

ویژه‌نامه توسعه زنجیره فناوری‌های هیدروژنی

بررسی انواع فن‌آوری‌های تولید هیدروژن و تعداد اختراعات ثبت‌شده در برخی از فن‌آوری‌های پرکاربرد

سارا محمودیان یونسی، علیرضا پارسای و مجید زندی*

گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

چکیده

امروزه و در عصر انرژی (انقلاب صنعتی پنجم)، رقابت جهانی برای جایگزینی انرژی‌های پاک به شدت در حال گسترش است. این موضوع، باعث روی آوردن بسیاری از کشورها به سمت استفاده از هیدروژن به عنوان یک منبع اولیه انرژی پاک و تجدیدپذیر شده است. در گذشته هیدروژن تنها به عنوان یک عنصر کاربردی در صنایع و پس از آن به عنوان یک سوخت شناخته می‌شد. اما امروزه، به دلیل این موج اشتیاق به هیدروژن، نگرش به هیدروژن تغییر یافته است. در حال حاضر، هیدروژن هم به عنوان یک منبع سوخت پاک و هم یک خوراک به ویژه صنایع پتروشیمی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، انواع روش‌های مهم تولید هیدروژن بررسی شده است. به منظور تحلیل فن‌آوری‌های به کاررفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فن‌آوری را مورد موشکافی قرار داده و با توجه به آن، آینده فن‌آوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به همین علت تحلیل اختراع روی چندین روش تولید هیدروژن انجام شده است. به منظور بررسی تعداد اختراع از پایگاه داده لنز استفاده شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فن‌آوری در این پایگاه جستجو شده است. تحلیل اختراع برای ۵ فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار متان، آذرکافت (پیرولیز)، گرماکافت (ترمولیز)، برق کافت (الکترولیز) و گازی‌سازی زغال سنگ انجام شده است. با توجه به تحلیل اختراع انجام شده، فن‌آوری‌های اصلاح ریفرمینگ بخار متان، گرماکافت و گازی‌سازی زغال سنگ در حال حاضر به مرحله بلوغ خود رسیده‌اند و فن‌آوری‌های آذرکافت و برق کافت هم‌چنان در مرحله رشد خود قرار دارند. هم‌چنین طبق تحلیل انجام شده عمده کشورهای ثبت‌کننده اختراع برای هر ۵ فن‌آوری بررسی شده، ایالات متحده آمریکا، حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین بوده است.

کلمات کلیدی: تولید هیدروژن، آینده انرژی، تحلیل اختراع، چرخه عمر فن‌آوری، آینده فن‌آوری

مقدمه

در پی مناقشه‌های اخیر میان روسیه و اوکراین و تأثیر آن بر بازار نفت و گاز، کشورهای اتحادیه اروپا در راستای جایگزینی انرژی مصرفی خود و به‌خصوص گاز طبیعی به‌سمت پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه هیدروژن، حرکت کرده‌اند. اختلاف‌های منطقه‌ای در تولید هیدروژن، به‌عنوان یکی از منابع اولیه جایگزین انرژی‌های سنتی، نگرانی‌هایی را در آینده برای توسعه پایدار به‌وجود آورده است [۱]. ایران با ورود به این عرصه، علاوه‌بر کاهش مصرف گاز طبیعی در کشور و مدیریت بهینه آن، امکان برنامه‌ریزی‌هایی را در جهت نیل به امنیت پایدار اقتصادی، اجتماعی، انرژی و سیاسی فراهم می‌کند. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدروژن به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع اولیه انرژی آینده، پیش‌بینی می‌شود که بخش قابل‌توجهی از نیازهای انرژی نسل‌های آتی از این گاز تأمین شود. این دیدگاه نشان می‌دهد که صاحب‌نظران، آینده را با هیدروژن و فن‌آوری‌های مرتبط با آن در ارتباط می‌بینند [۲]. شوک قیمت‌های نفت و گاز و توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی شامل گرمایش زمین و باران‌های اسیدی منجر به اولین موج اشتیاق به هیدروژن شد. در این موج، از هیدروژن تولیدشده از زغال‌سنگ برای تأمین انرژی در بخش حمل‌ونقل استفاده شد. در همین موج مجله بین‌المللی هیدروژن راه‌اندازی شد و آژانس بین‌المللی انرژی برنامه فن‌آوری هیدروژن و پیل سوختی را آغاز کرد. موج دوم رویکرد به فن‌آوری‌های استحصال هیدروژن، به‌دلیل نگرانی‌های آب‌وهوایی آغاز شد. تمرکز مطالعه در این دهه بر انرژی‌های تجدیدپذیر، جذب و ذخیره کربن و استفاده از هیدروژن در بخش حمل‌ونقل بود. در این دهه خودروسازان از خودروهای مبتنی بر پیل سوختی رونمایی کردند. در این دهه همچنین، ژاپن و کمیسیون اروپا (به‌همراه دولت کانادا) به ترتیب ۴/۵ میلیارد یورو و ۳۳ میلیون دلار کانادا برای تجارت بین‌المللی

هیدروژن اختصاص دادند. در این برنامه، کمیسیون اروپا به‌همراه دولت کانادا به مطالعه ذخیره‌سازی و استفاده از هیدروژن برای صادرات بین‌المللی پرداختند. پایین ماندن قیمت نفت در نیمه دوم این دهه، حمایت‌های مالی به این بخش را کم و از سرعت پیشرفت آن جلوگیری نمود. نگرانی‌های مربوط به تغییر اقلیمی و اوج‌گیری قیمت نفت، بار دیگر موج سوم رویکرد به هیدروژن را رقم زد. در این موج، سیاست‌گذاری‌های جدیدی در حوزه حمل‌ونقل شکل گرفت. در این دوره، نسل جدید نیروگاه‌های هسته‌ای ارزان و شکافت حرارتی آب در تولید هیدروژن از روش‌های ارزان مورد استقبال قرار گرفت. مشارکت بین‌المللی هیدروژن و پیل سوختی در اقتصاد توسط آمریکا پیگیری شد. بار دیگر کاهش قیمت نفت هم‌چنین توسعه خودروهای برقی براساس فن‌آوری باتری منجر به کمرنگ شدن این موج اشتیاق به هیدروژن شد [۳]. به‌تازگی نگرش به هیدروژن تغییر یافته است و این عنصر نه‌تنها به‌عنوان یک سوخت، بلکه به‌عنوان یک خوراک نیز در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که رقابت جهانی برای جایگزینی انرژی‌های پاک به‌شدت در حال گسترش است، کشورهای حاشیه خلیج فارس تصمیم به حفظ جایگاه خود به‌عنوان اولین صادرکنندگان سوخت در دنیا کرده‌اند؛ به‌عنوان مثال، عمان هدفی را اعلام کرده به «انتشار صفر خالص»^۱ برسد و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای را به حداقل برساند. براساس تحلیل آژانس بین‌المللی انرژی، عمان در مسیر تبدیل شدن به ششمین صادرکننده بزرگ هیدروژن در جهان و بزرگ‌ترین صادرکننده در خاورمیانه قرار دارد. عربستان سعودی نیز در میان کشورهای حاشیه خلیج فارس، برنامه‌ای بلندپروازانه برای گسترش سهم انرژی‌های پاک در سبد انرژی‌اش دارد. این کشور مطابق با برنامه اعلام‌شده به انتشار خالص صفر دست پیدا خواهد کرد و کاهش انتشار کربن

1. Net Zero Emission (NZE)

به میزان بیش از ۲۷۸ میلیون تن در هر ساعت در برنامه‌های خود دارد [۴]. در ایران برنامه‌ای در زمینه هیدروژن تدوین نشده است. البته پژوهش‌گران در موضوع‌های مختلف مرتبط با هیدروژن بررسی‌های متعددی انجام داده‌اند در ابتدا پژوهش‌های حوزه هیدروژن در ایران، بیش‌تر بر روش‌های جداسازی هیدروژن متمرکز بوده است [۵ و ۶]. اما در سال‌های اخیر بر روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن تمرکز بیش‌تری شده است [۷ و ۸]. به‌طورکلی، ذخیره‌سازی جایگاه مهمی در آینده انرژی کشور دارد. [۹]. در این مقاله، در ابتدا انواع فن‌آوری‌های استحصال هیدروژن شرح داده‌شده است. در بخش دوم، روش به‌کاررفته جهت تحلیل اختراع و پایگاه داده مورد استفاده معرفی شده است. در بخش بعدی، تحلیل اختراع برای پنج فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق کافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام‌شده و نتایج حاصل بررسی‌شده است. در بخش انتهایی نیز نتیجه‌گیری از تحلیل اختراع انجام‌شده، ارائه‌شده است.

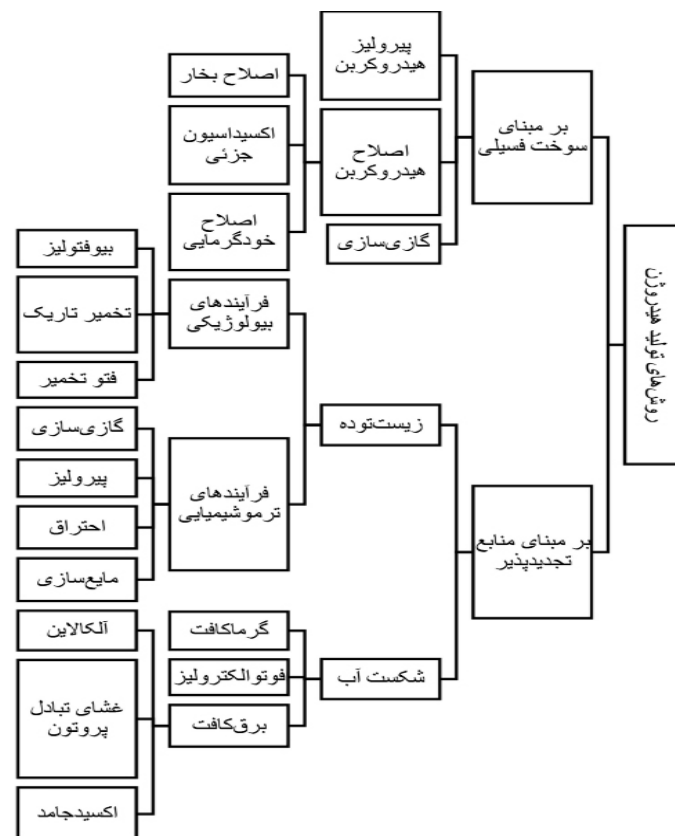
فن‌آوری‌های استحصال هیدروژن

به هر نوع هیدروژن، کدهای رنگی مشخصی

اختصاص داده می‌شود (شکل ۱). همان‌گونه که در شکل ۲ قابل‌مشاهده است، تفاوت در رنگ‌بندی انواع هیدروژن براساس منبع تولید، فرآیند و انرژی موردنیاز مدنظر است. نکته قابل‌توجه این است که تفاوت بین هیدروژن آبی و خاکستری نه در منبع تولید، بلکه در جذب و ذخیره کربن است. هر دو نوع هیدروژن آبی و خاکستری می‌توانند از منابع سوخت فسیلی مانند اصلاح ریفرمینگ بخار متان یا گازی‌سازی زغال‌سنگ تولید شوند، اما در هیدروژن آبی، کربن تولیدی در این فرآیند جذب و ذخیره می‌شود. شکل ۲ دسته‌بندی فرآیندهای تولید هیدروژن را نشان می‌دهد. در این دسته‌بندی، به‌طورکلی هیدروژن تولیدی با دو منشأ فسیلی و تجدیدپذیر درنظر گرفته‌شده است. هیدروژن تولیدی با منشأ فسیلی خود به سه دسته اصلاح ریفرمینگ هیدروکربن، آذرکافت هیدروکربن و گازی‌سازی تقسیم‌بندی شده است. اصلاح ریفرمینگ هیدروکربن خود شامل سه فرآیند اصلاح ریفرمینگ خودگرم‌شونده^۱ است. دسته دوم هیدروژن با منشأ تجدیدپذیر است که به دو دسته فرآیندهای زیست‌توده و فرآیندهای شکست آب تقسیم می‌شود.

مشکی Black منبع تولید: زغال‌سنگ مشکی فرایند تولید: گازی‌سازی زغال‌سنگ منبع انرژی: حرارت	سبز Green منبع تولید: آب فرایند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق تجدیدپذیر	خاکستری Grey منبع تولید: گاز طبیعی فرایند تولید: اصلاح بخار / گازی‌سازی منبع انرژی: حرارت	بنفش Purple منبع تولید: آب فرایند تولید: ترمولیز + الکترولیز منبع انرژی: حرارت و برق هسته‌ای	آبی Blue منبع تولید: گاز طبیعی فرایند تولید: اصلاح بخار / گازی‌سازی + جذب و ذخیره‌سازی کربن منبع انرژی: حرارت
قهوه‌ای Brown منبع تولید: زغال‌سنگ قهوه‌ای فرایند تولید: شکست هیدرولیکی منبع انرژی: حرارت	نارنجی Orange منبع تولید: زیست‌توده فرایند تولید: گازی‌سازی + اصلاح بخار منبع انرژی: حرارت	فیروزه‌ای Turquoise منبع تولید: گاز طبیعی فرایند تولید: پیرولیز منبع انرژی: برق شبکه	صورتی Pink منبع تولید: آب فرایند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق هسته‌ای	یشعی Jade green منبع تولید: گاز طبیعی فرایند تولید: اصلاح بخار متان + جذب و ذخیره‌سازی کربن منبع انرژی: برق تجدیدپذیر
سفید White منبع تولید: مخزن‌های هیدروکربوری فرایند تولید: شکست هیدرولیکی منبع انرژی: فشار و بیوشیمیایی	زرد Yellow منبع تولید: آب فرایند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق شبکه	طلایی Gold منبع تولید: مخزن‌های هیدروکربوری فرایند تولید: هم‌بندی هواری منبع انرژی: بیوشیمیایی	قرمز Red منبع تولید: آب فرایند تولید: ترمولیز منبع انرژی: حرارت هسته‌ای	سرمه‌ای Navy blue منبع تولید: گاز طبیعی فرایند تولید: اصلاح بخار متان + جذب و ذخیره‌سازی کربن منبع انرژی: برق شبکه

شکل ۱ فن‌آوری‌های تولید هیدروژن [۱۰، ۱۱ و ۱۲]



شکل ۲ انواع روش‌های استحصال هیدروژن [۱۴]

خودگرم‌شونده است [۱۳].

اصلاح ریفرمینگ بخار

فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار، واکنش میان بخار آب و هیدروکربن‌ها در دمای بالا برای تولید هیدروژن و دی‌اکسیدکربن است. اصلاح ریفرمینگ بخار، هیدروژن را از گاز طبیعی و به‌ندرت از گاز نفتی مایع‌شده و نفتا استخراج می‌کند. در این فرآیند، ابتدا مونوکسیدکربن همراه هیدروژن تولید می‌شود و منجر به تولید گاز سنتز می‌شود.



سپس از طریق واکنش دیگری، مونوکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن و هیدروژن اضافه می‌شود (واکنش جابه‌جایی آب-گاز).



واکنش کلی اصلاح ریفرمینگ بخار متان را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:



فرآیندهای زیست‌توده شامل دو دسته زیستی و ترموشیمیایی است. فرآیندهای زیرمجموعه زیستی شامل سه دسته بیوفتولیز، تخمیر تاریک و فتوتخمیر است. فرآیندهای ترموشیمیایی نیز شامل آذرکافت، گازی‌سازی، احتراق و مایع‌سازی است. در دسته دیگر که مربوط به هیدروژن تولیدی در فرآیند شکست آب است، سه روش برق‌کافت، گرماکافت و نورکافت (فتولیز) قرار گرفته است. روش گرماکافت از این جهت در دسته بر مبنای منابع تجدیدپذیر قرار گرفته است که از حرارت تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی متمرکز یا زمین گرمایی) برای شکستن مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌کند [۱۳].

اصلاح ریفرمینگ هیدروکربن

دسته اول از فرآیندهای تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی، اصلاح ریفرمینگ هیدروکربن نام دارد. این دسته شامل ۳ فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار متان، اکسیداسیون جزئی و اصلاح ریفرمینگ

این جهت مفید است که نیازی به منبع حرارتی اضافی ندارد و از اصلاح ریفرمینگ بخار متان مقرون به صرفه تر و ساده تر است.

گازی سازی

گازی سازی یک فرآیند ترموشیمیایی است که طی آن سوخت جامد کربنی به گازهای هیدروژن و مونوکسیدکربن تبدیل می شود. در واقع، زغال سنگ در حضور اکسیژن، دی اکسیدکربن، هوا یا بخار آب در دما و فشار بالا به گاز سنتز تبدیل می شود. چنین فرآیندی مقدار قابل توجهی دی اکسیدکربن آزاد می کند. علاوه بر زغال سنگ، زیست توده نیز می تواند طی چنین فرآیندی به هیدروژن و مونوکسیدکربن به همراه مقداری آب، متان و دی اکسیدکربن تبدیل شود.

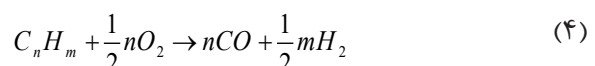
آذرکافت هیدروکربن

آذرکافت، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن است. گاز طبیعی یا متان طی این فرآیند، در اثر حرارت به گاز هیدروژن و کربن جامد تجزیه می شود $(CH_4 \rightarrow C(s) + 2H_2)$. کربن تولید شده می تواند ذخیره و برای کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، آذرکافت متان یک روش مناسب برای تولید هیدروژن با رد پای کربن کم است. به ازای هر کیلوگرم هیدروژن در این روش (در صورت استفاده از گاز به عنوان عنوان تغذیه)، ۲ kg تا ۳ kg کربن دی اکسید تولید می شود. در اینجا منظور از تولید کربن دی اکسید، رد پای تولید آن در این فرآیند است زیرا در فرآیند آذرکافت متان، تنها کربن جامد تولید می شود. در کربن دی اکسید اشاره شده، علاوه بر انتشار کربن دی اکسید حاصل از تولید برق، انتشار ناشی از استخراج و حمل و نقل گاز طبیعی نیز در نظر گرفته می شود [۱۵]. این در حالی است که تولید هر کیلوگرم هیدروژن در فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار منجر به انتشار ۹ kg تا ۱۲ kg کربن دی اکسید خواهد شد. مبنای محاسبه بخشی از این دی اکسیدکربن تولید شده، به کمک وزن مولکولی هر واکنش دهنده و محصول و نسبت

در فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار، به ازای هر کیلوگرم متان، حدود نیم کیلوگرم هیدروژن حاصل می شود. عمده هیدروژن در جهان هم اکنون به این روش تولید می شود [۱۴].

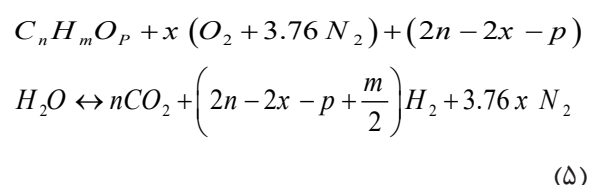
اکسیداسیون جزئی

اکسیداسیون جزئی راه حل جایگزینی برای تولید هیدروژن از طریق فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار است. در این فرآیند مخلوطی از هوا و سوختی هم چون گاز طبیعی یا هیدروکربن های سنگین به صورت جزئی در اصلاح گر سوزانده می شود و هیدروژن و مونوکسیدکربن تولید می شوند [۱۴]. مزیت اصلی اکسیداسیون جزئی این است که برخلاف اصلاح ریفرمینگ بخار، واکنشی گرمازا است و در دماهای پایین تری انجام می شود. واکنش اصلی این فرآیند به صورت زیر است:



اصلاح ریفرمینگ خود گرم شونده (خود گرمایی)

فرآیند اصلاح ریفرمینگ خود گرم شونده برای برطرف سازی مشکل خروجی پایین هیدروژن در فرآیند اکسیداسیون جزئی و گرماگیر بودن فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار توسعه یافته است. اصلاح ریفرمینگ خود گرم شونده، دو فرآیند اشاره شده را با هم ترکیب می کند و آن را به گزینه ای جذاب برای اصلاح ریفرمینگ درون سیستمی هیدروکربن های پیچیده مانند نفت سفید و گازوئیل تبدیل می کند [۱۴]. واکنش شیمیایی این فرآیند به صورت زیر است:



نسبت مولی اکسیژن به سوخت (x) بر تولید هیدروژن، گرمای واکنش و مقدار آب مورد نیاز برای تبدیل کربن سوخت به دی اکسیدکربن تأثیر می گذارد. اصلاح ریفرمینگ خود گرم شونده از

کرده‌اند. محدوده دمایی ترجیحی برای گازی سازی زیست توده °C ۱۴۰۰-۵۰۰ است. فشار کاری این فرآیند نیز بسته به مقیاس تولید و خروجی مورد نظر می‌تواند از فشار اتمسفر تا ۳۳ bar متغیر باشد. هم‌چنین، شرایط کاری مناسب برای آذرکافت زیست توده به‌طور معمول بین ۶۵۰ K تا ۸۰۰ K و ۰/۱ تا ۰/۵ MPa قرار دارد [۲۰].

• فرآیندهای بیولوژیکی

فرآیندهای بیولوژیکی که برای تولید هیدروژن به‌کار می‌روند، به سه نوع تخمیر تاریک، فتوتخمیر و نورکافت قابل دسته‌بندی هستند. در فرآیند تخمیر تاریک، باکتری‌های بی‌هوازی روی بسترهای غنی از کربوهیدرات، تحت شرایط بی‌نور و بدون اکسیژن، زیست توده اولیه را به هیدروژن، اسیدهای آلی و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌کنند. تولید هیدروژن زیستی از طریق فرآیند تخمیر تاریک با استفاده از واکنش‌های بیوشیمیایی با کمک آنزیم‌ها در دمای محیط و فشار معمولی انجام می‌شود. در فرآیند فتوتخمیر، باکتری‌های فتوسنتزی تحت شرایط بی‌هوازی از نور خورشید به‌عنوان منبع انرژی استفاده کرده و مولکول‌های آلی کوچک موجود در زیست توده را جذب می‌کنند. در این فرآیند، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن به‌عنوان محصول‌های جانبی تولید می‌شوند که امکان تولید هیدروژن از طیف وسیعی از بسترها را فراهم می‌کند [۲۱]. بیوفوتولیز یک فرآیند فتوشیمیایی-بیوشیمیایی است که با استفاده از نور، هیدروژن را از آب تولید می‌کند. در بیوفوتولیز مستقیم، مولکول آب تحت شرایط بی‌هوازی توسط فتوسنتز و با کمک فعالیت کاتالیزوری آنزیم هیدروژناز^۱، به اکسیژن و یون‌های هیدروژن تجزیه می‌شود. این فرآیند در میکروارگانیسم‌هایی مانند میکرو جلبک‌های سبز یا سیانوباکتری‌ها انجام می‌شود. یکی از مزایای این روش این است که هیدروژن به‌طور مستقیم از آب و در شرایط محیطی تولید می‌شود.

استوکیومتری هر کدام در واکنش انجام می‌شود. در یک واکنش اصلاح ریفرمینگ بخار متان، به‌ازای هر ۱ mol متان، ۴ mol هیدروژن و ۱ mol دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود. وزن ۱ mol دی‌اکسیدکربن ۴۴ g و وزن مولکولی ۴ mol هیدروژن، ۸ g است. با تقسیم این دو عدد بر یکدیگر، عدد ۵/۵ حاصل می‌شود. در واقع در واکنش اصلاح ریفرمینگ کربن، به‌ازای هر کیلوگرم هیدروژن تولیدی، ۵/۵ kg دی‌اکسیدکربن آزاد می‌شود. این مقدار فقط با در نظر گرفتن خود واکنش است، در حالی که با در نظر گرفتن رد پای دی‌اکسیدکربن تولیدی در کل زنجیره ارزش تولید هیدروژن، این مقدار تا حدود ۹ kg تا ۱۲ kg افزایش خواهد یافت [۱۶]. آذرکافت متان شامل روش‌های گوناگونی از جمله آذرکافت کاتالیستی، آذرکافت با پلاسما، آذرکافت با ماکروویو، آذرکافت با امواج شوک و سایر موارد است. علاوه بر گاز طبیعی، زیست توده و زغال سنگ نیز می‌تواند از طریق آذرکافت منجر به تولید هیدروژن شود [۱۷ و ۱۸].

تولید هیدروژن از زیست توده

زیست توده به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر، از طیف وسیعی از فعالیت‌ها از جمله کشت محصول‌های کشاورزی، جنگل‌داری، ماهی‌گیری و دامداری به‌راحتی در دسترس است. زیست توده حاوی غلظت بالایی از ترکیب‌های آلی مانند کربن، اکسیژن و هیدروژن است. از نظر ارزش انرژی، هیدروژن ماده‌ای است که بیش‌ترین سهم انرژی کل زیست توده (۴۰٪) را تشکیل می‌دهد. از یک کیلوگرم زیست توده می‌توان حدود ۰/۶۷۲ m^۳ هیدروژن تولید کرد. در حال حاضر، رایج‌ترین روش‌های تولید هیدروژن از زیست توده فرآیندهای ترموشیمیایی، بیولوژیکی و برق کافت هستند [۱۹]. از میان این روش‌ها، فرآیندهای بیولوژیکی و برق کافت برای کاربردهای بزرگ مقیاس به‌دلیل نرخ پایین تولید از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیستند در حالی که فرآیندهای ترموشیمیایی از جمله گازی سازی و آذرکافت توجه بسیاری به‌خود جلب

1. Hydrogenase

در حال حاضر به دلیل بازده پایین تولید هیدروژن، این فن آوری نیازمند مساحت قابل توجهی برای جمع آوری نور خورشید است. برخلاف روش مستقیم، در بیوفوتولیز غیرمستقیم، کربوهیدرات‌ها در مرحله تثبیت دی اکسید کربن تجمع می یابند و اکسیژن تولید می کنند. هیدروژن در مرحله بعدی با استفاده از مواد آلی تولید شده در مرحله اول به عنوان منبع کربن، تولید می شود. این موضوع باعث کاهش نیاز به افزودن مواد مغذی به محیط کشت می شود [۲۲].

فرآیندهای ترموشیمیایی

فرآیندهای ترموشیمیایی برای تولید هیدروژن به چهار نوع گازی سازی، آذرکافت، احتراق و مایع سازی تقسیم می شوند. گازی سازی یک فرآیند ترموشیمیایی است که در آن سوخت های جامد کربنی به گاز هیدروژن و مونوکسید کربن تبدیل می شود. در آذرکافت نیز، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن اتفاق می افتد.

تولید هیدروژن از فرآیند شکست آب

هیدروژن می تواند از آب که فراوانی زیادی در سطح زمین دارد نیز تولید شود. اگر انرژی کافی به مولکول آب داده شود، این مولکول به اجزای سازنده خود یعنی هیدروژن و اکسیژن شکسته می شود. فرآیند شکست آب می تواند از طریق روش های گوناگونی از جمله برق کافت، گرماکافت و فوتوالکترولیز اتفاق بیفتد.

گرماکافت (ترمولیز)

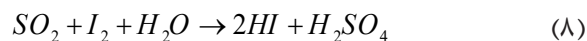
گرماکافت یک فرآیند گرماگیر است که طی آن آب در دماهای بالاتر از 2500°C به طور مستقیم به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می شود. این فرآیند برگشت پذیر بوده و یکی از چالش های آن جداسازی هیدروژن و اکسیژن تولید شده برای جلوگیری از ترکیب مجدد آن ها است. در مقابل گرماکافت، تجزیه ترموشیمیایی قرار دارد که می تواند با ترکیب انرژی حرارتی و تعدادی واکنش شیمیایی چرخه ای، آب را در دماهای پایین تر از فرآیند گرماکافت (زیر



سپس، SO_3 در دمای 800°C تا 900°C به دی اکسید گوگرد و اکسیژن تجزیه می شود،



واکنش بعدی به منظور تولید مجدد سولفوریک اسید و هیدروژن دیده انجام می شود،



در نهایت، در دمایی بین 45°C تا 450°C ، طی واکنش گاز هیدروژن تولید می شود [۱۸].

فوتوالکترولیز

مشابه برق کافت، فوتوالکترولیز فرآیندی است که به کمک جذب انرژی فوتون ها و به کارگیری الکترودهایی از جنس نیمه رسانا، به تجزیه مولکول های آب به هیدروژن و اکسیژن می پردازد. الکترودهای تیتانیوم اکسید برای این کاربرد به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند [۲۳ و ۲۴].



برق کافت (الکترولیز)

برق کافت یا الکترولیز فرآیند تجزیه مولکول های آب به هیدروژن و اکسیژن از طریق عبور جریان برق است. در واقع، برق کافت به معنای تبدیل انرژی الکتریکی به هیدروژن و اکسیژن در اثر وقوع واکنش های شیمیایی در هر یک از الکترودهای یک واحد برق کافت است. هم اکنون، فن آوری های برق کافت شامل آلکالاین، اکسید جامد و غشای مبادله کننده پروتون می شوند [۲۵ و ۲۶].

رویکردهای جدید برای تولید هیدروژن از گاز طبیعی

سایر رویکردهایی که کم تر بالغ هستند، اما کاهش انتشار را به طور کامل در فرآیند ادغام می کنند.

چهار شرکت در زمینه اصلاح ریفرمینگ بخار متان شناسایی شده است [۲۸].

• اصلاح ریفرمینگ بخار متان الکتریکی

یکی از راه‌های مقابله با انتشار در روش اصلاح ریفرمینگ بخار متان که ناشی از نیازهای گرمایشی است، استفاده از برق به جای احتراق گاز طبیعی برای این منظور است. نوآوری در این زمینه بر طراحی اصلاح‌گرهای فشرده‌ای متمرکز شده است که فرآیند را از یک کوره بزرگ با مجموعه‌ای از صدها لوله اصلاح، هر کدام به طول بیش از ۱۰ m و پر از کاتالیزور بی‌نیاز می‌کند. در فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار متان رایج، سیستم گرمایش مبتنی بر گاز به دماهای شعله بالاتر از دمای واکنش برای جبران تلفات انتقال حرارت نیاز دارد، اما یک سیستم گرمایش مقاوم‌تری الکتریکی می‌تواند از گرمایش بسیار دقیق و کارآمدتری استفاده کند که براساس ویژگی‌های واکنش‌های شیمیایی برای دستیابی به نسبت تبدیل متان بالاتر در زمان واقعی تغییر می‌کند. اگر چنین سیستم‌هایی در همه واحدهای اصلاح ریفرمینگ بخار متان با استفاده از برق تجدیدپذیر یا هسته‌ای اعمال شود، به‌طور بالقوه می‌توان انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن را تا ۱٪ کاهش داد. فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار متان الکتریکی یک حوزه ثبت اختراع به نسبت فعال با ۲۲ اختراع ثبت‌شده شناسایی شده است که ۹ مورد از این ثبت اختراع‌ها، به شرکت دانمارکی تاپسه^۳ وابسته است.

• اصلاح ریفرمینگ پلاسما^۴

روشی نوین‌تر برای تغییر به گرمایش مبتنی بر برق در فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار متان، ایجاد پلاسمای داغ گاز یونیزه شده‌ای است که در آن واکنش اتفاق می‌افتد و مزایای متعددی دارد ازجمله:

شامل اصلاح ریفرمینگ بخار متان با جذب سطحی^۱، اصلاح ریفرمینگ گرمایش الکتریکی^۲، اصلاح ریفرمینگ پلاسما و تجزیه حرارتی متان هستند [۲۷]. با این حال، این فن‌آوری‌ها تنها بخش کوچکی از فعالیت‌های ثبت اختراع اخیر مرتبط با تولید هیدروژن از گاز طبیعی را تشکیل می‌دهند. اختراع ثبت‌شده تجزیه حرارتی در حال افزایش به سمت سطح رویکردهای ادغام‌کننده جذب و ذخیره‌سازی کربن هستند.

• اصلاح ریفرمینگ بخار متان با جذب سطحی

در فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار متان، متان ابتدا با بخار آب برای جداسازی کربن از هیدروژن اصلاح ریفرمینگ می‌شود. سپس در مرحله دوم، در طی واکنش جابه‌جایی آب-گاز مونوکسیدکربن حاصل با بخار بیش‌تری برای استخراج هیدروژن اضافی از مولکول‌های آب واکنش می‌دهد. این فرآیند دومرحله‌ای به دلیل نیاز به دمای بالا و فشار بالا ($1000-800^{\circ}\text{C}$ و $1/53\text{ MPa}$) و همچنین مشکلات دستیابی به نرخ تبدیل بسیار بالا با مشکل مواجه است. فرآیند اصلاح ریفرمینگ بخار متان با جذب سطحی، این مراحل را در یک مرحله واحد، با شرایط عملیاتی ملایم‌تر ترکیب می‌کند و می‌تواند منجر به خروجی با ۹۸٪ هیدروژن و سطوح بسیار پایین‌تر مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن شود. بنابراین، مزیت‌هایی ازجمله نیاز کم‌تر به سوزاندن گاز طبیعی، انرژی کم‌تر برای تصفیه محصول هیدروژن و مواد راکتور ارزان‌تر که نیازی به تحمل چنین شرایط سختی ندارند، دارد. به علاوه، جداسازی دی‌اکسیدکربن در فرآیند جذب و ذخیره‌سازی کربن را می‌توان بسیار راحت‌تر انجام داد. علاوه بر این، فولادهای آلیاژی با دمای بالا که در راکتور اصلاح ریفرمینگ موردنیاز هستند را می‌توان با مصالح ارزان‌تر جایگزین کرد. با این حال، فعالیت ثبت اختراع در این زمینه محدود است و فقط ۱۹ اختراع ثبت‌شده از شش متقاضی مختلف، از جمله دو مؤسسه تحقیقاتی TNO و دانشگاه ایالتی اوهایو و

1. Sorption-Enhanced Steam Reforming (SE-SMR)

2. Electrically-Reforming

3. Topsoe

4. Plasma Reforming

فن‌آوری در طول عمر خود برحسب شاخص تعداد تجمعی اختراعاتی ثبت‌شده، یک منحنی S شکل را طی می‌کند. هرچند شاخص‌های مختلفی به‌صورت ترکیبی و یا تنها برای ترسیم نمودار مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما مهم‌ترین شاخص در ترسیم نمودار TLC روند ثبت اختراع بوده است. مطابق با پژوهش‌های انجام‌شده برای یک فن‌آوری در طول چرخه عمر بر طبق نمودار **شکل ۳** فوق، می‌توان چهار فاز زیر را در نظر گرفت:

(۱) پیدایش^۱: در این فاز ایده فن‌آوری مطرح‌شده و در مراکز پژوهشی مورد تحقیق و توسعه قرار می‌گیرد. تولید اختراع در این دوره در ابتدا ناچیز بوده، اما با شناخته شدن فن‌آوری توسط بازی‌گران دیگر به‌مرور نرخ تولید اختراع مرتبط با آن شدت می‌گیرد تا به نرخ رشد ثابتی می‌رسد. شکل منحنی در این فاز تا حدی نامنظم و تعداد کل اختراعات به نسبت پایین است.

(۲) رشد^۲: در این فاز نرخ رشد تولید اختراع به‌طور تقریبی ثابت بوده و رشد فن‌آوری همچنان با نرخ فزاینده‌ای در حال وقوع است. منحنی در این بخش روند روبه رشد مشخصی داشته و تقعر منحنی به سمت بالا است.

(۳) بلوغ^۳: در این فاز، تحقیق و توسعه در فن‌آوری مربوطه کاهش‌یافته که در نتیجه آن رشد نمودار شاخص تجمعی اختراع روند کاهشی به‌خود می‌گیرد.

(۱) آب ورودی مورد نیاز نیست.

(۲) تجهیزات را می‌توان بسیار فشرده ساخت.

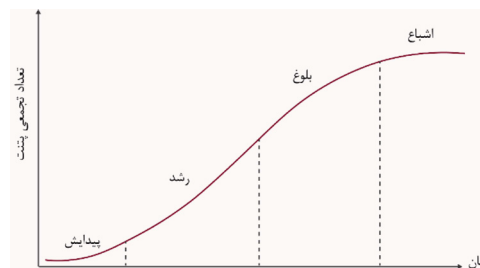
(۳) می‌توان زیست‌توده یا هیدروکربن‌های سنگین و هم‌چنین گاز طبیعی را برای تولید هیدروژن پردازش کرد.

(۴) به‌طور بالقوه می‌توان از مقادیر کم‌تری کاتالیزور استفاده کرد، درحالی‌که رادیکال‌های آزاد موجود در خود پلاسما به دستیابی بازده بالاتر کمک می‌کنند.

(۵) شرایط واکنش به‌طور بالقوه قابل تنظیم است به‌گونه‌ای که محصول هیدروژن با استفاده از همان تجهیزات به سوخت‌های مصنوعی تبدیل شود. با این‌حال، در این فن‌آوری نیاز برق برای تشکیل پلاسما همچنان بالا است و مناسب بودن آن به‌عنوان یک گزینه مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیر برای تولید هیدروژن هنوز ثابت نشده است. تنها چند اختراع ثبت‌شده مرتبط با این موضوع وجود دارد که اکثر آن‌ها از مؤسسه‌های پژوهشی کره‌ای هستند [۲۸].

روش کار

در مسیر تحلیل فن‌آوری^۱ روش‌های مختلفی برای بررسی وضعیت فن‌آوری و چشم‌انداز آینده آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های رایج در این فرآیند، بررسی چرخه عمر فن‌آوری^۲ به‌عنوان معیاری از وضعیت گذشته و حال و پیش‌بینی چشم‌انداز آینده آن است. بر این اساس، یک



شکل ۳ نمودار S شکل چرخه عمر فن‌آوری (TLC) [۲۹]

1. Technology Assessment
2. Technology Life Cycle or TLC
3. Emerging
4. Growth
5. Maturity

نتایج و بحث

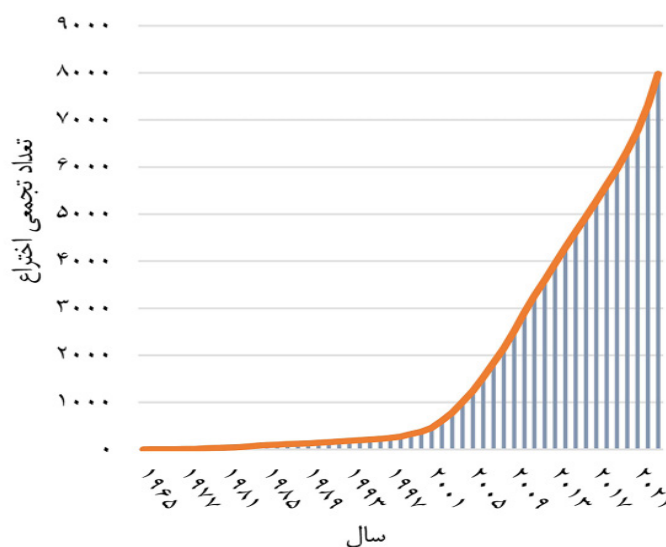
بیش‌ترین تعداد اختراعاتی ثبت‌شده^۲ در کل زنجیره ارزش هیدروژن، مربوط به بخش تولید هیدروژن مشاهده‌شده است. حدود دو سوم از اختراعاتی مربوطه بر فن‌آوری‌های مرتبط با تغییر اقلیم مانند برق‌کافت و تولید هیدروژن از زیست‌توده یا ترکیب‌های غیرآلی متمرکز هستند. در این بخش، با توجه به محدودیت در تعداد صفحه‌های انتشار مقاله، تحلیل اختراع فقط برای ۵ فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق‌کافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام‌شده است.

تحلیل اختراع برای فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار

در حوزه فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار، همان‌طور که از **شکل ۴** نشان داده می‌شود، دو چرخه عمر فن‌آوری را می‌توان در نظر گرفت. چرخه اول از سال ۱۹۶۵ میلادی آغاز و تا حدود سال ۲۰۱۵ میلادی ادامه داشته است. برای این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار قابل تشخیص هستند:

این فرآیند در پی صنعتی شدن و انتقال فن‌آوری از مراکز پژوهشی به مراکز صنعتی رخ می‌دهد. در این مرحله، اگرچه هنوز روند روبه رشد تعداد اختراعات در منحنی به‌طور منظم پیش می‌رود، اما نرخ تغییر شیب منحنی منفی بوده و تقعر آن به سمت پایین است.

۴) اشباع^۱: در این فاز تولید اختراع در فن‌آوری مربوطه روند کاهشی به خود می‌گیرد. در نتیجه نمودار تجمعی به بخش هموار خود نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر، در این مرحله تحقیق و توسعه در فن‌آوری حذف‌شده و به تبع آن سودآوری و عدم تخصیص سرمایه به تحقیق و توسعه متوقف می‌گردد. با توجه به مطالب بیان‌شده، به‌منظور تحلیل فن‌آوری‌های به کار رفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فن‌آوری را مورد موشکافی قرار داده و با توجه به آن، آینده فن‌آوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به‌منظور بررسی تعداد اختراع از پایگاه داده لنز استفاده‌شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فن‌آوری در این پایگاه جستجو شده است [۳۰].



شکل ۴ نمودار تعداد تجمعی اختراع برای فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار

1. Saturation

2. International Patent Families (IPFs)

مالکان اختراع‌های ثبت‌شده در این حوزه نیز شرکت ایداتک^۳ به‌همراه دو شرکت مذکور، به‌عنوان بزرگ‌ترین مالکان ثبت اختراع در حوزه فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار محسوب می‌شوند. در حوزه فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار، بیش‌ترین اختراع ثبت‌شده مربوط به ایالات‌متحده آمریکا با حدود ۴۸۰۰ اختراع بوده و حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین در رده‌های بعدی قرار دارد.

تحلیل اختراع برای فن‌آوری آذرکافت

مطابق با نمودار ارائه‌شده در **شکل ۵** تحلیل چرخه عمر برای فن‌آوری آذرکافت نشان‌دهنده یک چرخه عمر فن‌آوری بوده که می‌توان فازهای زیر را برای آن تشخیص داد:

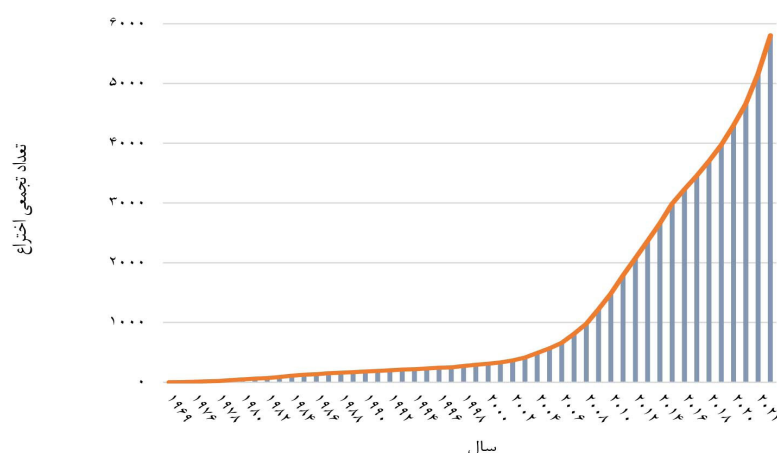
(۱) پیدایش: تا این سال نحوه رشد اختراع‌ها منظم با تقعر به‌سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فن‌آوری‌های نوظهور است. طولانی بودن دوره پیدایش نشان‌دهنده فرآیند بلندمدت برای طرح ایده در فن‌آوری آذرکافت و شناخت این فن‌آوری به‌منظور تولید هیدروژن توسط بازی‌گران این حوزه است. در مجموع در ۳۰ سال طی شده مربوط به این فاز تنها ۵۰۰ اختراع ثبت گردید.

(۱) پیدایش: تا این سال نحوه رشد اختراع‌ها منظم با تقعر به‌سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فن‌آوری‌های نوظهور است.

(۲) رشد: در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد اختراع‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به‌سمت بالا است.

(۳) بلوغ: در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به‌سمت پایین منحنی شده است رشد اختراع‌ها کندتر شده و فن‌آوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود.

چرخه دوم از سال ۲۰۱۵ میلادی آغاز و تا سال ۲۰۲۳ میلادی ادامه پیدا کرده است. در این چرخه به‌دلیل بلوغ فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار، فاز پیدایش فن‌آوری دیده نمی‌شود و چرخه از مرحله رشد آغاز شده و ادامه پیدا کرده است که این موضوع نشان‌دهنده رویکرد جدید تولیدکنندگان هیدروژن برای تحقیق و توسعه بیش‌تر در این فن‌آوری است. درخصوص متقاضیان اختراع‌های ثبت‌شده در حوزه فن‌آوری اصلاح ریفرمینگ بخار، دو شرکت آرامکو^۱ و ایر پروداکتز^۲ از متقاضیان برتر ثبت اختراع در این حوزه بوده و در مجموع حدود ۴۵۰ اختراع توسط این دو شرکت ثبت‌شده است. درخصوص



شکل ۵ نمودار تعداد تجمعی اختراع برای فن‌آوری آذرکافت

1. Aramco
2. Air Products and Chemical, Inc.
3. Idatech

این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فن‌آوری قابل‌بررسی هستند:

(۱) پیدایش: تا این سال نحوه رشد اختراعات منظم با تقعر به‌سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فن‌آوری‌های نوظهور است. در طی این فاز (۳۳ سال) تنها ۳۶۴ اختراع ثبت گردیده که نشان‌دهنده فرآیند بلندمدت برای طرح ایده در فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ و شناخت این فن‌آوری به‌منظور تولید هیدروژن توسط بازی‌گران این حوزه است.

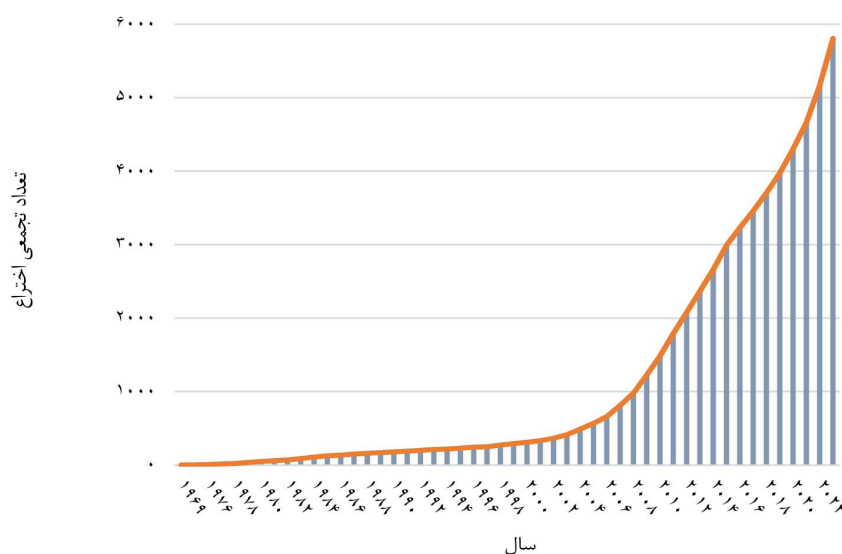
(۲) رشد: در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد اختراعات در جریان بوده و تقعر منحنی به‌سمت بالا است.

(۳) بلوغ: در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به‌سمت پایین منحنی شده است رشد اختراعات کندتر شده و فن‌آوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود. در این چرخه همانند توضیح ارائه‌شده در فن‌آوری‌های پیشین به‌دلیل بلوغ فن‌آوری، فاز پیدایش مشاهده نمی‌شود و چرخه از مرحله رشد آغاز می‌گردد که این موضوع نشان‌دهنده تحقیق و توسعه بیشتر در این فن‌آوری همراه با تولید اختراع است.

(۲) رشد: در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد اختراعات در جریان بوده و تقعر منحنی به‌سمت بالا است. این روند تصاعدی نشان‌گر اقبال بیش‌ازپیش فعالان حوزه هیدروژن به این فن‌آوری استحصال و تحقیق و توسعه در این زمینه است. در میان متقاضیان و مالکان برتر ثبت اختراع در حوزه فن‌آوری آذرکافت می‌توان به‌ترتیب شرکت‌های ایداتک، آرامکو، نفت شل و اکسون موبیل^۱ را به‌عنوان بیش‌ترین درخواست‌کننده‌های اختراع و شرکت‌های ایداتک، آرامکو، نفت شل و آیوژن^۲ را به‌عنوان بزرگ‌ترین مالکان اختراعات ثبت‌شده نام برد. براساس نمودار حوزه‌های ثبت اختراع مطابق معمول فن‌آوری‌های بررسی‌شده برای تولید هیدروژن، ۴ حوزه ایالات‌متحده آمریکا (۶۰٪)، سازمان جهانی مالکیت فکری (۲۰٪)، سازمان ثبت اختراع اروپا (۹٪) و چین (۹٪) دارای بیش‌ترین سهم در ثبت اختراع مربوط به حوزه آذرکافت می‌باشند.

تحلیل اختراع برای فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ

تحلیل چرخه عمر برای فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ در تولید هیدروژن نمایان‌گر دو چرخه عمر فن‌آوری در طی دوره است (شکل ۶). در



شکل ۶ نمودار تعداد تجمعی اختراع برای فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ

1. ExxonMobil

2. Iogen Corporation

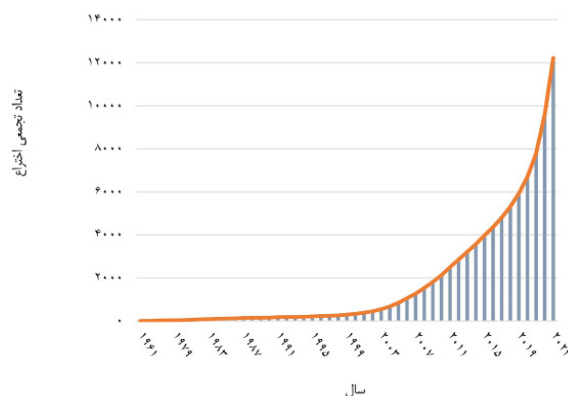
(۱) پیدایش: تا این سال نحوه رشد اختراعات منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فن‌آوری‌های نوظهور است. تعداد اختراعات ثبت‌شده در این دوره حدود ۴۵۰ عدد بوده است.

(۲) رشد: در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد اختراعات در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است. به گونه‌ای که تعداد اختراعات در این دوره ۲۰ ساله حدود ۲۴ برابر رشد داشته است. ادامه‌دار بودن فاز رشد در این چرخه نشان‌دهنده گستردگی مرحله تحقیق و توسعه در حوزه فن‌آوری برق‌کافت برای تولید هیدروژن است. شرکت‌های زیرمجموعه گروه هواننگ^۲ در کشور چین دارای بیش‌ترین تقاضا برای ثبت اختراع در حوزه فن‌آوری برق‌کافت بوده و پس‌از آن شرکت آرامکو و شرکت توشیبا قرار دارند. آمار ارائه‌شده برای مالکان اختراع اما اشتراک‌چندانی با شرکت‌های اصلی متقاضی نداشته و ایدیاتک، مک‌آلیستر تکنولوژی^۳ و آرامکو جزو بزرگ‌ترین مالکان این حوزه فن‌آوری شناخته‌شده‌اند. آمار ارائه‌شده از حوزه‌های ثبت اختراع نیز نشان‌دهنده نقش پررنگ چین در تحقیق و توسعه این فن‌آوری است. مجموع اختراعات ثبت‌شده در این کشور با پس از ایالات متحده بیش‌ترین فراوانی را در میان حوزه‌های دیگر ثبت اختراع داشته است.

با توجه به آمار بررسی‌شده درخصوص متقاضیان و مالکان برتر ثبت اختراع در فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ، علاوه بر شرکت‌های مطرح در فن‌آوری‌های تولید هیدروژن مانند آرامکو، ایرپروداکتز و نفت شیل، شرکت دیگری به نام یواوپی^۱ که یک شرکت چندملیتی محسوب می‌گردد مشاهده می‌شود که در رده اول مالکان و رده دوم متقاضیان اختراع قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری گسترده این شرکت برای تحقیق و توسعه در فن‌آوری گازی‌سازی زغال‌سنگ به منظور تولید هیدروژن است. مطابق با جستجوی انجام‌شده برای حوزه‌های برتر ثبت اختراع، حوزه ایالات متحده با اختلاف قابل توجهی بیش‌ترین سهم را دارا است. نکته قابل توجه در این نمودار، سهم بیش‌تر چین نسبت به سازمان ثبت اختراع اروپا در تولید و ثبت اختراع در فن‌آوری مربوطه است که این موضوع را می‌توان به منابع عظیم زغال‌سنگ در کشور چین نسبت داد.

تحلیل اختراع برای فن‌آوری برق‌کافت

مطابق با آنچه که در نمودار تعداد تجمعی اختراع نشان داده شده است **شکل ۷**، فن‌آوری برق‌کافت در تولید هیدروژن دارای یک چرخه فن‌آوری بوده که تاکنون ادامه پیدا کرده است. در این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فن‌آوری قابل بررسی هستند:



شکل ۷ نمودار تعداد تجمعی اختراع برای فن‌آوری برق‌کافت

1. Honeywell UOP
2. China Huaneng Group
3. McAlister Technologies

گرماکافت مربوط به ایالات متحده آمریکا با ۴۱۷ اختراع بوده و حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین در رده‌های بعدی قرار دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، در ابتدا انواع فن‌آوری‌های استحصال هیدروژن شرح داده شده است. به‌منظور تحلیل فن‌آوری‌های به‌کاررفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فن‌آوری را موشکافی کرده و با توجه به آن، آینده فن‌آوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به‌منظور بررسی تعداد اختراع از پایگاه داده لنز استفاده شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فن‌آوری در این پایگاه جستجو شده است. تحلیل اختراع برای ۵ فن‌آوری اصلاح ریفورمینگ بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق کافت و گازی‌سازی زغال سنگ انجام شده است. با توجه به تحلیل اختراع انجام شده، فن‌آوری‌های اصلاح ریفورمینگ بخار متان، گرماکافت و گازی‌سازی زغال سنگ در حال حاضر به مرحله بلوغ خود رسیده‌اند و فن‌آوری‌های آذرکافت و برق کافت همچنان در مرحله رشد خود قرار دارند. همچنین طبق تحلیل انجام شده عمده کشورهای ثبت‌کننده اختراع برای هر ۵ فن‌آوری بررسی شده، ایالات متحده آمریکا، حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین بوده است.

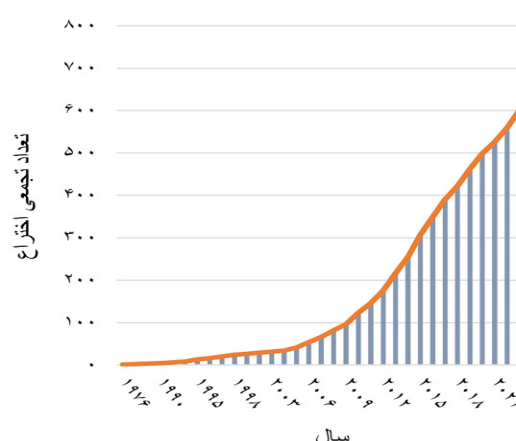
تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مرکز پژوهشی انرژی و پژوهشگاه انرژی و هیدروژن دانشگاه شهید بهشتی که در انجام این پژوهش از حمایت آن بهره‌مند بوده‌ایم، تشکر می‌شود.

1. Intelligent Energy
2. Brilliant Light Power
3. Virent Energy System, Inc.

تحلیل اختراع برای فن‌آوری گرماکافت

نمودار تعداد تجمعی اختراع در شکل ۸ نشان‌دهنده چرخه عمر فن‌آوری گرماکافت در تولید هیدروژن است. آغاز فرآیند ثبت اختراع در این حوزه آغاز و این چرخه تاکنون ادامه پیدا کرده است. در این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فن‌آوری قابل تشخیص هستند:



شکل ۸ نمودار تعداد تجمعی اختراع برای فن‌آوری گرماکافت

(۱) پیدایش: تا این سال نحوه رشد اختراعات منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فن‌آوری‌های نوظهور است. تعداد اختراع‌های ثبت شده در این دوره تنها ۳۴ عدد بوده است.

(۲) رشد: در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد اختراعات در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است. به گونه‌ای که تعداد اختراعات در این دوره ۱۰ ساله به ۲۵۵ عدد رسیده است.

(۳) بلوغ: در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به سمت پایین منحنی شده است رشد اختراعات کندتر شده و فن‌آوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود. این فاز تاکنون ادامه داشته، هرچند رشد به نسبت بیشتری را در این فاز می‌توان مشاهده کرد. فراوانی درخواست ثبت اختراع بیش‌تر معطوف به سه شرکت اینتلیجنت انرژی^۱، بریلینت لایت پاور^۲ و ویرینت^۳ می‌باشد این ترتیب در آمار ارائه شده برای مالکان اصلی اختراع نیز دیده می‌شود. بیش‌ترین اختراع ثبت شده برای فن‌آوری

مراجع

- [1]. Balsalobre-Lorente, D., Sinha, A., & Murshed, M. (2023). Russia-Ukraine conflict sentiments and energy market returns in G7 countries: Discovering the unexplored dynamics. *Energy Economics*, 125, 106847, doi: org/10.1016/j.eneco.2023.106847.
- [2]. van Dorsten B. and la Cruz F. L. D. (2022). Decoding the hydrogen rainbow, [Online]. Available: <https://www.woodmac.com/news/opinion/decoding-the-hydrogen-rainbow/>.
- [3]. IEA, The Future of Hydrogen for G20. Seizing today's opportunities, International Energy Agency, Vol. 6, No. June, pp. 246-256, 2019.
- [۴]. خردادیوز، چرخش استراتژیک اعراب؛ برنامه بلندپروازانه قطب نفت دنیا برای صادرات انرژی پاک، جستجوگر هوشمند خبری خبربان. [Online. Available: <https://38536110.khabarban.com>].
- [5]. Amanipour, M., Ganji Babakhani, E., Zamanian, A., & Heidari, M. (2011). Synthesis of a Multilayer Ceramic Membrane Used for Hydrogen Separation at High Temperature. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 1(2), 57-62, doi: 10.22078/JPST.2011.53.
- [6]. Samiee, L., Dehghani Mobarake, M., Karami, R., & Ayazi, M. (2012). Developing of ethylene glycol as a new reducing agent for preparation of Pd-Ag/PSS composite membrane for hydrogen separation. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 2(2), 25-32, doi: 10.22078/JPST.2012.119.
- [7]. Sedaee B. and asghari M. (2025). Investigating the computational fluid dynamics of temperature impact on underground hydrogen storage in carbon dioxide-containing salt caverns, *Journal of Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2024.5437.3418.
- [8]. Shahin M. and Simjoo M. (2025). Underground hydrogen storage: an essential step to achieving net-zero carbon goals, *Journal of Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2024.5447.3423.
- [9]. Mahmoudian Yonesi, S., Gandomzadeh, M., Mosayyebi, A., Mazlom Farsibaf, M., & Zandi, M. (2024). Modeling the Supply Chain of LNG with System Dynamic Method (Case study: Iran). *Strategic Studies in Petroleum and energy Industry*, 15(60), 9-9. URL: <http://iieshrm.ir/article-1-1640-en.html>.
- [10]. Do, T. N., Kwon, H., Park, M., Kim, C., Kim, Y. T., & Kim, J. (2023). Carbon-neutral hydrogen production from natural gas via electrified steam reforming: Techno-economic-environmental perspective. *Energy Conversion and Management*, 279, 116758, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116758.
- [11]. Hoang, A. T., Pandey, A., De Osés, F. J. M., Chen, W. H., Said, Z., Ng, K. H., Ağbulut, Ü., Tarełko, W., Ölçer, A.I. & Nguyen, X. P. (2023). Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization strategies and net-zero goals of world shipping: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113790., doi: 10.1016/j.rser.2023.113790.
- [12]. Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. A., Nghiem, L.D. & Mahlia, T. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113941, doi: 10.1016/j.rser.2023.113941.
- [13]. Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. A., Nghiem, L.D. & Mahlia, T. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113941, doi: 10.1016/j.rser.2023.113941.
- [14]. Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. A., Nghiem, L.D. & Mahlia, T. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113941, doi: 10.1016/j.rser.2023.113941.
- [15]. Sánchez-Bastardo, N., Schlögl, R., & Ruland, H. (2021). Methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: a potential bridge technology from fossil fuels to a renewable and sustainable hydrogen economy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(32), 11855-11881, doi: 10.1021/acs.iecr.1c01679.
- [16]. How much CO₂ is produced from steam methane reforming?, "Hydrogen Newsletter. [Online]. Available: <https://www.hydrogennewsletter.com/how-much-co2-is-produced-from-steam-methane-reforming/>.
- [17]. ENGIE InNovation, "Turquoise hydrogen," 2023. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://inNovation.engie.com/en/news/interview/emerging-sustainable-techNologies-2023/turquoise-hydrogen/29011>.
- [18]. Megía, P. J., Vizcaino, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy & Fuels*, 35(20), 16403-16415, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02501.
- [19]. El-Shafie, M., Kambara, S., & Hayakawa, Y. (2019). Hydrogen production technologies overview, doi: 10.4236/jpee.2019.71007.
- [20]. Megía, P. J., Vizcaino, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy & Fuels*, 35(20), 16403-16415, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02501.

- [21]. Akhlaghi, N., & Najafpour-Darzi, G. (2020). A comprehensive review on biological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22492-22512, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.182.
- [22]. Penconi, M., Rossi, F., Ortica, F., Elisei, F., & Gentili, P. L. (2015). Hydrogen production from water by photolysis, sonolysis and sonophotolysis with solid solutions of rare earth, gallium and indium oxides as heterogeneous catalysts. *Sustainability*, 7(7), 9310-9325, doi: doi:10.3390/su7079310.
- [23]. Penconi, M., Rossi, F., Ortica, F., Elisei, F., & Gentili, P. L. (2015). Hydrogen production from water by photolysis, sonolysis and sonophotolysis with solid solutions of rare earth, gallium and indium oxides as heterogeneous catalysts. *Sustainability*, 7(7), 9310-9325, doi: doi:10.3390/su7079310.
- [24]. Hoang, A. T., Pandey, A., De Osés, F. J. M., Chen, W. H., Said, Z., Ng, K. H., Ağbulut, Ü., Tarełko, W., Ölçer, A.I. & Nguyen, X. P. (2023). Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization strategies and net-zero goals of world shipping: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113790, doi: 10.1016/j.rser.2023.113790.
- [25]. Awad, M., Said, A., Saad, M. H., Farouk, A., Mahmoud, M. M., Alshammari, M. S., Alghaythi, M.L., Aleem, S.H.A., Abdelaziz, A.Y. & Omar, A. I. (2024). A review of water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application. *Alexandria Engineering Journal*, 87, 213-239, doi: 10.1016/j.aej.2023.12.032.
- [26]. Guo, X., Zhu, H., & Zhang, S. (2024). Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 1048-1059, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.325.
- [27]. J. A. y Ungria, C. A. Rodriguez, and P. Burattini, Hydrogen patents for a clean energy future, Epo, No. January, 2023.
- [28]. J. A. y Ungria, C. A. Rodriguez, and P. Burattini, Hydrogen patents for a clean energy future, Epo, No. January, 2023.
- [29]. Gao, L., Porter, A. L., Wang, J., Fang, S., Zhang, X., Ma, T., Wang, W. & Huang, L. (2013). Technology life cycle analysis method based on patent documents. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(3), 398-407. doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.003.
- [30]. The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search.” Accessed: May 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.lens.org/>.



Analysis of Hydrogen Production Technologies and Registered Patents in Each Field

Sara Mahmoodian Yonesi, Alireza Parsay and Majid Zandi*

Renewable Energy Department, Energy Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran Iran

m_zandi@sbu.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2024.5457.3429

Received: May 12, 2024

Accepted: December 14, 2024

Introduction

The global energy landscape is undergoing a transformative shift, with hydrogen emerging as a cornerstone of decarbonization strategies. This study investigates the technological and patent landscape of hydrogen production, emphasizing its dual role as both a clean fuel and a critical feedstock for industries like petrochemicals. The urgency of this transition is amplified by geopolitical tensions (e.g., Russia-Ukraine conflict) and climate commitments, prompting nations to prioritize hydrogen as a replacement for fossil fuels.

The study examines various hydrogen production technologies and their patent registrations, highlighting the global shift toward clean energy solutions. Hydrogen, once primarily used in industrial applications, is now recognized as a key player in the transition to sustainable energy. The research focuses on five major technologies: methane steam reforming, pyrolysis, thermolysis, electrolysis, and coal gasification. The motivation for this study stems from the increasing global competition to replace traditional energy sources with hydrogen, driven by environmental concerns and geopolitical factors, such as the Russia-Ukraine conflict's impact on energy markets. Moreover, the study also underscores the lack of a formal hydrogen program in Iran, despite growing research interest in hydrogen storage and separation methods.

Materials and Methods

The research employs a patent analysis approach to

evaluate the maturity and growth stages of hydrogen production technologies. Moreover, enough data were collected from the Lens database, using keywords specific to each technology. Moreover, the analysis is grounded in the Technology Life Cycle (TLC) framework, which categorizes technologies into four phases: emerging, growth, maturity, and saturation. In addition, the studies track the cumulative number of patents over time to determine the developmental stage of each technology. In addition, this method provides insights into past trends, current status, and future potential of the technologies.

Results and Discussion

The patent analysis reveals distinct stages of development for each technology:

- **Methane Steam Reforming:** Exhibits two life cycles, with the first reaching maturity by 2015 and the second showing renewed growth from 2015 onward. The U.S., WIPO, and Europe dominate patent registrations.
 - **Pyrolysis:** Remains in the growth phase, with significant patent activity since 2005. The U.S. leads, followed by WIPO and China.
 - **Coal Gasification:** Shows two cycles, with the first maturing by 2019 and the second entering growth. The U.S. and China are key players.
 - **Electrolysis:** Continues to grow rapidly, with China and the U.S. as major contributors.
 - **Thermolysis:** Reached maturity by 2023, with the U.S. holding the most patents.
- Notably, companies like Aramco, Air Products, and

Idatech are prominent in patent filings, reflecting their leadership in hydrogen technology innovation.

Conclusions

The study concludes that methane steam reforming, thermolysis, and coal gasification have reached maturity, while pyrolysis and electrolysis are still evolving. The U.S., WIPO, Europe, and China are the primary hubs for hydrogen-related patents, indicating their strategic focus on clean energy. Ultimately, the findings suggest that electrolysis and pyrolysis hold significant potential for future advancements, given their ongoing growth. For Iran and similar regions, the study highlights the need for structured hydrogen programs to capitalize on these technologies and integrate into the global clean energy landscape.

References

1. Balsalobre-Lorente, D., Sinha, A., & Murshed, M. (2023). Russia-Ukraine conflict sentiments and energy market returns in G7 countries: Discovering the unexplored dynamics. *Energy Economics*, 125, 106847, doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106847.
2. van Dorsten B. and la Cruz F. L. D. (2022). Decoding the hydrogen rainbow, [Online]. Available: <https://www.woodmac.com/news/opinion/decoding-the-hydrogen-rainbow/>.
3. IEA, The Future of Hydrogen for G20. Seizing today's opportunities, International Energy Agency, Vol. 6, No. June, pp. 246–256, 2019.
4. Amanipour, M., Ganji Babakhani, E., Zamanian, A., & Heidari, M. (2011). Synthesis of a Multilayer Ceramic Membrane Used for Hydrogen Separation at High Temperature. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 1(2), 57-62, doi: 10.22078/JPST.2011.53.
5. Samiee, L., Dehghani Mobarake, M., Karami, R., & Ayazi, M. (2012). Developing of ethylene glycol as a new reducing agent for preparation of Pd-Ag/PSS composite membrane for hydrogen separation. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 2(2), 25-32, doi: 10.22078/JPST.2012.119.
6. Sedaee B. and asghari M. (2025). Investigating the computational fluid dynamics of temperature impact on underground hydrogen storage in carbon dioxide-containing salt caverns, *Journal of Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2024.5437.3418.
7. Shahin M. and Simjoo M. (2025). Underground hydrogen storage: an essential step to achieving net-zero carbon goals, *Journal of Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2024.5447.3423.
8. Do, T. N., Kwon, H., Park, M., Kim, C., Kim, Y. T., & Kim, J. (2023). Carbon-neutral hydrogen production from natural gas via electrified steam reforming: Techno-economic-environmental perspective. *Energy Conversion and Management*, 279, 116758, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116758.
9. Hoang, A. T., Pandey, A., De Osés, F. J. M., Chen, W. H., Said, Z., Ng, K. H., Ağbulut, Ü., Tarelko, W., Ölçer, A.I. & Nguyen, X. P. (2023). Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization strategies and net-zero goals of world shipping: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113790., doi: 10.1016/j.rser.2023.113790.