مروری بر روش‌های ذخیره گاز هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی

نگار شاهدعلی[۱]، فائزه برزگری[۱]، مهدی رضوی‌فر[۲*]

۱. دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: tzarepour@ut.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۳۶ - ۵۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

چکیده

هیدروژن به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در کربن‌زدایی سیستم انرژی جهانی، نقش حیاتی در جایگزینی سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف از جمله صنعت، تولید برق، حمل‌ونقل و گرمایش ایفا می‌کند. برای تحقق این هدف، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید هیدروژن، توسعه زیرساخت‌های کارآمد برای ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و توزیع آن ضروری است. ذخیره‌سازی هیدروژن به دو روش اصلی انجام می‌شود؛ ذخیره‌سازی فیزیکی که شامل نگه‌داری هیدروژن در حالت گازی فشرده، مایع یا فوق‌بحرانی است و نیز ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد مانند استفاده از حامل‌های آلی هیدروژن مایع، هیدریدهای فلزی یا سوخت‌های توان‌زا می‌باشد. همچنین، ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده مطرح است، هرچند که تجربه عملی در این زمینه هنوز محدود است. با وجود پتانسیل بالای هیدروژن در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، چالش‌های علمی و عملیاتی متعددی از جمله ایمنی ذخیره‌سازی، بهینه‌سازی زیرساخت و مدیریت هزینه‌ها وجود دارد. در این مطالعه به بررسی جامع ذخیره‌سازی زیرزمین هیدروژن پرداخته و رویکردهای پیشروی این فناوری ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله، بسترسازی مناسبی به‌منظور استفاده از این روش در ایران باهدف تولید انرژی پایدار است.

کلید واژه‌ها: هیدروژن، حامل انرژی، ذخیره‌سازی زیرزمینی، مخازن نفت و گاز، تولید پایدار انرژی

۱. مقدمه

نقش همه‌جانبه هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی کم‌کربن در ارائه یک راه‌حل انرژی پاک برای کربن‌زدایی از صنایع با مصرف سوخت بالا، تأمین انرژی و کاهش چشم‌گیر انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است[۱-۳]. هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، بادی و تولید برق آبی پشتیبانی می‌کند. با این حال عرضه انرژی تجدیدپذیر تحت تأثیر نوسانات روزانه تا فصلی قرار دارد. تولید هیدروژن با استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در کاهش دادن معایب این سیستم‌ها کمک کند، به‌عنوان مثال هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز آب که با نام هیدروژن سبز شناخته می‌شود، بهترین گزینه برای این منظور در نظر گرفته می‌شود اما از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست[۴].

هیدروژن در میان تمام مواد شناخته شده دارای بیش‌ترین

دانسیته انرژی گرانشی (۱۲۰ کیلوژول بر گرم) و کم‌ترین وزن اتـمی (۱/۰۰۷۸۴ amu) و دانسیتـه انـرژی حجـمی پاییـنی است. (جدول ۱) ویژگی‌های فیزیکی هیدروژن را مورد بررسی قرار داده است[۵].

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی هیدروژن[۵]

تشریح	هیدروژن
وزن مولکولی(amu)	۱/۰۹۷۴
جرم مولکولی ($g\ mol^{-1}$)	۲/۰۱۵۹
نقطه سه‌گانه	
دما (K)	۱۳/۸
فشار (KPa)	۷/۰۴۱
نقطه بحرانی	
دما (K)	۳۲/۹۳۸
فشار (MPa)	۱/۲۸۵۸
دانسیته در دما و فشار نرمال ($Kg\ m^{-3}$)	۰/۰۸۹۹۰
گرانروی در دما و فشار نرمال (μPoise)	۸۹/۴۸
حلالیت در آب در دما و فشار نرمال (g gas per Kg water)	۰/۰۰۱۶
ضریب نفوذپذیری در دما و فشار نرمال ($m^{-2}\ s^{-1}$)	۰/۰۰۰۰۱۶
سرعت انتشار در دما و فشار نرمال (ms^{-1})	۰/۰۲>
سرعت شناوری (ms^{-1})	۱/۲-۹
ثابت گرمای ویژه گاز در دما و فشار نرمال (KJ/Kg K)	۱۴/۸۵
هدایت حرارتی گاز در دما و فشار نرمال (W/m K)	۰/۱۸۷
محدودیت اشتعال‌پذیری در هوا (٪)	۴-۷۵
محدودیت انفجار در هوا (٪)	۵۹-۱۵
دمای احتراق خودکار در هوا (٪)	۷۹۳-۱۰۲۳(۸۵۸)
دما و فشار نرمال: (K) ۲۳۹ و (Pa) ۱۰۱۳۲۵	

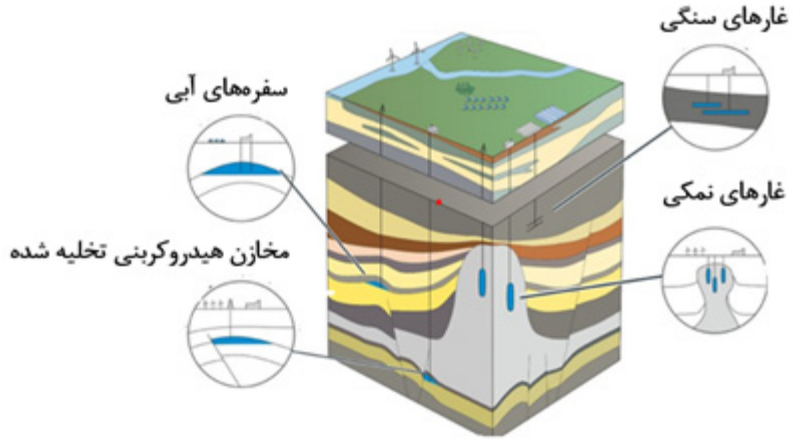
مایـع کـردن هیـدروژن هزینه‌هـای بـالایی دارد و بـرای ذخیره‌سـازی انـرژی در مقیاس‌های مورد نیـاز مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشـد[۶]. گاز هیـدروژن دارای ویژگی‌هـایی ماننـد اندازه کوچـک، وزن مولکـولی کـم، گرانـروی کـم، دانسیتـه پایین، شناوری مثبت و نفوذپذیری بالا و همچنین حلالیت کم در آب می‌باشـد، هرچند تحقیقات نشان داده است که این حلالیت با افزایش فشار بیش‌تر می‌شود[۷].

فناوری‌های موجـود برای ذخیره‌سـازی و انتقال هیدروژن به‌صـورت مسـتقیم از فناوری‌هـای مرتبـط و تکامـل یافته در صنایـع شیمیایی و گازی توسـعه یافته‌اند. ایـن موضوع به‌ویژه در مـورد ذخیره‌سـازی فیزیـکی و انتقـال هیـدروژن از طریق جاده، خط لوله یا کشتی صادق است. هرچند نفوذپذیری بالای هیـدروژن، مواد قابل اسـتفاده بـرای خطوط لولـه هیدروژن را محـدود کرده و نیازمند انجام اقدامات اضافی برای بازسـازی و تغییر کاربری شبکه‌های موجود خطوط لوله است. یک ویژگی منحصر به فرد هیدروژن در مقایسـه با سـوخت‌های فسیلی و مشتقات آن، این است که می‌توان آن را از طریق ترکیب کردن شیمیایی یا فیزیکی با مواد مایع یا جامد مناسب ذخیره کرد. با وجود سـطح پایین آمادگی فناوری در این زمینه، فناوری‌های ذخیره‌سـازی هیـدروژن مبتـنی بر مـواد، کاربرد هیـدروژن را به‌عنـوان یک واسـطه ذخیره‌سـازی انـرژی بهبـود بخشیده و راه‌های جایگزینی برای انتقال هیدروژن ارائه می‌دهند[۸].

هوش مصنوعی (به‌ویژه تکنیک‌هایی مانند ANN[1] و KNN[2]) می‌توانـد روند پیدا کردن مواد جدید را سـریع‌تر کند، هزینه‌های تحقیـق و توسـعه را پاییـن بیـاورد و عملکرد سیسـتم‌ها را بهتر کند. به‌همین دلیل، اسـتفاده از آن در توسـعه روش‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای ذخیره‌سـازی هیدروژن بسیار مهم اسـت و نشان می‌دهد که فناوری دیجیتال و انرژی پاک چطور می‌توانند کنار هم آینده‌ای پایدار بسازند.

گزینه‌هـای مختلـف زمین‌شـناسی بـرای ذخیره‌سـازی هیدروژن پیشـنهاد شـده‌اند، مانند غارهای نمکی، سـفره‌های آب‌شـور، یا مخازن هیدروکربنی تخلیه شـده که در (شکل ۱) آورده شـده اسـت. خواص فیزیکی و شیمیـایی هرکدام از این ذخیره‌سـازی‌ها متفاوت اسـت و همچنیـن پارامترهایی مانند نیـاز بـه گاز بالشـتی، هزینـه نگهـداری، آماده‌سـازی سـایت، نظارت، نرخ تولید و ریسک نشتی که باید برای توسعه تجاری در نظر گرفته شود نیز متفاوت خواهد بود[۹-۱۲].

1. Artificial Neural Network - ANN
2. K-Nearest Neighbors - KNN



شکل ۱: گزینه‌های مختلف زمین‌شناسی برای ذخیره‌سازی هیدروژن[۹]

۲. روش‌های تولید هیدروژن

هیدروژن را می‌توان از طریق روش‌های مختلفی تولید کرد که هر کدام بازدهی، هزینه‌ها و شدت کربن متفاوتی دارند. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی از طریق رفرمینگ بخار متان[1]، رفرمینگ خودگرمایی[2]، اکسیداسیون جزئی[3]، گازی‌سازی زغال‌سنگ یا پیرولیز است که ممکن است با استفاده از جذب و ذخیره‌سازی کربن[4] یا بدون آن انجام شود. همچنین هیدروژن از طریق الکترولیز آب نیز تولید می‌شود[۱۳].

تعدادی از فناوری‌های جدید تولید هیدروژن با استفاده از کربن که به مقدار کم در حال توسعه هستند، در (جدول ۲) شرح داده شده‌اند. این جدول دسته‌بندی روش‌های تولید هیدروژن از منابعی مانند گاز طبیعی، بیوگاز و الکترولیز آب را ارائه کرده و فرایندهای شیمیایی و میکروبی مربوطه را مشخص می‌کند.

جدول ۲: فناوری‌های جدید تولید هیدروژن با استفاده از کربن

استفاده از میکروب‌ها	میکروب‌هایی که از انرژی نور برای تولید هیدروژن از آب به‌عنوان بخشی از فرآیندهای متابولیک خود استفاده می‌کنند [۱۴].
تخمیر زیست‌توده	تولید هیدروژن از طریق تخمیر زیست‌توده [۱۵].
پیرولیز یا گازی‌سازی زیست‌توده	تبدیل زیست‌توده به هیدروژن از طریق پیرولیز یا گازی‌سازی [۱۶].
شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب	تولید هیدروژن با استفاده از فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی [۱۷].
شکافت حرارتی خورشیدی آب	تولید هیدروژن با استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی [۱۸].
الکترولیز با انرژی هسته‌ای	تولید هیدروژن از طریق الکترولیز آب با استفاده از انرژی هسته‌ای.
پیرولیز متان	تولید هیدروژن و کربن جامد از طریق پیرولیز متان.

یک نکته مهم در فرآیندهای تولید هیدروژن، در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای در چرخه عمر مرتبط با خود فرآیند تولید و همچنین فرآیندهای مرتبط دیگر (مانند استخراج سوخت) است. تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار نسبتاً بالای کربن می‌شود، حتی زمانی که این انتشارات جذب شوند.

از طرف دیگر، هیدروژن تولید شده از منابع خورشیدی و بادی معمولاً با محیط‌زیست سازگارند[۱۹]. علاوه بر این، درصورتی‌که انتشارات جذب شوند، استفاده از زیست‌توده برای تولید هیدروژن می‌تواند به انتشارات منفی منجر شود.

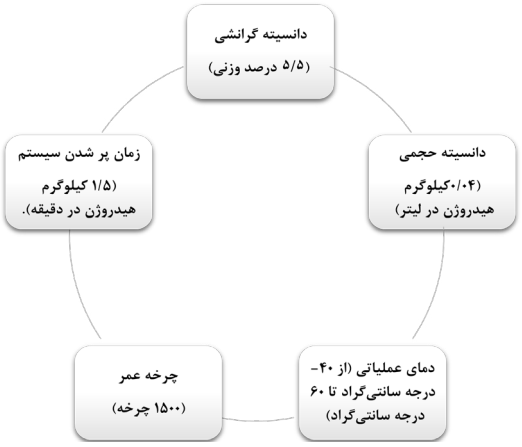
1. Steam Methane Reforming
2. Autothermal Reformation
3. Partial Oxidation (POX)
4. Carbon Capture and Storage

امروزه بیش‌تر هیدروژن تولید شده (۹۶ درصد) از طریق رفرمینگ بخار متان بدون جذب و ذخیره‌سازی کربن است[۲۰]. تنها ۴ درصد از هیدروژن تولید شده، هیدروژن سبز است که با فرض قیمت‌های گاز طبیعی در سال ۲۰۲۰، در این دو روش به ترتیب از ارزان‌تر به گران‌تر است[۲۱].

روند هزینه‌ای نشان می‌دهند که هزینه تولید هیدروژن سبز در دهه آینده ارزان‌تر از هیدروژن تولید شده از گاز طبیعی خواهد شد، زیرا هزینه‌های انرژی‌های باد، خورشید، آب و سایر منابع انرژی غیرفسیلی و همچنین الکترولایزرها با افزایش استقرار کاهش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌های هیدروژن سبز در برخی مناطق تا سال ۲۰۳۰ حتی کم‌تر از هزینه‌های هیدروژن آبی شود[۲۲].

۳. ذخیره‌سازی هیدروژن

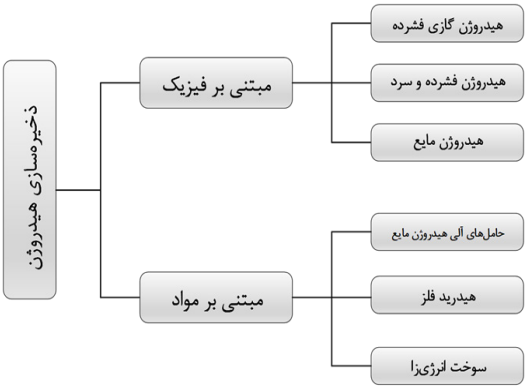
فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن نقش اساسی در ایجاد زیرساخت هیدروژن ایفا می‌کنند. فرمی که هیدروژن در آن ذخیره می‌شود نه‌تنها روش حمل و نقل آن را تعیین می‌کند، بلکه روش‌های استفاده از هیدروژن را نیز مشخص می‌کند. پیشرفت در فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن می‌تواند زمینه‌های کاربرد هیدروژن را گسترش داده و تقویت کند. از دیدگاه فنی، معمولاً پنج عامل اصلی برای توصیف سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن در نظر گرفته می‌شود که در (شکل ۲) ارائه شده است. این عوامل به بررسی ویژگی‌ها و عملکرد سیستم کمک می‌کنند و معیارهایی برای مقایسه روش‌های مختلف ذخیره‌سازی فراهم می‌آورند[۲۳].



شکل ۲: پنج عامل اصلی برای توصیف سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن [۲۳]

به‌طورکلی، سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ذخیره‌سازی مبتنی بر روش‌های فیزیکی و ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد که جزئیات این دسته‌بندی در (شکل ۳) ارائه شده است. در مورد دسته اول، هیدروژن با تغییر حالت فیزیکی آن ذخیره می‌شود، یعنی با افزایش فشار (ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده[1]) یا کاهش دما به زیر نقطه تبخیر آن (ذخیره‌سازی هیدروژن مایع[2]) یا استفاده از هر دو روش (ذخیره‌سازی هیدروژن فشرده و سرد[3])[۲۴].

در مورد ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد، از مواد اضافی تحت عنوان «حامل» استفاده می‌شود. این مواد می‌توانند به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی با مولکول‌ها یا اتم‌های هیدروژن پیوند برقرار کنند. بااین‌حال، بیش‌تر فناوری‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد هنوز در مراحل آزمایشگاهی و نمایشی قرار دارند.



شکل ۳: مروری از تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی هیدروژن [۲۴]

۳-۱. ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده

۳-۱-۱. مخازن تحت فشار

ساده‌ترین و کامل‌ترین روش برای ذخیره‌سازی هیدروژن گازی، فشرده‌سازی و پر کردن آن در مخازن تحت فشار است. در (جدول ۳) مقایسه‌ای بین چهار نوع مخزن موجود در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن صورت گرفته است. انتخاب نوع مخزن بر اساس حوزه کاربردی و تعادل بین عملکرد فنی و هزینه انجام می‌شود.

1. Compressed Gaseous Hydrogen Storage
2. Liquid Hydrogen
3. Cryo-Compressed Hydrogen

جدول ۳: دسته‌بندی و مقایسه انواع مختلف مخازن تحت فشار

نوع	مواد / توضیحات	فشار معمولی (MPa)	قیمت (kgH2/$)	دانسیته گرانشی معمولی (wt٪)	کاربردهای اصلی
اول	مخزن تحت فشار کاملاً فلزی(مثلاً فولاد و آلومینیوم)	۳۰-۱۵ [۲۵]	۲۴۰ [۲۶]	۱/۷ [۲۷]	ذخیره‌سازی هیدروژن به‌عنوان گاز صنعتی[۲۵]
دوم	مخزن‌تحت‌فشارفلزی پیچیده شده با کامپوزیت الیاف شیشه‌ای	۹۵-۱۰ [۲۵] حداکثر تحمل فشار (امکان دستیابی به بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال)	۳۶۰ [۲۶]	۲/۱ [۲۷]	کاربردهای ثابت مانند ذخیره‌سازی هیدروژن تحت‌فشاربالا در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) [۲۸]
سوم	پوشش کامپوزیت کامل با لایه‌ی فلزی داخلی	۷۰-۳۰	۷۰۰ [۲۷]	۴/۲ [۲۷]	تریلی حامل لوله‌های هیدروژن [۲۹] تریلی هیدروژن [۲۵] ذخیره‌سازی هیدروژن بر روی کشتی
چهارم	کاملاً کامپوزیتی (مثلاً پلی‌اتیلن با دانسیته بالا به‌عنوان لایه داخلی همراه با الیاف شیشه یا کربن)	۷۰-۳۰	۱۲۰۰-۵۰۰ [۳۰]	۵/۷ [۲۷]	ذخیره‌سازی هیدروژن تحت‌فشار پایین در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) [۲۸] تریلی حامل لوله‌های هیدروژن [۲۹] تریلی هیدروژن ذخیره‌سازی هیدروژن بر روی کشتی

مخازن تحت فشار نوع اول، برای ذخیره‌سازی هیدروژن در پایان قرن نوزدهم ظاهر شدند. به دلیل دانسیته گرانشی پایین، تنها می‌توان از آن‌ها برای کاربردهای ثابت، به‌ویژه ذخیره‌سازی هیدروژن به‌عنوان گاز صنعتی در محل استفاده کرد[۲۵]؛ بنابراین، برای ذخیره‌سازی هیدروژن در فشار بالاتر، می‌توان به‌راحتی مخزن فلزی را با پیچیدن الیاف آغشته به رزین در قسمت استوانه‌ای میانی تقویت کرد. بسته به ضخامت الیاف پیچیده شده، مخازن تحت فشار تولید شده به این روش که به‌عنوان مخازن نوع دوم شناخته می‌شوند، بیش‌ترین تحمل در برابر فشار را دارند[۳۱]. مخازن تحت فشار نوع دوم معمولاً برای ذخیره‌سازی گاز در فشار بالا استفاده می‌شوند، مانند ذخیره‌سازی آبشاری هیدروژن[1] در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن[2] با فشار ۸۷/۵ مگاپاسکال. وقتی لایه‌های داخلی فلزی یا پلیمری به‌طور کامل با الیاف پیچیده می‌شوند، مخازن تحت فشار (به ترتیب به نام‌های نوع سوم و چهارم) به‌طور قابل‌توجهی سبک‌تر می‌باشند و بنابراین می‌توانند نیازهای دانسیته گرانشی هیدروژن ذخیره‌شده برای کاربردهای خودرویی را برآورده کنند. به همین دلیل، مخازن تحت‌فشار نوع سوم و چهارم ترجیحاً در ماشین‌های یدک‌کش لوله‌ای و مخازن یکپارچه برای حمل هیدروژن استفاده می‌شوند. در مورد ذخیره‌سازی هیدروژن ثابت با فشار پایین در ایستگاه‌های سوخت‌گیری، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از مخازن نوع چهارم وجود دارد. اگرچه می‌توان همان مقدار هیدروژن را در مخازن نوع یک با هزینه‌های سرمایه‌گذاری مشابه ذخیره کرد، اما این مخازن به فضای بیش‌تری نیاز دارند[۲۸].

فرآیندهای تولید سیلندر فلزی بدون درز و لایه‌ی داخلی برای مخازن تحت‌فشار نوع اول، دوم و سوم بسیار مشابه هستند: قطعات فلزی اولیه یا صفحات به‌صورت عمیق کشیده شده و به شکل پوسته درمی‌آیند، سپس با استفاده از فرآیندهای پرس یا چرخش گرم، گردن سیلندر تشکیل می‌شود. لایه‌های داخلی مخازن نوع چهارم معمولاً از پلی‌اتیلن با دانسیته بالا[3] یا پلی‌آمید[4] ساخته می‌شوند و از روش‌هایی مانند قالب‌گیری چرخشی، قالب‌گیری بادی یا جوش‌دادن بخش‌های گنبدی تزریقی به لوله‌های اکسترود شده پلیمری استفاده می‌شود. برای تقویت لایه‌های داخلی مخازن، الیاف (مانند شیشه، آرامید، کربن و غیره) می‌توانند به‌صورت دورپیچ، قطبی‌پیچ یا مارپیچی روی آن‌ها پیچیده شوند.

۳-۱-۲. ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن

علاوه بر مخازن تحت‌فشار، یکی دیگر از روش‌های امیدوارکننده برای ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده، استفاده از غارهای نمکی موجود و مناسب، سفره‌های آب زیرزمینی و مخازن گاز تخلیه‌شده است. ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن[5]

1. Cascade Hydrogen Storage
2. Hydrogen Refueling Station
3. High-Density Polyethylene
4. Polyamide
5. Polyamide

به‌ویژه برای ذخیره‌سازی میان‌مدت و بلندمدت حجم زیادی از هیدروژن مازاد ناشی از واردات یا تولید انرژی‌های تجدیدپذیر فصلی توسعه‌یافته است. غارهای نمکی به‌طورکلی بهترین گزینه برای ذخیره‌سازی هیدروژن خالص هستند. این موضوع نه‌تنها به دلیل نفوذناپذیری ذخایر نمک، خواص مکانیکی مطلوب نمک و مقاومت آن در برابر واکنش‌های شیمیایی بلکه به دلیل وجود سنگ‌های تبخیری ویسکوالاستیک است که به‌عنوان یک سپر بسیار خوب برای گازها عمل می‌کنند[۱۱,۳۲]. علاوه بر این، شرایط شوری موجود در این غارها، مصرف میکروبی هیدروژن ذخیره‌شده را سرکوب می‌کند[۱۱]. متأسفانه، حجم غارهای نمکی نسبتاً کم است و به‌طور گسترده توزیع نشده‌اند. مخازن گاز تخلیه‌شده حجم بیش‌تری دارند و مزایای قابل‌توجهی از این نظر نشان می‌دهند که ساختار و ویژگی‌های زمین‌شناسی آن‌ها در طول اکتشاف و بهره‌برداری به‌خوبی شناسایی شده‌اند[۳۲]. با این حال، خلوص هیدروژن ذخیره‌شده ممکن است به دلیل وجود گاز طبیعی باقی‌مانده کاهش یابد. اگر ویژگی‌های مخزنی خوبی از سنگ میزبان و یک لایه نفوذناپذیر برای جلوگیری از مهاجرت هیدروژن ذخیره شده وجود داشته باشد، سفره‌های آب زیرزمینی که حجم بسیار بزرگی دارند و به‌راحتی یافت می‌شوند، گزینه‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن خواهند بود. با این حال، معایب آن‌ها شامل احتمال نشت در امتداد گسل‌های کشف نشده به دلیل ماهیت متخلخل سفره‌های آب‌زیرزمینی، واکنش‌های بیوشیمیایی و واکنش‌های هیدروژن با مواد معدنی در سنگ مخزن است. تاکنون، ذخیره‌سازی هیدروژن خالص در سفره‌های آب زیرزمینی گزارش نشده است. کاربردهای هیدروژن با ذخیره‌سازی مناسب آن‌ها مقایسه شده و در (جدول ۴) فهرست شده‌اند.

جدول ۴: سایت ذخیره‌سازی مناسب و کاربرد انرژی بر اساس ترکیب جریان تزریق‌شده (درصد هیدروژن در مخلوط گاز) [۳۳]

جریان گاز	تبدیل	کاربرد	سایت ذخیره‌سازی مناسب
هیدروژن خالص	سلول‌های سوختی	برق و وسایل نقلیه	غارهای نمکی که تقریباً کاملاً نفوذ ناپذیر هستند از درجه بالایی از تمیزی برخوردارند و با خطر بسیار کم آلودگی گاز توسط ناخالصی‌ها مشخص می‌شوند
گاز طبیعی کم هیدروژن (۱۵-۶ درصد H_2)	برق به گاز	توربین‌های گازی یا تزریق آن به خط لوله گاز طبیعی	مخزن گاز تخلیه شده
مخلوط غنی از هیدروژن همراه با CO, CH_4 , CO_2, (گاز سنتز یا گاز شهری ۲۰-۴۰ درصد H_2)	برق به گاز و گاز به برق	برق از طریق تبدیل ترمودینامیکی در توربین‌های گازی و به‌عنوان سوخت (درمکرد گاز شهری) برای روشنایی و گرمایش بدون نیاز به هیچ‌گونه تبدیل	سفره آب زیرزمینی، مخزن گاز تخلیه شده یا غار نمکی
مخلوطی از هیدروژن و CO_2	برق به گاز	سوخت و برق	سفره آب زیرزمینی، مخزن گاز تخلیه شده

۳-۲. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع

هیدروژن در حالت مایع، دانسیته جرمی و حجمی بسیار بالاتری نسبت به ذخیره‌سازی گازی فشرده دارد. با این حال، تکنیک مایع کردن هیدروژن بسیار دشوارتر و نیازمند مصرف انرژی بیش‌تر نسبت به فشرده‌سازی هیدروژن یا مایع کردن گازهای متعارف دیگر است. این موضوع عمدتاً به دلایل زیر است:

- دمای تبخیر (۲۰/۲۸ کلوین در فشار ۱ اتمسفر) و نقطه بحرانی (۳۳ کلوین) هیدروژن بسیار پایین است.
- اندازه مولکول هیدروژن بسیار کوچک است، به‌طوری‌که در دمای نسبتاً بالا به گاز ایده‌آل نزدیک می‌شود. ضریب ژول-تامسون آن تنها در صورتی مثبت است که دما کم‌تر از ۲۰۲ کلوین باشد (دمای وارونگی ژول-تامسون هیدروژن) [۳۴].

توجه داشته باشید که نرخ تغییرات دمای یک گاز واقعی نسبت به فشار در فرآیند هم‌آنتروپی به‌عنوان ضریب ژول-تامسون تعریف می‌شود. با کاهش فشار (افزایش حجم)، اگر دمای گاز کم‌تر از دمای وارونگی باشد، ضریب ژول-تامسون مثبت است و گاز سرد می‌شود. اگر دمای گاز بالاتر از دمای وارونگی باشد، ضریب ژول-تامسون منفی است و گاز گرم می‌شود.

یکی از چالش‌های اصلی فناوری مخزن کرایوژنیک برای ذخیره‌سازی هیدروژن مایع، کاهش تلفات ناشی از تبخیر است. گرمای جذب‌شده توسط هیدروژن مایع باعث تبخیر آن می‌شود. از آنجا که مخزن داخلی فلزی برای تحمل فشار بالاتر طراحی نشده است، هیدروژن تبخیر شده باید آزاد شود که این امر منجر به تلفات تبخیر مواد می‌شود. هدایت حرارتی، تابش، همرفت از منابع اصلی نشت حرارت هستند.

مخازن کرایوژنیک پیشرفته برای ذخیره‌سازی هیدروژن مایع از مخازن توسعه‌یافته برای نیتروژن مایع با تغییرات بسیار کمی نشئت گرفته‌اند. در عمل، استفاده مناسب از هیدروژن تبخیرشده و در نتیجه کاهش تلفات مؤثر تبخیر، روز به روز محبوب‌تر شده است[۳۵,۳۶].

اخیراً، تلاش‌های زیادی برای کاهش بیش‌تر تلفات تبخیر مخازن هیدروژن مایع انجام شده است. یکی از روش‌های نماینده، استفاده از فناوری عایق‌بندی چندلایه در ترکیب با خلأ بالا (در محدوده ۱۰-۴ میلی‌بار) است که به‌عنوان یک فناوری استاندارد برای ذخیره‌سازی هلیوم مایع استفاده می‌شود[۳۷].

۳-۳. ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت کرایو-فشرده[1]

اگر چه ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت مایع به دانسیته بالاتری نسبت به حالت گازی دست می‌یابد، اما تلفات جوش‌شده[2] اجتناب‌ناپذیر، کاربرد آن را به‌ویژه در مورد ذخیره‌سازی برای خودروها محدود می‌کند[۳۸]. مزیت اصلی ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت کرایو-فشرده این است که می‌تواند به دانسیته بالاتری نسبت به هیدروژن مایع در دماهای نسبتاً بالاتر دست یابد. آماده‌سازی کرایو-فشرده هیدروژن از هیدروژن گازی به یک واحد فشرده‌سازی چندمرحله‌ای با یک کمپرسور و سیستم خنک‌کننده نیاز دارد. واضح است که افزایش فشار و کاهش دما به‌سادگی منجر به دانسیته بسیار بالای هیدروژن می‌شود، اما از نظر مصرف انرژی و امکانات ذخیره‌سازی، از نظر اقتصادی چندان مقرون‌به‌صرفه نیست[۳۹]. افزایش دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن از طریق فشرده‌سازی از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است؛ اما اگر فشار خیلی بالا باشد، این مزیت به‌تدریج خنثی می‌شود.

اگر کرایو-فشرده هیدروژن تهیه شده مستقیماً به یک وسیله نقلیه الکتریکی سلول سوختی[3] تزریق شود، نیازی به واحد ذخیره‌سازی میانی نیست؛ بنابراین، این فناوری می‌تواند به‌راحتی با ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن مبتنی بر هیدروژن مایع سازگار شود. برخلاف هیدروژن گازی فشرده و هیدروژن مایع، اکثر مطالعات درباره کرایو-فشرده هیدروژن بر روی کاربردهای ذخیره‌سازی و زمینه‌های مرتبط متمرکز شده‌اند[۴۰,۴۱]. در عمل، مخزن کرایو-فشرده هیدروژن ترکیبی از مخزن فشار هیدروژن گازی فشرده و مخزن هیدروژن مایع است. این مخزن به‌طورکلی شامل یک مخزن فشار نوع سوم برای هیدروژن گازی فشرده است که با عایق‌کاری چندلایه مورد استفاده برای هیدروژن مایع پوشانده شده است. علاوه بر این، مخزن باید در خلأ محصور شود[۴۲].

۴-۳. ذخیره‌سازی هیدروژن در حامل‌های آلی هیدروژن مایع

ذخیره‌سازی هیدروژن با ترکیب شیمیایی یا فیزیکی آن با مواد مایع یا جامد مناسب (ذخیره‌سازی هیدروژن مبتنی بر مواد) وجود دارد. حامل‌های آلی هیدروژن مایع[4] یکی از مواد امیدوار کننده برای این منظور هستند. در دمای محیط، این مواد، مایع یا نیمه مایع هستند و دارای پیوندهای غیراشباعی می‌باشند که به آن‌ها امکان ذخیره‌سازی مولکول‌های هیدروژن از طریق یک واکنش شیمیایی (هیدروژناسیون) در حضور کاتالیزورها را می‌دهد. برای آزادسازی هیدروژن، واکنش دهیدروژناسیون کاتالیزوری تحت شرایط دمایی و فشار

1. Cryo-Compressed Hydrogen Storage (CCH_2)
2. Boil-Off
3. Fuel Cell Electric Vehicle
4. Liquid Organic Hydrogen Carriers

مناسب انجام می‌شود. علاوه بر این، معیارهای باید برای طراحی مهندسی یک ماده حامل‌های آلی هیدروژن مایع در نظر گرفته شوند که این معیارها به طراحی و ارزیابی کارآمد مواد حامل کمک می‌کنند. جزئیات این معیارها در (جدول ۵) ارائه شده است[۴۳,۴۴]:

جدول ۵: معیارهای طراحی حامل‌های آلی هیدروژن مایع[۴۴]

ایمن و غیر سمی در طول حمل‌ونقل و استفاده
دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن حجمی کافی (مثلاً بیش‌تر از ۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و گرمائی (مثلاً بیش‌تر از ۶ درصد وزنی)؛
نقطه ذوب پایین، مثلاً کم‌تر از ۳۰- درجه سانتی‌گراد
نقطه‌جوش نسبتاً بالا، مثلاً بیش‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد
پایداری شیمیایی کافی حامل‌های آلی هیدروژن مایع هیدروژنه و مصرف انرژی کم‌تر برای واکنش دهیدروژناسیون آن (این نشان می‌دهد که انرژی پیوند هیدروژن حامل‌های آلی هیدروژن مایع نباید خیلی کم یا خیلی زیاد باشد؛ محدوده بهینه بین ۴۰ تا ۷۰ کیلوژول بر مول هیدروژن است)؛
انتخاب‌پذیری واضح بین حامل‌های آلی هیدروژن مایع هیدروژنه و دهیدروژنه در طول چرخه عمر طولانی؛
عدم وجود یا مقدار بسیار کم محصولات تجزیه‌شده پس از واکنش دهیدروژناسیون؛
قابلیت ادغام مستقیم در زیرساخت‌های سوختی موجود و تثبیت‌شده؛
هزینه تولید پایین

هیچ‌یک از حامل‌های آلی هیدروژن مایع‌های موجود نمی‌توانند به‌طور کامل تمام این معیارها را برآورده کنند. مطالعات پیشرفته امروزی عمدتاً بر دو دسته از مواد متمرکز هستند: ترکیبات هوموسیکلیک (حلقوی همگن) و ترکیبات هتروسیکلیک (حلقوی ناهمگن). در سیستم‌های هوموسیکلیک متیل‌سیکلوهگزان[1] تولوئن یکی از اولین سیستم‌های حامل‌های آلی هیدروژن مایع مورد بررسی بود که امروزه به مرحله تجاری‌سازی رسیده است. تولوئن با استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن مختلف تبدیل می‌شود. در شرایط محیطی، متیل سیکلوهگزان مایع دارای دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن ۶/۲ درصد وزنی است؛ اما به دلیل نیاز انرژی نسبتاً بالا (۶۸.۳ کیلوژول بر مول هیدروژن)، دهیدروژن‌اسیون در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد معمولاً با تشکیل کک و سایر محصولات جانبی همراه است[۴۵].

نفتالین نیز یک سیستم جالب حامل‌های آلی هیدروژن مایع هوموسیکلیک است که نه‌تنها به دلیل دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن بالا در دکالین (۷/۳ درصد وزنی)، بلکه به این دلیل که ترکیب دهیدروژنه شده آن (نفتالین) در دمای اتاق جامد است، مورد توجه قرار گرفته است. این ویژگی با طراحی نوآورانه کاتالیزور و بستر، دامنه کاربردهای سیستم حامل‌های آلی هیدروژن مایع دکالین/نفتالین را گسترش می‌دهد. امیدوارکننده‌ترین سیستم حامل‌های آلی هیدروژن مایع هوموسیکلیک، یک سیستم چند جزئی شامل پرهیدرو-بنزیل تولوئن/ بنزیل تولوئن و پرهیدرو-دی‌بنزیل تولوئن یا دی‌بنزیل تولوئن است[۴۳].

حامل‌های آلی هیدروژن مایع هتروسیکلیک[2] رقیبی برای سیستم‌های هوموسیکلیک هستند. در سال‌های اخیر، حامل‌های هیدروژن هتروسیکلیک (به‌ویژه انواع مبتنی بر N-هتروسیکل) به دلیل واکنش‌پذیری بهتر، سینتیک و ترمودینامیک مطلوب، دمای پایین‌تر دهیدروژناسیون و برگشت‌پذیری بالاتر، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند.

این ترکیبات از نظر سینتیکی و دمای عملیاتی مطلوب هستند، اما دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن کم‌تر از ۶ درصد وزنی ممکن است کاربرد آن‌ها را در سناریوهای پیشرفته محدود کند. این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه حامل‌های آلی هیدروژن مایع‌های هتروسیکلیک مزایای قابل‌توجهی دارند، اما هنوز چالش‌های عملیاتی نیاز به بهبود بیش‌تر دارند.

۳-۵. ذخیره‌سازی هیدروژن در هیدریدهای فلزی

به‌طورکلی، هر ماده جامدی که بتواند به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی با هیدروژن ترکیب شود و ترکیب حاصل در دمای نگهداری معمولی پایدار بوده و در دما و فشار متعادل قادر به آزادسازی هیدروژن باشد، می‌تواند به‌عنوان ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت جامد مورد استفاده قرار گیرد. واضح است که ذخیره‌سازی حالت جامد، ایمن‌ترین روش است و بالاترین

1. Methyl Cyclohexane
2. Heterocyclic Liquid Organic Hydrogen Carriers

دانسیته ذخیره‌سازی حجمی را ارائه می‌دهد. ترکیبات بین‌فلزی، گزینه‌های سنتی اما با دانسیته کم از دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان مواد بالقوه ذخیره‌سازی هیدروژن در نظر گرفته شده‌اند.

نانوساختارهای کربنی، پتانسیل بالا اما چالش‌های فنی متعددی دارند. مواد متخلخل یا نانوساختار کربنی مانند نانولوله‌های کربنی نیز به‌عنوان گزینه‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن مطرح شده‌اند؛ اما:

- امیزان هیدروژن جذب شده و انرژی پیوند C–H به‌شدت به مساحت سطح ویژه و چیدمان موضعی اتم‌های کربن بستگی دارد.
- از آنجا که تولید انبوه نانو لوله‌های کربنی خالص با انحرافات مورفولوژیک کم و روش‌های مشخصه‌یابی قابل‌اطمینان هنوز محدود است، نتایج گزارش شده برای چگالی ذخیره‌سازی هیدروژن در آن‌ها پراکنده و غیرقابل تکرار است[۴۶, ۴۷].
- مواد سبک با چگالی ذخیره‌سازی بالاتر
- برای دستیابی به چگالی بالاتر، انتخاب مواد ذخیره‌سازی به عناصر سبک مانند Li, Be, B, Na, Mg و Al محدود می‌شود. علاوه بر چگالی ذخیره‌سازی، ویژگی‌های زیر باید در نظر گرفته شوند[۴۸]:
- دمای تفکیک پایین و فشار متعادل
- اتلاف گرمای کم در طول تشکیل هیدرید (واکنش گرمازا)
- گرمای تشکیل کم برای کاهش انرژی مورد نیاز آزادسازی هیدروژن
- اتلاف انرژی محدود در طی شارژ و دشارژ هیدروژن (جلوگیری از آزادسازی خود به خودی هیدروژن)
- سینتیک سریع
- پایداری چرخه‌ای
- پایداری بالا در برابر اکسیژن و رطوبت برای عمر چرخه‌ای طولانی
- هزینه پایین بازیافت و زیرساخت شارژ
- ایمنی

درحالی‌که هیدریدهای فلزی و نانوساختارهای کربنی پتانسیل ذخیره‌سازی هیدروژن را دارند، چالش‌هایی مانند چگالی ذخیره‌سازی پایین، مشکلات تولید و پایداری هنوز نیاز به تحقیقات بیش‌تر دارند. مواد سبک مانند منیزیم و ترکیبات لیتیوم به‌عنوان گزینه‌های امیدوارکننده برای بهبود مشکل چگالی در ذخیره‌سازی مطرح هستند، اما باید معیارهای عملیاتی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شوند.

به دلیل پتانسیل بالای جذب هیدروژن، هزینه نسبتاً پایین و برگشت‌پذیری خوب، هیدریدهای فلزی مبتنی بر منیزیم و آلیاژهای آن، امیدوارکننده‌ترین مواد برای ذخیره‌سازی هیدروژن در حالت جامد هستند. در دما و فشارهای بالا، مثلاً ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۳ مگاپاسکال، مولکول‌های هیدروژن با منیزیم واکنش داده و هیدرید منیزیم را تشکیل می‌دهند که از نظر تئوری، حاوی ۷/۶ درصد وزنی هیدروژن است؛ اما این مقدار هرگز در مواد حجیم قابل‌دستیابی نیست. جذب هیدروژن توسط منیزیم، یک جذب شیمیایی تجزیه شده روی سطح منیزیم است که به دنبال آن انتشار هیدروژن رخ می‌دهد. با پیشرفت واکنش، لایه هیدرید منیزیم رشد می‌کند که تقریباً نفوذناپذیر است و در نتیجه فرآیند هیدروژنه شدن بیش‌تر را متوقف می‌سازد. علاوه بر این، به دلیل میل شدید منیزیم به اکسیژن، لایه اکسیدی فشرده‌ای که پس از مدت کوتاهی قرار گرفتن در معرض هوا تشکیل می‌شود، مانع از انتشار هیدروژن می‌گردد. افزایش نسبت سطح به حجم، ساده‌ترین راه برای افزایش چگالی ذخیره‌سازی هیدروژن و سرعت هیدروژنه شدن است[۴۹].

۳-۶. مقایسه و بحث فناوری‌ها

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی، در این بخش مقایسه جامعی بین فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن در سه دسته انجام می‌دهیم: ویژگی‌های فنی کلیدی، مصرف انرژی و زمینه‌های کاربردی مناسب. در (جدول ۶) مقایسه مصرف انرژی و زمینه کاربرد بین روش‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن ارائه شده است[۴۹].

جدول ۶: مقایسه مصرف انرژی و زمینه کاربرد بین روش‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن[۴۹]

روش‌ها	ذخیره هیدروژن مبتنی بر فیزیک			ذخیره هیدروژن مبتنی بر مواد			
	هیدروژن گازی		هیدروژن مایع	کرایو-فشرده	سوخت	حامل‌های آلی	هیدریدهای
	فشرده			هیدروژن	انرژی‌زا	هیدروژن	فلزی
	۳۵ مگاپاسکال	۷۰ مگاپاسکال	زیرزمین		آمونیاک / متانول		
محدودیت تکنولوژی امروزی برای کاربرد	نسبتاً ذخیره‌سازی کم سیستم ظرفیت (گرانشی و حجمی)	نسبتاً ذخیره‌سازی کم سیستم ظرفیت هزینه بالای مخزن، فقط برای وسیله نقلیه سبک	مشکلات برای یافتن مکان جغرافیایی مناسب برای ذخیره هیدروژن در زیرزمین	تبخیر انرژی مصرفی برای فرایند مایع‌سازی	اعتبارسنجی از عملکرد، دوام، ایمنی و حجم جرم تولیدی به دلیل هزینه بالا	انرژی مصرفی بالا برای فرایند هیدروژن‌زدایی جداسازی یا تصفیه گاز موردنیاز برای متانول: جذب مستقیم هوا برای تولید متانول سیز آمونیاک: انرژی مصرفی بالا برای فرایند هیدروژناسیون	هزینه بالا مواد نرخ انتشار پایین هیدروژن، انتشار دمایی نسبتاً بالا
کاربرد پتانسیلی یا امروزی		ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین	ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سبک	مقدار زیادی از هیدروژن برای مدت زمان طولانی	حمل و نقل هیدروژن به ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن، ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین	ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین و سبک	حمل و نقل هیدروژن به مسافت طولانی، ذخیره هیدروژن بلندمدت، ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین و سبک

مشخص است که فناوری‌های ذخیره‌سازی فیزیکی هیدروژن بالاترین دانسیته (۱۰۰ درصد) را دارند، درحالی‌که حامل‌های مبتنی بر مواد معمولاً دانسیته حجمی بیش‌تری نشان می‌دهند. این ویژگی، حامل‌های مبتنی بر مواد را به گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای ذخیره‌سازی میان‌مدت تا بلندمدت و انتقال هیدروژن در مسافت‌های طولانی تبدیل می‌کند. اگر چه دانسیته حجمی هیدروژن مایع قابل‌مقایسه با این فناوری‌ها است، اما دمای کرایوژنیک و مسئله تبخیر آن، هیدروژن مایع را به گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تبدیل می‌کند. به دلیل عمر چرخه‌ای طولانی سیستم، نرخ سوخت بالا و نرخ آزادسازی هیدروژن و البته خلوص، هیدروژن فشرده گازی تاکنون تنها راه‌حل ذخیره‌سازی هیدروژن در خودرو بوده است. برای افزایش دانسیته ذخیره‌سازی، توسعه فناوری‌های هیدروژن مایع و هیدروژن فشرده سرد در بین خودروسازان عمده محبوبیت فزاینده‌ای یافته است.

دسته مصرف انرژی از یک سو بر انرژی مورد نیاز برای ایجاد شرایط ذخیره‌سازی (مانند برق مورد استفاده برای فشرده‌سازی و مایع‌سازی هیدروژن، انرژی مورد نیاز برای ترکیب هیدروژن با حامل‌های شیمیایی و غیره) و از سوی دیگر بر انرژی لازم برای انجام واکنش‌های دهیدروژناسیون تمرکز دارد. به‌استثنای هیدروژن فشرده گازی و حامل‌های آلی مایع هیدروژن، برای ذخیره‌سازی هیدروژن باید حدود یک سوم انرژی موجود در هیدروژن (بر اساس ارزش حرارتی پایین) یا بیش‌تر صرف شود. حامل‌های آلی مایع هیدروژن به‌عنوان کم‌مصرف‌ترین فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن شناخته می‌شود. بااین‌حال، این درک مبتنی بر استفاده کامل از گرمای آزادشده در فرآیند هیدروژناسیون است. در مواردی که از حامل‌های آلی مایع هیدروژن برای انتقال هیدروژن در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شود، محل‌های هیدروژناسیون و دهیدروژناسیون معمولاً از نظر جغرافیایی فاصله زیادی دارند.

۴. نقاط عطف تاریخی و وضعیت کنونی فناوری

باوجود تجربه گسترده در ذخیره‌سازی گاز طبیعی و سایر فعالیت‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی، تجربه ذخیره‌سازی هیدروژن در زیرزمین، به‌ویژه هیدروژن با خلوص بالا (بیش از ۹۰ درصد)، بسیار محدود است (جدول ۲).

۴-۱. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی

غارهای نمکی، حفره‌هایی هستند که از طریق استخراج محلول در سازندهای نمکی مناسب (عمدتاً متشکل از هالیت) با استفاده از آب شیرین برای حل کردن سنگ نمک ایجاد می‌شوند[۵۰]. ویژگی‌های اطراف این غارها شامل نفوذپذیری پایین، قابلیت آب‌بندی بسیار بالا، رفتار شیمیایی خنثی نسبت به هیدروژن و خواص مکانیکی مطلوب امکان برداشت و تزریق‌های چرخه‌ای را فراهم می‌کند و اجازه می‌دهد مایعات برای مدت طولانی به‌صورت ایمن ذخیره شوند[۵۱،۵۲]. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی زیرزمینی به‌عنوان یک گزینه مناسب برای ذخیره‌سازی زمین‌شناختی برای هیدروژن شناخته شده است. در دهه گذشته، ذخیره‌سازی هیدروژن در غارهای نمکی مورد توجه چشم‌گیری قرار گرفته است و عملیات جدیدی در بریتانیا (مثل ترمال و اکوئینور، آلدبرو)، ایالات متحده (مثل یوتا)، هلند (مثل گاسونی، ویندام) و فرانسه (مثل نوول آکیتن و اترز) در حال توسعه هستند[۵۳].

۴-۲. ذخیره‌سازی در سفره‌های آب‌شور

ترکیبی از سنگ‌های متخلخل که با سنگ‌های گلی نفوذناپذیر پوشیده شده‌اند و یک لایه درپوش آب‌بندی را تشکیل می‌دهند، شرایطی را در اعماق زیرسطحی ایجاد می‌کنند که به‌طور کامل برای به دام انداختن و نگهداری گازهایی مانند متان، گاز طبیعی و کربن‌دی‌اکسید، همراه با آب‌نمک سازند، مناسب هستند. این سازندها که طی هزاران سال گازها را به‌طور ایمن نگه‌داری می‌کنند، می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس‌های عظیم باشند.

تجربه مهم در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن در سفره‌های آب‌شور در دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰، از طریق ذخیره‌سازی گاز شهری در این حفره‌ها، به‌دست‌آمده است. گاز شهری از گازسازی زغال‌سنگ تولید می‌شود که در آن اکسیژن و بخار، زغال‌سنگ را اکسید می‌کنند تا مخلوطی گازی شامل حدود ۵۰-۶۰ درصد هیدروژن، حدود ۳۰ درصد متان و حدود ۲۰ درصد کربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید تولید شود. ذخیره‌سازی گاز شهری در این سفره‌ها در فرانسه (بِین)، جمهوری چک (لوبودیس) و آلمان (انگلبورشتل، باد لاوشتات) انجام شد. طی دهه‌ها فعالیت تجاری، هیچ گزارشی از نقص در نگهداری در این سایت‌های ذخیره‌سازی گاز شهری ثبت نشد؛ هرچند، ممکن است برخی تغییرات در ترکیب گاز ذخیره‌شده به دلیل واکنش‌های بیوژئوشیمیایی در مخازن ذخیره‌سازی رخ دهد[۵۴-۵۶]. همچنین احتمال تولید هیدروژن سولفید و تولید متان توسط باکتری‌های متانوژن در مخزن وجود دارد.

در حالی‌که ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط‌های متخلخل اخیراً توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است، تنها دو مطالعه آزمایشی که تاکنون هیدروژن را تزریق و بازیابی کرده‌اند، پروژه‌های متان سبز در اتریش و آرژانتین هستند که در (جدول ۲) نیز آورده شده است[۵۷].

۵. چالش‌های عملیات چرخه‌ای

برای متعادل کردن عرضه و تقاضا در سیستم انرژی، هیدروژن باید برای زمانی که تقاضای انرژی از تولید انرژی بیش‌تر باشد ذخیره شود. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی و سنگ‌های متخلخل می‌تواند نرخ تزریق و برداشت را فراهم کند تا منبعی انعطاف‌پذیر و در مقیاس فصلی برای انرژی ایجاد شود. این تزریق و برداشت چرخه‌ای هیدروژن، فشار و دما را در اطراف چاه و تا اعماق مخزن تغییر می‌دهد و منجر به تغییراتی می‌شود که ممکن است بر یکپارچگی چاه، مخزن و کل مجموعه ذخیره‌سازی تأثیر بگذارد و باعث آسیب‌هایی مثل فعال‌سازی مجدد گسل‌ها و خرابی چاه شود. این جنبه‌های ژئومکانیکی و واکنش آن‌ها به ذخیره‌سازی هیدروژن باید ارزیابی شوند تا خطرات نشتی به حداقل برسد و یکپارچگی ذخیره‌سازی هیدروژن تضمین شود.

برای غارهای نمکی که احتمالاً نرخ چرخه‌های سریع‌تری نسبت به مخازن متخلخل تجربه می‌کنند، یکپارچگی و پایداری یک غار به عوامل ژئومکانیکی و زمین‌شناسی نمک و شکل غار و همچنین فشار گاز ذخیره‌شده بستگی دارد[۹]. در طول عملیات غارهای نمکی، فرآیندهای پیچیده مکانیکی، حرارتی

و هیدرولیکی را تجربه خواهند کرد. وضعیت تنش غار به عمق، وضعیت تنش زمین‌شناسی، فشار داخلی گاز و نرخ‌های تزریق یا برداشت بستگی دارد[۵۸]. همچنین توسط رفتار نمک و هندسه غار کنترل می‌شود که خود تحت تأثیر ناهمگونی است و این ناهمگونی بر بار توزیع تنش در طول چرخه‌های بارگذاری و تخلیه اثر می‌گذارد[۵۹,۶۰]. نمک دارای ویژگی‌هایی است که مقاومت در برابر شکستگی هیدرولیکی را فراهم می‌کند و انعطاف‌پذیر است و به‌صورت ویسکوالاستیک تحت تنش‌ها رفتار می‌کند، بنابراین توانایی ترمیم ترک‌ها و گسل‌های القایی را دارد[۶۱]. این موارد باید در انتخاب محل به حداقل برسند. ضروری است که تغییرات تنش در طول چرخه‌های تزریق و برداشت از مرز عبور نکنند، مرزی که رفتار گشادشدگی را از رفتار تراکم‌پذیری جدا می‌کند و منجر به افزایش نفوذپذیری، کاهش استحکام سنگ و خرابی احتمالی می‌شود که به از دست رفتن یکپارچگی غار می‌انجامد[۶۲]. دمای گاز در غار به دلیل فرآیندهای ترمودینامیکی و تبادل حرارت نوسان می‌کند که معمولاً به نزدیکی دیواره غار منتقل می‌شود. از آنجا که نمک ضریب انبساط حرارتی نسبتاً پایینی دارد، تغییرات حرارتی کوچک در دیواره غار می‌تواند تغییرات تنش نسبتاً بزرگی ایجاد کند و بر یکپارچگی غار تأثیر بگذارد[۶۳]. فشار داخلی غار باید محدود شود تا اطمینان حاصل شود که تنش‌های غار زیر مرز گشادشدگی باقی می‌مانند. این کار احتمال وقوع ترک‌های ریز و گسترش آسیب را که ممکن است به خرابی ناشی از خستگی منجر شود، کاهش می‌دهد[۶۴].

برای ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط متخلخل، جنبه‌های ژئومکانیکی در بسیاری از جهات مشابه ذخیره‌سازی گاز طبیعی هستند و شامل تغییرات فشار دوره‌ای (سالانه یا فصلی)، تعامل شیمیایی کوتاه‌مدت و بلندمدت هیدروژن با سنگ‌ها و گسل‌ها و تأثیر تنش بر رفتار مکانیکی می‌شوند[۶۵]. برای حفظ یکپارچگی محل ذخیره‌سازی، بسیار مهم است که فشار، زیر فشار ورود مویرگی و فشارهای شروع شکستگی سنگ‌های پوششی و گسلی نگه داشته شود[۶۶,۶۷]. ترشوندگی و نقش آب‌بندی در ذخیره‌سازی زمین‌شناختی هیدروژن در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است[۶۸,۶۹].

در مواردی که هیدروژن در مخازن گازی تخلیه‌شده ذخیره می‌شود، فشارهای مخزن نباید از فشارهای اولیه پیش از تولید فراتر روند، زیرا این امر ممکن است به شکست ژئومکانیکی مخزن منجر شود[۷۰]. توجه داشته باشید که به دلیل دانسیته پایین‌تر هیدروژن در مقایسه با متان، حجم هیدروژنی که می‌تواند به‌طور ایمن در مخازن گازی تخلیه‌شده ذخیره شود، کم‌تر از مقدار گاز اولیه موجود است[۷۱].

در چرخه تولید هیدروژن دانسیته پایین و گرانروی کم سیال، مؤثر است. بااین‌حال، مدل‌سازی کامپیوتری نشان می‌دهد که تولید انبوه هیدروژن از یک سفره آب نمکی می‌تواند به ایجاد یک منطقه کم‌فشار در اطراف چاه تولید منجر شود[۷۲]. اگر محل ذخیره‌سازی به‌صورت محفظه‌بندی شده (تقسیم‌شده به محفظه‌های جدا با شرایط متفاوت) باشد و ارتباط فشاری محدود یا هیچ ارتباطی بین محل واقعی و سازند اطراف وجود نداشته باشد، ظرفیت ذخیره‌سازی بسیار پایین خواهد بود، مگر این‌که اقدامات بیش‌تری اعمال شود. بااین‌حال، اگر این ساختارهای محفظه‌بندی شده، میدان‌های گازی تخلیه‌شده باشند، مانند جنوب دریای شمال، فشار پس از تولید و اشباع آب آن‌ها می‌تواند نسبتاً پایین باشد. گاز تزریق شده یک منطقه کم‌فشار را پر می‌کند و ظرفیت عمدتاً به فشرده‌سازی گاز وابسته است.

استراتژی‌های بهینه‌سازی برای اطمینان از عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس بزرگ در محیط متخلخل هنوز نادر هستند، اما تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که نسبت دقیق گاز بالشتکی[1] به گاز کاری و همچنین یک روش انتخاب دقیق محل می‌تواند کارایی عملیات را افزایش دهد[۷۲]. دوره‌ای بودن ذخیره‌سازی هیدروژن به نوسانات تنش در داخل مخزن و گسل‌های نزدیک منجر خواهد شد که ممکن است باعث فشردگی مخزن، فرونشست یا فعال‌سازی مجدد گسل‌ها شود. چرخه‌ای بودن ذخیره‌سازی هیدروژن منجر به نوسانات تنش در مخزن و گسل‌های مجاور آن می‌شود که ممکن است باعث فشردگی مخزن، فرونشست یا فعال‌سازی مجدد گسل‌ها گردد.

ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط‌های متخلخل ممکن است به واکنش‌های انحلال-رسوب منجر شود که به‌نوبت خود ممکن است به افزایش تغییر شکل الاستیک

1. Cushion Gas

و غیرالاستیک مخزن منجر شود[۷۳]. علاوه بر این، تورم یا خشک شدن رس‌ها در داخل مخزن و سنگ‌پوششی ممکن است طی عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن رخ دهد که می‌تواند به ایجاد مسیرهای نشت منجر شود[۷۴].

الف) تعیین دقیق حد بالای فشار تزریق

ب) بهینه‌سازی مکان چاه‌ها برای مدیریت فشار

ج) انجام ارزیابی دقیق داده‌های تاریخی درباره فشار مخزن، روش‌های تحریک و تاریخچه مدیریت تولید مرتبط با انرژی

د) اطمینان از اینکه طراحی حفاری چاه‌های جدید از ایجاد شکستگی‌های جدید جلوگیری کند و مهم‌تر از همه

ه) انجام آزمایش یکپارچگی چاه برای تمام چاه‌های موجود.

۶. تحلیل هوش‌مصنوعی، مدل‌سازی و نرم‌افزاری

شبکه عصبی مصنوعی یک مدل محاسباتی است که از ساختار مغز انسان و شبکه‌های عصبی بیولوژیکی الهام گرفته شده است. این شبکه از واحدهای ساده‌ای به نام نورون[1] تشکیل شده که در لایه‌های مختلف (ورودی، پنهان و خروجی) مرتب شده‌اند. هر نورون داده‌های ورودی را دریافت می‌کند، آن‌ها را با وزن‌های خاصی (که اهمیت هر ورودی را نشان می‌دهند) ترکیب می‌کند و در نهایت یک خروجی تولید می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی، هسته اصلی یادگیری عمیق[2] است. KNN یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های دسته‌بندی و رگرسیون است. ایده آن بر اساس شباهت است. این الگوریتم تمام داده‌های آموزشی را به خاطر می‌سپارد. هنگامی‌که یک داده جدید به آن داده می‌شود، فاصله آن داده از تمام داده‌های موجود را محاسبه می‌کند. سپس، K داده‌ای که بیش‌ترین شباهت (کم‌ترین فاصله) را به داده جدید دارند، انتخاب می‌شوند.

ذخیره‌سازی ایمن و کارآمد هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، یکی از چالش‌های کلیدی در اقتصاد هیدروژنی است. هوش مصنوعی و به‌طور خاص مدل‌هایی مانند ANN و KNN می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به حل این چالش کمک کنند. کشف و طراحی مواد جدید برای ذخیره‌سازی هیدروژن (کاربرد ANN)، در یافتن موادی است که بتوانند هیدروژن را با دانسیته بالا، در دما و فشار متعارف و با ایمنی کافی جذب و ذخیره کنند (مانند هیدریدهای فلزی، چارچوب‌های آلی-فلزی[3] و نانومواد). کاربرد دیگر ANN بهینه‌سازی فرآیندها و کنترل سیستم‌های ذخیره‌سازی در مدیریت شرایط عملیاتی (دما، فشار، سرعت شارژ/دشارژ) در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن برای به حداکثر رساندن کارایی و ایمنی است. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و شناسایی الگوها در آزمایش‌های مربوط به جذب و واجذب هیدروژن، نیازمند تولید حجم زیادی از داده‌های پیچیده توسط ANN و KNN می‌باشد. هر دو می‌توانند برای تحلیل این داده‌ها و یافتن الگوهای پنهان به کار روند.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به‌عنوان مهم‌ترین بخش توسعه فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی هیدروژن در ایران عمل می‌کنند. این ابزارها امکان تحلیل سیستم‌های پیچیده را در چندین سطح، از مقیاس اتمی تا مقیاس سیستم کامل، فراهم می‌سازند.

در سطح اتمی و مولکولی، از روش‌هایی نظیر دینامیک مولکولی و تئوری تابعی دانسیته به‌طور گسترده‌ای برای تحقیق در مورد مواد پیشرفته ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. هدف اصلی این مطالعات، بررسی برهم‌کنش هیدروژن با مواد میزبان مختلف، از جمله هیدریدهای فلزی پیچیده (مانند هیدرید منیزیم و سدیم آلانیت) و جاذب‌های متخلخل نوین مانند چارچوب‌های آلی-فلزی و نانومواد کربنی است. این مدل‌سازی‌ها به غربالگری سریع مواد، پیش‌بینی سینتیک جذب یا واجذب و شناسایی مکانیسم‌های بنیادی در سطح اتمی می‌پردازند.

در سطح مخازن، شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای طراحی و بهینه‌سازی مخازن ذخیره‌سازی به کار گرفته می‌شوند. نرم‌افزارهایی مانند ANSYS Fluent و COMSOL Multiphysics برای مدل‌سازی میدان‌های جریان، انتقال حرارت و توزیع فشار در حین فرآیندهای شارژ و دشارژ مخازن فشار بالا و بسترهای هیدرید فلزی استفاده می‌شوند.

در سطح سیستم، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی فرآیند (مانند Aspen HYSYS) و پلتفرم‌های دینامیک سیستم (مانند MATLAB) برای یکپارچه‌سازی واحد ذخیره‌سازی هیدروژن با سایر اجزای سیستم انرژی، از جمله الکترولایزرها،

1. Neuron
2. Deep Learning
3. metal-organic frameworks - MOFs

پیل‌های سوختی و منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این مدل‌های یکپارچه به ارزیابی کارایی ترمودینامیکی، پایداری دینامیکی و بهینه‌سازی اقتصادی کل سیستم می‌پردازند [۷۵].

۷. موانع اصلی و فرصت‌های آینده

تجربه چندین دهه ذخیره‌سازی مخلوط گازهای غنی از هیدروژن، امکان کاهش ریسک واکنش‌های بیولوژیکی و ژئوشیمیایی ناشی از تزریق هیدروژن را از طریق انتخاب مکان مناسب و استراتژی‌های کاهش فراهم می‌کند.

سازندهای ذخیره‌سازی هیدروژن که شامل یک مخزن مناسب، سنگ‌پوششی که هیدروژن ذخیره‌شده را حفظ کند و یک ساختار تله مانند که امکان بازتولید کارآمد را فراهم کند، می‌تواند راه‌حل انعطاف‌پذیرتری از نظر جغرافیایی برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ نسبت به غارهای نمکی ارائه دهد[۷۶]. به دلیل دانسیته پایین هیدروژن، حجم‌های بزرگ هیدروژن تزریق‌شده، مایعات موجود در منافذ (معمولاً آب‌شور و یا هیدروکربن‌های باقی‌مانده) را جابه‌جا می‌کند و منجر به افزایش فشار سازند می‌شود که اگر به‌درستی مدیریت نشود، می‌تواند یکپارچگی محل ذخیره‌سازی را به خطر بیندازد. این موضوع، نیاز به پایش فشار در مخزن ذخیره‌سازی را برجسته می‌کند.

تحقیقات اخیر در مورد گازهای بالشتکی جایگزین، مانند نیتروژن، متان یا کربن‌دی‌اکسید، برای کاهش هزینه‌ها یا ذخیره گازهای گلخانه‌ای اضافی، چشم‌انداز امیدوارکننده دیگری است. استفاده از این گازهای بالشتکی جایگزین می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌ای در ذخیره‌سازی آبخوان شور را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد[۷۷]. با این حال، خطر اختلاط گازها نگران‌کننده است، به‌ویژه زمانی که میزان اختلاط بین گاز کاری و گاز بالشتکی به سطحی برسد که کیفیت تولید را کاهش دهد، به‌طوری‌که جداسازی اجزای سطحی برای دستیابی به خلوص مورد نیاز هیدروژن ضروری شود[۷۸]. با این حال، بسته به کاربردهای هیدروژن تولید شده، ممکن است پردازش سطحی بدون توجه به سطح اختلاط در مخزن مورد نیاز باشد.

در ذخیره‌سازی در محیط متخلخل، هیدروژن ممکن است به‌طور بالقوه واکنش‌های ژئوشیمیایی با سنگ‌ها و سیالات سازند داشته باشد که می‌تواند کیفیت مخزن را بهبود بخشد یا کاهش دهد[۷۹]. علاوه بر این، برای ذخیره‌سازی هیدروژن، تأثیر این واکنش‌ها بر عملیات ذخیره‌سازی نیاز به اعتبارسنجی دارد، زیرا واکنش‌های معدنی اغلب در دوره‌های طولانی رخ می‌دهند و علاوه بر این، هیدروژن حلالیت پایینی در آب دارد. سوابق تاریخی پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در (جدول ۷) مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل انحلال قابل‌توجهی در مواد معدنی ایجاد نمی‌کند، خطری که با خشک شدن تدریجی اشباع آب در چرخه‌های تزریق و تولید بعدی بیش‌تر کاهش می‌یابد[۷۹].

افزایش غلظت هیدروژن در یک مکان ذخیره‌سازی ممکن است رشد میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده هیدروژن را تحریک کند که انتظار می‌رود تأثیراتی بر ذخیره‌سازی در محیط متخلخل داشته باشند. رشد آن‌ها می‌تواند منجر به مصرف هیدروژن، تولید متان، رشد فیلم که مسیرهای جریان سیال را مسدود می‌کند، رسوب مواد معدنی و تولید سولفید هیدروژن شود که می‌تواند به خوردگی زیرساخت‌های فلزی منجر گردد.

غارهای نمکی و میدان‌های گازی تخلیه‌شده محدوده وسیعی از مقیاس‌ها و قابلیت تحویل هیدروژن را فراهم می‌کنند که قادر به پاسخگویی به نیازهای فصلی و روزانه انرژی ما هستند. غارهای نمکی انعطاف‌پذیری تحویل کوتاه‌مدت را همراه با یک سیستم عملیاتی چرخه‌ای تثبیت‌شده با ریسک کاهش‌یافته تولید هیدروژن ارائه می‌دهند. با این حال، آن‌ها از نظر جغرافیایی محدود هستند و نمی‌توانند مقیاس ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن مورد نیاز برای کربن‌زدایی عمیق سیستم انرژی جهانی را فراهم کنند. میدان‌های گازی تخلیه‌شده قادر به تأمین ذخیره‌سازی انرژی فصلی هستند[۸۰،۸۱]. این موضوع به‌ویژه در صورتی مرتبط است که هیدروژن تولیدشده از اصلاح بخار متان همراه با جذب و ذخیره کربن (هیدروژن آبی) در فاز انتقالی استفاده شود، درحالی‌که پیشرفت‌های فناوری مورد نیاز و کاهش هزینه‌ها برای تولید هیدروژن از انرژی تجدیدپذیر و الکترولیز (هیدروژن سبز) به دست آید. با این حال، این محاسبات بر اساس برآوردهای حجمی استاتیک است و اولاً نیاز به گاز بالشتکی را به‌درستی در نظر نمی‌گیرد و ثانیاً اطلاعاتی در مورد نرخ‌های تزریق و تولید قابل‌دستیابی ارائه نمی‌دهد. میدان‌های گازی طی دهه‌ها خالی شده‌اند.

جدول ۷: سوابق تاریخی پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن [۷۹]

مکان	نوع ذخیره‌سازی	ترکیب گاز	حجم مخزن(m^3)	عمق(m)	وضعیت	سال
Teesside، بریتانیا	غارنمکی (نمک بستر)	% 4-3 CO_2، % 95 H_2	۳×۷۰۰۰۰	۳۵۰	فعال	۱۹۷۲
Clemens، آمریکا	غارنمکی (گنبد نمکی)	% 95 H_2	۵۸۰۰۰۰	۱۰۰۰	فعال	۱۹۸۳
MossBluff، آمریکا	غارنمکی (گنبد نمکی)	H_2	۵۶۶۰۰۰	۱۲۰۰	فعال	۲۰۰۷
Spindletop، آمریکا	غارنمکی (گنبد نمکی)	% 95 H_2	۹۰۶۰۰۰	۱۳۴۰	فعال	۲۰۰۷
STOPIL-H2,Etzel، فرانسه	غارنمکی	--	۵۷۰۰۰۰	--	تحت توسعه	--
Kiel، آلمان	غارنمکی	گاز شهری	۷٫۸×۱۰^۷	۱۳۳۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	--
BadLauchstädt، آلمان	غار نمکی و محیط متخلخل میدان گاز تخلیه شده	گاز شهری	۶٫۸×۱۰^۸	۸۰۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	--
UndergroundSun Storage، اتریش	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	% 10 H_2	۱۱۵۰۰۰	۱۲۰۰	تحت توسعه	۲۰۱۷
Yakshunovskoe Field، روسیه	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	--	--	--	فعال	۲۰۱۰
Kirchheiligen، آلمان	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	گاز شهری	۲.۴×۱۰^۸	۹۰۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	--
Hähnlein، آلمان	مخزن متخلخل (سفره آبی)	گاز شهری	۱.۶×۱۰^۸	۵۰۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	--
Eschenfelden، آلمان	مخزن متخلخل (سفره آبی)	گاز شهری	۱.۶×۱۰^۸	۶۰۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	--
Ketzin، آلمان	مخزن متخلخل (سفره آبی)	گاز شهری	۱.۳×۱۰^۸	۲۵۰-۴۰۰	برطرف شده	۱۹۶۴ -۲۰۰۰
Lobodice، جمهوری چک	مخزن متخلخل (سفره آبی)	گاز شهری	۱×۱۰^۸	۴۰۰-۵۰۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	۱۹۶۵ -۱۹۹۵
Beynes، فرانسه	مخزن متخلخل (سفره آبی)	گاز شهری	۳.۳×۱۰^۸	۴۳۰	برای ذخیره‌سازی گازطبیعی پس گرفته شده	۱۹۵۶ -۱۹۷۲
HyBRIT، سوئد	غار سنگی	% 100 H_2	۱۰۰	۳۰	تحت توسعه	۲۰۱۶

۹. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، تاکنون هیچ شکل واحدی از هیدروژن بر کل زنجیره ارزش هیدروژن مسلط نشده است. با توجه به نیازهای مختلف ذخیره‌سازی (مقدار، مدت‌زمان و غیره)، مشخصات متفاوت حمل‌ونقل (فاصله، حجم و غیره) و مصارف نهایی گوناگون، حالت فیزیکی و شیمیایی هیدروژن باید تعدیل شود تا به اهداف اقتصادی دست یابد؛ بنابراین، ممکن است لازم باشد سیستم‌های زیرساختی متفاوتی برای پشتیبانی از سناریوهای کاربردی مختلف ایجاد شوند. از آنجا که سلول‌های سوختی هیدروژن به آلودگی گازی بسیار حساس هستند، زیرساخت هیدروژن مربوطه (برای خودروهای برقی سلول سوختی، تولید برق با سلول سوختی و غیره) معمولاً بر اساس زیرساخت فناورانه بالغ‌تر هیدروژن خالص در حالت گازی و یا مایع ساخته می‌شود. خط لوله مقرون به‌صرفه‌ترین روش برای انتقال حجم عظیمی از هیدروژن گازی فشرده در مسافت‌های طولانی است. بااین‌حال، ساخت آن‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالایی است. در سناریوهای کاربردی شامل ذخیره‌سازی هیدروژن میان‌مدت و بلندمدت، فناوری‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد به دلیل دانسیته حجمی بالاتر، پایداری شیمیایی و ایمنی بهتر ترجیح داده می‌شوند. به‌محض حل مشکل فرآیند انرژی‌بر آزادسازی هیدروژن در آن‌ها، آمونیاک و حامل‌های آلی هیدروژن علاوه بر هیدروژن مایع می‌توانند حامل‌های امیدوارکننده‌ای برای حمل هیدروژن در مسافت‌های طولانی باشند. ترمودینامیک و سینتیک نامطلوب در فرآیندهای هیدروژنه کردن و دهیدروژنه‌کردن، در حال حاضر اصلی‌ترین موانع در راه کاربرد و تجاری‌سازی گسترده هیدریدهای فلزی هستند. بالاخره هر کشور و منطقه باید استراتژی خود را برای ساخت زیرساخت مبتنی بر هیدروژن با توجه دقیق به ویژگی‌های انرژی خود و نقشش در سیستم جهانی انرژی هیدروژنی طراحی کند. برای کشورها و مناطقی با سهم بالاتر انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقیق و توسعه در تولید هیدروژن با پیوند پیشرفته با انرژی‌های تجدیدپذیر و ساخت زیرساخت برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و انتقال داخلی هیدروژن باید در اولویت قرار گیرد. برای کشورها و مناطقی که وابستگی بالایی به واردات یا صادرات هیدروژن دارند (مانند ژاپن و استرالیا)، ذخیره‌سازی ایمن، کم‌هزینه و کارآمد میان‌مدت و بلندمدت و انتقال بین‌قاره‌ای هیدروژن و یا حامل‌های آن (مانند حامل‌های آلی هیدروژن و هیدریدهای فلزی) باید تمرکز اصلی باشد. برای کشورها و مناطقی با انرژی تجدیدپذیر متمرکز، مصرف انرژی بالا و نیاز زیاد به مواد اولیه شیمیایی (مانند چین)، تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ، ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و انتقال داخلی هیدروژن باید اهداف اصلی در ساخت زیرساخت هیدروژنی باشد. علاوه بر این، سوخت‌های نیروگاهی می‌توانند به‌عنوان پیوندی بین بخش‌های مختلف انرژی و صنایع شیمیایی عمل کنند.

با توجه به چالش‌های فنی، اقتصادی و ایمنی موجود در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن، پیشنهاداتی برای تحقیقات و اقدامات آتی ارائه می‌گردد. تمرکز تحقیقات بر سنتز و بهینه‌سازی مواد نوین از قبیل نانوکامپوزیت‌های هیدرید فلزی با سینتیک جذب و واجذب سریع‌تر و چارچوب‌های آلی-فلزی با ظرفیت جذب سطحی بالاتر در دما و فشار نزدیک به محیط، امری ضروری است. انجام مطالعات شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای کاهش هزینه‌های تولید مخازن کامپوزیتی فشار بالا و همچنین بهبود سیستم‌های عایق‌بندی برای کاهش تلفات تبخیر در مخازن هیدروژن مایع پیشنهاد می‌شود. ایجاد و بومی‌سازی استانداردها و پروتکل‌های ایمنی برای طراحی، تولید، نصب و بهره‌برداری از تمامی سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، جهت جلب اعتماد عمومی و تضمین ایمنی، بسیار حیاتی است.

مراجع:

[1]. Hanley, E.S., J. Deane, and B.Ó. Gallachóir, The role of hydrogen in low carbon energy futures–A review of existing perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 82: p. 3027–3045.

[2]. McPherson, M., N. Johnson, and M. Strubegger, The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions. Applied Energy, 2018. 216: p. 649–661.

[3]. UNIDO, Towards Hydrogen Societies: Expert Group Meeting. 2018.

[4]. EIA, U., California's curtailment of solar electricity generation continues to increase. 2021.

[5]. Lemmon, E.W., Thermophysical properties of fluid systems. NIST chemistry WebBook, 2010.

M., Okoroafor, R., ... & Hoteit, H. (2025). Recent progress in underground hydrogen storage. Energy & Environmental Science.

[15]. Łukajtis, R., et al., Hydrogen production from biomass using dark fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 91: p. 665–694.

[16]. Cao, L., et al., Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. Environmental research, 2020. 186: p. 109547.

[17]. Kumar, S.S. and V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis–A review. Materials Science for Energy Technologies, 2019. 2(3): p. 442–454.

[18]. Safari, F. and I. Dincer, A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. Energy Conversion and Management, 2020. 205: p. 112182.

[19]. Reitenbach, V., Ganzer, L., Albrecht, D., & Hagemann, B. (2015). Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. Environmental Earth Sciences, 73(11), 6927-6937.

[20]. Global, I., Hydrogen review 2021. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021.

[21]. Union, I., Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels. http://ww. w. xploit-eu. com/pdfs/Europe, 2014. 202020: p. 20.

[22]. Commission, E.T., Making the hydrogen economy possible: Accelerating clean hydrogen in an electrified economy. 2021.

[23]. Dutta, S., A review on production, storage

[6]. Yin, L. and Y. Ju, Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes. Frontiers in Energy, 2020. 14: p. 530–544.

[7]. Chabab, S., et al., Measurements and predictive models of high-pressure H_2 solubility in brine (H_2O+ NaCl) for underground hydrogen storage application. International Journal of Hydrogen Energy, 2020. 45(56): p. 32206–32220.

[8]. Miao Yang , R.H., Stefano Berrettoni , Bernd Sprecher , Baodong Wang, A review of hydrogen storage and transport technologies Clean Energy, February 2023. 7(1): p. 190–216.

[9]. Ozarslan, A., Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. International journal of hydrogen energy, 2012. 37(19): p. 14265–14277.

[10]. Amid, A., D. Mignard, and M. Wilkinson, Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. International journal of hydrogen energy, 2016. 41(12): p. 5549–5558.

[11]. Sáinz-García, A., et al., Assessment of feasible strategies for seasonal underground hydrogen storage in a saline aquifer. International journal of hydrogen energy, 2017. 42(26): p. 16657–16666.

[12]. Johannes Miocic, N.H., Katriona Edlmann, Jonathan Scafidi,v, Underground hydrogen storage: a review. 2023. 528: p. 73 – 86.

[13]. Nikolaidis, P. and A. Poullikkas, A comparative overview of hydrogen production processes. Renewable and sustainable energy reviews, 2017. 67: p. 597–611.

[14]. Ali, M., Isah, A., Yekeen, N., Hassanpouryouzband, A., Sarmadivaleh,

of hydrogen and its utilization as an energy resource. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014. 20(4): p. 1148–1156.

[24]. US Department of Energy. Hydrogen Storage (Chapter 3.3 from Multi-Year Research, D., and Demonstration Plan). DOE, 2015. https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/05/f22/fcto_myrdd_storage.pdf, 2015.

[25]. Barthélémy, H., M. Weber, and F. Barbier, Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. International journal of hydrogen energy, 2017. 42(11): p. 7254–7262.

[26]. Legault M. Pressure vessel tank types. 2012. https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessel-tank-types (14 September 2021, d.l.a.

[27]. Rivard, E., M. Trudeau, and K. Zaghib, Hydrogen storage for mobility: a review. Materials, 2019. 12(12): p. 1973.

[28]. Parks, G., et al., Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs. 2014, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).

[29]. Elgowainy, A., et al., Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. International journal of hydrogen energy, 2014. 39(35): p. 20197–20206.

[30]. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress11/iv_e_3_law_2011.pdf (14 September 2021, date last accessed)., L.K.F.A.P.R.I.E.C.A.o.H.S.M.a.O.-B.S.D.H.a.F.C.P.

[31]. FIBA Technologies Inc. High Pressure Hydrogen Type II Vessel. 2014. https://www.fibatech.com/2014/11/24/type-2-hydrogen-vessel/ (1 August 2022, d.l.a.

[32]. Tarkowski, R., Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 105: p. 86–94.

[33]. Zivar D, K.S., Foroozesh J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. International journal of hydrogen energy. 2021 Jul 1;46(45):23436-62.

[34]. Valenti G. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: Gupta RB, B.A., Veziroğlu TN (eds). Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure. Sawston, UK: Woodhead Publishing, 2016, 27–51.

[35]. Derking, H., et al., Liquid hydrogen storage: status and future perspectives. Cryogenic Heat and Mass Transfer, 2019.

[36]. Petitpas, G., Boil-off losses along LH2 pathway. 2018, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).

[37]. Swanger, A., et al. Large scale production of densified hydrogen to the triple point and below. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. IOP Publishing.

[38]. Brunner, T. and O. Kircher, Cryo-compressed hydrogen storage. Hydrogen science and engineering: materials, processes, systems and technology, 2016: p. 711–732.

[39]. Yanxing, Z., et al., Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy,

Hirscher, Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. International journal of hydrogen energy, 2007. 32(9): p. 1121–1140.

[49]. Zaluska, A., L. Zaluski, and J. Ström–Olsen, Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage. Journal of Alloys and Compounds, 1999. 288(1-2): p. 217–225.

[50]. Li, J., et al., Modeling the construction of energy storage salt caverns in bedded salt. Applied Energy, 2019. 255: p. 113866.

[51]. Evans, D., et al., Salt cavern exergy storage capacity potential of UK massively bedded halites, using compressed air energy storage (CAES). Applied Sciences, 2021. 11(11): p. 4728.

[52]. Lux, K.-H., Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: Geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. 2009.

[53]. Le Duigou, A., et al., Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. 42(36): p. 22987–23003.

[54]. Buzek, F., et al., Carbon isotope study of methane production in a town gas storage reservoir. Fuel, 1994. 73(5): p. 747–752.

[55]. Kruck, O., et al., Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe. KBB Undergr. Technol. GmbH, 2013: p. 1–32.

[56]. Panfilov, M., Underground and pipeline hydrogen storage, in Compendium of hydrogen energy. 2016, Elsevier. p. 91–115.

2019. 44(31): p. 16833–16840.

[40]. Ahluwalia, R., et al., Supercritical cryo-compressed hydrogen storage for fuel cell electric buses. International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(22): p. 10215–10231.

[41]. Xu, Z., et al., Supply system of cryo-compressed hydrogen for fuel cell stacks on heavy duty trucks. international journal of hydrogen energy, 2020. 45(23): p. 12921–12931.

[42]. Stolten, D., R.C. Samsun, and N. Garland, Fuel cells: data, facts, and figures. 2016: John Wiley & Sons.

[43]. Perera, M. S. A. (2023). A review of underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: Insights into various rock-fluid interaction mechanisms and their impact on the process integrity. Fuel, 334, 126677.

[44]. Rao, P.C. and M. Yoon, Potential liquid-organic hydrogen carrier (LOHC) systems: A review on recent progress. Energies, 2020. 13(22): p. 6040.

[45]. Yan, J., et al., Dehydrogenation of methylcyclohexane over PtSn supported on MgAl mixed metal oxides derived from layered double hydroxides. International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(19): p. 9343–9352.

[46]. Hirscher, M. and M. Becher, Hydrogen storage in carbon nanotubes. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2003. 3(1-2): p. 3–17.

[47]. Mohan, M., et al., Hydrogen storage in carbon materials—A review. Energy Storage, 2019. 1(2): p. e35.

[48]. Sakintuna, B., F. Lamari-Darkrim, and M.

scale hydrogen storage in porous media–the scientific challenges. Energy & Environmental Science, 2021. 14(2): p. 853–864.

[66]. Vavra, C.L., J.G. Kaldi, and R.M. Sneider, Geological applications of capillary pressure: a review. AAPG bulletin, 1992. 76(6): p. 840–850.

[67]. Miocic, J.M., G. Johnson, and C.E. Bond, Uncertainty in fault seal parameters: implications for CO_2 column height retention and storage capacity in geological CO_2 storage projects. Solid earth, 2019. 10(3): p. 951–967.

[68]. Hashemi, L., et al., A comparative study for H_2–CH_4 mixture wettability in sandstone porous rocks relevant to underground hydrogen storage. Advances in Water Resources, 2022. 163: p. 104165.

[69]. Ali, M., et al., Assessment of wettability and rock-fluid interfacial tension of caprock: Implications for hydrogen and carbon dioxide geo-storage. International Journal of Hydrogen Energy, 2022. 47(30): p. 14104–14120.

[70]. Tenthorey, E., et al., Modelling the geomechanics of gas storage: A case study from the Iona gas field, Australia. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013. 13: p. 138–148.

[71]. Birkholzer, J.T., Q. Zhou, and C.-F. Tsang, Large-scale impact of CO_2 storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. International journal of greenhouse gas control, 2009. 3(2): p. 181–194.

[72]. Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. Renewable and Sustainable

[57]. Biegger, P., F. Kittinger, and M. Lehner. Underground Sun Conversion. in Book of Abstracts. 2018.

[58]. Ramesh Kumar, K., et al., Geomechanical simulation of energy storage in salt formations. Scientific Reports, 2021. 11(1): p. 19640.

[59]. Spiers, C., et al., Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. Geological Society, London, Special Publications, 1990. 54(1): p. 215–227.

[60]. Asgari, A., et al., Stability analysis of salt cavern gas storage using 2D thermo-hydro-mechanical finite-element software. Journal of Mining and Environment, 2020. 11(1): p. 77–97.

[61]. Urai, J., J. Schmatz, and J. Klaver, Over-pressured salt solution mining caverns and leakage mechanisms Phase 1: Micro-scale processes (Project KEM-17), MaP–Microstructure and Pores GmbH. Aachen. [Google Scholar], 2019.

[62]. Hunsche, U. and A. Hampel, Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. Engineering geology, 1999. 52(3-4): p. 271–291.

[63]. Leister, N., et al., Salt Cavern Appraisal for Hydrogen and Gas Storage. Stage 2. 2018, ETI, Atkins.

[64]. Khaledi, K., et al., Stability and serviceability of underground energy storage caverns in rock salt subjected to mechanical cyclic loading. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2016. 86: p. 115–131.

[65]. Heinemann, N., et al., Enabling large-

Energy Reviews, 105, 86-94.

[73]. Pijnenburg, R., et al., Inelastic deformation of the Slochteren sandstone: Stress-strain relations and implications for induced seismicity in the Groningen gas field. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019. 124(5): p. 5254–5282.

[74]. Wentinck, H.M. and A. Busch, Modelling of CO_2 diffusion and related poro-elastic effects in a smectite-rich cap rock above a reservoir used for CO_2 storage. 2017.

[75]. Zahra Amiri, Negar ShahedAli,Faezeh Barzegari, Application of artificial intelligence in exploitation of hydrocarbon reservoirs,1403, https://civilica.com/doc/2047335/

[76]. Zivar, D., S. Kumar, and J. Foroozesh, Underground hydrogen storage: A comprehensive review. International journal of hydrogen energy, 2021. 46(45): p. 23436–23462.

[77]. Misra, B., et al. The use of inert base gas in underground natural gas storage. in SPE Unconventional Resources Conference/ Gas Technology Symposium. 1988. SPE.

[78]. Pfeiffer, W.T. and S. Bauer, Subsurface porous media hydrogen storage–scenario development and simulation. Energy Procedia, 2015. 76: p. 565–572.

[79]. Hassanpouryouzband, A., et al., Thermodynamic and transport properties of hydrogen containing streams. Scientific data, 2020. 7(1): p. 222.

[80]. Mouli-Castillo, J., N. Heinemann, and K. Edlmann, Mapping geological hydrogen storage capacity and regional heating demands: An applied UK case study. Applied Energy, 2021. 283: p. 116348.

[81]. Scafidi, J., et al., A quantitative assessment of the hydrogen storage capacity of the UK continental shelf. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. 46(12): p. 8629–8639.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 12 / Issue 4 / NO. 24 / Winter 2026 / Pages 36-57

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

A Review of Hydrogen Gas Storage Methods as an Energy Carrier

Negar Shahedali[1], Faezeh Barzegari[1], Mehdi Razavifar[2*]

1. B.Sc. Student, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:
Received: 14 October 2025
Revised: 15 November 2025
Accepted: 18 November 2025

Keywords:
Hydrogen
Energy Carrier
Underground Storage
Oil and Gas Reservoirs
Sustainable Energy Production

ABSTRACT

Hydrogen, as a key component in decarbonizing the global energy system, plays a vital role in replacing fossil fuels in various sectors, including industry, power generation, transportation, and heating. To achieve this goal, in addition to reducing hydrogen production costs, the development of efficient infrastructure for its storage, transportation, and distribution is essential. Hydrogen storage is primarily accomplished through two main methods: physical storage, which involves storing hydrogen in compressed gas, liquid, or supercritical states, and material-based storage, such as using liquid organic hydrogen carriers, metal hydrides, or synthetic fuels. Additionally, underground hydrogen storage is emerging as a promising solution, although practical experience in this area is still limited. Despite hydrogen's high potential in renewable energy systems, there are numerous scientific and operational challenges, including storage safety, infrastructure optimization, and cost management. This study comprehensively investigates underground hydrogen storage and presents the approaches to this technology. The results presented in this article lay a good foundation for using this method in Iran with the aim of producing sustainable energy.

DOR: 20.1001.1.2510.1111.1404.08.27

How to cite this article

N. Shahedali, F. Barzegari, I. Bakhoda, M. Razavifar, Hydrogen, Energy Carrier, Underground Storage, Oil and Gas Reservoirs, Sustainable Energy Production. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(4): 36-57. (https://ijge.irangi.org/issue_51967_53307.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: m.razavifar@tabrizu.ac.ir, (M. Razavifar).

Available online 21 December 2025
25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.
This is an open access article under the CC BY license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)