



Green Leaves. Februarv 2015. Photographer: Quentin Rev

آشنایی با هیدروژن سبز

محمدحامد ژف

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
رایانامه نویسنده: m.hamed.zhaf@ut.ac.ir

چکیده

هیدروژن سبز به هیدروژنی اطلاق می‌شود که از طریق فرآیندهایی مانند الکترولیز آب و با استفاده از برق تجدیدپذیر تولید شده‌است. شناسایی روزافزون نقش هیدروژن سبز در ذخیره‌سازی انرژی، کاربردهای صنعتی و حمل‌ونقل، سرمایه‌گذاری و تحقیقات، این بخش را به حرکت درآورده و بر اهمیت آن در دستیابی به اهداف انتشار صفر خالص تا نیمه قرن جاری، تأکید دارد. روش‌های دیگر تولید هیدروژن سبز شامل فرآیندهای ترموشیمیایی، تولید بیولوژیکی و تولید گاز از زیست توده است. هر یک از این تکنیک‌ها مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند که بر کارایی، مقیاس‌پذیری و هزینه‌های کلی تأثیر می‌گذارند. با وجود مزایا، هیدروژن سبز با موانع قابل توجهی از جمله هزینه‌های بالای تولید، چالش‌های توسعه زیرساخت‌ها و نوسانات بازار مواجه است. علاوه بر این، ملاحظات محیط‌زیستی و اجتماعی باید مورد توجه قرار گیرند تا دسترسی عادلانه به مزایای فناوری‌های هیدروژن سبز در حین گسترش آن‌ها تضمین شود. در سطح جهانی، تقاضا برای هیدروژن سبز در حال افزایش است و کشورهای مختلف با اجرای چارچوب‌های سیاستی، حمایتی و سرمایه‌گذاری در قابلیت‌های تولید، در تلاش برای ایجاد یک بازار قوی هیدروژن سبز هستند. آژانس بین‌المللی انرژی پیش‌بینی می‌کند که تولید هیدروژن سبز به میزان چشمگیری افزایش خواهد یافت، که نیازمند سرمایه‌گذاری‌های هنگفت در فناوری‌ها و زیرساخت‌ها برای حمایت از رشد این فناوری است. آینده هیدروژن سبز به شکل فزاینده‌ای به عنوان یک عنصر حیاتی در انتقال انرژی دیده می‌شود و فرصت‌های اقتصادی شایانی را وعده می‌دهد؛ در عین حال چالش‌های بحرانی محیط‌زیستی را نیز کاهش خواهد داد.

کلیدواژه‌ها: هیدروژن سبز، انرژی‌های تجدیدپذیر، پایداری انرژی

مقدمه

فرایندهای ترموشیمیایی شامل استفاده از حرارت برای هدایت واکنش‌های شیمیایی هستند که هیدروژن را از مواد اولیه‌ای مانند گاز طبیعی یا زیست‌توده استخراج می‌کنند. این روش‌ها می‌توانند هیدروژن را به‌طور کارآمد تولید کنند؛ با این حال، فرایندهای ترموشیمیایی سنتی اغلب دی‌اکسید کربن آزاد می‌کنند که چالش‌هایی برای اهداف انتشار صفر خالص^۴ ایجاد می‌کنند (de Kleijne et al., 2022; Eric Koons, 2024). در نتیجه، تمرکز فزاینده‌ای بر بهبود این فرایندها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای درحالی که کارایی حفظ می‌شود، وجود دارد.

روش‌های بیولوژیکی برای تولید هیدروژن شامل استفاده از موجودات بیولوژیکی برای تولید گاز هیدروژن از طریق فرایندهای متابولیکی است. این روش می‌تواند از زیست‌توده، از جمله ضایعات کشاورزی و ارگانیک، برای تولید هیدروژن استفاده کند (Magazzino et al., 2024). درحالی که این روش‌ها هنوز در مراحل تحقیقاتی هستند اما برای تولید هیدروژن پایدار نویدبخش هستند.

فرایندهای گازی‌سازی، مواد آلی را از طریق واکنش‌های دمای بالا با اکسیژن کنترل‌شده یا بخار به گاز ترکیبی، که متشکل از هیدروژن و مونوکسید کربن است، تبدیل می‌کنند. فرآیند گازی‌سازی نه‌تنها هیدروژن تولید می‌کند بلکه امکان جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS^۵) را نیز فراهم می‌آورد و بدین ترتیب انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد (de Kleijne et al., 2022; Magazzino et al., 2024). این روش به‌عنوان یک مسیر قابل‌قبول برای بهره‌برداری از پتانسیل منابع

هیدروژن سبز به‌عنوان سوخت پاک شناخته شده‌است؛ زیرا درحین استفاده از خود آلاینده‌های مضر منتشر نمی‌کند. تولید هیدروژن سبز از منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند خورشیدی و بادی، پایداری آن را به‌عنوان یک حامل انرژی جایگزین تأیید می‌کند. مزایای محیط‌زیستی هیدروژن سبز، به کاهش کربن در صنایع مختلف، از جمله پالایشی و پتروشیمیایی گسترش می‌یابد، جایی که می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین پاک‌تر برای سوخت‌های فسیلی عمل کند و بدین ترتیب انتشار کربن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Marouani et al., 2023).

تولید هیدروژن سبز شامل استخراج هیدروژن از منابع پایدار مختلف است و عمدتاً از طریق روش‌هایی که تأثیرات محیط‌زیستی را به‌حداقل می‌رسانند، انجام می‌شود. مسیرهای اصلی تولید را می‌توان به فرایندهای الکترولیتی، فرایندهای ترموشیمیایی، فرایندهای بیولوژیکی و تولید گاز از زیست‌توده تقسیم‌بندی کرد. فرایندهای الکترولیتی از برق برای تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن از طریق الکترولیز استفاده می‌کنند. این روش براساس شرایط عملیاتی و الکترولیزر مورد استفاده به سه نوع اصلی تقسیم می‌شود: الکترولیز قلیایی (AEL^۱)، الکترولیز غشای تبادل پروتون (PEMWE^۲) و الکترولیز اکسید جامد (SOEC^۳) (de Kleijne et al., 2022; Vidas & Castro, 2021). فرایند AEL یک فناوری مناسب تثبیت‌شده است که اولین بار در سال ۱۷۸۹ معرفی شد، ساختار PEMWE مشابه با سلول‌های سوختی است اما عملکرد آن معکوس بوده و از غشاهای پلی‌سولفاته جامد به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. کارایی تولید این فرایندها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر قابلیت کلی هیدروژن سبز به‌عنوان یک منبع انرژی تأثیر بگذارد. (Vidas & Castro, 2021).

¹ Alkaline ELectrolyser

² Proton Exchange Water Membrane Electrolysis

³ Solid Oxide Electrolyzer Cell

^۴ "انتشار خالص صفر Net Zero Emission" به وضعیتی اطلاق می‌شود که در آن مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در مقیاس‌های مختلف، در یک دوره زمانی مشخص، از طریق حذف مستقیم از جو یا جبران‌سازی مانند کاشت درخت یا استفاده از فناوری‌های جذب کربن، به صفر می‌رسد.

^۵ Carbon Capture and Storage

زیست‌توده تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است.

تولید و استفاده از هیدروژن سبز در سطح جهانی به واسطه ابتکارات دولتی و سرمایه‌گذاری‌های بخش خصوصی به شدت در حال گسترش است. از سال ۲۰۲۴، اداره ملی انرژی چین توسعه زیر ساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر را تحلیل کرده و بر اهمیت هیدروژن سبز در دستیابی به اهداف انتقال انرژی تأکید کرده است (Franco & Giovannini, 2023). کشورهای اروپایی بر هیدروژن سبز به عنوان بخشی از استراتژی‌های تنوع بخشی انرژی خود تمرکز کرده‌اند و از منابع تجدیدپذیر فراوان خود مانند انرژی باد و خورشید برای تولید هیدروژن با انتشار صفر استفاده می‌کنند. سازمان بین‌المللی انرژی (IEA)^۱ اشاره کرده است که اکوسیستم جهانی هیدروژن^۲ به سرعت در حال تکامل است و ظرفیت‌های پیش‌بینی شده نشان‌دهنده تغییر قابل توجهی به سمت منابع انرژی پاک‌تر هستند (Tuluhong et al., 2024; Vidas & Castro, 2021). در ایالات متحده، وزارت خزانه‌داری اقداماتی برای حمایت از بخش هیدروژن پاک از طریق اعتبار مالیاتی تولید هیدروژن پاک پیشنهادی، بخشی از قانون کاهش تورم، انجام داده است. این ابتکار به دنبال تحریک رشد صنعتی و ترویج حفاظت‌های محیط‌زیستی است و در دسترس بودن هیدروژن پاک با هزینه رقابتی را افزایش می‌دهد (Tuluhong et al., 2024). چارچوب‌های سیاستی مشابهی در کشورهای مختلف در حال توسعه هستند تا محیطی مساعد برای رشد بازار هیدروژن سبز ایجاد کنند.

بازار هیدروژن سبز نیز شاهد افزایش ادغام‌ها و اکتساب‌ها است که نشان‌دهنده علاقه فزاینده شرکت‌ها به این بخش

است (By Wilhelm Schmundt, 2023). سرمایه‌گذاری‌های استراتژیک و پیشرفت‌های فناوری در اولویت قرار دارند تا کارایی تولید و مقیاس‌پذیری^۳ را افزایش دهند. کشورهایی مانند اسپانیا، نروژ و یونان در حال تبدیل شدن به بازیگران کلیدی در بازار هیدروژن هستند و ظرفیت‌های تولید قابل توجهی را ایجاد می‌کنند (Eric Koons, 2024). با این حال، تفاوت قابل توجهی بین پروژه‌های برنامه‌ریزی شده و پروژه‌هایی که وارد مرحله ساخت شده‌اند وجود دارد، که نشان‌دهنده چالش‌هایی است که باید برای پاسخگویی به تقاضاهای آینده برطرف شوند (Chiara Gulli, 2024).

روش کار

نوشته حاضر با مرور مقالات علمی، منابع کتابخانه‌ای و آنلاین نگارش شده است.

نتایج و بحث

هیدروژن سبز مزایای زیادی دارد که به شناخته شدن روزافزون آن به عنوان یک بازیگر کلیدی در سیستم‌های انرژی پایدار کمک می‌کند. ذخیره‌سازی انرژی و انعطاف‌پذیری هیدروژن سبز به عنوان یک راه‌حل مؤثر برای ذخیره‌سازی انرژی عمل می‌کند که قادر به تثبیت منابع انرژی تجدیدپذیر است. مازاد انرژی تجدیدپذیر می‌تواند از طریق الکترولیز به هیدروژن تبدیل شود، که امکان ذخیره‌سازی انرژی و تبدیل مجدد آن به برق در زمان نیاز را فراهم می‌کند (Marouani et al., 2023).

^۱ International Energy Agency

^۲ "اکوسیستم جهانی هیدروژن" به مجموعه‌ای از زنجیره‌های تأمین، فناوری‌ها، بازیگران، سیاست‌ها و بازارها اطلاق می‌شود که در تولید، ذخیره‌سازی، توزیع و مصرف هیدروژن-به‌ویژه هیدروژن کم‌کربن یا سبز- در سطح جهانی نقش دارند.

^۳ "مقیاس‌پذیری (Scalability)" به قابلیت فنی، اقتصادی و زیربنایی یک فناوری برای افزایش ظرفیت تولید بدون افت عملکرد، پایداری یا افزایش نامتناسب در هزینه‌ها اطلاق می‌شود.

این ویژگی امنیت انرژی را افزایش می‌دهد و انعطاف‌پذیری در سیستم‌های انرژی را فراهم می‌کند.

یکی از مزیت‌های قابل توجه هیدروژن سبز پتانسیل آن برای ایجاد ارزش محلی و پیوندهای صنعتی است. با استفاده از هیدروژن سبز برای کاربردهای محلی، مانند تولید فولاد سبز یا کودهای شیمیایی، کشورها می‌توانند سهم تولیدی خود را در تولید ناخالص داخلی افزایش دهند و فرصت‌های شغلی بلندمدت را ترویج کنند. یک رویکرد دوگانه که استفاده محلی را با صادرات محدود ترکیب می‌کند، به کشورها این امکان را می‌دهد که پتانسیل‌های داخلی را توسعه دهند و در عین حال از بازارهای انرژی بین‌المللی بهره‌مند شوند، که ممکن است سرمایه‌گذاری‌های خارجی را جذب کند و تلاش‌های کربن‌زدایی محلی را تقویت کند. علاوه بر این، صادرات هیدروژن سبز می‌تواند تراز تجاری را بهبود بخشد و اهمیت سیاسی آن را در چشم‌انداز جهانی انرژی افزایش دهد (Jumah, 2024).

توسعه کاربرد هیدروژن سبز پیشرفت‌های فناوری و انتقال دانش را تسهیل می‌کند، که می‌تواند توسعه اجتماعی-اقتصادی را در کشورهای تولیدکننده تسریع بخشد. با افزایش سرمایه‌گذاری‌ها در فناوری‌های هیدروژن سبز، این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند به بهبود در زمینه‌های تحقیق، توسعه و نوآوری منجر شوند و ساختار صنعتی قابل‌تطبیق‌تری را پرورش دهند (Jumah, 2024). علاوه بر این، کاهش پیش‌بینی‌شده هزینه تولید هیدروژن سبز ممکن است رقابت‌پذیری آن را به‌عنوان یک منبع انرژی ترجیحی در دهه‌های آینده بیشتر تقویت کند (Magazzino et al., 2024).

پایداری بلندمدت هیدروژن سبز با توجه به پتانسیل آن برای تحول در تولید و بهبود کارایی صنایع سنگین مورد توجه قرار گرفته‌است. با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، هیدروژن سبز به چارچوب انرژی پایدارتر کمک

می‌کند. همچنین مزایای اقتصادی قابل توجه و پتانسیل ایجاد شغل‌های زیاد در بخش انرژی سبز را ارائه می‌دهد. این تغییر به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر برای مقابله با تغییرات اقلیمی و دستیابی به آینده‌ای پایدار بسیار حیاتی است (Magazzino et al., 2024).

توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های هیدروژن سبز با چالش‌های قابل توجهی مواجه است که بر مقیاس‌پذیری و قابلیت اقتصادی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. این چالش‌ها از موانع فناوری گرفته تا ملاحظات اقتصادی و نوسانات بازار متغیر هستند.

پایه‌سازی زیرساخت‌ها چالش حیاتی در توسعه کاربرد هیدروژن سبز است. ساخت تأسیسات ضروری، مانند ایستگاه‌های الکترولیزر^۱ و راه‌حل‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه و زمان‌های طولانی دارد (US department of energy, 2024). بدون زیرساخت‌های مناسب، انتقال به اقتصاد هیدروژنی ممکن است به تأخیر بیفتد و تلاش‌ها برای برآورده کردن نیازهای انرژی آینده و اهداف اقلیمی را تضعیف کند. علاوه بر این، بیشتر پروژه‌های زیرساختی باید با چارچوب‌های قانونی پیچیده مطابقت داشته باشند و نیاز به همکاری چندین ذی‌نفع، از جمله نهادهای دولتی و شرکت‌های خصوصی دارند (Magazzino et al., 2024).

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تولید هیدروژن سبز، رقابت هزینه‌ای با منابع سنتی هیدروژن، مانند هیدروژن خاکستری و آبی است. در حال حاضر، هزینه تولید هیدروژن سبز حدود ۴/۸۵ دلار به ازای هر کیلوگرم تخمین زده می‌شود، که عمدتاً به دلیل هزینه‌های بالای برق و کارایی الکترولیزرها است (IEA, 2023; UNIDO, 2024).

اگرچه پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که قیمت‌ها ممکن است تا سال ۲۰۳۰ به کمتر از ۲/۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم

¹ Electrolyser

و محروم به مزایای فناوری‌های هیدروژن سبز دسترسی دارند (Magazzino et al., 2024; UNIDO, 2024). پرداختن به این نگرانی‌ها برای جلب حمایت عمومی و اطمینان از موفقیت بلندمدت ابتکارات هیدروژن سبز حیاتی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

درحالی که کشورها تلاش می‌کنند به اهداف انتشار صفر خالص دست یابند، هیدروژن سبز به‌طور فزاینده‌ای در انتقال انرژی جهانی تأثیرگذار است. سازمان بین‌المللی انرژی (IEA)^۱ پیش‌بینی می‌کند که تولید هیدروژن به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت و برآورد می‌کند که برای حمایت از تلاش‌های کاهش کربن، نیاز به افزایش به ۲۰۰ میلیون تن هیدروژن آبی و ۳۰۰ میلیون تن هیدروژن سبز تا سال ۲۰۷۰ وجود دارد (White House, 2023).

این رشد پیش‌بینی شده ضرورت سرمایه‌گذاری ۳۰۰ میلیارد تا ۷۰۰ میلیارد دلار در سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۰ در فناوری‌های هیدروژنی را برجسته می‌کند، که برای شکوفایی صنعت هیدروژن حیاتی خواهد بود (David Stent, 2021).

چشم‌انداز جهانی انرژی ۲۰۲۳ یک چارچوب مدل‌سازی جامع ارائه می‌دهد که شامل سناریوهای مختلف انتقال انرژی متناسب با توافق پاریس است. این سناریوها طیف وسیعی از نتایج برای گرمایش جهانی از ۱/۶ درجه سانتی‌گراد تا ۲/۹ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ را بسته به پیشرفت‌های فناوری و اجرای سیاست‌ها پیشنهاد می‌کنند (Daniel Haag, 2024). این تنوع بر ضرورت سیاست‌های قابل تطبیق و آینده‌نگر تأکید می‌کند که

کاهش یابند، دستیابی به این هدف نیازمند پیشرفت‌های قابل توجهی در تولید انرژی تجدیدپذیر، کارایی الکترولیزرها و کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای خواهد بود (IEA, 2023; Magazzino et al., 2024).

کارایی الکترولیزرها نقش حیاتی در تعیین هزینه کلی و قابلیت اجرایی تولید هیدروژن سبز ایفا می‌کند. سیستم‌های الکترولیز کنونی دارای نرخ کارایی تقریباً ۶۵-۶۰٪ هستند، به این معنی که بخش قابل توجهی از انرژی ورودی در فرآیند تبدیل از دست می‌رود (IEA, 2023; Magazzino et al., 2024). تلاش‌ها برای توسعه الکترولیز با دمای بالا، که می‌تواند کارایی بهتری داشته باشد، در حال انجام است، اما این فرآیند به بخار و ورودی‌های حرارتی نیاز دارد که ادغام آن با منابع انرژی تجدیدپذیر موجود شرایط را پیچیده می‌کند (IEA, 2023).

بازار هیدروژن سبز با تقاضای ناکافی و کانال‌های توزیع محدود هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد. حمایت‌های سیاستی، از جمله یارانه‌ها و مشوق‌ها، برای تحریک سرمایه‌گذاری در تولید هیدروژن و زیرساخت‌ها ضروری است (Magazzino et al., 2024). موفقیت ابتکارات هیدروژن سبز به ادغام هیدروژن در سیستم‌های انرژی موجود و شبکه‌های حمل و نقل بستگی دارد، که چالش‌های ترازبری اضافی را به همراه دارد (IEA, 2023). تلاش‌های هماهنگ در سراسر زنجیره ارزش برای غلبه بر این موانع و اطمینان از استقرار مؤثر فناوری‌های هیدروژن سبز ضروری است.

با افزایش تولید هیدروژن سبز، باید به پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی آن توجه شود. تأمین مواد برای الکترولیزرها و تأثیرات محیط‌زیستی بالقوه پروژه‌های بزرگ مقیاس انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نگرانی‌های مربوط به پایداری را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، برای انتقال به یک اقتصاد هیدروژنی باید مسائل برابری در نظر گرفته شود و اطمینان حاصل شود که جوامع کم‌درآمد

¹ International Energy Agency

می‌توانند مسیرهای مختلفی را برای تثبیت فناوری‌های هیدروژن در برگیرند.

فرصت‌های سرمایه‌گذاری در بخش هیدروژن در نقاط مختلف زنجیره ارزش، از توسعه مواد اولیه تا تولید، حمل و نقل و ذخیره‌سازی هیدروژن، به وجود خواهند آمد. چشم‌انداز اقتصادی کنونی، تحت تأثیر افزایش نرخ بهره و تورم، هم چالش‌ها و هم فرصت‌هایی را برای سرمایه‌گذاران به همراه دارد. با وجود کاهش توجیه اقتصادی هیدروژن سبز از دیدگاه فعالان بازار انرژی، سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی در هیدروژن نشان‌دهنده تاب‌آوری بوده و پیش‌بینی می‌شود در دوران نوسانات اقتصادی از سایر کلاس‌های دارایی^۱ بهتر عمل کند (David Stent, 2021).

روش‌های فعلی تولید هیدروژن، به‌ویژه هیدروژن خاکستری که از گاز طبیعی مشتق می‌شود، بازار را تسخیر کرده‌اند؛ با این حال، انتقال به گزینه‌های سبزتر، مانند هیدروژن آبی و سبز، برای دستیابی به اهداف پایداری ضروری خواهد بود (White House, 2023). نوآوری‌ها در فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، مانند گاز فشرده و حامل‌های هیدروژن مایع آلی، نیز نقش حیاتی در رشد این بخش ایفا خواهند کرد (Vidas & Castro, 2021).

فشار برای بهبود کارایی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش‌های تولید هیدروژن، در سال‌های آینده به رشد یک اقتصاد هیدروژنی متنوع کمک خواهد کرد. چارچوب‌های قانونی مکانیسم‌های حکمرانی و گزارش‌دهی در حال تکامل هستند تا بهتر از اقتصاد هیدروژن حمایت کنند. شفافیت بیشتری از شرکت‌ها و تأمین‌کنندگان مالی

^۱ کلاس‌های دارایی مشابه هیدروژن سبز، به سایر حوزه‌های سرمایه‌گذاری در بخش انرژی پاک و گذار کم‌کربن اطلاق می‌شود که شامل انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی)، زیرساخت‌های ذخیره‌سازی انرژی، حمل‌ونقل پاک، کربن‌زدایی صنعتی، و فناوری‌های بازیافت و اقتصاد چرخشی هستند.

در مورد سرمایه‌گذاری‌ها و فعالیت‌های مرتبط با هیدروژن مورد نیاز است. در عین حال رعایت معیارهای فنی سخت‌گیرانه و تأیید مستقل برای ایجاد اعتماد سرمایه‌گذاران و اطمینان از هم‌راستایی با اهداف کاهش کربن ضروری خواهد بود (ESG & Sustainability, n.d.).

هیدروژن سبز به عنوان یکی از عناصر کلیدی در گذار جهانی به انرژی پاک شناخته می‌شود و قابلیت آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ذخیره‌سازی انرژی، و کاربردهای صنعتی و حمل‌ونقل اهمیت بسیاری دارد. روش‌های مختلفی برای تولید هیدروژن سبز از جمله الکترولیز قلیایی، غشای تبادل پروتون و سلول الکترولیز اکسید جامد وجود دارد که هر کدام مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند. اگرچه هزینه‌های بالای تولید و نیاز به زیرساخت‌های گسترده چالش‌های اصلی این حوزه محسوب می‌شوند، اما با افزایش سرمایه‌گذاری‌ها و سیاست‌گذاری‌های حمایتی، بسیاری از کشورها در حال توسعه بازارهای هیدروژن هستند. پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی حاکی از رشد چشمگیر تولید هیدروژن سبز تا سال ۲۰۵۰ است. در نتیجه، با ادامه حمایت‌های سیاسی و اقتصادی و نوآوری‌های فناورانه، هیدروژن سبز می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به اهداف پایداری ایفا کند و آینده‌ای کم‌کربن و پایدارتر را رقم بزند.

منابع

Chiara Gulli, B. H. J. N. M. W., & M. W. (2024, January 10). Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook. McKinsey & Company.

<https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>.

Daniel Haag. (2024, April 22). Fulfilling the potential of green hydrogen. World Energy Congress 2024.



Environmental Economics, 1(1), 3–30.
<https://doi.org/10.3390/rsee1010002>.

Marouani, I., Guesmi, T., Alshammari, B. M., Alqunun, K., Alzamil, A., Alturki, M., & Hadj Abdallah, H. (2023). Integration of Renewable-Energy-Based Green Hydrogen into the Energy Future. *Processes*, 11(9), 2685. <https://doi.org/10.3390/pr11092685>.

Tuluhong, A., Chang, Q., Xie, L., Xu, Z., & Song, T. (2024). Current Status of Green Hydrogen Production Technology: A Review. *Sustainability*, 16(20), 9070. <https://doi.org/10.3390/su16209070>.

UNIDO. (2024). Policies of global program hydrogen in industry. *United Nations Industrial Development Organization*.

US Department of Energy. (2024). Hydrogen Laws and Incentives in Federal. *US Department of Energy*.
<https://www.energy.gov>.

Vidas, L., & Castro, R. (2021). Recent developments on hydrogen production technologies: State-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. *Applied Sciences*, 11(23), 11363. <https://doi.org/10.3390/app112311363>.

White House. (2023, December 22). Treasury Sets Out Proposed Rules for Transformative Clean Hydrogen Incentives. <https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/clean-energy-updates/2023/12/22/treasury-sets-out-proposed-rules-for-transformative-clean-hydrogen-incentives/>.

Wilhelm Schmundt, B. G. E. H. M. H. S. G. F. K. A. G. F. B.-B. L. L. A. W. S. M., & D. S. (2023, March 21). Building the Green Hydrogen Economy. *Boston Consulting Group*.
<https://www.bcg.com/publications/2023/strategies-to-build-green-hydrogen-economy>.

David Stent. (2021, October 18). The Challenges In Pursuit Of A Green Hydrogen Economy. *Climate Council*.
<https://climatecouncil.com/articles/the-challenges-in-pursuit-of-a-green-hydrogen-economy/>.

de Kleijne, K., de Coninck, H., van Zelm, R., Huijbregts, M. A. J., & Hanssen, S. V. (2022). The many greenhouse gas footprints of green hydrogen. *Sustainable Energy & Fuels*, 6(19), 4383–4387. <https://doi.org/10.1039/D2SE00444E>.

Eric Koons. (2024, June 11). Types of Hydrogen: Grey, Blue and Green. *Energytracker.asia*.
<https://energytracker.asia/types-of-hydrogen-grey-blue-and-green/>.

ESG & Sustainability. (n.d.). Green Hydrogen: The Impact on Transport and Energy. *RBS International*.
<https://www.rbsinternational.com/insights/2023/01/green-hydrogen-the-impact-on-transport-and-energy.html>.

Franco, A., & Giovannini, C. (2023). Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives. *Sustainability*, 15(24), 16917. <https://doi.org/10.3390/su152416917>.

IEA. (2023, April). Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity. *International Energy Agency*.
<https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>.

Jumah, A. bin. (2024). A comprehensive review of production, applications, and the path to a sustainable energy future with hydrogen. *RSC Advances*, 14(36), 26400–26423. <https://doi.org/10.1039/D4RA04559A>.

Magazzino, C., Mele, M., & Leogrande, A. (2024). Regional Disparities and Strategic Implications of Hydrogen Production in 27 European Countries. *Regional Science and*



Introduction to Green Hydrogen

Mohammad Hamed Zhaf

Master's student, Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Author's E-mail: m.hamed.zhaf@ut.ac.ir

Abstract

Green hydrogen refers to hydrogen produced through processes such as water electrolysis using renewable electricity. The growing recognition of green hydrogen's role in energy storage, industrial applications, and transportation has spurred investment and research in this field, emphasizing its importance in achieving net-zero emissions by mid-century. Other production methods for green hydrogen include thermochemical processes, biological production, and gasification of biomass. Each of these techniques has its own advantages and challenges that affect efficiency, scalability, and overall cost. Despite its advantages, green hydrogen faces significant barriers, including high production costs, infrastructure development challenges, and market volatility. Furthermore, environmental and social considerations must be addressed to ensure equitable access to the benefits of green hydrogen technologies as they expand. Globally, demand for green hydrogen is increasing, and various countries are implementing policy frameworks, providing financial support, and investing in production capacities to build a strong green hydrogen market. The International Energy Agency forecasts a significant increase in green hydrogen production, which will require substantial investments in technologies and infrastructure to support the anticipated growth. Green hydrogen is increasingly viewed as a vital element in the global energy transition, offering promising economic opportunities while also addressing critical environmental challenges.

Keywords: Green hydrogen, Renewable energies, Energy sustainability