



رنگین کمان هیدروژن

سارا عبدی¹، مسعود نصیری^{2*}

1- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

2- دانشیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، mnasiri@semnan.ac.ir

چکیده

هیدروژن در صورت تولید از منابع انرژی تجدیدپذیر یا از طریق فرآیندهای کم کربن، می تواند به عنوان یک حامل انرژی جایگزین در راستای دستیابی به سامانه های انرژی با انتشار کربن صفر یا نزدیک به صفر مورد استفاده قرار گیرد. هیدروژن گازی بی رنگ است که رنگ های نمادینی به آن نسبت داده می شود تا بر اساس منابع مورد استفاده در فرآیندهای تولید و منابع انرژی طبقه بندی شود. روش هایی مانند الکترولیز آب، گازی سازی زیست توده و ریفرمینگ متان با بخار آب (همراه با جذب و ذخیره سازی کربن)، مسیرهایی را برای سنتز هیدروژن فراهم می کنند. این مطالعه، مسیرهای اصلی مرتبط با تولید هیدروژن و رنگ های اختصاص داده شده به هر مسیر را، تحت عنوان "رنگین کمان هیدروژن" بررسی می کند. بر اساس منبع هیدروژن، فرآیند تولید و میزان انتشار کربن دی اکسید، رنگ های هیدروژن سبز، خاکستری، قهوه ای، سیاه، آبی، فیروزه ای، نارنجی، صورتی، قرمز و زرد به تفصیل در این بررسی توضیح داده می شوند. دسته بندی تولید هیدروژن به رنگ ها بر اساس میزان انتشار گازهای گلخانه ای، چارچوبی برای درک ویژگی های زیست محیطی و اقتصادی آن ها فراهم می کند. مزایای زیست محیطی استفاده از هیدروژن به روش های تولید هیدروژن و منابع اولیه مورد استفاده بستگی دارد. تنها هیدروژن سبز انتشار گازهای گلخانه ای بسیار کمی دارد. هیدروژن آبی نیز با ترکیب فناوری های جذب، استفاده و ذخیره سازی کربن، مبتنی بر فرآیندهای هیدروژن خاکستری تولید می شود تا شدت انتشار کربن آن در مقایسه با هیدروژن خاکستری به میزان قابل توجهی کاهش یابد. از سوی دیگر، معرفی یک بازار بین المللی برای هیدروژن در راستای کاهش هزینه ها و تولید هیدروژن در بهترین شرایط حائز اهمیت است.

کلیدواژه ها: انرژی تجدیدپذیر، تولید هیدروژن، رنگ های هیدروژن، انتشار کربن، هیدروژن کم کربن

Hydrogen Rainbow

Sara Abdi¹, Masoud Nasiri^{2*}

1- Assistant Professor, Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Semnan University, Semnan 35131-19111, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Semnan University, Semnan 35131-19111, Iran

* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, mnasiri@semnan.ac.ir

Received: 16 August 2025 Accepted: 23 June 2026

Abstract

Hydrogen can be used as an alternative energy carrier to achieve energy systems with zero or near-zero carbon emissions, if it is produced from renewable energy sources or through low-carbon processes. Hydrogen is a colorless gas that is assigned symbolic colors to classify it based on the resources used in the production processes and energy sources. Methods such as water electrolysis, biomass gasification, and steam methane reforming (with carbon capture and storage) provide pathways for hydrogen synthesis. This study examines the main pathways associated with hydrogen production and the colors assigned to each pathway, known as the "hydrogen rainbow". Based on the hydrogen source, production process, and carbon dioxide emission rate, hydrogen colors of green, gray, brown, black, blue, turquoise, orange, pink, red, and yellow are explained in detail in this review. The color classification of hydrogen production based on greenhouse gas emissions provides a framework for understanding their environmental and economic characteristics. The environmental benefits of using hydrogen depend on the hydrogen production methods and the primary sources used. Only green hydrogen has very low greenhouse gas emissions. Blue hydrogen is also produced by incorporating carbon capture, utilization and storage technologies based on gray hydrogen

processes, to significantly reduce its carbon emission intensity compared to gray hydrogen. On the other hand, the introduction of an international market for hydrogen is important to reduce costs and produce hydrogen under the best conditions.

Keywords: Renewable energy, Hydrogen production, Hydrogen colors, Carbon emissions, Low-carbon hydrogen

1- مقدمه

بسیار ارزان و آسان‌تر، همواره از آن‌ها پیشی گرفته‌است. با این حال، سوخت‌های فسیلی به دلیل محدود بودن نمی‌توانند به تامین انرژی ادامه دهند و استفاده از آن‌ها منجر به تخریب محیط زیست، گرمایش جهانی، از بین رفتن تنوع زیستی و موارد مشابه می‌گردد[3].

هیدروژن در چهار سال گذشته به عنوان امیدوارکننده‌ترین گزینه برای حذف سوخت‌های فسیلی، مورد توجه و حمایت قرار گرفته‌است. هیدروژن می‌تواند برای ذخیره‌ی انرژی تجدیدپذیر استفاده شود. هم‌چنین می‌توان آن را در مناطقی از جهان که منابع انرژی تجدیدپذیر فراوانی وجود دارد، تولید کرد و به مناطقی با تقاضای هیدروژن در مقیاس صنعتی بالاتر منتقل کرد[7]. تصور می‌شود که هیدروژن می‌تواند 6٪ از کل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان را فراهم کند[8] و به عنوان یک حامل انرژی پاک در زمینه‌های مختلفی مانند صنعت، حمل‌ونقل و تولید برق مورد استفاده قرار گیرد. با در نظر گرفتن نقش هیدروژن در موارد مذکور و هم‌چنین در کاهش آلودگی و ترکیبات سمی، تخمین‌های فعلی پیش‌بینی می‌کنند که هیدروژن ممکن است تا سال 2050 حدود 20٪ از تقاضای نهایی انرژی را تامین کند[9].

هیچ استاندارد جهانی قطعی برای تعداد رنگ‌های هیدروژن وجود ندارد، زیرا اصطلاحات رنگی هیدروژن قراردادی و مبتنی بر مسیر تولید و منبع انرژی اولیه هستند. به عنوان مثال، هیدروژنی که از طریق گازی‌سازی لیگنیت⁷ تولید می‌شود هیدروژن قهوه‌ای⁸ و هیدروژنی که از طریق گازی‌سازی زغال‌سنگ سخت⁹ تولید می‌شود، هیدروژن سیاه¹⁰ نامیده می‌شود. هیدروژن خاکستری¹¹ نیز به هیدروژنی اطلاق می‌گردد که از متان فسیلی¹² تولید می‌شود. با توجه به وضعیت فعلی گرمایش جهانی، تولید هیدروژن و زیرساخت‌های مرتبط برای ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و مصرف آن در اسرع وقت باید گسترش پیدا کنند. افزایش تولید هیدروژن سبز بدون توسعه‌ی زیرساخت‌ها، موجب اتلاف زمان خواهد شد؛ بنابراین هر دو مرحله باید به‌طور هم‌زمان دنبال شوند.

هدف از این مطالعه، مرور رنگ‌ها و دسته‌بندی‌های مربوط به انواع هیدروژن است که می‌تواند چشم‌انداز کلی فناوری‌های مختلف تولید هیدروژن را در آینده ترسیم کند. هم‌چنین، چالش‌های تولید هیدروژن با رنگ‌های مختلف نیز مورد بحث قرار گرفته‌است. این مقاله، مسیرهای مختلف تولید هیدروژن را به همراه سهم بالقوه‌ی آن‌ها در اقتصاد بدون کربن به اختصار بررسی کرده و نقش طیف هیدروژن را در توصیف

انرژی یکی از مهم‌ترین بخش‌های توسعه، تکامل، گسترش و بقای یک کشور است. صرفه‌جویی در مصرف انرژی باید کارآمدترین راه برای رسیدگی به تقاضای رو به افزایش انرژی باشد. پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی انرژی تا سال 2040 سالانه 1/3 درصد افزایش یابد که ناشی از رشد جمعیت، توسعه‌ی اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری است[1]. انرژی‌های تجدیدپذیر، سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای همگی سهم قابل توجهی در تامین انرژی دارند[2]. در حال حاضر، منبع اصلی انرژی، سوخت‌های فسیلی است که حدود 76/5٪ از عرضه جهانی انرژی را به خود اختصاص می‌دهد؛ پس از آن انرژی‌های تجدیدپذیر با 19/8٪ و انرژی هسته‌ای با 3/7٪ قرار دارند[3]. انرژی فسیلی مسئول بخش عمده‌ای از تولید هیدروژن است؛ به‌طوری‌که 60٪ از کل هیدروژن تولیدی در واحدهای اختصاصی تولید هیدروژن حاصل می‌شود[4] و مابقی به‌صورت محصول جانبی در واحدهای صنعتی مانند پالایشگاه‌ها به‌دست می‌آید. انرژی هسته‌ای از مواد رادیواکتیو و انرژی تجدیدپذیر از منابع پایدار (خورشیدی، بادی، آبی و غیره) تامین می‌گردند. در این میان، سناریوهای مرتبط با تغییرات اقلیمی، موجب تسریع توسعه و گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان راهکاری حیاتی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با گرمایش جهانی شده‌اند[5]. توسعه‌ی سیستم‌های انرژی سازگار با محیط زیست، به دلیل تمرکز فزاینده بر تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی، امنیت انرژی و حفاظت از محیط زیست، به یک استراتژی جهانی حیاتی برای تبدیل انرژی مبدل شده‌است. هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی¹ (IPCC) و سازمان هواشناسی جهانی² (WMO) در سال‌های اخیر هشدارهای جدی در مورد احتمال افزایش گرمایش جهانی به بیش از 1/5 درجه‌ی سانتی‌گراد تا قبل از سال 2030 صادر کرده‌اند. بر این اساس، انتظار می‌رود اقتصاد جهانی به انتشار صفر خالص³ گازهای گلخانه‌ای⁴ (GHGs) دست یابد[6].

برای دستیابی به اهداف صفر خالص، انتظار می‌رود مجموعه‌ای از فناوری‌ها به کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید بدون به خطر انداختن امنیت انرژی نسل‌های آینده کمک کنند. از جمله‌ی این راهکارها می‌توان به فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن⁵ (CCUS)، ذخیره‌سازی انرژی هوای کرایوژنیک⁶، باتری‌های پیشرفته و گذار به اقتصاد هیدروژنی اشاره کرد. فناوری‌های مرتبط با هیدروژن از قرن نوزدهم مطرح شده و به تدریج توسعه یافته‌اند؛ اما ظهور فناوری‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی

⁷ Lignite

⁸ Brown hydrogen

⁹ Hard coal

¹⁰ Black hydrogen

¹¹ Gray hydrogen

¹² Fossil methane

¹ Intergovernmental panel on climate change

² World meteorological organization

³ Net-zero emissions

⁴ Greenhouse gases

⁵ Carbon capture, utilization and storage

⁶ Cryogenic air energy storage

فرآیندهای تولید، بر اساس میزان انتشار کربن و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌دهد.

2- هیدروژن و روش‌های تولید آن

به طور کلی، هیدروژن به دلیل چگالی انرژی پایین، خطرات اشتعال‌پذیری و زیرساخت‌های محدود، با چالش‌هایی در ذخیره‌سازی، ایمنی و حمل‌ونقل مواجه است. ریفرمینگ گاز طبیعی با بخار آب، بیشترین هیدروژن را تولید می‌کند؛ زیرا این فناوری، تثبیت‌شده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین فناوری تجاری برای تولید هیدروژن است. تولید جهانی هیدروژن سالانه حدود 900 میلیون تن کربن‌دی‌اکسید در جو منتشر می‌کند. با توجه به مشکلات فوری زیست‌محیطی، علاقه‌ی زیادی به تولید هیدروژن کم‌کربن وجود دارد. با این حال، گسترش این فناوری به دلیل افزایش هزینه‌های تولید هیدروژن بسیار محدود است. هیدروژن را می‌توان با روش‌های مختلفی مانند الکترولیز، ریفرمینگ متان با بخار آب¹ (SMR)، گازی‌سازی، فرآیندهای ترموشیمیایی، فتوشیمیایی، بیوشیمیایی و بیولوژیکی تولید کرد. در عین حال، می‌توان از منابع انرژی مختلف بسیاری برای تولید انرژی الکتریکی (ورودی فرآیند الکترولیز) بدون دخالت سوخت‌های فسیلی و در نتیجه بدون انتشار کربن‌دی‌اکسید استفاده کرد. از جمله‌ی این منابع می‌توان به منابع انرژی تجدیدپذیر² (RES) و انرژی هسته‌ای اشاره کرد.

در حال حاضر، روش‌های اصلی الکترولیز شامل الکترولیز غشای الکترولیتی پلیمری³ (PEM)، الکترولیز آب قلیایی⁴ (ALK) و الکترولیز اکسید جامد⁵ (SOEC) می‌باشد. در میان آن‌ها، ALK از سال ۱۹۲۰ به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌است و تقریباً 70٪ از سهم بازار را تشکیل می‌دهد. ALK روشی اقتصادی بوده و طول عمر بالایی دارد. با این حال، کاربرد این فناوری به‌دلیل عملکرد مداوم و استفاده از منابع تجدیدپذیر متغیر با چالش‌هایی مواجه است. ALK چگالی جریان پایینی داشته و می‌تواند در شرایط خورنده کار کند. فناوری PEM از سال 1960 مورد استفاده قرار گرفته و به دلیل اندازه‌ی کوچک سیستم، برای بخش‌های شهری مناسب است. این فناوری علاوه بر کارایی بالاتر، پاسخ‌گویی سریع‌تری داشته و به‌خوبی می‌تواند مازاد انرژی تجدیدپذیر را جذب کند. فناوری‌های PEM با فشار بالا می‌توانند هیدروژن را به صورت تحت فشار تحویل دهند و اثربخشی کلی را افزایش دهند. با این حال، از آن‌جا که کاتالیزورهای الکتروکاتود و مواد غشایی مورد استفاده در این روش پرهزینه هستند، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه‌ی قابل توجهی وجود دارد. فناوری SOEC شامل الکترولیت‌های جامد است و از جداسازی آب برای تولید هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌کند. اکسیژن به غشا نفوذ کرده و در آند الکترون‌دهنده تولید می‌شود. فناوری SOEC راندمانی بالاتر از 74-81 درصد داشته و با توان 150 کیلووات به صورت تجاری در دسترس

است[4]. با وجود این مزایا، هزینه‌های بالای تولید، نگهداری و همچنین مصرف بالای انرژی، مانع استفاده‌ی گسترده از این فناوری می‌شود[10].

3- هیدروژن و رنگین کمان آن

سیستم طبقه‌بندی رنگ‌های هیدروژن برای کمک به سیاست‌گذاران، توسعه‌دهندگان پروژه و مصرف‌کنندگان در تمایز فرآیندها و فناوری‌های مختلف تولید هیدروژن و بر اساس ظرفیت‌های آن در جهت نیل به سمت آینده‌ای با انرژی تجدیدپذیر معرفی شده‌است. در چشم‌انداز پویای هیدروژن، رنگ‌های جدیدی به وجود می‌آیند و به واژگان جهانی هیدروژن می‌افزایند. مزیت اصلی پیشنهاد یک کد رنگی، استانداردسازی مسیرهای تولید هیدروژن است. نکته‌ی بسیار مهم این است که تأثیرات زیست‌محیطی هیدروژن تولید شده باید مهم‌ترین معیار برای طبقه‌بندی گزینه‌های مختلف تولید هیدروژن باشد، زیرا نیرو محرکه‌ی رونق فعلی هیدروژن، نیاز به کربن‌زدایی از اقتصاد جهانی است[11].

هیدروژن سبز⁷ نوعی هیدروژن است که به طور فزاینده‌ای محبوب شده و از طریق فرآیند الکترولیز با استفاده از انرژی تجدیدپذیر از آب تولید می‌شود. این نوع هیدروژن برای گذار به سیستم‌های انرژی و حمل‌ونقل پایدارتر، ضروری تلقی می‌شود. در سال 2021، تنها 0/0٪ از 94 میلیون تن هیدروژن تولید شده، از الکترولیز آب و با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر حاصل شده‌است. هیدروژن سبز به طور گسترده به هیدروژنی اطلاق می‌گردد که بدون انتشار کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود. این هیدروژن نه تنها فاقد کربن است، بلکه با سرعت در حال گذار از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس تجاری در سراسر جهان است؛ در حالی که همچنان هزینه‌ی تولید آن نسبت به هیدروژن مبتنی بر سوخت فسیلی بالاتر است[4]. به هیدروژن سبز "هیدروژن پاک"⁸، "هیدروژن تجدیدپذیر" یا "هیدروژن کم‌کربن"⁹ نیز گفته می‌شود. یکی از مزایای اصلی هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز، خلوص استثنایی آن است که از 99/95 درصد فراتر می‌رود.

بیشتر هیدروژن تولیدی (83٪)، همچنان از سوخت‌های فسیلی و عمدتاً از ریفرمینگ متان با بخار آب و بدون بهره‌گیری از فناوری‌های CCUS حاصل می‌گردد که به آن هیدروژن خاکستری گویند. هیدروژن خاکستری هیدروژنی است که از گاز طبیعی به دست می‌آید. اعتقاد بر این است که بیش از 40٪ هیدروژن خاکستری به عنوان محصول جانبی فرآیندهای شیمیایی متنوع تولید می‌شود. این نوع هیدروژن عمدتاً در صنعت پتروشیمی و برای تولید آمونیاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های دیگر تولید هیدروژن خاکستری شامل اکسیداسیون جزئی⁹ (POX) فرآورده‌های نفتی، ریفرمینگ خودگرمایی¹⁰ (ATR) و اکسیداسیون جزئی متان¹¹ (POM) می‌باشد[12]. چالش اصلی هیدروژن خاکستری، انتشار گسترده‌ی کربن‌دی‌اکسید حاصل شده در فرآیند تولید هیدروژن

⁷ Clean hydrogen

⁸ Low-carbon hydrogen

⁹ Partial oxidation

¹⁰ Autothermal reforming

¹¹ Partial oxidation of methane

¹ Steam methane reforming

² Renewable energy sources

³ Polymer electrolyte membrane

⁴ Alkaline

⁵ Solid oxide electrolysis cell

⁶ Green hydrogen

توسعه یافته ترین فرآیند تولید هیدروژن می باشد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [17].

هیدروژن نارنجی⁷ حاصل برداشت کنترل شده و برنامه ریزی شده از منابع هیدروژن طبیعی است. این نوع هیدروژن از طریق تزریق یک محلول غنی شده با کربن به یک سازند واکنش پذیر و سپس جمع آوری آب اشباع شده با هیدروژن از طریق چاه های برداشت اطراف نقطه ی تزریق، تولید می شود. نام گذاری آن نیز به رنگ آهن اکسید شده اشاره دارد [18]. هیدروژن صورتی⁸ و قرمز⁹ که با استفاده از انرژی هسته ای تولید می شوند، نرخ انتشار کربنی به ترتیب برابر با $0/3 - 0/6 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ و $0/1 \text{ CO}_2/\text{kg H}_2$ داشته و از این نظر، مزایای قابل توجهی در کاهش انتشار مستقیم کربن ارائه می دهند. با این حال، سایر اثرات زیست محیطی مانند شرایط خطرناک، تابش و مدیریت پسماند باید در نظر گرفته شوند. برخی از رنگ های هیدروژن تعاریف ثابتی دارند، در حالی که تعاریف متناقضی برای برخی دیگر می توان یافت. به عنوان مثال، سازمان بین المللی انرژی دی ان وی¹⁰، هیدروژن زرد¹¹ را به عنوان هیدروژنی تعریف می کند که از طریق الکترولیز آب با استفاده از شبکه ی برق تولید می شود. در حالی که برخی منابع دیگر از تعریفی استفاده می کنند که بیان می کند این هیدروژن منحصر با استفاده از انرژی خورشیدی تولید می شود [19]. بسته به روش تولید، بین هیدروژن زرد و نارنجی نیز تفاوت وجود دارد. تأثیر زیست محیطی هیدروژن نارنجی عمدتاً به ترکیب منابع انرژی در شبکه ی برق بستگی دارد. در برخی از کشورها که ترکیب انرژی بسیار پاکي دارند، مانند کاستاریکا، ایسلند یا پاراگوئه، انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از هیدروژن نارنجی ممکن است بسیار کم باشد. در مقابل، برای کشوری مانند چین، انتشار گازهای گلخانه ای هیدروژن نارنجی با سوخت های فسیلی قابل مقایسه خواهد بود. میزان انتشار کربن دی اکسید مرتبط با هیدروژن نارنجی در آلمان در سال 2020، 370 گرم کربن دی اکسید در کیلووات ساعت تخمین زده شد [7].

در مقایسه ی هیدروژن قرمز و زرد که به ترتیب توسط منابع انرژی هسته ای و خورشیدی تامین می شوند، هیدروژن قرمز با هزینه های تولید پایین تر، کارآمدتر می باشد. رنگ های قرمز و صورتی هیدروژن، به ترتیب برای تمایز فرآیندهای تولید هیدروژن یعنی ترمولیز/ترموشیمیایی¹¹ و الکترولیز به کار می روند. هیدروژن قرمز از طریق تجزیه ی کاتالیزوری آب در دمای بالا با استفاده از انرژی حرارتی هسته ای به عنوان منبع انرژی تولید می شود [20]؛ در حالی که تولید هیدروژن صورتی از طریق الکترولیز آب و با استفاده از برق نیروگاه های هسته ای صورت می گیرد [21]. بنابراین، هیدروژن آبی و صورتی می توانند هر دو تحت عنوان "هیدروژن کم کربن" قرار گیرند، اما هیدروژن کم کربن لزوماً آبی یا صورتی نیست [19]. هیدروژن بنفش¹² نیز با استفاده از انرژی هسته ای و گرما و از طریق

است که تقریباً ۸۳۰ تن کربن دی اکسید در سال تخمین زده می شود. در میان منابع موجود، اصطلاحات هیدروژن قهوه ای و سیاه نیز گاهی اوقات برای اشاره به هیدروژن خاکستری استفاده می شوند. هیدروژن خاکستری منجر به انتشار مستقیم کربن از $13 - 7/5 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ می گردد. انتشار گازهای گلخانه ای حاصل از تولید هیدروژن خاکستری را می توان به دو منبع اصلی نسبت داد: (الف) تبدیل متان از طریق فرآیند SMR به کربن دی اکسید و هیدروژن، و (ب) توان الکتریکی مورد نیاز برای تولید انرژی حرارتی و تامین فشار بالای عملیاتی این فرآیند [13].

یکی دیگر از فرآیندهای مهم تولید هیدروژن خاکستری، گازی سازی زغال سنگ¹ است که برخی منابع ممکن است آن را به عنوان هیدروژن قهوه ای طبقه بندی کنند. این فرآیند گازی سازی، که به ویژه در چین به دلیل عواملی نظیر هزینه ی بالای گاز طبیعی و ذخایر فراوان زغال سنگ رایج است، منجر به بالاترین میزان انتشار کربن دی اکسید در بین رنگ های مختلف هیدروژن می گردد که از $18 - 25 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ متغیر است [14]. آستانه ی $36/4$ گرم کربن دی اکسید به ازای هر مگاژول هیدروژن، به عنوان استاندارد برای حداقل کربن هیدروژن در نظر گرفته شده است؛ در حالی که این مقدار برای تولید هیدروژن خاکستری به حدود 94 گرم کربن دی اکسید به ازای هر مگاژول هیدروژن می رسد [15].

در حال حاضر، هیدروژن آبی² به عنوان راهکاری موقت برای گذار به سوی هیدروژن کاملاً سبز در نظر گرفته می شود. اصطلاح "هیدروژن آبی" چند سالی است که برای اشاره به هیدروژن تولید شده از سوخت های فسیلی با بهره گیری از فناوری CCUS ابداع شده است. به عبارت دیگر، با ترکیب فناوری CCUS و ریفرمینگ متان با بخار آب، هیدروژن آبی با استفاده از گاز طبیعی یا زیست توده³ تولید می شود. هیدروژن تولید شده از انرژی های پایدار، مانند الکترولیز آب، می تواند سایه هایی از آبی یا سبز را نشان دهد. طبق مطالعات انجام پذیرفته، هیدروژن آبی در مقایسه با هیدروژن خاکستری تنها 18-25 درصد کاهش در انتشار گازهای گلخانه ای را به همراه دارد. علاوه بر این، این حامل انرژی در کاربردهای گرمایشی، همچنان 20٪ بیشتر از گاز طبیعی یا زغال سنگ، گازهای گلخانه ای منتشر می کند [16].

تولید هیدروژن فیروزه ای⁴ از طریق فرآیند پیرولیز⁵ متان به دلیل محصول جانبی کربن جامد آن، یعنی کربن رشته ای یا نانولوله های کربنی، از روش های مرسوم متمایز است. این محصول جانبی مزایایی مانند ذخیره سازی آسان تر و میزان انتشار کربن کمتر را در مقایسه با روش های سنتی ارائه می دهد. پیرولیز متان شامل سه دسته فرآیند تجزیه ی حرارتی، تجزیه ی پلاسما و تجزیه ی کاتالیزوری است. این نوع هیدروژن در سال های اخیر، به ویژه از طریق تجزیه ی حرارتی که پیشرفته ترین و

⁷ Pink hydrogen

⁸ Red hydrogen

⁹ DNV

¹⁰ Yellow hydrogen

¹¹ Thermolysis/thermochemical

¹² Purple (violet) hydrogen

¹ Coal gasification

² Blue hydrogen

³ Biomass

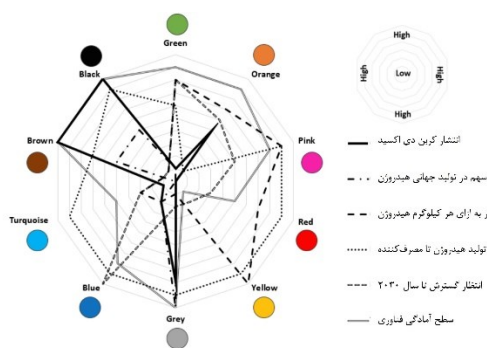
⁴ Turquoise hydrogen

⁵ Pyrolysis

⁶ Orange hydrogen

فرآیند غیرمستقیم، هیدروژن سفید و هیدروژن تولید شده توسط فرآیند مستقیم، هیدروژن صورتی نامیده می‌شوند [12].

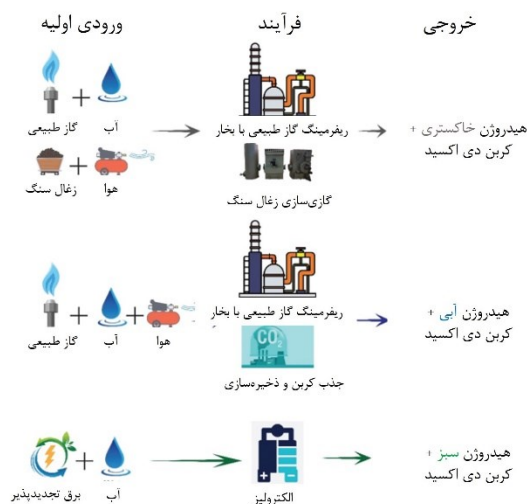
در مورد اختصاص رنگ به فرآیند تولید هیدروژن، اختلاف نظر، تفاسیر و طبقه‌بندی‌های متنوعی وجود دارد. هیدروژن تولید شده توسط تخمیر میکروبی^۳، گاهی اوقات هیدروژن طلایی^۴ نامیده می‌شود [24]. هیدروژن طلایی در ژنراتورهای اختصاصی هیدروژن خورشیدی تولید می‌شود. تنها هدف ژنراتورهای هیدروژن خورشیدی، تولید هیدروژن با استفاده از انرژی خورشیدی است. در شکل 2، رنگ‌های مختلف هیدروژن با استفاده از معیارهای مختلفی همچون میزان انتشار کربن دی‌اکسید، سهم در تولید جهانی، هزینه، فاصله‌ی تولید هیدروژن تا مصرف‌کننده و انتظار گسترش آن تا سال 2030 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، میزان تولید کربن هیدروژن خاکستری، قهوه‌ای و سیاه زیاد است (مرکز دایره کمترین مقدار و محیط دایره بیشترین مقدار را نشان می‌دهد). مطابق این شکل، سهم در تولید جهانی هیدروژن سبز کم است، در حالی‌که هیدروژن خاکستری سهم بیشتری را به‌خود اختصاص داده‌است. هزینه به دلار هیدروژن سبز تولیدی نیز نشان می‌دهد که تا سال 2030 این رقم همچنان بالا بوده و توجیه اقتصادی ندارد.



شکل 2 مقایسه رنگ‌های هیدروژن با استفاده از معیارهای مختلف [7]

آژانس بین‌المللی انرژی^۵ (IEA) از رنگ‌ها برای اشاره به انواع مختلف هیدروژن استفاده نمی‌کند. این آژانس به‌جای به‌کارگیری رنگ‌ها، هیدروژن تجدیدپذیر را هیدروژنی می‌نامد که از طریق فرآیند الکترولیز با استفاده از برق حاصل از منابع تجدیدپذیر (آنچه بسیاری دیگر آن را هیدروژن سبز می‌نامند) یا از طریق مسیرهای مبتنی بر زیست‌توده تولید می‌شود. گاهی اوقات آن‌ها از اصطلاحات هیدروژن کم‌انتشار^۶ یا هیدروژن کم‌کربن^۷ برای هیدروژنی که از طریق الکترولیز تولید می‌شود استفاده می‌کنند؛ جایی که برق از یک منبع کم‌انتشار (تجدیدپذیر یا هسته‌ای)، زیست‌توده یا سوخت‌های فسیلی همراه با فناوری CCUS تامین شده باشد. در این مورد، هیدروژن سبز می‌تواند هیدروژن تجدیدپذیر، هیدروژن

ترکیبی از الکترولیز و تجزیه‌ی ترموشیمیایی آب به‌دست می‌آید [20]. تکنیک‌های اصلی سنتز برای تولید هیدروژن رنگی، شامل هیدروژن خاکستری، آبی و سبز، به ترتیب با استفاده از روش‌های ریفرمینگ گاز طبیعی با بخار و یا سوزاندن کک با هوا، ریفرمینگ گاز طبیعی با بخار همراه با جذب و ذخیره‌سازی کربن، و الکترولیز در شکل 1 نشان داده شده‌اند.



شکل 1 خلاصه‌ای از تولید هیدروژن رنگی [4]

مفهوم هیدروژن سفید^۱ به دلیل تفاوت در تعریف، سردرگم‌کننده است. برخی منابع، رنگ سفید را به هیدروژن طبیعی که به عنوان مثال در غارها یافت می‌شود، نسبت داده‌اند [22]. این ماده در طبیعت به صورت گاز آزاد در لایه‌های پوسته‌ی قاره‌ای، اعماق پوسته‌ی اقیانوسی یا در گازهای آتشفشانی، چشمه‌های آب گرم و سیستم‌های هیدروترمال یافت می‌شود. به نظر می‌رسد که این نوع هیدروژن در طیف وسیعی از سازندهای سنگی و مناطق زمین‌شناسی وجود دارد [20]. برخی منابع نیز هیدروژن سفید را به عنوان یک محصول جانبی حاصل از فرآیندهای شیمیایی در نظر می‌گیرند [23]. به منظور مشخص کردن مفهوم هیدروژن سفید، دو رویکرد برای تجزیه‌ی ترموشیمیایی آب با استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. این رویکردها شامل روش‌های مستقیم با حداقل مراحل اما نیازمند دمای بالا (1400-1500 درجه‌ی سانتی‌گراد)، و روش‌های غیرمستقیم با استفاده از انرژی حرارتی و دارای سطح فناوری بالاتر می‌باشند. این چرخه‌های غیرمستقیم ممکن است شامل مراحل بیشتری باشند و در دماهای مقرون به‌صرفه‌ی 800-900 درجه‌ی سانتی‌گراد، با کمک سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی^۲ (TES) عمل کنند و امکان عملکرد مداوم را فراهم سازند. هیدروژن تولید شده توسط

⁵ International energy agency

⁶ Low-emission hydrogen

⁷ Low-carbon hydrogen

¹ White hydrogen

² Thermal energy storage

³ Microbial fermentation

⁴ Golden hydrogen

جدول 1 تعاریف رنگ‌های هیدروژن [7]

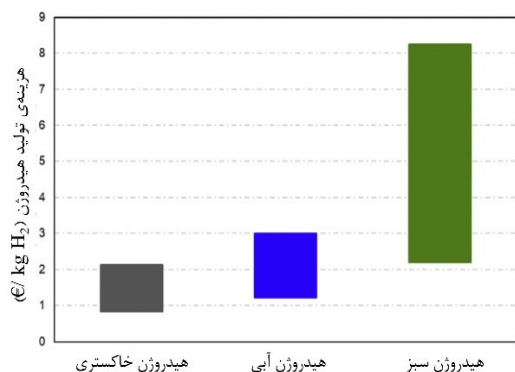
رنگ	منبع انرژی	منبع هیدروژن	فرآیند تولید	انتشار CO ₂
سبز	انرژی تجدیدپذیر	آب	الکترولیز	بدون انتشار مستقیم
نارنجی	برق تأمین شده از شبکه‌ی برق (با ترکیب منابع مختلف)	-	-	وابسته به ترکیب برق شبکه
صورتی	هسته‌ای	-	-	بدون انتشار مستقیم CO ₂
قرمز	-	زیست‌توده	ترمولیز/ فرآیند ترموشیمیایی	بدون انتشار مستقیم CO ₂
زرد	خورشیدی	-	-	بدون انتشار مستقیم CO ₂
خاکستری	برق از منابع غیر تجدیدپذیر	گاز طبیعی	ریفرمینگ متان با بخار آب	بالا
آبی	برق از منابع غیر تجدیدپذیر	گاز طبیعی/ زیست‌توده	ریفرمینگ متان با بخار آب	پایین
فیروزه‌ای	-	گاز طبیعی	پیرولیز	بدون انتشار مستقیم CO ₂
قهوه‌ای	-	زغال‌سنگ لیگنیت/ زیست‌توده	گازی‌سازی	بالا
سیاه	-	زغال‌سنگ قیری ^۲ (زغال‌سنگ سخت)	-	بالا

کم‌انتشار یا هیدروژن کم‌کربن باشد؛ اما هیدروژن تجدیدپذیر، هیدروژن کم‌انتشار یا هیدروژن کم‌کربن لزوماً به هیدروژن سبز اشاره ندارند. اتحادیه‌ی اروپا اخیراً در طرح گذار به انرژی پاک خود اعلام کرده‌است که اگر الکترولیزرها^۱ در کشورهایی کار کنند که بیش از 90٪ برق آن‌ها از منابع تجدیدپذیر تأمین شود یا شدت انتشار برق کمتر از یک آستانه‌ی مشخص باشد، روش‌های تولید هیدروژن به عنوان "هیدروژن سبز" شناخته می‌شوند. آستانه‌ی تعیین شده برای هیدروژن "کم‌کربن"، معادل $14/5 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ است که بر مبنای کاهش 50 درصدی انتشار کربن‌دی‌اکسید در مقایسه با روش گازی‌سازی زغال‌سنگ محاسبه شده‌است. همچنین، اصطلاح هیدروژن "پاک و تجدیدپذیر" زمانی به‌کار می‌رود که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، با 65٪ کاهش نسبت به آستانه‌ی هیدروژن "کم‌کربن"، به کمتر از $4/9 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ برسد [7].

در جدول 1 رنگ‌های هیدروژن بر مبنای منبع، فرآیند تولید هیدروژن و همچنین میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید آن، به اختصار تعریف شده‌اند. انتشار کربن‌دی‌اکسید در هر مسیر تولید، عمدتاً تحت تأثیر منابع هیدروژن و انرژی قرار دارد. برای مسیرهایی که آب ماده‌ی اولیه است، عملاً هیچ انتشار کربن‌دی‌اکسید مرتبطی وجود ندارد. در مقابل، در مسیرهایی که سوخت‌های فسیلی ماده‌ی اولیه‌اند (مانند هیدروژن خاکستری، قهوه‌ای و سیاه)، انتشار بالای کربن‌دی‌اکسید اجتناب‌ناپذیر است، مگر آن‌که فناوری CCUS به‌کار گرفته شود. مسیرهای مبتنی بر زیست‌توده نیز در صورت در نظر گرفتن فناوری CCUS، پتانسیل تبدیل شدن به مسیرهای کربن منفی را دارند. با این حال، به دلیل ماهیت تجدیدپذیر زیست‌توده، این مسیرها به عنوان مسیرهای کربن صفر شناخته می‌شوند [25]. شکل 3 شدت کربن رنگ‌های هیدروژن مطرح شده در این بررسی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، شدت انتشار کربن در هیدروژن سیاه در بیشترین و در هیدروژن قرمز در کمترین مقدار قرار دارد.

¹ Electrolyzers

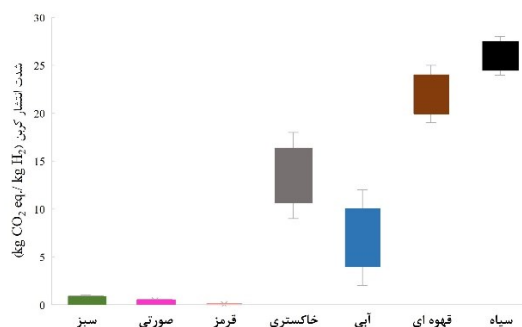
² Bituminous coal



شکل 4 هزینه‌های تولید هیدروژن گزارش شده برای روش‌های مختلف تولید [11]

5- نتیجه‌گیری

تقاضای جهانی برای هیدروژن به دلیل عوامل متعددی، با رشد چشم‌گیری مواجه شده‌است. انتظار می‌رود هیدروژن نقش مهمی در گذار به یک سیستم انرژی کم‌کربن ایفا کند. تقریباً تمام هیدروژنی که امروزه تولید می‌شود، از سوخت‌های فسیلی، عمدتاً از گاز طبیعی و از طریق ریفرمینگ متان با بخار آب حاصل می‌شود که میزان انتشار کربن بالایی دارد. اختصاص کدهای رنگی به ویژه رنگ‌های سبز و خاکستری به هیدروژن، به منظور تمایز بین تولید هیدروژن غیرآلاینده و تولید هیدروژن با انتشار گسترده‌ی کربن‌دی‌اکسید صورت گرفته‌است. هیدروژن سبز نویدبخش کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است و اکنون به طور گسترده به عنوان هیدروژن تولید شده از الکترولیز آب با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شود. با این حال، منابع انرژی دیگری همچون انرژی هسته‌ای نیز می‌توانند الکترولیز آب را تقویت کرده و تولید هیدروژن بدون انتشار کربن‌دی‌اکسید را ممکن سازند. بخش بزرگی از تحولات دهه‌ی آینده، در حوزه‌ی هیدروژن سبز نهفته است. با این حال، بسیاری از کشورها به ویژه کشورهای صادرکننده برتر سوخت‌های فسیلی، از هیدروژن آبی یا فیروزه‌ای برای دوره گذار حمایت می‌کنند. از سوی دیگر، هیدروژن سبز نیز ممکن است در آینده با پیشرفت‌های فناورانه به گزینه‌ای اقتصادی و در دسترس تبدیل شود، که این امر مستلزم آن است که منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت تولید برق بیشتری را تأمین کنند. در نهایت، این سوال اصلی هم‌چنان باقی است که آیا هیدروژن با هر رنگی، با احتساب تمام هزینه‌های خارجی مرتبط با حامل‌های انرژی، می‌تواند در تمامی بخش‌های سیستم انرژی از نظر اقتصادی رقابتی شود؟ موفقیت آینده‌ی هیدروژن به شدت به توسعه‌ی فناوری و کاهش هزینه‌های ناشی از آن، و هم‌چنین به اولویت‌های آینده و چارچوب‌های سیاستی مرتبط وابسته است.



شکل 3 شدت انتشار کربن رنگ‌های هیدروژن مورد بررسی (برگرفته از داده‌های ارائه شده در [26])

4- هزینه‌های تولید هیدروژن

در این بخش، هزینه‌های تولید سه رنگ هیدروژن سبز، آبی و خاکستری، که در حال حاضر بیشتر مورد بحث قرار گرفته‌اند، بررسی می‌شود. علی‌رغم تقاضای بالای هیدروژن در کاربردهای صنعتی، بخش عمده‌ای از آن هم‌چنان با استفاده از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود که منجر به انتشار کربن‌دی‌اکسید بالایی می‌شود. هزینه‌های نهایی هیدروژن بر اساس روش تولید و نوع انرژی مورد استفاده تعیین می‌شوند. هیدروژن خاکستری ارزان‌ترین گزینه است، اما انتشار کربن بالایی دارد. هیدروژن آبی ممکن است به دلیل انتشار کمتر و هزینه‌های اضافی فناوری جذب کربن، بسیار گران‌تر از هیدروژن خاکستری باشد. هیدروژن سبز کمترین میزان انتشار را دارد، اما به دلیل نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر، هزینه‌های تولید آن بالاتر است. هزینه‌های تولید هیدروژن برای روش‌های مختلف تولید، در شکل 4 ارائه شده‌است. مطابق این شکل، در حال حاضر، گران‌ترین روش تولید هیدروژن، استفاده از الکترولایزر با بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر است. بر اساس اطلاعات موجود، هزینه‌ی هیدروژن سبز بین 2/2-2/8 یورو به ازای هر کیلوگرم هیدروژن می‌باشد. در مقابل، هیدروژن خاکستری در مناطقی که قیمت گاز طبیعی پایین است، ممکن است با نرخ 0/8 یورو به ازای هر کیلوگرم هیدروژن تولید شود [4]. هزینه‌ی برق و هزینه‌ی سرمایه‌ی الکترولایزرها، پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر قیمت هیدروژن نارنجی و سبز هستند. در حال حاضر، تولید هیدروژن از طریق سوخت‌های فسیلی، مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش می‌باشد.

6- مراجع

- [16] R. W. Howarth, M. Z. Jacobson, How green is blue hydrogen?, *Energy Science & Engineering*, Vol. 9, No. 10, pp. 1676–1687, 2021.
- [17] M.M. Mohideen, B. Subramanian, J. Sun, J. Ge, H. Guo, A.V. Radhamani, S. Ramakrishna, Y. Liu, Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 174, p. 113153, 2023.
- [18] F. Osselin, C. Soullaine, C. Fauguerolles, E.C. Gaucher, B. Scaillet, M. Pichavant, Orange hydrogen is the new green, *Nature Geoscience*, Vol. 15, No. 10, pp. 765–769, 2022.
- [19] F. Lubbe, J. Rongé, T. Bosserez, J. A. Martens, Golden hydrogen, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 39, p. 100732, 2023.
- [20] J. M. M. Arcos, D. M. F. Santos, The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production, *Gases*, Vol. 3, No. 1, pp. 25–46, 2023.
- [21] D. Kim, M. Shin, J. Park, A novel hybrid approach to pink and turquoise hydrogen production via oxy-fuel combustion, *Energy Conversion and Management*, Vol. 314, p. 118704, 2024.
- [22] L. Pinkerton, The Hydrogen Rainbow Is So 2021—It's Time to Get Over It, *Power*, Vol. 2, No. 03, 2022.
- [23] P. Schneider, *The colours of hydrogen*, Accessed 9 November 2022; <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>.
- [24] R.L. Germscheidt, D.E.B. Moreira, R.G. Yoshimura, N.P. Gasbarro, E. Datti, P.L. dos Santos, J.A. Bonacin, Hydrogen environmental benefits depend on the way of production: an overview of the main processes production and challenges by 2050, *Advanced Energy and Sustainability Research*, Vol. 2, No. 10, p. 2100093, 2021.
- [25] M. Binder, M. Kraussler, M. Kuba, M. Luisser, *Hydrogen from biomass gasification*, IEA Bioenergy: Task 33, pp. 1–85, 2018.
- [26] I. Marouani, T. Guesmi, B.M. Alshammari, K. Alqunun, A. Alzamil, M. Alturki, H. Hadj Abdallah, Integration of renewable-energy-based green hydrogen into the energy future, *Processes*, Vol. 11, No. 9, p. 2685, 2023.
- [1] F. M. Mohsen, H. M. Mjbel, A. F. Challoor, R. Alkhazaleh, A. Alahmer, Advancements in green hydrogen production: A comprehensive review of prospects, challenges, and innovations in electrolyzer technologies, *Fuel*, Vol. 404, p. 136251, 2026.
- [2] M. T. Kartal, The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries, *Renewable Energy*, Vol. 184, pp. 871–880, 2022.
- [3] H. Mehmood, H. Akbar, P. Nilsalab, S. H. Gheewala, Exploring the spectrum: an environmental examination of hydrogen's diverse colors, *Energy Advances*, Vol. 4, No. 2, pp. 224–238, 2025.
- [4] P. Saha, F.A. Akash, S.M. Shovon, M.U. Monir, M.T. Ahmed, M.F.H. Khan, S.M. Sarkar, M.K. Islam, M.M. Hasan, D.-V.N. Vo, Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy, *International Journal of Green Energy*, Vol. 21, No. 6, pp. 1383–1397, 2024.
- [5] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 146, p. 111180, 2021.
- [6] K. V. Vilbergsson, K. Dillman, N. Emami, E. J. Ásbjörnsson, J. Heinonen, D. C. Finger, Can remote green hydrogen production play a key role in decarbonizing Europe in the future? A cradle-to-gate LCA of hydrogen production in Austria, Belgium, and Iceland, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 46, pp. 17711–17728, 2023.
- [7] J. Incer-Valverde, A. Korayem, G. Tsatsaronis, T. Morosuk, 'Colors' of hydrogen: Definitions and carbon intensity, *Energy Conversion and Management*, Vol. 291, p. 117294, 2023.
- [8] B. Soergel, E. Kriegler, I. Weindl, S. Rauner, A. Dirmaichner, C. Ruhe, M. Hofmann, N. Bauer, C. Bertram, B.L. Bodirsky, A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda, *Nature Climate Change*, Vol. 11, No. 8, pp. 656–664, 2021.
- [9] S. Nambyaruveetil, L. Ali, M. Altarawneh, Spectrum of innovation: Analysis of twelve hydrogen production pathways in the age of artificial intelligence, *Journal of Power Sources*, Vol. 658, p. 238333, 2025.
- [10] Y. Xu, S. Cai, B. Chi, Z. Tu, Technological limitations and recent developments in a solid oxide electrolyzer cell: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, pp. 548–591, 2024.
- [11] A. Ajanovic, M. Sayer, R. Haas, The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 57, pp. 24136–24154, 2022.
- [12] Z. Hammi, N. Labjar, M. Dalimi, Y. El Hamdouni, E. M. Lotfi, S. El Hajjaji, Green hydrogen: A holistic review covering life cycle assessment, environmental impacts, and color analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 80, pp. 1030–1045, 2024.
- [13] S. K. Dash, S. Chakraborty, D. Elangovan, A brief review of hydrogen production methods and their challenges, *Energies*, Vol. 16, No. 3, p. 1141, 2023.
- [14] S. Postels, A. Abánades, N. von der Assen, R. K. Rathnam, S. Stückrad, A. Bardow, Life cycle assessment of hydrogen production by thermal cracking of methane based on liquid-metal technology, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 48, pp. 23204–23212, 2016.
- [15] I. Staffell, D. Scamman, A.V. Abad, P. Balcombe, P.E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, K.R. Ward, The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 463–491, 2019.

چکیدہ گرافیکی

