

بررسی انواع فناوری‌های تولید هیدروژن و تعداد پتنت‌های ثبت‌شده در برخی از فناوری‌های پر کاربرد

مجید زندی^{۱*}، سارا محمودیان یونسی^۱، علیرضا پارسای^۲

۱- دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

m_zandi@sbu.ac.ir

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 به‌عنوان یک منبع اولیه انرژی پاک و تجدیدپذیر شده است. در گذشته هیدروژن تنها به‌عنوان یک عنصر کاربردی در صنایع و پس از آن به‌عنوان یک سوخت شناخته می‌شد. اما امروزه، به دلیل این موج اشتیاق به هیدروژن، نگرش به هیدروژن تغییر یافته است. در حال حاضر، هیدروژن هم به‌عنوان یک منبع سوخت پاک و هم یک خوراک به‌ویژه صنایع پتروشیمی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، انواع روش‌های مهم تولید هیدروژن بررسی شده است. به منظور تحلیل فناوری‌های به کاررفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فناوری را مورد موشکافی قرار داده و با توجه به آن، آینده فناوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به همین علت تحلیل پتنت روی چندین روش تولید هیدروژن انجام شده است. به منظور بررسی تعداد پتنت از پایگاه داده لنز استفاده شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فناوری در این پایگاه جستجو شده است. تحلیل پتنت برای ۵ فناوری اصلاح بخار متان (Steam Methane Reforming)، آذرکافت (پیرولیز)، گرماکافت (ترمولیز)، برق کافت (الکترولیز) و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام شده است. با توجه به تحلیل پتنت انجام شده، فناوری‌های اصلاح بخار متان، گرماکافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ در حال حاضر به مرحله بلوغ خود رسیده‌اند و فناوری‌های آذرکافت و برق کافت هم‌چنان در مرحله رشد خود قرار دارند. هم‌چنین طبق تحلیل انجام شده عمده کشورهای ثبت‌کننده پتنت برای هر ۵ فناوری 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 پتنت، چرخه عمر فناوری، آینده فناوری

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 (Balsalobre-Lorente et al., 2023). ایران با ورود به این عرصه، علاوه بر 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 عنصر تأمین شود. این دیدگاه نشان می‌دهد که صاحب‌نظران، آینده را با هیدروژن و فناوری‌های مرتبط با آن در ارتباط می‌بینند (Dorsten & Cruz, 2022).

شوک قیمت‌های نفت و گاز و توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی شامل گرمایش زمین و باران‌های اسیدی منجر به اولین موج اشتیاق به هیدروژن در دهه ۱۹۷۰ میلادی شد. در این موج، از هیدروژن تولیدشده از زغال‌سنگ برای تأمین انرژی در بخش حمل‌ونقل استفاده شد. در همین موج و در سال ۱۹۷۶ میلادی، مجله بین‌المللی هیدروژن راه‌اندازی شد و آژانس بین‌المللی انرژی برنامه فناوری هیدروژن و پیل سوختی را در سال ۱۹۷۷ میلادی آغاز کرد. موج دوم روی کرد به فناوری‌های استحصال هیدروژن، در دهه ۱۹۹۰ میلادی 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 در سال ۲۰۰۰ میلادی، موج سوم روی کرد 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 ارزان‌مورد استقبال قرار گرفت. مشارکت بین‌المللی هیدروژن و پیل سوختی در اقتصاد توسط آمریکا در سال ۲۰۰۳ میلادی پیگیری شد. بار دیگر کاهش قیمت نفت در سال ۲۰۱۰ میلادی و هم‌چنین توسعه خودروهای برقی براساس فناوری باتری منجر به کمرنگ شدن این موج اشتیاق به هیدروژن شد (IEA, 2019). 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 و در سال ۲۰۲۲ میلادی، عمان هدفی را اعلام کرده که تا سال ۲۰۵۰ میلادی به «انتشار صفر خالص^۱» برسد و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای را به حداقل

^۱ Net Zero Emission (NZE)

برسازند. براساس تحلیل آژانس بین‌المللی انرژی، عمان در مسیر تبدیل شدن به ششمین صادرکننده بزرگ هیدروژن در جهان و بزرگ‌ترین صادرکننده در خاورمیانه تا سال ۲۰۳۰ میلادی قرار دارد. عربستان سعودی نیز در میان کشورهای حاشیه خلیج فارس، برنامه‌ای بلندپروازانه برای گسترش سهم انرژی‌های پاک در سبد انرژی‌اش دارد. این کشور تا سال ۲۰۶۰ میلادی و مطابق با برنامه اعلام‌شده به انتشار خالص صفر دست پیدا خواهد کرد و کاهش انتشار کربن به میزان بیش از ۲۷۸ میلیون تن در هر ساعت تا سال ۲۰۳۰ میلادی را در برنامه‌های خود دارد (خردادنیوز، ۱۴۰۲).

در این مقاله، در ابتدا انواع فناوری‌های استحصال هیدروژن شرح داده شده است. در بخش دوم، روش به‌کاررفته جهت تحلیل پتنت و پایگاه داده مورد استفاده معرفی شده است. در بخش بعدی، تحلیل پتنت برای پنج فناوری اصلاح بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق کافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام شده و نتایج حاصل بررسی شده است. در بخش انتهایی نیز نتیجه‌گیری از تحلیل پتنت انجام شده، ارائه شده است.

فناوری‌های استحصال هیدروژن

به هر نوع هیدروژن، کدهای رنگی مشخصی اختصاص داده می‌شود (شکل ۱). همان‌گونه که در شکل ۲ قابل مشاهده است، تفاوت در رنگ‌بندی انواع هیدروژن براساس منبع تولید، فرآیند و انرژی موردنیاز مدنظر است. نکته قابل توجه این است که تفاوت بین هیدروژن آب 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 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، به‌طور کلی هیدروژن تولیدی با دو منشأ فسیلی و تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. هیدروژن تولیدی با منشأ فسیلی خود به سه دسته اصلاح هیدروکربن، آذرکافت هیدروکربن و گازی‌سازی تقسیم‌بندی شده است. اصلاح هیدروکربن خود شامل سه فرآیند اصلاح بخار، اکسیداسیون جزئی^۱ و اصلاح خودگرم‌شونده^۲ است.

مشکی Black	سبز Green	خاکستری Grey	بنفش Purple	آبی Blue
منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق
قهوای Brown	نارنجی Orange	فیروزه‌ای Turquoise	صورتی Pink	یشی Jade green
منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق
سفید White	زرد Yellow	طلایی Gold	قرمز Red	سرمه‌ای Navy blue
منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: کربن فرآیند تولید: کربن‌زدایی منبع انرژی: حرارت	منبع تولید: آب فرآیند تولید: الکترولیز منبع انرژی: برق

شکل ۱- فناوری‌های تولید هیدروژن (Do et al., 2023; Hoang et al., 2023a; Zainal et al., 2024a).

دسته دوم هیدروژن با منشأ تجدیدپذیر است که به دو دسته فرآیندهای زیست‌توده و فرآیندهای شکست آب تقسیم می‌شود. فرآیندهای زیست‌توده شامل دو دسته زیستی و ترموشیمیایی است. فرآیندهای زیرمجموعه زیستی شامل سه

^۱ Partial Oxidation (POX)

^۲ Autothermal Reforming (ATR)

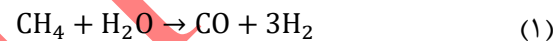
دسته بیوفتولیز، تخمیر تاریک و فتوتخمیر است. فرآیندهای ترموشیمیایی نیز شامل آذرکافت، گازی‌سازی، احتراق و مایع‌سازی است. در دسته دیگر که مربوط به هیدروژن تولیدی در فرآیند شکست آب است، سه روش برق‌کافت، گرماکافت و نورکافت (فتولیز) قرار گرفته است. روش گرماکافت از این جهت در دسته بر مبنای منابع تجدیدپذیر قرار 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 (Zainal et al., 2024b).

اصلاح هیدروکربن:

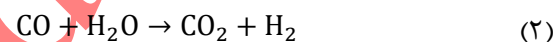
دسته اول از فرآیندهای تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی، اصلاح هیدروکربن نام دارد. این دسته شامل ۳ فرآیند اصلاح بخار متان، اکسیداسیون جزئی و اصلاح خودگرم‌شونده است (Zainal et al., 2024b).

اصلاح بخار

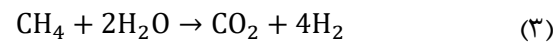
فرآیند اصلاح بخار، واکنش میان بخار آب و هیدروکربن‌ها در دمای بالا برای تولید هیدروژن و دی‌اکسیدکربن است. اصلاح بخار، هیدروژن را از گاز طبیعی و به‌ندرت از گاز نفتی مایع‌شده و نفتا استخراج می‌کند. در این فرآیند، ابتدا مونوکسیدکربن همراه هیدروژن تولید می‌شود و منجر به تولید گاز سنتز می‌شود.



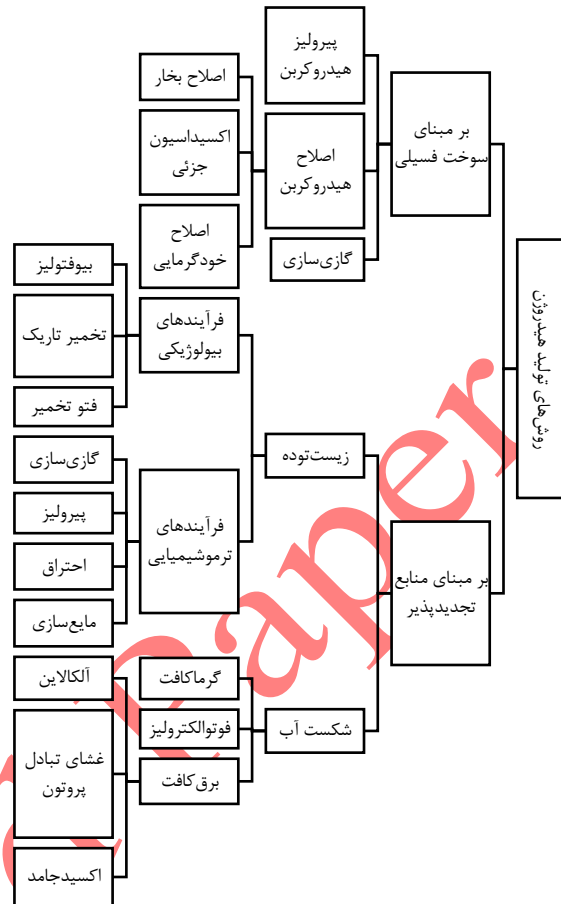
سپس از طریق واکنش دیگری، مونوکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن و هیدروژن اضافه می‌شود (واکنش جابه‌جایی آب-گاز).



واکنش کلی اصلاح بخار متان را می‌توان به صورت زیر نشان داد:



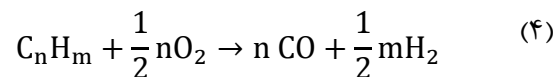
در فرآیند اصلاح بخار، به ازای هر کیلوگرم متان، حدود نیم کیلوگرم هیدروژن حاصل می‌شود. عمده هیدروژن در جهان هم‌اکنون به این روش تولید می‌شود (Zainal et al., 2024c).



شکل ۲- انواع روش‌های استحصال هیدروژن (Zainal et al., 2024c).

اکسیداسیون جزئی

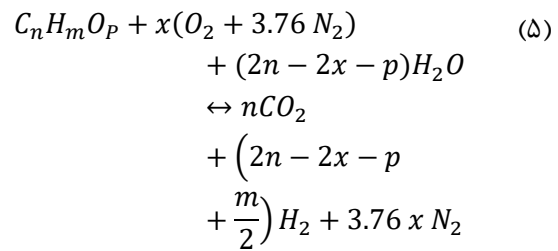
اکسیداسیون جزئی راه‌حل جای‌گزینی برای تولید هیدروژن از طریق فرآیند اصلاح بخار است. در این فرآیند مخلوطی از هوا و سوختی هم‌چون گاز طبیعی یا هیدروکربن‌های سنگین به صورت جزئی در اصلاح‌گر سوزانده می‌شود و هیدروژن و مونوکسیدکربن تولید می‌شوند (Zainal et al., 2024c). مزیت اصلی اکسیداسیون جزئی این است که برخلاف اصلاح بخار، واکنشی گرمازا است و در دماهای پایین‌تری انجام می‌شود. واکنش اصلی این فرآیند به صورت زیر است:



اصلاح خودگرم‌شونده (خودگرمایی)

فرآیند اصلاح خودگرم‌شونده^۱ برای برطرف‌سازی مشکل خروجی پایین هیدروژن در فرآیند اکسیداسیون جزئی و گرماگیر بودن فرآیند اصلاح بخار توسعه‌یافته است. اصلاح خودگرم‌شونده، دو فرآیند اشاره‌شده را با هم ترکیب می‌کند و آن را به گزینه‌ای جذاب برای اصلاح درون سیستمی هیدروکربن‌های پیچیده مانند نفت سفید و گازوئیل تبدیل می‌کند (Zainal et al., 2024c). واکنش شیمیایی این فرآیند به صورت زیر است:

^۱ Auto-thermal reforming (ATR)



نسبت مولی اکسیژن به سوخت (x) بر تولید هیدروژن، گرمای واکنش و مقدار آب موردنیاز برای تبدیل کربن سوخت به دی‌اکسید کربن تأثیر می‌گذارد. اصلاح خودگرم‌شونده از این جهت مفید است که نیازی به منبع حرارتی اضافی ندارد و از اصلاح بخار متان مقرون به صرفه‌تر و ساده‌تر است.

گازی‌سازی

گازی‌سازی یک فرآیند ترموشیمیایی است که طی آن سوخت جامد کربنی به گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن تبدیل می‌شود. در واقع، زغال سنگ در حضور اکسیژن، دی‌اکسید کربن، هوا یا بخار آب در دما و فشار بالا به گاز سنتز تبدیل می‌شود. چنین فرآیندی مقدار قابل توجهی دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند. علاوه بر زغال سنگ، زیست‌توده نیز می‌تواند طی چنین فرآیندی به هیدروژن و مونوکسید کربن به همراه مقداری آب، متان و دی‌اکسید کربن تبدیل شود.

آذركافت هیدروکربن

آذركافت، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن است. گاز طبیعی یا متان طی این فرآیند، در اثر حرارت به گاز هیدروژن و کربن جامد تجزیه می‌شود ($CH_4 \rightarrow C(s) + 2H_2$). کربن تولیدشده می‌تواند ذخیره و برای کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گیرد.

به‌طور کلی، آذركافت متان یک روش مناسب برای تولید هیدروژن با ردپای کربن کم است. به ازای هر کیلوگرم هیدروژن در این روش (در صورت استفاده از گاز به‌عنوان عنوان تغذیه)، ۲ تا ۳ کیلوگرم کربن دی‌اکسید تولید می‌شود. در اینجا منظور از تولید کربن دی‌اکسید، ردپای تولید آن در این فرآیند است. زیرا در فرآیند آذركافت متان، تنها کربن جامد تولید می‌شود. در کربن دی‌اکسید اشاره‌شده، علاوه بر انتشار کربن دی‌اکسید حاصل از تولید برق، انتشار ناشی از استخراج و حمل‌ونقل گاز طبیعی نیز در نظر گرفته می‌شود (Sánchez-Bastardo et al., 2021). این در حالی است که تولید هر کیلوگرم هیدروژن در فرآیند اصلاح بخار منجر به انتشار ۹ تا ۱۲ کیلوگرم کربن دی‌اکسید خواهد شد. مبنای محاسبه بخشی از این دی‌اکسید کربن تولیدشده، به کمک وزن مولکولی هر واکنش‌دهنده و محصول و نسبت استوکیومتری هر کدام در واکنش انجام می‌شود. در یک واکنش اصلاح بخار متان، به ازای هر ۱ مول متان، ۴ مول هیدروژن و ۱ مول دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. وزن ۱ مول دی‌اکسید کربن ۴۴ گرم و وزن مولکولی ۴ مول هیدروژن، ۸ گرم است. با تقسیم این دو عدد بر یکدیگر، عدد ۵,۵ حاصل می‌شود. در واقع در واکنش اصلاح کربن، به ازای هر کیلوگرم هیدروژن تولیدی، ۵,۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود. این مقدار فقط با در نظر گرفتن خود واکنش است، در حالی که با در نظر گرفتن ردپای دی‌اکسید کربن تولیدی در کل زنجیره ارزش تولید هیدروژن، این مقدار تا حدود ۹ تا ۱۲ کیلوگرم افزایش خواهد یافت (How Much CO2 Is Produced from Steam Methane Reforming?, 2023)

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، زیست‌توده و زغال‌سنگ نیز می‌تواند از طریق آذرکافت منجر به تولید هیدروژن شود (Turquoise Hydrogen | ENGIE Innovation, 2023)، (Megia et al., 2021a).

تولید هیدروژن از زیست‌توده

زیست‌توده به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر، از طیف وسیعی از فعالیت‌ها از جمله کشت محصول‌های کشاورزی، جنگل‌داری، ماهی‌گیری و دامداری به‌راحتی در دسترس است. زیست‌توده حاوی غلظت بالایی از ترکیب‌های آلی مانند کربن، اکسیژن و هیدروژن است. از نظر ارزش انرژی، هیدروژن ماده‌ای است که بیش‌ترین سهم انرژی کل زیست‌توده (۴۰ درصد) را تشکیل می‌دهد. از یک کیلوگرم زیست‌توده می‌توان حدود ۰/۶۷۲ مترمکعب هیدروژن تولید کرد. در حال حاضر، رایج‌ترین روش‌های تولید هیدروژن از زیست‌توده فرآیندهای ترموشیمیایی، بیولوژیکی و برق‌کافت هستند (El-Shafie et al., 2019). از میان این روش‌ها، فرآیندهای بیولوژیکی و برق‌کافت برای کاربردهای بزرگ‌مقیاس به‌دلیل نرخ پایین تولید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند. درحالی‌که فرآیندهای ترموشیمیایی از جمله گازی‌سازی و آذرکافت توجه بسیاری به خود جلب کرده‌اند. محدوده دمایی ترجیحی برای گازی‌سازی زیست‌توده ۱۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. فشار کاری این فرآیند نیز بسته به مقیاس تولید و خروجی موردنظر می‌تواند از فشار اتمسفر تا ۳۳ بار متغیر باشد. هم‌چنین، شرایط کاری مناسب برای آذرکافت زیست‌توده به‌طورمعمول بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ کلوین و ۰/۱ تا ۰/۵ مگاپاسکال قرار دارد (Megia et al., 2021b).

• فرآیندهای بیولوژیکی

فرآیندهای بیولوژیکی که برای تولید هیدروژن به کار 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، زیست‌توده 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 زیست‌توده 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 (Akhlaghi & Najafpour-Darzi, 2020).

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 میکروجلبک‌های سبز یا سیانوباکتری‌ها انجام می‌شود. یکی از مزایای این روش این است که هیدروژن به‌طور مستقیم از آب و در شرایط محیطی تولید می‌شود. در حال

^۱ Hydrogenase

حاضر به دلیل بازده پایین تولید هیدروژن، این فناوری نیازمند مساحت قابل توجهی برای جمع‌آوری نور خورشید است. برخلاف روش مستقیم، در بیوفوتولیز غیرمستقیم، کربوهیدرات‌ها در مرحله تثبیت دی‌اکسیدکربن تجمع می‌یابند و اکسیژن تولید می‌کنند. هیدروژن در مرحله بعدی با استفاده از مواد آلی تولیدشده در مرحله اول به‌عنوان منبع کربن، تولید می‌شود. این موضوع باعث کاهش نیاز به افزودن مواد مغذی به محیط کشت می‌شود (Marta Penconi, Federico Rossi, Fausto Ortica, 2015a).

• فرآیندهای ترموشیمیایی

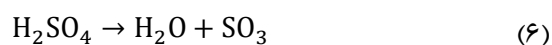
فرآیندهای ترموشیمیایی برای تولید هیدروژن به چهار نوع گازی‌سازی، آذرکافت، احتراق و مایع‌سازی تقسیم می‌شوند. گازی‌سازی یک فرآیند ترموشیمیایی است که در آن سوخت‌های جامد کربنی به گاز هیدروژن و مونوکسیدکربن تبدیل می‌شود. در آذرکافت نیز، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن اتفاق می‌افتد.

تولید هیدروژن از فرآیند شکست آب:

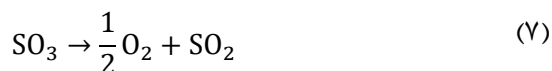
هیدروژن می‌تواند از آب که فراوانی زیادی در سطح زمین دارد نیز تولید شود. اگر انرژی کافی به مولکول آب داده شود، این مولکول به اجزای سازنده خود یعنی هیدروژن و اکسیژن شکسته می‌شود. فرآیند شکست آب می‌تواند از طریق روش‌های گوناگونی از جمله برق کافت، گرماکافت و فوتوالکترولیز اتفاق بیفتد.

گرماکافت (ترمولیز)

گرماکافت یک فرآیند گرماگیر است که طی آن آب در دماهای بالاتر از ۲۵۰۰ درجه سلسیوس به‌طور مستقیم به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. این فرآیند برگشت‌پذیر بوده و یکی از چالش‌های آن جداسازی هیدروژن و اکسیژن تولیدشده برای جلوگیری از ترکیب مجدد آن‌ها است. در مقابل گرماکافت، تجزیه ترموشیمیایی قرار دارد که می‌تواند با ترکیب انرژی حرارتی و تعدادی واکنش شیمیایی چرخه‌ای، آب را در دماهای پایین‌تر از فرآیند گرماکافت (زیر ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) تجزیه کند. یکی از چرخه‌های متداول مورد استفاده در این فرآیند، چرخه گوگرد-ید است. در این چرخه، ابتدا سولفوریک اسید در دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس دچار شکست حرارتی می‌شود،



سپس، SO_3 در دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به دی‌اکسید گوگرد و اکسیژن تجزیه می‌شود،



واکنش بعدی به‌منظور تولید مجدد سولفوریک اسید و هیدروژن دیده انجام می‌شود،



در نهایت، در دمایی بین ۴۵ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس، طی واکنش $2\text{HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$ ، گاز هیدروژن تولید می‌شود (Megia et al., 2021a).

فوتوالکترولیز

مشابه برق کافت، فوتوالکترولیز فرآیندی است که به کمک جذب انرژی فوتون‌ها و به‌کارگیری الکترودهایی از جنس نیمه-رسانا، به تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن می‌پردازد. الکترودهای تیتانیوم اکسید برای این کاربرد به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (Marta Penconi, Federico Rossi, Fausto Ortica, 2015b)، (Hoang et al., 2023b).



برق کافت (الکترولیز)

برق کافت یا الکترولیز فرآیند تجزیه مولکول‌های 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 واکنش‌های شیمیایی در هر یک از الکترودهای یک واحد برق کافت است. هم‌اکنون، فناوری‌های برق کافت شامل آلکالین، اکسید جامد و غشای مبادله‌کننده پروتون می‌شوند (Awad et al., 2024; Guo et al., 2024).

روی‌کردهای جدید برای تولید هیدروژن از گاز طبیعی

سایر روی‌کردهایی که کم‌تر بالغ هستند، اما کاهش انتشار را به‌طور کامل در فرآیند ادغام می‌کنند، شامل اصلاح بخار متان با جذب سطحی^۱، اصلاح گرمایش الکتریکی^۲، اصلاح پلاسما و تجزیه حرارتی متان هستند (Ungria et al., 2023a). با این حال، این فناوری‌ها 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 بخار متان با جذب سطحی

در فرآیند اصلاح بخار متان، متان ابتدا با بخار آب برای جداسازی کربن از هیدروژن اصلاح 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 (۱۰۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۱/۵۳ مگاپاسکال) و همچنین مشکلات دستیابی به نرخ تبدیل بسیار بالا با مشکل مواجه است.

فرآیند اصلاح 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 درصد هیدروژن و سطوح بسیار پایین‌تر مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن شود؛ بنابراین، مزیت‌هایی از جمله 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 مورد نیاز هستند را می‌توان با مصالح ارزان‌تر جایگزین کرد. با این حال، فعالیت ثبت اختراع در این زمینه محدود است و فقط ۱۹ اختراع ثبت‌شده

^۱ Sorption-enhanced steam reforming (SE-SMR)

^۲ Electrically-reforming

از شش متقاضی مختلف، از جمله دو موسسه تحقیقاتی TNO و دانشگاه ایالتی اوهایو و چهار شرکت در زمینه اصلاح بخار متان شناسایی شده است (Ungria et al., 2023b).

- اصلاح بخار متان الکتریکی

یکی از راه‌های مقابله با انتشار در روش اصلاح 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 متر و پر از کاتالیزور بی‌نیاز می‌کند. در فرآیند اصلاح 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 بخار متان با استفاده از برق تجدیدپذیر یا هسته‌ای اعمال شود، به‌طور بالقوه می‌توان انتشار جهانی دی‌اکسید کربن را تا ۱ درصد کاهش داد. در بازه بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، فناوری اصلاح 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^۱ وابسته است.

- اصلاح پلاسما^۲

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

- (۱) آب ورودی موردنیاز 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 سوخت-های مصنوعی تبدیل شود.

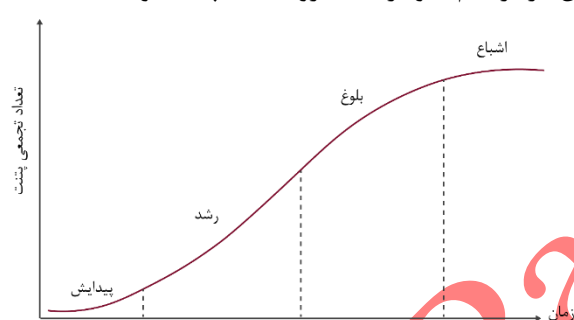
بالین‌حال، در این فناوری نیاز برق برای تشکیل پلاسما همچنان بالا است و مناسب بودن آن به‌عنوان یک گزینه مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیر برای تولید هیدروژن هنوز ثابت نشده است. تنها چند اختراع ثبت‌شده مرتبط با این موضوع وجود دارد که اکثر آن‌ها از موسسه‌های پژوهشی کره‌ای هستند (Ungria et al., 2023b).

^۱ Topsoe

^۲ Plasma reforming

روش کار

در مسیر تحلیل فناوری^۱ روش‌های مختلفی برای بررسی وضعیت فناوری و چشم‌انداز آینده آن مورداستفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های رایج در این فرایند، بررسی چرخه عمر فناوری^۲ به‌عنوان معیاری از وضعیت گذشته و حال و پیش‌بینی چشم‌انداز آینده آن است. بر این اساس، یک فناوری 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 مورداستفاده قرار گرفته‌اند، اما مهم‌ترین شاخص در ترسیم نمودار TLC روند ثبت پتنت بوده است.



شکل ۳- نمودار S شکل چرخه عمر فناوری (TLC) (Gao et al., 2013)

مطابق با پژوهش‌های انجام‌شده برای یک فناوری در طول چرخه عمر بر طبق نمودار شکل فوق، می‌توان چهار فاز زیر را در نظر گرفت:

(۱) پیدایش^۳: در این فاز ایده فناوری مطرح‌شده و در مراکز پژوهشی موردتحقیق و توسعه قرار می‌گیرد. تولید پتنت در این دوره در ابتدا ناچیز بوده، اما با شناخته شدن فناوری توسط بازی‌گران دیگر به‌مرور نرخ تولید پتنت مرتبط با آن شدت می‌گیرد تا به نرخ رشد ثابتی می‌رسد. شکل منحنی در این فاز تا حدی نامنظم و تعداد کل پتنت‌ها به نسبت پایین است.

(۲) رشد^۴: در این فاز نرخ رشد تولید پتنت به‌طور تقریبی ثابت بوده و رشد فناوری 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^۵: در این فاز، تحقیق و توسعه در فناوری مربوطه کاهش یافته که در نتیجه آن رشد نمودار شاخص تجمعی پتنت روند کاهشی به خود می‌گیرد. این فرایند در پی صنعتی شدن و انتقال فناوری از مراکز پژوهشی به مراکز صنعتی رخ می‌دهد. در این مرحله، اگرچه هنوز روند روبه رشد تعداد پتنت‌ها در منحنی به‌طور منظم پیش می‌رود، اما نرخ تغییر شیب منحنی منفی بوده و تقعر آن به سمت پایین است.

^۱ Technology Assessment

^۲ Technology life cycle or TLC

^۳ Emerging

^۴ Growth

^۵ Maturity

۴) اشباع^۱: در این فاز تولید پتنت در فناوری 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 فناوری حذف شده و به تبع آن سودآوری و عدم تخصیص سرمایه به تحقیق و توسعه متوقف می‌گردد.

با توجه به مطالب بیان شده، به منظور تحلیل فناوری‌های به‌کاررفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فناوری را مورد موشکافی قرار داده و با توجه به آن، آینده فناوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به منظور بررسی تعداد پتنت از پایگاه داده لنز استفاده شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فناوری در این پایگاه جستجو شده است (*The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search, n.d.*).

نتایج و بحث

بیشترین تعداد اختراعاتی ثبت شده^۲ در کل زنجیره ارزش هیدروژن، مربوط به بخش تولید هیدروژن مشاهده شده است. حدود دو سوم از اختراعاتی مربوطه بر فناوری‌های مرتبط با تغییر اقلیم مانند برق کافت و تولید هیدروژن از زیست‌توده یا ترکیب‌های غیرآلی متمرکز هستند. در این بخش، با توجه به محدودیت در تعداد صفحه‌های انتشار مقاله، تحلیل پتنت فقط برای ۵ فناوری اصلاح بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق کافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام شده است.

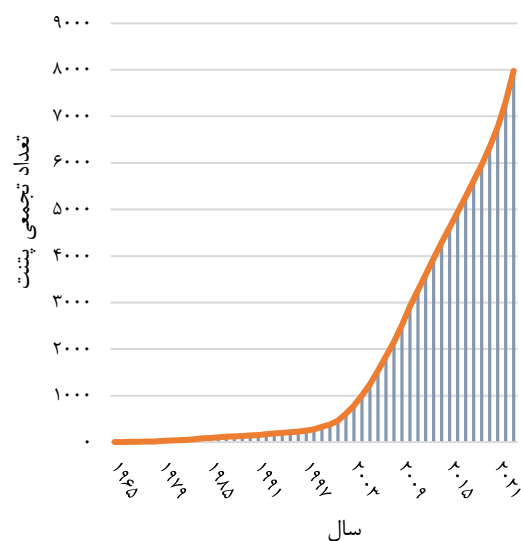
تحلیل پتنت برای فناوری اصلاح بخار

در حوزه فناوری اصلاح بخار، همان‌طور که از نمودار شکل ۴ نشان داده می‌شود، دو چرخه عمر فناوری 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 فناوری اصلاح بخار قابل تشخیص هستند:

- ۱) پیدایش (تا سال ۲۰۰۰ میلادی): تا این سال نحوه رشد پتنت‌ها منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فناوری‌های نوظهور است.
 - ۲) رشد (تا سال ۲۰۰۹ میلادی): در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد پتنت‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است.
 - ۳) بلوغ (تا سال ۲۰۱۵ میلادی): در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به سمت پایین منحنی شده است رشد پتنت‌ها کندتر شده و فناوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود.
- چرخه دوم از سال ۲۰۱۵ میلادی آغاز و تا سال ۲۰۲۳ میلادی ادامه پیدا کرده است. در این چرخه به دلیل بلوغ فناوری اصلاح بخار، فاز پیدایش فناوری 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 فناوری است.

^۱ Saturation

^۲ International patent families (IPFs)



شکل ۴- نمودار تعداد تجمعی پتنت برای فناوری اصلاح بخار

در خصوص متقاضیان پتنت‌های ثبت‌شده در حوزه فناوری اصلاح بخار، دو شرکت آرامکو^۱ و ایر پروداکتز^۲ از متقاضیان برتر ثبت پتنت در این حوزه بوده و در مجموع حدود ۴۵۰ پتنت توسط این دو شرکت ثبت‌شده است. در خصوص مالکان پتنت‌های ثبت‌شده در این حوزه نیز شرکت ایداتک^۳ به همراه دو شرکت مذکور، به‌عنوان بزرگ‌ترین مالکان ثبت پتنت در حوزه فناوری اصلاح بخار محسوب می‌شوند.

در حوزه فناوری اصلاح بخار، بیش‌ترین پتنت ثبت‌شده مربوط به ایالات‌متحده آمریکا با حدود ۴۸۰۰ پتنت بوده و حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین در رده‌های بعدی قرار دارد.

تحلیل پتنت برای فناوری آذرکافت

مطابق با نمودار ارائه‌شده در شکل ۵ تحلیل چرخه عمر برای فناوری آذرکافت نشان‌دهنده یک چرخه عمر فناوری از سال ۱۹۷۶ میلادی تاکنون بوده که می‌توان فازهای زیر را برای آن تشخیص داد:

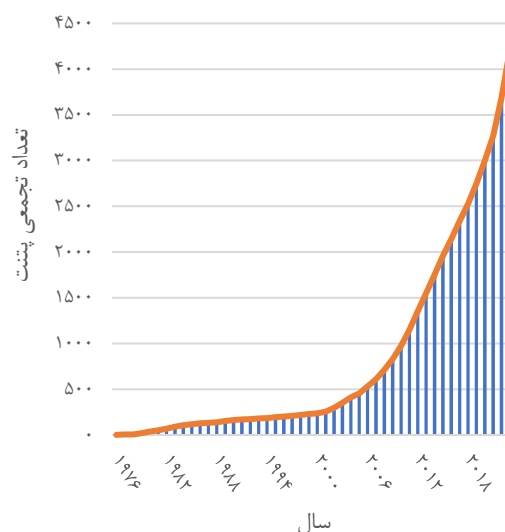
(۱) پیدایش (تا سال ۲۰۰۵ میلادی): تا این سال نحوه رشد پتنت‌ها منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فناوری‌های نوظهور است. طولانی بودن دوره پیدایش نشان‌دهنده فرایند بلندمدت برای طرح ایده در فناوری آذرکافت و شناخت این فناوری به‌منظور تولید هیدروژن توسط بازی‌گران این حوزه است. در مجموع در ۳۰ سال طی شده مربوط به این فاز تنها ۵۰۰ پتنت ثبت گردید.

(۲) رشد (تا سال ۲۰۲۳ میلادی): در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد پتنت‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است. این روند تصاعدی نشان‌گر اقبال بیش‌ازپیش فعالان حوزه هیدروژن به این فناوری استحصال و تحقیق و توسعه در این زمینه است.

^۱ Aramco

^۲ Air Products and Chemical, Inc.

^۳ Idatech



شکل ۵- نمودار تعداد تجمعی پتنت برای فناوری آذکافت

در میان متقاضیان و مالکان برتر ثبت پتنت در حوزه فناوری آذکافت می‌توان به ترتیب شرکت‌های ایداتک، آرامکو، نفت شل و اکسون موبیل^۱ را به‌عنوان بیش‌ترین درخواست‌کننده‌های پتنت و شرکت‌های ایداتک، آرامکو، نفت شل و آیوژن^۲ را به‌عنوان بزرگ‌ترین مالکان پتنت‌های ثبت‌شده نام برد.

بر اساس نمودار حوزه‌های ثبت پتنت مطابق معمول فناوری‌های بررسی‌شده برای تولید هیدروژن، ۴ حوزه ایالات‌متحده آمریکا (۶۰ درصد)، سازمان جهانی مالکیت فکری (۲۰ درصد)، سازمان ثبت اختراع اروپا (۹ درصد) و چین (۹ درصد) دارای بیش‌ترین سهم در ثبت پتنت مربوط به حوزه آذکافت می‌باشند.

تحلیل پتنت برای فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ

تحلیل چرخه عمر برای فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ در تولید هیدروژن نمایان‌گر دو چرخه عمر فناوری در طی دوره است (شکل ۶). چرخه اول از سال ۱۹۶۹ میلادی آغاز و تا حدود سال ۲۰۱۹ میلادی ادامه پیدا کرده است. در این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فناوری قابل‌بررسی هستند:

(۱) پیدایش (تا سال ۲۰۰۲ میلادی): تا این سال نحوه رشد پتنت‌ها منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فناوری‌های نوظهور است. در طی این فاز (۳۳ سال) تنها ۳۶۴ پتنت ثبت گردیده که نشان‌دهنده فرایند بلندمدت برای طرح ایده در فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ و شناخت این فناوری به‌منظور تولید هیدروژن توسط بازی‌گران این حوزه است.

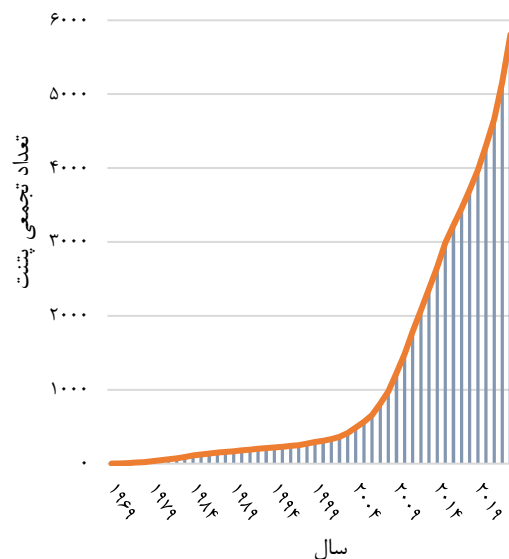
(۲) رشد (تا سال ۲۰۱۵ میلادی): در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد پتنت‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است.

(۳) بلوغ (تا سال ۲۰۱۹ میلادی): در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به سمت پایین منحنی شده است رشد پتنت‌ها کندتر شده و فناوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود.

^۱ ExxonMobil

^۲ Iogen Corporation

چرخه دوم از سال ۲۰۱۹ میلادی آغاز و تا سال ۲۰۲۳ میلادی ادامه پیدا کرده است. در این چرخه همانند توضیح ارائه شده در فناوری‌های پیشین به دلیل بلوغ فناوری، فاز پیدایش مشاهده نمی‌شود و چرخه از مرحله رشد آغاز می‌گردد که این موضوع نشان‌دهنده تحقیق و توسعه بیشتر در این فناوری همراه با تولید پتنت است.



شکل ۶- نمودار تعداد تجمعی پتنت برای فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ

با توجه به آمار بررسی شده در خصوص متقاضیان و مالکان برتر ثبت پتنت در فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ، علاوه بر شرکت‌های مطرح در فناوری‌های 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 پتنت قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری گسترده این شرکت برای تحقیق و توسعه در فناوری گازی‌سازی زغال‌سنگ به منظور تولید هیدروژن است.

مطابق با جستجوی انجام شده برای حوزه‌های برتر ثبت پتنت، 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 پتنت در فناوری مربوطه است که این موضوع را می‌توان به منابع عظیم زغال‌سنگ در کشور چین نسبت داد.

تحلیل پتنت برای فناوری برق‌کافت

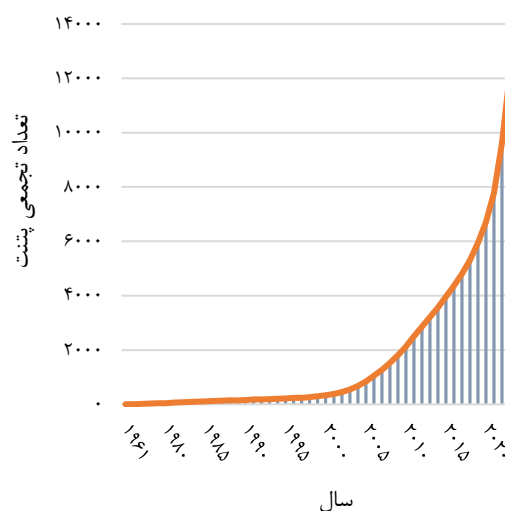
مطابق با آنچه که در نمودار تعداد تجمعی پتنت نشان داده شده است (شکل ۷)، فناوری برق‌کافت در تولید هیدروژن دارای یک چرخه فناوری بوده که از سال ۱۹۶۱ میلادی آغاز و تاکنون ادامه پیدا کرده است. در این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فناوری قابل بررسی هستند:

- (۱) پیدایش (تا سال ۲۰۰۳ میلادی): تا این سال نحوه رشد پتنت‌ها منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فناوری‌های نوظهور است. تعداد پتنت‌های ثبت شده در این دوره حدود ۴۵۰ عدد بوده است.

^۱ Honeywell UOP

۲) رشد (تا سال ۲۰۲۳ میلادی): در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد پتنت‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است. به‌گونه‌ای که تعداد پتنت‌ها در این دوره ۲۰ ساله حدود ۲۴ برابر رشد داشته است. ادامه‌دار بودن فاز رشد در این چرخه نشان‌دهنده گسترده‌گی مرحله تحقیق و توسعه در حوزه فناوری برق کافت برای تولید هیدروژن است.

شرکت‌های زیرمجموعه گروه هوانگ^۱ در کشور چین دارای بیش‌ترین تقاضا برای ثبت پتنت در حوزه فناوری برق کافت بوده و پس‌از آن شرکت آرامکو و شرکت توشیبا قرار دارند. آمار ارائه‌شده برای مالکان پتنت اما اشتراک چندانی با شرکت‌های اصلی متقاضی نداشته و ایدیانتک، مک‌الیستر تکنولوژی^۲ و آرامکو جزو بزرگ‌ترین مالکان این حوزه فناوری شناخته‌شده‌اند.



شکل ۷- نمودار تعداد تجمعی پتنت برای فناوری برق کافت

آمار ارائه‌شده از حوزه‌های ثبت پتنت نیز نشان‌دهنده نقش پررنگ چین در تحقیق و توسعه این فناوری است. مجموع پتنت‌های ثبت‌شده در این کشور با پس از ایالات‌متحده بیش‌ترین فراوانی را در میان حوزه‌های دیگر ثبت پتنت داشته است.

تحلیل پتنت برای فناوری گرماکافت

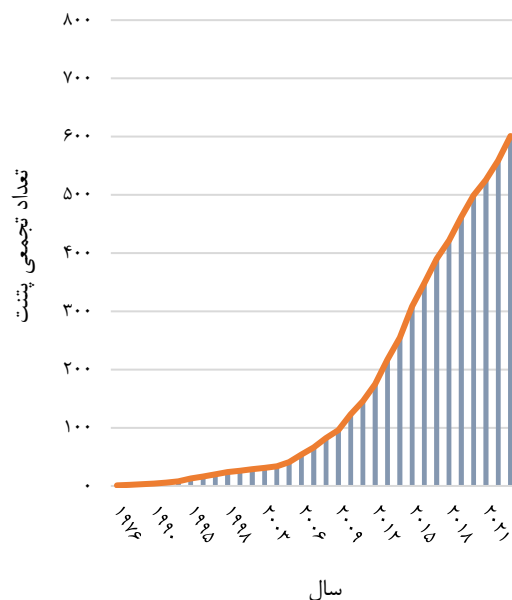
نمودار تعداد تجمعی پتنت در شکل ۸ نشان‌دهنده چرخه عمر فناوری گرماکافت در تولید هیدروژن است. آغاز فرایند ثبت پتنت در این حوزه از سال ۱۹۷۶ میلادی آغاز و این چرخه تاکنون ادامه پیدا کرده است. در این چرخه، فازهای زیر برای وضعیت فناوری قابل تشخیص هستند:

- ۱) پیدایش (تا سال ۲۰۰۴ میلادی): تا این سال نحوه رشد پتنت‌ها منظم با تقعر به سمت بالا نبوده که شاخصه فاز پیدایش فناوری‌های نوظهور است. تعداد پتنت‌های ثبت‌شده در این دوره تنها ۳۴ عدد بوده است.
- ۲) رشد (تا سال ۲۰۱۴ میلادی): در این بخش از منحنی، رشد بالایی در تعداد پتنت‌ها در جریان بوده و تقعر منحنی به سمت بالا است. به‌گونه‌ای که تعداد پتنت‌ها در این دوره ۱۰ ساله به ۲۵۵ عدد رسیده است.

^۱ China Huaneng Group

^۲ McAlister Technologies

۳) بلوغ (تا سال ۲۰۲۳ میلادی): در این فاز که تا حدودی همراه با تقعر به سمت پایین منحنی شده است رشد پتنت‌ها کندتر شده و فناوری مربوطه وارد کاربردهای صنعتی می‌شود. این فاز تاکنون ادامه داشته، هرچند از سال ۲۰۲۲ میلادی به بعد رشد به نسبت بیش‌تری را در این فاز می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۸- نمودار تعداد تجمعی پتنت برای فناوری گرماکافت

فراوانی درخواست ثبت پتنت بیش‌تر معطوف به سه شرکت اینتلیجننت انرژی^۱، بریلینت لایت پاور^۲ و ویرینت^۳ می‌باشد. این ترتیب در آمار ارائه‌شده برای مالکان اصلی پتنت نیز دیده می‌شود. بیش‌ترین پتنت ثبت‌شده برای فناوری گرماکافت مربوط به ایالات‌متحده آمریکا با ۴۱۷ پتنت 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 فناوری‌های استحصال هیدروژن شرح داده‌شده است. به‌منظور تحلیل فناوری‌های به‌کاررفته در تولید هیدروژن، می‌بایست وضعیت گذشته و فعلی هر فناوری را موشکافی کرده و با توجه به آن، آینده فناوری‌های مورد استفاده در تولید هیدروژن را پیش‌بینی نمود. به‌منظور بررسی تعداد پتنت از پایگاه داده لنز استفاده‌شده است و کلیدواژه‌های مربوط به هر فناوری در این پایگاه جستجو شده است. تحلیل پتنت برای ۵ فناوری اصلاح بخار متان، آذرکافت، گرماکافت، برق کافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ انجام‌شده است. با توجه به تحلیل پتنت انجام‌شده، فناوری‌های اصلاح بخار متان، گرماکافت و گازی‌سازی زغال‌سنگ در حال حاضر به مرحله بلوغ خود رسیده‌اند و فناوری‌های آذرکافت و برق کافت هم‌چنان در مرحله رشد خود قرار دارند. هم‌چنین طبق تحلیل انجام‌شده عمده کشورهای ثبت‌کننده پتنت برای هر ۵

^۱ Intelligent Energy

^۲ Brilliant Light Power

^۳ Virent Energy System, Inc.

فناوری بررسی شده، ایالات متحده آمریکا، حوزه مربوط به سازمان جهانی مالکیت فکری (WIPO)، سازمان ثبت اختراع اروپا و چین بوده است.

تشکر و قدردانی

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

مراجع

- Akhlaghi, N., & Najafpour-Darzi, G. (2020). A comprehensive review on biological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22492–22512. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.182>
- Awad, M., Said, A., Saad, M. H., Farouk, A., Mahmoud, M. M., Alshammari, M. S., Alghaythi, M. L., Abdel Aleem, S. H. E., 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(September 2023), 213–239. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.032>
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106847>
- 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(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116758>
- Dorsten, B. van, & Cruz, F. L. D. la. (2022). Decoding the hydrogen rainbow. In *wood mackenzie*. <https://www.woodmac.com/news/opinion/decoding-the-hydrogen-rainbow/>
- El-Shafie, M., Kambara, S., & Hayakawa, Y. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 07(01), 107–154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.003>
- Guo, X., Zhu, H., & Zhang, S. (2024). Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(September 2023), 1048–1059. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.325>
- Hoang, A. T., Pandey, A., Martinez De Osés, F. J., Chen, W. H., Said, Z., Ng, K. H., Ağbulut, Ü., Tarelko, W., Ölçer, A. I., & Nguyen, X. P. (2023a). 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(September). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113790>
- Hoang, A. T., Pandey, A., Martinez De Osés, F. J., Chen, W. H., Said, Z., Ng, K. H., Ağbulut, Ü., Tarelko, W., Ölçer, A. I., & Nguyen, X. P. (2023b). 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(September). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113790>
- How much CO2 is produced from steam methane reforming?* (2023). Hydrogen Newsletter. <https://www.hydrogennewsletter.com/how-much-co2-is-produced-from-steam-methane-reforming/>
- IEA. (2019). The Future of Hydrogen for G20. Seizing today's opportunities. *International Energy Agency*, 6(June), 246–256.

- Marta Penconi, Federico Rossi, Fausto Ortica, F. E. and P. L. G. (2015a). Hydrogen Production from Water by Photolysis, Sonolysis and Sonophotolysis with Solid Solutions of Rare Earth, Gallium and Indium Oxides as Heterogeneous Catalysts. *Sustainability*, 7, 9310–9325. <https://doi.org/doi:10.3390/su7079310>
- Marta Penconi, Federico Rossi, Fausto Ortica, F. E. and P. L. G. (2015b). Hydrogen Production from Water by Photolysis, Sonolysis and Sonophotolysis with Solid Solutions of Rare Earth, Gallium and Indium Oxides as Heterogeneous Catalysts. *Sustainability*, 7, 9310–9325. <https://doi.org/doi:10.3390/su7079310>
- Megia, P. J., Vizcaino, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021a). Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy and Fuels*, 35(20), 16403–16415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
- Megia, P. J., Vizcaino, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021b). Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy and Fuels*, 35(20), 16403–16415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
- 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 and Engineering Chemistry Research*, 60(32), 11855–11881. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679>
- The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search*. (n.d.). Retrieved May 10, 2024, from [https://www.lens.org/Turquoise hydrogen | ENGIE Innovation](https://www.lens.org/Turquoise%20hydrogen%20|%20ENGIE%20Innovation). (2023). <https://innovation.engie.com/en/news/interview/emerging-sustainable-technologies-2023/turquoise-hydrogen/29011>
- Ungria, J. A. y, Rodriguez, C. A., & Burattini, P. (2023a). Hydrogen patents for a clean energy future. *Epo, January*.
- Ungria, J. A. y, Rodriguez, C. A., & Burattini, P. (2023b). Hydrogen patents for a clean energy future. *Epo, January*.
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2024a). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2024b). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., & Mahlia, T. M. I. (2024c). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>
- جستجوگر. چرخش استراتژیک اعراب؛ برنامه بلندپروازانه قطب نفت دنیا برای صادرات انرژی پاک. (1402). خردادنیوز <https://38536110.khabarban.com/>. هوشمند خبری خبربان

Analysis of hydrogen production technologies and registered patents in each field

Today and in the era of energy, the global competition for replacing clean energies is expanding rapidly. This issue has caused many countries to turn to using hydrogen as a primary source of clean and renewable energy. In the past, hydrogen was only known as a useful element in industries. But today, due to this wave of enthusiasm for hydrogen, the attitude towards hydrogen has changed. Currently, hydrogen is considered not only as a fuel source, but also as a feedstock for petrochemical industries. In this article, various important methods of hydrogen production have been reviewed. In order to analyze the technologies used in hydrogen production, the past and current status of each technology should be scrutinized and based on that, the future of the technologies used in hydrogen production should be predicted. For this reason, patent analysis has been done on several hydrogen production methods. Lens database was used to check the number of patents and keywords related to each technology were searched in this database. Patent analysis has been done for 5 technologies including methane steam reforming, pyrolysis, thermolysis, electrolysis and coal gasification. According to the patent analysis, the technologies of methane steam reforming, pyrolysis and coal gasification have already reached their maturity

stage, and the technologies of pyrolysis and electrolysis are still in their growth phase. Also, according to the analysis conducted, the main countries registering patents for all 5 technologies were the United States of America, the area related to the World Intellectual Property Organization (WIPO), the European Patent Organization, and China.

Keywords: Hydrogen production, energy future, patent analysis, technology life cycle, technology future

Accepted Paper

Accepted Paper