نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۱۴-۳۸

بهره‌برداری بهینه توزیع‌شده شبکه یکپارچه برق–گاز با مدل‌سازی 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

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

چکیده

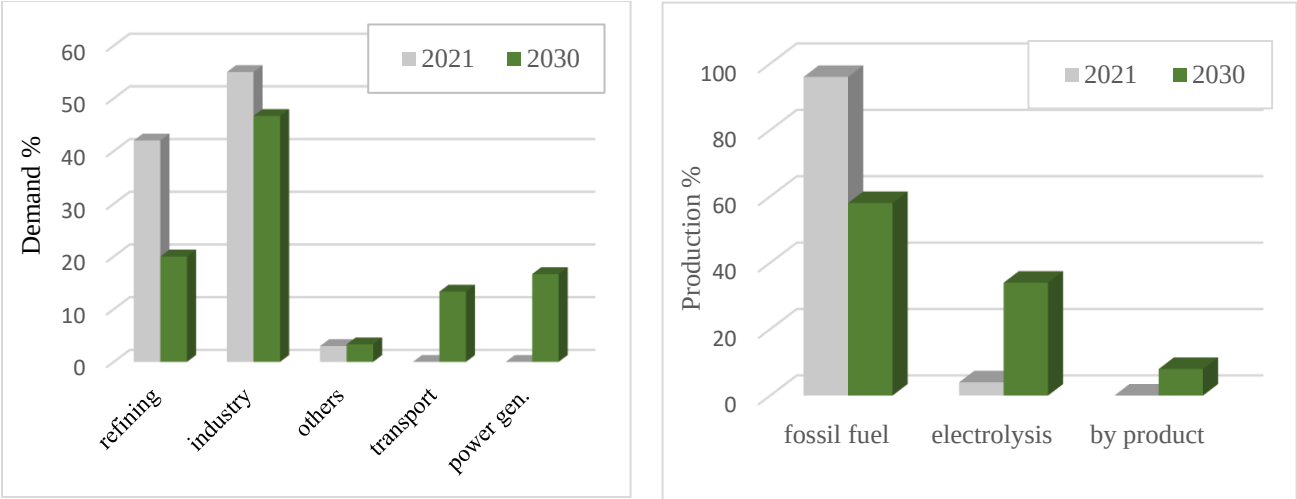
در پاسخ به تهدیدهای فزاینده‌ی تغییرات اقلیمی و نیاز فوری به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سیستم انرژی جهانی در حال گذار و دگرگونی عمیقی است. در این میان، هیدروژن (H_2) به‌عنوان حامل انرژی چندمنظوره و امیدوارکننده مطرح شده است. عنصری که ظرفیت کربن‌زدایی از بخش‌هایی را دارد که برق‌رسانی مستقیم به آن‌ها دشوار است، از جمله صنایع فولاد، مواد شیمیایی، تولید آمونیاک و حمل‌ونقل‌های سنگین. با وجود دهه‌ها تو سعه‌ی فناوری، پیاده سازی گسترده‌ی 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 می پردازد. تقاضای پیش‌بینی‌شده 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 چرخه‌ی 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 بلند مدت پیش‌قراول این گذار باشد؛ در حالی که هیدروژن آبی، با تکیه بر زیرساخت‌های موجود، راه‌حلی موقتی و پل‌گونه ارائه می‌دهد..

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 تُن 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 قابل‌توجهی 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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]



(الف) (ب)

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 به‌دنبال 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.

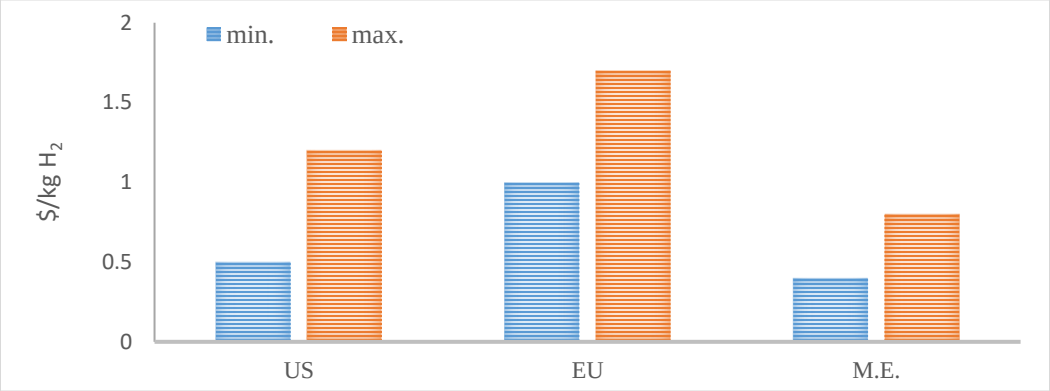
۲. مسیرهای تولید هیدروژن

فرایند تولید هیدروژن را می‌توان بر اساس منبع اولیه و شدت کربنِ 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

۱.۲ هیدروژن خاکستری و قهوه‌ای

هیدروژن خاکستری در حال حاضر رایج‌ترین شکل هیدروژن است که عمدتاً از طریق فرایند ریفورمینگ بخار متان (SMR: steam methane reforming) با استفاده از اتان یا گاز طبیعی تولید می‌شود. واکنش شیمیایی آن ($CH_4 + ۲H_2O \rightarrow CO_2 + ٤H_2$) 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 به‌جای متان، از گازی‌سازی زغال‌سنگ 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 می شود. در SMR به ازای هر ۴ مول هیدروژن تولید شده،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

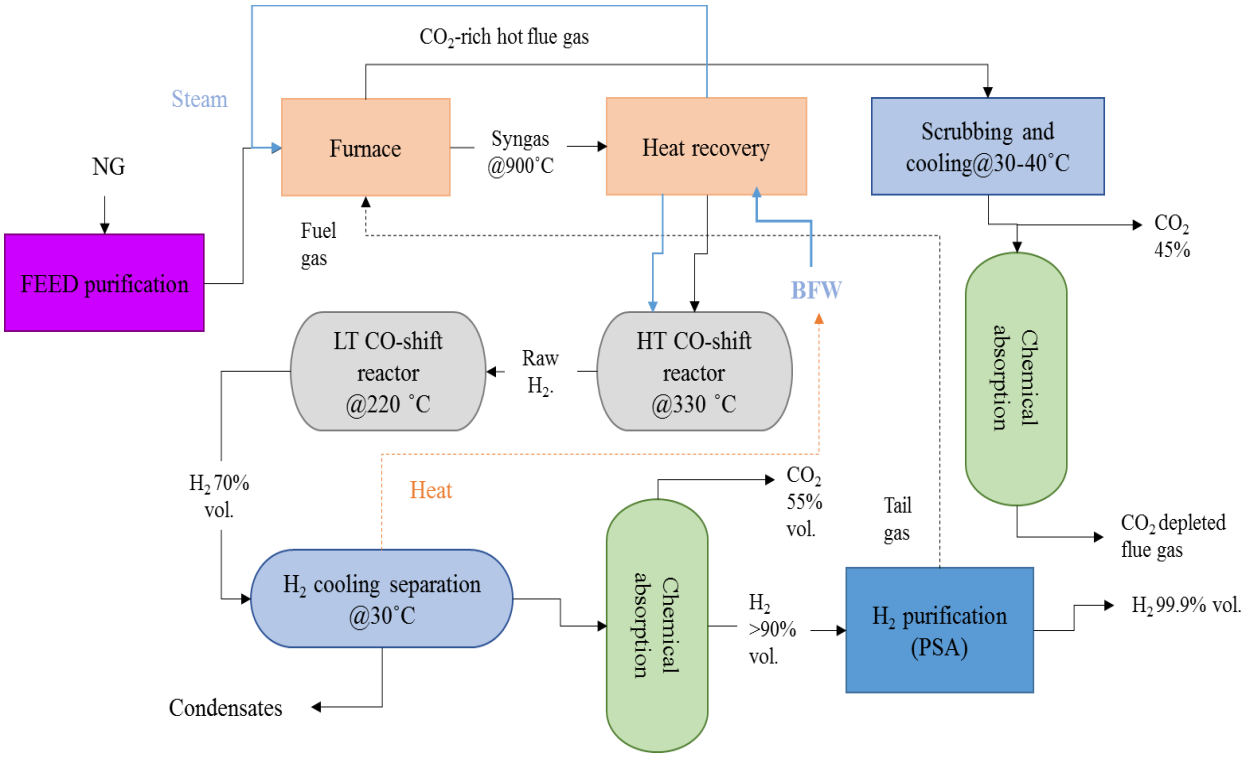
۱ مول دی‌اکسید کربن تولید می‌شود، در حالی که در اکسیداسیون جزئی (POX) این نسبت به ۱ مول دی‌اکسید کربن به ازای هر ۳ مول هیدروژن می‌رسد .با این حال، SMR نیازمند تأمین حرارت از طریق سوختن گاز طبیعی است، در حالی که فرآیندهای ATR و POX این مزیت را دارند که نیازی به منبع حرارت کربن‌زدایی‌شده ندارند [۲۰].

معادله ۱: $CH_4 + ۲H_2O \rightarrow ٤H_2 + CO_2$

معادله ۲: $CH_4 + ½O_2 \rightarrow ۲H_2 + CO_2$

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)، می توان تا میزان ۵۵ درصد از دی اکسید کربن تولیدی در فرایند تولید هیدروژن را جذب کرد. در مرحله خالصسازی به روش PSA، هیدروژن تا حد ۹۹,۹ درصد حجمی تولید می شود. گاز خروجی از این مرحله به همراه گاز سوخت وارد کوره می شود. گاز خروجی از استک کوره که دی اکسید کربن غلیظ دارد، پیش از وارد شدن به فرایند جذب شیمیایی وارد مرحله پیش-تصفیه برای جداسازی آلایندگی هایی از جمله NO_x و SO_x ، و سپس مرحله خنکسازی تا دمای ۳۰-۴۰ درجه سانتیگراد می شود. گاز خروجی از مرحله تصفیه وارد برج جذب شیمیایی می شود که در این مرحله نیز در حدود ۴۵٪ از دی اکسیدکربن ناشی از تولید هیدروژن جذب می شود. پایداری این روش تحت تأثیر نشت متان در مراحل استخراج و انتقال گاز، کارایی جذب کربن و ایمنی ذخیره‌سازی قرار دارد [۱۶]. یافته های جدید در زمینه نشت متان در زنجیره تامین گاز طبیعی نشان می دهد که درصورتیکه نشت متان از ۲٪ فراتر رود، مزایای اقلیمی هیدروژن آبی را به طور کامل خنثی می کند 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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]



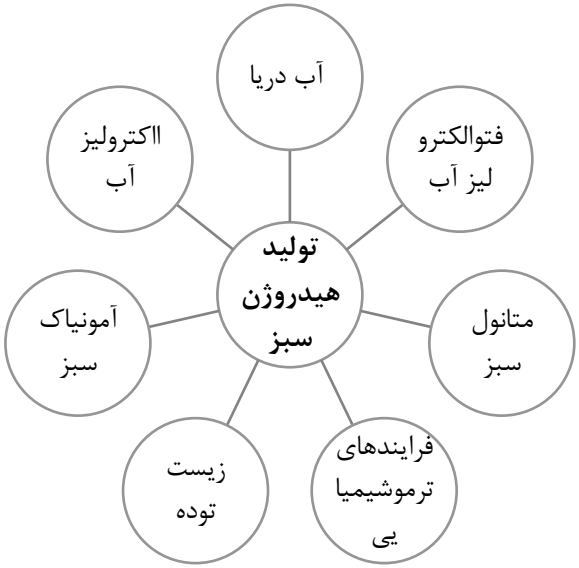
شکل ۳. شماتیک تولید هیدروژه آبی

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 به‌صورت 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 نمک های موجود و جلوگیری از خوردگی می باشد [۲۴]. در فتوالکترولیز آب از انرژی نور خورشید به طور مستقیم برای تجزیه آب استفاده می شود، که این فرایند با استفاده از مواد نیمه هادی مانند دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) انجام می گیرد. در روش تولید هیدروژن از متانول و یا آمونیاک سبز، متانول و آمونیاک با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و دی اکسید کربن جذب شده تولید شده و سپس هیدروژن از آنها استخراج می شود. در فرایندهای ترموشیمیایی تولید هیدروژن سبز، از چرخه های ترموشیمیایی در دمای بالا برای تجزیه آب استفاده می شود 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 می شود [۲۵] . همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشخص است، اگرچه هیدروژن سبز امکان تولید بدون

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

آلایندگی هیدروژن و اتصال میان‌بخشی (از برق به گاز) را فراهم می‌کند، اما به شدت وابسته به فرایند الکترولیز و آب با خلوص بالا است (حدود ۹ کیلوگرم آب برای تولید هر ۱ کیلوگرم هیدروژن). همچنین، هزینه‌ی برق عامل اصلی در ساختار هزینه‌ی این روش است، به‌طوری که تا ۷۰ درصد از کل هزینه‌ی تولید هیدروژن سبز را تشکیل می‌دهد [۲۶].



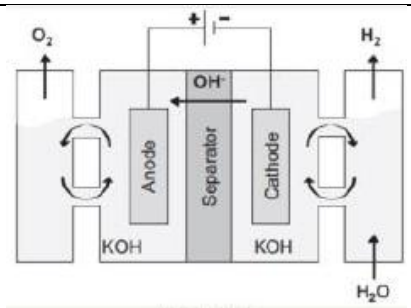
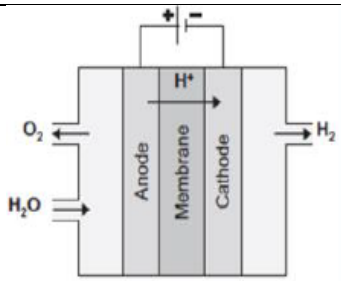
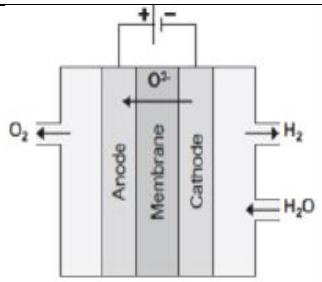
شکل ۴. فرایندهای تولید هیدروژن سبز

یک سلول الکترولیز از دو الکترود تشکیل شده است که واکنش‌های الکتروشیمیایی در حضور کاتالیزورهای مختلف بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد، یک جداکننده (separator) که عبور یون‌ها را ممکن می‌سازد اما مانع عبور الکترون‌ها و گازها می‌شود، و صفحات دوقطبی (bipolar plates) که به‌عنوان جمع‌کننده‌های جریان عمل می‌کنند و دو سلول را در یک پشته (stack) از هم جدا می‌نمایند. نوع جداکننده، فناوری الکترولیز را تعیین می‌کند 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 می‌شود. جدول ۱ ویژگی‌های کلیدی این فناوری‌ها را خلاصه می‌کند. الکترولیز قلیایی (AEC) در مقیاس صنعتی به‌خوبی توسعه یافته و مقرون‌به‌صرفه است؛ اما از الکترولیتی خورنده بر پایه پتاس یا سودا استفاده می‌کند 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، پروتون‌ها از یک غشای نازک پلیمری به‌عنوان جداکننده عبور می‌کنند و این امکان را فراهم می‌سازد که چگالی جریان‌های بالا حاصل شود. این روش به‌دلیل نیاز به فلزات گران‌بها مانند پلاتین و ایریدیوم به‌عنوان کاتالیزور، و همچنین حساسیت غشا به ناخالصی‌ها، هزینه‌برتر است؛ اما ساختاری فشرده دارد و برای استفاده در منابع تجدیدپذیر ناپایدار (مانند انرژی خورشیدی یا بادی) مناسب‌تر است. در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

فناوری SOEC، الکترولیت از زیرکونیای پایدارشده 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]. یافته ها 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 اینجال 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^3H_2)	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^3 H_2$)	۰,۹	۰,۹	۱,۱ (Steam)
Advantage	Low-cost	High power density	Water-CO_2 Co-electrolysis
Limitation	Corrosive electrolyte	High cost	Thermal-degradation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 برنامه‌هایی مانند استراتژی هیدروژن اتحادیه (۲۰۲۰) و REPowerEU (۲۰۲۲). خوشه‌های صنعتی مانند بخش فولاد آلمان و بندرهای هلند در خط مقدم کربن‌زدایی با استفاده از هیدروژن قرار دارند. چین که در حال حاضر به هیدروژن مبتنی بر زغال‌سنگ وابسته است، سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در فناوری جذب و ذخیره کربن (CCS) و الکترولایزرهای تغذیه‌شده 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 هاب‌های هیدروژن پاک در اولویت قرار گرفته است؛ تمرکز بر هیدروژن آبی به‌واسطه زیرساخت‌های گاز طبیعی موجود و همچنین هیدروژن سبز در ایالت‌های غنی از منابع تجدیدپذیر است.

جدول۲. پروژه‌های 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 NorthH۲	۰,۰۵۰ ۱۰	Operational (pilot)	۲۰۲۵	Offshore wind
UK	H۲H 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 هسته ای، 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.

۲. ۵ هیدروژن فیروزه ای

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 به‌صورت حرارتی تجزیه می‌گردد. پیرولیز متان، همان‌طور که در معادله ۳ نشان داده شده است، منجر به تولید گاز هیدروژن و کربن جامد (کربن سیاه) به‌عنوان 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 به‌عنوان 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].

معادله ۳: $CH_4 \rightarrow C(s) + ۲H_2$

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].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

۲. ۶ هیدروژن طلایی و نارنجی

هیدروژن طلایی به هیدروژن طبیعی اشاره دارد که در ساختارهای زمین‌شناسی به‌صورت طبیعی و بدون دخالت زیستی (ابیوتیک) یا به‌صورت 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 به‌صورت 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 می شوند [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 تکتونیکی را شامل می شوند. 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. فرایندهای تولید هیدروژن زیرزمینی (UHG)

UHG	Abiotic	Serpentinization	$(Mg,Fe)_2SiO_4+H_2O \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4+Fe_3O_4+H_2$
		Iron Oxidation / Reduction Reactions	$3Fe^{2+}+4H_2O \rightarrow Fe_3O_4+4H_2+O_2$ $Fe_3O_4+H_2O+CO_2 \rightarrow FeCO_3+H_2$
		Phosphate Reduction	$SiO_2+H_2O \rightarrow Si(OH)_4 \rightarrow H_2$ (via catalysis)
		Pyrite formation	$FeS + H_2S \rightarrow FeS_2 + H_2$
		Crustal weathering	$3Fe^{2+}+4H_2O+O_2 \rightarrow Fe_3O_4+4H_2$
		Crystallization	Serpentine→Olivine+Water+H_2
		Mechanical induced	$2FeO$ (inolivine)$+H_2O+O_2 \rightarrow Fe_2O_3+H_2$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

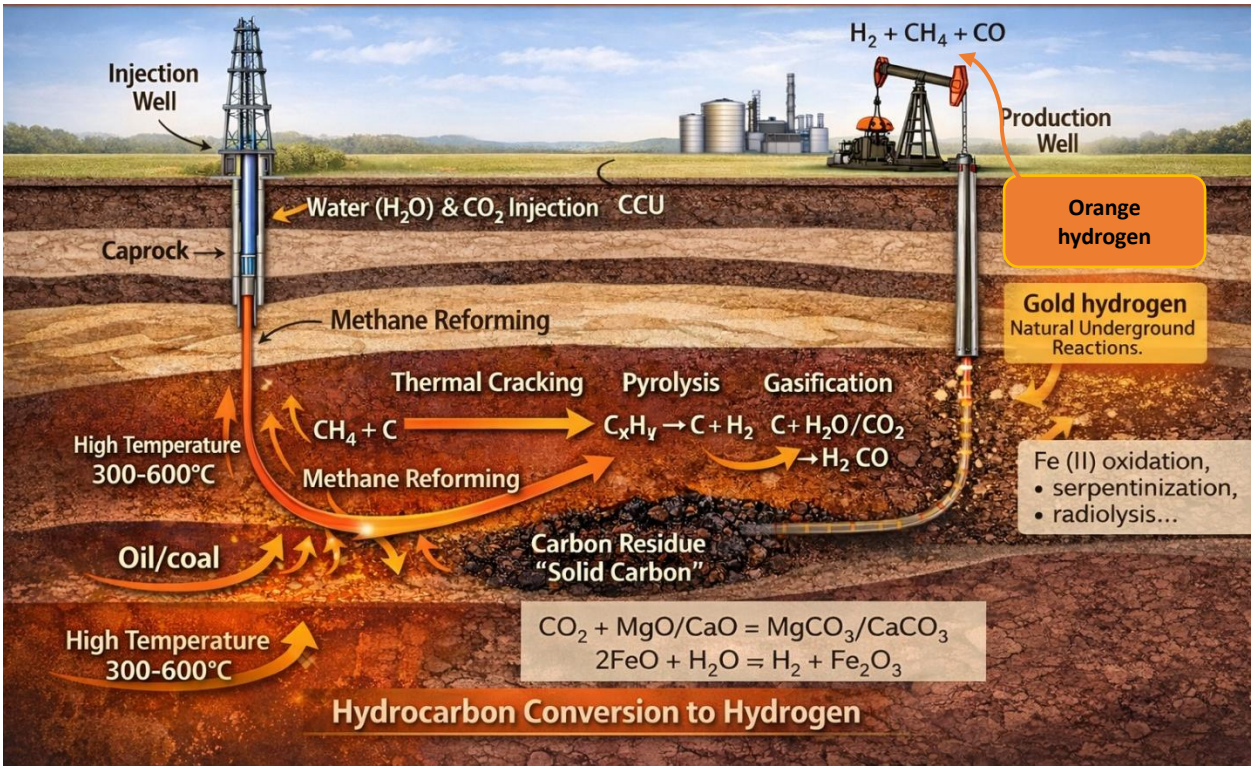
		Magnetic & hrdrothermal reactions	$FeO\ (magma)+H_2O \rightarrow Fe(OH)_3+H_2$
		Ca reaction with water	$Ca + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2$
		Radiolysis of water	$H_2O \rightarrow H_2+O_2+radicals$
		Thermal decomposition	$Kerogen/CH_x \rightarrow CH_4+CO_2+H_2$
	biological	Mixed Acid Fermentation	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3COOH+2CO_2+4H_2$
		Nitrogen fixation	$N_2+8H^++8e^- \rightarrow 2NH_3+H_2$
		Phospite oxidation	$H_3PO_3+H_2O \rightarrow H_3PO_4+H_2$
		Acetate oxidation	$CH_3COO^-+4H_2O \rightarrow 2HCO_3^-+4H_2+OH^-$
		Anaerobic CO Oxidation	$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$
		Fe^3 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 پروژه‌های تحقیقاتی متعددی در سراسر جهان به‌طور فعال در حال بررسی منابع طبیعی هیدروژن هستند، داده‌های جامع در مورد پتانسیل منابع، هزینه‌های تولید، و موقعیت‌های دقیق جغرافیایی عمدتاً محرمانه باقی مانده‌اند. این شفافیت محدود معمولاً ناشی از ماهیت اولیه اکتشافات، حساسیت‌های تجاری، و نبود چارچوب‌های قانونی مشخص برای استخراج و گزارش دهی هیدروژن طبیعی است. فراتر از عدم قطعیت‌های مربوط به اکتشاف، چالش‌های 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 ناخالصی‌های احتمالی در ذخایر مانند گاز متان (CH_4)، نیتروژن (N_2)، دی‌اکسید کربن واکنش‌نداده (CO_2) و رطوبت است. خلوص هیدروژن طبیعی به ترکیب آب نفوذی بستگی دارد؛ آبی که ممکن است حاوی CO_2، کربنات‌ها و ذرات معلق باشد که می‌توانند واکنش‌های مشابه فیشر–تروپش را تسهیل کرده و باعث تولید ناخالصی‌های آلی در شرایط مساعد زیرسطحی شوند.

هیدروژن نارنجی، توسعه‌ای نشات گرفته از هیدروژن طلایی به‌شمار می‌رود که در آن آب با فشار بالا به درون سنگ‌های اولترامافیک تزریق می‌شود تا واکنش‌های 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 می‌شود، با توجه به گرادیان زمین‌گرمایی 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 زمین‌شیمی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

و تحریک مهندسی‌شده است که شباهت‌هایی به فرکینگ (شکست هیدرولیکی) دارد. تولید هیدروژن نارنجی این امکان را فراهم می‌سازد که آب با ترکیب شیمیایی خاص و مهندسی‌شده به درون سنگ‌ها تزریق شود، که در نتیجه آن می‌توان خلوص هیدروژن تولیدی را به‌صورت کنترل‌شده 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 بازیابی سنگ از طریق فرآیندهای میکروبی مانند Feammox، که در آن Fe^{2+} توسط میکروارگانیسم‌های کاهش‌دهنده‌ی 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 فرایندهای طبیعی زمین‌شیمیایی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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–زیست‌محیطی سناریوهای تولید هیدروژن

امکان‌سنجی اقتصادی و زیست‌محیطی مسیرهای تولید هیدروژن نقش بسیار مهمی در میزان پذیرش آن‌ها ایفا می‌کند. در حالی که رقابت‌پذیری از نظر هزینه برای ورود به بازار اهمیت بالایی دارد، پایداری و ردپای کربن عوامل اصلی برای هم‌راستایی با اهداف اقلیمی جهانی مانند توافق پاریس به‌شمار می‌روند. این بخش به ارزیابی انواع مختلف هیدروژن بر پایه‌ی ماتریسی ترکیبی از هزینه و میزان انتشار می‌پردازد و عواملی مانند هزینه‌های تولید، انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل چرخه عمر، قابلیت گسترش‌پذیری و چشم‌انداز آینده را در نظر می‌گیرد.

۱,۳ ارزیابی اقتصاد هیدروژن

هزینه تولید هیدروژن به‌شدت تحت تأثیر نوع فناوری، دسترسی به خوراک (مانند گاز طبیعی یا آب)، قیمت انرژی، و بلوغ زیرساخت‌ها قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، هیدروژن مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (مانند خاکستری و قهوه‌ای) هنوز ارزان‌ترین گزینه‌ها هستند (۱ تا ۲,۹ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم)، در حالی که هیدروژن سبز و فیروزه‌ای به دلیل هزینه‌های بالای برق و تجهیزات، گران‌تر محسوب می‌شوند [۳۹]. با این حال، روندهای آینده نشان می‌دهند که کاهش چشم‌گیر در هزینه الکترولایزرها و برق تجدیدپذیر می‌تواند این فاصله قیمتی را کاهش دهد. صرفه اقتصادی هیدروژن به میزان زیادی به برابری هزینه آن با سوخت‌های 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 می‌توانند به کاهش سریع این هزینه کمک کنند: انتظار می‌رود هزینه الکترولایزرها تا سال ۲۰۳۰ بین ۳۰ تا ۵۰٪ کاهش یابد. این کاهش هزینه به دلیل مقیاس تولید بیشتر و نوآوری‌های فناورانه، وکاهش پیوسته قیمت برق تجدیدپذیر در سراسر جهان است که منجر به بهبود اقتصادی فرآیند الکترولیز می‌شود. براین 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]. پیش‌بینی می‌شود قیمت سوخت‌های فسیلی به‌دلیل اجرای سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن و کاهش منابع، افزایش یابد. این تحولات می‌توانند مسیر رقابت‌پذیرتر شدن هیدروژن‌های پاک را هموار کنند و جایگاه آن‌ها را در آینده انرژی تقویت نمایند. این درحالیست 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 زیرساختهای جذب دی اکسید

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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.

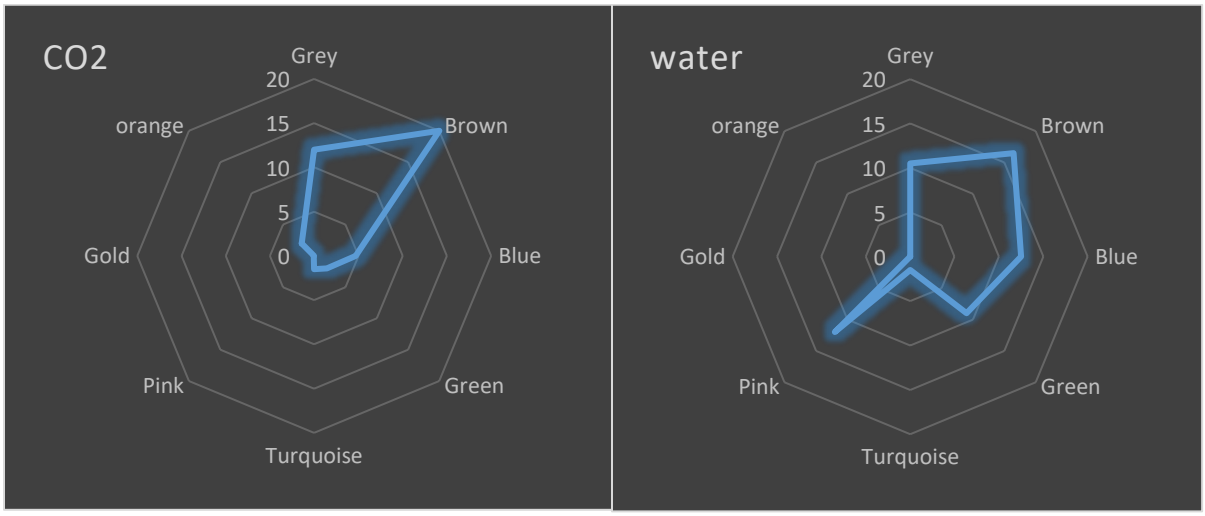
شکل ۶. مقایسه هزینه های تولید هیدروژن در سال

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 هرکیلوگرم 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 هیدروکربودری 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 ذخیره‌سازی دارند. ایران نیز به‌واسطه داشتن میدان‌های نفت و گاز فراوان، به‌ویژه مخازن تخلیه‌شده، از پتانسیل نظری خوبی برخوردار است، اما ارزیابی دقیق زمین‌شناسی، ایمنی، نشت‌پذیری و سازگاری مخزن با هیدروژن هنوز در سطحی قرار ندارد که بتوان آن را به مرحله تجاری گسترده رساند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

۲,۳ ارزیابی زیست‌محیطی

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 زیست‌محیطی دیگری نیز باید در نظر گرفته شود؛ مانند مصرف آب، تأثیرات زیست‌محیطی بر زمین، و نشت گازهای فرار (مثل متان). متان درنشت بالای متان در بالادست پروژه های هیدروژن آبی می تواند منجر به تولید ۰,۵ کیلوگرم دی اکسید 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. درهمین حال، در مورد هیدروژن فیروزه ای، درصورتیکه کربن جامد حاصل به جای دفع در صنایع پایین دست مانند تولید گرافن استفاده می شود، می تواند 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 : ۲-۵	H : ٤,٥ - ۱۲	L <۱	M : ۱-٤	H: ۹-۱۲	L <۲	M : ۹-۱۵	H:> ۱۵
Grey	×						×						×	×			×					×		×	
Brown		×						×					×	×			×					×			×
Blue	×	×							×				×					×	×		×			×	
Pink				×						×			×		×				×	×				×	
Green					×					×			×		×				×	×				×	
Turquoise	×		×								×		×			×		×		×			×		
Gold						×						×	×				×			×			×		
Orange						×						×	×				×								×

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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. [۲۲, ۵۳-۵۵]. همچنین، نظر به اینکه درآمدهای نفتی سهمی بین ۶۰ تا ۹۵ درصد از بودجه ملی این کشورها را تشکیل می دهند، 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 درون‌منطقه‌ای به جای هماهنگی، و وابستگی به شرکت‌های مشاور بین‌المللی با رویکردهای کوتاه‌نظرانه دارد [۵۶].

به منظور کمّی‌سازی 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 انرژی های 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 کروپ)، 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 برخوردار بودن از امتیازات بالای شاخص های طبیعی از جمله ذخایر زیرزمینی، تابش خورشید ، تنش آبی که با نمک‌زدایی قابل حل است، در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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 بالفوه به مزیت عملیاتی محسوب می‌شوند.

۴. نتیجه گیری

گذار جهانی به سمت اقتصاد کم‌کربن، هیدروژن را به یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی آینده تبدیل کرده است. با اینحال، نتایج این پژوهش نشان می دهد 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 ذخیره سازی، 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 می دهد تا بدون اختلال در ثبات اقتصادی، به اهداف کربن زدایی صنایع انرژی بر برسند. این درحالیست که هیدروژن سبز با مناطق غنی از انرژی های 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. یدروژن 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 تبدیل‌شدن به یک مسیر بومی و قابل توسعه را داراست.

براساس ارزیابی فنی-اقتصادی-زیست محیطی این تحقیق و نتایج شاخص ترکیبی هیدروژن، برای کشورهای بهره مند 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 هیدورژن را مطرح می کند، به گونه ای 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،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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

منابع و مراجع

۱. Guo, Y., et al., *Deploying green hydrogen to decarbonize China's coal chemical sector.* Nature Communications, ۲۰۲۳. **۱٤**(۱): p. ۸۱۰٤.

۲. Boretti, A., *A correct perspective for hydrogen from engineered diagenesis.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۳. **٤۸**(۵۸): p. ۲۱۹۸۱–۲۱۹۸٤.

۳. 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. **٤۰**(٤): p. ۳۵–٤۰.

٤. Johnson, N., et al., *Realistic roles for hydrogen in the future energy transition.* Nature Reviews Clean Technology, ۲۰۲۵. **۱**(۵): p. ۳۵۱–۳۷۱.

۵. Ajanovic, A., M. Sayer, and R. Haas, *The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۲. **٤۷**(۵۷): p. ۲٤۱۳٦–۲٤۱۵٤.

٦. Deng, Q., et al., *CCS and CCUS Technologies: Giving the Oil and Gas Industry a Green Future.* Frontiers in Energy Research, ۲۰۲۲. **۱۰**.

۷. Osman, A.I., et al., *Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review.* Environmental Chemistry Letters, ۲۰۲۲. **۲۰**(۱): p. ۱۵۳–۱۸۸.

۸. Hu, H., et al., *Thermodynamic modeling and analysis of hydrogen storage systems in hydrogen refueling stations.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٤. **۵۷**: p. ۱۱۰۱–۱۱۱۰.

۹. Opoku Duartey, K., et al. *Underground Hydrogen Storage: Transforming Subsurface Science into Sustainable Energy Solutions*. Energies, ۲۰۲۵. **۱۸**, ۷٤۸ DOI: ۱۰,۳۳۹۰/en۱۸۰۳۰۷٤۸.

۱۰. 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, ۲۰۲٦. **۲۲۵**: p. ۱۱٦۱۵٦.

۱۱. 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. ۸۲–۹٦.

۱۲. Afanasev, P., et al., *An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٤. **۷۸**: p. ۸۰۵–۸۲۸.

۱۳. 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. ۱۰۰۸٤۷.

۱٤. Zhao, J., et al., *Advances and challenges in hydrogen production technologies: A critical review.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٦. **۲۰٤**: p. ۱۵۳۱٦٤.

۱۵. Everts, A.J.W., J. Bonnie, and R. Loosveld, *Natural hydrogen development-potential and challenges.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۵. **۱٤۲**: p. ۲٦–۳۹.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

١٦. Roy, R., et al., *Comparative techno-environmental analysis of grey, blue, green/yellow and pale-blue hydrogen production.* International Journal of Hydrogen Energy, ٢٠٢٥. **١١٦**: p. ٢٠٠–٢١٠.

١٧. 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, ٢٠٢٥. **١٤٠**: p. ٦٢٧–٦٥٢.

١٨. Schwab, P.S. and T.A. Adams, *Meta-study and environmental techno-economic assessments (eTEAs) of blue hydrogen processes.* Computers & Chemical Engineering, ٢٠٢٥. ٢٠٠: p. ١٠٩١٥٤.

١٩. 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, ٢٠٢٤. **٣٥٤**: p. ١٢٢٢٢٧.

٢٠. Davids, D., et al., *Impact of methane leakage rate and carbon capture rate on blue hydrogen sustainability using combined warming index.* Applied Energy, ٢٠٢٥. **٣٩٤**: p. ١٢٥٨٨٨.

٢١. 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, ٢٠٢٥. **٢١٧**: p. ١١٥٧٦٨.

٢٢. Al-Khelaiwi, M.S., et al., *Evaluation of Green and Blue Hydrogen Production Potential in Saudi Arabia.* Energy Conversion and Management: X, ٢٠٢٤. **٢٤**: p. ١٠٠٧٤٢.

٢٣. 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, ٢٠٢٥. **٦١**: p. ١٠٣٥١٤.

٢٤. 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, ٢٠٢٥. **٥١٩**: p. ١٤٦٠١٩.

٢٥. Algburi, S., et al., *The green hydrogen role in the global energy transformations.* Renewable and Sustainable Energy Transition, ٢٠٢٥. **٨**: p. ١٠٠١١٨.

٢٦. 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, ٢٠١٨. **٨٢**: p. ٢٤٤٠–٢٤٥٤.

٢٧. Ansari, D., *The Hydrogen Ambitions of the Gulf States.* Stiftung Wissenschaft und Politik, ٢٠٢٢.

٢٨. Fernández-Arias, P., et al., *Emerging Trends and Challenges in Pink Hydrogen Research.* Energies, ٢٠٢٤. **١٧**(١٠): p. ٢٢٩١.

٢٩. Zamberi, F.Z.B., S.M. Hoseyni, and J. Cordiner, *High-level hazard analysis for pink hydrogen production.* International Journal of Green Energy, ٢٠٢٦. **٢٣**(٤): p. ٨٣١–٨٥٠.

٣٠. Boretti, D.A., *Advances in sustainable turquoise hydrogen production via methane pyrolysis in molten metals.* Cleaner Chemical Engineering, ٢٠٢٥. **١١**: p. ١٠٠١٣٩.

٣١. Roy, T.K., *Techno-economic and environmental assessment of green hydrogen production in multiple Australian regions using different electrolyzer technologies.* Renewable Energy, ٢٠٢٦. ٢٥٦: p. ١٢٣٨٧٩.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

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, ۲۰۲٦. ۲۲٥: p. ۱٥٤۳۷۸.
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, ۲۰۲٥. ۱۱۸: p. ٤۰۷–٤۱٦.
۳٤. Shiran, B.S., et al., *Effects of microbial activities on hydrogen storage efficiency in porous media.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٥. **۱٥٤**: p. ۱٥۰۲۸۷.
۳٥. Hassanpouryouzband, A., et al., *In situ hydrogen generation from underground fossil hydrocarbons.* Joule, ۲۰۲٥. **۹**(۲): p. ۱۰۱۸۰۹.
۳٦. Askarova, A., et al., *Innovative technology for underground clean in situ hydrogen generation: Experimental and numerical insights for sustainable energy transition.* Renewable Energy, ۲۰۲٥. **۲٤۰**: p. ۱۲۲۲٥۹.
۳۷. Nova, A., et al., *Multiscale techno-economic analysis of orange hydrogen synthesis.* Energy, ۲۰۲۳. **۲۸۲**: p. ۱۲۸٦٤٤.
۳۸. Pelucchi, S., et al., *Turquoise hydrogen to reduce emissions of the north American oil upstream sector.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٤. **۸۸**: p. ۱۰٤۸–۱۰٥۹.
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, ۲۰۲٥. **۱۰۱**: p. ۱٥۰۳–۱٥۱۷.
٤۰. 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, ۲۰۲٥. **۱۸۹**: p. ۱٥۲۱٦۰.
٤۱. Acar, C., et al., *Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٤. **٤۹**: p. ٦۱۹–٦۳٤.
٤۲. Miocic, J., et al., *Underground hydrogen storage: a review.* Geological Society Special Publications, ۲۰۲۲. **٥۲۸**.
٤۳. Ali, M., et al., *Recent progress in underground hydrogen storage.* Energy & Environmental Science, ۲۰۲٥. **۱۸**(۱۲): p. ٥۷٤۰–٥۸۱۰.
٤٤. Schuler, J., A. Ardone, and W. Fichtner, *A review of shipping cost projections for hydrogen-based energy carriers.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲٤. **٤۹**: p. ۱٤۹۷–۱٥۰۸.
٤٥. Abdellatif, M., M. Hashemi, and S. Azizmohammadi, *Large-scale underground hydrogen storage: Integrated modeling of reservoir-wellbore system.* International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۲۳. **٤۸**(٥۰): p. ۱۹۱٦۰–۱۹۱۷۱.
٤٦. 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. **۳۳٤**: p. ۱۲٦٦۷۷.
٤۷. Coelho, M.S., et al., *A Systematic Analysis of Life Cycle Assessments in Hydrogen Energy Systems.* Hydrogen, ۲۰۲٥. **٦**(٤): p. ۹٦.
٤۸. Blay-Roger, R., et al., *Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۲٤. **۱۸۹**: p. ۱۱۳۸۸۸.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]

٤٩. Schwab, P.S. and T.A. Adams, *Meta-study and environmental techno-economic assessments (eTEAs) of blue hydrogen processes.* Computers & Chemical Engineering, ٢٠٢٥: p. ١٠٩١٥٤.
٥٠. Mehmeti, A., et al., *Public Perceptions, Awareness, and Social Acceptance of Hydrogen Technologies in Albania.* Hydrogen, ٢٠٢٥. **٦**(٣): p. ٦٢.
٥١. Almaraz, S.D.-L., et al., *Identifying social aspects related to the hydrogen economy: review, synthesis, and research perspectives.* International Journal of Hydrogen Energy, ٢٠٢٤. **٤٩**: p. ٦٠١–٦١٨.
٥٢. Oburoh, A., et al., *Blue hydrogen in the United Kingdom – A policy & environmental case study.* Energy Reviews, ٢٠٢٥. **٤**(٢): p. ١٠٠١٣١.
٥٣. Ball, M. and M. Wietschel, *The future of hydrogen – opportunities and challenges.* International Journal of Hydrogen Energy, ٢٠٠٩. **٣٤**(٢): p. ٦١٥–٦٢٧.
٥٤. Noussan, M., et al. *The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective*. Sustainability, ٢٠٢١. **١٣**, ٢٩٨ DOI: ١٠,٣٣٩٠/su١٣٠١٠٢٩٨.
٥٥. Talebian, S.H., et al., *An environmental-economic analysis of a case solar power plant for power decarbonization.* Energy Science & Engineering, ٢٠٢٥.
٥٦. Zumbraegel, T., *The Technopolitics of Hydrogen: Arab Gulf States' Pursuit of Significance in a Climate-Constrained World.* Geoforum ٢٠٢٥. **١٥٨**(١٠٤١٦٨).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-22]