

بهره‌برداری بهینه توزیع شده شبکه یکپارچه برق-گاز با مدل سازی فازی عدم قطعیت رفتاری پاسخگویی بار

سیده حسنا طالبیان (نویسنده مسئول)

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام

h.talebian@ilam.ac.ir

حسین رستم پور

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام

پوریا تنهایی

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام

چکیده

در پاسخ به تهدیدهای فزاینده تغییرات اقلیمی و نیاز فوری به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سیستم انرژی جهانی در حال گذار و دگرگونی عمیقی است. در این میان، هیدروژن (H_2) به عنوان حامل انرژی چندمنظوره و امیدوارکننده مطرح شده است. عنصری که ظرفیت کربن‌زدایی از بخش‌هایی را دارد که برق رسانی مستقیم به آن‌ها دشوار است، از جمله صنایع فولاد، مواد شیمیایی، تولید آمونیاک و حمل‌ونقل‌های سنگین. با وجود دهه‌ها توسعه فناوری، پیاده سازی گسترده سامانه‌های انرژی مبتنی بر هیدروژن همچنان با موانع فنی، اقتصادی و زیرساختی روبه‌رو است. این مرور جامع، به بررسی روش‌های گوناگون تولید هیدروژن از جمله هیدروژن خاکستری، آبی، سبز، فیروزه‌ای، صورتی و همچنین انواع نوظهوری مانند هیدروژن طلایی و نارنجی می‌پردازد. تقاضای پیش‌بینی شده برای هیدروژن، ساختارهای هزینه‌ای فعلی، و راهبردهای کلیدی برای استقرار این فناوری مورد بررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، این مطالعه به چالش‌های زیست‌محیطی و نیازهای پژوهشی مرتبط با انتشار آلاینده، مصرف آب و پایداری در چرخه عمر می‌پردازد. با تلفیق روندهای کنونی و چشم‌اندازهای آینده، این مقاله بر نقش حیاتی هیدروژن در گذار جهانی انرژی تأکید می‌کند و مسیرهایی را برای غلبه بر چالش‌هایی که مانع از استقرار گسترده آن هستند، ترسیم می‌نماید. در این میان، تأکید شده است که اگر تعارضات مربوط به مصرف آب و کاربری زمین در مناطق خشک به‌خوبی مدیریت شوند، هیدروژن سبز می‌تواند در بلندمدت پیش‌قراول این گذار باشد؛ در حالی که هیدروژن آبی، با تکیه بر زیرساخت‌های موجود، راه‌حلی موقتی و پل‌گونه ارائه می‌دهد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش:

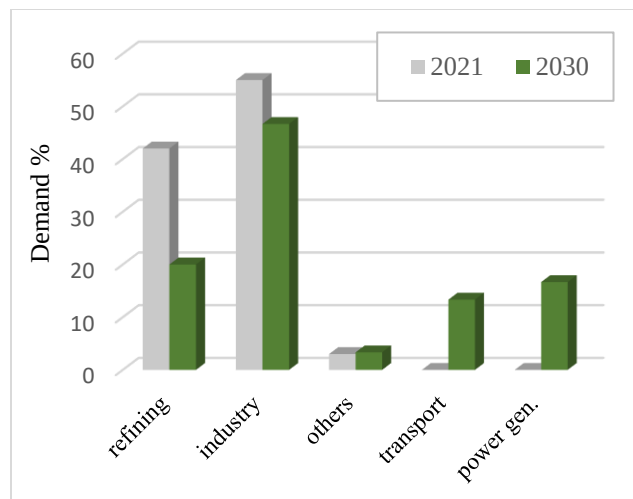
۱۴۰۵/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی:

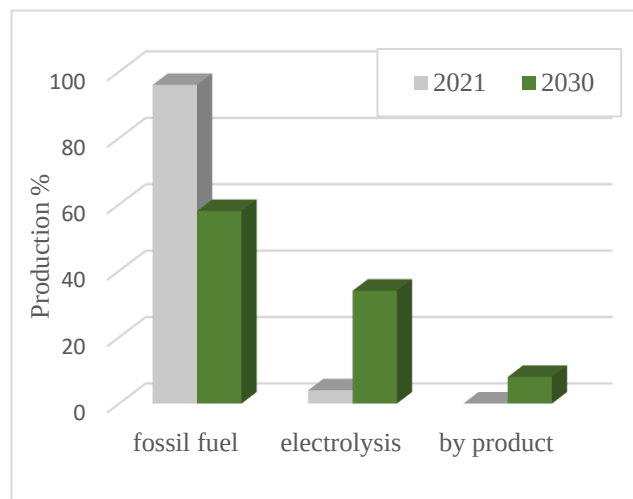
اقتصاد مبتنی بر هیدروژن،
گذار به سامانه‌های نوین
انرژی،
روش‌های تولید هیدروژن،
هیدروژن نارنجی

۱. مقدمه

سیاست‌های اقلیمی جهانی و اهداف تعیین‌شده برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، باعث ایجاد یک تغییر اساسی در شیوه‌ی تولید، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی شده‌اند. بر اساس آخرین گزارش بانک جهانی و آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در سال ۲۰۲۵، با وجود افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر، سهم پنج کشور بزرگ منتشرکننده‌ی آلاینده‌ها—چین، ایالات متحده، هند، روسیه و ژاپن—همچنان بالای ۶۰٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان باقی مانده است که عمدتاً به دلیل وابستگی شدید آن‌ها به سوخت‌های فسیلی و زغال‌سنگ بوده است [۱، ۲]. با رسیدن میزان انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) به رکورد ۳۷٫۵ میلیارد تن در سال ۲۰۲۳، نیاز فوری به منابع انرژی بدون کربن که بتوانند در مقیاس صنعتی عمل کنند، بیش از پیش احساس می‌شود [۳، ۴]. این نکته قابل توجه است که هیدروژن بالاترین چگالی انرژی ویژه را در میان سوخت‌های شناخته‌شده دارد (حدود ۱۲۰ مگاژول بر کیلوگرم) و در صورت تولید پایدار، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی نسبت به سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهد [۵، ۶]. از آنجایی که بسیاری از مسیرهای ساده‌تر برای کربن‌زدایی از مصرف انرژی در حال اجرا هستند، در سال‌های اخیر توجه‌ها دوباره به هیدروژن کم‌کربن به‌عنوان عاملی کلیدی برای کربن‌زدایی از صنایع سخت‌دسترس معطوف شده است [۷]. قابلیت هیدروژن در کاهش انتشار کربن در صنایعی مانند فولاد، آهن، آمونیاک، آلومینیوم و تولید مواد شیمیایی، همچنین توانایی آن در ذخیره‌سازی بلندمدت انرژی و پایداری شبکه‌های برق، آن را به گزینه‌ای جذاب برای سناریوهای آینده‌ی انرژی تبدیل کرده است [۸]. با این حال، هیدروژن یک منبع اولیه‌ی انرژی نیست؛ بلکه باید از طریق فرایندهایی با مصرف بالای انرژی تولید شود، که شدت انتشار کربن آن‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این فرایندها مسیرهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (مانند هیدروژن خاکستری و آبی) گرفته تا الکترولیز با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (هیدروژن سبز) را شامل می‌شوند [۹]. همچنین حوزه‌های نوظهوری مانند استخراج هیدروژن طبیعی (هیدروژن طلایی و نارنجی) را نیز در بر می‌گیرند. در حال حاضر، ۹۵٪ از هیدروژن تولیدی جهان از نوع خاکستری است. این در حالی است که بر اساس سیاست‌های کربن-صفر (Net Zero) آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تا سال ۲۰۵۰ باید ۹۸٪ از هیدروژن از منابع پاک تأمین شود [۱۰]. شکل‌های ۱ (الف) و (ب) مقایسه‌ای از وضعیت تاریخی تقاضا برای هیدروژن و منابع تولید آن در سال ۲۰۲۱ در مقابل برنامه‌ریزی برای سال ۲۰۳۰ را نشان می‌دهند [۱۱].



(ب)



(الف)

شکل ۱. وضعیت (الف) تولید و (ب) تقاضای هیدروژن.

همان‌طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، هیدروژن امروزی تقریباً به‌طور کامل از سوخت‌های فسیلی، عمدتاً گاز طبیعی، تولید می‌شود. در این شکل مشخص شده که اگرچه هیدروژن سبز در سال ۲۰۲۱ کمتر از ۱٪ از تولید جهانی را به خود اختصاص داده بود، اما در حال حاضر به محور اصلی بیشتر پروژه‌های اعلام‌شده برای سال ۲۰۳۰ تبدیل شده است [۵]. در بخش تقاضا، همان‌طور که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده، حدود ۷۰ میلیون تن هیدروژن خالص عمدتاً در پالایش نفت و صنایعی مانند تولید آمونیاک برای تولید کودهای شیمیایی مصرف می‌شود. با توجه به تلاش کشورها برای اجرای راهبردهای کربن‌زدایی در بخش‌های صنعتی، حمل‌ونقل و تولید برق، پیش‌بینی می‌شود تقاضا برای هیدروژن به‌صورت تصاعدی افزایش یابد. این رشد تقاضا به‌ویژه در مناطق صنعتی‌شده بسیار چشم‌گیر است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۴,۰۰۰ تراوات‌ساعت برسد [۱۲]. تنها در اروپا، میزان مصرف هیدروژن در سال ۲۰۱۵ حدود ۳۲۵ تراوات‌ساعت برآورد شده است که عمدتاً در بخش صنعت به کار می‌رفته است. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ این میزان به ۴۰۰ تا ۷۵۰ تراوات‌ساعت برسد که حدود ۳۰٪ از آن مربوط به نیازهای ذخیره‌سازی خواهد بود. برآوردها برای سال ۲۰۵۰ حاکی از جهشی بسیار بزرگ‌تر است، به‌طوری‌که مصرف جهانی هیدروژن بین ۳,۰۰۰ تا ۵,۰۰۰ تراوات‌ساعت پیش‌بینی می‌شود. این موضوع بیانگر حرکت جدی و گسترده به‌سوی کربن‌زدایی عمیق در سطح جهانی است [۱۳].

چالش‌های اصلی در فرایندهای فعلی تولید هیدروژن شامل تأمین مواد اولیه (در اصلاح سوخت‌های فسیلی) و هزینه‌های بالای انرژی (در فرایند الکترولیز) هستند. بازار جهانی هیدروژن در حال تجربه‌ی تحولی سریع است؛ تحولی که با راهبردهای ملی، کنسرسیوم‌های بین‌المللی، و حمایت‌های مالی چندجانبه تقویت شده است [۱۴]. سرمایه‌گذاری جهانی در حوزه هیدروژن در سال ۲۰۲۳ از مرز

۳۰۰ میلیارد دلار عبور کرده است. در حالی که تنها سه سال پیش، این رقم کمتر از ۵٪ این مقدار بود. تاکنون بیش از ۹۰ کشور یا نقشه راه هیدروژن خود را ارائه داده‌اند یا در حال تدوین آن هستند. تحقق عملی «اقتصاد هیدروژنی» منوط به غلبه بر مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، اقتصادی و سیاستگذاری است؛ از جمله مقیاس‌پذیری تولید، آمادگی زیرساخت‌ها، فناوری‌های ذخیره‌سازی، رقابت‌پذیری از نظر هزینه، و ایمنی زیست‌محیطی.

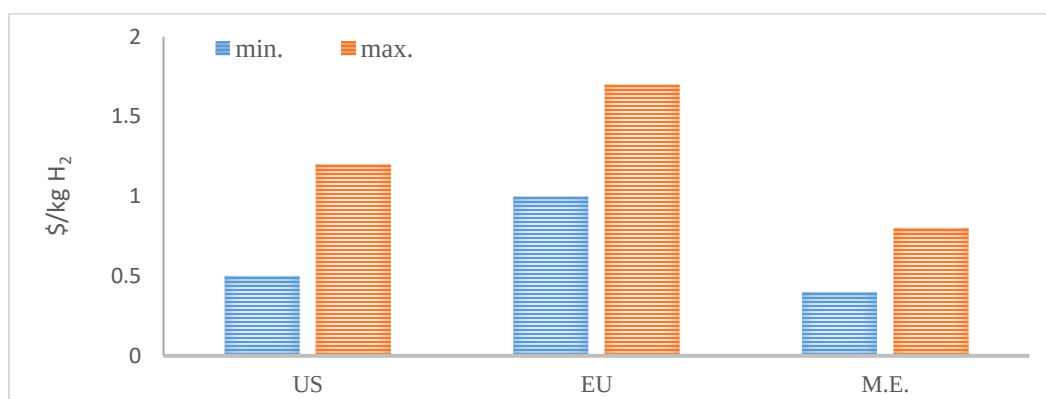
با توجه به راهبردهای گذار انرژی در کشورهای دارای منابع غنی سوخت‌های فسیلی—از جمله ایران—که به دنبال کاهش انتشار کربن در عین حفظ مزیت‌های زیرساختی و منابع هیدروکربنی خود هستند، تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر مسیرهای متداول تولید هیدروژن مانند ریفرمینگ متان (به‌ویژه هیدروژن آبی) و توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی معطوف بوده است. با این حال، اگرچه در سال‌های اخیر توجه محدودی به زمین‌شناسی هیدروژن و ذخایر طبیعی آن جلب شده، این مطالعات غالباً فاقد رویکردی یکپارچه در تلفیق فرآیندهای ژئوشیمیایی، مهندسی مخزن و امکان‌سنجی صنعتی هستند [۱۵]. به‌ویژه مسیرهای نوظهوری مانند هیدروژن نارنجی که می‌تواند به‌عنوان راهکاری هم‌راستا با زیرساخت‌های موجود در کشورهای نفت‌خیز مطرح شود، در ادبیات داخلی به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده و ارتباط آن با تولید طبیعی هیدروژن (هیدروژن طلایی) همچنان مبهم باقی مانده است. از این‌رو، وجود این شکاف دانشی، ضرورت انجام پژوهش حاضر را در راستای توسعه راهکارهای بومی و کم‌کربن برای گذار انرژی در ایران و کشورهای مشابه برجسته می‌سازد. این مقاله مروری، به‌صورت انتقادی چشم‌انداز کنونی فناوری‌های مرتبط با هیدروژن را تحلیل می‌کند و ظرفیت آن‌ها را به‌عنوان سنگ‌بنای گذار جهانی انرژی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این راستا، مقایسه‌ای دقیق از مسیرهای مختلف تولید هیدروژن ارائه می‌دهد و امکان ادغام آن‌ها را در بخش‌های صنعتی سخت‌کربن‌زدا تحلیل می‌نماید. در نهایت، شکاف‌های دانشی کلیدی شناسایی شده و مسیرهای آینده در حوزه سیاست‌گذاری و پژوهش ترسیم می‌شوند.

۲. مسیرهای تولید هیدروژن

فرایند تولید هیدروژن را می‌توان بر اساس منبع اولیه و شدت کربن فرآیند دسته‌بندی کرد. این دسته‌بندی‌ها معمولاً با کدهای رنگی شناخته می‌شوند که هر رنگ نشان‌دهنده‌ی مسیر خاصی برای تولید هیدروژن و تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با آن است. در این بخش، مسیرهای اصلی تولید هیدروژن مورد بررسی قرار می‌گیرند و ویژگی‌های فنی، بازدهی انرژی، ردپای کربنی، و توجیه اقتصادی هر یک از آن‌ها بررسی می‌شود.

۱.۲ هیدروژن خاکستری و قهوه‌ای

هیدروژن خاکستری در حال حاضر رایج‌ترین شکل هیدروژن است که عمدتاً از طریق فرایند ریفرمینگ بخار متان (SMR: steam methane reforming) با استفاده از اتان یا گاز طبیعی تولید می‌شود. واکنش شیمیایی آن $(CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2)$ مقدار زیادی دی‌اکسید کربن (CO_2) آزاد می‌کند و به همین دلیل، این روش دارای شدت کربن بالایی است. نوع قهوه‌ای هیدروژن نیز از روشی مشابه پیروی می‌کند، با این تفاوت که به جای متان، از گازی‌سازی زغال سنگ استفاده می‌شود که تأثیرات زیست‌محیطی آن حتی بیشتر است [۱۶]. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، هزینه‌ی تولید هیدروژن خاکستری در مناطق مختلف متفاوت است و این تفاوت بستگی به در دسترس بودن منابع اولیه‌ی تولید دارد [۱۷]. اگرچه در برخی مناطق دارای منابع غنی سوخت‌های فسیلی، تولید این نوع هیدروژن از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما در صورت اجرای مقررات سخت‌گیرانه‌ی اقلیمی، تولید هیدروژن خاکستری بدون سامانه‌های قوی کاهش کربن به تدریج کنار گذاشته خواهد شد.

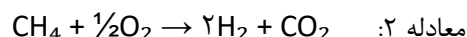
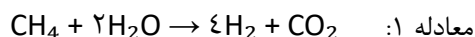


شکل ۲. هزینه‌ی منطقه‌ای تولید هیدروژن خاکستری [۱۸].

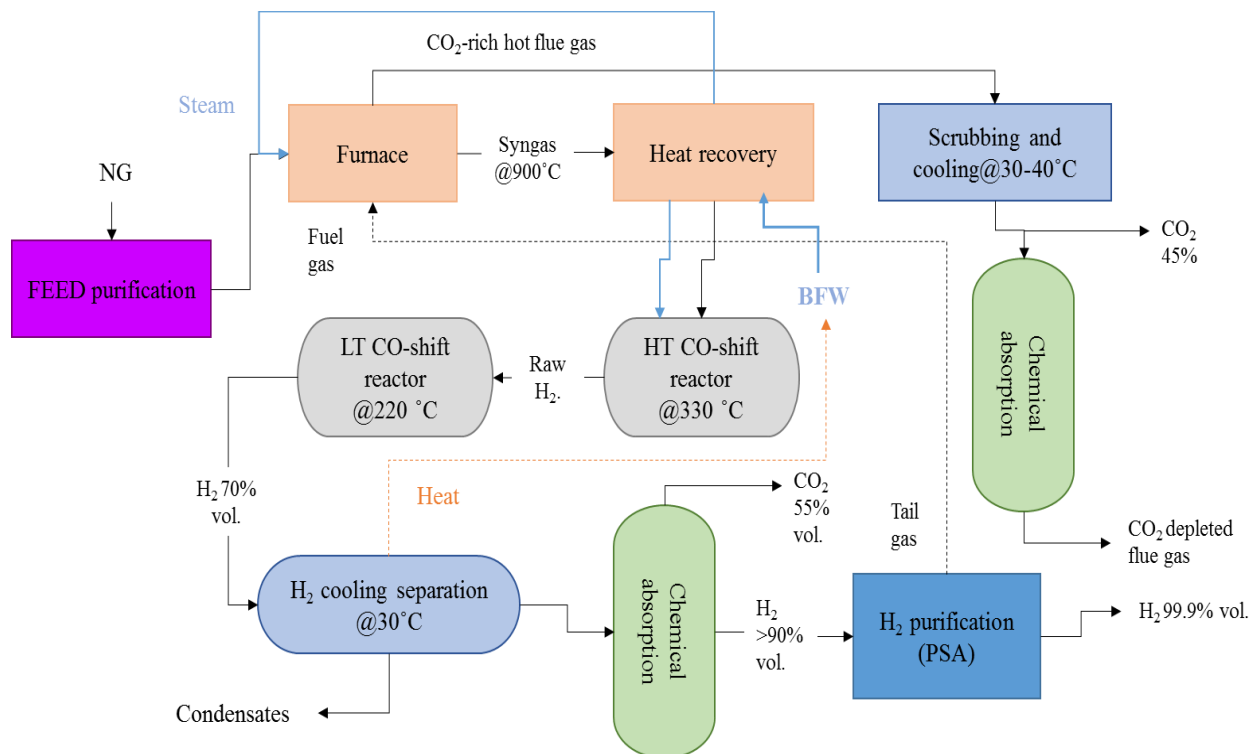
۲.۲ هیدروژن آبی

صنعت گاز طبیعی به‌طور فزاینده‌ای به سمت تبدیل گاز طبیعی به هیدروژن، که به آن هیدروژن آبی گفته می‌شود، گرایش پیدا کرده است. در این فرآیند، متان به‌صورت کاتالیزوری با بخار واکنش داده و هیدروژن از طریق روش‌هایی مانند بازآفرینی متان (SMR)، اکسیداسیون جزئی (POX) یا بازآفرینی خودگرمایی (ATR) تولید می‌شود. این فرآیندها معمولاً با فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) یا جذب و استفاده مجدد از کربن (CCU) همراه هستند تا صنعت گاز طبیعی بتواند با آینده‌ای کم‌کربن سازگار شود و جایگاه خود را حفظ و تقویت نماید [۱۹، ۲۰]. همان‌طور که در معادلات ۱ و ۲ نشان داده شده، در فرآیند SMR، گاز طبیعی با بخار آب در دمای بالا واکنش داده و گاز هیدروژن تولید می‌شود. در SMR به ازای هر ۴ مول هیدروژن تولید شده،

۱ مول دی‌اکسید کربن تولید می‌شود، در حالی که در اکسیداسیون جزئی (POX) این نسبت به ۱ مول دی‌اکسید کربن به ازای هر ۳ مول هیدروژن می‌رسد. با این حال، SMR نیازمند تأمین حرارت از طریق سوختن گاز طبیعی است، در حالی که فرآیندهای ATR و POX این مزیت را دارند که نیازی به منبع حرارت کربن‌زدایی شده ندارند [۲۰].



همانطور که در شکل ۳ که شماتیک تولید هیدروژن آبی همراه با جذب CO_2 می باشد، مشخص شده است، جذب کربن از طریق شیمیایی می‌تواند تا ۸۰-۹۵٪ از انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به هیدروژن خاکستری را بکاهد [۲۱]. همانطور که در این شماتیک مشخص است، قبل از مرحله خالصسازی هیدروژن در فرایند جذب چرخشی در فشار بالا (PSA)، می‌توان تا میزان ۵۵ درصد از دی‌اکسید کربن تولیدی در فرایند تولید هیدروژن را جذب کرد. در مرحله خالصسازی به روش PSA، هیدروژن تا حد ۹۹٫۹ درصد حجمی تولید می‌شود. گاز خروجی از این مرحله به همراه گاز سوخت وارد کوره می‌شود. گاز خروجی از استک کوره که دی‌اکسید کربن غلیظ دارد، پیش از وارد شدن به فرایند جذب شیمیایی وارد مرحله پیش-تصفیه برای جداسازی آلاینده‌گی‌هایی از جمله NO_x و SO_x ، و سپس مرحله خنکسازی تا دمای ۳۰-۴۰ درجه سانتیگراد می‌شود. گاز خروجی از مرحله تصفیه وارد برج جذب شیمیایی می‌شود که در این مرحله نیز در حدود ۴۵٪ از دی‌اکسید کربن ناشی از تولید هیدروژن جذب می‌شود. پایداری این روش تحت تأثیر نشت متان در مراحل استخراج و انتقال گاز، کارایی جذب کربن و ایمنی ذخیره‌سازی قرار دارد [۱۶]. یافته‌های جدید در زمینه نشت متان در زنجیره تأمین گاز طبیعی نشان می‌دهد که در صورتیکه نشت متان از ۲٪ فراتر رود، مزایای اقلیمی هیدروژن آبی را به طور کامل خنثی می‌کند بطوریکه هیدروژن آبی در بازه ۲۰ ساله حتی از هیدروژن خاکستری نیز اثر گرمایشی بیشتری خواهد داشت [۲۰]. سینرژی با فرآیندهای صنعتی دیگر مانند جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS) و منابع حرارتی هسته‌ای، چشم‌اندازها و فرصت‌های جدیدی برای هیدروژن آبی به عنوان یک راهبرد گذار کوتاه‌مدت فراهم می‌کند؛ البته به شرط آنکه نشت متان و کارایی CCS به‌خوبی مدیریت شوند [۲۲].

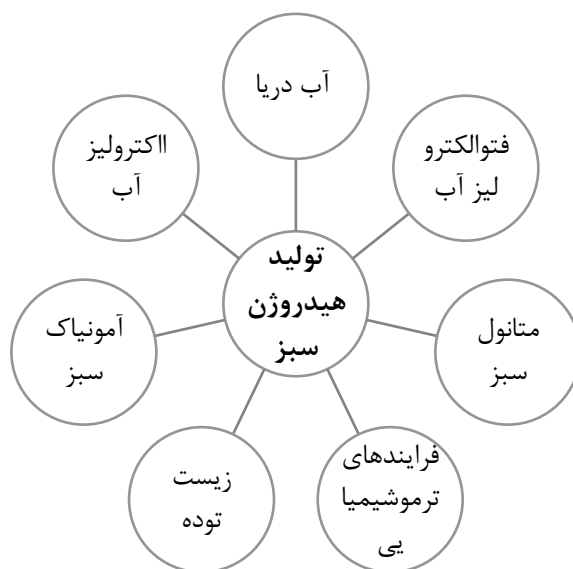


شکل ۳. شماتیک تولید هیدروژن آبی

۳.۲ هیدروژن سبز

هیدروژن سبز از طریق الکترولیز آب و با بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، خورشید یا نیروگاه‌های آبی تولید می‌شود. راندمان انرژی این فرایند بسته به ظرفیت الکترولایزر بین ۵۵ تا ۷۵ درصد متغیر است. به دلیل عدم تولید دی اکسید کربن در حین فرایند، این روش پایدارترین مسیر تولید هیدروژن محسوب می‌شود. شکل ۴ روشهای تولید هیدروژن سبز را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. فناوری‌های اصلی الکترولیز شامل الکترولیز قلیایی (Alkaline)، غشای تبادل پروتون (PEM)، و سلول الکترولیز اکسید جامد (SOEC) هستند [۲۳]. چالش اصلی در الکترولیز آب دریا غلبه بر مشکلات ناشی از نمک‌های موجود و جلوگیری از خوردگی می‌باشد [۲۴]. در فتوالکترولیز آب از انرژی نور خورشید به طور مستقیم برای تجزیه آب استفاده می‌شود، که این فرایند با استفاده از مواد نیمه هادی مانند دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) انجام می‌گیرد. در روش تولید هیدروژن از متانول و یا آمونیاک سبز، متانول و آمونیاک با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و دی اکسید کربن جذب شده تولید شده و سپس هیدروژن از آنها استخراج می‌شود. در فرایندهای ترموشیمیایی تولید هیدروژن سبز، از چرخه‌های ترموشیمیایی در دمای بالا برای تجزیه آب استفاده می‌شود و از انرژی خورشیدی متمرکز برای تامین حرارت استفاده می‌شود. در فرایند تولید هیدروژن سبز از زیست توده، هیدروژن در محیط کم اکسیژن از گاز سنتز جداسازی می‌شود [۲۵]. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشخص است، اگرچه هیدروژن سبز امکان تولید بدون

آلایندگی هیدروژن و اتصال میان بخشی (از برق به گاز) را فراهم می کند، اما به شدت وابسته به فرایند الکترولیز و آب با خلوص بالا است (حدود ۹ کیلوگرم آب برای تولید هر ۱ کیلوگرم هیدروژن). همچنین، هزینه ی برق عامل اصلی در ساختار هزینه ی این روش است، به طوری که تا ۷۰ درصد از کل هزینه ی تولید هیدروژن سبز را تشکیل می دهد [۲۶].

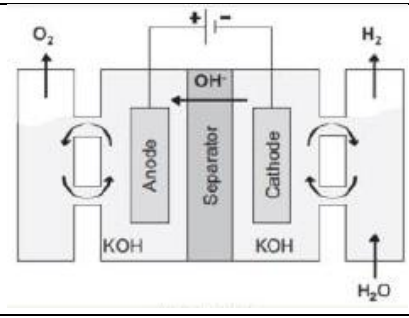
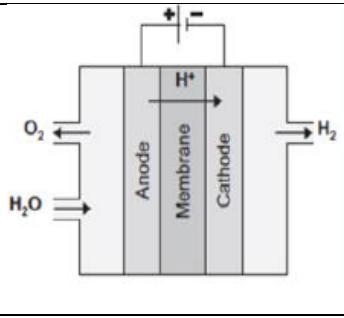
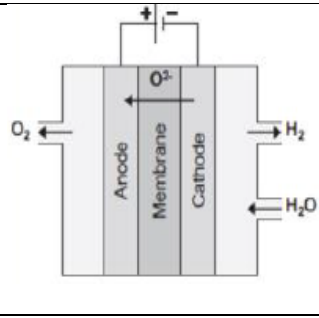


شکل ۴. فرایندهای تولید هیدروژن سبز

یک سلول الکترولیز از دو الکترود تشکیل شده است که واکنش های الکتروشیمیایی در حضور کاتالیزورهای مختلف بر روی آن ها انجام می گیرد، یک جداکننده (separator) که عبور یون ها را ممکن می سازد اما مانع عبور الکترود ها و گازها می شود، و صفحات دوقطبی (bipolar plates) که به عنوان جمع کننده های جریان عمل می کنند و دو سلول را در یک پشته (stack) از هم جدا می نمایند. نوع جداکننده، فناوری الکترولیز را تعیین می کند و شرایط عملکرد کاتالیزور مانند دما (T)، pH و فشار (P) را تحمیل می کنند. انتخاب روش الکترولیز بر اساس هزینه، ظرفیت و نوع کاربرد انجام می شود. جدول ۱ ویژگی های کلیدی این فناوری ها را خلاصه می کند. الکترولیز قلیایی (AEC) در مقیاس صنعتی به خوبی توسعه یافته و مقرون به صرفه است؛ اما از الکترولیتی خورنده بر پایه پتاس یا سودا استفاده می کند و نسبت به نفوذ گاز حساس است، به همین دلیل در شرایط بارگذاری دینامیک (متغیر) کارایی کمتری دارد. الکترولیز PEM (PEMEC) معمولاً از یک سلول بدون فاصله (zero-gap) تشکیل شده است که در آن، پروتون ها از یک غشای نازک پلیمری به عنوان جداکننده عبور می کنند و این امکان را فراهم می سازد که چگالی جریان های بالا حاصل شود. این روش به دلیل نیاز به فلزات گران بها مانند پلاتین و ایریدیوم به عنوان کاتالیزور، و همچنین حساسیت غشا به ناخالصی ها، هزینه برتر است؛ اما ساختاری فشرده دارد و برای استفاده در منابع تجدیدپذیر ناپایدار (مانند انرژی خورشیدی یا بادی) مناسب تر است. در

فناوری SOEC، الکترولیت از زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) ساخته شده و وظیفه هدایت یون‌های O^{2-} را بر عهده دارد. در این روش، آب به کاتد منتقل می‌شود و در آنجا کاهش یافته و به هیدروژن تبدیل می‌شود. برای دستیابی به رسانایی بالا، سیستم باید در دمایی بالاتر از ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد کار کند. مزیت این فناوری دمای بالا (SOEC) آن است که نیاز به مصرف الکتریسیته کمتری دارد، کاتالیزورها در برابر مسموم شدن (poisoning) حساسیت کمتری دارند، و همچنین امکان هم‌الکترولیز آب و دی‌اکسید کربن را فراهم می‌سازد [۲۵]. یافته‌ها نشان می‌دهد در مناطق استرس آبی از جمله خاورمیانه، چالش اصلی در تولید هیدروژن سبز بیشتر از هزینه برق تجدیدپذیر مربوط به دسترسی به آب شیرین است. از اینرو مطالعات جدیدی با استفاده از کاتالیزورهای مبتنی بر نیکل-آهن-فسفات بدون نیاز به نمک زدایی پیشین با بازده ۷۸٪ مورد توجه قرار گرفته است. با اینحال این فناوری هنوز در مقیاس صنعتی اثبات نشده است [۲۶].

جدول ۱. مقایسه فناوری‌های مختلف الکترولیز

Electrolysis	AEC	PEMEC	SOEC
			
Operating Pres. (Bar)	۱-۳۰	۱-۳۰	۱
Operating Temp. (°C)	۶۰-۸۰	۵۰-۸۰	۵۰۰-۹۰۰
Power cons. (kWh/Nm ^۳ H _۲)	۳٫۸-۴٫۵	۴٫۲-۶	۳٫۳-۳٫۹
Electrical efficiency (%)	۶۰-۸۰	۵۰-۸۰	۹۶
Capacity range	MW-۲۰ MW	kW-۲۰ MW	MW
Maturity	Mature	Commercial	Demonstration
CAPEX (\$/kWe)	۸۰۰-۱۳۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۳۰۰۰-۵۰۰۰
Water cons. (kg/Nm ^۳ H _۲)	۰٫۹	۰٫۹	۱٫۱ (Steam)
Advantage	Low-cost	High power density	Water-CO _۲ Co-electrolysis
Limitation	Corrosive electrolyte	High cost	Thermal-degradation

جدول شماره ۲ موقعیت پروژه های بزرگ جهانی تولید هیدروژن سبز را نشان می دهد [۲۷]. همانطور که در این جدول مشخص است، اروپا در توسعه هیدروژن آبی و سبز پیشتاز است، از طریق برنامه هایی مانند استراتژی هیدروژن اتحادیه (۲۰۲۰) و REPowerEU (۲۰۲۲). خوشه های صنعتی مانند بخش فولاد آلمان و بندرهای هلند در خط مقدم کربن زدایی با استفاده از هیدروژن قرار دارند. چین که در حال حاضر به هیدروژن مبتنی بر زغال سنگ وابسته است، سرمایه گذاری گسترده ای در فناوری جذب و ذخیره کربن (CCS) و الکترولیزرهای تغذیه شده با انرژی تجدیدپذیر انجام داده و هدف دارد تا سال ۲۰۳۵ به بزرگترین تولیدکننده هیدروژن سبز جهان تبدیل شود. در ایالات متحده، با تصویب قانون زیرساخت و اشتغال (Infrastructure Investment and Jobs Act)، توسعه هاب های هیدروژن پاک در اولویت قرار گرفته است؛ تمرکز بر هیدروژن آبی به واسطه زیرساخت های گاز طبیعی موجود و همچنین هیدروژن سبز در ایالت های غنی از منابع تجدیدپذیر است.

جدول ۲. پروژه های اصلی هیدروژن سبز در جهان

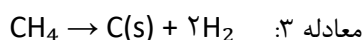
Country	Project	Capacity (GW)	Status	Launch Year	Remarks
UAE	Al Maktoum solar park	۰,۰۰۱۲۵	In operation	۲۰۲۱	Solar
Saudi Arabia	NEOM Green Hydrogen	۶۵۰ k tons/yr	Under Construction	۲۰۲۶	Solar+Wind
	Helios Green Fuel	۴	Negotiation phase	۲۰۲۸	Solar
China	Beijing Jingneng	۵	Planning / Under Construction	۲۰۲۳-۲۰۲۵	Solar+Wind+Water
Australia	Asia's RE Hub	۱۴-۲۶	Approval pending	۲۰۲۷-۲۰۳۰	Solar+Wind
	HyEnergy zero carbon H _۲	۸	Planning	۲۰۲۰	Solar+Wind
Oman	Green Hydrogen Oman (GH _۲)	۲۵	Feasibility Stage	+۲۰۳۰	Solar+Wind
Spain	HyDeal Ambition	۶۷	Planning Phase	۲۰۳۰	Solar
Denmark	Greater Copenhagen	۱۳	Operational	۲۰۲۱	Solar+Wind
Belgium	Ostend Pilot NorthH _۲	۰,۰۵۰ ۱۰	Operational (pilot)	۲۰۲۵	Offshore wind
UK	H _۲ H Saltend	۰,۶	Development Phase	۲۰۲۷	Offshore wind
France	HYGreen Provence	۱,۵	Planned	۲۰۳۰	Solar
Netherlands	AquaVentus	۱۰	Initial pilot stage / Planning	۲۰۲۵	Offshore wind
	Rotterdam	۱	Under Construction	۲۰۲۵	Offshore wind
Brazil	Base One	۳۴	Design Phase	۲۰۲۵	Solar

۴.۲ هیدروژن صورتی

هیدروژن صورتی مشابه با هیدروژن سبز و از طریق الکترولیز آب، اما با استفاده از برق حاصل از انرژی هسته‌ای، تولید می‌شود. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به سهمی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد از بازار دست یابد [۲۸]. این نوع هیدروژن از تولید پایدار و یکنواخت نیروگاه‌های هسته‌ای بهره می‌برد و امکان تولید مداوم را فراهم می‌سازد. با این حال، چالش‌هایی همچون، ایمنی فناوری هسته‌ای، مدیریت پسماندهای رادیواکتیو، میزان پذیرش عمومی از جمله موانع گسترش آن هستند [۲۹]. همچنین توسعه بیشتر این مسیر نیازمند تحقیقات، نوآوری فنی و بهینه‌سازی هزینه‌ها در سال‌های آینده خواهد بود.

۵.۲ هیدروژن فیروزه‌ای

هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان تولید می‌شود؛ فرایندی که در آن گاز طبیعی (NG) در دماهای بالا (معمولاً بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) و در غیاب اکسیژن به صورت حرارتی تجزیه می‌گردد. پیرولیز متان، همان‌طور که در معادله ۳ نشان داده شده است، منجر به تولید گاز هیدروژن و کربن جامد (کربن سیاه) به عنوان محصول جانبی می‌شود که می‌توان از آن در صنایع مختلفی مانند لاستیک، جوهر و باتری استفاده کرد. هیدروژن فیروزه‌ای در صورتی که انرژی گرمایی مورد نیاز آن از برق تجدیدپذیر تأمین شود، می‌تواند به عنوان جایگزینی کم‌کربن در نظر گرفته شود و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ حدود ۵ تا ۱۰ درصد از عرضه هیدروژن کم‌کربن را تشکیل دهد [۳۰].



با این حال، وابستگی به گاز طبیعی، هزینه‌های سرمایه‌ای بالا (CAPEX) به دلیل این که فناوری‌های پیرولیز هنوز در مقیاس صنعتی در حال توسعه‌اند، و مصرف بالای انرژی برای دماهای عملیاتی بالا، از اصلی‌ترین چالش‌ها و محدودیت‌های این روش محسوب می‌شوند [۳۱]. شرکت‌هایی مانند Monolith Materials و BASF در آمریکا فعالانه در حال توسعه سیستم‌های پیرولیز متان هستند و پروژه‌های پایلوتی که از انرژی حرارتی خورشیدی برای گرمایش استفاده می‌کنند، در استرالیا در دست اجرا هستند [۳۲]. موفقیت این روش به پیشرفت در طراحی کاتالیست‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی فرایند، و توسعه بازارهای پایدار برای استفاده بهینه از کربن سیاه بستگی دارد [۳۳].

۲.۶ هیدروژن طلایی و نارنجی

هیدروژن طلایی به هیدروژن طبیعی اشاره دارد که در ساختارهای زمین‌شناسی به صورت طبیعی و بدون دخالت زیستی (ابیوتیک) یا به صورت زیستی در عمق زیرسطح زمین به دام افتاده است [۳۴]. این فرآیند مشابه تجمع سوخت‌های فسیلی است و استخراج آن شبیه به استخراج گاز طبیعی می‌باشد. اگر این هیدروژن به صورت پاک استخراج شود، نیازی به ورودی انرژی خارجی ندارد و پتانسیل قابل توجهی برای کاهش کربن در بخش‌های مختلف، از جمله صنایع پالایشگاهی، کارخانه‌های تولید متانول و تأسیسات تولید آمونیاک ارائه می‌دهد. مسیرهای تولید هیدروژن زیرسطحی (UHG) شامل فرآیندهای ابیوتیک و واکنش‌های ژئوشیمیایی هستند که در جدول ۳ شرح داده شده‌اند. فرآیندهای ابیوتیک، مکانیزم‌های غیرزیستی هستند که عمدتاً توسط واکنش‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی، از جمله تعاملات آب-سنگ مانند سرپنتین‌سازی و هیدراسیون اولیوین، رادیولیز، تجزیه گرمایی، و سایر واکنش‌های ابیوتیک هدایت می‌شوند [۳۵]. رادیولیز واکنشی است که در آن تجزیه طبیعی مواد رادیواکتیو مولکول‌های آب را می‌شکند. واکنش‌های ترموشیمیایی و کاتالیزوری مانند واکنش‌های مواد معدنی آهن-دار و کاهش فسفات، واکنش‌های ماگمایی و هیدروترمال شامل گرمایش پوسته زمین، تبلور و تشکیل پیریت، و در نهایت واکنش‌های ردوکس با مواد معدنی پوسته، مانند تبدیل اکسید آهن تحت شرایط هیدروترمال یا تکتونیک را شامل می‌شوند. فرآیندهای میکروبی مسیرهای زیستی هستند که توسط میکروارگانیسم‌های هیدروژن‌زا هدایت می‌شوند، مانند تخمیر، تثبیت نیتروژن، اکسیداسیون فسفیت، اکسیداسیون استات و اکسیداسیون بی‌هوازی مونوکسید کربن (CO). این واکنش‌ها در شرایط بی‌هوازی زیرسطحی رخ می‌دهند و توسط متابولیسم میکروبی تسهیل می‌شوند، که اغلب از بسترهایی مانند CO، استات یا فسفیت‌ها استفاده می‌کنند [۳۶]. اهمیت تولید طبیعی هیدروژن میکروبی در عمق زیرسطح هم‌اکنون در حال مطالعه است تا پتانسیل زیست‌فناوری آن ارزیابی شود.

جدول ۳. فرآیندهای تولید هیدروژن زیرزمینی (UHG)

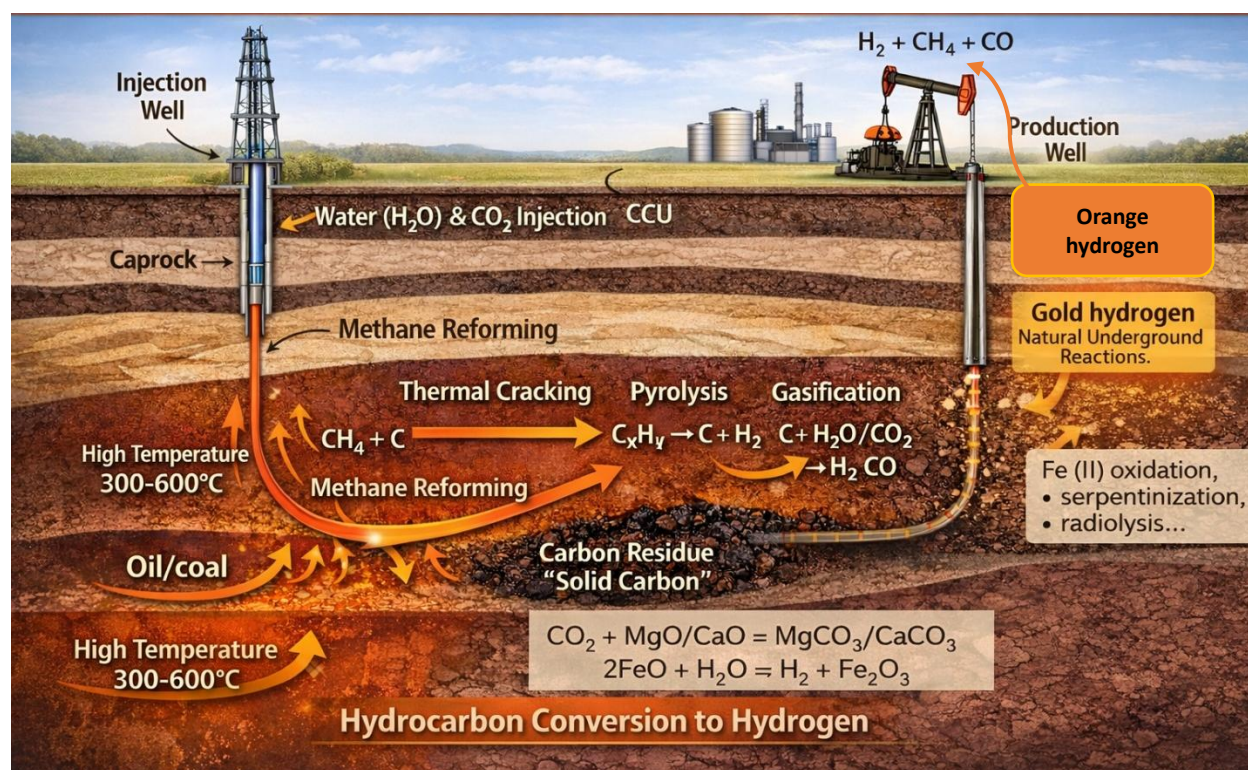
UHG	Abiotic	Serpentinization	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$
		Iron Oxidation / Reduction Reactions	$3\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 + \text{O}_2$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{FeCO}_3 + \text{H}_2$
		Phosphate Reduction	$\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}(\text{OH})_4 \rightarrow \text{H}_2$ (via catalysis)
		Pyrite formation	$\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{H}_2$
		Crustal weathering	$3\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}^+$
		Crystallization	Serpentine $\rightarrow$ Olivine + Water + H_2
		Mechanical induced	$2\text{FeO (in olivine)} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$

		Magnetic & hdrothermal reactions	$\text{FeO (magma)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_r + \text{H}_r$
		Ca reaction with water	$\text{Ca} + \text{}^r\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2$
		Radiolysis of water	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_r + \text{O}_r + \text{radicals}$
		Thermal decomposition	$\text{Kerogen/CH}_x \rightarrow \text{CH}_r + \text{CO}_r + \text{H}_r$
	biological	Mixed Acid Fermentation	$\text{C}_r\text{H}_{1r}\text{O}_r \rightarrow \text{}^r\text{CH}_r + \text{COOH} + \text{}^r\text{CO}_r + \text{}^r\text{H}_r$
		Nitrogen fixation	$\text{N}_r + \text{}^r\text{H}^+ + \text{}^r\text{e}^- \rightarrow \text{}^r\text{NH}_r + \text{H}_r$
		Phospite oxidation	$\text{H}_r\text{PO}_r + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_r\text{PO}_r + \text{H}_r$
		Acetate oxidation	$\text{CH}_r\text{COO}^- + \text{}^r\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{}^r\text{HCO}_r^- + \text{}^r\text{H}_r + \text{OH}^-$
		Anaerobic CO Oxidation	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_r + \text{H}_r$
		Fe ^r Reduction	Microorganisms reduce Fe ³⁺ to Fe ²⁺ while oxidizing NH ₄ ⁺ , producing H ₂

تازه ترین ارزیابی منابع جهانی هیدروژن طبیعی نشان می دهد که پتانسیل قابل استخراج هیدروژن طلایی در جهان بین ۵ تا ۱۵ میلیون تن در سال برآورد می شود که در حدود ۵٪ از تقاضای پیش بینی شده برای سال ۲۰۵۰ می باشد. با وجود آنکه پروژه های تحقیقاتی متعددی در سراسر جهان به طور فعال در حال بررسی منابع طبیعی هیدروژن هستند، داده های جامع در مورد پتانسیل منابع، هزینه های تولید، و موقعیت های دقیق جغرافیایی عمدتاً محرمانه باقی مانده اند. این شفافیت محدود معمولاً ناشی از ماهیت اولیه اکتشافات، حساسیت های تجاری، و نبود چارچوب های قانونی مشخص برای استخراج و گزارش دهی هیدروژن طبیعی است. فراتر از عدم قطعیت های مربوط به اکتشاف، چالش های مرتبط با منابع هیدروژن طلایی شامل احتمال نشت آن به سطح زمین و ورود به اتمسفر (در حدود ۲۰ میلیون تن در سال) و همچنین وجود ناخالصی های احتمالی در ذخایر مانند گاز متان (CH₄)، نیتروژن (N₂)، دی اکسید کربن واکنش نداده (CO₂) و رطوبت است. خلوص هیدروژن طبیعی به ترکیب آب نفوذی بستگی دارد؛ آبی که ممکن است حاوی CO₂، کربنات ها و ذرات معلق باشد که می توانند واکنش های مشابه فیشر-تروپش را تسهیل کرده و باعث تولید ناخالصی های آلی در شرایط مساعد زیرسطحی شوند.

هیدروژن نارنجی، توسعه ای نشأت گرفته از هیدروژن طلایی به شمار می رود که در آن آب با فشار بالا به درون سنگ های اولترامافیک تزریق می شود تا واکنش های سرپانتینی شدن در اعماق زمین تحریک شده و سرعت تولید هیدروژن افزایش یابد [۳۷]. عمق مورد نظر برای این فرایند بین ۵ تا ۱۰ کیلومتر تخمین زده می شود، با توجه به گرادیان زمین گرمایی حدود ۳۰ درجه سلسیوس به ازای هر کیلومتر، که دمای مناسب برای انجام واکنش در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس قرار دارد. این روش ترکیبی از زمین شیمی

و تحریک مهندسی شده است که شباهت‌هایی به فرکینگ (شکست هیدرولیکی) دارد. تولید هیدروژن نارنجی این امکان را فراهم می‌سازد که آب با ترکیب شیمیایی خاص و مهندسی شده به درون سنگ‌ها تزریق شود، که در نتیجه آن می‌توان خلوص هیدروژن تولیدی را به صورت کنترل شده مدیریت کرد—مشابه آنچه در سامانه‌های مبتنی بر الکترولیز انجام می‌شود. این ویژگی به‌ویژه در کاهش نیاز به پالایش‌های ثانویه بسیار سودمند است، به‌ویژه در کاربردهایی که استاندارد خلوص متفاوت است (مثلاً در مواردی که از هیدروژن برای احتراق استفاده می‌شود، الزامات خلوص کمتر سخت‌گیرانه هستند). علاوه بر این، افزودن هدفمند مولکول‌های خاص به آب تزریقی، امکان بروز مسیرهای واکنشی جدیدی را فراهم می‌کند؛ از جمله جذب و ذخیره‌سازی CO_2 از طریق تشکیل کربنات درجا در طول واکنش سرپانتینیزاسیون، یا تقویت باززایی سنگ از طریق فرآیندهای میکروبی مانند Feammox، که در آن Fe^{2+} توسط میکروارگانیسم‌های کاهش‌دهنده Fe^{3+} بازیابی می‌شود. این ویژگی‌ها، هیدروژن نارنجی را به راهکاری تطبیق‌پذیر و قابل سفارشی‌سازی در تقاطع تولید انرژی پاک، جذب کربن و مهندسی بیوژئوشیمیایی تبدیل می‌کند. شکل ۵ نمایی شماتیک از فرآیندهای تولید هیدروژن نارنجی و طلایی در زیرسطح و واکنش‌های زمین‌شیمیایی مرتبط را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمای شماتیک از مسیرهای تولید هیدروژن در زیرسطح که تولید هیدروژن نارنجی از طریق تبدیل درجا (in situ) هیدروکربن‌ها و همچنین تشکیل هیدروژن طلایی از طریق فرآیندهای طبیعی زمین‌شیمیایی را نشان می‌دهد.

پروژه های پایلوت هیدروژن نارنجی در فرانسه (منطقه لورن) و آلمان از سال ۲۰۲۴ وارد فاز تزریق آب شده اند و اولین نتایج نشان می دهد که نرخ تولید هیدروژن با تحریک مهندسی شده تا ۱۰ برابر حالت طبیعی افزایش یافته است [۳۸].

۳. ارزیابی اقتصادی-زیست محیطی سناریوهای تولید هیدروژن

امکان سنجی اقتصادی و زیست محیطی مسیرهای تولید هیدروژن نقش بسیار مهمی در میزان پذیرش آنها ایفا می کند. در حالی که رقابت پذیری از نظر هزینه برای ورود به بازار اهمیت بالایی دارد، پایداری و ردپای کربن عوامل اصلی برای هم راستایی با اهداف اقلیمی جهانی مانند توافق پاریس به شمار می روند. این بخش به ارزیابی انواع مختلف هیدروژن بر پایه ی ماتریسی ترکیبی از هزینه و میزان انتشار می پردازد و عواملی مانند هزینه های تولید، انتشار گازهای گلخانه ای در کل چرخه عمر، قابلیت گسترش پذیری و چشم انداز آینده را در نظر می گیرد.

۱،۳ ارزیابی اقتصاد هیدروژن

هزینه تولید هیدروژن به شدت تحت تأثیر نوع فناوری، دسترسی به خوراک (مانند گاز طبیعی یا آب)، قیمت انرژی، و بلوغ زیرساخت ها قرار دارد. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، هیدروژن مبتنی بر سوخت های فسیلی (مانند خاکستری و قهوه ای) هنوز ارزان ترین گزینه ها هستند (۱ تا ۲،۹ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم)، در حالی که هیدروژن سبز و فیروزه ای به دلیل هزینه های بالای برق و تجهیزات، گران تر محسوب می شوند [۳۹]. با این حال، روندهای آینده نشان می دهند که کاهش چشم گیر در هزینه الکترو لایزرها و برق تجدید پذیر می تواند این فاصله قیمتی را کاهش دهد. صرفه اقتصادی هیدروژن به میزان زیادی به برابری هزینه آن با سوخت های فسیلی وابسته است. در حال حاضر، هیدروژن سبز هنوز گران است (حدود ۴،۵ تا ۱۲ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم)، اما عوامل متعددی می توانند به کاهش سریع این هزینه کمک کنند: انتظار می رود هزینه الکترو لایزرها تا سال ۲۰۳۰ بین ۳۰ تا ۵۰٪ کاهش یابد. این کاهش هزینه به دلیل مقیاس تولید بیشتر و نوآوری های فناوریانه، و کاهش پیوسته قیمت برق تجدید پذیر در سراسر جهان است که منجر به بهبود اقتصادی فرآیند الکترو لیز می شود. بر این اساس، پیش بینی قیمت هیدروژن سبز برای سال ۲۰۳۰ بین ۲ تا ۵ دلار بر کیلوگرم و تا سال ۲۰۵۰ به کمتر از ۲ دلار بر کیلوگرم می رسد [۴۰]. پیش بینی می شود قیمت سوخت های فسیلی به دلیل اجرای سیاست های قیمت گذاری کربن و کاهش منابع، افزایش یابد. این تحولات می توانند مسیر رقابت پذیری شدن هیدروژن های پاک را هموار کنند و جایگاه آنها را در آینده انرژی تقویت نمایند. این در حال است که هزینه تولید هیدروژن آبی که در سال ۲۰۳۰ در حدود ۱،۸ تا ۴۷ دلار به ازای هر کیلوگرم می باشد، پیش بینی می شود با توسعه زیرساخت های جذب دی اکسید

کربن تا سال ۲۰۳۰ به محدوده ۱,۵ تا ۳,۵ دلار به ازای هر کیلوگرم کاهش یابد و این روند تا سال ۲۰۵۰ به محدوده ۱ تا ۲ دلار به ازای هر کیلوگرم برسد.



شکل ۶. مقایسه هزینه های تولید هیدروژن در سال

یکی از چالشهای مغفول مانده در اقتصاد هیدروژن، فراتر از سناریوهای تولید، ذخیره سازی مقیاس بزرگ (در مقیاس فصلی و تراوات ساعتی) و انتقال می باشد [۴۱، ۴۲]. هزینه ذخیره سازی هیدروژن در غارهای نمکی در حدود ۰,۵ تا ۱ دلار به ازای هر کیلوگرم هزینه دارد، درحالیکه ذخیره سازی در مخازن فشرده بیش از ۵ دلار به ازای هر کیلوگرم هزینه دارد [۱۶]. همچنین انتقال از طریق خطوط لوله اختصاصی هیدروژن ۳ تا ۵ برابر گرانتر از خطوط گاز طبیعی موجود است [۴۳]. از اینرو، کشورهای دارای سازندهای نمکی گسترده، مخازن هیدروکربوری تخلیه شده، و زیرساخت شبکه گاز طبیعی مانند کشورهای حوزه خلیج فارس می توانند با راهبرد ترکیبی استفاده از مخازن و تبدیل خطوط موجود برای انتقال از این مزیت بهره مند شده و هزینه کل زنجیره تامین هیدروژن را بهینه سازی کنند [۴۴] [۴۵] [۴۶]. کشورهای شورای همکاری خلیج فارس (GCC) بخصوص عربستان سعودی، عمان و امارت متحده عربی به دلیل تجربه طولانی در مدیریت مخازن هیدروکربنی، از نظر فنی و نهادی آمادگی بیشتری برای بررسی و توسعه این نوع ذخیره سازی دارند. ایران نیز به واسطه داشتن میدانهای نفت و گاز فراوان، به ویژه مخازن تخلیه شده، از پتانسیل نظری خوبی برخوردار است، اما ارزیابی دقیق زمین شناسی، ایمنی، نشت پذیری و سازگاری مخزن با هیدروژن هنوز در سطحی قرار ندارد که بتوان آن را به مرحله تجاری گسترده رساند.

۲.۳ ارزیابی زیست محیطی

شدت کربن در تولید هیدروژن دامنه گسترده‌ای دارد. هیدروژن خاکستری و قهوه‌ای حدود ۱۰ تا ۱۲ تن دی‌اکسید کربن به ازای هر تن هیدروژن تولید می‌کنند که آن‌ها را با اهداف کربن‌خنثی (net-zero) ناسازگار می‌سازد، مگر اینکه همراه با فناوری جذب کربن (CCUS) استفاده شوند. در مقابل، هیدروژن سبز، صورتی و طلایی دارای انتشار مستقیم بسیار ناچیزی هستند. مطالعه جدید ارزیابی چرخه عمر کربن (LCA) در مسیرهای تولید هیدروژن نشان داده است که هیدروژن سبز با استفاده از انرژی بادی فراساحلی کمترین ردپای کربن را دارد [۴۷]. با این حال، در ارزیابی چرخه عمر، نگرانی‌های زیست محیطی دیگری نیز باید در نظر گرفته شود؛ مانند مصرف آب، تأثیرات زیست محیطی بر زمین، و نشت گازهای فرار (مثل متان). متان درنشت بالای متان در بالادست پروژه‌های هیدروژن آبی می‌تواند منجر به تولید ۰.۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلوگرم هیدروژن شود. در صورت فراتر رفتن نشت متان از آستانه ۲ درصد، مزایای اقلیمی هیدروژن آبی به طور کامل خنثی شده و حتی اثر گرمایشی بیشتری نسبت به هیدروژن خاکستری خواهد داشت. در همین حال، در مورد هیدروژن فیروزه‌ای، در صورتیکه کربن جامد حاصل به جای دفع در صنایع پایین دست مانند تولید گرافن استفاده می‌شود، می‌تواند ردپای کربن منفی داشته باشد.



شکل ۷. مقایسه شدت کربن و شدت مصرف آب انواع هیدروژن

۳.۳ مقایسه ترکیبی سناریوهای تولید هیدروژن

یک نقشه‌ی ارزیابی فنی-اقتصادی، عواملی نظیر هزینه تولید، پتانسیل کاهش انتشار، سازگاری با زیرساخت‌های موجود، بلوغ فناوری و قابلیت مقیاس‌پذیری را با هم ترکیب می‌کند. خلاصه‌ای از وضعیت انواع هیدروژن از منظر منبع تولید، فرایند تولید و محصولات آن، میزان هزینه، شدت کربن و شدت مصرف آب در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، فرایند

الکترولیز هیدروژن سبز و صورتی می تواند به مقادیر قابل توجهی از آب تصفیه شده نیاز داشته باشد و این نیاز در فرایندهای جانبی از جمله خالص سازی و سردسازی نیست مشهود است [۴۸]. بنابراین، تنش های آبی در مناطق خشک و تحت استرس آبی می تواند برای توسعه این انواع هیدروژن بدون در نظر گرفتن نمک زدایی و یا سیستم های جرخش آب محدودیت زا باشد [۴۹]. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در تصمیم سازی مسیرهای تولید هیدروژن، پذیرش اجتماعی می باشد که براساس مطالعه موردی صورت گرفته در سال ۲۰۲۵، هیدروژن سبز با ۸۵٪ حمایت عمومی در اروپا بالاترین پذیرش را داراست، درحالیکه هیدروژن صورتی به دلیل تردیدهای مربوط به انرژی هسته ای پایین ترین پذیرش عمومی را ثبت کرده است [۵۰، ۵۱]. در این میان هیدروژن آبی با پذیرش متوسط روبروست و نتایج در مورد هیدروژن طلایی و نارنجی نامشخص است و نیاز به آموزش عمومی و بررسی های بیشتر دارد [۵۲].

جدول ۴. خلاصه انواع هیدروژن

type	source						process						product				Cost USD/kg			CO ₂ kg/kg H ₂			Water cons. Lit w/kg H ₂		
	CH ₄	coal	Bio-CH ₄	Nuclear	REs	Rock beds	SMR	gasification	SMR+CCS/ATR	electrolysis	pyrolysis	Geo-chemical	Hydrogen	Carbon dioxide	Oxygen	Solid Carbon	L < ۳	M : ۳-۵	H : ۴,۵-۱۲	L < ۱	M : ۱-۴	H: ۹-۱۲	L < ۲	M : ۹-۱۵	H: > ۱۵
Grey	x						x						x	x			x					x		x	
Brown		x						x					x	x			x					x			x
Blue	x	x							x				x					x	x		x			x	
Pink				x						x			x		x				x	x				x	
Green					x					x			x		x				x	x				x	
Turquoise	x		x								x		x			x		x		x			x		
Gold						x						x	x				x			x			x		
Orange						x						x	x				x								x

۴,۳ مطالعه موردی کشورهای حوزه خلیج فارس

با استناد به تحلیل های ارائه شده در جدول ۴ و بررسی پتانسیل کشورهای خلیج فارس از منظر تولید و ذخیره سازی زیرزمینی هیدروژن و استراتژی های ملی، کشورهای این منطقه از مزیت چندگانه برخوردار می باشند. از یک سو، دارا بودن ذخایر عظیم گاز

طبیعی با هزینه استخراج بسیار پایین (کمتر از ۳ دلار به ازای هر میلیون واحد حرارتی) آن‌ها را به تولیدکنندگان بالقوه هیدروژن آبی با قیمت تمام‌شده رقابتی تبدیل کرده است؛ از سوی دیگر، برخورداری برخی از این کشورها از تابش خورشیدی ممتاز با ظرفیت بارگذاری بیش از ۲,۰۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال، زمینه را برای تولید هیدروژن سبز با هزینه‌ای در پایین‌ترین سطح جهانی فراهم می‌آورد. [۵۳-۵۵]. همچنین، نظر به اینکه درآمدهای نفتی سهمی بین ۶۰ تا ۹۵ درصد از بودجه ملی این کشورها را تشکیل می‌دهند، گذار جهانی به سوی انرژی کم‌کربن، این جریان درآمدی را تهدید می‌کند. ازینرو، این کشورها تلاش می‌کنند با ایجاد هاب‌های تولید، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل، و عقد قراردادهای بلندمدت با بازارهای مصرف، جایگاه خود را در اقتصاد جهانی انرژی پاک (دوران پسافسیل) تثبیت کنند [۲۷]. با وجود مزیت‌های چندگانه یادشده، تحقق چشم‌انداز هیدروژنی در کشورهای شورای همکاری خلیج فارس با چالش‌های اساسی متعددی مواجه است. نخست، چالش تأمین آب شیرین که فرایند الکترولیز به طور میانگین به ۹ لیتر آب با خلوص بالا به ازای هر کیلوگرم هیدروژن نیاز دارد در حالی که این کشورها در زمره خشک‌ترین نقاط جهان بوده و تأمین آب مورد نیاز مستلزم احداث نیروگاه‌های آب‌شیرین‌کن با سرمایه‌گذاری اولیه میلیارد دلاری است. دوم، ابهام در انتخاب حامل نهایی انرژی (هیدروژن مایع، آمونیاک یا متانول) که هزینه لجستیک نهایی را تحت تأثیر قرار داده و عدم انتخاب بهینه می‌تواند مزیت هزینه‌ای تولید را در مرحله حمل‌ونقل خنثی سازد. سوم، شکاف معنادار بین پروژه‌های اعلام‌شده و فاز بهره‌برداری تجاری که ریشه در نبود چارچوب قانونی استاندارد برای صدور گواهی کربن، رقابت درون منطقه‌ای به جای هماهنگی، و وابستگی به شرکت‌های مشاور بین‌المللی با رویکردهای کوتاه‌نظرانه دارد [۵۶].

به منظور کمی‌سازی و مقایسه عینی آمادگی کشورهای منتخب حوزه خلیج فارس (ایران، عربستان سعودی، امارات متحده عربی، عمان و قطر) برای گذار به اقتصاد هیدروژنی، یک شاخص ترکیبی بر اساس چارچوب PESTEL و با اقتباس از روش‌شناسی Baumgarten و همکاران (۲۰۲۵) توسعه داده شد. این شاخص شامل سه معیار اصلی اقتصادی (ذخایر زیرزمینی و مشارکت بین المللی)، فنی-زیست محیطی (میزان تابش خورشید، تنش آبی و کیفیت زیرساختها)، و سیاسی-نهادی (قانون ملی و تجربه جذب کربن برای توسعه هیدروژن آبی) و وزن‌دهی با تأکید بر اهمیت منابع ذخیره سازی زیرزمینی، قانون ملی به عنوان بستر جذب سرمایه و شفافیت سیاستی و دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر برای توسعه هیدروژن سبز انجام شده است. جمع وزن‌ها برابر ۱,۰۰ می‌باشد. امتیاز هر شاخص در مقیاس ۰ تا ۱۰۰ نرمال‌سازی شد و در نهایت امتیاز نهایی هر کشور از مجموع حاصلضرب امتیاز شاخص‌ها در وزن مربوطه محاسبه گردید. نتایج مربوط به شاخص ترکیبی اقتصاد هیدروژن برای کشورهای مورد مطالعه در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸. شاخص ترکیبی هیدروژن در کشورهای منتخب حوزه خلیج فارس

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، عربستان سعودی در رتبه اول قرار دارد. این برتری عمدتاً ناشی از امتیاز کامل در شاخص‌های «ذخایر زیرزمینی»، «تابش خورشید و زمین وسیع»، «مشارکت بین‌المللی» و «قانون ملی» است. وجود چارچوب چشم‌انداز ۲۰۳۰ و پروژه‌های پیشگامی مانند نیوم (تولید هیدروژن سبز با ظرفیت ۴ گیگاوات) و همچنین همکاری‌های گسترده با شرکت‌های آلمانی (تایسن کروب)، آمریکایی (ایر پروداکتس) و ژاپنی (میتسوبیشی) جایگاه این کشور را به عنوان پیشگام منطقه تثبیت کرده است. نقطه قوت امارات در شاخص‌های «تجربه جذب کربن» و «کیفیت زیرساخت» است. نخستین نیروگاه هیدروژن سبز خاورمیانه در پارک خورشیدی المکتوم و همچنین وجود شرکت‌های قدرتمندی مانند ادنوک (در حوزه جذب کربن) و مصدر (در حوزه انرژی تجدیدپذیر) نشان‌دهنده آمادگی بالای این کشور است. نقاط قوت عمان شامل «تابش خورشید نسبتاً خوب» (۶۰) و «مشارکت بین‌المللی در حال رشد» (۸۰) است. پروژه‌های متعدد از جمله منطقه ویژه اقتصادی دوقم و همکاری با شرکت‌های بلژیکی و هلندی نشان‌دهنده عزم جدی این کشور است. با این حال، امتیاز پایین در «قانون ملی» (۴۰) (به دلیل عدم انتشار استراتژی مدون) و «تجربه جذب کربن» (۶۰) در مقایسه با عربستان و امارات، مانع از ارتقای رتبه این کشور شده است. رویکرد قطر عمدتاً بر هیدروژن آبی و تکیه بر منابع عظیم گاز طبیعی متمرکز است. استراتژی اعلامی قطر مبنی بر صادرات ال‌ان‌جی و تولید هیدروژن در کشورهای واردکننده (به جای تولید داخلی) نیز در امتیاز متوسط «قانون ملی» منعکس شده است. ایران با وجود برخورداری از امتیازات بالای شاخص‌های طبیعی از جمله ذخایر زیرزمینی، تابش خورشید، تنش آبی که با نمک‌زدایی قابل حل است، در

شاخص‌های نهادی و بین‌المللی عملکرد بسیار ضعیفی داشته است که به وضوح نشان می‌دهد موانع سیاسی و تحریم‌های بین‌المللی، تبدیل پتانسیل خام طبیعی به یک اقتصاد عملیاتی هیدروژنی را با اختلال جدی مواجه کرده است. فقدان استراتژی ملی هیدروژن، عدم حضور در پروژه‌های بین‌المللی و به‌روز نبودن زیرساخت‌های جذب کربن و نمک‌زدایی، مهم‌ترین شکاف‌های دانشی و اجرایی در مسیر ایران برای تبدیل این ظرفیت بالقوه به مزیت عملیاتی محسوب می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری

گذار جهانی به سمت اقتصاد کم‌کربن، هیدروژن را به یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی آینده تبدیل کرده است. با اینحال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مسیر واحدی برای توسعه اقتصاد هیدروژن در تمامی کشورها وجود ندارد و مسیر موفقیت اقتصاد هیدروژن تنها وابسته به روش‌های تولید هیدروژن نیست، بلکه به توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی، انتقال، و مصرف نهایی نیز بستگی دارد. مسیر بهینه هیدروژن برای گذار انرژی باید متناسب با منابع پایه، آمادگی زیرساخت‌ها و اولویت‌های اقتصادی هر منطقه تنظیم شود. هیدروژن آبی یک راه حل عملی و متناسب با زیرساخت‌های کشورهای غنی از سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهد تا بدون اختلال در ثبات اقتصادی، به اهداف کربن زدایی صنایع انرژی بر برسند. این درحالیست که هیدروژن سبز با مناطق غنی از انرژی‌های تجدیدپذیر همسویی دارد. یافته‌های این مطالعه همچنین نشان داد که فناوری‌های نوظهوری مانند هیدروژن فیروزه‌ای، طلایی و نارنجی می‌توانند نقش مکمل و راهبردی در آینده اقتصاد هیدروژن ایفا کنند. هیدروژن طلایی و نارنجی به دلیل بهره‌گیری از واکنش‌های ژئوشیمیایی زیرسطحی، امکان تولید هیدروژن با شدت کربن پایین و نیاز محدود به زیرساخت‌های سطحی را فراهم می‌سازند. هیدروژن نارنجی به‌ویژه با تلفیق مهندسی مخزن، زمین‌شیمی و فناوری‌های تحریک درجا، ظرفیت تبدیل شدن به یک مسیر بومی و قابل توسعه را داراست.

براساس ارزیابی فنی-اقتصادی-زیست محیطی این تحقیق و نتایج شاخص ترکیبی هیدروژن، برای کشورهای بهره‌مند از منابع هیدروکربنی و منابع تجدیدپذیر، هیدروژن به یک دارایی استراتژیک برای گذار انرژی به مسیر کربن-صفر و تجارت بین‌المللی انرژی از طریق ایجاد هاب‌های ژئوپلتیک جدید تبدیل می‌شود. برای بهره‌برداری از این فرصت، این پژوهش پیشنهاد رویکرد سید متنوع هیدروژن را مطرح می‌کند، به گونه‌ای که هیدروژن آبی به‌عنوان راهکار کوتاه‌مدت، هیدروژن سبز به‌عنوان مسیر بلندمدت کربن‌صفر، و هیدروژن طلایی و نارنجی به‌عنوان فناوری‌های نوظهور راهبردی در کنار یکدیگر توسعه یابند. تحقق این هدف مستلزم تدوین نقشه‌راه ملی هیدروژن، توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و انتقال، تقویت همکاری‌های منطقه‌ای، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های زمین‌شیمی و مهندسی مخزن، و ایجاد چارچوب‌های قانونی شفاف برای جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی است. در نهایت،

هیدروژن نه تنها می تواند سوخت آینده باشد، بلکه به عنوان پلی راهبردی میان زیرساخت های سوخت های فسیلی و آینده انرژی کم کربن نیز عمل کند.

منابع و مراجع

1. Guo, Y., et al., *Deploying green hydrogen to decarbonize China's coal chemical sector*. Nature Communications, ۲۰۲۳. ۱۴(۱): p. ۸۱۰۴.
2. Boretti, A., *A correct perspective for hydrogen from engineered diagenesis*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۳. ۴۸(۵۸): p. ۲۱۹۸۱-۲۱۹۸۴.
3. English, J.M. and K.L. English, *An Overview of Carbon Capture and Storage and its Potential Role in the Energy Transition*. First Break, ۲۰۲۲. ۴۰(۴): p. ۳۵-۴۰.
4. Johnson, N., et al., *Realistic roles for hydrogen in the future energy transition*. Nature Reviews Clean Technology, ۲۰۲۵. ۱(۵): p. ۳۵۱-۳۷۱.
5. Ajanovic, A., M. Sayer, and R. Haas, *The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۲. ۴۷(۵۷): p. ۲۴۱۳۶-۲۴۱۵۴.
6. Deng, Q., et al., *CCS and CCUS Technologies: Giving the Oil and Gas Industry a Green Future*. Frontiers in Energy Research, ۲۰۲۲. ۱۰.
7. Osman, A.I., et al., *Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review*. Environmental Chemistry Letters, ۲۰۲۲. ۲۰(۱): p. ۱۵۳-۱۸۸.
8. Hu, H., et al., *Thermodynamic modeling and analysis of hydrogen storage systems in hydrogen refueling stations*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۵۷: p. ۱۱۰۱-۱۱۱۰.
9. Opoku Duarte, K., et al. *Underground Hydrogen Storage: Transforming Subsurface Science into Sustainable Energy Solutions*. Energies, ۲۰۲۵. ۱۸, ۷۴۸ DOI: ۱۰.۳۳۹۰/en۱۸۰۳۰۷۴۸.
10. Seyed Ghafouri, S.M.H., J. Younes, and G. Grasselli, *Geomechanics of geological storage of hydrogen: Knowledge gaps and future directions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۲۶. ۲۲۵: p. ۱۱۶۱۵۶.
11. Abid, H., et al., *Comparative assessment of future hydrogen demand potentials in a decarbonised European energy system*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۲۲: p. ۸۲-۹۶.
12. Afanasev, P., et al., *An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۷۸: p. ۸۰۵-۸۲۸.
13. Bokde, N.D., *A unified framework for multi-type hydrogen production and storage in renewable energy systems*. Energy Conversion and Management: X, ۲۰۲۵. ۲۵: p. ۱۰۰۸۴۷.
14. Zhao, J., et al., *Advances and challenges in hydrogen production technologies: A critical review*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۶. ۲۰۴: p. ۱۵۳۱۶۴.
15. Everts, A.J.W., J. Bonnie, and R. Loosveld, *Natural hydrogen development-potential and challenges*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۴۲: p. ۲۶-۳۹.

۱۶. Roy, R., et al., *Comparative techno-environmental analysis of grey, blue, green/yellow and pale-blue hydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۱۶: p. ۲۰۰-۲۱۰.
۱۷. Behera, U.S., B.K. Purohit, and H.-S. Byun, *A comprehensive review of fossil-based hydrogen production: Technological integrations, environmental sustainability, and economic viability*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۴۰: p. ۶۲۷-۶۵۲.
۱۸. Schwab, P.S. and T.A. Adams, *Meta-study and environmental techno-economic assessments (eTEAs) of blue hydrogen processes*. Computers & Chemical Engineering, ۲۰۲۵. ۲۰۰: p. ۱۰۹۱۵۴.
۱۹. Joo, C., et al., *A novel on-site SMR process integrated with a hollow fiber membrane module for efficient blue hydrogen production: Modeling, validation, and techno-economic analysis*. Applied Energy, ۲۰۲۴. ۳۵۴: p. ۱۲۲۲۲۷.
۲۰. Davids, D., et al., *Impact of methane leakage rate and carbon capture rate on blue hydrogen sustainability using combined warming index*. Applied Energy, ۲۰۲۵. ۳۹۴: p. ۱۲۵۸۸۸.
۲۱. Barnet, C., N. Maïzi, and S. Selosse, *From hydrocarbon to low-carbon hydrogen: Energy and economic challenges facing the Middle East and North Africa region*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۲۵. ۲۱۷: p. ۱۱۵۷۶۸.
۲۲. Al-Khelaiwi, M.S., et al., *Evaluation of Green and Blue Hydrogen Production Potential in Saudi Arabia*. Energy Conversion and Management: X, ۲۰۲۴. ۲۴: p. ۱۰۰۷۴۲.
۲۳. Losacker, J., et al., *Full-spectrum k-distribution weighted sum of gray gases model for air and oxyfuel combustion of hydrogen-hydrocarbon blends at atmospheric pressure*. Thermal Science and Engineering Progress, ۲۰۲۵. ۶۱: p. ۱۰۳۵۱۴.
۲۴. Buonomano, A., et al., *Green hydrogen production: energy and economic modelling of self-sufficient solar-powered electrolyser based on seawater desalination*. Journal of Cleaner Production, ۲۰۲۵. ۵۱۹: p. ۱۴۶۰۱۹.
۲۵. Algburi, S., et al., *The green hydrogen role in the global energy transformations*. Renewable and Sustainable Energy Transition, ۲۰۲۵. ۸: p. ۱۰۰۱۱۸.
۲۶. Buttler, A. and H. Spliethoff, *Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۱۸. ۸۲: p. ۲۴۴۰-۲۴۵۴.
۲۷. Ansari, D., *The Hydrogen Ambitions of the Gulf States*. Stiftung Wissenschaft und Politik, ۲۰۲۲.
۲۸. Fernández-Arias, P., et al., *Emerging Trends and Challenges in Pink Hydrogen Research*. Energies, ۲۰۲۴. ۱۷(۱۰): p. ۲۲۹۱.
۲۹. Zambari, F.Z.B., S.M. Hoseyni, and J. Cordiner, *High-level hazard analysis for pink hydrogen production*. International Journal of Green Energy, ۲۰۲۶. ۲۳(۴): p. ۸۳۱-۸۵۰.
۳۰. Boretti, D.A., *Advances in sustainable turquoise hydrogen production via methane pyrolysis in molten metals*. Cleaner Chemical Engineering, ۲۰۲۵. ۱۱: p. ۱۰۰۱۳۹.
۳۱. Roy, T.K., *Techno-economic and environmental assessment of green hydrogen production in multiple Australian regions using different electrolyzer technologies*. Renewable Energy, ۲۰۲۶. ۲۵۶: p. ۱۲۳۸۷۹.

۳۲. Rego, E.E., C.A. Oller Nascimento, and C.d.O. Ribeiro, *Economic analysis under uncertainty of turquoise hydrogen via methane pyrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۶. ۲۲۵: p. ۱۵۴۳۷۸.
۳۳. Denora, I., et al., *A study on the mechanical behaviour of carbon black and Struktosil-filled NBR compounds for hydrogen applications*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۱۸: p. ۴۰۷-۴۱۶.
۳۴. Shiran, B.S., et al., *Effects of microbial activities on hydrogen storage efficiency in porous media*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۵۴: p. ۱۵۰۲۸۷.
۳۵. Hassanpouryouzband, A., et al., *In situ hydrogen generation from underground fossil hydrocarbons*. Joule, ۲۰۲۵. ۹(۲): p. ۱۰۱۸۰۹.
۳۶. Askarova, A., et al., *Innovative technology for underground clean in situ hydrogen generation: Experimental and numerical insights for sustainable energy transition*. Renewable Energy, ۲۰۲۵. ۲۴۰: p. ۱۲۲۲۵۹.
۳۷. Nova, A., et al., *Multiscale techno-economic analysis of orange hydrogen synthesis*. Energy, ۲۰۲۳. ۲۸۲: p. ۱۲۸۶۴۴.
۳۸. Pelucchi, S., et al., *Turquoise hydrogen to reduce emissions of the north American oil upstream sector*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۸۸: p. ۱۰۴۸-۱۰۵۹.
۳۹. Baumgarten, J., C.P. Schneider, and D. Möst, *Hydrogen Economy Index – A comparative assessment of the political and economic perspective in the MENA region for a clean hydrogen economy*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۰۱: p. ۱۵۰۳-۱۵۱۷.
۴۰. Kılıç, S.S., et al., *The hydrogen-nuclear nexus: Levelized cost benchmark of pink hydrogen from small modular reactor driven alkaline electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. ۱۸۹: p. ۱۵۲۱۶۰.
۴۱. Acar, C., et al., *Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۴۹: p. ۶۱۹-۶۳۴.
۴۲. Miodic, J., et al., *Underground hydrogen storage: a review*. Geological Society Special Publications, ۲۰۲۲. ۵۲۸.
۴۳. Ali, M., et al., *Recent progress in underground hydrogen storage*. Energy & Environmental Science, ۲۰۲۵. ۱۸(۱۲): p. ۵۷۴۰-۵۸۱۰.
۴۴. Schuler, J., A. Ardane, and W. Fichtner, *A review of shipping cost projections for hydrogen-based energy carriers*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۴۹: p. ۱۴۹۷-۱۵۰۸.
۴۵. Abdellatif, M., M. Hashemi, and S. Azizmohammadi, *Large-scale underground hydrogen storage: Integrated modeling of reservoir-wellbore system*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۳. ۴۸(۵۰): p. ۱۹۱۶۰-۱۹۱۷۱.
۴۶. Perera, M.S.A., *A review of underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: Insights into various rock-fluid interaction mechanisms and their impact on the process integrity*. Fuel, ۲۰۲۳. ۳۳۴: p. ۱۲۶۶۷۷.
۴۷. Coelho, M.S., et al., *A Systematic Analysis of Life Cycle Assessments in Hydrogen Energy Systems*. Hydrogen, ۲۰۲۵. ۶(۴): p. ۹۶.
۴۸. Blay-Roger, R., et al., *Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۲۴. ۱۸۹: p. ۱۱۳۸۸۸.

۴۹. Schwab, P.S. and T.A. Adams, *Meta-study and environmental techno-economic assessments (eTEAs) of blue hydrogen processes*. Computers & Chemical Engineering, ۲۰۲۵: p. ۱۰۹۱۵۴.
۵۰. Mehmeti, A., et al., *Public Perceptions, Awareness, and Social Acceptance of Hydrogen Technologies in Albania*. Hydrogen, ۲۰۲۵. ۶(۳): p. ۶۲.
۵۱. Almaraz, S.D.-L., et al., *Identifying social aspects related to the hydrogen economy: review, synthesis, and research perspectives*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۴. ۴۹: p. ۶۰۱-۶۱۸.
۵۲. Oburoh, A., et al., *Blue hydrogen in the United Kingdom – A policy & environmental case study*. Energy Reviews, ۲۰۲۵. ۴(۲): p. ۱۰۰۱۳۱.
۵۳. Ball, M. and M. Wietschel, *The future of hydrogen – opportunities and challenges*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۰۹. ۳۴(۲): p. ۶۱۵-۶۲۷.
۵۴. Noussan, M., et al. *The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective*. Sustainability, ۲۰۲۱. ۱۳, ۲۹۸ DOI: ۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۰۱۰۲۹۸.
۵۵. Talebian, S.H., et al., *An environmental-economic analysis of a case solar power plant for power decarbonization*. Energy Science & Engineering, ۲۰۲۵.
۵۶. Zumbraegel, T., *The Technopolitics of Hydrogen: Arab Gulf States' Pursuit of Significance in a Climate-Constrained World*. Geoforum ۲۰۲۵. ۱۵۸(۱۰۴۱۶۸).