی نمی کنند، بنابراین بهترین تاثیر را در کاهش آلودگی محلی دارند. محدوده ای رانندگی و نحوه سوخت گیری خودرو های پیل سوختی تقریباً شبیه به خودرو های احتراق داخلی می باشد. علاوه بر این هیدروژن در مقایسه با سوخت های زیستی دارای هیچ محدودیتی در منابع نیست. با این وجود روند تولید و استفاده از خودرو های پیل سوختی بسیار کند بوده است، زیرا چالش های فنی و قیمت های بالا، عرضه آنها را به بازار به تاخیر انداخته است. در حالی که خودرو های پیل سوختی به صورت تجاری خیلی زود معرفی شدند؛ مانند: هیوندای توسان ix-35 و تویوتا میرای به ترتیب در سال های 2013 و 2014. کاهش هزینه های تولید و افزایش ایستگاه های سوخت رسانی تنها راه جذب توجه مشتری به این نوع خودرو ها است.

پتانسیل تئوری استفاده از هیدروژن برای حمل و نقل جاده ای بسیار زیاد است. هر نوع حمل و نقل جاده ای از لحاظ فنی توانایی استفاده از هیدروژن را دارد یا مستقیماً از پیل سوختی و یا استفاده از سوخت های مبتنی بر هیدروژن. اگر تمام 1 میلیارد خودرو، 190 میلیون کامیون و 25 میلیون اتوبوس در حال حاضر با حالت پیل سوختی خود جایگزین شوند، تقاضای هیدروژن به بیشتر از 300 میلیون تن در سال می رسد، بیشتر از 4 برابر تقاضای در حال حاضر. تقاضای انرژی برای بخش حمل و نقل جاده ای طبق تئوری در حال افزایش است. بدون در نظر گرفتن اهداف توافق پاریس استفاده از سوخت های فسیلی در بخش حمل و نقل جاده ای افزایش 10 درصدی تا سال 2030 خواهد داشت، این امر به خاطر افزایش استفاده از کامیون ها در بخش اقتصاد های نوظهور و همچنین افزایش مالکیت خودرو است.



Source: IEA 2019. All rights reserved.

نمودار 9 مقایسه تعداد وسایل در امروز و سال 2030 به تفکیک منطقه

هزینه های زیرساخت سوخت رسانی و پتانسیل کاهش هزینه ها:

راه اندازی زیرساخت های سوخت گیری هیدروژن یک نیاز کلیدی برای خودروهای پیل سوختی است. سوخت گیری هیدروژن تقریباً زمانی برابر با زمان سوخت گیری های مایع دارد. با این حال، تامین هیدروژن ایستگاه های سوخت رسانی نسبت به سوخت های معمولی نیاز به زمان و کار بیشتری دارد. اعتبارسنجی برآورد هزینه بسیار دشوار است زیرا کمتر از 400 ایستگاه سوخت رسانی هیدروژن در سراسر جهان وجود دارد و به دلایلی داده های آنها فاش نمی شود. با این حال، هزینه سرمایه گذاری برای ایستگاه های سوخت رسانی هیدروژن در فشار 700 بار حدود 0.6 تا 2 میلیون دلار و برای فشار 350 بار حدود 0.15 تا 1.6 میلیون دلار تخمین زده می شود. تقریباً 60 درصد این هزینه مربوط به کمپرسور ایستگاه است که باید هیدروژن را در این فشار فراهم سازی کند.

هزینه تامین هیدروژن برای خودرو های پیل سوختی را می توان با ساخت ایستگاه های سوخت گیری بزرگتر کاهش داد تا زمانی که تقاضای هیدروژن مورد انتظار اجازه دهد. ریسک های مربوط به تنش های بین مقدار تقاضای هیدروژن، هزینه هیدروژن و اندازه ایستگاه های سوخت گیری یکی از موانع جذب سریع هیدروژن به حمل و نقل است. ایستگاه های کوچک در گسترش اولیه از لحاظ اقتصادی موجه تر هستند زیرا امنیت اقتصادی بالاتری دارند ولی نرخ هیدروژن تحویلی آنها بالاتر است. زمانی که حجم تقاضا بالا باشد تاسیس ایستگاه های بزرگتر توجیه اقتصادی دارد و از طرفی میتواند به کاهش هزینه هیدروژن کمک کند

هزینه مخزن ذخیره و پتانسیل کاهش هزینه:

هزینه مخزن ذخیره سازی بسیار زیاد است زیرا قیمت کامپوزیت های استفاده شده بالا می باشد. انتظار می رود این هزینه با سرعت کمتری نسبت به هزینه پیل سوختی سقوط کند. به عنوان مثال برای یک خودرو با 600 کیلومتر مسافت طی شده با هر بار شارژ، امروزه مبلغ 3400 دلار برای مخزن آن باید هزینه شود و انتظار می رود این هزینه در درازمدت به 1800 دلار برسد.

هزینه پیل سوختی و پتانسیل کاهش هزینه:

پیل سوختی در دهه گذشته کاهش قابل توجهی داشته است، اما همچنان هزینه ها بالا و حجم تولید کم است. هزینه فعلی یک نمونه تجاری پیل سوختی تقریباً 230 دلار بر کیلووات تخمین زده می شود، اگرچه استفاده از فناوری های پیشرفته به زودی احتمالاً هزینه را به 180 دلار کاهش می دهد. ممکن است بتوان فعالیت کاتالیزور را افزایش داد در نتیجه میتوان محتوای پلاتین را کاهش داد که یکی از اجزا گران قیمت پیل سوختی است، همچنین ممکن است کاتالیزوری تولید شود که دیگر نیازی به پلاتین نداشته باشد.

هزینه ها همچنین می تواند از طریق صرفه جویی در مقیاس، کاهش یابند برای مثال: افزایش واحد های ساخته شده در یک کارخانه، هزینه ویژه هر جزء را کاهش می دهد. حدود نیمی از هزینه های سیستم مربوط به صفحات دوقطبی، غشاها، کاتالیزور و صفحات انتشار گاز می باشد. هزینه ترکیبی این اجزا را می توان با افزایش کارخانه ها تا 65 درصد کاهش داد.

بخش دریایی: کشتی ها و بنادر

بخش دریایی یکی از مصرف کنندگان مهم فرآورده های نفتی است که حدود 5 درصد از کل مصرف را تشکیل می دهد. تقاضای جهانی نفت این بخش از گزارش، بر حمل و نقل بین المللی تمرکز دارد که علل آن عبارتند از:

- ارزان ترین راه برای جابه جایی طولانی مدت
- حدود 90 درصد کالاهایی فیزیکی از لحاظ حجم از این طریق جابه جا می شوند (1/3 محصولات انرژی از این طریق جابه جا می شوند).

در نتیجه حمل و نقل دریایی نقش مهمی در تغییرات آب و هوایی دارد؛ که حدود 2.5 درصد دی اکسید کربن تولیدی جهان مربوط به این بخش می باشد. تاثیر گذاری بر روی کیفیت هوا به دلیل استفاده از نفت کوره و همچنین آلوده کردن هوای بنادر نیز یکی از مضرات آن است. عمدتاً سوخت های مبتنی بر هیدروژن یک گزینه پیشرو برای مقابله با چالش های حمل و نقل بین المللی است. هیدروژن فرصت به رسیدگی انتشار گازهای گلخانه ای نه تنها در طول سفر در دریا بلکه عملیات بندری شامل جابه جایی کالا ها را می تواند حل کند. (برای مثال استفاده از لیفتراک های پیل سوختی)

امروزه چگونه هیدروژن در بخش دریایی استفاده می شود؟

فرآورده های نفتی در حال حاضر در بخش کشتیرانی استفاده می شوند و استفاده از سوخت های مبتنی بر هیدروژن بسیار محدود است. با این حال در بلژیک یک پروژه برای استفاده هیدروژن با دیزل در موتورهای دریایی در حال انجام است، همچنین بیشتر از 20 پروژه برای استفاده از سلول های سوختی تا 300 کیلووات که با باتری های الکتریکی ترکیب شده اند بیشتر برای هدف تامین برق کمکی در کالیفرنیا در حال انجام است. همچنین پروژه هایی در زمینه استفاده کردن از آمونیاک به عنوان سوخت در کشتی ها تعریف و در حال انجام هستند.

پتانسیل سوخت های مبتنی بر هیدروژن در بخش دریایی

پیش بینی می شود حجم حمل و نقل بین المللی تا سال 2050 بیش از سه برابر شود. این روند در غیاب سیاست های آب و هوایی، افزایش 50 درصدی تقاضای فرآورده های نفتی را در این بخش به همراه دارد که تقریباً به روزی 6 میلیون بشکه نفت خواهد رسید. اقدام برای کاهش گازهای گلخانه ای می تواند مسیر را برای هیدروژن باز کند. سازمان بین المللی دریانوردی⁷¹ استراتژی هایی برای کاهش انتشارات گاز گلخانه ای و گوگرد در نظر گرفته است.

اقدامات ممکن برای کاهش انتشار گوگرد مانند: اسکرابرها، تغییر سوخت به گاز طبیعی مایع⁷² و استفاده از سوخت نفتی بسیار کم گوگرد⁷³ انجام شده است. ولی این اقدامات تاثیر زیادی بر کاهش گاز های گلخانه ای

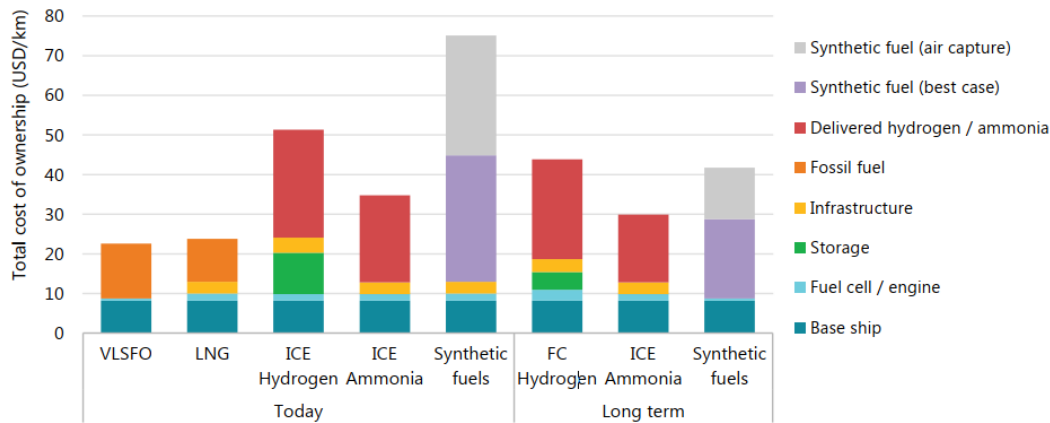
⁷¹ International Maritime Organization

⁷² LNG

⁷³ Very Low Sulphur Fuel Oil

نداشته است. هیدروژن، آمونیاک، سوخت های زیستی پیشرفته و سوخت های مایع مبتنی بر هیدروژن جایگزین های مناسبی برای سوخت کشتیرانی است. این که کدام یک از این سوخت ها جایگزین شوند بستگی به اجرای زیرساخت ها برای کشتی هاست. هیدروژن و آمونیاک مانند سوخت گاز طبیعی مایع نیاز به توسعه تاسیسات ذخیره سازی دارند و سوخت های زیستی پیشرفته به دلیل ناپایدار بودن در عرضه نمی تواند با این دو سوخت رقابت کند.

در میان شرکت های مربوط به حمل و نقل دریایی، شرکت مرسک^{۷۴} بزرگترین شرکت دریایی جهان، در سال ۲۰۱۸ اعلام کرد که هدف آن این است که تا سال ۲۰۵۰ به کربن صفر برسد. برای دستیابی به این هدف گفته می شود که باید کشتی های کم کربن تا سال ۲۰۳۰ از نظر تجاری پایدار و قابل اعتماد باشند.



نمودار ۱۰ هزینه مالکیت سوخت در آینده و حال

راه آهن و هیدروژن:

راه آهن در حال حاضر بخشی است که بیشتر بخش های آن به صورت الکتریکی درآمده است. طرح هایی که شامل قطارهای هیدروژنی باشند در بعضی از کشورها وجود دارد. حداقل سه شرکت در جهان وجود دارند که بر روی این زمینه کار می کنند. آلمان قصد دارد ناوگان هیدروژنی خود را افزایش دهد و تا آخر سال ۲۰۲۱ ۱۴ قطار هیدروژنی را در خط قرار دهد. ۵ ایالت فدرال نیز ۶۰ قطار به شرکت آلستوم^{۷۵} سفارش داده اند، همچنین دو قطار هیدروژنی در آلمان با یکبار سوخت گیری ۸۰۰ کیلومتر در روز را می پیماید. اولین قطار هیدروژنی ژاپن هم در حال انجام با مشارکت شرکت تویوتا است. تحت فرضیات خوشبینانه کاهش هزینه های تولید پیل سوختی، قطار های هیدروژنی توان رقابت با قطار های الکتریکی را خواهند داشت.

هواپیمایی و هیدروژن:

هوانوردی تقریباً ۲.۸ درصد از انتشار دی اکسید کربن جهانی را به خود اختصاص داده است و انتظار می رود تا سال ۲۰۵۰ ترافیک مسافری دوبرابر شود و به حدود ۱۶۰۰۰ میلیارد کیلومتر در سال برسد. افزایش تقاضای انرژی در

⁷⁴ Maersk

⁷⁵ Alstom

این بخش باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. بهترین جایگزین برای سوخت‌های فسیلی در این بخش هیدروژن و سوخت‌های زیستی پیشرفته می‌باشد.

در حالی که هیدروژن به صورت پروژه‌های نمایشی در هواپیماهای کوچک در مدل‌های شرکت هواپیمایی آلمان در سال 2016 و ایرباس در سال 2000 استفاده شده است، استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت هوانوردی نیاز به تحقیق و توسعه بیشتری دارد. چگالی انرژی کم هیدروژن و نیاز به ذخیره‌سازی بروی نیازمند تغییر در ساختار هواپیماها، سوخت‌گیری جدید و زیرساخت‌های ذخیره‌سازی هیدروژن در فرودگاه‌هاست. در سال 2018 تعداد پروژه‌ها در این زمینه به 130 عدد می‌رسد. استفاده مستقیم از برق به جای هیدروژن در پروژه تاکسی‌های هوایی شهری در حال توسعه هستند با این حال نیز این پروژه با چالش‌هایی مانند: وزن باتری، هزینه‌ها و ... مواجه است.

درمقابل سوخت‌های مایع مبتنی بر هیدروژن نیاز به تغییر در ساختار هواپیما، نحوه سوخت‌گیری و زیرساخت فرودگاه‌ها ندارند. سوخت‌های مصنوعی مبتنی بر هیدروژن الکترولیتی چهار تا شش برابر گران‌تر از سوخت جت معمولی تخمین زده می‌شوند. سوخت سهم بزرگی از کل هزینه‌های عملیاتی هوانوردی را تشکیل می‌دهد بنابراین این امر بسیار قابل توجه است. اعمال مالیات‌های برکربن یا سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیاز است که این صنعت به سمت هیدروژن متمایل شود. علاوه بر استفاده از هیدروژن در هواپیما، هیدروژن در حال حاضر در چند مورد کمکی استفاده می‌شود. این واحدها در صورت کار نکردن موتور جت، برق تولید می‌کنند.

هیدروژن به عنوان سوخت برای تامین حرارت در ساختمان:

بخش ساختمان در جهان تقریباً 30 درصد انرژی نهایی را مصرف می‌کنند که تقریباً 3/4 آن برای گرمایش خانه، آب داغ و پختن غذا استفاده می‌شود. نزدیک 28 درصد انتشارات دی‌اکسیدکربن مربوط به بخش خانگی و ساختمان‌ها می‌باشد.

جایگزینی تامین گرما از روش‌های کم‌کربن برای ساختمان‌ها چالش بسیار بزرگی است زیرا تصمیم‌گیری برای هر ساختمان ممکن است متفاوت باشد و به نوع کاربرد ساختمان، مالکیت، مکان، ترجیحات مشتری، قیمت انرژی کم‌کربن و راحتی بستگی دارد. این تعداد متغیرها باعث می‌شود فناوری استفاده شده در آینده مشترک با گاز طبیعی مصرف شوند. هیدروژن دارای پتانسیل کمک به این انتقال انرژی است (مانند تولید کردن متان) و می‌تواند برای استراتژی‌های تامین گرما بدون کربن در بلندمدت مورد استفاده قرار بگیرد.

امروزه چگونه بخش ساختمان از هیدروژن استفاده می‌کند؟

امروزه از هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی در ساختمان به صورت محدود و کم استفاده می‌شود. کاربردهای بالقوه هیدروژن اکنون در حال آزمایش هستند. در حال حاضر 37 پروژه تحقیقاتی وجود دارد مانند: بررسی ترکیب هیدروژن در شبکه گاز. در انگلستان جایی که تقاضا برای گرمایش بسیار مورد توجه است، پروژه‌هایی که بر روی این موضوع کار می‌کنند، برای این کشور مورد توجه قرار می‌گیرد. پروژه H21 شمال انگلستان بزرگترین پروژه بکارگیری هیدروژن در ساختمان است، این پروژه با هدف تامین گرمایش ساختمان 100 درصدی با هیدروژن است و هدف آن تامین 180 کیلوگرم هیدروژن در سال، تا سال 2025 و 2

میلیون تن هیدروژن در سال، تا سال 2035 است. همچنین طی مطالعاتی که انجام شده بر روی این پروژه در سال 2016 تایید شد که برای انجام، امکان استفاده مجدد از خط لوله گاز طبیعی موجود امکان پذیر است. علاوه بر این پروژه های تحقیقاتی با موضوع استفاده هیبرید میکروسیستم های تولید همزمان و پیل سوختی نیز وجود دارد که در آسیا و اروپا به ویژه پروژه ای ان ای فارم⁷⁶ در ژاپن در حال بررسی است. در سال 2012 نیز همچنین در اروپا تعداد 1000 پیل سوختی کوچک برای ساختمان های مسکونی و تجاری در 11 کشور مختلف نصب شده است.

پتانسیل تقاضای هیدروژن در آینده برای بخش ساختمان:

هیدروژن برای تمام بخش های انرژی ساختمان قابل در نظر گیری نمی باشد و عوامل مختلفی بر تقاضای نهایی هیدروژن در ساختمان تاثیر گذار خواهد بود مانند: زیرساخت های گاز طبیعی موجود، تراکم گرما، سایر انرژی های مورد نیاز ساختمان و ملاحظات ایمنی. همانطور که گفته شد استفاده از هیدروژن در ساختمان با چالش های بسیار زیادی رو به رو است و به همین دلیل پروژه های موجود در این زمینه بیشتر به صورت آزمایشی هستند. اما فرصت هایی نیز وجود دارند که بیشتر حول دو محور هستند. اولین محور ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی است و محور دوم استفاده از هیدروژن به صورت 100 درصدی برای تامین گرمایش ساختمان.

یکی از مزیت های اصلی استفاده از هیدروژن چه به صورت مخلوط با گاز طبیعی برای گرمایش و چه به صورت غیرمستقیم برای گرمایش و سرمایش منطقه ای، این است که نیاز به زیرساخت جدیدی ندارد و از زیرساخت موجود استفاده می کند. استفاده از زیرساخت های جدید به ناچار پرهزینه خواهد بود.

ترکیب هیدروژن با گاز طبیعی برای گرمایش خانگی:

در بعضی از کشور ها مانند کانادا، ایالت متحده و اروپای غربی هیدروژن را با سهم 3-5 درصد با گاز طبیعی ترکیب می کنند و این ترکیب تاثیر کمی بر تجهیزات مصرف نهایی مانند: اجاق گاز و دیگ بخار مورد استفاده برای گرمایش. همچنین در 14 ساختمان موجود در هلند هیدروژن با سهم 20 درصدی با گاز طبیعی ترکیب شده و هیچ مشکلی در پایداری، احتراق و همچنین در لوله ها و یا تجهیزات گرمایی وجود نداشته است. پروژه های دیگر در سراسر جهان نیز با انجام همین آزمایش به نتایج برابری رسیدند.

تست دقیق تر برای اطمینان از ایمنی، کارایی و عملکرد زیست محیطی سیستم در طولانی مدت مورد نیاز است. با این حال اجرا به حالت عمومی کمی دارای ریسک است مخصوصا برای وسایل و تجهیزات قدیمی تر.

ترکیب هیدروژن می تواند تقاضای قابل توجهی را برای هیدروژن فراهم سازد، اما مدیریت اثرات هزینه یک چالش اساسی برای سیاستگذاران است. به عنوان مثال اگر در سراسر جهان هیدروژن با سهم 3 درصد به گاز طبیعی اضافه شود، این امر باعث تقاضای 12 میلیون تنی در سال می شود که تقریبا حدود 17 درصد کل تقاضای هیدروژن در حال حاضر، این عمل به طور بالقوه ای بر هزینه های تامین هیدروژن تاثیر گذار خواهد بود.

⁷⁶ ENE-Farm

اگر بخواهیم بیشتر از سهم 20 درصد با گاز طبیعی مخلوط کنیم باید از سوخت های مبتنی بر هیدروژن استفاده کنیم. با این حال تزریق متان مصنوعی حاصل از هیدروژن که از جایگزینی تجهیزات موجود جلوگیری می کند، احتمالا قیمت گاز را بسیار بیشتر از قیمت خالص آن خواهد کرد.

استفاده 100 درصدی هیدروژن برای گرمایش ساختمان:

از منظر هزینه ها و اقتصاد استفاده 100 درصدی هیدروژن برای گرمایش (برای مثال استفاده از پیل سوختی یا دیگ های بخار هیدروژنی) برای ساختمان های بزرگ و مجتمع های ساختمانی بسیار جذاب به نظر می رسد. همچنین برای شبکه های انرژی منطقه ای استفاده از سلول های سوختی همراه با سیستم های تولید همزمان یا سایر سیستم های هیبرید می تواند جذاب باشد. در چنین مواردی می تواند این سیستم ها همراه یک واحد ذخیره سازی انرژی باشد این سیستم ذخیره ساز می تواند تعادل سیستم قدرت را در طول سال بهبود ببخشد و از پیک های فصلی اجتناب کند. همچنین امکان انعطاف پذیری بیشتری را در شبکه فراهم می سازد.

برای بازارهای گسترده تر مانند ساختمان های مسکونی پتانسیل هیدروژن به چند عامل بستگی دارد: قیمت هیدروژن، هزینه تکنولوژی و قیمت هیدروژن تحویلی به مصرف کننده. قیمت هیدروژن تحویلی به مصرف کننده تقریبا باید بین 1.5 تا 3 دلار برای هر کیلوگرم باشد. ولی همچنان ممکن است این قیمت نیز با گاز طبیعی در رقابت باشد و در برخی از کشورها استفاده از گاز طبیعی ترجیح داده شود. برای جلوگیری از این عمل و تشویق به استفاده از هیدروژن باید قانون گذاری هایی در زمینه کاهش تولید دی اکسید کربن و افزایش قیمت سوخت هایی که تولید آلاینده می کنند انجام گیرد.

اگر 100 درصد هیدروژن در نهایت قادر به رقابت از نظر سرمایه و هزینه های عملیاتی باشد. پتانسیل استفاده از آن در ساختمان ها بسیار زیاد می باشد. تقاضای گرمایش ساختمان در آینده نیز به عنوان بخش اصلی انرژی ساختمان باقی خواهد ماند حتی در سناریو های کم کربن. در قرارداد پاریس بخش گرمایش ساختمان تقریبا 50 درصد از انرژی ساختمان را در سال 2030 تشکیل می دهد.

منطقه	تقاضا گاز طبیعی (میلیون تن)	قیمت رقابتی برای هیدروژن (دلار/کیلوگرم هیدروژن)	تقاضا هیدروژن (میلیون تن هیدروژن)
کانادا	21	0.8-1.2	0.7-11
ایالات متحده	147	1.2-1.5	5.1-7.7
اروپا	80	2.0-3.0	0.5-0.7
ژاپن	14	2.0-3.5	0.4-0.6
کره	11	0.9-1.9	2.8-4.2
روسیه	43	1.5-1.8	1.5-2.2
چین	51	1.2-1.4	1.8-2.7

جدول 3 تقاضا گاز طبیعی و هیدروژن جایگزین در سال 2030 به تفکیک مناطق

دستیابی به سطوح بالای استفاده از هیدروژن در ساختمان ها و سطح بالقوه بالاتر در طولانی مدت با موانعی مواجه است. از جمله: اجرای این طرح ها نیازمند هزینه سرمایه اولیه بالاتر و هزینه انرژی بالاتر است، همچنین نگرانی های بخش ایمنی کار، که ممکن است مشتری کمتری داشته باشد. پروژه های تحقیقاتی و همچنین مشارکت قوی دولت و بخش های خصوصی برای یافتن راه های غلبه بر این موانع نیاز است. درک پتانسیل استفاده از هیدروژن در ساختمان ها و حرکت به سوی استفاده از انرژی های کم کربن در ساختمان نیازمند به چند مورد مهم زیر است:

- هماهنگی بین سیاستگذاران، صنعت و سرمایه گذاران
- تعامل بیشتر مصرف کنندگان با بخش خدمات تجهیزات مانند نصب کننده ها
- حذف موانع احتمالی برای استفاده از هیدروژن با اقداماتی مانند بهبود سیاست
- ارائه بیانات واضح درمورد انتظارات دولت برای شدت تولید کربن آینده
- حمایت از نوآوری هایی که در این زمینه مطرح و آزمایش می شوند

سیستم های تولید برق منعطف:

هیدروژن را می توان به عنوان سوخت در نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی استفاده کرد. اکثر توربین گازهای موجود می توانند سهم 3 تا 5 درصدی هیدروژن را در سوخت خود مصرف کنند و در برخی از آنها این سهم به 30 درصد نیز می رسد. این صنعت مطمئن است که می تواند تا سال 2030 توربین های استاندارد که کاملاً با هیدروژن کار کنند را تولید کنند. (طبق گفته ی ای یو توربین⁷⁷ در سال 2019).

آمونیاک نیز به عنوان یک سوخت پاک توانایی استفاده شدن در توربین های گازی را دارد. به طوری که استفاده مستقیم آمونیاک در میکرو توربین با ظرفیت 300 کیلووات موفقیت آمیز بوده است. در توربین های گازی با ظرفیت بالاتر از 2 مگاوات موانعی مانند: واکنش آمونیاک با هوا آهسته است، پایداری شعله و همچنین تولید اکسید های نیتروژن مسائلی هستند که هنوز در حال بررسی می باشند. محققان (والرا مدینان و همکاران) در سال 2018 پیشنهاد دادند که به جای سوزاندن مستقیم آمونیاک، ابتدا هیدروژن را از نیتروژن جدا کرده و آن را می سوزانیم. این جدایش نیازمند دمای 600 تا 1000 درجه سلسیوس است که در خود توربین گاز اتفاق می افتد، اگرچه این عمل تولید برق و بازده کل سیستم را کاهش می دهد.

پیل های سوختی نیز می توانند با بازده تقریباً 50-60 درصد به عنوان یک سیستم تولید برق منعطف استفاده شوند. برای انتخاب بین پیل سوختی یا سیکل ترکیبی برای تولید برق، از لحاظ اقتصادی تا حد زیادی بستگی به هزینه های سرمایه آنها دارد. اما باید این هم در نظر داشت که پیل های سوختی عمر فنی کوتاه تری نسبت به نیروگاه های سیکل ترکیبی دارند و همچنین پیل های سوختی توان خروجی کمتری دارند (تا 50 مگاوات که بزرگترین پیل سوختی موجود است) در مقایسه با سیکل های ترکیبی که می توانند به 400 مگاوات خروجی دست یابند. گرمای تولید شده از پیل سوختی می تواند از طریق یک مبدل حرارتی با یک سیستم توربین بخار کوپل شود. با فرض های خوشبینانه هزینه سرمایه ای مورد نیاز برای 1 کیلووات برق از طریق پیل سوختی می تواند از 1600 دلار زمان حال به 425 دلار در سال 2030 برسد. هزینه سرمایه ای مورد نیاز برای 1 کیلووات برق از طریق سیکل ترکیبی در حال حاضر 1000 دلار است.

⁷⁷ EU Turbine

هیدروژن و آمونیاک می‌توانند انعطاف پذیری کم کربن را برای سیستم های برق ارائه دهند مخصوصا در زمان حال حاضر که انرژی الکتریکی بدست آمده از نیروهای تجدیدپذیر متغیر است. افزایش سهم انرژی های تجدید پذیر نیازمند ذخیره بلندمدت است مثلا ذخیره سازی برای چندروز کم آفتاب یا کم باد. هیدروژن و سوخت های مبتنی بر هیدروژن (مانند متان مصنوعی) و آمونیاک تولید شده از الکتریسیته (از طریق الکترولیز) گزینه های بالقوه ای برای ذخیره سازی طولانی مدت و مقیاس بزرگ هستند. غارهای نمکی بهترین انتخاب برای ذخیره سازی زیرزمینی هستند. همچنین تبدیل برق به متان یک گزینه ی مناسب برای ذخیره سازی است زیرا که می‌تواند از زیرساخت هایی که برای ذخیره سازی و حمل و نقل گاز طبیعی فراهم شده اند استفاده کند. آمونیاک نیز فرم دیگری برای ذخیره سازی انرژی می‌باشد که باید در مخازن فولادی بزرگ ذخیره شود. در حال حاضر معمولا در صنعت کودسازی از ذخیره آمونیاک استفاده می‌شود.

1. Winter, C.-J., *Hydrogen energy—Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change*. International journal of hydrogen energy, 2009. **34**(14): p. S1-S52
2. Queen's :08Scott, D.S., *Smelling land: the hydrogen defense against climate catastrophe*. 20. Printer Publishing
3. .Dinçer, İ. and C. Zamfirescu, *Sustainable hydrogen production*. 2016: Elsevier
4. de Miranda, P.E.V., *Hydrogen energy: sustainable and perennial*, in *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. 2019, Elsevier. p. 1-38
5. Ball, M. and M. Wietschel, *The future of hydrogen—opportunities and challenges*. International journal of hydrogen energy, 2009. **34**(2): p. 615-627
6. IEA, *Global Hydrogen Review*. 2021: p. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
7. IEA, *The Future of Hydrogen*. IEA PARIS, 2019: p. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
8. Bünger, U., et al., *Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications*, in *Compendium of hydrogen energy*. 2016, Elsevier. p. 133-163
9. Bünger, U., et al., *Power-to-gas (PtG) in transport status quo and perspectives for development*. Report to the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI), Germany, 2014
10. Leaver, J., *International Energy Agency (IEA) strategic initiatives and activities for hydrogen*. 2019
11. Haeseldonckx, D. and W. D'haeseleer, *The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(10-11): p. 1381-1386
12. Ohlig, K. and L. Decker. *The latest developments and outlook for hydrogen liquefaction technology*. in *AIP conference proceedings*. 2014. American Institute of Physics
13. al., *Shell Hydrogen Study Energy of the Future*. Sustainable mobility though fuel cells Jörg, A., et and H, 2017. **2**
14. .Nederland, N., *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. GT-170272, viewed, 2018. **10**
15. Association, W.S., *World Crude Steel Production—Summary*. World Steel Association: Brussels, Belgium, 2020
16. .Emissions, B.Z., *Zero carbon industry plan: electrifying industry*. 2018