مقاله مروری

نانومواد در تولید هیدروژن سبز: دیدگاه‌های فنی پیرامون انتخاب نانومواد، ویژگی‌ها، روش‌های تولید و کاربردهای تجاری

مجید میرزایی[۱و*]، طیبه محبی[۲] و مسعود همدانیان[۳]

۱. استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری گروه نانوشیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۳. دانشیار گروه نانوشیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده

هیدروژن به‌دلیل فراوانی و ویژگی‌های برجسته‌اش، گزینه‌ای دلخواه برای بسیاری از کاربردهای انرژی بشمار می‌رود. ذخیره‌سازی و تولید آن به‌عنوان اولویت‌های توسعه‌ای مطرح شده‌اند. همچنین، نقش نانومواد در تولید، ذخیره‌سازی و استفاده تجاری هیدروژن بسیار مهم است. این مقاله به بررسی ویژگی‌های انرژی هیدروژن، هیدروژن سبز، نانومواد مورداستفاده برای تولید، روش‌های تولید آن‌ها و کاربردهای تجاری پرداخته است. در ابتدا، یک مرور کلی بر انرژی هیدروژن و ویژگی‌های اصلی آن ارائه و سپس، اهمیت هیدروژن سبز به دقت بررسی شده است. افزون‌بر استفاده از نانومواد در تولید هیدروژن سبز، به روش‌های تولید نانومواد نیز توجه شده است. ارزیابی‌های فنی و اقتصادی و امکانات استفاده از هیدروژن در کاربردهای انرژی نیز مطالعه شده است. استفاده از نانوذره‌های سازگار با محیط‌زیست برای تولید هیدروژن به جای نانوذره‌های شیمیایی می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند. استفاده دوباره از نانوذره‌ها با استفاده از روش‌های محبوس‌سازی نیز یک راه ممکن برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها است. در پایان، برپایه نتیجه‌های پژوهش، جهت‌گیری‌های آینده تشریح شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: انرژی، هیدروژن سبز، نانومواد، تولید، ذخیره‌سازی، فتوسنتز.

* عهده‌دار مکاتبات: mjmirzaei@nri.ac.ir

مقدمه

هیدروژن به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک جایگزین بدون آلودگی و قابل‌دوام برای سوخت‌های معمولی شناخته شده است. سوخت‌های فسیلی، مانند زغال‌سنگ، نفت و گاز، بیش از ۷۵ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای آزادشده و به‌طورتقریبی ۹۰ درصد از کل انتشار کربن دی‌اکسید را تشکیل می‌دهند. ازاین‌رو، تا حد زیادی بزرگترین عامل تغییرهای آب‌وهوایی در جهان هستند. کلید حل این فاجعه آب و هوایی جایگزینی زغال سنگ و نفت که در حال حاضر بیشتر آلاینده‌ها را تولید می‌کنند، با منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است. نگرانی اصلی در مورد منابع تجدیدپذیر، نوسان‌های قیمت افزون‌بر نیاز به پایداری است. هیدروژن به‌عنوان یک گزینه مناسب درنظرگرفته می‌شود، زیرا سوخت پاک است. توانایی موتورهای احتراق دوگانه سوخت با سطح متفاوت زیست‌گاز برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین، تأثیر آن بر احتراق و عملکرد موتور توسط چندین پژوهشگر آزمایش شد [۱ و ۲]. برای موتورها، گزینه‌های مناسب زیادی برای جایگزینی وابستگی به سوخت‌های فسیلی وجود دارد. زیست‌دیزل چربی‌های حیوانی (AFBD[1]) نیز به‌عنوان یک گزینه بالقوه بازیابی سوخت از زیست‌توده زباله درنظرگرفته می‌شود [۳]. جدای از سوخت، انرژی هیدروژن برای بسیاری از کاربردها، به‌ویژه در رشد انرژی کارآمد، اقتصادی و پایدار، به‌ویژه برق‌کافنده تقسیم‌کننده آب و سلول‌های سوختی استفاده می‌شود. در حین احتراق، هیدروژن تنها بخار آب از خود ساطع می‌کند و هیچ باقی‌مانده‌ای در اتمسفر باقی نمی‌گذارد، بنابراین، به‌عنوان انرژی پاک نامیده می‌شود. بازده تبدیل انرژی با برق‌کافنده تقسیم آب و سلول‌های سوختی بهبود می‌یابد. به‌کارگیری الکتروکاتالیست‌های پایدار و فراوان برای تسریع در کاهش سرعت واکنش هیدروژن و اکسیژن ضروری است. نانومواد غنی از کربن به‌عنوان الکتروکاتالیست‌های مناسب برای واکنش هیدروژن و اکسیژن معرفی شده‌اند. تقاضا برای یک منبع انرژی غیرآلاینده تبدیل به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در آینده می‌شود. هیدروژن به‌دلیل هزینه پایین و اثرات زیست‌محیطی کم، بهترین گزینه درنظرگرفته می‌شود. افزون‌براین، انرژی خورشیدی و منابع آبی فراوان از مزایای بزرگ برای تولید انرژی هیدروژن هستند [۴ و ۵].

هیدروژن یک جزء مهم است و به شکل‌های متفاوت در گیاهان، حیوانات، انسان، سوخت‌های فسیلی و سایر ترکیب‌ها تولید می‌شود. زغال سنگ، آب، زیست‌توده، گاز طبیعی و انواع مواد دیگر همگی ممکن است برای تولید هیدروژن با فرایندهای گرمایی، الکترولیتی یا فوتولیتیکی با ترکیب‌هایی مانند هیدروژن سولفید و بوروهیدرید استفاده شوند. با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های زیست‌محیطی در حال افزایش است و به‌احتمال هیدروژن یکی از گزینه‌های سبز آینده خواهد بود. این یک حامل انرژی شیمیایی است که به‌طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا می‌کند و ممکن است روزی از سایر حامل‌های انرژی شیمیایی پیشی گیرد [۶]. نانومواد با اندازه کوچک خود به‌دلیل واکنش‌پذیری بالاتر و ماهیت قابل‌توجیه برخی از ویژگی‌ها، سطح بزرگتری نسبت به مواد حجیم مربوط فراهم می‌کنند [۷ و ۸]. در سال‌های اخیر، نانومواد با ویژگی فیزیکی و شیمیایی و اندازه نانو خود در مقایسه با سایر مواد حجیم‌تر، دانشمندان و پژوهشگران را مجذوب خود کرده‌اند. از آنجایی‌که نانومواد ویژگی‌های الکتریکی، الکترونیکی، مکانیکی، مغناطیسی، نوری و سطحی فوق‌العاده‌ای دارند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با توجه به ذخیره انرژی، نسبت سطح به حجم بالای این مواد، پیامدهای مهمی دارد. ویژگی‌های اصلی این مواد جدید برای دستگاه‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، مساحت سطح بزرگ و قابلیت تجمیع نانومواد است. این نانوذره‌ها برپایه شکل، منبع، اندازه و ترکیب شیمیایی گروه‌بندی می‌شوند. انواع نانومواد از منابع متفاوت سنتز و براین‌پایه نام‌گذاری شده‌اند. بسته به کاربردها و

1. Animal fats biodiesel (AFBD)

نیازهای صنعتی، نانومواد در مقدارهای زیاد تولید می‌شوند. منبع طبیعی و منبع مصنوعی دو منبع اصلی هستند که از راه آن‌ها نانومواد تولید می‌شوند [۹ و ۱۰].

بررسی حاضر به نقش نانومواد در تولید و ذخیره هیدروژن می‌پردازد. هدف اصلی این کار، شناسایی نانومواد برجسته به‌کاررفته در تولید هیدروژن، مراحل درگیر و روش‌ها همراه با کاربردهای آن‌ها است. تحلیل‌های فنی–اقتصادی و جهت‌گیری‌های آتی نیز در پایان این گزارش برپایه حقایق بررسی‌شده از راه گزارش‌ها گنجانده شده است.

انرژی هیدروژن و ویژگی آن

هیدروژن ساده‌ترین و فراوان‌ترین عنصر در جهان است. هیدروژن نقش کلیدی در این حامل‌های انرژی در سامانه انرژی جهان دارد. هیدروژن نیز یک سوخت جایگزین مطلوب است. برخلاف زغال‌سنگ و بنزین، هیدروژن منبع اصلی انرژی نیست. عملکرد آن بیشتر شبیه «حامل انرژی» ثانویه برای الکتریسیته است، که ابتدا باید با استفاده از انرژی از منبع دیگری ایجاد شود و سپس به مکانی منتقل شود که انرژی شیمیایی نهان آن به‌طورکامل استفاده شود. ویژگی هیدروژن آن را به یکی از بادوام‌ترین گزینه‌ها برای بسیاری از کاربردهای انرژی تبدیل می‌کند. ویژگی اولیه هیدروژن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ویژگی‌های اولیه هیدروژن [۱۱ تا ۱۳]

عامل	مقدار در واحد SI
وزن مولکولی	۱٫۰۰۷۸۴ گرم به ازای هر مول
فشار بخار	۱۰۱٫۲۸۳ در دمای ۲۵۲٫۸ -درجه‌سلسیوس
چگالی گاز	۰٫۱۳۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب در نقطه جوش و فشار ۱ اتمسفر
وزن مخصوص گاز	۰٫۰۶۹۶ در دمای صفر درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر
حجم مخصوص گاز	۱۱٫۱۹۹ مترمکعب بر کیلوگرم در دمای ۲۱٫۱ درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر
حجم مخصوص مایع	۰٫۰۷۱۰ در نقطه جوش و فشار ۱ اتمسفر
چگالی مایع	۶۷٫۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب در نقطه جوش و فشار ۱ اتمسفر
چگالی گاز	۰٫۰۸۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب
نقطه جوش	۲۵۳ درجه سلسیوس در فشار اتمسفری
نقطه انجماد/ذوب	۲۵۹– درجه سلسیوس در فشار اتمسفری
دمای بحرانی	۲۴۰ درجه سلسیوس
فشار بحرانی	۱۲۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع به صورت مطلق
گرمای نهان تبخیر	۴۴۶ کیلوژول بر کیلوگرم در نقطه جوش
محلول‌پذیری در آب	۰/۰۰۲۴ حجم / حجم در دمای ۱۵٫۶ درجه سلسیوس
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت C_p	۱۴٫۳کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس
ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت C_v	۱۰٫۱۱ کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس
دمای خود اشتعالی	۵۸۵ درجه سلسیوس
ارزش گرمایی پایین برپایه وزن	۱۱۹٫۷۹ کیلوژول بر کیلوگرم
ارزش گرمایی بالا برپایه وزن	۱۴۲٫۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم
ارزش گرمایی پایین برپایه حجم	۱۱٫۰۰۰ کیلوژول بر مترمکعب در شرایط اتمسفری
ارزش گرمایی بالا برپایه حجم	۱۳٫۰۰۰ کیلوژول بر مترمکعب در شرایط اتمسفر
نسبت هوا به سوخت استوکیومتری	۳۴٫۲ کیلوگرم بر کیلوگرم در دمای ۲۷ درجه سلسیوس و ۱ اتمسفر
حدود اشتعال‌پذیری درصدحجمی در هوا	۴ تا ۷۵ درصد
حدود انفجاری	۱۸٫۲ تا ۵۸٫۹ درصدحجمی در هوا
بیشینه دمای شعله	۱۵۲۷ درجه سلسیوس
بیشینه نرخ احتراق در هوا	۲٫۷ تا ۳٫۵ متر بر ثانیه

ویژگی‌های هیدروژن

در مقایسه با بیشتر سوخت‌ها، مانند بنزین، که ارزش گرمایی آن ۴۰ تا ۴۵ MJ/kg در ۲۹۸ K است، هیدروژن دارای ارزش گرمایی هیدروژن ۱۲۰ تا ۱۴۰ MJ/kg است. با این حال، چگالی انرژی حجمی هیدروژن مایع (۸ MJ/L) به‌طور تقریبی ۴ برابر کمتر از سوخت‌های هیدروکربنی مانند بنزین (۳۲ MJ/L) است. اگرچه گاز هیدروژن چگالی انرژی ثقلی بالاتری نسبت به سوخت‌های هیدروکربنی دارد، ولی به‌دلیل چگالی انرژی حجمی کمتر، به مخزن بزرگتری نیاز دارد. هیدروژن به‌عنوان یک گاز قابل‌اشتعال با دمای اشتعال به‌نسبت پایین، هنگام استفاده خطراتی را ایجاد می‌کند. همچنین، به دلیل اندازه مولکولی کوچک آن‌ها، ممکن است به‌راحتی از مواد عبور کنند و موجب تردی هیدروژنی، تخریب و نشت در برخی مواد شوند [۱۳].

هر وسیله‌ای که به انرژی نیاز دارد، مانند ماشین‌های الکتریکی و وسایل الکترونیکی، ممکن است با استفاده از هیدروژن در سلول‌های سوختی، انرژی بگیرد. تا زمانی که انرژی سلول‌های سوختی با هیدروژن تامین می‌شود، برخلاف باتری‌ها، هرگز نیاز به باردارکردن دوباره یا تمام‌شدن انرژی ندارند. یک پیل سوختی مشابه باتری، کار می‌کند. آند و کاتد به‌ترتیب با هیدروژن و اکسیژن تامین می‌شوند. فقط پروتون‌های بار مثبت می‌توانند از راه غشای الکترولیت به کاتد بروند. پروتون‌ها با بار مثبت می‌توانند از راه کاتد وارد الکترولیت شوند، پروتون‌ها با الکترون‌ها در کاتد به‌هم می‌رسند، با اکسیژن ترکیب می‌شوند و آب را تشکیل می‌دهند. الکترون‌ها می‌توانند از یک مدار خارجی عبور کنند تا الکتریسیته ایجاد شود [۱۴].

هیدروژن سبز

هیدروژنی که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر یا کم‌کربن ایجاد شود به‌عنوان هیدروژن سبز (GH_2) شناخته می‌شود. در مقایسه با هیدروژن ساخته‌شده از اصلاح بخار گاز طبیعی، هیدروژن سبز کربن بسیار کمتری منتشر می‌کند. هیدروژن سبز شامل تولید انرژی از روش برق‌کافت و فرایند احتراق است که هیچ زباله خطرناکی برای محیط‌زیست تولید نمی‌کند. هیدروژن سبز تولیدشده با برق‌کافت آب کمتر از ۰/۱ درصد از کل تولید هیدروژن را تشکیل می‌دهد که می‌توان از آن برای کربن‌زدایی صنایعی مانند تولید فولاد و سیمان که به‌سختی برق‌رسانی می‌شوند، استفاده کرد و در نتیجه تغییرهای آب و هوایی را محدود کرد.

دلیل اصلی استفاده کم از هیدروژن سبز هزینه تولید بالای آن است. با وجود این، پیش‌بینی می‌شود که تقاضا برای هیدروژن افزایش یابد و هزینه‌های تولید هیدروژن کاهش یابد. هیدروژن سبز ممکن است برای ساخت آمونیاک سبز، یک جزء حیاتی در تولید کود، استفاده شود و همچنین، می‌تواند در خطوط لوله فعلی گاز طبیعی مخلوط شود. صنعت هیدروژن برای رقابت با آمونیاک تولیدشده به‌طور سنتی (آمونیاک خاکستری) به آمونیاک سبز نیاز دارد [۱۵].

روشی که امروزه برای تولید بیشتر هیدروژن به‌کار می‌رود، اصلاح بخار متان نام دارد. در این روش، متان داغ و بخار آب در حضور یک کاتالیست با هم واکنش می‌دهند و هیدروژن، کربن مونوکسید و مقدار کمی کربن دی‌اکسید تولید می‌کنند. در مرحله بعدی، کربن مونوکسید با بخار و کاتالیست واکنش داده و هیدروژن و کربن دی‌اکسید بیشتری تولید می‌شود. پس از حذف ناخالصی‌ها و کربن دی‌اکسید، هیدروژن خالص به‌دست می‌آید. هیدروژن می‌تواند از راه فرایند اصلاح بخار از سایر سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، پروپان و بنزین نیز تولید شود. در فرایند برق‌کافت آب نیز هیدروژن

تولید می‌شود و تنها فراورده جانبی آن اکسیژن است. در این روش، آب در داخل یک سلول الکترولیتی به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. یکی از دلایل افزایش علاقه به هیدروژن سبز، کاهش سریع هزینه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر است [۱۶].

هیدروژن سبز نقش مهمی در دستیابی به اهداف زیست‌محیطی ایفا می‌کند، چراکه حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای در برخی از بخش‌های اقتصادی چالش‌برانگیز است. استفاده از برق مستقیم، انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود کارایی انرژی می‌توانند به کاهش چشمگیر انتشارات در تولید برق و برخی از انواع حمل و نقل کمک کنند، مانند سفرهای دوربرد، کشتیرانی، هواپیمایی و تولید بتن و فولاد که کربن‌زدایی آن‌ها به‌دلیل نیاز به سوخت‌های پرانرژی یا گرمای بالا، چالش‌برانگیز است. هیدروژن سبز می‌تواند این نیاز در بخش حمل و نقل را برآورده سازد. هیدروژن به‌وفور یافت می‌شود و به‌راحتی قابل‌دسترس است. می‌توان آن را به مکان‌های دیگر منتقل کرد یا در همان محل تولید استفاده کرد. هیدروژن می‌تواند در مقادیر بزرگ برای مدت‌های طولانی ذخیره شود، در حالی که باتری‌ها قادر به ذخیره‌سازی حجم زیادی از انرژی برای مدت زمان طولانی نیستند [۱۷].

با استفاده از هیدروژن، انرژی کمتری برای انجام کارها لازم است، زیرا هیدروژن به‌طورتقریبی سه برابر انرژی بیشتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارد. هیدروژن سبز همچنین، این مزیت بی‌همتا را دارد که می‌تواند در هر جایی که آب و برق موجود باشد برای تولید برق و گرمای بیشتر تولید شود. کاربردهای متنوعی برای هیدروژن وجود دارد و افزون‌بر استفاده در صنایع، می‌توان هیدروژن سبز را در شبکه‌های لوله‌کشی گاز موجود ذخیره کرد و برای راه‌اندازی وسایل خانگی به‌کار برد. برق‌کافت یکی از روش‌های سازگار با محیطزیست برای تولید هیدروژن است که می‌تواند به‌عنوان نمونه‌ای عملی با قطعه‌های رایج پیاده‌سازی شود.

تولید هیدروژن به‌روش برق‌کافت امکان ذخیره‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر نامنظم را فراهم می‌آورد. در همه روش‌های تولید هیدروژن سبز، از سامانه‌های تولید برق فتوولتائیک (PV[1]) استفاده می‌شود که از نظر کارایی، هزینه و اقتصادی‌بودن برای کاربردهای تولید هیدروژن در مقیاس‌های بزرگ و کوچک ارزیابی شده‌اند [۱۸]. چون هیدروژن سبز زمانی تولید می‌شود که آب به هیدروژن و اکسیژن تجزیه شود، فناوری تولید برق هیدروژن سبز هنوز با کارایی و هزینه مطلوب در دسترس نیست. انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند زیست‌توده، باد و خورشید نیز در دسترس است و کربن آزاد نمی‌کند. چون هیدروژن سبز در فرایند تولید یا احتراق هیچ گاز مضری را آزاد نمی‌کند و به آسانی قابل‌ذخیره‌سازی است، می‌تواند در زمان‌های دیگر و برای مقاصد متفاوتی استفاده شود [۱۹ و ۲۰].

نانومواد برای انرژی هیدروژن

نانومواد به‌طور چشمگیری در رشد رشته‌های علمی جدید و فناوری‌های نانو تاثیرگذار هستند. اگر قرار است هیدروژن به سوخت اصلی اقتصاد آینده مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر تبدیل شود، باید روش‌های تولید و ذخیره هیدروژن سازگار با محیطزیست ایجاد شود. به‌طورمعمول، موادی با کمینه یک بعد خارجی ۱۰۰ نانومتر یا کمتر به‌عنوان نانومواد نامیده می‌شوند. برای درک کامل قابلیت انرژی تجدیدپذیر، لازم است در فناوری‌های تبدیل، ذخیره‌سازی و استفاده مؤثر از منابع انرژی تجدیدپذیر پیشرفت‌هایی صورت پذیرد. همچنین، بررسی کامل قابلیت‌های نانومواد در سنتز و ذخیره هیدروژن ضروری است.

1. Photovoltaics

در این بخش، مروری کوتاه بر انواع نانومواد، و روش‌های تولید آن‌ها و سپس، بحث گسترده‌ای در مورد نانومواد متفاوتی که برای تولید و ذخیره هیدروژن سبز در کاربردهای متفاوت استفاده می‌شوند، ارائه شده است. نانومواد را می‌توان به‌عنوان نانومواد بر پایه معدنی، کربن، آلی و چندسازه گروه‌بندی کرد. نانومواد معدنی می‌توانند حاوی عناصر فلزی یا غیرفلزی یا به شکل اکسید، هیدروکسید، کالکوژنید یا ترکیب‌های فسفات باشند. این مواد کاربردهای زیادی در الکترونیک، فوتونیک، حسگرهای شیمیایی و زیستی و دستگاه‌های زیست‌پزشکی دارند و برای جامعه ضروری هستند [۲۱ و ۲۲].

روش‌های تولید نانومواد

روش‌های تولید نانومواد بسته به‌کاربرد ویژه‌ای که برای آن تولید می‌شوند، متفاوت است [۲۳ و ۲۴]. در روش فاز بخار، بخار ناهمگون یا همگن هنگامی‌که مولکول‌های بخار متراکم می‌شوند، هسته‌هایی را بدون وجود ذره‌ها یا یون‌های ماده خارجی تولید می‌کنند، این فرایند به‌عنوان هسته‌زایی همگن شناخته می‌شود [۲۵ و ۲۶]. دانه‌های نانوبلوری زمانی تشکیل می‌شوند که اجزای بخار متراکم و دانه‌ها در نتیجه برخورد و ادغام، حجیم شوند. ذره‌های اولیه هنگام کاهش دما جمع می‌شوند تا توده‌ها را تشکیل دهند. سنتز شعله یک فرایند کم‌هزینه و محبوب برای تولید نانوذره‌ها برای کاربرد در صنعت است. تیتانیا، میکروسیلیکا و کربن سیاه معمولی‌ترین انواع نانوذره‌ها هستند که با سنتز شعله با نرخ تولید سالانه بیش از چندین میلیون تن، ساخته می‌شوند. پیش‌ساز پنتاکربونیل آهن در دماهای بالا قرار می‌گیرد تا تکپاره‌های آهن اکسید را با یک واکنش شیمیایی بخار تشکیل دهد [۲۷].

در روش لیزر فرسایشی، معمولی‌ترین منبع لیزر برای فرسایش، گارنت آلومینیم ایتریم است که با نئودیمیم دوپه شده است. یک پرتو لیزر بر سطح ماده موردنظر در مدت فرسایش لیزر با یک زاویه تابش مشخص (۴۵ یا ۹۰ درجه) پرتاب می‌شود. انرژی پرتو لیزر بسته به‌شدت لیزر، طول موج و مدت زمان تپ[1] از راه‌های متفاوت به ماده موردنظر می‌رسد. الکترون‌های آزاد یا محدود درون ماده هدف، انرژی را در طول فرسایش نورگرمایی[2] جذب می‌کنند. از راه برهم‌کنش‌های برخوردی با سایر الکترون‌های برانگیخته و فوتون‌های شبکه، دمای ماده افزایش می‌یابد و همچنین، الکترون‌های برانگیخته انرژی را منتقل و ماده موردنظر را ذوب می‌کنند. همان‌طور که مواد مذاب به جذب انرژی پرتو لیزر ادامه می‌دهند، یک ابر پلاسما بر سطح ایجاد می‌شود. در روش تخلیه قوس، دو الکترود که به‌عنوان کاتد یا آند عمل می‌کنند، ساختار بسیار ساده تخلیه قوس را تشکیل می‌دهند [۲۸]. سنتز نانوذره‌ها با روش تخلیه قوس را می‌توان در حالت تپی یا پیوسته انجام داد [۲۹].

روش سل–ژل یکی از بهترین روش‌ها برای ایجاد نانومواد اکسید فلزی با فعالیت چشمگیر فوتوکاتالیستی است [۳۰]. روش سل–ژل یک روش اقتصادی است و ترکیب شیمیایی فراورده به‌دلیل گستره دمای پایین به‌راحتی قابل واپایش است [۲۹]. موارد زیر برخی از قابل‌توجه‌ترین نانومواد هستند که برپایه نتیجه‌های گزارش‌شده، سنتز و در تولید هیدروژن استفاده شده‌اند.

1. Pulse
2. Photothermal*

* پدیده نورگرمایی به اثر تبدیل انرژی نورانی به انرژی گرمایی اشاره دارد و زمانی رخ می‌دهد که مواد خاصی نور را جذب و آن را به گرما تبدیل می‌کنند. این فرایند در کاربردهای متفاوتی مانند تولید برق، گرمایش و پزشکی به‌کارگرفته می‌شود.

نانوذره‌های نقره

نانوذره‌های نقره می‌توانند به‌طور کارامد از راه هر یک از روش‌های تولیدی که بررسی شده‌اند، تولید شوند. نانوذره‌های نقره (Ag NPs) به دلیل ویژگی‌های بی‌همتا، کاربردهای متنوعی در ثابت‌سازی پروتئین‌ها، صنایع الکترونیک، مواد غذایی و تولیدهای دارویی مبتنی بر زیست‌مواد دارند. پژوهش‌هایی با Ag NPs برای سنتز زیست‌هیدروژن از ماده اولیه گلوکز از روش تخمیر تاریک با استفاده از کشت‌های مختلط در شرایط واپایش‌شده، انجام شده است [۳۱]. در این مرحله، بهبود در فرایند تولید هیدروژن با نانوذره‌های نقره (Ag NPs) در اندازه ۱۰ تا ۲۰ نانومتر به‌دست آمد، به شکلی که این روند از این گستره تا رسیدن به پایداری در اندازه ۲۰۰ نانومتر به‌طور چشمگیری مورداطمینان است. در کل، بیشترین تولید ۲٫۴۸ مول H_2 به ازای هر مول گلوکز در حضور نانوذره‌های نقره با اندازه ۲۰ نانومتر ثبت شد که نشان‌دهنده بهبود تقریبی ۶۷٫۶ درصدی در بازده تولید نسبت به شریط کنترل (۱٫۴۸ $\frac{\text{mol } H_2}{\text{mol glucose}}$) است. تولید میان فراورده‌های دگرگشتی[1] فعال برای Ag NPs، مانند اتانول، مشتق‌های استات، بوتیرات، والرات و پروپیونات به‌طورچشمگیری تنظیم شده‌اند. در این مورد، افزایش تولید هیدروژن با افزایش استیک اسید و کاهش چشمگیر در مشتق‌های بوتیریک اسید، اتانول، پروپیونیک اسید و والریک اسید در حضور Ag NPs نسبت به نمونه‌های کنترل همراه بوده است. نکته جالب این است که نانوذرات نقره به شکل قابل‌توجهی موجب کاهش نرخ تولید زیست‌توده تحریک‌شده می‌شوند و همچنین فاز تأخیری در تولید هیدروژن را محدود می‌کنند [۳۲].

نانوذره‌های طلا

نانوذره‌های طلا (Au NPs) نیز برای افزایش ویژگی هم‌افزایی در واکنش‌های شیمیایی مانند تولید هیدروژن، اکسایش و فرایندهای طبیعی شناخته شده‌اند که این موضوع به‌نوبه‌خود منجر به فعال‌سازی و ثابت‌سازی آنزیم‌ها می‌شود. در مطالعاتی که بر نانوذره‌های طلا به اندازه ۵ نانومتر با پساب‌های صنعتی حاوی ساکارز انجام‌شده، کشت‌های بی‌هوازی به‌طورتقریبی ۶۲٫۳ درصد (۲٫۲۸ $\frac{\text{mol } H_2}{\text{mol hexose}}$) نسبت به نمونه کنترل (۱٫۳۸ $\frac{\text{mol } H_2}{\text{mol hexose}}$) بازده بیشتری داشته‌اند (جدول ۱). به‌طور غیرمنتظره‌ای، غلظت نانوذره‌های طلا تأثیر مستقیمی بر افزایش تولید هیدروژن داشته است. در طول فرایند تولید هیدروژن، نانوذره‌های طلا ترکیب‌های دگرگشته را دچار تغییر کرده‌اند. پیشرفت‌های چشمگیر در تولید هیدروژن با سطوح بالا و پایین تولید مشتق‌های استیک اسید در مقایسه با بوتیریک اسید و اتانول مرتبط است [۳۳].

نانوذره‌های تیتانیم دی‌اکسید

استفاده از نانوذره‌های TiO_2 (۲۵ نانومتر) در بازده تولید هیدروژن شامل پروتئین‌ها (نیتروژناز و جذب هیدروژن) از فرایند تخمیر تاریک است. در پژوهشی [۳۴]، در مقایسه با TiO_2 با غلظت ۱۰۰ mg/lit، تولید هیدروژن و فعالیت نیتروژناز به‌طورچشمگیری نسبت به گروه شاهد بهبود یافت. در مقابل، فعالیت هیدروژناز در حضور TiO_2 به‌طورچشمگیری کاهش پیدا کرد. افزون براین، زیست‌توده نیز افزایش یافت. تولید هیدروژن با نانوذره‌های TiO_2 با حدود ۴۶٫۱ درصد افزایش به ۱٫۰۱ $\frac{\text{mol}}{\text{kg TS}}$ افزایش یافت. به‌طورکلی، تولید هیدروژن شامل دو مرحله ۱٫۸۸ $\frac{\text{mol}}{\text{kg TS}}$ برای یک رویکرد یکپارچه توصیه می‌شود، استفاده از هر دو روش تخمیر تاریک و روشن برای دستیابی به بازیابی هیدروژن بالا از لجن زباله منطقی است. استفاده از نانوذره‌های تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2 NPs) به اندازه ۲۵ نانومتر بر بازده تولید هیدروژن که درگیر پروتئین‌هایی مانند نیتروژناز[2] و جذب هیدروژن در فرایند تخمیر

1. Metabolic

۲. آنزیم موجود در برخی ترکیزه‌های خاکی و خزه‌ها که در گرفتن نیتروژن هوا و ساختن آمونیاک نقش دارد.

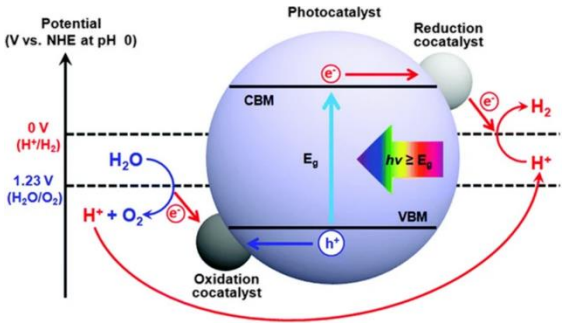
تاریک است، تأثیر دارد. در مقایسه با تیتانیم دی‌اکسید به غلظت ۱۰۰ mg/lit، تولید هیدروژن و فعالیت نیتروژناز به‌طور چشمگیری نسبت به نمونه‌های کنترل بهتر بود. در مقابل، فعالیت جذب هیدروژناز هنگام استفاده از TiO_2 به‌شکل محسوسی کاهش و مقدار زیست‌توده افزایش یافت. افزایش تولید هیدروژن با نانوذره‌های TiO_2 به مقدار تقریبی ۴۶/۱ درصد مشاهده شد و به $\frac{mol}{kg\ TS}$ ۱/۰۱ رسید.

نانوذره‌های آهن

چندین کشت باکتریایی در فرایندهای تولید زیست‌هیدروژن تخمیری تیره با زباله‌های زیستی و کربوهیدرات‌ها، قندها و مواد غذایی با استفاده از نانوذره‌های آهن ارزیابی می‌شوند. اثرها بر تولید تخمیری با استفاده از نانوذره‌های آهن با تخمیر بی‌هوازی گلوکز نشان داده شد که گستره ثابتی ۰–۵۰ میلی‌گرم در لیتر را در مقایسه با ذره‌های یون Fe^{2+} ایجاد کرد. برخلاف شاهد ($\frac{L}{kg\ VS}$ ۲۴۷)، هر دو ذره‌های Fe^{2+} و نانوذره‌های آهن افزایش بازده هیدروژن را در حدود ۱۵ و ۳۷ درصد در غلظت‌های mg/lit ۱۰ و ۲۵ نشان دادند. در این مرحله، بازده هیدروژن بالا با تغییر یک دگرگشته میانی بسیار مهم به مشتق‌های استات بالاتر در بخش بوتیرات و کاهش تثبیت اتانول و پروپیونات، همراه بود. جالب توجه است که نانوذره‌های آهن ۷۵ درصد کاهش تشکیل پروپیونات و ۳۵ درصد کاهش تشکیل پروپیونات در نزدیکی ذره‌های یون Fe^{2+} نشان دادند [۳۵]. یک روش مکانیکی نشان می‌دهد که نانوذره‌های آهن می‌توانند به‌طورموثر انتقال الکترون را در قالب یون‌های Fe^{2+} بین فردوکسین‌ها و هیدروژنازها تسهیل کنند و درنتیجه فعالیت آنزیم‌های کلیدی را ارتقاء دهند. افزون‌براین، نانوذره‌های آهن به آسانی به Fe^{2+} اکسید و موجب تولید هیدروژنازها و پروتئین‌های آهن–گوگرد از فردوکسین می‌شوند. نانوذره‌های آهن می‌توانند به‌طور موثری روش‌های تولید هیدروژن و تخمیر مواد زیست‌توده را تسریع کنند.

نانوذره‌های فوتوکاتالیست برای تولید هیدروژن

در سامانه فوتوکاتالیستی، الکترون‌ها و حفره‌هایی که تحت تأثیر نور در نوارهای رسانش و ظرفیت ایجاد می‌شوند، به سطح فوتوکاتالیست‌های ذره‌های ریز منتقل می‌شوند و در واکنش‌های اکسایش و کاهش مشارکت می‌کنند که در نتیجه آن‌ها به‌ترتیب هیدروژن و اکسیژن تولید می‌شود [۳۶ و ۳۷]. با بررسی دقیق سازوکارها و فرایندهای پایه، مشخص می‌شود که شکافتن آب به‌روش فوتوکاتالیستی یکی از روش‌های بسیار مؤثر است که نیازمند فوتوکاتالیست‌هایی با کاف نوار مناسب است [۳۸]. یک ساختار که نور خورشید فراوانی را جذب و نیم‌واکنش‌های تولید هیدروژن و اکسیژن را فعال می‌کند، باید قابلیت انتقال بار خوبی داشته باشد که الکترون‌ها و حفره‌ها را به‌فصل مشترک نیم‌رسانا/الکترولیت منتقل کند و موجب تأخیر در ترکیب مجدد بار و افزایش واکنش‌پذیری کاتالیستی سطح نیم‌واکنش شود. در چند دهه اخیر، تلاش‌های فراوانی برای دستیابی به این شرایط مهم در فوتوکاتالیست‌های طراحی‌شده برای تولید هیدروژن با کارایی بالا از راه آب صورت گرفته است [۳۹]. در شکل ۱، فرایند شکافتن آب با نانوفوتوکاتالیست‌ها برای تولید هیدروژن نشان داده شده است.



شکل ۱ طرح‌واره فرایند فوتوکاتالیستی شکافت آب [۴۰]
(دارای مجوز از ناشر مربوط)

فعالیت فتوکاتالیستی به‌شدت به انتقال و جداسازی بارهای الکتریکی القاءشده به‌وسیله نور، بستگی دارد. برای این کار، از نیم‌رساناهای فتوکاتالیست استفاده می‌شود تا جداسازی بارها را آسان‌تر کند. میدان الکترواستاتیکی درونی روی–ایندیم سولفید ($ZnIn_2S_4$) را می‌توان به دقت تنظیم کرد تا فضای بیشتری ایجاد شود و در نتیجه، کجی بیشتری در ساختارهای روی–ایندیم سولفید، روی سولفات ($ZnSO_4$) و چهاروجهی‌ها به‌وجود آید. این تغییرها با افزایش ممان‌های دوقطبی و میدان الکترواستاتیکی ایجاد می‌شود و برای جداسازی الکترون‌ها و حفره‌ها در فرایند تولید هیدروژن با فتوکاتالیست بسیار مفید است [۴۱]. همچنین، ساختارهای نانودوقلویی در سنتز محلول‌های جامد برای فعالیت‌های فتوکاتالیستی به‌کاررفته‌اند. هیدروژن از آب بدون نیاز به فلزهای گرانبها و با بازدهی بسیار بالا در برابر نور مرئی تولید می‌شود. جداسازی الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده با نور و همچنین، فعالیت فتوکاتالیز می‌تواند به‌طور چشمگیری با قابلیت ایجادشده با بلورهای نانودوقلویی موازی بهبود یابد. تعداد الکترون‌های آزاد در مرکز دوقلویی بسیار زیاد است و جداسازی موثر دوقلویی از راه محل ایجاد واکنش هیدروژن (الکترون) و واکنش اکسایش ممکن می‌شود [۴۲].

نانومواد حالت جامد برای کاربرد ذخیره‌سازی هیدروژن

انرژی خورشیدی به‌طور پیوسته با یک فرایند شناخته‌شده به نام فتوشیمی به هیدروژن تبدیل می‌شود، ولی برای رسیدن به یک اقتصاد مبتنی بر هیدروژن، هنوز با چالش‌های بزرگی در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن مواجه هستیم.

به‌طور کلی، هیدروژن می‌تواند در شکل‌های جامدی مانند ترکیب‌های کربنی، هیدریدهای فلزی و اسکلت‌های آلی فلزی، یا به‌صورت گاز فشرده، مایع کریوژنیک، یا در مواد جامد مناسب ذخیره شود. برخلاف دو روش اول که هیدروژن را به شکل گازی و مایع ذخیره می‌کنند، ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت جامد می‌تواند با جذب شیمیایی یا فیزیکی هیدروژن در مواد، در دما و فشارهایی نزدیک به شرایط محیطی صورت گیرد. نیاز به مخزن بزرگ برای ذخیره هیدروژن به‌صورت مایع یا گاز، نگرانی‌های ایمنی جدی را برای استفاده در وسایل نقلیه ایجاد می‌کند. بنابراین، ذخیره‌سازی به صورت جامد می‌تواند یک راه‌حل فنی با مزایا و امنیت بالا باشد. دینامیک و ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن در حالت جامد به‌شدت تحت تأثیر برهم‌کنش‌های سطحی مواد متفاوت است. برای اینکه سامانه مبتنی بر MgH_2 به یک گزینه قوی برای ذخیره‌سازی هیدروژن تبدیل شود، باید ترمودینامیک آن بهبود یابد. مواد ذخیره‌سازی هیدروژن، ظرفیت بالایی برای ذخیره‌سازی هیدروژن دارند [۴۳].

با توجه به مساحت زیاد سطح، ویژگی‌های انعطاف‌پذیر و توانایی جذب و رهاسازی هیدروژن به شکل قابل‌برگشت، پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد نانوذره‌های جامد به‌عنوان مواد بسیار امیدوارکننده‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن انجام شده است. در این مطالعه مروری که توسط نویسندگان

انجام شده است، سه گروه اصلی نانومواد جامد هیدریدهای فلزی، هیدریدهای فلزی مرکب و مواد مبتنی بر کربن و ویژگی‌های آن‌ها بررسی شده‌اند. هیدریدهای فلزی می‌توانند تا ۲۰ درصد وزنی بیشتر هیدروژن را در مقایسه با دو ماده دیگر ذخیره کنند. با این حال، به‌دلیل مشکل‌هایی مانند کندی سرعت جذب و رهاسازی هیدروژن و پایداری چرخه‌ای نامطلوب، ظرفیت واقعی ذخیره‌سازی هیدروژن آن‌ها ممکن است کمتر باشد. هنگامی‌که هیدروژن به شکل شیمیایی با فلز پیوند داشته باشد، ماده‌ای جامد به نام هیدرید فلزی تشکیل می‌شود که می‌تواند هیدروژن را با جذب بر سطح خود یا درون ساختار شبکه‌ای خود ذخیره کند [۴۴]. ظرفیت‌های ذخیره‌سازی هیدروژن نظری برای هیدریدهای فلزی مرکب مانند $LiBH_4$ و $NaAlH_4$ می‌تواند به‌ترتیب تا ۱۸ و ۷ درصد وزنی باشد [۴۵]. این مواد با ترکیب هیبریدهای فلزی با دیگر مواد برای ایجاد ساختارهای بیشتر پیچیده تولید می‌شوند. هیدریدهای فلزی پیچیده قابلیت ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت قابل برگشت را فراهم می‌کنند، ولی ممکن است به‌دلیل دماهای بالای عملیاتی و واکنش‌های کند، استفاده از آن‌ها محدود باشد. مواد مبتنی بر کربن مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی با ظرفیت‌هایی بین ۶٫۳ تا ۸ درصد وزنی، توانایی کمتری در ذخیره‌سازی هیدروژن نسبت به هیدریدهای فلزی و پیچیده دارند. این مواد به‌دلیل سطح وسیع‌تر و هزینه‌های به‌احتمال کمتر، برای کاربردهای ذخیره‌سازی هیدروژن مطلوب هستند. با این حال، معایبی مانند فرایندهای سنتز پیچیده و تمایل به‌زوال در طول زمان دارند [۴۶].

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در استفاده از نانومواد حالت جامد برای ذخیره‌سازی هیدروژن، رسیدن به مقدارهای مناسب ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت قابل‌برگشت است. حتی اگر ظرفیت‌های ذخیره‌سازی هیدروژن واقعی کمتر از مقادیر نظری باشند، ممکن است به‌دلیل مشکلاتی مانند کندی نرخ جذب و آزادسازی هیدروژن، چرخه‌های ناپایدار و دماهای بالای عملیاتی با محدودیت‌هایی روبه‌رو شوند. با ایجاد مواد جدید با ویژگی‌های بهبود یافته و ارتقاء سنتز و فرایندهای پردازش مواد موجود، می‌توان این محدودیت‌ها را کاهش داد [۴۷].

امکان‌سنجی استفاده تجاری هیدروژن

هیدروژن سبز در بسیاری از صنایع کاربرد دارد و یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن در بخش حمل و نقل است، جایی که به‌عنوان سوختی عمل می‌کند که فقط آب را به‌عنوان فراورده جانبی منتشر می‌کند. همچنین، صنایع پتروشیمی و شیمی سبز نیز از این نوع هیدروژن بهره می‌برند. در زمینه استفاده از آن برای گرمایش منازل و تأمین برق نیز پیشرفت‌هایی صورت گرفته است. هیدروژن به‌خودی خود منبع اصلی انرژی مانند نور خورشید، باد یا آب نیست، بلکه نقش یک حامل انرژی را دارد. این به این معناست که برای تولید هیدروژن نیاز به انرژی است و این انرژی زمانی که هیدروژن استفاده می‌شود، آزاد می‌شود. به همین دلیل است که گفته می‌شود هیدروژن می‌تواند به‌عنوان یک روش برای ذخیره‌سازی انرژی به‌کار رود؛ برپایه گزارش‌های بسیار، مصرف هیدروژن در صنایع بیشتر به‌صورت توزیع‌شده است و به‌طورعمده در تولید آمونیاک، متانول و فرایند اصلاح بخار به‌کار می‌رود [۴۸].

صنایع شیمیایی برای تولید کودهای سبز

یکی از عنصرهای خام اصلی که بیشتر در صنایع شیمیایی استفاده می‌شود، هیدروژن است. این یک جزء کلیدی در تولید متانول است که برای ایجاد بسپارهای متعدد و همچنین، آمونیاک که منجر به تولید کود می‌شود، به‌کارمی‌رود. کودهای سبز کودهای معدنی مبتنی بر نیترات هستند که ساختار فیزیکی و شیمیایی مشابه کودهای ساخته‌شده با سوخت‌های فسیلی دارند، ولی ردپای کربن به‌مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد، زیرا با انرژی‌های تجدیدپذیر (نیروی آبی، بادی، خورشیدی) ساخته می‌شوند. هیدروژن موردنیاز برای تولید آمونیاک، که برای تولید کودهای سبز استفاده می‌شود، از آب

با برق‌کافت با به‌کارگیری انرژی تجدیدپذیر به‌دست می‌آید. همه مراحل باقی‌مانده پس از حذف هیدروژن برای تولید آمونیاک سبز به همان شیوه انجام می‌شود. بنابراین، استفاده از کودهای سبز برای کربن‌زدایی تولید مواد غذایی یک روش ساده، موثر و بدون فسیل است. همه کودهای معدنی از آمونیاک به‌عنوان واکنشگر اصلی خود تولید می‌شوند [۴۹]. این شامل به‌کارگیری یک فرایند کاتالیستی است که از بزرگترین فناوری موجود برای کاهش گازهای گلخانه‌ای در طول پردازش استفاده می‌کند. ضرورت تغییر به هیدروژن سبز با توانایی این فناوری برای به کمینه رساندن انتشار نیتروژن اکسید (N_2O)، یک گاز گلخانه‌ای قوی، در طول فرایند تولید کود، برجسته شده است که آسیب‌پذیری در برابر نوسان‌های قیمت گاز طبیعی و کود در مقیاس جهانی را کاهش می‌دهد. نانوذره‌ها قابلیت چشمگیری را برای استفاده در بخش شیمیایی برای تولید کودهای سبز نشان داده‌اند. ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذره‌ها، مانند نسبت سطح به حجم بالا، واکنش‌پذیری و فعالیت کاتالیستی، آن‌ها را به کاندیدای عالی برای افزایش کارایی کود، کاهش اثرات زیست‌محیطی و تشویق کشاورزی پایدار تبدیل می‌کند. در این بخش، روش‌های متفاوت استفاده از نانوذره‌ها در بخش شیمیایی برای تولید کودهای سبز را بررسی شده است. نانوذره‌ها را می‌توان به‌عنوان کاتالیست یا واکنش‌دهنده در تولید کودهای سبز استفاده کرد که موجب افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست محیطی می‌شود. از نانوذره‌ها می‌توان برای پاکسازی زباله‌های صنعتی و تبدیل آن به کودهای سبز استفاده کرد و در نتیجه روش‌های مدیریت پسماند سازگار با محیط‌زیست را تقویت کرد. کیفیت و محتوای تغذیه‌ای کودهای سبز را می‌توان با به‌کارگیری نانوذره‌ها به‌عنوان حسگر واپایش و تضمین کرد که آن‌ها به الزامات قانونی پایبند و در حمایت از شیوه‌های کشاورزی پایدار، مفید هستند. پیشبرد شیوه‌های کشاورزی پایدار و کاهش اثرهای زیست‌محیطی تولید کود با استفاده از نانوذره‌ها در بخش شیمیایی برای ایجاد کودهای سبز بسیار امکان‌پذیر است. کودهای سبز می‌توانند با نانوذره‌ها به روش‌های متفاوتی مانند کپسوله‌سازی، پوشش‌دهی و نانوحسگرها بهره‌مند شوند. شیوه‌های کشاورزی پایدار و کاهش اثرهای زیست‌محیطی تولید کود از طریق توسعه و اجرای مستمر نانوذره‌ها در بخش شیمیایی امکان‌پذیر است [۵۰ و ۵۱].

آمونیاک سبز در صنعت کود

یکی از معیارهای کلیدی برای کاهش انتشار، به‌ویژه در صنایعی که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دشوار است، آمونیاک سبز است. حذف نیاز به سوخت‌های فسیلی، با به‌دست‌آوردن نیتروژن از جو و تولید هیدروژن از برق‌کافت آب، آمونیاک را دوست‌دار محیط‌زیست می‌کند. فشار و دمای موردنیاز برای واکنش هیدروژن–نیتروژن در طول حلقه سنتز آمونیاک با منابع تجدیدپذیر انرژی مانند انرژی باد یا خورشید تولید می‌شود.

تولید غذا و تغذیه جمعیتی که به‌سرعت در حال گسترش است، هر دو به‌شدت به نیتروژن، یک ماده مغذی اصلی برای گیاهان، بستگی دارد. مشابه شکل ۲، آمونیاک سبز ممکن است به‌عنوان سوخت زیست‌توده به‌وسیله کارخانه‌های تولید کود برای تولید کودهای نیتروژن استفاده شود [۵۳].

شکل ۲ صنعت کود مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر [۵۳]
(دارای مجوز از ناشر مربوط)

آمونیاک در درجه اول در تولید کودهای پیچیده مانند دی‌آمونیم فسفات و کودهای مبتنی بر نیتروژن (اوره) استفاده می‌شود. پیش‌بینی می‌شود در ده سال آینده، به‌دلیل افزایش جمعیت و افزایش مصرف مواد غذایی، نیاز به کود نیتروژن با نرخ ترکیبی سالانه ۳ درصد افزایش یابد. آمونیاک همچنین، می‌تواند به‌طورمستقیم یا حتی به صورت محلول در آب به خاک تزریق شود. اگرچه آمونیاک بی‌آب به‌طور گسترده در دسترس است و استفاده از آن در خاک ساده است، تحویل آن باید به دقت برنامه‌ریزی شود [۵۲].

آمونیاک سبز، یک جایگزین مناسب برای آمونیاک معمولی، در تجارت کود به‌عنوان یک راه حل بی‌خطر برای محیط‌زیست است. نانوذره‌ها به‌دلیل اندازه کوچک و ویژگی‌های بی‌همتایشان، نویدهای بی‌همتایی در بهبود کارایی کودهای مبتنی بر آمونیاک سبز نشان داده‌اند [۵۴].

برای ایجاد یک کود آهسته رهش، نانوذره‌ها را می‌توان در یک پوسته بسپار محصور کرد و با آمونیاک سبز ترکیب کرد. این فناوری تحویل طولانی‌مدت کود را تضمین می‌کند و احتمال شستشو را کاهش می‌دهد و در نتیجه جذب مواد مغذی با فراورده کشاورزی را افزایش می‌دهد و اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. برای بهبود دوام ذره‌های سبز آمونیاک و محدودکردن اتلاف آمونیاک در اثر تبخیر، نانوذره‌ها را می‌توان بر روی سطوح آن‌ها پوشش داد. این فناوری ضمن کاهش اثرهای زیست‌محیطی، کارایی را بهبود می بخشد. نانوذره‌ها می‌توانند به‌عنوان حسگر برای تشخیص سطوح مواد مغذی در خاک و ارائه بازخورد به کشاورزان استفاده شوند. این اطلاعات را می‌توان برای تغییر نرخ کاربرد کود که منجر به بازده فراورده بالاتر و اثر زیست‌محیطی کمتر می‌شود، به‌کارگرفت [۵۵].

هیدروژن در صنایع پتروشیمی

در صنایع شیمیایی و پتروشیمی معاصر، هیدروژن یکی از مهم‌ترین فراورده‌ها و واسطه‌ها است. امروزه بیشتر با به‌کارگیری روش‌های تبدیل هیدروکربن که با واکنشگرهای مبتنی بر فسیل، ساخته می‌شود.

با توجه به شدت انرژی بالای بخش‌های پتروشیمی، اگر هیدروژن با روش‌های کم‌هزینه و بدون انتشار (مانند جذب و جداسازی کربن) تولید شود، ممکن است کلید کربن‌زدایی این بخش باشد. مواد شیمیایی و ترکیب‌های موسوم به پتروشیمی‌ها به‌طورمعمول از نفت خام به‌دست می‌آیند. این فرایندها شامل اکسایش، هیدروژن‌دارشدن، شکست حرارتی، فرایندهای کاتالیستی و روش‌های مشابه دیگر هستند. آن‌ها در ایجاد لاستیک مصنوعی، فراورده‌های لاستیکی مصنوعی، الیاف مصنوعی، پلاستیک، حشره‌کش‌ها، داروها و مواد شوینده و رنگ‌ها به‌کار برده می‌شوند [۵۶].

در فرایند هیدروکراکینگ که فراورده‌های نفتی مانند بنزین و گازوئیل را تولید می‌کند، بیشتر از هیدروژن استفاده می‌شود. برای تولید متانول که از آن برای از بین بردن آلاینده‌هایی مانند گوگرد نیز استفاده می‌شود. این ماده به‌عنوان یک محصول جانبی طی فرایند ذوب تولید می‌شود. کک نفتی باید در دماهای بسیار بالا و با اکسیژن و بخار، در دستگاه‌های تخصصی گازی‌ساز پخته شود تا از این ماده اولیه، هیدروژن تولید شود. [۵۶]. در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی با استفاده از هیدروژن، مانند سنتز آمونیاک، متانول و سایر ترکیب‌ها، کاتالیست‌ها ضروری هستند. نانوذره‌های روتنیم، نیکل و آهن فعالیت کاتالیستی خوبی در تبدیل بخار گاز طبیعی برای ایجاد هیدروژن نشان داده‌اند [۵۷].

ذخیره‌سازی هیدروژن به‌دلیل چگالی کم و قابلیت اشتعال قوی این گاز، دشوار است. نانوذره‌ها به‌عنوان مواد ذخیره‌سازی هیدروژن نوید چشمگیری را نشان داده‌اند. هیدریدهای فلزی که از برهم‌کنش نانوذره‌های فلزی با هیدروژن تولید می‌شوند، به‌عنوان مواد ذخیره‌سازی هیدروژن بالقوه، مطالعه شده‌اند. هیدریدهای فلزی ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی دارند و می‌توانند هیدروژن را در دماها و فشارهای پایین آزاد کنند. غشاهای انتخابی هیدروژن در بخش پتروشیمی برای جداسازی و تصفیه گاز حیاتی هستند. برای افزایش گزینش‌پذیری و نفوذپذیری، می‌توان نانوذره‌های فلزی مانند پالادیم و پلاتین را به غشاهای بسپار افزود. این نانوذره‌ها می‌توانند انتقال هیدروژن را با غشاء بهبود بخشند و گزینش‌پذیری هیدروژن را نسبت به گازهای دیگر فراهم کنند [۵۸].

چرخه عمر و تحلیل فنی–اقتصادی

تحلیل‌های فنی–اقتصادی و چرخه عمر راه‌هایی را برای افزایش سودآوری و در عین حال کاهش تأثیرهای زیست‌محیطی نشان می‌دهند. تحلیل فنی–اقتصادی (TEA) یک ابزار قدرتمند برای سنجش تأثیر پژوهش و توسعه بر اقتصادی‌بودن فرایندهای ادغامی است. یک روش به نام تحلیل چرخه عمر برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی یک فراورده یا فرایند در طول چرخه عمر به‌کار می‌رود [۵۹]. روش زیست‌گاز به‌عنوان یک جایگزین عملی برای روش سنتی بازسازی بخار است که می‌توان از آن برای تولید هیدروژن استفاده کرد. مشابه گاز طبیعی، زیست‌گاز مزیت اضافی داشتن یک منبع تجدیدپذیر را دارد که با حذف انتشار متان، که به‌صورت اقتصادی و به مقادیر چشمگیری تولید می‌شود، آلودگی را کاهش می‌دهد. این امر منجر به ایجاد تأسیسات بازیابی گاز محل دفن و هضم‌کننده‌های بی‌هوازی برای درمان زیست‌پسماندها، مانند زباله‌های جامد شهری، کودها و فراورده‌های انرژی می‌شود. افزون بر کاهش زباله‌های محل دفن، تولید زیست‌گاز کودی غنی از مواد مغذی را به‌عنوان یک فراورده جانبی تولید می‌کند [۶۰].
هیدروژن یک عنصر کلیدی در ایجاد سامانه‌های انرژی پایدار و پاک است، ولی هنوز تولید آن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. با وجود پروژه‌های نمایشی بسیاری که استفاده از هیدروژن را تشویق می‌کنند و پژوهش‌های جهانی برای ارائه نقشه‌های راه برای پذیرش فناوری، فناوری‌های جدید برای تولید، ذخیره‌سازی، توزیع و استفاده از هیدروژن در حال توسعه هستند [۶۰].

این فناوری‌ها به‌عنوان ابزارهایی برای رسیدن به سامانه‌های انرژی کم‌کربن با پروژه‌هایی که سعی در تسریع پذیرش تجاری این فناوری‌ها دارند، تایید شده‌اند. پسماندهای خانگی به‌عنوان یک ماده معیار برای تولید زیست‌گاز به‌کاررفته‌اند. بازیافت پسماندهای به جامعه منفعت می‌رساند [۶۱]. نانوذره‌های سازگار با محیط‌زیست برای تولید هیدروژن به جای نانوذره‌های شیمیایی می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند. استفاده دوباره از نانوذره‌ها با روش‌های محبوس‌سازی نیز یک راه ممکن برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها است. بازیافت نانوذره‌ها در پژوهش‌های بسیاری با موفقیت نشان داده شده است. هرچند پیشنهادشده که استفاده از نانوذره‌های سبز ممکن است به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند، ولی از داده‌های

جمع‌آوری‌شده از گزارش‌های متفاوت مشخص است که فرایند جذب حتی با نانوذره‌های سبز تولیدشده همچنان، گران است. توسعه نانوذره‌های ارزان‌قیمت و محیط‌زیستی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با این حال، برای اینکه استفاده از آن‌ها در هزینه‌های عملیاتی معمولی جای گیرد، باید تلاش‌های بیشتری صورت گرفته شود.

چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

با وجود توانایی‌های موجود برای تسریع در تغییرهای انرژی، اقتصاد مبتنی بر هیدروژن سبز همچنان، با چالش‌هایی در زمینه‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی دست و پنجه نرم می‌کند. اگرچه ممکن است بتوان گفت که انرژی‌های تجدیدپذیر گزینه‌ای بهتر از انرژی‌های موجود مبتنی بر سوخت‌های فسیلی هستند، ولی این انرژی‌ها به تنهایی نمی‌توانند پاسخگوی همه مشکل‌های انرژی باشند. استفاده از فناوری‌های تجدیدپذیر، هرچند تاکید شده است، ولی برای رسیدن به اهداف کافی نیست. افزون‌براین، تنها حدود ۱۶/۵ درصد از کل مصرف انرژی با برق تامین می‌شود. برای کاهش بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای از ۸۳/۵ درصد باقی‌مانده بخش انرژی، نیاز به اقدامات بیشتری است [۶۲]. هیدروژن برای دهه‌ها در پالایشگاه‌ها و صنایع شیمیایی به‌کاررفته و به استفاده از آن به‌عنوان یک منبع انرژی در سال‌های اخیر به‌شدت توجه شده است. با افزایش این علاقه و کاربردهای نهایی، انتظار می‌رود تقاضا برای هیدروژن نیز با رشد سالانه مرکب افزایش یابد.

برای اطمینان از اینکه این تقاضا برای هیدروژن به‌طورپایدار و با کمترین تاثیر زیست‌محیطی برآورده شود، تولید هیدروژن باید با کمینه یا بدون انتشار کربن صورت گیرد. تجاری‌سازی و استقرار در مقیاس بزرگ هیدروژن سبز با چالش‌های اساسی روبه‌رو است. از آنجاکه می‌توان از آن به‌عنوان سوخت برای حمل و نقل و تولید برق استفاده کرد. اقتصاد در حال ظهور هیدروژن می‌تواند تغییرهای چشمگیری در بخش انرژی ایجاد کند. هیدروژن سبز و سایر سوخت‌های سنتزی بدون کربن ممکن است در نهایت جایگزین بنزین به‌عنوان سوخت حمل و نقل و گاز طبیعی به‌عنوان منبع انرژی شوند [۶۳].

نتیجه‌گیری

هیدروژن به‌عنوان یک ماده انرژی مفید و کارآمد شناخته می‌شود که می‌تواند جایگزینی برای منابع انرژی سنتی باشد. این پژوهش مروری به بررسی همه مزایا و معایب منابع هیدروژنی پرداخته است. منابع انرژی سنتی دارای معایبی هستند که شامل نرخ تخلیه سریع‌تر، نوسان‌های قیمتی و محدودیت در دسترسی می‌شوند. برای چیرگی بر این چالش‌های اساسی، هیدروژن ممکن است گزینه‌ای بهتر باشد. با این حال، تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن به پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری نیاز دارد. از نظر فنی، پژوهش‌ها در زمینه هیدروژن هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد، زیرا گزینه‌های ذخیره‌سازی محدود و هزینه‌ها بالا هستند. نانومواد به‌عنوان یک گزینه عملی برای بازه گسترده‌ای از کاربردها ظهور کرده‌اند. نقش نانومواد در تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن سبز در این مقاله به‌طور مفصل توضیح داده شده است. برپایه نتیجه‌های این پژوهش، نانومواد فلزی در تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن عملکرد خوبی داشته‌اند. از نظر فنی، ذخیره‌سازی هیدروژن ضعیف است و برپایه روندهای بازار کنونی، استفاده از هیدروژن هنوز از مواد انرژی موجود گران‌تر است. هیدروژن سبز تولیدشده با نانومواد ممکن است به اندازه نیاز مؤثر واقع شود. با این حال، برپایه نتیجه‌های این پژوهش، می‌توان گفت که پژوهش‌های عمده‌ای در زمینه تولید هیدروژن از طریق تخمیر تاریک انجام شده است. هنوز روش‌های دیگری برای کاوش

وجود دارند. افزون‌براین، به جز تعدادی از نانوذره‌ها مانند نقره، طلا، آهن و غیره، کاوش در زمینه سایر نانوذره‌ها برای تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن همچنان ادامه دارد.

مراجع

[1] Fan Z, Zhang X, Li Y, Guo X, Jin Z. Construct 3D NiCo-LDH/Cu_2O pn heterojunction via electrostatic self-assembly for enhanced photocatalytic hydrogen evolution. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022;110:491-502. **doi: 10.1016/j.jiec.2022.03.027**

[2] Mirzaee M, Mohebbi T, Rezakhani D. A Comprehensive review of the corrosion and erosion resistant coating on the fireside in power plant boilers. Farayandno. 2023;18(82):73-93. **doi: 10.22034/farayandno.2023.2001252.1920**

[3] Yaman H, Yesilyurt MK, Uslu S. Simultaneous optimization of multiple engine parameters of a 1-heptanol/gasoline fuel blends operated a port-fuel injection spark-ignition engine using response surface methodology approach. Energy. 2022;238:122019. **doi: 10.1016/j.energy.2021.122019**

[4] Dincer I. Green methods for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 2012;37(2):1954-71. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.173**

[5] Mirzaee M, Mohebbi T. A review of anti-corrosion and erosion protective coatings in offshore wind power devices. Journal of Studies in Color World. 2024;14(2):133-59. **doi: 10.30509/jscw.2024.82001**

[6] Rosen MA, Koohi-Fayegh S. The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. Energy, Ecology and Environment. 2016;1:10-29. **doi: 10.1007/s40974-016-0005-z**

[7] Pourhashem S, Seif A, Zhou Z, Ji X, Sgroi MF, Duan J, et al. Theoretical and experimental investigations about the role of MXene nanosheets covered with ZnO quantum dots on barrier resistance of epoxy coatings. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024;12(1):111869. **doi: 10.1016/j.jece.2023.111869**

[8] Mirzaee M, Dehghanian C. Flower-like mesoporous nano $NiCo_2O_4$-decorated ERGO/Ni-NiO foam as electrode materials for supercapacitor. Materials Research Bulletin. 2019;109:10-20. **doi: 10.1016/j.materresbull.2018.09.020**

[9] Dincer I, Zamfirescu C. Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. International Journal of Hydrogen Energy. 2012;37(21):16266-86. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.133**

10. Mirzaee M, Dehghanian C. Pulsed electrodeposition of reduced graphene oxide on NiNiO foam electrode for high-performance supercapacitor. International Journal of Hydrogen Energy. 2018;43(27):12233-50. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.173**

[11] Zhang Y, Ying Z, Zhou J, Liu J, Wang Z, Cen K. Electrolysis of the Bunsen reaction and properties of the membrane in the sulfur–iodine thermochemical cycle. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014;53(35):13581-8. **doi: 10.1021/ie502275s**

[12] Roessler PG, Lien S. Activation and de novo synthesis of hydrogenase in Chlamydomonas. Plant Physiology. 1984;76(4):1086-9. **doi: 10.1104/pp.76.4.1086**

[13] McCarty RD, Hord J, Roder HM. Selected properties of hydrogen (engineering design data), NBS monograph 168. US: National Bureau of Standards; 1981.

[14] Dawood F, Anda M, Shafiullah G. Hydrogen production for energy: An overview. International Journal of Hydrogen Energy. 2020;45(7):3847-69. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059**

[15] Staffell I, Scamman D, Abad AV, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. Energy & Environmental Science. 2019;12(2):463-91. **doi: 10.1039/C8EE01157E**

[16] Nikolaidis P, Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes. Renewable and sustainable energy reviews. 2017;67:597-611. **doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044**

[17] Majumdar A, Deutch JM, Prasher RS, Griffin TP. A framework for a hydrogen economy. Joule. 2021;5(8):1905-8. **doi: 10.1016/j.joule.2021.07.007**

[18] Zhou Y, Li R, Lv Z, Liu J, Zhou H, Xu C. Green Hydrogen: A promising way to the carbon-free society. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2022;43:2-13. **doi: 10.1016/j.cjche.2022.02.001**

[19] Ko DH, Kang SC, Lee CW, Im JS. Effects of support porosity of Co-Mo/MgO catalyst on methane catalytic decomposition for carbon and hydrogen production. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022;112:162-70. **doi: 10.1016/j.jiec.2022.05.008**

[20] Oliveira AM, Beswick RR, Yan Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. Current Opinion in Chemical Engineering. 2021;33:100701. **doi: 10.1016/j.coche.2021.100701**

[21] Khin MM, Nair AS, Babu VJ, Murugan R, Ramakrishna S. A review on nanomaterials for environmental remediation. Energy & Environmental Science. 2012;5(8):8075-109. **doi: 10.1039/C2EE21818F**

[22] Yeo M-K, Nam D-H. Influence of different types of nanomaterials on their bioaccumulation in a paddy microcosm: A comparison of TiO_2 nanoparticles and nanotubes. Environmental Pollution. 2013;178:166-72. **doi: 10.1016/j.envpol.2013.03.040**

[23] Mirzaee M, Dehghanian C, Sabet Bokati K. ERGO grown on Ni-Cu foam frameworks by constant potential method as high performance electrodes for supercapacitors. Applied Surface Science. 2018;436:1050-60. **doi: 10.1016/j.apsusc.2017.12.145**

[24] Mirzaee M, Dehghanian C. Synthesis of nanoporous copper foam-applied current collector electrode for supercapacitor. Journal of the Iranian Chemical Society. 2019;16(2):283-92. **doi: 10.1007/s13738-018-1505-x**

[25] Mirzaee M, Rashidi A, Zolriasatein A, Rezaei Abadchi M. A simple, low cost, and template-free method for synthesis of boron nitride using different precursors. Ceramics International. 2021;47(5):5977-84. **doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.171**

[26] Mirzaee M, Rashidi A, Zolriasatein A, Rezaei Abadchi M. Solid-state synthesis and characterization of two-dimensional hexagonal BCN nanosheet using a free template method. Diamond and Related Materials. 2021;115:108350. **doi: 10.1016/j.diamond.2021.108350**

[27] Zhou G, Goshi E, He Q. Micro/Nanomaterials-augmented hydrogen therapy. Advanced Healthcare Materials. 2019;8(16):1900463. **doi: 10.1002/adhm.201900463**

[28] Bhanja P, Bhaumik A. Porous nanomaterials as green catalyst for the conversion of biomass to bioenergy. Fuel. 2016;185:432-41. **doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.004**

[29] Niemann MU, Srinivasan SS, Phani AR, Kumar A, Goswami DY, Stefanakos EK. Nanomaterials for hydrogen storage applications: A review. Journal of Nanomaterials. 2008;950967:1-9. **doi: 10.1155/2008/950967**

[30] Mirzaee M, Vaezi M, Palizdar Y. Synthesis and characterization of silver doped hydroxyapatite nanocomposite coatings and evaluation of their antibacterial and corrosion resistance properties in simulated body fluid. Materials Science and Engineering: C. 2016;69:675-84. **doi: 10.1016/j.msec.2016.07.057**

[31] Alaqad K, Saleh TA. Gold and silver nanoparticles: synthesis methods, characterization routes and applications towards drugs. J Environ Anal Toxicol. 2016;6(4):525-2161. **doi: 10.4172/2161-0525.1000384**

[32] Janardhanan R, Karuppaiah M, Hebalkar N, Rao TN. Synthesis and surface chemistry of nano silver particles. Polyhedron. 2009;28(12):2522-30. **doi: 10.1016/j.poly.2009.05.038**

[33] Shi H, Magaye R, Castranova V, Zhao J. Titanium dioxide nanoparticles: A review of current toxicological data. Particle and fibre toxicology. 2013;10:1-33. **doi: 10.1186/1743-8977-10-15**

[34] Schwarz JA, Contescu CI, Putyera K. Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. US: CRC press; 2004.

[35] Khot LR, Sankaran S, Maja JM, Ehsani R, Schuster EW. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. Crop Protection. 2012;35:64-70. **doi: 10.1016/j.cropro.2012.01.007**

[36] Pourhashem S, Seif A, Saba F, Nezhad EG, Ji X, Zhou Z, et al. Antifouling nanocomposite polymer coatings for marine applications: A review on experiments, mechanisms, and theoretical studies. Journal of Materials Science & Technology. 2022;118:73-113. **doi: 10.1016/j.jmst.2021.11.061**

[37] Mirzaee M, Seif A, Rashidi A, Silvestrelli PL, Zhou Z, Pourhashem S, et al. Investigating the effect of PDA/KH550 dual functionalized h-BCN nanosheets and hybrided with ZnO on corrosion and fouling resistance of epoxy coating: Experimental and DFT studies. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022;10(6):108746. **doi: 10.1016/j.jece.2022.108746**

[38] Gruere GP, Narrod CA, Abbott L. Agriculture, food, and water nanotechnologies for the poor: Opportunities, constraints, and role of the Consultative Group on International Agricultural Research. Netherlands: IFPRI Discussion Paper 1064; 2011.

[39] Gajanan K, Tijare S. Applications of nanomaterials. Materialstoday: Proceedings. 2018;5(1):1093-6. **doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.187**

[40] Chen C, Zhou Y, Fang H, Peng X, Jiang L. Progress and challenges in energy storage and utilization via ammonia. Surface Science and Technology. 2023;1(1):13. **doi: 10.1007/s44251-023-00013-6**

[41] Peralta-Videa JR, Zhao L, Lopez-Moreno ML, de la Rosa G, Hong J, Gardea-Torresdey JL. Nanomaterials and the environment: A review for the biennium 2008–2010. Journal of hazardous materials. 2011;186(1):1-15. **doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.11.020**

[42] Ghasemzadeh G, Momenpour M, Omidi F, Hosseini MR, Ahani M, Barzegari A. Applications of nanomaterials in water treatment and environmental remediation. Frontiers of Environmental Science & Engineering. 2014;8:471-82. **doi: 10.1007/s11783-014-0654-0**

[43] Ostadi M, Paso KG, Rodriguez-Fabia S, Øi LE, Manenti F, Hillestad M. Process integration of green hydrogen: Decarbonization of chemical industries. Energies. 2020;13(18):4859. **doi: 10.3390/en13184859**

[44] Dagdougui H. Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain. International Journal of Hydrogen Energy. 2012;37(6):5318-27. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.041**

[45] Froudakis GE. Hydrogen storage in nanotubes & nanostructures. Materials Today. 2011;14(7-8):324-8. **doi: 10.1016/S1369-7021(11)70162-6**

[46] Sakintuna B, Lamari-Darkrim F, Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. International Journal of Hydrogen Energy. 2007;32(9):1121-40. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.022**

[47] Bouaricha S, Dodelet J, Guay D, Huot J, Boily S, Schulz R. Hydriding behavior of Mg–Al and leached Mg–Al compounds prepared by high-energy ball-milling. Journal of Alloys and Compounds. 2000;297(1-2):282-93. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.022**

[48] Glenk G, Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen. Nature Energy. 2019;4(3):216-22. **doi: 10.1038/s41560-019-0326-1**

[49] Adnan N, Nordin SM, Bahruddin MA, Tareq AH. A state-of-the-art review on facilitating sustainable agriculture through green fertilizer technology adoption: Assessing farmers behavior. Trends in Food Science & Technology. 2019;86:439-52. **doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.040**

[50] Ahmed A, He P, He P, Wu Y, He Y, Munir S. Environmental effect of agriculture-related manufactured nano-objects on soil microbial communities. Environment international. 2023;173:107819. **doi: 10.1016/j.envint.2023.107819**

[51] ul Ain Q, Hussain HA, Zhang Q, Rasheed A, Imran A, Hussain S, et al. Chapter thirteen-Use of nano-fertilizers to improve the nutrient use efficiencies in plants. In: Aftab T, Hakeem KR, editors. Sustainable plant nutrition. US: Academic Press 2023. p. 299-321. **doi: 10.1016/B978-0-443-18675-2.00013-4**

[52] Tamhankar S, Green hydrogen by pyroreforming of glycerol. In: Hydrogen Systems: Enabling Energy Solutions. 19th World Hydrogen Energy Conference; 2012 Jun 3-7; Toronto, Canada. Elsevier Procedia; 2013.

[53] Palys MJ, Daoutidis P. Optimizing renewable ammonia production for a sustainable fertilizer supply chain transition. ChemSusChem. 2023;16(22):e202300563. **doi: 10.1002/cssc.202300563**

[54] Dubas ST, Pimpan V. Green synthesis of silver nanoparticles for ammonia sensing. Talanta. 2008;76(1):29-33. **doi: 10.1016/j.talanta.2008.01.062**

[55] Qureshi S, Mumtaz M, Chong FK, Mukhtar A, Saqib S, Ullah S, et al. A review on sensing and catalytic activity of nano-catalyst for synthesis of one-step ammonia and urea: Challenges and perspectives. Chemosphere. 2022;291:132806. **doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132806**

[56] Valente A, Iribarren D, Dufour J. Life cycle assessment of hydrogen energy systems: A review of methodological choices. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2017;22:346-63. **doi: 10.1007/s11367-016-1156**-z

[57] Peng B, Tang J, Luo J, Wang P, Ding B, Tam KC. Applications of nanotechnology in oil and gas industry: Progress and perspective. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2018;96(1):91-100. **doi: 10.1002/cjce.23042**

[58] Singh R, Altaee A, Gautam S. Nanomaterials in the advancement of hydrogen energy storage. Heliyon. 2020;6(7):e04487. **doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04487**

[59] Zhao G, Nielsen ER, Troncoso E, Hyde K, Romeo JS, Diderich M. Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. International Journal of Hydrogen Energy. 2019;44(19):9517-28. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.015**

[60] Heijungs R. Chain management by life cycle assessment (CMLCA). Journal of Environmental Science and Sustainable Development.2003;3:1-29. **doi: org/10.7454/jessd.v3i1.1045**

[61] Ajanovic A, Sayer M, Haas R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 2022;47(57):24136-54. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.094**

[62] Muradov NZ, Veziroğlu TN. “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. International Journal of Hydrogen Energy. 2008;33(23):6804-39. **doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.08.054**

[63] Dash SK, Chakraborty S, Roccotelli M, Sahu UK. Hydrogen fuel for future mobility: Challenges and future aspects. Sustainability. 2022;14(14):8285. **doi: 10.3390/su14148285**

Nanomaterials in the production of green hydrogen: Technical perspectives on the selection of nanomaterials, characteristics, production methods, and commercial applications

M. Mirzaee[1,*], T. Mohebbi[2], M. Hamedanian[3]

1. Assistant professor of Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2. Ph.D Student of Chemistry Department, Kashan University, Kashan, Iran.
3. Associate Professor of Chemistry Department, Kashan University, Kashan, Iran.

Abstract: Hydrogen production has garnered significant attention due to increased awareness of the depletion of fossil fuel resources. Storage and production have been highlighted as developmental priorities. Additionally, the role of nanomaterials in the production, storage, and commercial use of hydrogen is of great importance. This article examineed the energy characteristics of hydrogen, green hydrogen, nanomaterials used for production, their production methods, and commercial applications. Initially, a general overview of hydrogen energy and its main characteristics was provided. Then, the importance of green hydrogen was carefully reviewed. Besides using nanomaterials in green hydrogen production, nanomaterials' production methods were also considered. Technical and economic evaluations and the possibilities of using hydrogen in well-known energy applications were studied. Using environmentally friendly nanoparticles for hydrogen production instead of chemical nanoparticles can help reduce operational costs. Reusing nanoparticles through entrapment methods is also possible to save on cost. In conclusion, future directions based on the research findings are outlined.

Keywords: Energy, Green hydrogen, Nanomaterials, Production, Storage, Photosynthesis.

*** Coresponding author Email:** mjmirzaei@nri.ac.ir