



The University of Tehran Press

Hydrogen Production and Electrification: Transforming the Chemical Industry for a Sustainable Future

Mohammad Amin Asban¹ | Mohsen Salimi² | Majid Amidpour^{3*}

1. Department of Energy System Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: moh.asban@email.kntu.ac.ir

2. Renewable Energy Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. Email: msalimi@nri.ac.ir

3. Corresponding Author, Department of Energy System Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: amidpour@kntu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 27 July 2025

Accepted: 25 November 2025

Published Online: 28 May 2026

Keywords:

Hydrogen Production,
Electrification,
Sustainable Energy,
Decarbonization,
Steam Methane Reforming.

ABSTRACT

The transition to sustainable energy systems has placed hydrogen at the center of attention as a clean and versatile energy carrier. This paper reviews recent advancements in hydrogen production technologies, their various applications, and the challenges associated with integrating hydrogen into global energy systems. Currently, hydrogen is mainly produced from fossil fuels, but it holds significant potential to play a transformative role in achieving net-zero emissions by 2050. The analysis emphasizes the importance of shifting from conventional production methods, such as steam methane reforming (SMR), to low-carbon and renewable approaches like electrified steam methane reforming (E-SMR) or electrolysis powered by renewable sources. Hydrogen's role in decarbonizing hard-to-abate sectors, including transportation, the steel industry, and chemical manufacturing, is also highlighted. While the roadmap for global hydrogen integration appears promising, achieving scalability and sustainability will require coherent policies, technological innovation, and strong economic incentives to support the widespread adoption of hydrogen in the global energy transition.

Cite this article: Asban, M. A.; Salimi, M. & Amidpour, M. (2026). Hydrogen Production and Electrification: Transforming the Chemical Industry for a Sustainable Future. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 349-366. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394281.1139>



© Mohammad Amin Asban, Mohsen Salimi, Majid Amidpour
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394281.1139>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Hydrogen is increasingly recognized as a critical component of the global energy transition. As an energy carrier, it offers a unique ability to decarbonize sectors that are otherwise challenging to electrify. The International Energy Agency (IEA) projects that hydrogen will contribute approximately 10% of total energy demand by 2050 under a net-zero scenario, marking a sixfold increase in current utilization. While hydrogen derived from fossil fuels remains the dominant production pathway, the pressing need to mitigate greenhouse gas emissions has accelerated the development of alternative methods such as renewable-powered electrolysis and E-SMR and Carbon Capture and Storage (CCS)-enabled SMR.

The deployment of hydrogen as a clean energy vector spans a diverse range of applications, including fuel cell electric vehicles (FCEVs), ammonia synthesis, methanol production, and direct reduction of iron for steelmaking. However, achieving widespread adoption requires overcoming economic and technical barriers, including high production costs, infrastructure limitations, and energy

inefficiencies. This document explores the technological advancements, industrial strategies, and policy frameworks that are shaping the future of hydrogen, with a focus on its integration into global energy markets and its role in achieving long-term decarbonization targets.

Conclusion

Hydrogen stands at the nexus of innovation and necessity in the quest for a sustainable energy future. Despite its significant promise, the transition to a hydrogen-driven economy faces multiple challenges, including cost reduction, scaling production technologies, and establishing robust infrastructure. The integration of hydrogen into energy systems, especially through renewable-driven SMR that represents a pivotal opportunity to decarbonize hard-to-abate sectors.

In conclusion, hydrogen's potential lies in its ability to bridge the gap between renewable energy generation and industrial applications. With coordinated global efforts in research, policy, and market development, hydrogen could not only meet ambitious climate goals but also redefine energy economics for the 21st century. As countries and industries adopt comprehensive hydrogen strategies, the collaboration among stakeholders will be instrumental in shaping a cleaner and more resilient energy landscape.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

تولید هیدروژن و برقی‌سازی: تحول در صنعت شیمیایی برای آینده‌ای پایدار

محمدامین آسبان^۱ | محسن سلیمی^۲ | مجید عمیدپور^{۳*}

۱. گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: moh.asban@email.kntu.ac.ir
۲. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران. رایانامه: msalimi@nri.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: amidpour@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

گذار به سیستم‌های انرژی پایدار از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی، هیدروژن را به عنوان یکی از ارکان اصلی کربن‌زدایی در بخش‌های مختلف انرژی و صنعت مطرح کرده است. این مقاله با تمرکز بر فناوری اصلاح بخار متان برقی‌شده (E-SMR)، به بررسی تحلیلی ظرفیت‌ها، چالش‌ها و مزایای این فناوری نوین در مقایسه با روش‌های متداول نظیر SMR می‌پردازد. نوآوری این مطالعه در تحلیل جامع نقش برقی‌سازی فرایندهای شیمیایی، به‌ویژه تولید هیدروژن، در ارتقای بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار کربن، و افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی در صنایع انرژی‌بر است. همچنین، بررسی‌های مقایسه‌ای اقتصادی و فنی فناوری‌های مختلف و ادغام این فناوری با منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های شبکه برق مورد بررسی قرار گرفته و نقش آن در تحقق اهداف خالص صفر تا سال ۲۰۵۰ تحلیل شده است. یافته‌های مقاله نشان می‌دهد فناوری E-SMR، در صورت همراهی با سیاست‌گذاری هوشمندانه و توسعه زیرساختی مناسب، می‌تواند به طور مؤثری جایگزین فرایندهای پرکربن فعلی شود و نقش کلیدی در گذار انرژی ایفا کند.

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

- تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱
- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰
- تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴
- تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

تولید هیدروژن،
برقی‌سازی،
انرژی پایدار،
کربن‌زدایی،
اصلاح بخار متان.

استناد: آسبان، محمدامین؛ سلیمی، محسن و عمیدپور، مجید (۱۴۰۵). تولید هیدروژن و برقی‌سازی: تحول در صنعت شیمیایی برای آینده‌ای پایدار. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۲) ۳۶۶-۳۶۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394281.1139>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© محمدامین آسبان، محسن سلیمی، مجید عمیدپور

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394281.1139>

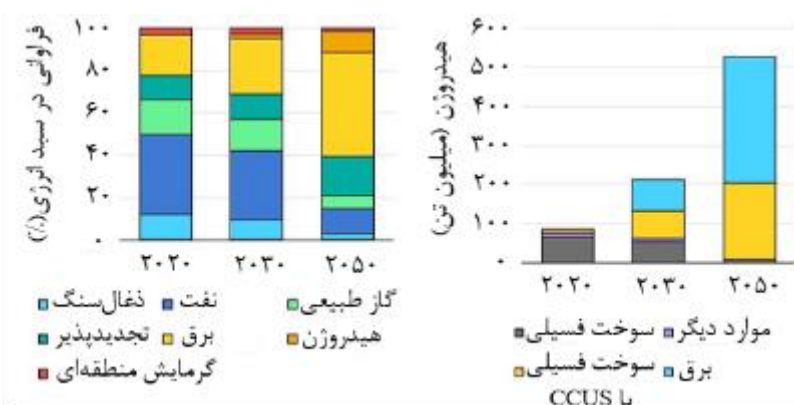


مقدمه

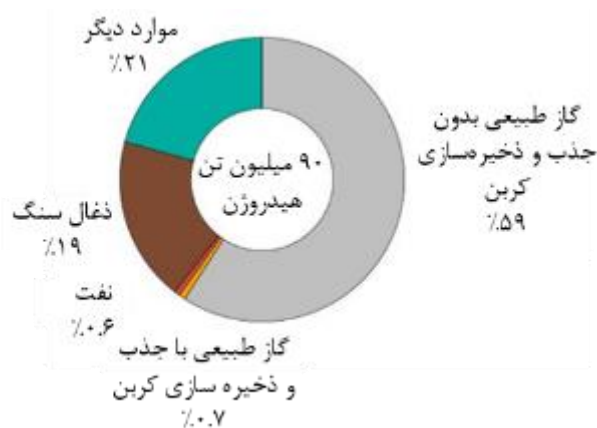
زمان بهره‌برداری از ظرفیت بالقوه هیدروژن در گذار به یک نظام انرژی پایدار فرا رسیده است. در سال ۲۰۱۹ و هم‌زمان با انتشار گزارش مهم آژانس بین‌المللی انرژی با عنوان *آینده هیدروژن* برای گروه بیست، تنها سه کشور فرانسه، ژاپن و کره جنوبی دارای استراتژی ملی در زمینه هیدروژن بودند. امروزه اما ۱۷ دولت راهبردهای ملی هیدروژن خود را منتشر کرده‌اند و بیش از ۲۰ کشور دیگر نیز به طور رسمی اعلام کرده‌اند که در حال تدوین چنین برنامه‌هایی هستند. در کنار آن، بسیاری از شرکت‌های بزرگ صنعتی و انرژی نیز به دنبال بهره‌گیری از فرصت‌های تجاری مرتبط با هیدروژن هستند. روشن است که هیدروژن نقشی اساسی در تحقق نظام انرژی عاری از کربن ایفا خواهد کرد.

هیدروژن: سوخت آینده

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پراکندگی تولید هیدروژن بر اساس منابع انرژی مصرفی نشان می‌دهد در حال حاضر سوخت‌های فسیلی همچنان سهم زیادی را در فرایندهای تولید هیدروژن به خود اختصاص داده‌اند. در شکل ۲ نیز منابع اصلی تأمین هیدروژن بر مبنای نوع فرایند تولید نمایش داده شده است که بار دیگر وابستگی شدید به منابع فسیلی را برجسته می‌سازد.



شکل ۱. نمودار پراکندگی تولید هیدروژن از منابع انرژی مصرفی [۱] مختلف [۶]



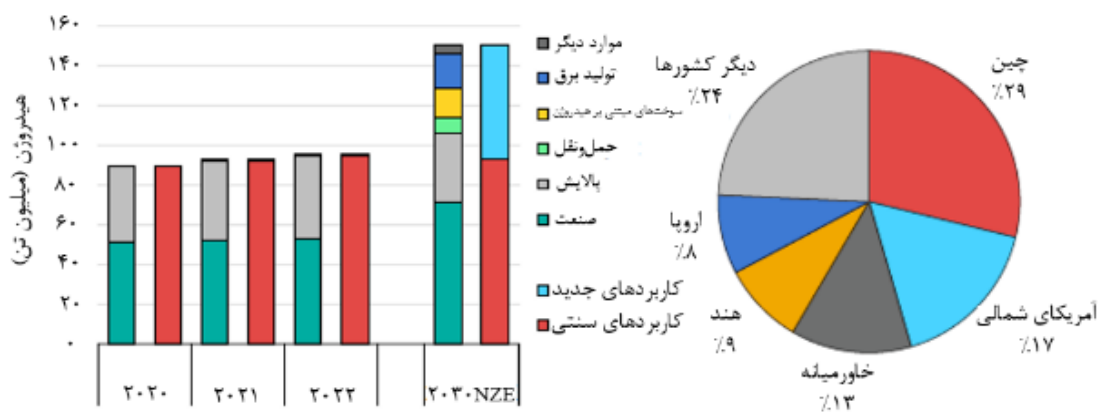
شکل ۲. نمودار پراکندگی تولید هیدروژن از منابع مختلف [۱]

بر اساس نقشه راه «برنامه انتشار صفر» آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۵۰، استفاده از هیدروژن به طور چشمگیری به حوزه‌های مختلف بخش انرژی گسترش خواهد یافت. در این چارچوب، تقاضای جهانی برای هیدروژن شش برابر مقدار کنونی پیش‌بینی شده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ حدود ۱۰ درصد از کل مصرف نهایی انرژی را تأمین کند [۱]. در حال حاضر، تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی همچنان ارزان‌ترین گزینه در بسیاری از مناطق جهان به شمار می‌رود.

بسته به قیمت گاز طبیعی در هر منطقه، هزینه تولید هیدروژن از این منبع بین ۰/۵ تا ۱/۷ دلار به ازای هر کیلوگرم متغیر است. به‌کارگیری فناوری^۱ CCUS به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از این فرایند، هزینه تولید را به حدود ۱ تا ۲ دلار در هر کیلوگرم افزایش می‌دهد.

مصرف جهانی هیدروژن در سال ۲۰۲۲ به ۹۵ میلیون تن رسید که بیانگر رشدی حدود ۳ درصد نسبت به برآورد اصلاح‌شده سال ۲۰۲۱ است. این روند افزایشی ادامه‌دار است و تنها در سال ۲۰۲۰ به دلیل همه‌گیری کووید-۱۹ و رکود اقتصادی جهانی با وقفه مواجه شد.

با وجود آنکه تقاضای جهانی هیدروژن در سال ۲۰۲۲ به بالاترین سطح تاریخی خود رسید، مصرف آن همچنان عمدتاً در حوزه‌های سنتی متمرکز باقی مانده است. این رشد را نمی‌توان بازتابی از موفقیت سیاست‌های توسعه هیدروژن دانست، بلکه بیشتر تحت تأثیر روندهای کلی بازار انرژی جهانی است. همان‌گونه که اشاره شد، بخش اعظم تقاضا در صنایع و پالایش نفت متمرکز است و کمتر از ۱/۱ درصد آن به کاربردهای نوین در صنایع سنگین، حمل‌ونقل یا تولید برق اختصاص دارد. نقش هیدروژن کم‌کربن در این میان بسیار محدود است؛ به گونه‌ای که تنها حدود ۰/۷ درصد از کل تقاضای هیدروژن را تشکیل می‌دهد. این واقعیت بیانگر آن است که تولید و مصرف هیدروژن در سال ۲۰۲۲ همچنان با انتشار بیش از ۹۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن همراه بوده است [۱].



شکل ۳. نمودار پراکنندگی تقاضای هیدروژن در کشورها در سال ۲۰۲۰ و صنایع مختلف [۱]

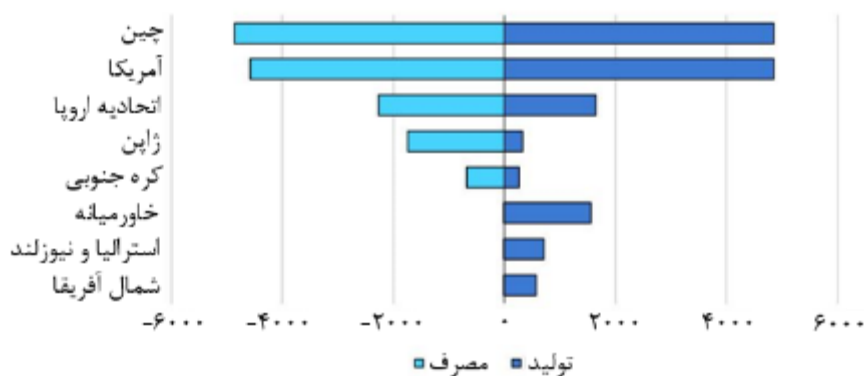
همان‌طور که گفته شد، مانند سال‌های گذشته، رشد مصرف جهانی هیدروژن نتیجه سیاست‌های هیدروژن نیست، بلکه نتیجه روندهای جهانی انرژی است. تمام این افزایش در کاربردهای سنتی، عمدتاً در پالایش و بخش شیمیایی رخ داده و با این افزایش، تولید بر اساس سوخت‌های فسیلی کاهش نیافته است؛ به این معنا که رشد تولید هیدروژن هیچ سودی برای اهداف کاهش تغییرات اقلیمی در جهان نداشته است. در حال حاضر، استفاده از هیدروژن در کاربردهای جدید مانند صنایع سنگین، حمل‌ونقل، تولید سوخت‌های مبتنی بر هیدروژن یا تولید و ذخیره‌سازی برق که کلید انتقال انرژی پاک است، کمتر از ۱/۱ درصد تقاضای جهانی را تشکیل می‌دهد. در نسخه به‌روزشده سال ۲۰۲۳ سناریوی انتشارات صفر خالص آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۵۰ (سناریوی NZE) استفاده از هیدروژن تا پایان این دهه سالانه ۶ درصد رشد می‌کند که به معنای رسیدن به بیش از ۱۵۰ میلیون تن از هیدروژن تا سال ۲۰۳۰ است که تقریباً ۴۰ درصد از کاربردهای جدید حاصل می‌شود [۱].

1. Carbon Capture, Utilization, and Storage

۲. سناریوی انتشارات صفر خالص تا سال ۲۰۵۰ (سناریوی NZE) یک سناریوی هنجاری است که مسیری را برای بخش انرژی جهانی به منظور دستیابی به انتشار گازهای گلخانه‌ای صفر خالص تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد، در حالی که اقتصادهای پیشرفته قبل از سایرین به انتشار خالص صفر می‌رسند. این سناریو همچنین اهداف کلیدی توسعه پایدار مرتبط با انرژی، به‌ویژه دسترسی جهانی به انرژی تا سال ۲۰۳۰ و بهبودهای عمده کیفیت هوا را برآورده می‌کند. مطابق با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای که در ششمین گزارش ارزیابی هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC) ارزیابی شده، با محدود کردن افزایش دمای جهانی به ۱/۵ درجه سانتی‌گراد (با حداقل ۵۰ درصد احتمال) سازگار است.

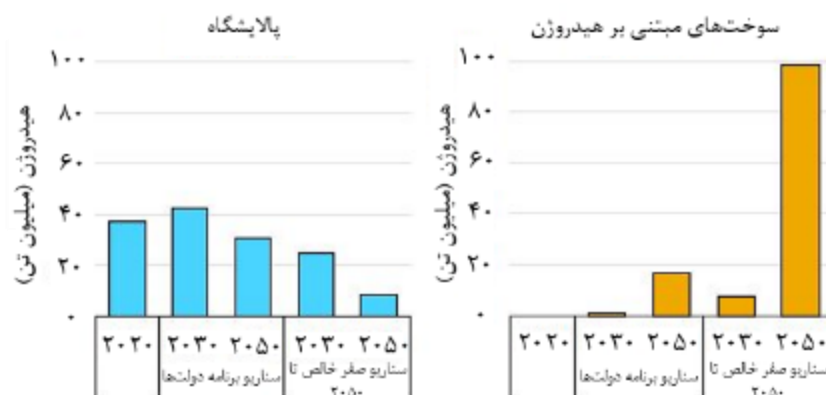
تقاضای جهانی هیدروژن در سال ۲۰۲۰ حدود ۹۰ میلیون تن هیدروژن بود که تقریباً تمام این تقاضا ناشی از مصارف پالایشی و صنعتی است. پالایشگاه‌ها سالانه نزدیک به ۴۰ میلیون تن هیدروژن به عنوان ماده اولیه و یا به عنوان منبع انرژی مصرف می‌کنند. پالایشگاه‌ها از هیدروژن برای حذف ناخالصی‌ها (به‌ویژه گوگرد) و ارتقای بخش‌های نفت سنگین به محصولات سبک‌تر استفاده می‌کنند. چین بزرگ‌ترین مصرف‌کننده هیدروژن برای پالایش است (نزدیک به ۹ میلیون تن هیدروژن در سال) و پس از آن ایالات متحده (بیش از ۷ میلیون تن هیدروژن در سال) و خاورمیانه (نزدیک به ۴ میلیون تن هیدروژن در سال) قرار دارند. این سه منطقه روی هم بیش از نیمی از تقاضای جهانی را تشکیل می‌دهند [۱].

حدود نیمی از تقاضای پالایش با هیدروژن فرعی حاصل از فرایندهای دیگر در پالایشگاه (مانند رفرمینگ نفتی کاتالیزوری) یا سایر فرایندهای پتروشیمی ادغام‌شده در پالایشگاه‌های خاص (مانند کراکرهاي بخار) تأمین می‌شود. باقی توسط تولید اختصاصی در محل تأمین می‌شود. اکثر تولیدات در محل مبتنی بر ریفرم گاز طبیعی است، به استثنای برخی موارد مانند استفاده از گازی شدن زغال سنگ، که تقریباً ۲۰ درصد از تولید هیدروژن اختصاصی در پالایشگاه‌های چین را تشکیل می‌دهد.



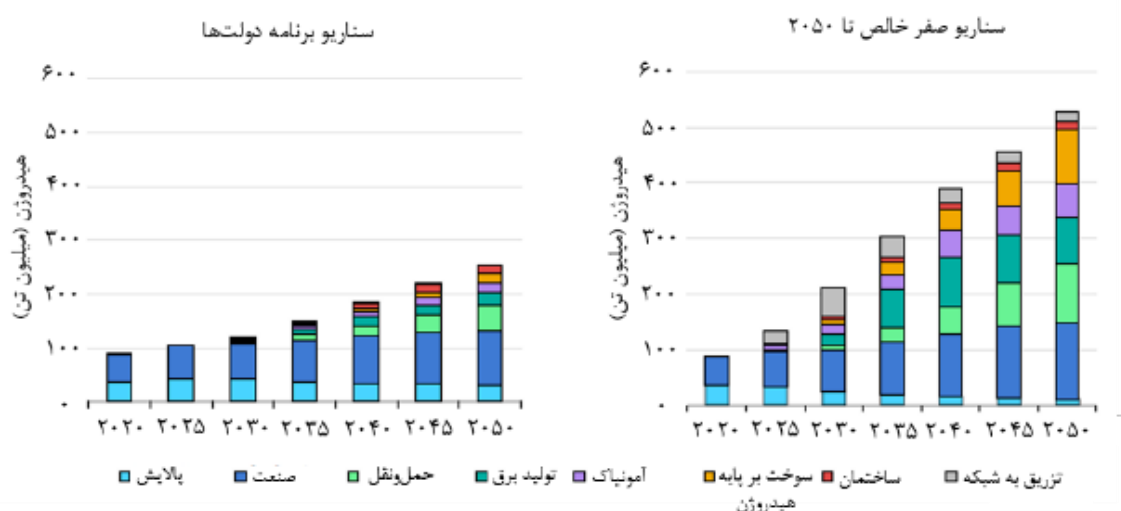
شکل ۴. نمودار پیش‌بینی تولید و مصرف هیدروژن تا سال ۲۰۵۰ [۱]

در بخش صنعتی تقاضا تا حدودی بالاتر است، به طوری که بیش از ۵۰ میلیون تن هیدروژن عمدتاً برای خوراک تولیدات شیمیایی که حدود ۴۵ میلیون تن هیدروژن است استفاده می‌شود که تقریباً سه چهارم آن به تولید آمونیاک و یک چهارم به متانول اختصاص دارد. ۵ میلیون تن هیدروژن باقی‌مانده در فرایند کاهش مستقیم آهن (DRI) برای فولادسازی مصرف می‌شود. این توزیع از سال ۲۰۰۰ تقریباً بدون تغییر باقی مانده است.



شکل ۵. نمودار تولید و مصرف هیدروژن در پالایشگاه‌ها و سوخت‌های مبتنی بر هیدروژن بر اساس سناریو صفر خالص و برنامه‌های دولت‌ها [۱]

اما پذیرش هیدروژن برای کاربردهای جدید بسیار کند بوده است، با جذب محدود به دهه گذشته، زمانی که استقرار وسیله نقلیه الکتریکی سولول سوختی (FCEV) آغاز شد و پروژه‌های آزمایشی شروع به تزریق هیدروژن به شبکه‌های گاز و استفاده از آن برای تولید برق کردند. نتایج مثبت حاصل از این تجربیات، توسعه برخی از فناوری‌های هیدروژن را تا مرز تجاری سازی سوق داد. به موازات این مسائل، نگرانی‌ها در مورد تغییرات اقلیمی افزایش یافته است و دولت‌ها و صنعت تعهدات محکمی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. اگرچه این امر پذیرش هیدروژن را برای کاربردهای جدید تسریع کرده است، تقاضا در این زمینه همچنان ناچیز است. به عنوان مثال، در حمل‌ونقل، تقاضای سالانه هیدروژن کمتر از ۲۰ کیلو تن هیدروژن است یعنی فقط ۰/۰۲ درصد از کل نیاز هیدروژن. همان‌طور که در نقشه راه خالص صفر آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۵۰ نشان داده شده، دستیابی به اهداف کربن‌زدایی دولت مستلزم تغییر گامی در سرعت گسترش فناوری‌های هیدروژن در بسیاری از بخش‌های بخش انرژی است.



شکل ۶. نمودار گسترش هیدروژن در بخش‌های مختلف بر اساس سناریو صفر خالص و برنامه‌های دولت‌ها [۱]

در سال ۲۰۲۰، تولید هیدروژن به منظور تأمین تقاضای بخش پالایش مسئول انتشار نزدیک به ۲۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن بود. با این حال، برخی اقدامات برای کاهش این سطح از انتشار کربن تا کنون عملیاتی شده‌اند؛ از جمله بهره‌برداری از شش واحد نیروگاهی مجهز به تأسیسات جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS) و دو واحد صنعتی که از فناوری الکترولیز برای تولید هیدروژن استفاده می‌کنند. افزون بر این، دست‌کم ۳۰ پروژه دیگر در دست توسعه است که هدف آن‌ها گسترش تولید هیدروژن فسیلی همراه با CCUS و همچنین ایجاد ظرفیت‌های جدید مبتنی بر فناوری‌های اصلاحی پیشرفته یا الکترولیز است. با وجود این پیشرفت‌ها، توسعه و گسترش تولید هیدروژن پاک در ایران مستلزم تدوین یک نقشه راه جامع و شفاف است؛ نقشه راهی که تحقق اهداف بلندمدت را با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص کشور ممکن سازد. این برنامه باید ابعاد مختلفی همچون پتانسیل‌های تولید انرژی، شبکه حمل‌ونقل، الگوهای مصرف نهایی انرژی و نیز پویایی‌های واردات و صادرات را به طور یکپارچه در بر گیرد [۱].

کربن‌زدایی صنایع هیدروژن از طریق برقرسانی: موانع و فرصت‌ها

کربن‌زدایی صنایع شیمیایی از طریق برقرسانی

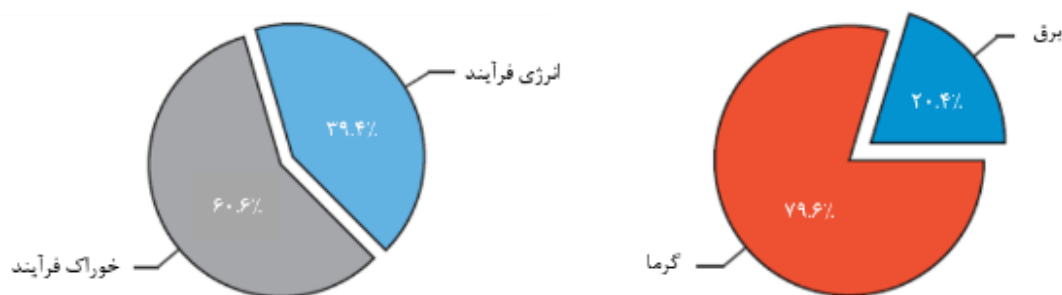
کاهش مداوم هزینه در فناوری‌های ذخیره‌سازی بادی، خورشیدی و انرژی، نقش آن‌ها را در کربن‌زدایی عمیق بخش انرژی الکتریکی و برقرسانی اقتصادی گسترش داده است. به عنوان مثال، در سناریو انتشار صفر خالص آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) تا سال ۲۰۵۰، باد و خورشید ۷۰ درصد از تولید برق جهانی را تأمین می‌کنند، در حالی که برآورد می‌شود که برق از ۲۰ درصد مصرف نهایی انرژی جهانی (۲۰۲۰) به نزدیک به ۵۰ درصد افزایش یابد. راه‌حل‌های کربن‌زدایی مبتنی بر برقرسانی یا

«کربن‌زدایی الکتریکی» در بخش‌های حمل‌ونقل و ساختمان (مانند وسایل نقلیه الکتریکی، پمپ‌های حرارتی) در حال حاضر از نظر تجاری قابل دوام بوده و در مقیاس صنعتی به کار گرفته شده‌اند. در مقابل، مسیرهای کربن‌زدایی برای بخش صنعتی که ۲۴ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را در سال ۲۰۱۹ به خود اختصاص داده، کمتر مورد توجه بوده است. علاوه بر این، انتشارات کربن در بخش صنعتی طی دو دهه گذشته سریع‌تر از هر بخش دیگری رشد کرده که ناشی از رشد تقاضای مرتبط با توسعه اقتصادی برای مواد بوده است. این چشم‌انداز بر فرصت‌ها و چالش‌های الکتروکربن‌زدایی صنایع شیمیایی، سومین منبع بزرگ انتشارات صنعتی جهانی در سال ۲۰۱۹ و منبع اصلی جهانی بهره‌وری اقتصادی و اشتغال مستقیم و غیرمستقیم تمرکز دارد. عوامل متعددی کربن‌زدایی از مواد شیمیایی را به طور منحصربه‌فردی چالش‌برانگیز می‌کند. نخست، فرایندهای شیمیایی عمدتاً به سوخت‌های فسیلی به عنوان ماده اولیه و منبع انرژی متکی هستند، که تخمین زده می‌شود ۵۸ تا ۷۰ درصد به عنوان ماده اولیه استفاده شود. در برخی موارد، استفاده از مواد اولیه مشتق‌شده از فسیل به تولید محصولات جانبی منجر می‌شود که برای مقاصد انرژی سوزانده می‌شوند (به عنوان مثال، تولید هیدروژن از ریفرم بخار متان)، که مرز بین ورودی‌های سوخت‌های فسیلی مورد استفاده به عنوان مواد اولیه و کاربردهای انرژی را محو می‌کند. دوم، تقاضا برای کالاهای شیمیایی و از جمله هیدروژن به عنوان یکی از مواد اولیه موادی مانند آمونیاک، متانول و... رشد کرده است، روندی که انتظار می‌رود ادامه یابد. برای مثال، تقاضا برای مواد شیمیایی اولیه (مانند متانول و آمونیاک) پیش‌بینی می‌شود از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۵۰، ۴۰ درصد تا ۶۰ درصد افزایش یابد.

مسیرهای کربن‌زدایی عمیق این بخش، بر اساس چرخه، شامل چندین استراتژی است (۱) با استفاده از مواد اولیه کربنی جایگزین مانند زیست‌توده (۲) انجام جذب و جداسازی کربن (CCS) برای حذف انتشارات مربوط به سوخت فسیلی، و (۳) استقرار فرایندهای جدید برای تولید مواد شیمیایی که جایگزین سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی جایگزین مانند برق می‌شود.

وضعیت استفاده از برق در صنایع شیمیایی

در سال ۲۰۱۸، الکتریسیته تنها ۲۰/۴ درصد از مصرف انرژی در محل در بخش مواد شیمیایی ایالات متحده را به خود اختصاص داد، و باقی آن توسط گرمای حاصل از احتراق، عمدتاً از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شد. اکثر سوخت‌های فسیلی مورد استفاده مواد اولیه هستند، اما فرصت‌های کاهش انتشار عمدتاً ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی است.



شکل ۷. پراکندگی سوخت فسیلی مورد استفاده برای تأمین انرژی و خوراک فرآیند [۳۰]

بسیاری از مواد شیمیایی کالایی که امروزه تولید می‌شوند، بر اساس واکنش‌های گرماگیر هستند که در دماهای بالا (۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) با گرمای حاصل از سوزاندن سوخت فسیلی عمل می‌کنند. به عنوان مثال، می‌توان به فرآیند ریفرم بخار و متان برای تولید هیدروژن اشاره کرد. یکی از روش‌های جایگزینی گرمای مشتق‌شده از فسیل، گرمایش مقاوم‌تری مستقیم است که شامل عبور جریان الکتریکی با توان بالا از مواد است که به تولید گرما از مقاومت الکتریکی ماده منجر می‌شود. دمای قابل حصول تأمین گرما به ویژگی‌های انتقال حرارت رآکتور و مقاومت ماده بستگی دارد. در حالی که گرمایش مقاوم‌تری در زندگی روزمره همه‌جا وجود دارد، به دلیل هزینه نسبتاً ارزان تأمین گرما از سوخت‌های فسیلی تا به امروز، در صنعت فرآیند شیمیایی کمتر رایج است. با این حال، علی‌رغم معایب هزینه‌های تاریخی، گرمایش مقاوم‌تری مزایای زیادی دارد، همان‌طور

که با مطالعات در مورد توسعه راکتورهای گرمایش الکتریکی برای ریفرم بخار و متان برای تولید هیدروژن مشخص شده است گرمایش مقاومتی می‌تواند گرما را در طیف وسیعی از دماها فراهم کند و گرمایش سریع‌تر و یکنواخت‌تری را فراهم کند و در نتیجه، راکتورهای فشرده‌تر، مقیاس‌پذیرتر و پاسخ‌دهنده‌تر را ایجاد کند.

راکتورها و عملیات واحد با گرمایش مقاومتی نشان‌دهنده یک الگوی جدید در صنایع شیمیایی است که به طراحی مجدد فرایندهای ایجادشده برای به حداکثر رساندن منافع نیاز دارد. برای مثال، راکتورهای کاتالیزوری گرماگیر که از کوره‌های بزرگ استفاده می‌کنند، می‌توانند با واحدهای حاوی راکتورهای کاتالیزوری گرم‌شده با مقاومت جایگزین شوند. چنین طرح‌ها و طرح‌های عملیاتی جدیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

فناوری‌های تولید هیدروژن و برقی‌سازی آنها

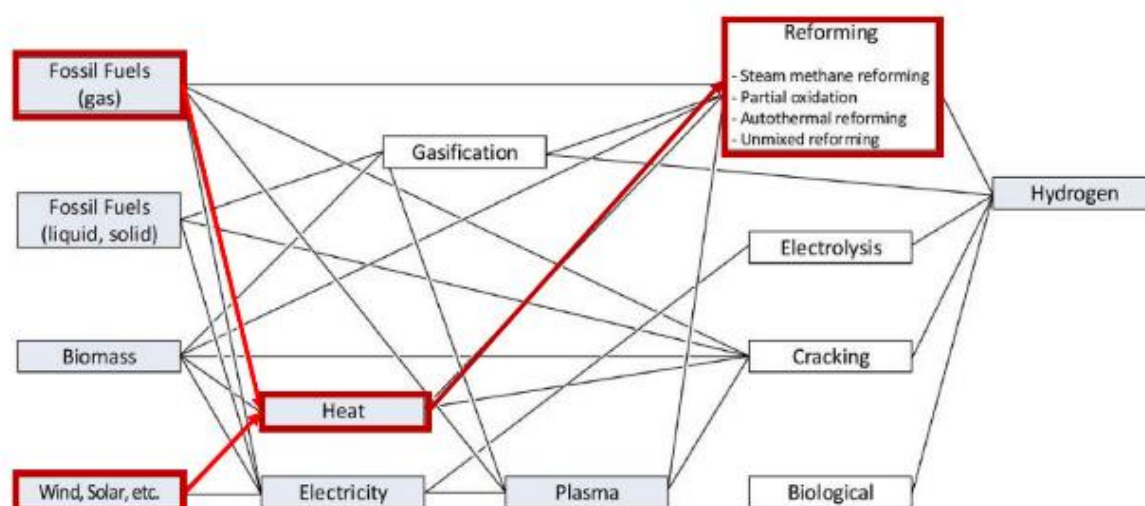
با وجود رشد چشمگیر فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی، چالش‌هایی نظیر نوسانات زمانی و مکانی در تولید این نوع انرژی‌ها، به استفاده‌ای غیرکارآمد و گاه نامتناسب از این منابع در صنایع مختلف منجر شده است. این امر به‌ویژه در صنایع انرژی‌بر مانند صنایع شیمیایی، باعث شده است که سهم بالقوه انرژی‌های تجدیدپذیر در این حوزه‌ها همچنان محدود باقی بماند. در حالی که فناوری‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در گذار انرژی ایفا می‌کنند، نبود راهکارهای مؤثر برای یکپارچه‌سازی آنها با فرایندهای صنعتی پیوسته، شکاف قابل توجهی در بهره‌وری و پایداری ایجاد کرده است.

در مقایسه با روش‌های متداول تولید انرژی، بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) و راهکارهایی نظیر انرژی به گاز (PtG یا Power-to-Gas) افق‌های تازه‌ای را برای استفاده پایدار از منابع تجدیدپذیر فراهم کرده‌اند. فناوری PtG به‌ویژه به واسطه تولید هیدروژن، توانسته است جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌های انرژی کشورهای پیشرو پیدا کند. هیدروژن نه تنها به عنوان حامل انرژی پاک شناخته می‌شود، بلکه ظرفیت بالایی برای کاربرد در بخش‌های حمل‌ونقل، نیروگاهی، فولاد، ساخت‌وساز و صنایع شیمیایی دارد. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌بر بودن فرایندهای الکترولیز و نبود زیرساخت‌های مناسب حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی، مانع از تجاری‌سازی کامل این مسیر در بسیاری از کشورها از جمله ایران شده است.

در این میان، شکاف مهمی در ادبیات پژوهش مربوط به برقی‌سازی فرایندهای متداول تولید هیدروژن، به‌ویژه اصلاح بخار متان (SMR) وجود دارد. بیشتر مطالعات گذشته تمرکز خود را بر الکترولیز آب گذاشته‌اند و کمتر به پتانسیل برقی‌سازی فرایندهای گرمایی موجود مانند SMR با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند. در حالی که فرایند E-SMR اصلاح بخار متان برقی‌شده به عنوان رویکردی نوین، امکان استفاده مستقیم از انرژی برق تجدیدپذیر را برای تأمین گرمای فرایند و تولید هیدروژن فراهم می‌کند. این فناوری ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند گامی عملی برای اتصال انرژی‌های تجدیدپذیر به صنعت پتروشیمی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی باشد [۲ و ۳].

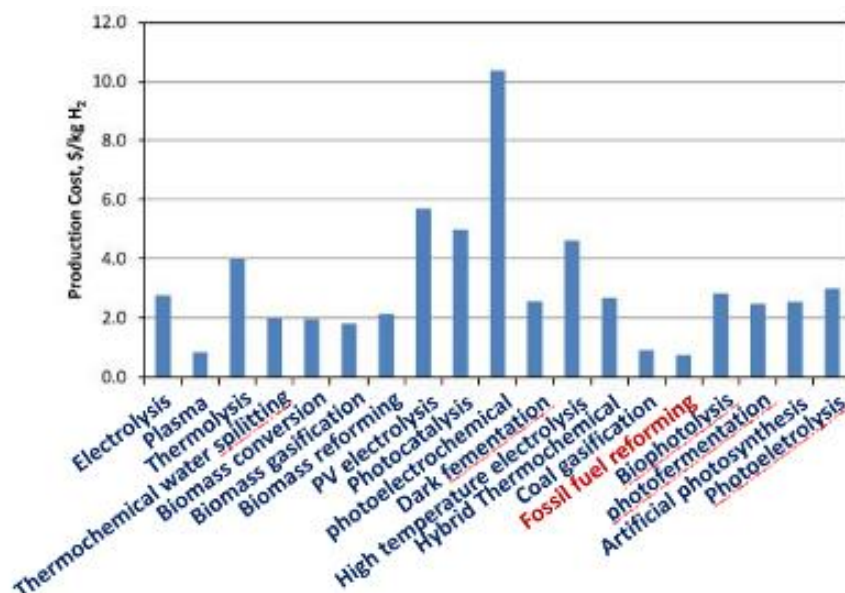
پژوهش حاضر با تمرکز بر مرور و تحلیل این فناوری به عنوان دروازه ورود به برقی‌سازی تولید هیدروژن و به طور گسترده‌تر صنایع شیمیایی، در پی آن است که پتانسیل فنی و اقتصادی این فناوری را در مقایسه با روش‌های موجود ارزیابی کرده و نقش آن را در ایجاد هم‌افزایی میان منابع تجدیدپذیر و نیازهای صنعتی کشور تبیین کند. از این منظر، تحقیق حاضر پاسخی به شکاف‌های موجود در ادبیات پژوهش و بسترساز سیاست‌گذاری واقع‌گرایانه برای توسعه زیرساخت هیدروژن در ایران است.

از یک طرف، حمل‌ونقل هیدروژن به دلیل چگالی کم، خوردگی فلز و دامنه وسیع انفجار با مشکلات اقتصادی و مقیاس تولید کوچک مواجه می‌شود. امروزه، توجه گسترده‌ای به اختلاط هیدروژن در خطوط لوله گاز طبیعی برای انتقال هیدروژن به دلیل مزایای آن در مقیاس بزرگ، مسافت طولانی و کم‌هزینه، شده است. پروژه‌های نمایشی با نسبت اختلاط هیدروژن تا ۲۰ درصد در سراسر جهان راه‌اندازی شده‌اند. همچنین، نسبت اختلاط هیدروژن در گاز طبیعی می‌تواند در نوسان ۰ تا ۲۰ درصد در تزریق هیدروژن مانند پروژه گاز طبیعی آملند در هلند باشد [۴ و ۵].

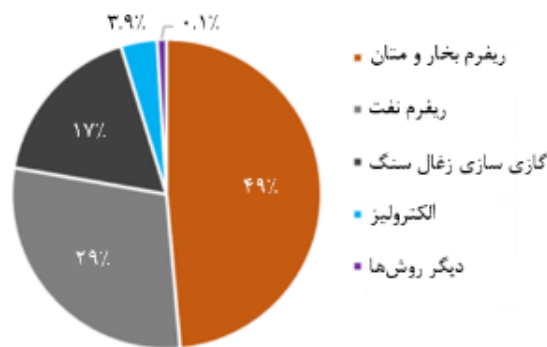


شکل ۸. انواع فناوری‌های تولید هیدروژن

از سوی دیگر در حوزه فناوری‌های تولید هیدروژن، هزینه هیدروژن تولید شده توسط الکترولیز آب به عنوان یک فناوری بدون تولید کربن و بدون استفاده از سوخت فسیلی به دلیل مصرف بالای انرژی آن بسیار بالاتر از هزینه‌های ریفرم متان بخار (SMR) است. علاوه بر این، مقیاس پروژه الکترولیز آب تجاری هنوز کوچک است. تولید هیدروژن از الکترولیز آب تنها حدود ۴ درصد هیدروژن تولیدی جهان را می‌گیرد که از این میزان تنها ۲۵ درصد به طور مستقیم بر پایه برق تجدیدپذیر است. فرایند اصلی تولید هیدروژن در جهان SMR است که ۴۸ درصد تولید جهانی هیدروژن را تشکیل می‌دهد. فرایند SMR با واکنش بخار و متان تحت کاتالیز در دمای بالا، هیدروژن تولید می‌کند که یک روش معمولی و به صرفه است و گسترده‌ترین مسیر برای تولید هیدروژن از گاز طبیعی است و انتظار می‌رود که به دلیل اقتصاد مطلوب نسبت به سایر روش‌ها و زیرساخت‌های موجود، فرایند غالب برای تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ باقی بماند [۶ و ۷].



شکل ۹. نمودار هزینه تولید هیدروژن با روش‌های مختلف [۱۰]

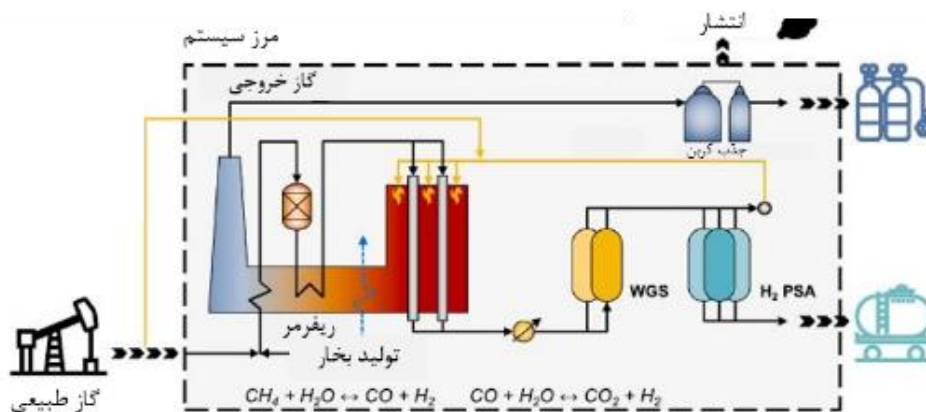


شکل ۱۰. نمودار فراوانی روش تولید هیدروژن

واکنش (۱) $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$, $\Delta H_{298}^0 = 206.2 \text{ kJ mol}^{-1}$

واکنش (۲) $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$, $\Delta H_{298}^0 = -41.2 \text{ kJ mol}^{-1}$

در رآکتورهای لوله‌ای با سوخت صنعتی (SMR)، گاز طبیعی با بخار و در صورت لزوم CO_2 مخلوط می‌شود و به هیدروژن و اکسید کربن تبدیل می‌شود که به عنوان گاز سنتز شناخته می‌شود. فرایند ریفرم متان بخار عمدتاً توسط واکنش‌های ریفرم متان بخار مستقل ترمودینامیکی و جابه‌جایی گاز آب^۱ WGS که به ترتیب در واکنش‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند، کنترل می‌شود. به طور کلی واکنش ۱ به شدت گرماگیر است که به سوختن متان اضافی در محفظه احتراق برای گرم کردن نیاز دارد. سوزاندن متان نه تنها باعث اتلاف حرارت قابل توجهی می‌شود، بلکه باعث انتشار کربن اضافی و مصرف گاز طبیعی در کشور نیز می‌شود.

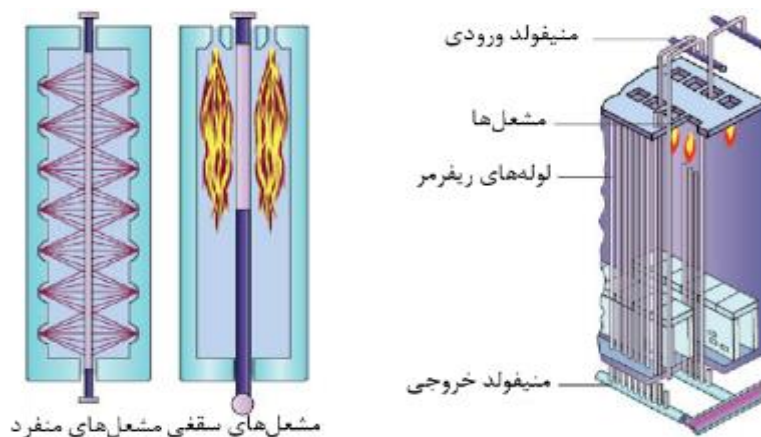


شکل ۱۱. فرایند کلی یک واحد SMR

پیکربندی این کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی با کار کردن نیروگاه‌های SMR در فشار بالا مطلوب است. با این حال، پیروی از اصل Chatelier Le، این تبدیل واکنش رفرمینگ را محدود می‌کند و برای جبران آن، دمای بالاتری لازم است تا رفرمینگ گرماگیر به سمت تبدیل متان کافی پیش برود [۸].

فرایند SMR صنعتی (خاکستری) دارای ردپای قابل توجهی از CO_2 است، زیرا تقریباً $8/6$ – $9/3$ تن CO_2 در هر تن هیدروژن تولید می‌شود که در آن ۱۷–۴۱ درصد نتیجه مستقیم احتراق سوخت و گاز خارج شده برای تأمین گرمای مورد نیاز است [۹ و ۱۰]. تولید گاز سنتز به طور معمول، رآکتور ریفورمر بزرگ‌ترین، پیچیده‌ترین و گران‌ترین عملیات واحد در تولید گاز سنتز است. این شامل کاتالیزوری است که در تعداد زیادی لوله فولادی پر آلیاژ بارگذاری شده است که در یک کوره بزرگ قرار می‌گیرند و با احتراق سوخت‌های فسیلی و گازهای خارج شده از فرایند گرم می‌شوند. این پیکربندی اجازه می‌دهد تا حدود ۵۰ درصد از گرمای عرضه شده مستقیم به واکنش اصلاحی در بستر کاتالیزور منتقل شود، در حالی که بقیه به صورت گرمای نهان در گاز دودکش

داغ ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. بنابراین، دمای احتراق مشعل‌ها باید به طور قابل توجهی بالاتر از دمای واکنش باشد تا شار حرارتی مورد نیاز به داخل تولید شود. برای دستیابی به راندمان انرژی بالا در پیکربندی نیروگاه SMR، یک بخش حرارتی اتلاف گاز دودکش یکپارچه یک نیاز است که در آن راندمان را می‌توان تا حدودی افزایش داد. ۹۵ درصد در صورتی که تولید بخار اضافی در نظر گرفته شود [۸].



شکل ۱۲. راکتور لوله‌ای ریفرمر متان و بخار

عملکرد کارخانه‌های SMR صنعتی معمولاً توسط انتقال حرارت در سرتاسر کوره ریفرمر محدود می‌شود. ترکیب رسانایی حرارتی کم با فرمینگ بخار گرماگیر قوی متان، یک گرادیان دمایی تند در سراسر بستر کاتالیست ایجاد می‌کند، خطر ایجاد نقاط داغ را افزایش می‌دهد و باعث ایجاد تنش حرارتی مضر برای طول عمر راکتور می‌شود. بنابراین، عملیات معمول اقتصادی و عملی کارخانه SMR صنعتی در حدود ۱۵ barg - ۳۰ و ۸۵۰ - ۹۲۰ C^o توسط محدودیت‌های مواد محدود شده است [۸].

برای بهبود راندمان حرارتی ریفرمر، برخی از محققان بهینه‌سازی‌های مختلفی را روی فرایند SMR انجام داده‌اند. سیمپسون و همکاران تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی فرایند SMR را انجام دادند و دریافتند که ۴۲/۸ درصد از اتلاف انرژی ناشی از احتراق در ریفرمر است و ۱۹ درصد از تلفات انرژی ناشی از گازهای دودکش آگزوز است. راندمان حرارتی می‌تواند با بهینه‌سازی دما، فشار و نسبت بخار به متان (S/C) راکتور به ۷۱/۱ درصد برسد [۱۱]. پنگ فرایند تبادل حرارتی فرایند SMR را از طریق تحلیل نقطه پینچ بهینه کرد و بازده حرارتی ۸۸/۸۲ درصد را برای فرایند جدید به دست آورد [۱۲]. لی و همکاران از شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی راندمان حرارتی سیستم SMR در شرایط کاری مختلف استفاده کردند و دریافتند که بازده حرارتی بهینه ۹۱/۲۶ درصد است که ۸/۴۰ درصد بیشتر از سیستم اصلی است. به طور کلی، راندمان حرارتی فرایند SMR به دلیل راندمان کم احتراق در ریفرمر و انتقال انرژی توسط تخلیه گاز دودکش به یک گلوگاه رسیده است [۱۳].

علاوه بر این، انتشار CO₂ از فرایند SMR بدون دستگاه جذب و ذخیره کربن^۱ (CCS) به ۹/۴-۱۱/۴ کیلوگرم بر کیلوگرم هیدروژن می‌رسد [۱۴]، در حالی که برای فرایند SMR با فناوری CCS، انتشار CO₂ هنوز بیش از ۱ کیلوگرم بر کیلوگرم هیدروژن است [۱۵ و ۱۶].

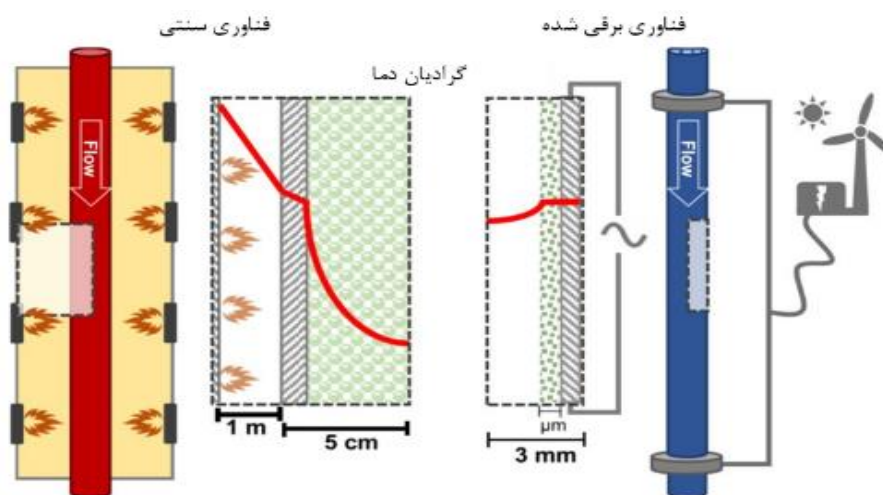
انتشار CO₂ اضافی و ناکارآمدی‌های مرتبط با احتراق در فرایندهای SMR معمولی اساساً مورد توجه قرار نگرفته است. فرض کنید برق تولیدشده توسط انرژی‌های تجدیدپذیر به جای احتراق وارد فرایند SMR بشود.

نخست، اتلاف حرارت گاز دودکش در فرایند SMR معمولی را می‌توان حذف کرد و از CO₂ آزادشده توسط احتراق متان به عنوان سوخت جلوگیری کرد. در حال حاضر، مقدار زیادی هیدروژن صنعتی از SMR می‌آید. SMR با برق تجدیدپذیر می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف گاز خوراک و انتشار CO₂ تولید هیدروژن را کاهش دهد. سنتی و همکاران پیشنهاد کرد که ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در صنایع شیمیایی می‌تواند به طور مؤثر جایگزین بخشی از انرژی فسیلی شود [۱۷].

دوم، مقیاس و کارایی تولید هیدروژن الکتریکی را می‌توان بهبود بخشید و فرایند SMR را نیز می‌توان بهینه کرد. اسپگنول و همکاران استفاده از الکتریسیته را برای تأمین انرژی گرمایی برای ریفرمر در فرایند SMR پیشنهاد کردند. مطالعات تجربی آن‌ها نشان داد اندازه رآکتور را می‌توان با روش گرمایش الکتریکی کاهش داد و نرخ تبدیل متان را به ۸۰ درصد رساند [۱۸ و ۱۹].

پالما و همکاران دریافته‌اند که گرمایش الکتریکی می‌تواند فعالیت کاتالیزور را افزایش دهد و تشکیل کربن پلیمری را سرکوب کند [۲۰]. تانگ و همکارانش یک رآکتور با منبع حرارتی هیبریدی متمرکز خورشیدی و الکتریکی برای اصلاح بخار متان توسعه دادند و دریافته‌اند که نرخ تبدیل متان به تعادل ترمودینامیکی SMR نزدیک شده است [۲۱].

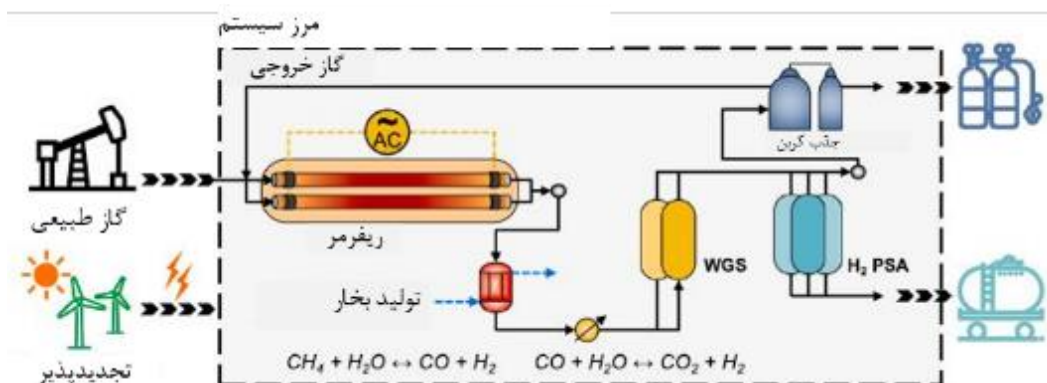
ویژمن و همکاران راستی‌آزمایی آزمایشی را روی یک ریفرم متان و بخار برقی شده (E-SMR) انجام دادند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد حجم ریفرمر می‌تواند دو مرتبه کاهش یابد و دستیابی به مقیاس ظرفیت وسیع‌تر را آسان‌تر کند. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، لوله فولادی به یک ژنراتور برق AC با پوشش داخلی کاتالیزورهای مبتنی بر Ni (ضخامت حدود ۱۲۸ میکرومتر) متصل است. لوله آلیاژ FeCrAl مستقیم توسط اثر ژول گرم می‌شود. در نتیجه انرژی را مستقیم به محل فعال کاتالیزوری بدون تفاوت دما از سطح گرما به مکان کاتالیزوری تأمین کرد. یکی دیگر از مزایای E-SMR شده در مطالعه آن‌ها این است که پاسخ زمانی سریع و عملکرد دینامیکی در نتیجه گرمایش الکتریکی قابل دستیابی است، به خلاف واحد SMR صنعتی که در آن نرخ گرمایش پایین و عملکرد حالت پایدار برای جلوگیری از تنش حرارتی یا تشکیل نقاط داغ مورد نیاز است. این ویژگی‌ها به‌ویژه در دنیایی که نیاز به فناوری‌های انعطاف‌پذیرتر برای عملیات‌های پویا تقاضای زیادی دارد، جالب هستند. این ادغام بر محدودیت‌های انتقال حرارت شناخته‌شده از واحد SMR صنعتی غلبه می‌کند. داشتن یک منبع حرارتی یکنواخت برای فرایند همچنین تضمین می‌کند که ترکیب گاز در تمام طول کاتالیزوری نزدیک به تعادل نگه داشته می‌شود، حجم رآکتور کاهش می‌یابد و به استفاده بیشتر از مواد کاتالیزوری منجر می‌شود. داشتن یک منبع حرارتی یکنواخت برای فرایند همچنین تضمین می‌کند که ترکیب گاز در تمام طول کاتالیزوری نزدیک به تعادل نگه داشته می‌شود، حجم رآکتور کاهش می‌یابد و به استفاده بیشتر از مواد کاتالیزوری منجر می‌شود [۲۲ - ۲۴].



شکل ۱۳. سمت راست: یک رآکتور ریفرمر برقی شده سمت چپ: یک رآکتور ریفرمر سنتی

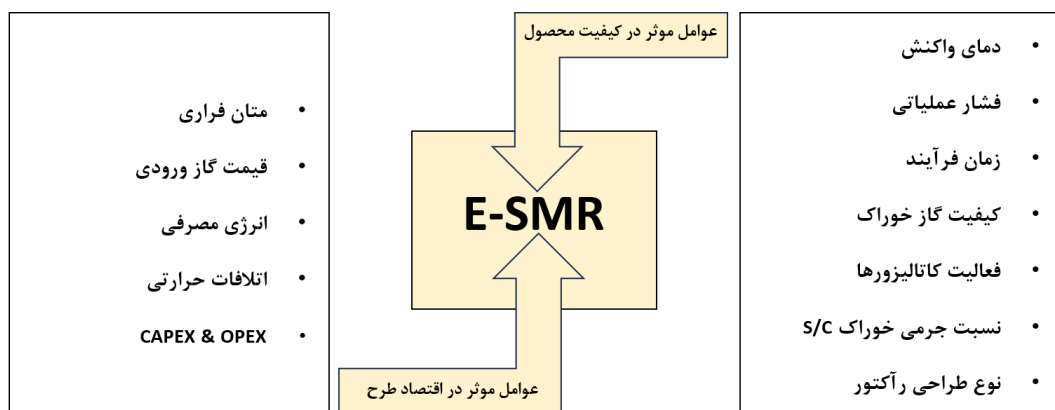
فناوری E-SMR به طور مؤثر نیاز به بخش احتراق را در طرح اصلاح متان بخار حذف می‌کند، در نتیجه انتشار CO_2 مستقیم مرتبط را با فرض استفاده از نیروی الکتریکی تجدیدپذیر حذف می‌کند.

ریفرمر برقی شده از نظر فنی امکان‌پذیر است، اما مطالعه فنی و اقتصادی طراحی سیستم فرایند SMR همراه با الکتریسیته و بررسی تخصصی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به‌خصوص فناوری‌های خورشیدی یکپارچه با SMR در حال حاضر هنوز نیاز به بررسی دارد.



شکل ۱۴. فرایند یک واحد E-SMR

با این حال، طراحی بهینه چنین سیستمی به‌ویژه زمانی که با منابع تجدیدپذیر - به‌خصوص انرژی خورشیدی - یکپارچه شود، همچنان نیازمند مطالعه دقیق فنی و اقتصادی است. در حال حاضر، شکاف‌هایی در درک جامع رفتار دینامیکی، بهره‌وری انرژی، و تحلیل هزینه - منفعت در شرایط واقعی عملیاتی وجود دارد که باید با انجام مطالعات چندرشته‌ای مرتفع شود [۲۵ و ۲۶].



شکل ۱۵. عوامل مؤثر در کیفیت محصول و اقتصاد طرح

بر اساس شکل ۱۵، کیفیت محصول (هیدروژن تولیدی) در سیستم SMR تحت تأثیر مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی قرار دارد. از جمله:

۱. دمای واکنش: دمای بالاتر معمولاً باعث افزایش نرخ واکنش و بازده هیدروژن می‌شود، اما نیازمند مصرف انرژی بیشتر و ملاحظات مواد نسوز است.
۲. فشار عملیاتی: فشار نقش مهمی در تعادل ترمودینامیکی و بهره‌وری فرایند دارد و می‌تواند بر انتخاب کمپرسورها و هزینه‌های عملیاتی اثر بگذارد.
۳. زمان فرایند (زمان ماند گاز در رآکتور): بر بازده واکنش و تبدیل متان مؤثر است و به طراحی رآکتور وابسته است.
۴. کیفیت گاز خوراک (مقدار ناخالصی‌ها مانند گوگرد): بر عملکرد کاتالیزورها و طول عمر تجهیزات تأثیر مستقیم دارد.
۵. فعالیت و پایداری کاتالیزورها: عامل تعیین‌کننده‌ای در نرخ واکنش و نیاز به احیا یا جایگزینی دوره‌ای است.
۶. نسبت جرمی بخار به کربن (S/C ratio): این نسبت نقش کلیدی در جلوگیری از تشکیل دوده و افزایش تبدیل متان دارد.
۷. نوع طراحی رآکتور: پارامترهایی مانند توزیع دما، نرخ انتقال جرم و سطح تماس گاز-کاتالیزور از طراحی رآکتور تأثیر می‌پذیرند.

از سوی دیگر، اقتصاد کلی طرح تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که باید در مدل‌سازی لحاظ شوند. از جمله:

۱. میزان متان فراری: کاهش بازده فرایند و افزایش هزینه‌های محیط زیستی را در پی دارد.

۲. قیمت گاز خوراک: سهم بالایی در هزینه‌های جاری فرایند دارد.
 ۳. مصرف انرژی الکتریکی و گرمایی: تعیین‌کننده هزینه‌های عملیاتی، به‌ویژه در طرح‌های برقی‌شده است.
 ۴. اتلاف‌های حرارتی: بر بازده نهایی سیستم اثرگذار بوده و نیاز به عایق‌بندی و طراحی حرارتی دقیق را ایجاد می‌کند.
 ۵. هزینه‌های سرمایه‌گذاری (CAPEX) و عملیاتی (OPEX): که شامل هزینه ساخت، نصب، نگهداری و بهره‌برداری از واحد می‌شوند و در ارزیابی اقتصادی طرح حیاتی هستند.
- با توجه به مجموع این عوامل، پژوهش حاضر تلاش دارد، نقش و تأثیر هر یک از این متغیرها را در عملکرد فنی و اقتصادی طرح بررسی کرده و نقشه راهی برای ادغام مؤثر انرژی‌های تجدیدپذیر در فرایند اصلاح بخار متان ارائه دهد [۲۷ و ۲۸].

چالش‌ها و فرصت‌های یکپارچه‌سازی شبکه و سیستم‌های انرژی

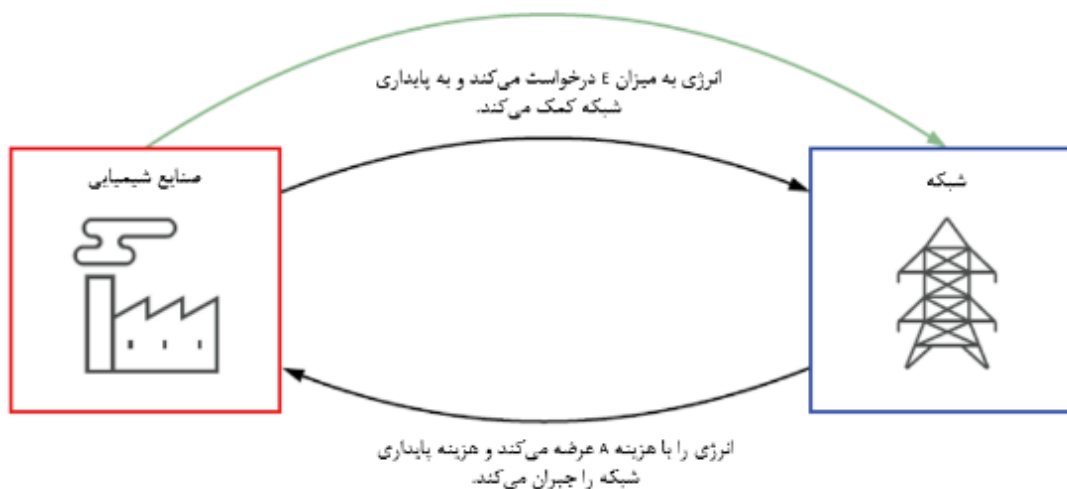
اجرای موفقیت‌آمیز فناوری‌های برق‌رسانی‌شده به عنوان یک استراتژی برای کربن‌زدایی، به دو عنصر کلیدی بستگی دارد: (۱) توانایی هماهنگ کردن عملکرد آن‌ها با شبکه برق به شیوه‌ای سودمند و (۲) تطبیق با افزایش تقاضای کل برق از طریق تسریع استقرار تجدیدپذیرها و سایر فناوری‌ها و روندهای سیاستی که قبلاً در بسیاری از مناطق در حال انجام است.

هماهنگی با یک واحد تولید برق چه خارج شبکه باشد یا داخل شبکه و یک واحد E-SMR، امکان ارزش‌گذاری انعطاف‌پذیر هیدروژن را با ارائه خدمات مختلف به شبکه برق در بازه‌های زمانی مختلف (مانند ساعتی، روزانه، ماهانه، و فصلی) فراهم می‌کند. این مسئله می‌تواند منبع درآمد اضافی برای تولیدکننده هیدروژن از طریق E-SMR باشد. شبکه برق نیز از این هماهنگی برای به حداقل رساندن اثرات اقتصادی و عملیاتی افزایش تقاضای برق و دستیابی به اهداف کربن‌زدایی بهره خواهد برد.

یک پارامتر ورودی کلیدی که بر اقتصاد الکتریکی E-SMR تأثیر می‌گذارد، هزینه برق و مکانیسم خرید است. برق را می‌توان از طریق قراردادهای دوجانبه بلندمدت بین E-SMR و تولیدکنندگان مستقل برق و شرکت‌های برق با شرایط قرارداد ثابت (مثلاً قیمت و مقدار برق، با شرایط شدت انتشار) تهیه کرد. این استراتژی تا حدی خطر واحد E-SMR را از عدم قطعیت و نوسان قیمت‌های برق به پهای از دست رفتن درآمدهای حاصل از خدمات شبکه برق بالقوه کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، می‌توان برق را از طریق یک بازار عمده‌فروشی نقطه‌ای تهیه کرد، جایی که قیمت‌ها بسته به شرایط شبکه می‌تواند از منفی تا قیمت‌های بسیار بالا در هر مگاوات ساعت متغیر باشد [۲۹].

علاوه بر این، اگر کارخانه‌های شیمیایی به مصرف‌کنندگان بزرگ و انعطاف‌پذیر برق تبدیل شوند، می‌توانند به طور استراتژیک در بازار عمده‌فروشی شرکت کنند تا بر قیمت‌های بازار به نفع خود تأثیر بگذارند.

انتشار گازهای گلخانه‌ای از محل صنایع به خارج از محل در شبکه منتقل می‌شود.



شکل ۱۶. تعامل صنایع شیمیایی برقی‌شده با شبکه برق

از دیدگاه شبکه برق، رشد سریع و ناهماهنگ تقاضای برق از یک صنعت شیمیایی برقی ممکن است به ظرفیت تولید ناکافی برای پاسخ‌گویی به تمام تقاضای برق در قلمرو خدمات آن منجر شود، که به نوبه خود ممکن است قابلیت اطمینان شبکه برق را کاهش دهد و به جیره‌بندی برق و ناترازی بیشتر منجر شود. بنابراین، احداث واحدهای خارج از شبکه تجدیدپذیر به طور هم‌زمان با احداث E-SMR قابل توجه است.

نتیجه‌گیری

کربن‌زدایی عمیق تولید مواد شیمیایی بخش مهمی از تلاش‌های کربن‌زدایی گسترده‌تر در اقتصاد است، اما در مقایسه با سایر بخش‌های انرژی‌بر، احتمالاً به دلیل پیچیدگی، ماهیت چندمحصولی و نقش محوری آن در اقتصادهای منطقه‌ای و اشتغال مرتبط، توجه چندانی به آن نشده است. فناوری‌های معرفی شده راه‌حلی است که به صورت تجاری در دسترس هستند (گرمایش با مقاومت الکتریکی) را شامل می‌شود که یک فرصت استثنایی برای کاهش ناترازی برق و گاز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی این صنایع است و می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا بهترین راهکارها را برای اجرای این طرح انتخاب کنند.

نوآوری این پژوهش در رویکرد ساختاریافته آن نهفته است؛ به گونه‌ای که ابتدا با بررسی وضعیت موجود انرژی و تحلیل جایگاه فعلی و سناریوهای آینده‌نگر هیدروژن در نظام انرژی آغاز می‌شود، سپس برقی‌سازی صنایع شیمیایی بررسی و فناوری اصلاح بخار متان برقی‌شده (E-SMR) به عنوان یک گزینه کم‌کربن معرفی می‌شود و در ادامه، مزایا و فرصت‌های فناورانه، زیست‌محیطی و اقتصادی آن به تفصیل بررسی می‌شود. این ترتیب منطقی، چارچوبی منسجم برای درک ضرورت گذار به فناوری‌های نوین و انتخاب استراتژی‌های بهینه ارائه می‌دهد.

فناوری‌های معرفی‌شده در این مقاله، به‌ویژه استفاده از گرمایش مقاومتی در فرایند E-SMR، ضمن حذف احتراق مستقیم سوخت‌های فسیلی، امکان کاهش چشمگیر انتشار CO₂، افزایش بهره‌وری حرارتی، و تعامل بهتر با منابع تجدیدپذیر را فراهم می‌سازند. این فناوری می‌تواند هم‌زمان به کاهش ناترازی برق و گاز، بهبود عملکرد زیست‌محیطی، و انعطاف‌پذیری عملیاتی در صنایع شیمیایی منجر شود.

یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تدوین سیاست‌های حمایتی از تولید هیدروژن پاک در کشور باشد و به تصمیم‌گیران کمک کند تا مسیرهای فناورانه مؤثر در راستای دستیابی به اهداف کربن‌زدایی و امنیت انرژی را برگزینند.

منابع

- [1] International Energy Agency, "Global Hydrogen Review 2021." [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [2] E. Shagdar, B. G. Lougou, Y. Shuai, E. Ganbold, O. P. Chinonso, and H. Tan, "Process analysis of solar steam reforming of methane for producing low-carbon hydrogen," *RSC Adv*, vol. 10, no. 21, pp. 12582–12597, Mar. 2020.
- [3] J. Ma *et al.*, "A high temperature tubular reactor with hybrid concentrated solar and electric heat supply for steam methane reforming," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.132073.
- [4] Kippers M J, de Laat J C and Hermkens R J M, Pilot project on hydrogen injection in natural gas on Island of Ameland in the Netherlands International Gas Union Research Conference; Seoul, 2011.
- [5] C. Acar and I. Dincer, "Selection criteria and ranking for sustainable hydrogen production options," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 95, pp. 40118–40137, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.137.
- [7] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, and K. R. Khalilpour, "Hydrogen as an energy vector," Mar. 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.
- [8] Rostrup-Nielsen, Jens, and Lars J. Christiansen. *Concepts in syngas manufacture*. Vol. 10. World Scientific, 2011.
- [9] P. L. Spath and M. K. Mann, "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming.," Feb. 2001, [Online]. Available: <http://www.doe.gov/bridge>
- [10] A. O. Oni, K. Anaya, T. Giwa, G. Di Lullo, and A. Kumar, "Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions," *Energy Convers Manag*, vol. 254, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115245.
- [11] A. P. Simpson and A. E. Lutz, "Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 18, pp. 4811–4820, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025.
- [12] X. D. Peng, "Analysis of the thermal efficiency limit of the steam methane reforming process," *Ind Eng Chem Res*, vol. 51, no. 50, pp. 16385–16392, Dec. 2012, doi: 10.1021/ie3002843.
- [13] J. Lee *et al.*, "Machine learning-based energy optimization for on-site SMR hydrogen production," *Energy Convers Manag*, vol. 244, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114438.
- [14] Z. Navas-Anguila, D. García-Gusano, J. Dufour, and D. Iribarren, "Revisiting the role of steam methane reforming with CO₂ capture and storage for long-term hydrogen production," *Science of the Total Environment*, vol. 771, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145432.
- [15] Malehmirchegini, L., & Chapman, A. J. (2025). Strategies for achieving carbon neutrality within the chemical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115762>.
- [16] D. Y. C. Leung, G. Caramanna, and M. M. Maroto-Valer, "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies," 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.093.
- [17] G. Centi, G. Iaquaniello, and S. Perathoner, "Chemical engineering role in the use of renewable energy and alternative carbon sources in chemical production," *BMC Chemical Engineering*, vol. 1, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1186/s42480-019-0006-8.
- [18] M. Idamakanti, E. B. Ledesma, R. R. Ratnakar, M. P. Harold, V. Balakotaiah, and P. Bollini, "Electrified Catalysts for Endothermic Chemical Processes: Materials Needs, Advances, and Challenges," *ACS Engineering Au*, vol. 4, no. 1, pp. 71–90, Feb. 2024, doi: 10.1021/acsengineeringau.3c00051.
- [19] L. Zheng, M. Ambrosetti, and E. Tronconi, "Joule-Heated Catalytic Reactors toward Decarbonization and Process Intensification: A Review," *ACS Engineering Au*, vol. 4, no. 1, pp. 4–21, Feb. 2024, doi: 10.1021/acsengineeringau.3c00045.
- [20] L. Zheng, M. Ambrosetti, F. Zaio, A. Beretta, G. Groppi, and E. Tronconi, "Direct electrification of Rh/Al₂O₃ washcoated SiSiC foams for methane steam reforming: An

- experimental and modelling study,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 39, pp. 14681–14696, May 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.346.
- [21] J. Ma *et al.*, “A high temperature tubular reactor with hybrid concentrated solar and electric heat supply for steam methane reforming,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.132073.
- [22] Wismann ST, Engbæk JS, Vendelbo SB, Bendixen FB, Eriksen WL, Aasberg-Petersen K, Frandsen C, Chorkendorff I, Mortensen PM. Electrified methane reforming: A compact approach to greener industrial hydrogen production. *Science*. 2019 May 24;364(6442):756-759. doi:10.1126/science.aaw8775. PMID: 31123131.
- [23] S. T. Wismann *et al.*, “Electrified methane reforming: Elucidating transient phenomena,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 425, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.131509.
- [24] S. T. Wismann *et al.*, “Electrified Methane Reforming: Understanding the Dynamic Interplay,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 58, no. 51, pp. 23380–23388, Dec. 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b04182.
- [25] Bakey, Kevin. “The production of hydrogen gas: steam methane reforming.” *ENGL 202C—Process Description* (2015).
- [26] S. Alimah *et al.*, “Techno-economics of desalination cogeneration with SMR: Case study for prospective NPP in West Kalimantan,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100603.
- [27] R. R. Ratnakar and V. Balakotaiah, “Sensitivity analysis of hydrogen production by methane reforming using electrified wire reactors,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 916–926, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.352.
- [28] H. Song, Y. Liu, H. Bian, M. Shen, and X. Lin, “Energy, environment, and economic analyses on a novel hydrogen production method by electrified steam methane reforming with renewable energy accommodation,” *Energy Convers Manag*, vol. 258, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115513.
- [29] G. Maggio, A. Nicita, and G. Squadrito, “How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature,” May 03, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.121.
- [30] D. S. Mallapragada *et al.*, “Decarbonization of the chemical industry through electrification: Barriers and opportunities,” Jan. 18, 2023, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.joule.2022.12.008.