نهمین کنگره ملی
شیمی و نانوشیمی
از پژوهش تا توسعه ملی
9th National Congress of
Chemistry and Nanochemistry
from Research to National Development

تولید سوخت هیدروژن پاک با بهره‌گیری از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز آب

آیدا مرتضوی [۱]، مریم شهیکی تاش [۱] ، مجتبی کیخا[۳] و بلقیس آدرم[۴]
[۱] دانش آموز متوسطه دوم دبیرستان دانشگاه زاهدان
[۳] دکتری شیمی معدنی کارشناس پژوهش‌سرای دانش‌آموزی پویندگان زاهدان Mojtaba.Keikha1@Gmail.com
[۴] دکتری شیمی آلی مدیر پژوهش‌سرای دانش‌آموزی پویندگان زاهدان

چکیده:

هیدروژن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی پاک، به دلیل چگالی انرژی بالا و عدم تولید آلاینده در زمان مصرف، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گذار به اقتصاد کم‌کربن دارد. با این حال، بخش عمده هیدروژن تولیدی جهان همچنان از منابع فسیلی و به‌ویژه فرآیند رفورمینگ بخار متان تأمین می‌شود که با انتشار قابل‌توجه دی‌اکسیدکربن همراه است. از سوی دیگر، الکترولیز متداول آب نیز به دلیل مصرف بالای انرژی الکتریکی و هزینه‌های عملیاتی زیاد با محدودیت‌هایی روبه‌رو است.در این پژوهش، امکان استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب (HTE) برای تولید هیدروژن پاک مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، بخشی از انرژی موردنیاز برای تجزیه مولکول‌های آب از طریق انرژی حرارتی با دمای بالا (حدود ۷۰۰°C تا ۱۰۰۰°C) تأمین می‌شود که می‌تواند از گرمای اتلافی راکتورهای هسته‌ای به دست آید. در این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های ترمودینامیکی، تأثیر دمای بالا بر کاهش انرژی الکتریکی موردنیاز، افزایش راندمان تبدیل انرژی و بهبود عملکرد سامانه الکترولیز بررسی شده و نتایج آن با روش‌های متداول تولید هیدروژن مقایسه شده است.نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند راندمان تولید هیدروژن را به بیش از ۸۰ درصد افزایش داده و مصرف انرژی الکتریکی را به طور قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین این رویکرد با حذف منابع فسیلی در تأمین انرژی فرآیند، امکان تولید هیدروژن پاک با انتشار کربن بسیار ناچیز را فراهم می‌کند. از این رو، یکپارچه‌سازی فناوری الکترولیز حرارتی با نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای تولید پایدار هیدروژن و تقویت امنیت انرژی در آینده مطرح شود.

کلمات کلیدی : اقتصاد کم‌کربن، الکترولیز حرارتی آب، انرژی هسته‌ای، بهره‌وری انرژی، توسعه پایدار، هیدروژن پاک، گرمای مازاد راکتور هسته‌ای.

۱- مقدمه

در عصر حاضر که کربن‌زدایی و استفاده از منابع انرژی پایدار به اولویت‌های جهانی تبدیل شده‌اند، هیدروژن (H_2) به‌عنوان یک حامل انرژی پاک و کلیدی، نقشی راهبردی ایفا می‌کند. چگالی انرژی جرمی بالای هیدروژن (۱۴۲MJ/kg)، آن را از نظر وزنی به گزینه‌ای مناسب‌تر نسبت به بسیاری از سوخت‌های فسیلی تبدیل کرده است. علاوه بر این، فرآیند مصرف هیدروژن، اعم از احتراق یا استفاده در پیل‌های سوختی، تنها آب خالص تولید می‌کند؛ ازاین‌رو، هیدروژن راهکاری مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع و حمل‌ونقل به‌شمار می‌رود [۱]، [۲].

با وجود مزایای فراوان، چالش اصلی هیدروژن به نحوه تولید آن مربوط می‌شود. در حال حاضر، بخش عمده هیدروژن جهان از منابع فسیلی تولید می‌شود که با انتشار قابل توجه دی‌اکسیدکربن همراه است. در مقابل، الکترولیز آب یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید هیدروژن پاک محسوب می‌شود که در آن مولکول آب به کمک جریان الکتریکی به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود [۳]. در این فرآیند، انرژی الکتریکی لازم برای شکستن پیوندهای مولکولی آب تأمین شده و واکنش به‌صورت گرماگیر انجام می‌گیرد. بر اساس رابطه انرژی آزاد گیبس ($\Delta G=\Delta H-T\Delta S$)، بخشی از انرژی مورد نیاز این واکنش می‌تواند علاوه بر برق، از طریق انرژی حرارتی تأمین شود که این موضوع

زمینه‌ساز توسعه روش‌های الکترولیز حرارتی شده است [۴].

الکترولیز حرارتی آب (High Temperature Electrolysis) یکی از فناوری‌های نوین تولید هیدروژن است که با استفاده هم‌زمان از انرژی الکتریکی و حرارتی، مصرف برق را کاهش داده و راندمان سیستم را افزایش می‌دهد. در این میان، نیروگاه‌های هسته‌ای به‌عنوان منبعی پایدار از حرارت دمای بالا، ظرفیت قابل توجهی برای تأمین انرژی مورد نیاز این فرآیند دارند [۵]. راکتورهای هسته‌ای در کنار تولید برق، مقادیر زیادی انرژی حرارتی در محدوده دمایی ۷۰۰°C تا ۱۰۰۰°C تولید می‌کنند که بخش عمده آن به‌صورت گرمای اتلافی دفع می‌شود. استفاده از این حرارت مازاد می‌تواند بازده تولید هیدروژن را به‌طور چشمگیری افزایش دهد [۶].

در فرآیند الکترولیز حرارتی هسته‌ای (Nuclear-Powered HTE)، بخار آب داغ وارد سامانه الکترولیز شده و در شرایط دمای بالا، انرژی کمتری برای شکستن پیوندهای شیمیایی آب نیاز خواهد بود. این امر موجب کاهش مصرف برق، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه نهایی تولید هیدروژن می‌شود [۷]. همچنین، تولید هیدروژن با استفاده از انرژی هسته‌ای می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و نقش مهمی در تحقق اقتصاد کم‌کربن و توسعه پایدار ایفا کند [۸].

۲- بیان مسئله

نیروگاه‌های هسته‌ای، به‌ویژه راکتورهای نسل فعلی، در فرآیند تولید برق مقادیر قابل توجهی انرژی حرارتی با دمای بالا تولید می‌کنند. بخش عمده این انرژی به‌صورت گرمای مازاد یا حرارت دفع‌شده وارد سامانه‌های خنک‌کننده شده و در نهایت به محیط زیست منتقل می‌شود. این در حالی است که حرارت اتلافی نیروگاه‌ها می‌تواند به‌عنوان یک منبع انرژی ارزشمند و قابل استفاده در فرآیندهای صنعتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۱]، [۲].

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع سوخت فسیلی و نیاز روزافزون به انرژی‌های پاک، استفاده بهینه از انرژی‌های اتلافی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [۳]. در این راستا، یکی از راهکارهای نوین، استفاده از حرارت مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند تولید هیدروژن پاک است. هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، نقش مهمی در آینده سیستم‌های انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند [۴]، [۵].

فرآیند الکترولیز حرارتی آب (HTE) یا الکترولیز بخار در دمای بالا، یکی از فناوری‌های پیشرفته تولید هیدروژن است که در آن بخشی از انرژی مورد نیاز برای تجزیه آب، به‌جای انرژی الکتریکی، از انرژی حرارتی تأمین می‌شود [۶]. این فرآیند امکان استفاده از حرارت با دماهای بالا را فراهم کرده و می‌تواند موجب کاهش مصرف برق، افزایش راندمان و کاهش هزینه نهایی تولید هیدروژن شود [۷].

نیروگاه‌های هسته‌ای به دلیل تولید پایدار حرارت در دماهای بالا، گزینه‌ای مناسب برای تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز فرآیند HTE محسوب می‌شوند [۸]. استفاده از این حرارت مازاد، علاوه بر کاهش اتلاف انرژی، می‌تواند بازده کلی نیروگاه را افزایش داده و به ایجاد یک زنجیره ارزش جدید در حوزه انرژی‌های پاک کمک کند [۹].

در این پژوهش، قابلیت‌ها و مزایای استفاده از حرارت مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آن بر تولید هیدروژن پاک، افزایش بهره‌وری انرژی و توسعه پایدار ارزیابی شده است.

۳- روند اجرای پژوهش

۱- تحلیل منابع حرارتی نیروگاه‌های هسته‌ای

نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند تولید برق، مقدار قابل‌توجهی انرژی حرارتی تولید می‌کنند که تنها بخشی از آن به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در اغلب نیروگاه‌های هسته‌ای متداول مانند راکتورهای آب فشرده (PWR) و آب جوشان (BWR)، بازده تبدیل انرژی حرارتی به برق حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد است. به این معنا که تقریباً ۶۵ تا ۷۰ درصد انرژی تولیدی راکتور به صورت گرمای مازاد در

سامانه‌های خنک‌کننده دفع می‌شود [۲]، [۹].

این گرمای مازاد معمولاً از طریق کندانسور، برج‌های خنک‌کننده یا سامانه‌های خنک‌کاری با آب دریا یا رودخانه به محیط منتقل می‌شود. در مرحله کندانسور، بخار خروجی از توربین که هنوز دارای انرژی حرارتی قابل‌توجهی است، به آب تبدیل شده و این انرژی به مدار خنک‌کننده منتقل می‌شود. دمای این گرما معمولاً در بازه ۳۰°C تا ۶۰°C قرار دارد، اما در بخش‌های بالادستی چرخه حرارتی نیروگاه، به‌ویژه در مسیر بخار یا مدارهای واسط، دما می‌تواند به ۳۰۰°C یا بیشتر نیز برسد.

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در یک نیروگاه هسته‌ای با ظرفیت حدود ۱۰۰۰MW، توان حرارتی راکتور حدود ۳۰۰۰MW است. در این شرایط نزدیک به ۲۰۰۰MW انرژی حرارتی به‌صورت گرمای اتلافی در سامانه‌های خنک‌کننده دفع می‌شود که بخش قابل‌توجهی از آن از نظر فنی قابلیت بازیابی و استفاده در فرآیندهای صنعتی را دارد [۵]، [۱۲].

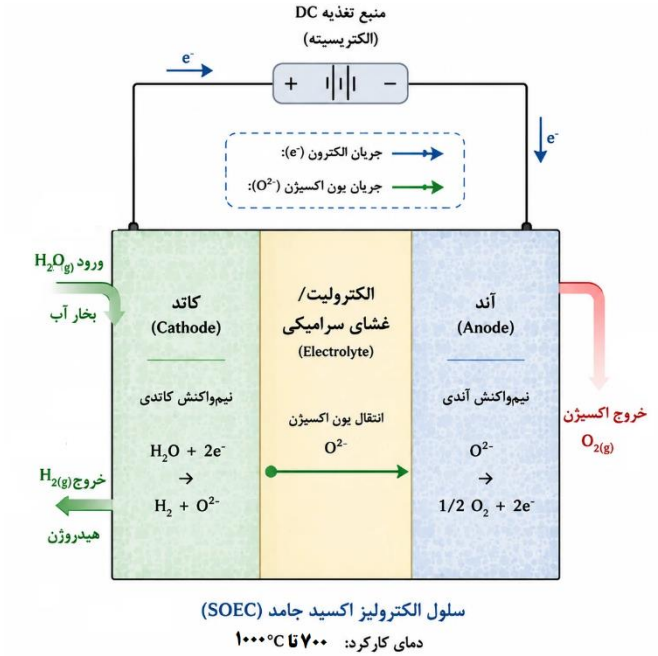
تحلیل بازه‌های دمایی و ظرفیت انتقال حرارت نشان می‌دهد که بخشی از این انرژی می‌تواند از طریق مبدل‌های حرارتی و سامانه‌های انتقال حرارت به فرآیندهای دما بالا مانند الکترولیز حرارتی آب (HTE) منتقل شود. استفاده از این گرما باعث می‌شود بخشی از انرژی موردنیاز برای شکستن مولکول‌های آب به صورت حرارتی تأمین شود و در نتیجه مصرف انرژی الکتریکی فرآیند کاهش یابد.

بنابراین، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای نه‌تنها یک اتلاف انرژی محسوب نمی‌شود، بلکه می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی پایدار و کم‌کربن برای فرآیندهای صنعتی، به‌ویژه تولید هیدروژن پاک، مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع زمینه مناسبی برای یکپارچه‌سازی سامانه‌های هسته‌ای با فناوری‌های تولید هیدروژن فراهم می‌کند و می‌تواند به افزایش بهره‌وری کلی نیروگاه‌های هسته‌ای کمک کند.

۲- بررسی فرآیند الکترولیز حرارتی آب

فرآیند الکترولیز حرارتی آب یا High Temperature Electrolysis (HTE) یکی از روش‌های پیشرفته تولید هیدروژن پاک است که در آن تجزیه مولکول‌های آب با استفاده همزمان از انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی انجام می‌شود. برخلاف الکترولیز متداول که در دمای پایین و با تکیه کامل بر برق عمل می‌کند، در فرآیند HTE بخشی از انرژی موردنیاز واکنش از طریق گرمای دمای بالا تأمین می‌شود. این ویژگی موجب کاهش مصرف برق و افزایش راندمان کلی فرآیند می‌شود [۴]، [۱۰].

در فناوری HTE معمولاً از سلول‌های الکترولیز اکسید جامد (SOEC) استفاده می‌شود. این سلول‌ها دارای الکترولیت سرامیکی جامد بوده و در دماهای بالا عملکرد مناسبی دارند. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است بخار آب در سمت کاتد وارد شده و پس از دریافت الکترون به هیدروژن تبدیل می‌شود، در حالی که یون‌های اکسیژن از طریق الکترولیت به سمت آند حرکت کرده و در آنجا گاز اکسیژن تشکیل می‌شود [۱۲]، [۱۳].

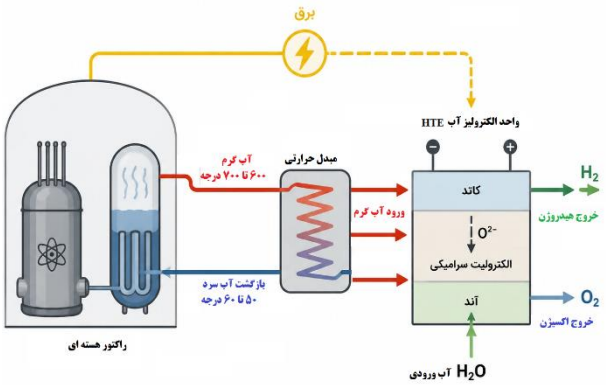


شکل ۱: فناوری HTE در الکترولیز آب

تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که افزایش دمای فرآیند موجب کاهش ولتاژ موردنیاز سلول و در نتیجه کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود.

۳- مدل‌سازی و تحلیل یکپارچه‌سازی سامانه

در شکل ۲ یک مدل مفهومی برای یکپارچه‌سازی سامانه حرارتی نیروگاه هسته‌ای با واحد الکترولیز حرارتی آب طراحی شده است. هدف از این مدل‌سازی، بررسی امکان انتقال گرمای مازاد نیروگاه به سامانه تولید هیدروژن و ارزیابی تأثیر آن بر عملکرد کلی سیستم است. در این چارچوب، ابتدا مسیرهای قابل استفاده برای بازیابی انرژی حرارتی در چرخه نیروگاه شناسایی شد. این منابع حرارتی می‌توانند از بخش‌هایی مانند بخار خروجی توربین، مبدل‌های حرارتی میانی یا مدارهای انتقال حرارت نیروگاه تأمین شوند.



شکل ۲ .مدل مفهومی یکپارچه‌سازی نیروگاه هسته‌ای با سامانه الکترولیز دمای بالا (THE) برای تولید هیدروژن

در مدل پیشنهادی، گرمای بازیابی‌شده از طریق مبدل‌های حرارتی به سامانه تولید بخار منتقل شده و بخار با دمای بالا برای تغذیه سلول‌های الکترولیز اکسید جامد (SOEC) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند، بخار آب در دمای بالا وارد واحد الکترولیز شده و تحت تأثیر جریان الکتریکی به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. استفاده از گرمای مازاد نیروگاه در این مرحله باعث می‌شود بخش

قابل‌توجهی از انرژی موردنیاز فرآیند به‌صورت حرارتی تأمین شده و در نتیجه مصرف انرژی الکتریکی کاهش یابد.

نتایج تحلیل مدل نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی سامانه‌های هسته‌ای با واحدهای الکترولیز دمای بالا می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری کلی انرژی در نیروگاه شود. در این شرایط، بخشی از گرمایی که پیش‌تر به محیط دفع می‌شد به یک محصول با ارزش افزوده بالا یعنی هیدروژن تبدیل می‌شود. علاوه بر این، استفاده از منابع حرارتی پایدار نیروگاه هسته‌ای امکان عملکرد پیوسته سامانه تولید هیدروژن را فراهم می‌کند و می‌تواند به افزایش پایداری تولید کمک کند [۶]، [۱۴].

همچنین در این تحلیل تأثیر پارامترهایی مانند دمای بخار ورودی، میزان گرمای قابل بازیابی و شرایط عملیاتی سلول‌های الکترولیز بر عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دمای بخار ورودی، راندمان تبدیل انرژی در فرآیند الکترولیز افزایش یافته و ولتاژ موردنیاز سلول کاهش می‌یابد. این موضوع در نهایت منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی و بهبود بازده کلی تولید هیدروژن می‌شود.

در مجموع، مدل‌سازی انجام‌شده نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی نیروگاه‌های هسته‌ای با سامانه‌های الکترولیز حرارتی آب از نظر فنی امکان‌پذیر بوده و می‌تواند به عنوان رویکردی مؤثر برای افزایش بهره‌وری انرژی و تولید هیدروژن پاک مورد توجه قرار گیرد.

۴- تحلیل ترمودینامیکی و راندمان تولید هیدروژن در الکترولیز حرارتی آب (HTE)

فرآیند تجزیه آب برای تولید هیدروژن بر اساس واکنش زیر انجام می‌شود:

$$H_2O \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2}O_2$$

برای انجام این واکنش باید انرژی لازم برای شکستن پیوندهای مولکولی آب تأمین شود. از دیدگاه ترمودینامیکی، انرژی کل موردنیاز برای این واکنش به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی. در الکترولیز متداول آب که در دماهای پایین انجام می‌شود، تقریباً تمام انرژی موردنیاز به صورت انرژی الکتریکی تأمین می‌گردد. به همین دلیل مصرف برق در این روش نسبتاً بالا است و هزینه تولید هیدروژن افزایش می‌یابد [۴]، [۱۰].

در مقابل، در فرآیند الکترولیز حرارتی آب (High Temperature Electrolysis) که در دماهای بالا (معمولاً حدود ۷۰۰°C تا ۱۰۰۰°C) انجام می‌شود، بخشی از انرژی موردنیاز واکنش از طریق انرژی حرارتی تأمین می‌شود. افزایش دما باعث کاهش انرژی آزاد گیبس (ΔG) موردنیاز برای واکنش شده و در نتیجه میزان انرژی الکتریکی لازم برای انجام فرآیند کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در دماهای بالا سهم انرژی حرارتی در تأمین انرژی واکنش افزایش یافته و سهم انرژی الکتریکی کاهش پیدا می‌کند [۱۰]، [۱۲].

این ویژگی باعث می‌شود که فرآیند HTE در مقایسه با الکترولیز معمولی از نظر مصرف انرژی کارآمدتر باشد. استفاده از منابع حرارتی دمای بالا، مانند حرارت تولیدی در نیروگاه‌های هسته‌ای، می‌تواند شرایط مناسبی برای اجرای این فرآیند فراهم کند و راندمان کلی تولید هیدروژن را افزایش دهد [۵]، [۹].

مطالعات نشان می‌دهد که در سامانه‌های الکترولیز دمای پایین، بازده تبدیل انرژی معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۷۰ درصد قرار دارد، در حالی که در سامانه‌های الکترولیز حرارتی با استفاده از سلول‌های اکسید جامد (SOEC)، بازده سیستم می‌تواند به حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد نیز برسد [۱۲]، [۱۳]. علاوه بر این، استفاده از منابع حرارتی خارجی باعث کاهش قابل‌توجه مصرف برق شده و در برخی مطالعات کاهش مصرف انرژی الکتریکی تا حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است [۴]، [۱۳].

از سوی دیگر، رایج‌ترین روش تولید هیدروژن در جهان یعنی رفورمینگ بخار متان (Steam Methane Reforming) گرچه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما با انتشار قابل‌توجه دی‌اکسیدکربن همراه است و به عنوان یکی از منابع تولید هیدروژن خاکستری شناخته می‌شود [۱۱]. در مقابل، ترکیب انرژی هسته‌ای با فرآیند HTE می‌تواند هیدروژن را با انتشار کربن بسیار ناچیز تولید کند و نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا نماید.

در مجموع، تحلیل ترمودینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب می‌تواند با کاهش مصرف انرژی الکتریکی، افزایش بازده فرآیند و کاهش انتشار کربن، به عنوان یک راهکار مؤثر برای تولید پایدار هیدروژن در آینده

مطرح شود.

۵- تحلیل مزایا و چالش‌های فناوری

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب دارای مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی است. یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری، افزایش بهره‌وری انرژی در نیروگاه‌های هسته‌ای است. در نیروگاه‌های متداول، بخش زیادی از انرژی تولیدی راکتور به‌صورت گرمای اتلافی دفع می‌شود، اما در سامانه یکپارچه هسته‌ای‌هیدروژنی این انرژی می‌تواند در تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گیرد و به محصولی با ارزش افزوده بالا تبدیل شود [۱]، [۱۱].

همان‌گونه که در جدول ۱ مقایسه بین روش‌های تولید هیدروژن مشاهده می‌شود، فرآیند رفورمینگ بخار متان (SMR) اگرچه دارای بازده نسبتاً مناسب در حدود ۶۵ تا ۷۵ درصد است، اما به دلیل وابستگی به گاز طبیعی، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در آن بسیار زیاد است. در مقابل، الکترولیز معمولی آب دارای انتشار کربن بسیار کم بوده، اما به دلیل وابستگی کامل به انرژی الکتریکی، بازده آن معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۷۰ درصد قرار دارد.

بر اساس نتایج جدول، فرآیند الکترولیز حرارتی آب (HTE/SOEC) که از ترکیب انرژی الکتریکی و حرارت دمای بالا استفاده می‌کند، دارای بازده بالاتری در حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد است. همچنین زمانی که گرمای موردنیاز این فرآیند از گرمای مازاد نیروگاه هسته‌ای تأمین شود، میزان انتشار CO_2 به نزدیک صفر رسیده و بازده سامانه به حدود ۹۰ درصد نزدیک می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی نیروگاه‌های هسته‌ای با فناوری HTE می‌تواند نسبت به سایر روش‌های تولید هیدروژن، عملکرد بهینه‌تر و سازگاری بیشتری با اهداف کربن‌زدایی داشته باشد.

از دیدگاه زیست‌محیطی، این فناوری می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کند. در روش‌های رایج تولید هیدروژن، به‌ویژه رفورمینگ بخار متان، مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود، در حالی که در فرآیند HTE متصل به نیروگاه هسته‌ای، انرژی موردنیاز بدون استفاده مستقیم از سوخت‌های فسیلی تأمین شده و میزان انتشار کربن به حداقل می‌رسد [۹]، [۱۱].

از دیگر مزایای این فناوری می‌توان به کاهش مصرف انرژی الکتریکی در مقایسه با الکترولیز معمولی اشاره کرد. استفاده از انرژی حرارتی دمای بالا باعث می‌شود بخشی از انرژی موردنیاز تجزیه آب به‌صورت حرارتی تأمین شود و در نتیجه ولتاژ موردنیاز سلول‌های الکترولیز کاهش یابد. این مسئله موجب افزایش راندمان کلی فرآیند و کاهش هزینه‌های انرژی در بلندمدت می‌شود [۱۰]، [۱۲].

با وجود این مزایا، چالش‌های فنی و اقتصادی متعددی نیز در مسیر توسعه این فناوری وجود دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به مواد و تجهیزات مقاوم در برابر دماهای بالا و شرایط خورنده است. سلول‌های الکترولیز اکسید جامد و مبدل‌های حرارتی در دماهای بالا کار می‌کنند و در صورت استفاده طولانی‌مدت ممکن است دچار خوردگی یا افت عملکرد شوند [۸]، [۱۲]. علاوه بر این، کنترل پایدار فرآیند، مدیریت انتقال حرارت و هماهنگی عملکرد بین نیروگاه هسته‌ای و سامانه الکترولیز از جمله مسائل فنی مهم در طراحی این سامانه‌ها محسوب می‌شود.

هزینه‌های اولیه احداث زیرساخت‌ها و تجهیزات پیشرفته نیز از دیگر محدودیت‌های توسعه این فناوری است. با این حال، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی می‌تواند در بلندمدت بخشی از هزینه‌های اولیه را جبران کند.

در مجموع، تحلیل انجام‌شده و داده‌های جدول مقایسه‌ای نشان می‌دهد که فناوری تولید هیدروژن با استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای، در مقایسه با روش‌های متداول، دارای بازده بالاتر، انتشار کربن کمتر و ظرفیت بیشتری برای توسعه اقتصاد هیدروژنی و تحقق اهداف انرژی پاک در آینده است.

جدول۱. مقایسه روش‌های اصلی تولید هیدروژن از نظر انرژی و انتشار کربن

روش تولید هیدروژن	منبع انرژی اصلی	دمای فرآیند/ °C	بازده تقریبی/ درصد	میزان انتشار CO_2
رفورمینگ بخار متان(SMR) Steam Methane Reforming	گاز طبیعی	حدود ۷۰۰–۱۰۰۰	حدود ۶۵–۷۵	زیاد
الکترولیز معمولی آب (LTE) Low Temperature Electrolysis	انرژی الکتریکی	حدود ۵۰–۸۰	حدود ۶۰–۷۰	بسیار کم (در صورت استفاده از برق پاک)
الکترولیز حرارتی آب(HTE / SOEC) HighTemperature Electrolysis	انرژی الکتریکی + حرارت دمای بالا	حدود ۷۰۰–۱۰۰۰	حدود ۸۰–۹۰	بسیار کم
الکترولیز حرارتی با گرمای نیروگاه هسته‌ای Nuclear-Powered HTE	برق + گرمای مازاد هسته‌ای	حدود ۷۰۰–۹۰۰	تا حدود ۹۰	نزدیک به صفر

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی امکان استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب (HTE) رای تولید هیدروژن پاک پرداخت. نتایج تحلیل‌های ترمودینامیکی و مقایسه انجام‌شده در جدول ۱ نشان داد که بهره‌گیری از حرارت دمای بالای راکتورهای هسته‌ای می‌تواند بخش قابل‌توجهی از انرژی موردنیاز فرآیند تجزیه آب را تأمین کرده و در نتیجه مصرف انرژی الکتریکی را کاهش دهد. این موضوع موجب افزایش راندمان تولید هیدروژن در مقایسه با الکترولیز متداول شده و بازده کلی سیستم را به حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد می‌رساند [۱۰]، [۱۲].

همچنین، مقایسه روش‌های مختلف تولید هیدروژن نشان می‌دهد که ترکیب فرآیند HTE با انرژی هسته‌ای علاوه بر افزایش بهره‌وری انرژی، از نظر زیست‌محیطی نیز مزیت قابل‌توجهی دارد؛ زیرا برخلاف روش رفورمینگ بخار متان، انتشار مستقیم دی‌اکسیدکربن در آن بسیار ناچیز است [۱۱]. از این رو، این فناوری می‌تواند نقش مهمی در توسعه اقتصاد کم‌کربن، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تقویت امنیت انرژی ایفا کند.

با وجود مزایای قابل‌توجه، پیاده‌سازی صنعتی این فناوری همچنان با چالش‌هایی مانند طراحی تجهیزات مقاوم در برابر دما و خوردگی بالا، مدیریت ایمنی سامانه‌های هسته‌ای و یکپارچه‌سازی بهینه میان راکتور و واحد الکترولیز همراه است. بنابراین، توسعه مواد پیشرفته، بهبود سامانه‌های کنترل و افزایش پایداری تجهیزات از مهم‌ترین زمینه‌های پژوهشی آینده به شمار می‌روند [۹]، [۱۳].

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از گرمای مازاد نیروگاه‌های هسته‌ای در فرآیند الکترولیز حرارتی آب، یکی از راهکارهای امیدبخش برای تولید پایدار و اقتصادی هیدروژن پاک در آینده خواهد بود و می‌تواند سهم مهمی در گذار جهانی به سمت انرژی‌های کم‌کربن داشته باشد.

مراجع:

[۱] م. محمودی و ا. حاتمی، «بررسی نقش هیدروژن در کربن‌زدایی و توسعه انرژی پایدار»، مجله پژوهش‌های انرژی نو، سال ۹، شماره ۲، صص ۴۵-۵۸، ۱۴۰۳ .

[2] F. Shafiee, M. Rastgar, and A. Bankdarchian, “Hydrogen as a clean energy carrier for sustainable development,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 49, No. 12, pp. 5412-5425, 2024.

[۳] س. مرادپور و ف. شفیع‌اف، «بررسی روش‌های نوین تولید هیدروژن از طریق الکترولیز آب»، فصلنامه فناوری انرژی، سال ۷، شماره ۱، صص ۲۳-۳۴، ۱۴۰۲.

[4] J. E. O’Brien, C. M. Stoots, and J. S. Herring, “High-temperature steam electrolysis for hydrogen production,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 18, pp. 10211-10224, 2022.

[5] International Energy Agency (IEA), Global Hydrogen Review 2024. Paris: IEA Publications, pp. 55-78, 2024.

[6] Nuclear Energy Institute, “Advanced nuclear reactors and hydrogen production,” Proc. Int. Conf. on Clean Nuclear Energy Systems. Washington DC, pp. 88-96, 2025.

[7] L. Wang, Y. Chen, and H. Zhao, “Thermal-assisted electrolysis using nuclear reactor waste heat,” IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 38, No. 4, pp. 2150-2161, 2023.

[8] T. Smith, R. Brown, and D. Green, “Low-carbon hydrogen production pathways using nuclear thermal systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 189, pp. 113902, 2025.

[9] International Atomic Energy Agency (IAEA), Hydrogen Production Using Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.8, Vienna, Austria, 2013.

[10] S. D. Ebbesen, J. Hogh, K. Ahlgren, J. Mogensen, “High Temperature Electrolysis in Alkaline Cells, Solid Oxide Cells, and Polymer Electrolyte Membrane Cells,” Chemical Reviews, vol. 114, no. 21, pp. 10697–10734, 2014.

[11] International Energy Agency (IEA), The Future of Hydrogen: Seizing Today’s Opportunities, Paris, France, 2019.

[12] M. Ni, M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung, “Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolysis cell (SOEC),” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. 9, pp. 2337–2354, 2008.

[13] S. Hwang, J. Lee, and H. Kim, “Recent progress in high-temperature steam electrolysis for hydrogen production,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 154, 2022.

[14] A. Brisse, J. Schefold, and M. Zahid, “High temperature water electrolysis in solid oxide cells,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. 20, pp. 5375–5382, 2008.