مقایسه فرآیندهای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای و چشم‌انداز آینده آن‌ها در ایران

سبحان حرفت[۱]، میلاد پیرهادی[۲]، مجید چگنی[۳]، مجید زندی[۴*]

۱. دانشجو دکترا، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. شرکت ملی گاز ایران، تهران، ایران

۴. دانشیار، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: m_zandi@sbu.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۷۰ - ۹۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

چکیده

هیدروژن، به‌عنوان یک عنصر سبک و فراوان، نقشی کلیدی در توسعه انرژی‌های پاک ایفا کرده و ظرفیت بالایی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. این پژوهش باهدف ارزیابی و مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، به‌عنوان دو گزینه اصلی تولید هیدروژن کم‌کربن و بررسی پتانسیل آن‌ها در کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی انجام شده است. روش‌های تولید هیدروژن آبی شامل تولید هیدروژن از متان و بخار آب همراه با واحد جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن و روش تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق فرآیند پیرولیز متان و تولید کربن جامد مورد بررسی قرار گرفتند. در این راستا، مقایسه‌ای میان هزینه‌ها، کارایی و چالش‌های زیست‌محیطی هر دو نوع هیدروژن صورت گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهند که هیدروژن فیروزه‌ای با تولید کربن جامد به‌جای گازهای گلخانه‌ای، گزینه‌ای پایدارتر و مناسب‌تر از نظر زیست‌محیطی است. بر اساس برخی از داده‌ها برای تولید هر کیلوگرم هیدروژن، بین ۱۲ تا ۱۳/۵ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای آزاد می‌شود، درحالی‌که هیدروژن فیروزه‌ای با استفاده از پیرولیز متان، انتشار مستقیم صفر دی‌اکسید کربن دارد. از سوی دیگر، میزان مصرف انرژی در تولید هیدروژن فیروزه‌ای تا ۳۰ درصد کم‌تر از روش‌های مرسوم تولید هیدروژن آبی گزارش شده است که نشان‌دهنده مزیت آن از نظر بهره‌وری انرژی است. در ایران، برای گذار از وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به سمت تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، ایجاد زیرساخت‌ها، فناوری‌های پیشرفته و سیاست‌گذاری‌های کلان ضروری است. این امر نیازمند بهره‌گیری از منابع موجود، توسعه دانش بومی و سرمایه‌گذاری‌های جدید است. پژوهش حاضر بر اهمیت توسعه فناوری‌های مرتبط با تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای تأکید داشته و نیاز به تجهیز و به‌روزرسانی فناوری‌ها برای بهره‌برداری بهینه از این منابع انرژی پاک را موردتوجه قرار داده است.

کلید واژه‌ها: هیدروژن آبی، هیدروژن فیروزه‌ای، تولید هیدروژن از متان و بخار آب (SMR)، جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS)

۱. مقدمه

سامانه انرژی جهانی نیازمند گذار به‌سوی کربن‌زدایی است تا ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرهای آب‌وهوایی نیز کنترل شود. امنیت انرژی و مقرون‌به‌صرفه بودن سوخت تولیدی نیز از جنبه‌های کلیدی این گذار محسوب می‌شوند که باید در کنار کاهش آلایندگی مورد توجه قرار گیرند. باوجود افزایش تلاش‌ها برای کاهش کربن، مسیر دقیق آینده کم‌کربن هنوز روشن نیست و به همین دلیل نقش سوخت‌ها و فناوری‌های جایگزین که برای کمک به این گذار در نظر گرفته شده‌اند با عدم قطعیت همراه است. درحالی‌که انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای در حال افزایش است، هیدروژن به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در آینده انرژی جهانی شناخته شده و ظرفیت‌های مهمی برای تأمین امنیت انرژی و کاهش اثر زیست‌محیطی دارد[۱]. هیدروژن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردش، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، هیدروژن در حمل‌ونقل نقشی کلیدی ایفا می‌کند و به‌ویژه در سوخت خودروهای الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی، کامیون‌ها، اتوبوس‌ها و حتی کشتی‌ها و هواپیماها به‌کار می‌رود. در حوزه تولید برق، هیدروژن به‌عنوان یک راه‌کار ذخیره‌سازی انرژی عمل می‌کند. در این فرآیند، انرژی مازاد تولیدشده از منابع تجدیدپذیر، مانند باد و خورشید، برای الکترولیز آب استفاده می‌شود. در فرآیند الکترولیز، آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود که هیدروژن تولیدشده ذخیره می‌گردد. سپس، در زمان نیاز، هیدروژن ذخیره‌شده از طریق فرآیندهایی مانند احتراق یا استفاده در پیل‌های سوختی، مجدداً به برق تبدیل می‌شود.

در صنایع انرژی‌بر، هیدروژن نقش مهمی در تولید آمونیاک ایفا کرده و به‌عنوان ماده اولیه در تولید کودهای شیمیایی استفاده می‌شود. در پالایشگاه‌ها، هیدروژن برای فرایندهایی مانند هیدرو کراکینگ و حذف گوگرد از سوخت‌های فسیلی کاربرد دارد. هم‌چنین در صنعت فولاد، استفاده از هیدروژن به‌عنوان جایگزین کربن در احیای سنگ‌آهن می‌تواند به کاهش قابل‌توجه انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند. این گستره کاربردها، همراه با امکان تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر و آب‌شیرین‌سازی، آن را به گزینه‌ای استراتژیک برای تحقق اهداف زیست‌محیطی و توسعه پایدار تبدیل کرده است[۲]. هرچند هیدروژن به‌طور عمومی به‌صورت خالص در طبیعت وجود ندارد اما فرآیندهای مختلفی برای تولید آن از منابع دیگر وجود دارد. هیدروژن را می‌توان از منابع مختلفی مانند گاز طبیعی و زغال‌سنگ (با استفاده از فناوری جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن)، زیست‌توده، هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید تولید کرد. این تنوع در منابع تولید، هیدروژن را به گزینه‌ای منعطف برای تأمین انرژی تبدیل کرده است. در مجموع، هیدروژن با ویژگی‌های پاک‌سوزی، انعطاف‌پذیری و قابلیت تولید از منابع گوناگون، یکی از شاخص‌های کلیدی در آینده سبد انرژی جهانی به‌شمار می‌رود و می‌تواند گذار به سامانه پایدارتر و ایمن‌تر را تسهیل کند[۳].

۱-۱. مصرف جهانی انرژی

روند مصرف جهانی انرژی نشان می‌دهد، تقاضای برق در سال ۲۰۲۳ حدود ۲/۲ درصد افزایش یافته و انتظار می‌رود این روند تا سال ۲۰۲۶ سالانه ۳/۴ درصد افزایش یابد. در سال ۲۰۲۲، مجموع هزینه‌ی جهانی مصرف‌کنندگان برای انرژی به ۱۰ تریلیون دلار رسید که این رقم نسبت به میانگین پنج‌ساله‌ی گذشته ۲۰ درصد افزایش داشته و نشان‌دهنده‌ی فشار مالی فزاینده‌ی انرژی بر اقتصاد جهانی است. باوجود گسترش سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۲۴ همچنان سهم زیادی در تأمین انرژی جهان داشتند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی که در سال ۲۰۲۳ منتشر شد، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای جهانی برای نفت، گاز و زغال‌سنگ تا سال ۲۰۳۰ به اوج خود برسد و سهم این سوخت‌ها در تأمین انرژی از ۸۰ درصد به ۷۳ درصد کاهش یابد. هم‌چنین، برآورد شده است که تقاضای نفت در سال ۲۰۲۵ به ۱.۱ میلیون بشکه در روز برسد که نسبت به پیش‌بینی قبلی (۹۹۰ هزار بشکه) افزایش یافته است. با این حال، انتظار می‌رود که رشد تقاضای نفت همچنان محدود باشد. اگرچه آمار دقیق سال ۲۰۲۴ هنوز منتشر نشده است، اما پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که روند افزایش مصرف جهانی انرژی ادامه خواهد داشت و تغییراتی مهم در ترکیب منابع انرژی و الگوی مصرف در مناطق مختلف رخ خواهد داد. نقش هیدروژن در چشم‌انداز جهانی انرژی در سال ۲۰۲۴ گسترش یافت و به‌عنوان یک حامل انرژی پاک مورد توجه قرار گرفت. تولید جهانی هیدروژن در

سال ۲۰۲۳ به ۹۷ میلیون تن رسید و در سال ۲۰۲۴ به حدود ۱۰۰ میلیون تن افزایش یافت، تقاضای هیدروژن در سال ۲۰۲۴ نیز در پالایشگاه‌ها و صنایع متمرکز باقی ماند. این تقاضا نسبت به سال ۲۰۲۲، ۴۰ درصد رشد کرد، اما سهم هیدروژن در بخش‌های جدید مانند صنایع سنگین، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی انرژی کم‌تر از ۱ درصد از کل تقاضای جهانی را تشکیل داد[۴].

۱-۲. مزایای استفاده از هیدروژن

هیدروژن، منبعی پاک و آینده‌دار، یکی از کلیدی‌ترین راه‌حل‌ها برای چالش‌های انرژی و زیست‌محیطی قرن حاضر محسوب می‌شود. این منبع انرژی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، از کاهش آلودگی هوا تا تقویت امنیت انرژی و ایجاد فرصت‌های اقتصادی، پتانسیل بالایی برای شکل‌دهی به آینده‌ای پایدار ارائه می‌دهد. در ادامه، مزایا و چالش‌های هیدروژن بررسی خواهد شد. از نظر زیست‌محیطی، هیدروژن گزینه‌ای ارزشمند به شمار می‌رود، زیرا احتراق آن تنها بخار آب تولید کرده و هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای یا آلاینده‌ای مانند کربن مونوکسید، اکسیدهای نیتروژن یا ذره‌های معلق ایجاد نمی‌کند. این ویژگی، هیدروژن را راه‌حلی مؤثر برای کاهش آلودگی هوا، به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل، معرفی کرده و امکان کاهش چشمگیر انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد. هیدروژن سبز، تولیدشده از منابع تجدیدپذیر، با فرآیند کاملاً پاک و پایدار، هیچ‌گونه اثر مخربی بر محیط‌زیست به‌جا نمی‌گذارد. از منظر امنیت انرژی، هیدروژن باقابلیت تولید از منابع متنوع مانند خورشید، باد، زیست‌توده و انرژی هسته‌ای، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کم‌رنگ می‌سازد. روش‌های تولید هیدروژن، مانند الکترولیز آب یا اصلاح متان، انعطاف‌پذیری بالایی در تأمین این منبع انرژی به ارمغان آورده و امکان تولید محلی آن را میسر می‌کنند. این ویژگی نه‌تنها امنیت انرژی کشورها را بهبود می‌بخشد، بلکه به‌عنوان راه‌حلی بلندمدت، نیازهای انرژی آینده را به‌صورت پایدار برآورده می‌سازد.

هیدروژن با چگالی انرژی بالا، گزینه‌ای مناسب برای ذخیره و انتقال انرژی محسوب می‌شود. پیل‌های سوختی هیدروژنی با تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریسیته، عملکردی کارآمدتر از موتورهای احتراق داخلی نشان داده و مناسب سامانه‌های غیرمتمرکز و مقاومند. این ویژگی‌ها، همراه با انعطاف‌پذیری هیدروژن، کاربردهای گسترده‌ای در حمل‌ونقل، تولید برق و صنایع ایجاد می‌کند. نمونه آن در حمل‌ونقل، خودروهای پیل سوختی با برد بالا، سوخت‌گیری سریع و عدم تولید آلایندگی است که جایگزین مناسبی برای مدل‌های بنزینی به شمار می‌روند. در صنعت نیز هیدروژن به‌عنوان ماده اولیه در تولید آمونیاک یا پالایش نفت، جایگزینی پاک‌تر از روش‌های متعارف است. فراتر از مزایای زیست‌محیطی و فنی، هیدروژن نقش کلیدی در شکل‌دهی به فرصت‌های اقتصادی و اجتماعی دارد. گسترش صنایع وابسته به هیدروژن، از تولید تا توزیع، زمینه‌ساز اشتغال و محرکی برای رشد اقتصاد است. سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه فناوری‌های هیدروژنی، مانند پیل‌های سوختی پیشرفته یا روش‌های تولید پاک، عاملی برای کاهش هزینه‌ها و بهبود رقابت‌پذیری این فناوری محسوب می‌شود. چنین تحولاتی، شتاب‌دهنده نوآوری در بخش انرژی و مؤثر در پیشبرد اهداف توسعه پایدار خواهد بود. با این‌حال، استفاده گسترده از هیدروژن بدون چالش نیست. هزینه بالای تولید هیدروژن، پیچیدگی‌های ذخیره‌سازی به‌دلیل چگالی پایین و نیاز به مخازن خاص و کمبود زیرساخت‌های کافی برای توزیع و سوخت‌رسانی، از موانع اصلی پیش روی این فناوری محسوب می‌شوند. از نظر ایمنی، هیدروژن در صورت رعایت اصول مهندسی قابل کنترل است، اما خطرهای احتمالی مانند نشت یا اشتعال‌پذیری، مدیریت دقیق و استانداردهای سخت‌گیرانه را ضروری می‌سازد. غلبه بر این چالش‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری کلان، نوآوری‌های فناورانه و همکاری میان کشورهای مختلف است. در مجموع، هیدروژن با ویژگی‌های زیست‌محیطی، کارایی بالا و تطبیق‌پذیری گسترده، گزینه‌ای کلیدی برای آینده انرژی جهانی به شمار می‌رود. این منبع انرژی باقابلیت کاهش آلودگی و تقویت امنیت انرژی، همراه با خلق فرصت‌های اقتصادی و توسعه نوآوری، عاملی مؤثر در پیشبرد اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. رفع موانع پیشرو، زمینه‌ساز تحقق جهانی پاک‌تر و پایدارتر با محوریت هیدروژن خواهد بود.

۱-۳. مرور مطالعات پیشین

در (جدول ۱) برخی از پژوهش‌ها در زمینه هیدروژن آورده شده است.

جدول ۱: برخی از پژوهش‌های مرتبط در زمینه هیدروژن

ردیف	نام نویسندگان و سال	فناوری	نتایج	شرایط و پارامترها	مرجع
۱	شاولکینا و همکاران ۲۰۲۱	مشعل پلاسمای DC برای تولید نانوساختارهای کربنی	نسبت C/H تأثیرگذار بر نوع محصول، افزودن نیتروژن برای ترکیب گرافن و نانولوله‌ها	دمای پلاسمای ۳۵۰۰-۲۵۰۰ کلوین، کنترل فشار و ترکیب گازها	[۵]
۲	بلمکار و همکاران ۲۰۲۴	راکتور پلاسمای RF[1] برای تبدیل متان به نانوذره‌ها کربنی	بازده تولید ۲۱۷ میلی‌گرم/ساعت، ساختار گرافیتی باکیفیت بالا	هزینه انرژی پایین، عملکرد مشابه کربن سیاه در باتری‌های لیتیوم - یونی	[۶]
۳	چن و همکاران ۲۰۲۴	قوس پلاسما DC	استفاده از متان برای تولید نانو صفحه گرافن باکیفیت بالا، استفاده از استیلن برای تولید ذره‌های کربن کروی شکل	دمای بالا (تا ۲۵۰۰ کلوین)، مدل‌سازی شیمیایی و شبیه‌سازی حرارتی	[۷]
۴	ایشیکاوا و همکاران ۲۰۲۴	رسوب‌دهی شیمیایی بخار تقویت‌شده با پلاسما[2]	تولید ساختارهای کربنی باکیفیت بالا و حداقل نقص‌های ساختاری، تأثیر تغییر قدرت پلاسما و ترکیب گازها بر ویژگی‌های محصول	کنترل دما و فشار، قدرت پلاسما، ترکیب گازها، دمای زیرلایه، سیستم پلاسما با دیواره‌های گرم و سرد	[۸]
۵	هاتاکیاما و همکاران ۲۰۲۴	رسوب‌دهی شیمیایی بخار تقویت‌شده با پلاسما	تولید نانولوله‌های کربنی باکیفیت بالا، توزیع یکنواخت و ساختار منظم	غلظت مشخص گاز هیدروژن، پلاسما با دمای پایین	[۹]
۶	احمدنوری ۲۰۲۴	تخلیه جرقه‌ای همراه با پلاسما القایی لیزری (SD-LIP)	افزایش ولتاژ تخلیه جرقه‌ای، نرخ تجزیه متان را دو برابر کرده و کربن جامد را کاهش می‌دهد	تغییر ولتاژ تخلیه جرقه‌ای برای کنترل نرخ تجزیه متان و تشکیل محصول	[۱۰]
۷	وانگ و همکاران ۲۰۱۶	راکتور پلاسما - کاتالیست چرخشی	بازده اتیلن ۵۵ درصد، تبدیل ۲۳ درصد متان به هیدروکربن‌های سبک، بهبود انتقال جرم و کارایی انرژی	کاتالیست پایه $MgAl_2O_4$، بازچرخانی بخشی از محصول	[۱۱]
۸	گائو و همکاران ۲۰۱۸	تخلیه جرقه‌ای پالس‌های میکروثانیه‌ای و نانوثانیه‌ای	بازده تبدیل متان ۹۱/۲ درصد، بازده تولید هیدروژن ۳۸/۴ درصد، کارایی تبدیل انرژی ۴۴/۳۳ درصد	طول فاصله تخلیه، نرخ جریان گاز، ویژگی‌های الکتریکی تخلیه	[۱۲]
۹	ژانگ و همکاران ۲۰۲۲	تخلیه جرقه‌ای پالس نانوثانیه‌ای برای اصلاح خشک متان	انتخاب پارامترهای پلاسما (چگالی الکترون، دماهای ارتعاشی و چرخشی)، بهبود بازده تبدیل گازها و افزایش کارایی فرآیند	استفاده از طیف‌سنجی گسیل نوری (OES)[3] برای تعیین پارامترهای پلاسما	[۱۳]
۱۰	فولچری و همکاران ۲۰۲۴	تجزیه متان با استفاده از پلاسما	بازدهی بالا در تبدیل متان به محصول‌های ارزشمند. استفاده از الکترودهای گرافیتی، بهبود عملکرد سیستم	استفاده از الکترودهای گرافیتی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای	[۱۴]

۲. برخی از انواع هیدروژن در صنعت انرژی

۲-۱. هیدروژن سبز

هیدروژن سبز، فناوری نویدبخشی است که در سال‌های اخیر با افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی جهانی، به‌عنوان راهکاری برای گذار به انرژی پایدار مطرح شده است. این فناوری با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و برق‌آبی، هیدروژن را از طریق الکترولیز تولید می‌کند، در این فرآیند، آب با الکتریسیته به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود و در صورت تأمین الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، محصول به‌عنوان هیدروژن سبز شناخته می‌شود[۱۵].

۲-۲. هیدروژن خاکستری

گاز طبیعی که ۴۸ درصد از تولید جهانی هیدروژن را تأمین می‌کند، یکی از رایج‌ترین خوراک‌ها برای تولید این عنصر به شمار می‌رود. هیدروژن خاکستری از طریق فرآیندهایی مانند تولید هیدروژن از متان و بخار آب[4](SMR) یا تبدیل خودگرمایشی[5](ATR) تولید می‌شود. این نوع هیدروژن، به‌دلیل کارایی و هزینه‌های نسبی پایین، به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند. در این فرآیند، بخار آب با دمای بالا به گاز طبیعی تصفیه‌شده اضافه می‌شود تا طی واکنش‌های شیمیایی، هیدروژن تولید شود[۱۶]. این روش تولید هیدروژن، به‌عنوان هیدروژن خاکستری شناخته می‌شود.

1. Radio Frequency Plasma Reactor
2. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)
3. Optical Emission Spectroscopy
4. Steam Methane Reforming (SMR)
5. Auto Thermal Reforming (ATR)

۲-۳. هیدروژن آبی

هیـدروژن آبی، مانند هیـدروژن خاکسـتری از گاز طبیعی تولید می‌شـود. این نوع هیدروژن باهدف کاهش انتشـار کربن از طریـق فناوری‌های پیشـرفته مـورد توجه قرار گرفته اسـت. به‌دلیل دسـترسی فراوان به منابع گاز طبیعی، در کشورهایی با ذخایر گاز فراوان مانند ایران، هیدروژن آبی جایگاهی راهبردی در تولیـد هیـدروژن دارد. این فناوری می‌توانـد با جذب کربن، به‌عنـوان راهـکاری میانی برای گـذار به انرژی‌های پـاک مورد استفاده قرار گیرد و نقشی کلیدی در صنایع ایفا کند[۱۷].

۲-۴. هیدروژن فیروزه‌ای

هیدروژن فیـروزه‌ای از تجزیه گاز متان در دمای بالا به‌دسـت می‌آید که منجر به تولید هم‌زمان هیدروژن و کربن می‌شود. یکی از مزیت‌های اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر، مانند الکترولیز آب و SMR، کارایی بالای انرژی آن از منظر ترمودینامیکی است. در طـول سـال‌ها، چندین روش بـرای تولید هیدروژن فیـروزه‌ای از جملـه تجزیه حرارتی کاتالیزوری و غیرکاتالیزوری، اسـتفاده از فلز مذاب یا نمک مذاب، انرژی خورشیدی متمرکز و پلاسماهای غیرحرارتی مورد بررسی قرار گرفته اسـت. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند [۱۸].

۲-۵. هیدروژن نارنجی

هیـدروژن نارنـجی از بازیافت پسـماندها تولید می‌شـود و به‌عنـوان راهـکاری برای کاهـش زباله و تولید هیـدروژن پاک مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیند شامل تجزیه پسماندها در دمای بالا و اسـتخراج هیدروژن خالص از گاز سنتز است. با توجه به بحران پسماندهای پلاستیکی، تولید هیدروژن نارنجی می‌تواند نقشی مهم در کاهش آلودگی محیط‌زیسـت و تأمین هیدروژن پایدار ایفا کند[۱۹]. هزینه تولید برخی از رنگ‌های هیدروژن در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: هزینه تولید انواع هیدروژن [۲۰]

رنگ	هزینه [USD/Kg]
سبز	۲/۲۸ - ۷/۳۹
خاکستری	۰/۶۷ - ۱/۳۱
مشکی/ قهوه‌ای	۱/۲ - ۲/۰
فیروزه‌ای	۱/۲۵ - ۱/۹۳
آبی	۱/۹۳ - ۳/۵۰

۳. فرآیند تولید هیدروژن آبی

همان‌گونه که در قبل اشـاره شـد، فرآیند تولیـد هیدروژن آبی مشـابه فرآیند تولید هیدروژن خاکستری است؛ اما در این روش، برخلاف هیدروژن خاکسـتری، دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصول جانبی جمع‌آوری و ذخیره می‌شود. یکی از هدف‌های تولیـد هیـدروژن آبی، کاهـش اثـر زیسـت‌محیطی گازهـای گلخانه‌ای اسـت. به‌طـور معمول از واحدهای جداسـازی کربن برای مدیریت و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در فرآیند تولید هیدروژن آبی استفاده می‌شود. این نوع هیدروژن نه‌تنها توانایی تأمین نیازهای صنعتی را دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک منبع پایدار انرژی در جهت کاهش تغییر اقلیمی عمل کند.

۳-۱. تولید هیدروژن از متان و بخار آب

تولیـد هیـدروژن از متـان و بخـار آب (SMR) به‌عنـوان اصلی‌تریـن فنـاوری تولیـد هیـدروژن خاکسـتری و آبی در سـطح جهـانی شـناخته شـده و حـدود ۷۵ درصـد از تولیـد هیدروژن جهانی را شـامل می‌شود. در این فرآیند کاتالیزوری، هیدروکربن‌هـا بـه هیـدروژن و دی‌اکسیـد کربـن تبدیـل می‌شـوند[۲۲]. SMR از چنـد مرحلـه پالایـش مـواد اولیـه، پیش‌اصـلاح، اصلاح بخـار، واکنش جابجـایی آب-گاز و تصفیه هیدروژن خام تشکیل شده است [۲۳]. در مرحله پالایش مواد اولیـه، گاز طبیـعی که متـان بیش‌ترین عنصر تشـکیل‌دهنده آن اسـت، از اجزای سـنگین‌تر مانند، نیتروژن، CO_2 و گوگرد پاک‌سـازی می‌شود. سپس، در مرحله پیش‌اصلاح کاتالیزوری، هیدروکربن‌های سـنگین‌تر ماننـد اتان به هیـدروژن و اجزای دیگـری مانند CH_4 و CO_2 در دماهـای پایین‌تر (بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) تبدیل می‌شوند. پس از این مرحله، اصـلاح بخار انجام می‌شـود کـه طی آن مخلوط متـان و بخار آب در حضـور یـک کاتالیـزور از جنـس نیکل واکنـش داده و هیدروژن به‌همراه CO تولید می‌شود. مراحل فرآیند به‌صورت زیر است.

$$CH_4(g) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + 3H_2(g) \quad (۱)$$

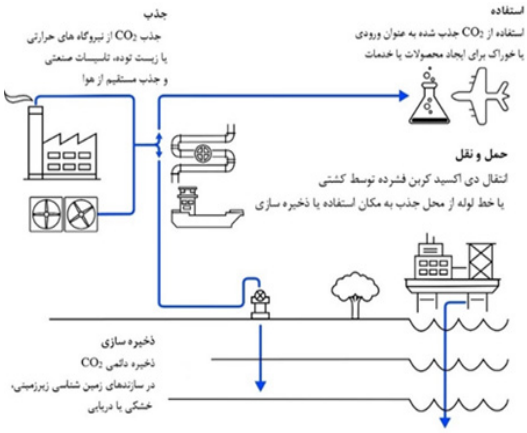
$$CO(g) + H_2O(g) \rightarrow CO_2(g) + H_2(g) \quad (۲)$$

واکنـش کلی تولیـد هیـدروژن از متـان و بخـار آب را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$CH_4(g) + 2H_2O(g) \rightarrow CO_2(g) + 4H_2(g) \quad (۳)$$

۳-۲. واحد ذخیره و استفاده از کربن جذب شده[1]

واحد ذخیره و استفاده از کربن جذب شده (CCUS) به مجموعه‌ای از فناوری‌هایی اطلاق می‌شود که می‌توانند نقش متنوعی در تحقق اهداف جهانی انرژی و زیست‌محیطی داشته باشند. در فرآیند تولید هیدروژن آبی بعد از SMR، CO_2 به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌شود که توسط سیستم CCUS جذب شده و می‌تواند به روش‌های مختلفی از جمله تزریق به سازندهای زمین‌شناسی یا استفاده در صنایع مختلف ذخیره و مورد استفاده قرار گیرد که در (شکل ۱) نمایش داده‌شده است. CO_2 همچنین می‌تواند به‌طور مستقیم از جو گرفته شود. دی‌اکسید کربن جذب‌شده توسط خط لوله، کشتی، راه‌آهن یا کامیون حمل می‌شود تا در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: مراحل فناوری CCUS [۲۴]

۴. معرفی فناوری‌های جذب، ذخیره و استفاده گاز دی‌اکسید کربن

فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن به روش‌ها و فناوری‌هایی گفته می‌شود که هدف آن‌ها جداسازی و ذخیره CO_2 از منابع مختلف است. این فناوری‌ها به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییر اقلیمی مورد توجه قرار دارند.

۴-۱. روش‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن

با توجه به احتراق سوخت‌های فسیلی سه سامانه پایه برای جذب دی‌اکسید کربن از گازهای خروجی از منابع تولید این گاز وجود دارد.

۴-۱-۱. فناوری جداسازی دی‌اکسید کربن پس از احتراق[2]

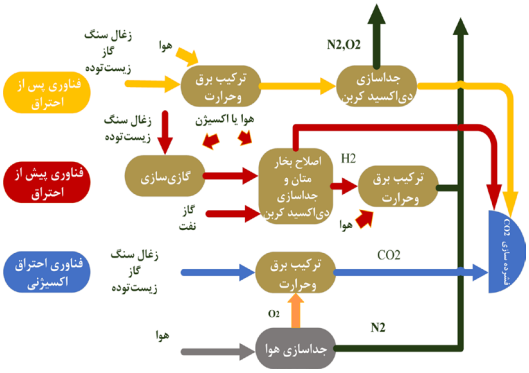
جذب گاز دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و زیستی، جذب پس از احتراق نامیده می‌شود. در این روش، بیش‌تر دی‌اکسید کربن قبل از ورود به جو جدا و در مخازن ذخیره می‌شود. به‌طورمعمول برای این کار از مواد شیمیایی جذب‌کننده استفاده می‌شود. هرچند روش‌های دیگری هم برای جذب دی‌اکسید کربن وجود دارد، اما هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته‌اند[۲۵].

۴-۱-۲. فناوری جداسازی دی‌اکسید کربن پیش از احتراق[3]

در این فناوری، سوخت در یک راکتور با آب و هوا یا اکسیژن ترکیب می‌شود و محصول آن گاز مونوکسید کربن و هیدروژن است. مونوکسید کربن با بخار آب واکنش داده و هیدروژن بیش‌تری همراه با دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. درنهایت، سوخت به دی‌اکسید کربن و هیدروژن، تبدیل می‌شود. این فناوری برای نیروگاه‌های چرخه ترکیبی گاز که در آن‌ها سوخت جامد مانند زغال‌سنگ به دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن تبدیل می‌شود، مناسب است. با این‌که هزینه آن نسبت به فناوری‌های پس از احتراق بالاتر است، بازده بیش‌تری دارد[۲۶].

۴-۱-۳. فناوری احتراق اکسیژنی[4]

در این فناوری سوخت به‌جای احتراق با هوا، با اکسیژن همراه با گاز دی‌اکسید کربن بازیافتی می‌سوزد. گازهای خروجی شامل گاز دی‌اکسید کربن فشرده‌شده، بخار آب و مقدار اندکی از سایر گازهای آلاینده ازجمله نیتروژن است. احتراق اکسیژنی یک فناوری نوظهور درحال‌توسعه بوده که نیاز به پژوهش و مطالعه بیش‌تری برای بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌ها دارد[۲۷]. انواع فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن در (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: انواع فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن [۲۸]

1. Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
2. Post Combustion Carbon Capture
3. Pre_Combustion Carbon Capture
4. Oxyfuel Combustion Carbon Capture

۴-۲. روش‌های ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن

ذخیره‌سازی CO_2: ذخیره‌سازی زمین‌شناسی به‌عنوان گزینه‌ای میان‌مدت و پراهمیت برای ذخیره دی‌اکسید کربن شناخته می‌شود. این روش سال‌ها در صنعت نفت و گاز برای افزایش برداشت نفت و گاز به‌کاررفته است، اما CO_2 در این فرآیند به جو بازمی‌گردد. تجربه ذخیره‌سازی طولانی‌مدت CO_2 بسیار محدود بوده و بیش‌تر به پروژه‌های کشور نروژ در میدان‌ها اسلیپنر[1] و اسنوهویت[2] مربوط می‌شود. برآورد هیئت بین‌دولتی تغییر آب‌وهوایی[3] نشان می‌دهد ظرفیت ذخیره‌سازی جهانی حدود ۱۰۰۰ میلیارد تن CO_2 است که برای تمام پروژه‌های CCS در قرن ۲۱، به‌منظور دستیابی به هدف ۱/۵ درجه سانتی‌گراد گرمایش جهانی، کافی خواهد بود. موسسه جهانی جذب و ذخیره‌سازی کربن[4] نیز از ظرفیت ذخیره‌سازی تا ۱۳۰۰۰ میلیارد تن CO_2 خبر داده است. هرچند بسیاری از این سایت‌ها هنوز در مرحله بررسی بوده و بخش زیادی از آن‌ها در مکان‌هایی غیرقابل‌دسترس یا کشف‌نشده قرار دارند[۲۹].

۴-۳. فناوری‌های استفاده از دی‌اکسید کربن

دی‌اکسید کربن به‌عنوان یکی از گازهای اصلی گلخانه‌ای، نقشی مهم در تغییر اقلیمی ایفا می‌کند. با این حال، به‌واسطه پیشرفت‌های علمی و فناوری، از این گاز می‌توان در کاربردهای مختلفی بهره‌برداری کرد. استفاده از CO_2 به دو دسته کلی، استفاده بدون فرآیند تبدیل و استفاده با فرآیند تبدیل تقسیم می‌شود. هرکدام از این دو دسته، شامل کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف هستند.

۴-۳-۱. فناوری استفاده از CO_2 بدون فرآیند تبدیل

در این دسته، CO_2 به شکل مستقیم و بدون تغییر شیمیایی در سامانه‌های مختلف به‌کار گرفته می‌شود. تعدادی از این روش‌ها به شرح زیر هستند:

- حلال: دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک حلال در فرآیندهای شیمیایی و به‌ویژه در استخراج مواد طبیعی و آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا، CO_2 فوق‌بحرانی به‌دلیل ویژگی‌های حلالیتی بالا و توانایی انحلال ترکیب‌های مختلف، به‌طور گسترده‌ای در فرآیندهای استخراج استفاده می‌شود. این ویژگی باعث افزایش کارایی و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌شود[۳۰].
- ازدیاد برداشت نفت: یکی از کاربردهای صنعتی مهم CO_2، تزریق آن به چاه‌های نفت است. در این روش، CO_2 با کاهش ویسکوزیته نفت و افزایش فشار مخازن، به افزایش بهره‌وری و استخراج نفت کمک می‌کند[۳۱][۳۰].
- سیال انتقال حرارت: CO_2 به‌عنوان یک سیال انتقال حرارت در سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی کاربرد دارد. به‌واسطه‌ی خواص ترمودینامیکی مناسب، CO_2 می‌تواند به‌صورت کارآمد در انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد[۳۱].

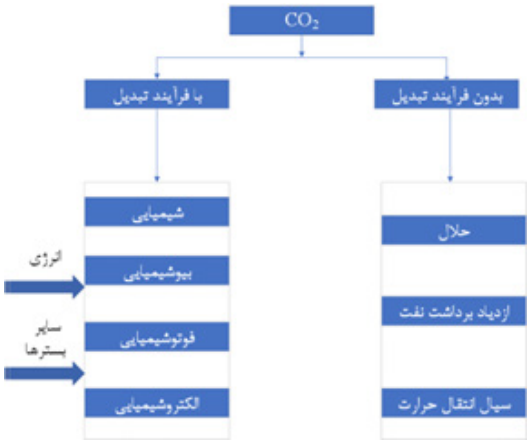
۴-۳-۲. فناوری استفاده از CO_2 با فرآیند تبدیل

در این روش‌ها، CO_2 از طریق واکنش‌های شیمیایی یا بیوشیمیایی به مواد با ارزش‌تر و قابل استفاده در صنایع مختلف تبدیل می‌شود. این فرآیندها به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- تبدیل شیمیایی: CO_2 می‌تواند از طریق واکنش‌های شیمیایی به مواد دیگری مانند متانول یا کربنات‌ها تبدیل شود. این ترکیب‌ها در صنایع مختلف به‌عنوان مواد اولیه یا سوخت استفاده می‌شوند.
- بیوشیمیایی: برخی میکروارگانیسم‌ها و گیاهان قادرند CO_2 را از محیط جذب کرده و آن را به ترکیب‌های آلی یا زیست سوخت‌ها تبدیل کنند. این فرآیندها نقش مهمی در به‌کارگیری CO_2 در کشاورزی و تولید سوخت‌های تجدیدپذیر دارند.
- فوتوشیمیایی: فرآیندهای فوتوشیمیایی از نور خورشید یا منابع نوری دیگر برای انجام واکنش‌های تبدیل CO_2 استفاده می‌کنند. یکی از کاربردهای این روش، شبیه‌سازی فرآیند فتوسنتز برای تولید مواد آلی است.
- الکتروشیمیایی: در این روش، از جریان الکتریکی برای انجام واکنش‌های شیمیایی روی CO_2 استفاده می‌شود. به‌عنوان‌مثال، CO_2 می‌تواند به‌وسیله جریان الکتریکی به مواد مفیدی مانند سوخت‌های کربنی یا مواد شیمیایی صنعتی تبدیل شود. استفاده از دی‌اکسید کربن، چه به شکل مستقیم و چه از طریق فرآیندهای تبدیل، به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش اثر محیط‌زیستی و بهبود

1. Sleipner
2. Snøhvit
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
4. Global CCS Institute

کارایی صنایع مطرح است. با استفاده از CO_2 به‌عنوان یک ماده خام یا پیش‌ماده برای تولید مواد شیمیایی، سوخت‌ها و انرژی، می‌توان به کاهش انتشار آن و توسعه فناوری‌های پاک‌تر کمک کرد. این دسته‌بندی‌ها و روش‌های مختلف استفاده از CO_2 را می‌توان در (شکل ۳) مشاهده کرد که فرآیندهای مختلف بهره‌برداری از این گاز را نمایش می‌دهد.



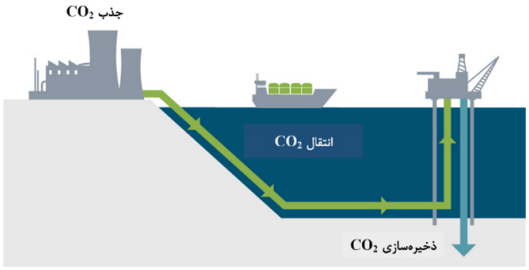
شکل ۳: روش‌های مختلف استفاده از دی‌اکسید کربن [۳۰]

۴-۴. انتقال CO_2

دی‌اکسید کربن را می‌توان به‌صورت فشرده، مایع، جامد یا در حالت هیدرات از طریق خطوط لوله، مخازن تحت‌فشار یا کشتی‌ها انتقال داد. زیرساخت‌های خط لوله دی‌اکسید کربن، به‌طورمعمول از منبع تولید CO_2 به پروژه‌های ازدیاد برداشت نفت(EOR)[1] متصل می‌شود، مانند خط آلبرتا کربن ترانک[2]. انتقال CO_2 از طریق کشتی تاکنون در مقیاس کوچک انجام شده است. با این حال، اکنون تلاش‌هایی برای ساخت کشتی‌های بزرگ‌تر و پایانه‌های تخلیه جدید در این بنادر در حال انجام است تا ظرفیت جابجایی CO_2 افزایش یابد. CO_2 منتقل‌شده از طریق خط لوله باید در شرایط فوق بحرانی و دمای پایین نگهداری شود. برای این منظور، CO_2 باید در فشاری حدود ۱۰۰ بار قرار گیرد. همچنین، غلظت آن باید به بیش از ۹۵ درصد افزایش یابد تا فرآیند فشرده‌سازی و تشکیل هیدرات بهینه‌سازی شده و از پایداری و کارایی انتقال اطمینان حاصل شود[۳۲].

۴-۵. مزایای تولید هیدروژن آبی

هیدروژن آبی، به‌طور قابل توجهی انتشار کربن را در مقایسه با هیدروژن خاکستری کاهش می‌دهد[۳۳]. این فناوری، علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، امنیت انرژی را نیز تقویت می‌کند، زیرا از زیرساخت‌های موجود گاز طبیعی بهره‌برداری و به‌عنوان یک مسیر انتقالی به‌سوی اقتصاد کم‌کربن عمل می‌کند[۳۴]. هم‌چنین، هیدروژن آبی در مقایسه با هیدروژن سبز در کوتاه‌مدت و میان‌مدت ناشی از هزینه‌های پایین تولید و استفاده از فناوری‌های پیشرفته ازلحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر است. به‌علاوه، این منبع اولیه انرژی به‌دلیل مقیاس‌پذیری بالا و توانایی پاسخ به تقاضای گسترده، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اجرایی شدن در کوتاه‌مدت محسوب می‌شود[۳۵]. در (شکل ۴) مراحل جذب، انتقال و ذخیره‌سازی CO_2 نشان داده شده است.



شکل ۴: مراحل جذب، انتقال و ذخیره‌سازی CO_2 [۳۶]

۴-۶. چالش‌های تولید هیدروژن آبی

چالش‌های تولید هیدروژن آبی به چندین عامل اساسی مرتبط است. یکی از عوامل کلیدی، مصرف بالای انرژی، به‌ویژه در فرآیند SMR، می‌باشد که بر بازده کلی این فرآیند تأثیر منفی می‌گذارد [۳۵]. علاوه بر این، واحد CCUS نقش مهم در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دارد، اما با چالش‌های فنی و اقتصادی جدی از جمله هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های گسترده مواجه است [۳۷]. همچنین، انتشار متان در مراحل استخراج و حمل‌ونقل گاز طبیعی می‌تواند اثر مثبت زیست‌محیطی هیدروژن آبی را کاهش دهد [۳۸]. ازنظر اقتصادی، تولید هیدروژن آبی در مقیاس بزرگ نیازمند سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی است و به‌شدت تحت تأثیر نوسان‌های بازار و تغییر قوانین قرار دارد[۳۹].

۵. فرآیند تولید هیدروژن فیروزه‌ای

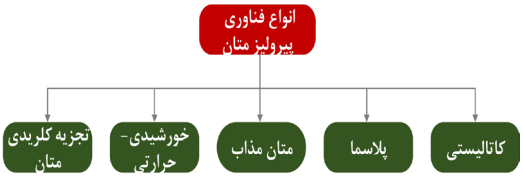
هیدروژن فیروزه‌ای به‌عنوان یکی از منابع پایدار انرژی، از فرآیند پیرولیز متان تولید می‌شود. پیرولیز، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن است. گاز طبیعی یا متان طی این

1. Enhanced oil recovery
2. Alberta Carbon Trunk

فرآینـد، در اثـر حـرارت بـه هیـدروژن و کربن جامـد تجزیه می‌شـود. پیرولیـز متان قادر اسـت هیـدروژن را بـا هزینه‌ای پایین و انتشـار گازهای گلخانه‌ای بسیار کم یا نزدیک به صفر تولید کند. این روش از گاز طبیعی استفاده می‌کند و پتانسیل آن را دارد کـه در مقایسـه با روش‌های دیگر، انتشـار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور مؤثری کاهش دهد[۴۰]. سایر فناوری‌های تبدیـل متان، ماننـد فرآینـد SMR، محدودیت‌هـایی از نظر انتشـار دارند به‌عنوان مثال، در فرآیند SMR، از هر کیلوگرم متان حدود ۰/۵ کیلوگرم هیدروژن تولید می‌شود[۴۱]. یکی از مزایای مهم پیرولیز متان این اسـت که در صورت اسـتفاده از گاز طبیـعی بـرای تأمین حـرارت، می‌توان انتشـار گازهای گلخانه‌ای را تا ۷۵ درصد نسبت به فرآیند SMR کاهش داد.

$$CH_4(g) + C(s) \rightarrow 2H_2(g) \qquad (۴)$$

محصول جانبی این فرآیند، کربن جامد است که می‌تواند به اشکال مختلفی مانند کربن سیاه آمورف، مواد گرافیتی، نانولوله‌ها و الیاف کربنی تولید شود. ویژگی‌ها و کیفیت کربن جامد تولیدی، قیمت آن را تعیین می‌کند و در نتیجه، تولید محصولی با ارزش می‌توانـد درآمـد اضافی ایجاد کرده و زمان بازگشـت سـرمایه را کاهش دهد. پیرولیز متان شامل روش‌های متنوعی است که در (شـکل ۵) نمایش داده شده‌اند. علاوه بر گاز طبیعی، زیست‌توده نیز از طریق پیرولیز قابل‌تبدیل به هیدروژن است.



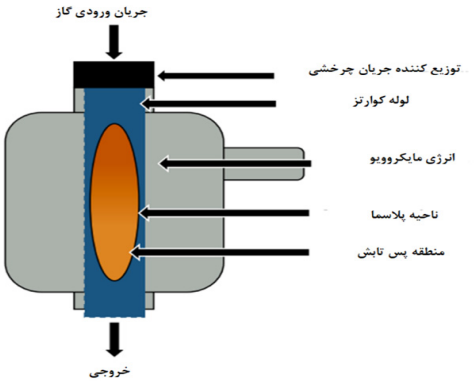
شکل ۵: انواع فناوری پیرولیز متان

۵-۱. پیرولیز کاتالیستی

پیرولیـز کاتالیسـتی یـک فرآینـد ترموشیمیایی اسـت که در آن بـا اسـتفاده از کاتالیزورهـا، مواد آلی بـه محصولی مانند زغال جامد، روغن مایع و گاز پیرولیتیک تبدیل می‌شـوند. این روش به‌ویژه برای تبدیل زیسـت‌توده و ضایعات پلاسـتیکی به محصول با ارزش بسیار کارآمد است. دما، زمان ماندگاری، نرخ گرمایـش و نوع مـاده اولیـه از پارامترهای کلیـدی این فرآیند هستند و برای افزایش کارایی از کاتالیزورهایی مانند زئولیت‌ها، اکسیدهای فلزی و ضایعات صنعتی استفاده می‌شود [۴۲] این فناوری قادر اسـت الفین‌های سـبک و ترکیب‌های معطر تولید کند. این فناوری هم‌چنین توانایی بهبود کیفیت نفت زیستی[1] و تبدیل زباله‌های پلاستیکی به انواع هیدروکربن را دارد [۴۳]. با این حال، چالش‌هایی مانند تشـکیل کک روی کاتالیزورها و نیاز به بازسـازی آن‌ها وجود دارد[۴۴]. پیشـرفت‌های اخیر، از جمله کاتالیزورهای فومی و سـامانه‌های کاتالیسـت دوگانه، به بهبود پایداری فرآیندها کمک کرده‌اند. به‌طورکلی، این فناوری باوجـود چالش‌هـا، به‌واسـطه پیشـرفت‌های مـداوم، به سـمت افزایش کارایی و تجاری‌سازی حرکت می‌کند[۴۵].

۵-۲. پیرولیز با پلاسما

پیرولیز متان با استفاده از پلاسما، روشی نوآورانه و مؤثر برای تولید هیدروژن و کربن جامد بدون انتشار دی‌اکسید کربن است و به همین دلیل، فرآیندی سـازگار با محیط‌زیسـت محسـوب می‌شـود. در ایـن روش، از مشـعل‌های پلاسـمای مایکروویـو (MPT)[2] اسـتفاده می‌شـود. (شـکل ۶)، شـماتیک یک راکتور پلاسـما مایکروویو را نشـان می‌دهد. علاوه بر این، پلاسـماترون قـوس لغزنـده (GAP)[3] نیز برای تجزیـه متان بـه‌کار می‌رود و بـازدهی بالاتری در تبدیل گاز متان بـه هیدروژن و کربن جامد دارد[۴۶] یـکی از مزایـای ایـن فرآینـد، تولید محصـول فرعی ارزشـمند مانند کربن سیاه اسـت که با انجام فرآیند گرمایشی، ویژگی‌هـای آن بهبود یافتـه و در کاربردهایی نظیـر تولید انواع باتری‌ها به‌کار می‌رود[۴۷]. بهینه‌سازی شرایط دمایی (تا ۴۳۰۰ کلویـن) و تنظیم دقیق زمان واکنش، بـرای افزایش بازده تولید هیـدروژن و بهبود کیفیت کربـن تولیدی اهمیت زیـادی دارد. به‌طـورکلی، کارآمـدی اقتصادی این فنـاوری به کاهش مصرف انرژی و ارتقای ارزش محصول جانبی وابسته است [۴۸].



شکل ۶: شماتیک یک راکتور پلاسما مایکروویو برای پیرولیز متان

1. Biocrude
2. Microwave plasma torch
3. Cliding arc plasmatron

۵-۳. پیرولیز متان مذاب

در این فرآیند متان با استفاده از تجزیه حرارتی به هیدروژن و محصول کربنی تبدیل می‌شود، بدون این‌که دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصول جانبی تولید شود. این روش که با فوم نیکل و نمک‌های مذاب بهینه‌سازی شده است، با کاهش رسوب کربن بر سطح فوم نیکل باعث حفظ ساختار و فعالیت کاتالیزور می‌شود. باوجود پتانسیل بالا، این فرآیند هنوز به بهبود پایداری و فعالیت کاتالیزور برای دستیابی به تجاری‌سازی کامل نیاز دارد[۴۹].

۵-۴. پیرولیز خورشیدی-حرارتی

پیرولیز خورشیدی-حرارتی، از انرژی خورشید برای تجزیه مواد کربنی مانند زیست‌توده، زغال‌سنگ و ضایعات استفاده می‌کند[۵۰] این روش به‌عنوان یک نوآوری در حوزه فناوری‌های پاک شناخته می‌شود و با بهره‌وری بالا، کاهش انتشار کربن و قابلیت ذخیره انرژی خورشیدی در قالب محصول پیرولیز، مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی دارد[۵۱] اما این روش باوجود نوآوری‌های فناورانه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای دستیابی به تجاری‌سازی و حل چالش‌هایی مانند مقیاس‌پذیری و ناترازی انرژی، نیاز به بررسی‌های بیش‌تری دارد[۵۲].

۵-۵. تجزیه کلریدی متان

تجزیه کلریدی متان، به شکل قابل‌توجهی بر تشکیل محصول و واسطه‌های شیمیایی اثر می‌گذارد. در طی این فرآیند، مواد تجزیه می‌شوند. در این فرآیند، آزادسازی کلر از پلی‌وینیل کلراید[1] در دو مرحله صورت می‌گیرد، مرحله اول در دمای ۴۰ تا ۳۴۳ درجه سانتی‌گراد که منجر به دکلره شدن و تولید بنزن و هیدروژن کلراید می‌شود؛ و مرحله دوم در دمای ۳۴۳ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد که به تولید هیدروکربن‌های آروماتیک تک‌حلقه‌ای و چندحلقه‌ای از طریق واکنش‌های حلقوی منجر می‌شود[۵۳]. در فرآیند پیرولیز، بخش عمده کلر موجود در زباله‌های لاستیکی و پلاستیکی به‌صورت ترکیب‌های کلردار در محصول جامد نهایی، یعنی باقی‌مانده کربنی یا زغال، باقی می‌ماند. این کلر، به‌صورت کلر آلی (کلر ترکیب شده با مواد آلی) است و در این شکل پایدار می‌ماند. با این حال، در دماهای بالا و در حضور ترکیب‌های فلزی، کلر آلی می‌تواند به ترکیب معدنی تبدیل شود که این واکنش‌ها به تسهیل آزادسازی کلر و ترکیب آن با فلزها کمک می‌کنند[۵۴]. همچنین در پیرولیز زباله‌های جامد شهری، کلر در دماهای بالاتر به اشکال معدنی به زغال تبدیل می‌شود. زئولیت‌های سدیم به‌عنوان کاتالیزور در دکلره‌سازی ترکیب‌های آلکیل و آلکنیل مؤثرند، اما حذف کلر از حلقه‌های آروماتیک تنها به‌طور جزئی انجام می‌شود[۵۵]. در پیرولیز PVC، دو مسیر یکی از طریق واسطه‌های درون مولکولی و دیگری بین مولکولی برای از دست دادن کلر وجود دارد. در مسیر بین مولکولی و در حضور اکسیدهای فلزی، واکنشی مانند اکسید نیکل[2]، نقش مهمی در تشکیل زغال دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای بازیافت بهتر مواد و کنترل آلاینده‌ها، فهم عمیق از واکنش‌های کلر و تغییرهای آن در طول فرآیند پیرولیز ضروری است [۵۶].

۵-۶. مزایای تولید هیدروژن فیروزه‌ای

تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان، روشی کارآمد و ازنظر ترمودینامیکی کم‌مصرف است که انرژی کم‌تری نسبت به الکترولیز آب نیاز دارد. این فرآیند، در مقایسه با هیدروژن خاکستری و آبی، اثر کربنی به‌مراتب کم‌تری دارد. علاوه بر این، محصول جانبی باارزشی چون کربن سیاه و نانولوله‌های کربنی را تولید می‌کند که به‌دلیل ارزش بالای بازاری، می‌توانند هزینه‌های تولید را جبران کرده و به جذابیت اقتصادی این روش بیفزایند [۵۷].

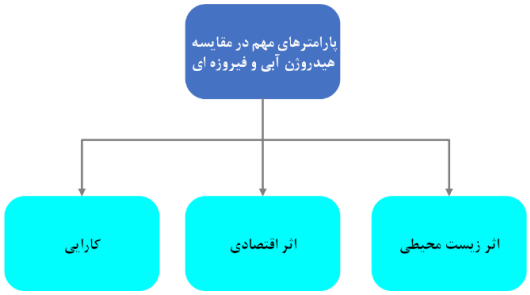
۵-۷. چالش‌های تولید هیدروژن فیروزه‌ای

راه‌اندازی اولیه تولید هیدروژن فیروزه‌ای به‌دلیل نیاز به راکتورها و کاتالیزورهای تخصصی هزینه‌بر است. علاوه بر این، تولید مداوم هیدروژن با چالشی نظیر کاهش کارایی کاتالیزورها به‌علت رسوب‌های کربنی مواجه است که به‌مرور زمان آن‌ها را غیرفعال می‌کند. همچنین، هزینه‌های بالای واحدهای جداسازی هوا و سایر زیرساخت‌ها، چالش‌های اقتصادی بیش‌تری ایجاد می‌کنند. با این‌که هیدروژن فیروزه‌ای مزایای قابل‌توجهی دارد ولی برای اجرای کامل این فناوری به پژوهش و توسعه بیش‌تری نیاز است [۵۸].

۶. مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در (شکل ۷) پارامترهای مؤثر مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای نشان داده شده است.

1. Polyvinyl Chloride
2. NiO



شکل ۷: پارامترهای مهم در مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در این بخش با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی[1] سه شاخص اثر زیست‌محیطی، اقتصادی و کارایی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در (جدول ۱، ۲ و ۳) نشان داده شده است.

AHP یک روش تصمیم‌گیری است که توسط محقق آمریکایی A. L. Satty در دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد شد. AHP روشی است که فرآیند تصمیم‌گیری توسط اشخاص خبره را در مورد مسائل پیچیده، مدل‌سازی و کمی سازی می‌کند. اصل اساسی روش AHP تجزیه مسئله به سطوح مختلف با توجه به ماهیت مسئله، هدف کلی و سپس تشکیل ساختار یک مدل تحلیلی در چند سطح است.

در این پژوهش از نرم‌افزار متن‌باز سوپردسیژن که شامل مدل AHP استفاده‌شده است. هدف مدل سلسله‌مراتبی در این پژوهش انتخاب مسیر فناوری مناسب برای تولید هیدروژن باتوجه به شاخص‌های اتخاذشده در سطح معیار از طریق بهترین گزینه توسط روش AHP است. جمعیت گروهی خبرگی شامل اعضایی از صاحبان صنایع، اساتید هیئت علمی، خبرگان بین صنعت و دانشگاه و دانشجویان دکتری بوده‌اند که در به‌صورت عضو دائم و وابسته در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی حضور دارند.

۶-۱. اثر زیست‌محیطی

در تولید هیدروژن آبی، به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، انتشار ۷/۶ تا ۹/۳ کیلوگرم معادل CO_2 بسته به منبع گاز طبیعی (خط لوله یا LNG) تخمین زده شده است. از سوی دیگر، هیدروژن فیروزه‌ای با انتشار کم‌تری معادل ۶/۱ تا ۸/۳ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلوگرم هیدروژن به‌عنوان گزینه‌ای سازگارتر با محیط‌زیست محسوب می‌شود. همچنین، تولید کربن جامد به‌عنوان یک محصول جانبی در این فرآیند، از انتشار مستقیم CO_2 جلوگیری می‌کند [۵۹]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای شاخص زیست‌محیطی در (جدول ۳) نشان داده شده است.

جدول ۳: خروجی AHP برای شاخص زیست‌محیطی

برنامه	کلی	نرمال	ایدئال	رتبه
هیدروژن فیروزه‌ای	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۵۴	۱
هیدروژن آبی	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۱	۲

۶-۲. اثر اقتصادی

هزینه‌های اولیه تولید هیدروژن آبی نسبت به تولید هیدروژن سبز و هیدروژن فیروزه‌ای کم‌تر است و از زیرساخت‌های گاز طبیعی موجود بهره می‌برد؛ اما هزینه بالای واحد CCUS همچنان از چالش‌های اقتصادی آن است. در مقابل، تولید هیدروژن فیروزه‌ای با بهره‌گیری از محصول جانبی کربنی با ارزش افزوده مانند نانولوله‌های کربنی می‌تواند هزینه‌های متغیر و هزینه کل تولید را کاهش می‌دهد و قابلیت اقتصادی فرآیند را بهبود می‌بخشد[۶۰]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای شاخص اقتصادی در (جدول ۴) نشان داده شده است.

جدول ۴: خروجی AHP برای شاخص اقتصادی

برنامه	کلی	نرمال	ایده‌آل	رتبه
هیدروژن فیروزه‌ای	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۱۷	۱
هیدروژن آبی	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۰۶	۲

۶-۳. کارایی

کارایی هیدروژن آبی از طریق ادغام فرآیندهایی مانند احتراق اکسیژنی و بهره‌گیری از گرمای اتلاف، قابل ارتقا است. همچنین، فرآیند پیرولیز متان در تولید هیدروژن فیروزه‌ای در مقایسه با الکترولیز، انرژی کم‌تری مصرف می‌کند که آن را به گزینه‌ای با کربن پایین و امیدوارکننده تبدیل می‌کند[۶۱]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای شاخص کارایی در (جدول ۵) نشان داده شده است.

جدول ۵: خروجی AHP برای شاخص کارایی

برنامه	کلی	نرمال	ایده‌آل	رتبه
هیدروژن فیروزه‌ای	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۰۸	۱
هیدروژن آبی	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۰۴	۲

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

۷. پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در (جدول ۶) برخی از پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای نشان داده شده است [۶۲].

جدول ۶: پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

پارامتر	هیدروژن آبی	هیدروژن فیروزه‌ای
خوراک	گاز طبیعی	گاز طبیعی
فرآیند	SMR+CCS	پیرولیز متان
کارایی انرژی	بالا $50-70\frac{KWh}{Kg\ H_2}$	پایین $10-30\frac{KWh}{Kg\ H_2}$
انتشار کربن	متوسط همراه با واحد CCS	کم (کربن جامد)
محصولات	CO_2 (جذب شده)	کربن جامد
اقتصادی	وابسته به کارایی و هزینه‌های CCS	محصولات جانبی کربن با ارزش بالا
زیست‌محیطی	انتشار پایین CO_2 نسبت به هیدروژن خاکستری	انتشار CO_2 کم‌تر نسبت به هیدروژن آبی
کاتالیست	اثر انتخاب کاتالیزور مناسب بر دمای عملیاتی و طول عمر تجهیزها	بهبود راندمان و کاهش دما در صورت استفاده از کاتالیزور مناسب
فشار	بهبود راندمان تولید H_2، همراه با نیاز به تجهیزهای گران‌تر	افزایش نرخ تبدیل متان در فشار بالاتر، هم‌زمان با افزایش خطر رسوب کربن
دمای واکنش	افزایش دما، با بهبود بازده هیدروژن و افزایش مصرف انرژی و امکان انتشار CO_2	دمای بالاتر، تسریع تجزیه متان به هیدروژن و کربن جامد، همراه با افزایش مصرف انرژی

۸. پتانسیل هیدروژن آبی و فیروزه‌ای در ایران

ایران با دارا بودن ذخایر عظیم گاز طبیعی و هزینه‌های پایین استخراج آن، علاوه بر پتانسیل مناسب برای توسعه فناوری‌های مبتنی بر گاز در تولید انرژی‌های پاک از سویی، دارای ناترازی مصرف گاز طبیعی از سوی دیگر است. این شرایط می‌تواند بستر مناسبی برای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای جهت ذخیره‌سازی انرژی در رفع ناترازی منحنی مصرف گاز طبیعی نیز فراهم کند. باتوجه به منابع گسترده گاز طبیعی و هزینه‌های رقابتی استخراج در ایران، این کشور می‌تواند به یک بازیگر کلیدی در تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای تبدیل شود و از این طریق، سهمی مؤثر در بازارهای جهانی انرژی پاک به‌دست آورد. همچنین، باتوجه به تغییر سیاست‌های جهانی در حوزه انرژی و ضرورت کاهش انتشار کربن، پیش‌بینی می‌شود زیرساخت‌های مرتبط با تولید هیدروژن در ایران گسترش یابد. باتوجه به مطالب اشاره شده در قبل، ازنظر اقتصادی انتخاب هیدروژن فیروزه‌ای نسبت به هیدروژن آبی مقرون‌به‌صرفه‌تر است؛ اما باتوجه به حجم گسترده تولید هیدروژن خاکستری در کشور، با استفاده از واحدهای CCUS تبدیل این حجم از هیدروژن خاکستری به هیدروژن آبی از منظر زیست‌محیطی حیاتی است.

۸-۱. اهمیت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تولید هیدروژن و توسعه فناوری‌های پاک

سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های هیدروژنی و فناوری‌های مرتبط، گامی اساسی در مسیر کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و توسعه اقتصاد پایدار انرژی است. ایجاد ظرفیت‌های لازم برای تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن، علاوه بر تقویت امنیت انرژی، به رقابت‌پذیری کشور در بازارهای بین‌المللی کمک می‌کند. توسعه فناوری‌های پاک، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، انتقال هیدروژن و حمایت از صنایع مرتبط، زمینه‌ساز رشد اشتغال فناورانه و بومی‌سازی فناوری‌های نوین خواهد بود. از سوی دیگر، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوا، از مزایای زیست‌محیطی این سرمایه‌گذاری است که درنهایت به بهبود کیفیت زندگی منجر می‌شود [۶۳].

۸-۲. اهمیت اقتصادی تولید هیدروژن

۸-۲-۱. نقش هیدروژن در تنوع‌بخشی به سبد انرژی و توسعه صنعتی

توسعه تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای گامی اساسی در

راستای کاهش وابستگی به منابع فسیلی و گسترش سهم انرژی‌های پاک در کشور است. به‌ویژه هیدروژن فیروزه‌ای که بدون انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود و می‌تواند جایگزین مهمی برای سوخت‌های فسیلی باشد. این روند نه‌تنها به تحقق اهداف زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه جایگاه ایران را به‌عنوان یکی از بازیگران کلیدی در بازار انرژی منطقه و جهان تقویت می‌نماید. علاوه بر این، توسعه فناوری‌های تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن، زیرساخت‌های جدیدی در صنایع مرتبط ایجاد کرده و فرصت‌های سرمایه‌گذاری گسترده‌ای را به همراه دارد. شکل‌گیری این اکوسیستم فناورانه موجب رشد صنایع مرتبط با انرژی‌های پاک، افزایش اشتغال در بخش‌های دانش‌بنیان و تقویت توانمندی‌های بومی در زمینه فناوری‌های نوین می‌شود. ازاین‌رو، تولید هیدروژن نه‌تنها به تحول ساختار انرژی کشور کمک می‌کند، بلکه به‌عنوان پیشرانی برای توسعه صنعتی و اقتصادی نیز عمل خواهد کرد.

۸-۲-۲. نقش هیدروژن در اقتصاد بین‌المللی و توسعه پایدار

با رشد بازار جهانی هیدروژن و افزایش تقاضا برای حامل‌های انرژی کم‌کربن، ایران فرصت قابل‌توجهی برای تبدیل‌شدن به یکی از صادرکنندگان بزرگ هیدروژن دارد. تولید و صادرات هیدروژن می‌تواند به متنوع‌سازی سبد صادراتی کشور کمک کرده و وابستگی اقتصادی به درآمدهای حاصل از نفت و گاز را کاهش دهد. جایگاه ژئوپلیتیکی ایران، منابع غنی گازی و ظرفیت‌های زیرساختی موجود، این امکان را فراهم می‌آورد که کشور در آینده به یکی از تأمین‌کنندگان کلیدی هیدروژن در بازارهای بین‌المللی تبدیل شود. علاوه بر مزایای اقتصادی، گسترش استفاده از هیدروژن در داخل کشور به بهبود شاخص‌های توسعه پایدار منجر خواهد شد. کاهش انتشار آلاینده‌ها، افزایش کیفیت هوا، ارتقای امنیت انرژی و کاهش اثر تغییرهای اقلیمی ازجمله دستاوردهای این تحول است. با بهره‌گیری از هیدروژن به‌عنوان حامل انرژی، ایران می‌تواند گام بلندی در مسیر توسعه پایدار برداشته و نقش خود را در گذار جهانی به سمت انرژی‌های پاک تثبیت کند.

۹. جایگاه هیدروژن فیروزه‌ای در چشم‌انداز انرژی جهان

در سال ۲۰۲۲ میلادی با افزایش تقاضای جهانی برای هیدروژن به ۹۵ میلیون تن، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید این ماده حیاتی به بیش از ۱۲۹۱ میلیون تن CO_2 رسید. این بدان معناست که به‌طور متوسط، برای تولید هر کیلوگرم هیدروژن، بین ۱۲ تا ۱۳/۵ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای آزاد می‌شود. در این میان، هیدروژن فیروزه‌ای به‌عنوان یک گزینه جذاب برای تولید هیدروژن با انتشار کم‌تر گازهای گلخانه‌ای مطرح شده است. با تغییر سیاست‌های انرژی جهانی به سمت کاهش کربن، هیدروژن فیروزه‌ای پتانسیل بالایی برای ایجاد یک بخش قابل‌توجه در بازار هیدروژن دارد [۶۴]. این فناوری به‌عنوان گزینه‌ای برای کمک به انتقال انرژی شناخته می‌شود، دولت‌های مختلف در حال حرکت به‌سمت تولید هیدروژن فیروزه‌ای در استراتژی‌های آینده انرژی خود هستند [۶۵]. هم‌زمان با این تحول‌ها، کشورهای خاورمیانه نیز با اجرای پروژه‌های کلان، نقش پررنگی در توسعه هیدروژن آبی و سبز ایفا می‌کنند. در عربستان سعودی، شرکت آرامکو با همکاری بانک نفتی هیوندای، پروژه‌ای برای تولید هیدروژن آبی از LPG و فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن در کره جنوبی راه‌اندازی کرده است[۶۶]. علاوه بر این، عربستان میدان گازی جافوره را با سرمایه‌گذاری ۱۱۰ میلیارد دلاری به‌منظور تولید هیدروژن آبی توسعه می‌دهد[۶۷]. در عمان نیز پروژه‌ای عظیم با مشارکت شرکت‌های اکوا پاور، اوکیو و ایر پروداکتز در حال اجرا است که هدف آن تولید سالانه ۱ میلیون تن آمونیاک سبز از ۳ گیگاوات انرژی تجدیدپذیر در منطقه الدقم است[۶۸]. این کشور همچنین در حال توسعه نیروگاهی با ظرفیت اولیه ۲۵۰-۵۰۰ مگاوات است که می‌تواند تا ۱ گیگاوات افزایش یابد. در امارات متحده عربی، شرکت ادنوک ابوظبی برنامه‌ریزی کرده است که تا سال ۲۰۲۵ نیروگاه رویس به بهره‌برداری برسد و سالانه ۱ میلیون تن آمونیاک آبی تولید کند[۶۹]. از سوی دیگر، شرکت مصدر با تشکیل اتحادیه‌ای ۵ میلیارد دلاری و همکاری با فرتیگلوب، پروژه‌ای را برای ساخت یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی به‌منظور توسعه اقتصاد هیدروژن سبز در این کشور آغاز کرده است[۷۰]. این برنامه‌ها نشان‌دهنده عزم جدی کشورهای خاورمیانه برای استفاده از ظرفیت‌های نوآورانه در حوزه انرژی پاک و کاهش انتشار کربن است، که می‌تواند نقشی کلیدی در انتقال جهانی به سمت اقتصاد کم‌کربن ایفا کند. به‌طور کلی، هیدروژن فیروزه‌ای در خاورمیانه هنوز در مراحل اولیه تحقیق قرار دارد، اما با توجه به منابع گاز طبیعی فراوان و اهداف کاهش کربن، در سال‌های آینده پروژه‌های عملیاتی بیش‌تری در این زمینه به بهره‌برداری خواهند رسید. در برخی از کشورها مانند استرالیا برنامه‌هایی برای

توسعه هیدروژن فیروزه‌ای دارند به‌عنوان مثال شرکت پیور هیدروژن نمونه اولیه‌ای با ظرفیت تولید روزانه ۱۵۰ کیلوگرم هیدروژن فیروزه‌ای ساخته که امکان ارتقا برای تولید گرافن و نانولوله‌های کربنی را نیز فراهم کرده است. در ادامه، ماژول‌های تجاری با ظرفیت‌های ۱,۵۰۰ و ۵,۰۰۰ کیلوگرم در کانتینرهای استاندارد ۱۲ متری طراحی و تولید شده‌اند. به‌گونه‌ای که بتوان در مناطقی که منابع کافی گاز متان وجود دارد، به‌سرعت نصب و بهره‌برداری کرد[۷۱]. هم‌چنین شرکت فناوری سیستم نوآورانه (ISTE) در کره جنوبی با شرکت بریتانیایی لویدیان[1] توافق‌نامه‌ای برای راه‌اندازی کارخانه‌ای به‌منظور تولید هیدروژن فیروزه‌ای و گرافن امضا کرده است[۷۲].

۱۰. محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی تجزیه‌ی حرارتی متان

تجزیه‌ی حرارتی متان، به دماهای بالا (بین ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) نیاز دارد بنابراین فرایندی انرژی‌بر و پرهزینه است؛ به‌ویژه زمانی که از منابع انرژی به‌جز تجدیدپذیرها استفاده شود[۷۳]. هزینه‌ی بالای کاتالیست‌هایی مانند فلزهای مذاب و پیچیدگی طراحی راکتورها، هزینه‌ی کلی این فرایند را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، موفقیت اقتصادی این روش به بازار محصول‌های جانبی کربنی وابسته است؛ به‌طوری که برای دستیابی به سودآوری، قیمت دوده‌ی کربنی باید به میزان قابل توجهی بالا باشد (برای مثال، حدود ۵۰۰ دلار به ازای هر تُن)[۷۴]. از جنبه‌ی زیست‌محیطی، این فرایند به‌طور مستقیم دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کند؛ اما اگر برق مورد نیاز از منابع فسیلی تأمین شود، ممکن است مزایای زیست‌محیطی آن کاهش یابد. هم‌چنین، مدیریت کربن جامد تولیدشده در مقیاس صنعتی، چالشی جدی به‌شمار می‌رود. افزون بر این، بسیاری از فناوری‌های مرتبط با این روش هنوز در مراحل تحقیق و توسعه قرار دارند و برای تجاری‌سازی، نیازمند مطالعه‌های بیش‌تر و جمع‌آوری داده‌های تجربی گسترده‌تری هستند[۷۵].

۱۱. جهت‌های آینده

فناوری‌های تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای جایگاه ویژه‌ای در آینده انرژی ایران دارند. هیدروژن آبی با هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های گسترده همراه است. در حالی که هیدروژن فیروزه‌ای بدون تولید دی‌اکسید کربن، گزینه‌ای پایدارتر محسوب می‌شود. نهادهای حاکمیتی می‌بایست با تدوین سیاست‌های حمایتی، تشویقی و جذب سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی، زمینه‌ساز پیشرفت این فناوری‌ها شوند. ترکیب هیدروژن آبی، فیروزه‌ای و سبز، راهکاری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ورود ایران به بازار جهانی هیدروژن فراهم می‌کند.

در این مسیر، توجه به توسعه پژوهش‌های نوین فناورانه ضروری به نظر می‌رسد. به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، استفاده از نانوذره‌ها به‌عنوان کاتالیست‌های پیشرفته برای ارتقای کارایی واکنش‌ها، توسعه و بهبود راکتورهای مبتنی بر فناوری پلاسما یا ماکروویو به‌منظور افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی، گسترش سامانه‌های جذب مستقیم کربن از هوا باهدف کاهش ردپای کربنی، طراحی مواد نوین برای ذخیره‌سازی و حمل ایمن‌تر هیدروژن و ارتقای فرآیندهای الکتروشیمیایی به‌منظور تبدیل دی‌اکسید کربن به محصول‌های ارزشمند، ازجمله مسیرهای مهم پژوهش‌های آینده به‌شمار می‌روند. پیگیری این محورها می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای فناوری‌های هیدروژن و تسریع حرکت به‌سوی اقتصاد کم‌کربن ایفا کند.

۱۲. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه دو مسیر تولید هیدروژن، یعنی هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی از جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و پایداری پرداخته شد که باتوجه به نتایج هیدروژن فیروزه‌ای رتبه اول دارا است. تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان، به‌عنوان فرآیندی نوآورانه، بدون نیاز به حضور اکسیژن، منجر به شکسته شدن مولکول‌های متان و تولید هیدروژن و کربن جامد به‌عنوان محصول جانبی می‌شود. در این روش، ردپای کربنی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، چرا که کربن تولیدشده به‌صورت جامد جمع‌آوری شده و قابلیت استفاده در صنایع مختلف را نیز دارد. در مقابل، هیدروژن آبی با فناوری‌های متداول‌تر تولید هیدروژن از متان و بخار آب همراه با واحد CCUS تولید می‌شود. اگرچه CCUS تا حدی انتشار CO_2 را کاهش می‌دهد، اما به سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در زیرساخت‌های ذخیره‌سازی نیاز دارد و امکان نشت CO_2 و متان در طول زنجیره‌ی تأمین وجود دارد. علاوه بر این، فرآیند SMR انرژی‌بر است که خود موجب افزایش

1. Levidian

هزینـه تولید و اثر زیسـت‌محیطی جانبی تولید آن می‌شـود. هیدروژن فیـروزه‌ای به‌دلیل برخـورداری از مزایای قابل‌توجه اقتصادی و زیست‌محیطی، گزینه‌ای پایدارتر و مطلوب‌تر برای تأمین هیدروژن در بلندمدت به شمار می‌آید. این مزایا شامل تولید محصول جانبی با ارزش، کاهش نیاز به زیرسـاخت‌های پیچیده‌ی ذخیره‌سـازی کربن و ردپـای کربنی به‌مراتب کم‌تر نسبت به هیدروژن آبی است. در نتیجه توسعه‌ی فناوری‌های پیشـرفته پیرولیز و ایجاد زیرسـاخت‌های مرتبط با هیدروژن فیروزه‌ای مورد توجه و حمایت بیش‌تر قرار خواهد گرفت.

تشکر و قدردانی

در انتهـا مراتب سـپاس خـود را از مرکز پژوهـشی انرژی دانشـگاه شـهید بهشـتی که نتایج پژوهش‌های خود را جهت این پژوهش در اختیار نگارندگان قرار داد، ابراز می‌داریم.

فهرست علائم اختصاری

SMR	Steam Methane Reforming
ATR	Auto Thermal Reforming
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CCS	Carbon Capture Storage
CO_2	Carbon dioxide
EOR	Enhanced oil recovery
MPT	microwave plasma torch
GAP	gliding arc plasmatron
PVC	polymerization of vinyl chloride
LNG	Liquefied natural gas
AHP	Analytic hierarchy process

مراجع:

[1]. E. S. Hanley, J. P. Deane, and B. P. Ó. Gallachóir, “The role of hydrogen in low carbon energy futures–A review of existing perspectives,” Feb. 01, 2018, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.034.

[2]. T. Capurso, M. Stefanizzi, M. Torresi, and S. M. Camporeale, “Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition,” Jan. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898.

[3]. [3] M. A. Rosen and S. Koohi-Fayegh, “The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems,” Feb. 01, 2016, Joint Center on Global Change and Earth System Science of the University of Maryland and Beijing Normal University. doi: 10.1007/s40974-016-0005-z.

[4]. [4] mckinsey, “Global Energy Perspective 2024,” 2024.

[5]. [5] M. B. Shavelkina, P. P. Ivanov, A. N. Bocharov, and R. K. Amirov, “Numerical and Experimental Study of the Multichannel Nature of the Synthesis of Carbon Nanostructures in DC Plasma Jets,” Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 41, no. 1, pp. 171–189, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11090-020-10133-8.

[6]. [6] A. Belamkar, B. Wagner, M. Kim, F. Bermudez, and L. Mangolini, “Conversion of Methane to Graphite-Like Carbon Nanoparticles Using a Low-Temperature Dusty Plasma,” ACS Appl Nano Mater, vol. 7, no. 10, pp. 11053–11058, May 2024, doi: 10.1021/acsanm.4c01614.

[7]. [7] X. Chen, H. Hu, W. Xia, and Z. Zhang, “Comparison study on carbon nanomaterial synthesis from methane and acetylene in DC arc plasma,” Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures, vol. 32, no. 5, pp. 471–482, 2024, doi: 10.1080/1536383X.2023.2294142.

[8]. [8] K. Ishikawa, “Effects of Plasma Ions/Radicals on Kinetic Interactions in Nanowall Deposition: A Review,” Aug. 01, 2024, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/adem.202400679.

01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2023.113635.

[17]. A. M. Hamed, T. N. A. T. Kamaruddin, N. Ramli, and M. F. A. Wahab, “A review on blue and green hydrogen production process and their life cycle assessments,” in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1281/1/012034.

[18]. S. S. Niknezhad, D. Staack, and E. N. Pistikopoulos, “Natural gas to hydrogen via a novel process intensified plasma-based reformer,” Appl Energy, vol. 373, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123911.

[19]. A. Midilli, H. Kucuk, M. Haciosmanoglu, U. Akbulut, and I. Dincer, “A review on converting plastic wastes into clean hydrogen via gasification for better sustainability,” Mar. 25, 2022, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/er.7498.

[20]. A. R. Razmi, A. R. Hanifi, and M. Shahbakhti, “Techno-economic analysis of a novel concept for the combination of methane pyrolysis in molten salt with heliostat solar field,” Energy, vol. 301, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131644.

[21]. D. P. Minh et al., “Hydrogen production from biogas reforming: An overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane,” in Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation, Elsevier, 2018, pp. 111–166. doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00004-X.

[22]. A. Iulianelli, S. Liguori, J. Wilcox, and A. Basile, “Advances on methane steam reforming to produce hydrogen through membrane reactors technology: A review,” Catal Rev Sci Eng, vol. 58, no. 1, pp. 1–35, Jan. 2016, doi: 10.1080/01614940.2015.1099882.

[9]. [9] R. Hatakeyama and T. Kato, “8 Structural Control of Single-Walled Carbon Nanotubes by Plasma Chemical Vapor Deposition.”

[10]. F. Ahmadinouri, “Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,” 2024.

[11]. B. Wang and H. M. Guan, “Highly Efficient Conversion of Methane to Olefins via a Recycle-Plasma-Catalyst Reactor,” Catal Letters, vol. 146, no. 10, pp. 2193–2199, Oct. 2016, doi: 10.1007/s10562-016-1846-y.

[12]. Y. Gao, S. Zhang, H. Sun, R. Wang, X. Tu, and T. Shao, “Highly efficient conversion of methane using microsecond and nanosecond pulsed spark discharges,” Appl Energy, vol. 226, pp. 534–545, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.006.

[13]. S. Zhang, X. Zeng, H. Bai, C. Zhang, and T. Shao, “Optical emission spectroscopy measurement of plasma parameters in a nanosecond pulsed spark discharge for CO_2/CH_4 dry reforming,” Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, vol. 267, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.saa.2021.120590.

[14]. L. Fulcheri, E. Dames, and V. Rohani, “Plasma-based conversion of methane into hydrogen and carbon black,” Dec. 01, 2024, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100973.

[15]. Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, “Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future,” Int J Hydrogen Energy, vol. 50, pp. 310–333, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.321.

[16]. S. Y. Ahn et al., “From gray to blue hydrogen: Trends and forecasts of catalysts and sorbents for unit process,” Oct.

utilization: A paradigm shift with CO_2 economy," Nov. 15, 2020, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.ceja.2020.100013.

[31]. H. Lu, X. Ma, K. Huang, L. Fu, and M. Azimi, "Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review," Sep. 01, 2020, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121994.

[32]. Y. Li, J. Ren, H. Ma, and A. N. Campbell, "Technical and economic performance assessment of blue hydrogen production using new configuration through modelling and simulation," International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 134, May 2024, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104112.

[33]. D. A. Tetteh and S. Salehi, "The Blue Hydrogen Economy: A Promising Option for the Nearto- Mid-Term Energy Transition," Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, vol. 145, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1115/1.4055205.

[34]. B. Qin, H. Wang, F. Li, D. Liu, Y. Liao, and H. Li, "Towards zero carbon hydrogen: Co-production of photovoltaic electrolysis and natural gas reforming with CCS," Int J Hydrogen Energy, vol. 78, pp. 604–609, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.337.

[35]. Solartronisa, "Transport." Accessed: Mar. 15, 2025. [Online]. Available: solartronisa.com/industries/clean-energy/carbon-capture/transport

[36]. S. Nešić, S. Fominykh, A. Vertlyugina, A. Sizykh, and U. Božović, "Decarbonization Challenges in Oil Refining: A Perspective on Blue Hydrogen Production at Panchevo Oil Refinery," in Society of Petroleum Engineers - SPE Europe Energy Conference and Exhibition, EURO 2024, Society of Petroleum Engineers (SPE), 2024. doi:

[23]. S. Herfat, A. Mosayyebi Jirhandeh, and M. Zandi, "The potential of using CCUS units in the Iran's industries with an Analytic Hierarchy Process (AHP)," renewable and new energies, vol. 11, no. 2, pp. 107–116, 1403.

[24]. A. Di Gianfrancesco, "Worldwide overview and trend for clean and efficient use of coal," in Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants, Elsevier Inc., 2017, pp. 643–687. doi: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00019-1.

[25]. P. Madejski, K. Chmiel, N. Subramanian, and T. Kuś, "Methods and Techniques for CO_2 Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies," Feb. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/en15030887.

[26]. M. Wohlthan et al., "Oxyfuel combustion based carbon capture onboard ships," International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 137, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104234.

[27]. D. C. Makepa and C. H. Chihobo, "Sustainable pathways for biomass production and utilization in carbon capture and storage—a review," 2024, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s13399-024-06010-5.

[28]. Global CCS Institute, "The Global Status of CCS Report," 2023.

[29]. B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, and K. Andersson, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment," Jun. 15, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.fuel.2023.127776.

[30]. A. Gulzar, A. Gulzar, M. B. Ansari, F. He, S. Gai, and P. Yang, "Carbon dioxide

porous structure and their performance," Renew Energy, vol. 212, pp. 887–896, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.119.

[44]. B. Qiu, N. Deng, Y. Zhang, and H. Wan, "Application of industrial solid wastes in catalytic pyrolysis," Jan. 01, 2018, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/apj.2150.

[45]. S. Kreuznacht et al., "Comparison of the performance of a microwave plasma torch and a gliding arc plasma for hydrogen production via methane pyrolysis," Plasma Processes and Polymers, vol. 20, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1002/ppap.202200132.

[46]. T. Li, C. Rehmet, Y. Cheng, Y. Jin, and Y. Cheng, "Experimental Comparison of Methane Pyrolysis in Thermal Plasma," Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 37, no. 4, pp. 1033–1049, Jul. 2017, doi: 10.1007/s11090-017-9806-x.

[47]. S. Kreuznacht, M. Böke, and A. von Keudell, "Space-resolved gas temperature of a microwave plasma torch used for hydrogen production via methane pyrolysis," Plasma Processes and Polymers, 2024, doi: 10.1002/ppap.202400089.

[48]. M. Liu et al., "Optimized Process for Melt Pyrolysis of Methane to Produce Hydrogen and Carbon Black over Ni Foam/NaCl-KCl Catalyst," Processes, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020360.

[49]. K. Zeng, D. Gauthier, J. Soria, G. Mazza, and G. Flamant, "Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review," Solar Energy, vol. 156, pp. 73–92, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.033.

[50]. J. Zeaiter, F. Azizi, M. Lameh, D. Milani, H. Y. Ismail, and A. Abbas, "Waste tire pyrolysis using thermal solar energy: An integrated approach," Renew Energy, vol. 10.2118/220018-MS.

[37]. V. Novotny, "Blue hydrogen can be a source of green energy in the period of decarbonization," Int J Hydrogen Energy, vol. 48, no. 20, pp. 7202–7218, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.095.

[38]. D. Bigestans, M. A. Cardin, and N. Kazantzis, "Economic performance evaluation of flexible centralised and decentralised blue hydrogen production systems design under uncertainty," Appl Energy, vol. 352, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121944.

[39]. H. Dai and R. S. Besser, "Fluidization analysis for catalytic decomposition of methane over carbon blacks for solar hydrogen production," Int J Hydrogen Energy, vol. 46, no. 79, pp. 39079–39094, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.150.

[40]. B. Parkinson, P. Balcombe, J. F. Speirs, A. D. Hawkes, and K. Hellgardt, "Levelized cost of CO_2 mitigation from hydrogen production routes," Energy Environ Sci, vol. 12, no. 1, pp. 19–40, Jan. 2019, doi: 10.1039/c8ee02079e.

[41]. M. Gholizadeh and X. Hu, "Progress in understanding the coking behavior of typical catalysts in the catalytic pyrolysis of biomass," Apr. 14, 2022, Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/d2se00168c.

[42]. N. Zhou et al., "A structured catalyst of ZSM-5/SiC foam for chemical recycling of waste plastics via catalytic pyrolysis," Chemical Engineering Journal, vol. 440, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.135836.

[43]. X. Wang et al., "Catalytic pyrolysis of microalgal lipids to liquid biofuels: Metal oxide doped catalysts with hierarchically

hybrid approach to pink and turquoise hydrogen production via oxy-fuel combustion," Energy Convers Manag, vol. 314, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118704.

[58]. G. H. Patel, J. Havukainen, M. Horttanainen, R. Soukka, and M. Tuomaala, "Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment," Green Chemistry, vol. 26, no. 2, pp. 992–1006, Jan. 2024, doi: 10.1039/d3gc02410e.

[59]. D. A. Tetteh and S. Salehi, "The Blue Hydrogen Economy: A Promising Option for the Nearto- Mid-Term Energy Transition," Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, vol. 145, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1115/1.4055205.

[60]. S. Yun, J. Lee, H. Cho, and J. Kim, "Oxy-fuel combustion-based blue hydrogen production with the integration of water electrolysis," Energy Convers Manag, vol. 291, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117275.

[61]. D. K. Park, J. H. Kim, H. S. Kim, J. H. Kim, and J. H. Ryu, "Possibility Study in CO_2 Free Hydrogen Production Using Dodecane (C12H26) from Plasma Reaction," Energies (Basel), vol. 16, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16041589.

[62]. Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, M. Jaszczur, and A. K. Al-Jiboory, "Hydrogen energy future: Advancements in storage technologies and implications for sustainability," J Energy Storage, vol. 72, p. 108404, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EST.2023.108404.

[63]. H. Alhamed et al., "From methane to hydrogen: A comprehensive review to assess the efficiency and potential of turquoise hydrogen technologies," May 28, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.123, pp. 44–51, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.030.

[51]. M. U. H. Joardder, P. K. Halder, M. A. Rahim, and M. H. Masud, "Solar pyrolysis: Converting waste into asset using solar energy," in Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches, Elsevier Inc., 2017, pp. 213–235. doi: 10.1016/B978-0-12-805423-9.00008-9.

[52]. J. Yang et al., "Insight into the pyrolysis behavior of polyvinyl chloride using in situ pyrolysis time-of-flight mass spectrometry: Aromatization mechanism and Cl evolution," Fuel, vol. 331, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125994.

[53]. Y. Ren et al., "Evolution and speciation transformation of chlorine during automobile shredder residue pyrolysis," Waste Management, vol. 174, pp. 320–327, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2023.12.008.

[54]. P. Gao et al., "Migration characteristics of chlorine during pyrolysis of municipal solid waste pellets," Waste Management, vol. 172, pp. 208–215, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.10.037.

[55]. L. Ye, T. Li, and L. Hong, "Understanding enhanced char formation in the thermal decomposition of PVC resin: Role of intermolecular chlorine loss," Mater Today Commun, vol. 26, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102186.

[56]. J. Diab, L. Fulcheri, V. Hessel, V. Rohani, and M. Frenklach, "Why turquoise hydrogen will Be a game changer for the energy transition," Int J Hydrogen Energy, vol. 47, no. 61, pp. 25831–25848, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.299.

[57]. D. Kim, M. Shin, and J. Park, "A novel

ijhydene.2024.04.231.

[64]. W. Antweiler and D. Schlund, “The Emerging International Trade in Hydrogen and the Role of Environmental, Innovation, and Trade Policies,” SSRN Electronic Journal, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4417163.

[65]. W. Antweiler and D. Schlund, “The emerging international trade in hydrogen: Environmental policies, innovation, and trade dynamics,” J Environ Econ Manage, vol. 127, p. 103035, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.JEEM.2024.103035.

[66]. C. Lee, “Korea’s Hyundai Heavy, Aramco sign blue hydrogen cooperation project.” [Online]. Available: https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/natural-gas/030421-s-koreas-hyundai-heavy-aramco-sign-blue-hydrogen-

[67]. M. Martin and S. El Wardany, “Saudi Arabia to Use $110 Billion Gas Field for Blue Hydrogen ‘We are biggest adventurers’ on blue hydrogen: energy minister,” 2021. [Online]. Available: https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-24/saudi-arabia-to-use-110-billion-gas-project-for-blue-hydrogen?utm_source=chatgpt.com&leadSo

[68]. ACWA Power, “ACWA Power, OQ, and Air Products Sign Joint Development Agreement Toward World-Scale Green Hydrogen-Based Ammonia Production Facility in Oman.”

[69]. ADNOC, “ADNOC to Build World-Scale Blue Ammonia Project,” 2021.

[70]. Masdar, “Masdar and ENGIE sign collaboration agreement with Fertiglobe to co-develop green hydrogen.”

[71]. Pure Hydrogen, “Turquoise Hydrogen.”

[72]. NBIC, “ISTE To Develop Eco-friendly Hydrogen with British Company,” 2023.

[73]. S. R. Patlolla, K. Katsu, A. Sharafian, K. Wei, O. E. Herrera, and W. Mérida, “A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production,” Jul. 01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2023.113323.

[74]. M. Shokrollahi, N. Teymouri, O. Ashrafi, P. Navarri, and Y. Khojasteh-Salkuyeh, “Methane pyrolysis as a potential game changer for hydrogen economy: Techno-economic assessment and GHG emissions,” Int J Hydrogen Energy, vol. 66, pp. 337–353, May 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.056.

[75]. A. Abánades-Velasco and Á. Martínez-Rodríguez, “CHALLENGES FOR THE DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS FOR METHANE PYROLYSIS WITH LIQUID METAL REACTORS,” Dyna (Spain), vol. 98, no. 4, pp. 413–419, Jul. 2023, doi: 10.6036/10880.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 12 / Issue 1 / NO. 21 / Summer 2025 / Pages 70-90

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

Comparison of Blue and Turquoise Hydrogen Production Processes and their Future Prospects in Iran

Sobhan Herfat[1], Milad Pirhadi[2], Majid Chegeni[3], Majid Zandi[4*]

1. Ph.D. Student, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. M.Sc. Student, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. National Iranian Gas Company, Tehran, Iran
4. Associate Professor, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:
Received: 25 January 2025
Revised: 30 April 2025
Accepted: 20 May 2025

Keywords:
Blue hydrogen
Turquoise hydrogen
Steam methane reforming (SMR)
Carbon capture utilization and storage (CCUS)

ABSTRACT

Hydrogen, as a light and abundant element, plays a key role in the development of clean energy and holds significant potential for replacing fossil fuels to reduce greenhouse gas emissions. This study aims to evaluate and compare blue and turquoise hydrogen as two primary options for low-carbon hydrogen production and to assess their potential in mitigating environmental impacts. Blue hydrogen production methods, including hydrogen generation from methane and steam combined with carbon capture, utilization, and storage (CCUS) units, and turquoise hydrogen production through methane pyrolysis and solid carbon generation, were examined. A comparative analysis of costs, efficiencies, and environmental challenges of both types of hydrogen was conducted. The findings indicate that turquoise hydrogen, through the production of solid carbon instead of greenhouse gases, represents a more sustainable and environmentally favorable option. Based on some data, for every kilogram of hydrogen produced, between 12 and 13.5 kilograms of greenhouse gases are released, whereas turquoise hydrogen production via methane pyrolysis results in zero direct carbon dioxide emissions. Moreover, the energy consumption for turquoise hydrogen production has been reported to be up to 30% lower than that of conventional blue hydrogen production methods, highlighting its advantage in terms of energy efficiency. In Iran, transitioning away from fossil fuel dependency toward blue and turquoise hydrogen production requires the development of infrastructure, advanced technologies, and comprehensive policymaking. This effort necessitates leveraging existing resources, fostering indigenous knowledge, and encouraging new investments. The present study emphasizes the importance of advancing technologies related to blue and turquoise hydrogen production and highlights the need for equipping and upgrading facilities to optimize the utilization of these clean energy resources.

DOR: 20.1001.1.25011084.1404.02.30

How to cite this article

S. Herfat, M. Pirhadi, M. Chegeni, M. Zandi,Comparison of Blue and Turquoise Hydrogen Production Processes and their Future Prospects in Iran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(1): 70 -90. (https://www.ijge.irangi.org/article_725916.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: m_zandi@sbu.ac.ir, (M. Zandi).

Available online 22 Jun 2025
25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.
This is an open access article under the CC BY license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)