

# هیدروژن، نقش تعیین کننده در عرضه انرژی آینده - زیرساختها، شکل گیری بازار و زنجیره عرضه

علی نوری - رئیس بهینه سازی انرژی در نفت و گاز بخش صنعت

## 1- مقدمه

یکی از سوخت‌هایی که تجدیدپذیر نیست، اما در زمره انرژی‌های پاک قرار می‌گیرد و بسیاری از کشورها برای مقابله با گرمایش جهانی در حال سرمایه‌گذاری روی آن هستند، هیدروژن است. توسعه موفقیت آمیز فناوری های انرژی هیدروژنی دارای چندین مزیت و فواید است. توسعه انرژی هیدروژنی می تواند از گرم شدن کره زمین جلوگیری کرده و همچنین امنیت انرژی را برای کشورهای فاقد منابع انرژی کافی تضمین کند. توسعه موفقیت آمیز هیدروژن انرژی را برای حمل و نقل و بخش نیروگاهی فراهم می کند. هیدروژن یک حامل انرژی منحصر به فرد است، زیرا می تواند از منابع مختلف انرژی مانند انرژی تجدیدپذیر، سوخت های فسیلی و زیست توده تولید گردد و در هنگام احتراق، هیچ نشر گاز CO<sub>2</sub> از خود تولید نمی کند. مزیت دیگر، گسترده گی توزیع منابع در سطح جهان که می توان از آن برای تولید هیدروژن استفاده شود.

فارغ از روش‌های گوناگون تولید هیدروژن که در حال حاضر اغلب با سوزاندن سوخت‌های فسیلی خصوصاً گاز طبیعی انجام می‌شود (روش غیر سبز) و یا در مقابل روش سبز که از تجدیدپذیرها در این فرآیند استفاده می‌شود وجود دارد، چگونگی ایجاد زیرساخت برای توزیع سوخت هیدروژن محل سوال است. بازار هیدروژن در مراحل ابتدایی خود است، اما به‌عنوان یک ستون اصلی گذار انرژی در اروپا در نقش یک جایگزین پاک‌تر برای گاز طبیعی در طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کشورها معرفی می‌شود.

در این مقاله ابتدا روش‌ها تولید هیدروژن اشاره می‌شود و سپس به زنجیره ارزش تولید هیدروژن و زیرساخت‌های لازم جهت توسعه بازار عرضه هیدروژن، اشاره می‌گردد.

## 2- روشهای تولید و توزیع گاز هیدروژن

زیرساخت سوخت هیدروژن را می توان به روشهای گوناگون طراحی نمود. کارشناسان معتقدند که منابع تولید هیدروژن و نحوه انتقال و توزیع آن متناسب با شرایط و مزایای جغرافیایی متفاوت خواهد بود. بعنوان مثال در مناطقی که منابع گاز طبیعی ارزان وجود دارد تولید هیدروژن از منابع گازی به صرفه ترین روش می باشد. در منطقه ای که منابع برق ارزان در دسترس باشد، از منابع برق و با روش الکترولیز آب، تولید هیدروژن توجیه اقتصادی دارد و در مناطقی که سوخت‌های دیگری مانند اتانول وجود داشته باشد، اتانول بعنوان منبع اولیه هیدروژن مزیت ویژه ای دارد.

روشهای تولید و توزیع هیدروژن عبارتند از

1- تولید انبوه هیدروژن بصورت متمرکز

○ توزیع بصورت هیدروژن مایع

○ توزیع بصورت گاز فشرده شده

○ توزیع بصورت جامد(گاز ذخیره شده در هیدریدهای فلزی)

2- تولید گاز هیدروژن در جایگاههای سوخت گیری (غیرمتمرکز)

○ تبدیل گاز طبیعی به هیدروژن با پروسه تبدیل گاز توسط بخار(Steam Reformer)

○ تبدیل گاز طبیعی به هیدروژن توسط اکسیداسیون جزئی(Partial Oxidation Reformer)

○ با روش الکترولیز قلیایی آب

○ به روش الکترولیز با غشاء پلیمری

3- تولید گاز هیدروژن بر روی خودرو

○ استفاده از بنزین یا گازوئیل بعنوان سوخت و تبدیل آن به هیدروژن در مبدل موجود در خودرو

○ استفاده از متانول و یا هر سوخت مایع مناسب دیگر بعنوان سوخت و تبدیل آن به هیدروژن در مبدل

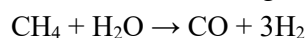
امروزه هیدروژن را می توان از فرایندهایی همچون الکترولیز آب، رفرمینگ گاز طبیعی و اکسیداسیون جزئی سوختهای فسیلی بدست آورد. در حال حاضر ۹۸٪ از کل هیدروژن تولید شده در جهان از سوختهای فسیلی بدست می آید. در آینده نزدیک از سوخت هیدروژن برای حرکت در آوردن وسایل نقلیه، گرم کردن و غذاپختن در خانه ها، استفاده می شود. در حال حاضر هیدروژن تولیدی در صنعت بعنوان یک فرآورده شیمیایی و نه بعنوان یک سوخت تلقی می شود. فروش تجاری هیدروژن کمتر از ۱۰٪ میزان تولید آن در دنیا می باشد که این رقم بالغ بر بیست میلیون تن در سال تخمین زده می شود. بدین معنی که ۹۰٪ هیدروژن تولیدی درمحل تولید به مصرف می رسد. بعنوان مثال امروزه صنایع هیدروژنی در ایالات متحده آمریکا سالیانه نه میلیون تن هیدروژن تولید می کند که این میزان سوخت مورد نیاز ۲۰ تا ۳۰ میلیون وسیله نقلیه هیدروژن سوزو تعداد ۵ تا ۸ میلیون خانوار را تأمین می کند. امروزه تنها سهم کوچکی از هیدروژن تولیدی بعنوان یک حامل انرژی مورد استفاده قرار می گیرد.

دانشیته کم انرژی هیدروژن در حالت گاز، کاربرد هیدروژن را به عنوان حامل انرژی با مشکل روبرو می سازد. بدین معنی که نسبت به سوختهای مایع همچون بنزین یا متانول از انرژی کمی به ازای هر واحد حجم برخوردار است. بنابراین بارگیری هیدروژن گازی (تحت فشار متوسط و پایین) به مقداری که برد حرکتی قابل قبولی را برای خودروی پیل سوختی تأمین نماید، کاری مشکل به نظر می رسد. هیدروژن مایع از دانشیته انرژی خوبی برخوردار است (حدود 120.7 کیلو ژول به ازاء هر کیلوگرم) اما باید در دمای بسیار پایین ( 253 درجه سانتیگراد زیر صفر ) و فشارهای بالا ذخیره شود که این مسئله ، ذخیره سازی و حمل و نقل آن را مشکل می سازد.

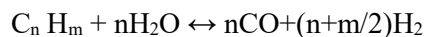
سوختهای متداول همچون گاز طبیعی ، پروپان و بنزین و سوختهایی مانند متانول و اتانول ، همگی در ساختار مولکولی خود هیدروژن دارند. با بکارگیری مبدل نصب شده بر روی خودرو (onboard) یا مبدلهایی که در محلهای سوخت گیری نصب می شوند، می توان هیدروژن موجود در این سوختها را جدا کرده و به عنوان سوخت در پیل سوختی مورد استفاده قرار داد. بدین ترتیب مشکل ذخیره سازی هیدروژن و توزیع آن تقریباً بطور کامل رفع می شود. کار مبدل سوخت فراهم آوردن هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی با استفاده از سوختهایی است که در دسترس بوده و حمل و نقل آن آسان می باشد. مبدلهای سوخت باید توانایی انجام این کار را با حداقل آلودگی و بالاترین راندمان داشته باشند. عملکرد مبدلهای سوخت به زبان ساده عبارت است از اینکه یک سوخت سرشار از هیدروژن را به هیدروژن و محصولات فرعی دیگر تبدیل نماید.

### مبدل گاز طبیعی تبدیل با بخار آب (Steam Reformer)

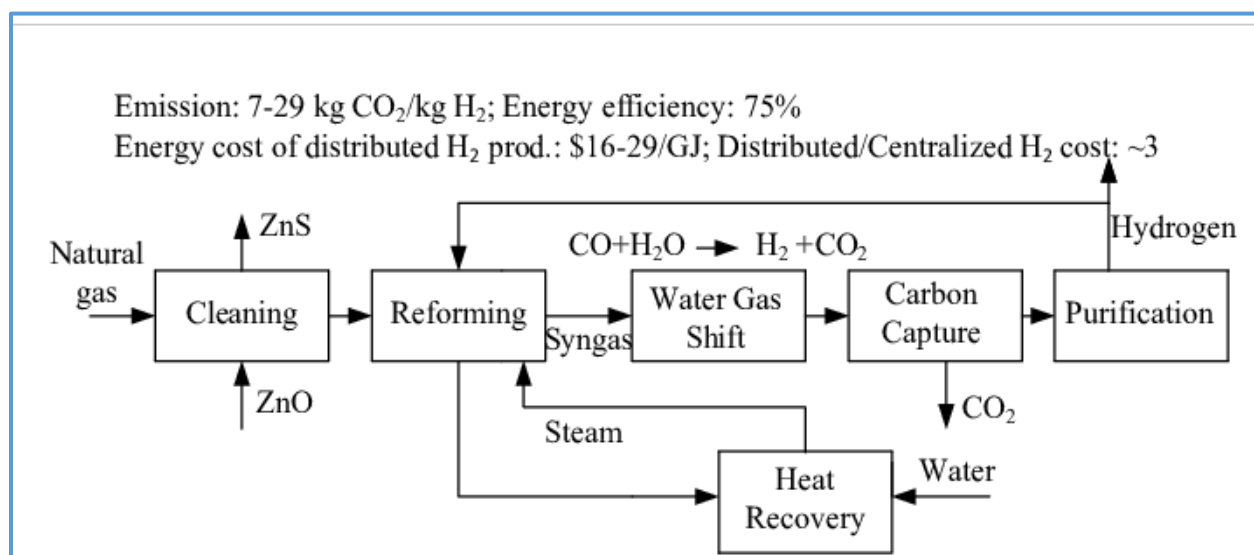
تبدیل گاز طبیعی توسط بخار یکی از روشهای متداول تولید هیدروژن می باشد. متان (عنصر اصلی گاز طبیعی) در واکنش تعادلی با بخار شرکت می کند و محصول واکنش بطور عمده هیدروژن و گاز مونوکسید کربن می باشد (فرآیند شکل (1)):



نقش اصلی بخار در واکنشهای تبدیل با بخار این است که تعادل را به سمت تولید CO و H<sub>2</sub> هدایت می کند و با توجه به تعادلی بودن واکنش، با کاهش فشار، واکنش به سمتی پیش می رود که تعداد بیشتری مولکول هیدروژن تولید شود. علاوه بر متان سایر هیدروکربنها نیز می توانند در واکنش تبدیل با بخار آب شرکت کرده و تولید هیدروژن نمایند. از اینرو شکل عمومی واکنش تبدیل بخار آب را می توان بصورت ذیل نشان داد:



این واکنش بشدت گرماگیر بوده و برای تولید بیشتر هیدروژن و مونوکسید کربن باید واکنش در شرایط دمای بالا و فشار پائین انجام شود. فشار معمولاً ثابت می باشد؛ بنابراین بالا بردن درجه حرارت واکنش را به سمت تولید هیدروژن پیش می برد. برای تأمین چنین حرارت بالایی (حدود ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد) راکتوری که واکنش در آن انجام می شود را در بخش تشعشعی یک کوره قرار می دهند.



شکل (1)- فرآیند تولید هیدروژن از گاز طبیعی

### مبدل گاز طبیعی تبدیل با استفاده از اکسیداسیون جزئی

در مواردی که استفاده از گاز طبیعی اقتصادی نباشد یا نفت سنگین به قیمت ارزان در دسترس باشد از اکسیداسیون جزئی برای تولید هیدروژن استفاده می شود. باقیمانده های حاصل از فرایندهای شیمیایی ترجیحاً برای تولید هیدروژن و مونوکسید کربن استفاده می شود. اکسیداسیون جزئی یک واکنش گرمازا بوده و در دمای بالا (بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد) بدون وجود کاتالیست انجام می گیرد. مزیت استفاده از این روش بر فرایندهای کاتالیستی این است که دیگر نیازی به پاکسازی موادی نظیر مشتقات گوگرد دار نیست.

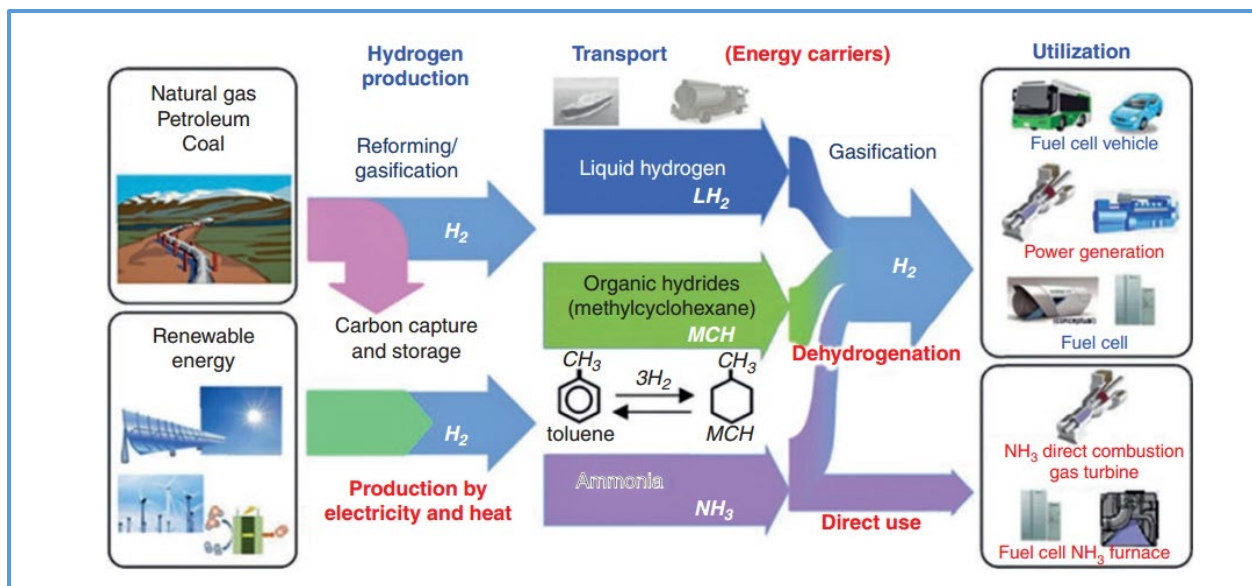
## سایر روش های تولید بر اساس نوع کاربرد

پیل های سوختی کاربردهای عمده ایی در بخش حمل و نقل و نیروگاهی دارند. پیل سوختی جهت تولید انرژی با راندمان بهینه ، نیازمند تجهیزات جانبی بنام سیستم پیل سوختی است که شرایط بهینه عملکرد برای پیل سوختی ، شامل خلوص سوخت ، مقدار هوا و سوخت ورودی به سری پیل سوختی ، رطوبت گازها و مدیریت آب ، کنترل دما و نهایتا فشار گازها در سیستم و سری پیل سوختی را کنترل نمایند. یک سیستم پیل سوختی را می توان به سه قسمت عمده شامل بخش سوخت رسانی (مبدل سوخت و سیستم ذخیره هیدروژن) ، بخش تولید انرژی شامل سری پیل سوختی و سیستم کنترل رطوبت ، فشار ، دما و دبی گازها و نهایتا بخش تبدیل انرژی که مربوط به فصل مشترک بین پیل سوختی و مصرف کننده برق جهت تبدیل جریان و ولتاژ برق به ولتاژ و جریان مناسب می باشد، تقسیم نمود.

متناسب با نوع پیل سوختی و کاربرد آن ، این سیستمها ساده و یا پیچیده می باشند، به عنوان نمونه در پیل های سوختی نیروگاهی ، بخش مبدل سوخت که سوختهای فسیلی ، بیومس و یا ... را تبدیل به هیدروژن خالص می نماید، بخش پیچیده و اصلی سیستم سوخت رسانی را تشکیل می دهد. در مصارف خودرویی سیستم سوخت رسانی بنا به نوع زیر ساخت سوخت موجود می تواند دو شکل زیر را به خود بگیرد: در صورتی که هیدروژن در جایگاه سوخت گیری تولید شود، سیستم ذخیره سوخت خودرو می تواند روش های مختلفی از قبیل ذخیره هیدروژن در مخازن تحت فشار ، بکار گیری نانو تیوبها ، بکار گیری جاذب های هیدرید فلزی ، بکار گیری هیدریدهای شیمیایی و ... را شامل شود. در صورت تولید هیدروژن در خودرو ، مبدل سوخت (بالاخص مبدل بنزین و متانول) قابل نصب بر روی خودرو بخش اصلی و پیچیده سیستم سوخت در خودرو را شامل می گردد.

### 3- زنجیره ارزش عرضه هیدروژن

سیستم تامین هیدروژن از پنج مرحله تشکیل شده است که شامل تولید هیدروژن و تبدیل به حامل هیدروژن، حمل و نقل دریایی حامل های هیدروژن، ذخیره سازی حامل هیدروژن و استفاده از هیدروژن است که در شکل (2) نشان داده شده است. انتظار می رود هیدروژن از ذغال سنگ درجه پایین (لیگنیت)، گاز همراه نفتی، گاز طبیعی و فرآیندهای عمدتا با مصارف برق شامل الکترولیز و حرارتی شامل ترمولیز آب که در این موارد عمدتا از منابع تجدیدپذیر استفاده می شود، تولید شود. روشهای انتقال هیدروژن عمدتا شامل هیدروژن مایع شده، از طریق تولید متیل سیکلو هگزان / تولوئن و آمونیاک می باشند که میتواند انرژی لازم برای فرآیند تولید از منابع تجدیدپذیر استفاده گردد. در انتهای زنجیره عرضه آمونیاک و تولوئن هیدروژن زدایی می گردند.



شکل (2) - زنجیره ارزش تولید و عرضه هیدروژن

تولید methyl cyclohexane (MCH) بمنظور کاهش هزینه انتقال هیدروژن می باشد. ایده اساسی تولید MCH در نقطه تولید انرژی با هیدروژناسیون تولوئن است که پس از رسیدن MCH به محل مقصد، هیدروژن زدایی می شود. در واقع سه مولکول H<sub>2</sub> با هر مولکول تولوئن قابل حمل هستند.

آمونیاک نیز برای کاهش هزینه انتقال هیدروژن استفاده می گردد و همچنین آمونیاک می تواند به عنوان سوخت در نیروگاههای تولید برق بکارگرفته شود. فرآیند تولید آمونیاک مشابه تولید آمونیاک در واحدهای پتروشیمی که از سنتز نیتروژن و هیدروژن استفاده می گردد که آمونیاک تولیدی از این روش آمونیاک سبز نامیده می شود. البته این فرآیند دو تا چهار برابر تولید آمونیاک از گاز طبیعی هزینه برتر خواهد بود.

امروزه فن آوری های توربین جهت تولید برق از گاز هیدروژن در حال توسعه می باشند. فناوری های تولید برق به دو گروه عمده یعنی احتراق همزمان گاز طبیعی و هیدروژن و تولید برق مستقیماً از احتراق هیدروژن تقسیم می گردند. در این میان توسعه فناوری تولید برق از احتراق هیدروژن توسط شرکت میتسوبیشی از سال 2018 آغاز شده است که انتظار می رود شرکت مذکور در سال 2025 به تولید اولین نمونه آن دست یابد.

تولید برق مستقیماً از آمونیاک یک راه حل استفاده از هیدروژن در تولید برق هست. آمونیاک حاصل از تولید توسط هیدروژن از طریق منابع تجدید پذیر دارای خواص زیر است:

- 1- فرآیند تولید آمونیاک سبز خود عاری از کربن است، هیچ تأثیر مستقیم گاز گلخانه ای ندارد و می تواند با یک فرآیند کاملاً بدون کربن از منابع انرژی تجدید پذیر سنتز شود.

2- آمونیاک چگالی انرژی  $22.5 \text{ MJ / kg}$  دارد، که قابل مقایسه با سوخت های فسیلی (ذغال سنگ های دارای درجه پایین حدود  $20 \text{ MJ / kg}$  می باشد. گاز طبیعی چگالی حدود  $55 \text{ MJ / kg}$ ، چگالی انرژی LNG  $54 \text{ MJ / kg}$  و هیدروژن  $142 \text{ MJ / kg}$  می باشد.)

3- می توان آن را به راحتی با فشرده سازی تا فشار  $0.8 \text{ MPa}$  در دمای جو به مایع تبدیل نمود.

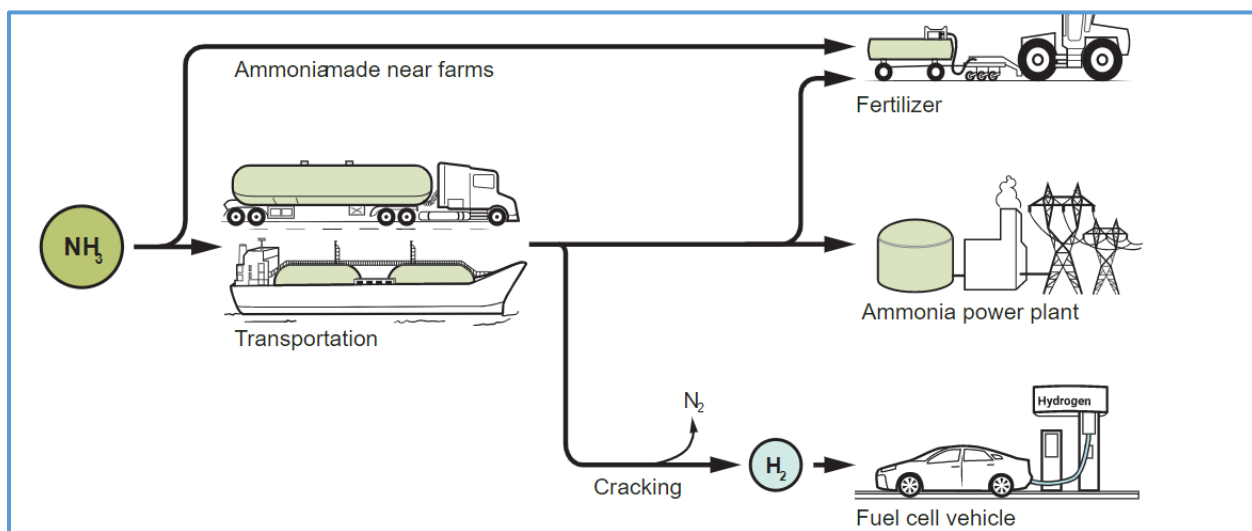
احتراق آمونیاک در محفظه احتراق توربین خود باعث تولید آب و دی اکسید نیتروژن طبق رابطه زیر می گردد:



در حال حاضر شرکت میتسوبیشی در نظر دارد تا فناوری تولید برق از آمونیاک را به ظرفیت 40 مگاوات توسعه دهد.

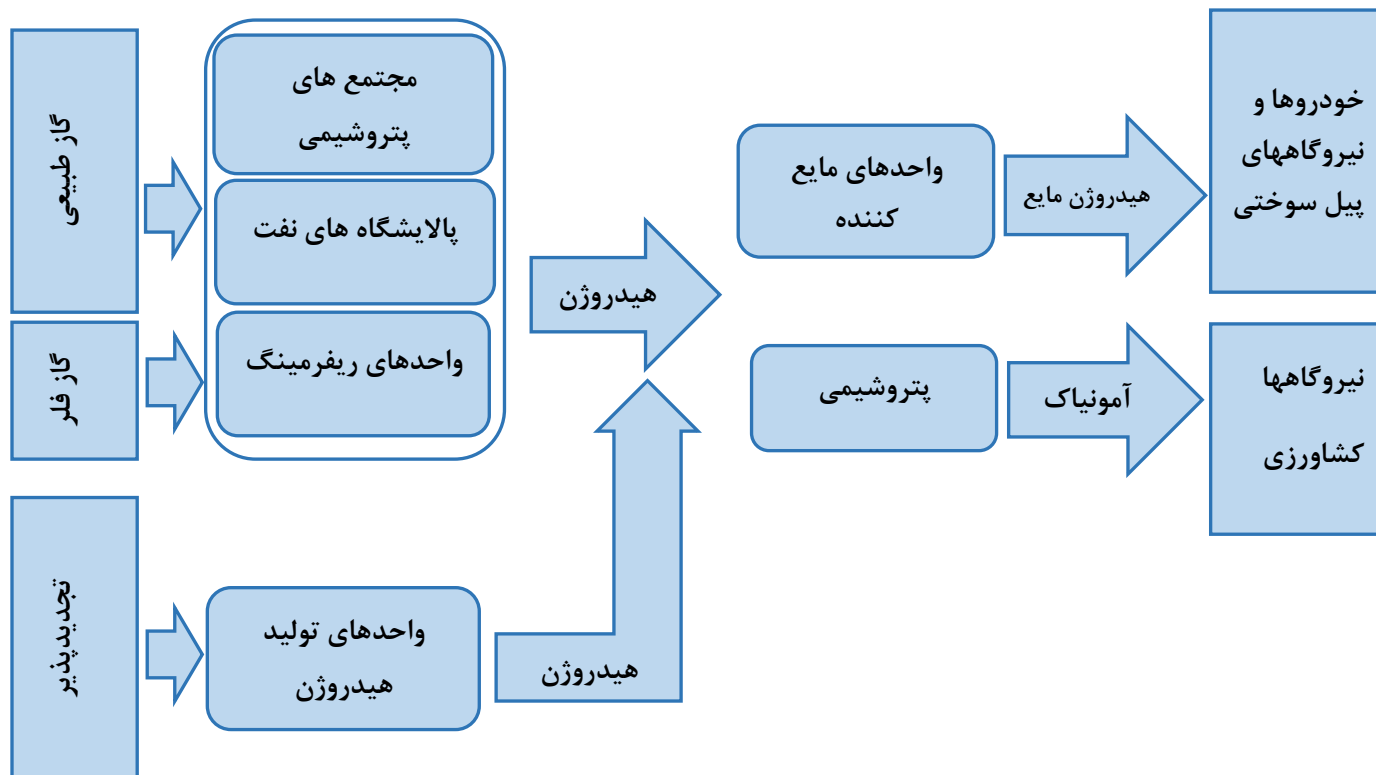
ویژگی آمونیاک این است که در حال حاضر زیرساخت قابل اعتماد برای ذخیره سازی و توزیع آمونیاک (از جمله خط لوله، راه آهن، جاده و کشتی) وجود دارد که می تواند هزینه و ریسک انتقال و توزیع هیدروژن را کاهش دهد. امروزه سالانه حدود 180 میلیون تن  $\text{NH}_3$  تولید و حمل می شود. در استراتژی های اساسی هیدروژن در کشورهای پیشرفته، سه اقدام برای دستیابی به کاهش هزینه ارائه داده شده است. این سه روش شامل کسب منابع و حاملهای انرژی ارزان قیمت، ایجاد زنجیره های تأمین هیدروژن در مقیاس بزرگ و استقرار مصرف گسترده هیدروژن به عنوان سوخت خودروها، تولید برق و مصارف صنعتی می باشد.

در شکل (3) زنجیره عرضه آمونیاک و استفاده به عنوان حامل انرژی هیدروژن و سوخت مستقیم در واحدهای نیروگاهی، خودرو و مصارف کشاورزی را نشان می دهد(5).



شکل(3)- زنجیره عرضه آمونیاک به عنوان حامل هیدروژن و سوخت

در شکل (4) زنجیره عرضه هیدروژن براساس ویژگیها و صنایع مرتبط در کشور ارائه شده است. این صنایع شامل پالایشگاههای نفت، مجتمع های پتروشیمی، منابع نفت و گاز و منابع تجدیدپذیر می باشد.



شکل(4)- زنجیره عرضه هیدروژن در کشور

#### 4- نتیجه گیری

فارغ از روش های گوناگون تولید هیدروژن که در حال حاضر اغلب با سوزاندن سوخت های فسیلی خصوصا گاز طبیعی انجام می شود (روش غیر سبز) و یا در مقابل روش سبز که از تجدیدپذیرها در این فرآیند استفاده می شود، وجود دارد، چگونگی ایجاد زیرساخت برای توزیع سوخت هیدروژن محل سوال است. بازار هیدروژن در مراحل ابتدایی خود است، اما به عنوان یک ستون اصلی گذار انرژی در برخی مناطق دنیا مانند اروپا و ژاپن در نقش یک جایگزین پاک تر برای گاز طبیعی در طیف گسترده ای از برنامه های کشورها معرفی می شود.

کشورها می توانند به جای ایجاد شبکه های جداگانه از همان ابتدا، از زیرساخت های گاز موجود خود برای تسهیل توسعه بازار هیدروژن استفاده کنند. استفاده از زیرساخت های انتقال و توزیع گاز بصورت خط لوله و گاز طبیعی مایع (LNG) به عنوان زیرساخت هیدروژن می تواند باعث کاهش هزینه ها و ریسک های مربوطه گردد. به عنوان مثال می توان از ترمینال های واردات گاز طبیعی مایع (LNG) می توانند برای واردات هیدروژن مایع (LH<sub>2</sub>) در آینده استفاده شوند.

روش دیگر اینست که صادر کنندگان گاز طبیعی عمده مانند روسیه و نروژ گاز را پیش از ارسال از طریق خط لوله کربن‌زدایی و هیدروژن تولید و سپس آن را از طریق شبکه‌های بزرگ خود به مشتریان ارسال کنند. راه جایگزین هم می‌تواند این باشد که آنها مانند سابق به صادرات گاز طبیعی ادامه دهند و خود مشتریان در مقصد پس از دریافت گاز، فرآیند کربن‌زدایی را پیش بگیرند. در واقع اعتقاد بر این است که بدلیل فرآیند تولید هیدروژن که عمدتاً از گاز طبیعی می‌باشد و روش انتقال در حال حاضر نباید بازارهای مجزا برای گاز و هیدروژن و برای کاهش ریسک و هزینه‌ها می‌توان هیدروژن را درون بازار گاز طبیعی معامله شود.

در حال حاضر استفاده از آمونیاک و تولوئن برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های انتقال و توزیع هیدروژن، ایده مناسبی جهت توسعه بازار هیدروژن در آینده بنظر می‌رسد. البته از آمونیاک نیز می‌توان به عنوان سوخت نیروگاهی، مستقیماً بکار برد که در حال حاضر شرکتهای سازنده نیروگاهی مشغول کار بر توسعه این نوع فناوریهای مربوطه می‌باشند.

## 5- مراجع

- (1) <http://hydrogen.satba.gov.ir/fa/overviewhfc/overviewhydrogen/productiondistribution>.
- (2) <http://irrea.ir/hydrogen>.
- (3) Shigeki Iida1 and Ko Sakata ,Hydrogen technologies and developments in Japan, Clean Energy, 2018, 1–9.
- (4) <https://cen.acs.org/business/petrochemicals/ammonia-fuel-future/99/i8>
- (5) <https://www.powermag.com/mitsubishi-power-developing-100-ammonia-capable-gas-turbine/>
- (6) Medina, Xiao, Ammonia for power, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 69, November 2018, Pages 63-102.
- (7) <https://www.sciencemag.org/news/2018/07/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon>
- (8) Ministry of Economy Trade and Industry of Japan. The Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells. 2016. [http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0322\\_05.html](http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0322_05.html)
- (9) Karabeyoglu, E Brian, Fuel conditioning system for ammonia fired power plants, NH3 Fuel Association (2012), Available online <https://nh3fuel.files.wordpress.com/2012/10/evans-brian.pdf> [2016-11-21]



