

## بررسی فناوری نوین تبدیل توان به گاز

مهدی دیمی دشت‌بیاض<sup>۱</sup>، امیر ابراهیمی مقدم<sup>۲</sup>، سید ایمان پیش‌بین<sup>۳</sup>، حمیده شیخانی<sup>۴</sup>، احمد ابراهیمی مقدم<sup>۵</sup>

۱ استادیار مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، amir\_ebrahimi\_051@mshdiau.ac.ir

۳ رئیس امور پژوهش و فناوری شرکت گاز خراسان رضوی، مشهد

۴ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۵ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵

### چکیده

امروزه به دلیل نگرانی‌های موجود در مورد مسائل زیست‌محیطی و نیز در مورد قابلیت اطمینان منابع انرژی، تولید برق با بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر (نو)، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. به همین دلیل به کارگیری سیستم‌های ذخیره انرژی در نقاط مختلف سیستم قدرت ضروری است، تا تعادل بین تولید و مصرف برقرار گردد و یا اینکه برای بازه‌های زمانی که تولید کمتر از مصرف است، بتوان ذخیره‌سازی انجام داد. در این مقاله، نخست برخی از روش‌های مرسوم ذخیره‌سازی انرژی معرفی شده و سپس به معرفی فناوری نوظهوری با عنوان تبدیل توان به گاز<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود. اساس این فناوری ذخیره‌سازی انرژی از طریق تبدیل توان به گاز است. یکی از پرکاربردترین روش‌ها در این فناوری، بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تولید هیدروژن از طریق فرایند الکترولیز و سپس ذخیره‌سازی هیدروژن تولیدی است. در صورت تمایل، برای افزایش کارایی سیستم، می‌توان با احداث یک واحد تولید متان<sup>۲</sup>، بخشی از هیدروژن تولیدی در مرحله قبل را به متان تبدیل و برای کاربردهای مختلف استفاده نمود.

### واژگان کلیدی

ذخیره‌سازی انرژی، فناوری PtG، انرژی تجدیدپذیر، تولید هیدروژن، الکترولیز

### ۱. مقدمه

تغییر آب‌وهوای زمین به علت استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را تشدید کرده است. منابع انرژی نو (تولیدات پراکنده) در سیستم‌های قدرت، جهت تولید

انرژی‌های تجدیدپذیر به گونه‌ای از انرژی اطلاق می‌شوند که برخلاف انرژی‌های تجدیدناپذیر، قابلیت بازگشت مجدد به طبیعت دارند. در سال‌های اخیر، مشکلات زیست‌محیطی و مسئله

توان الکتریکی در سطح وسیعی به کار گرفته می‌شوند [۱]. پس از بحران‌های انرژی که عمده‌ترین آنها در دهه ۷۰ م به وقوع پیوست، توجه بسیاری از کشورها به استفاده از انرژی‌های نو نظیر انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی<sup>۳</sup> و سایر منابع تجدیدپذیر جلب شده است. مثلاً تولید برق به وسیله توربین‌های بادی می‌تواند در ساعات پیک بسیار مفید باشد، البته عکس این موضوع نیز صادق است؛ یعنی شاید زمانی در ساعات پیک، تولید برق مؤثر و اقتصادی نباشد.

روش‌های متنوعی در خصوص ذخیره‌سازی انرژی برق وجود دارد که می‌توان انرژی را در ساعات غیرپیک ذخیره نمود [۲]. منابع فسیلی محدود است و اغلب در مناطق بی‌ثبات سیاسی یافت می‌شوند و این باعث می‌شود که به عنوان منابع نامطمئن شناخته شوند. بر این اساس، امروزه کشورهای توسعه‌یافته از سیستم‌های انرژی که به مقدار قابل توجهی بر مبنای سوخت‌های فسیلی هستند، دور شده‌اند و به سمت کاربردهای انرژی‌های تجدیدپذیر که تولید آلاینده‌گی ناچیز دارند پیش رفته‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد حدود ۸۰ درصد الکتریسیته‌ای که در سطح جهان با استفاده از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شود، به روش‌های هیدروالکتریک (برق‌آبی) به دست می‌آید (۱۶ درصد از کل انرژی تولیدشده). در این میان، سهم منابع بادی و فتوولتائیک به ترتیب فقط ۲ و ۳/۰ درصد می‌باشد [۳]. با توجه به اینکه این مقادیر سهم ناچیزی از کل می‌باشند، ضرورت دارد که در سطح جهان بر استفاده از فناوری‌های نو ذخیره‌سازی انرژی تمرکز و سرمایه‌گذاری شود.

از جمله روش‌های مرسوم ذخیره‌سازی انرژی می‌توان به ذخیره از طریق مکانیزم برق‌آبی تلمبه‌ای، هوای فشرده، چرخ طیار<sup>۴</sup> و استفاده از انواع باتری‌ها اشاره کرد. هر یک از این روش‌ها با محدودیت‌هایی نیز همراه‌اند که بسته به موقعیت جغرافیایی و منابع در دسترس در هر منطقه، باید بهترین روش ذخیره‌سازی را انتخاب نمود. در این میان، پارامترهای متنوعی تأثیرگذار خواهند بود که برخی از آنها عبارت‌اند از:

۱. بازدهی مکانیزم ذخیره‌سازی
۲. مقدار انرژی که می‌توان توسط مکانیزم موردنظر ذخیره کرد

۳. مدت زمانی که می‌توان انرژی ذخیره‌شده را حفظ نمود  
فناوری تولید گاز از توان روشی است که در آن یک توان اولیه ورودی به سیستم داده می‌شود و سپس با به کارگیری

فرایندهای مختلف می‌توان به تولید هیدروژن و یا متان پرداخت. بنابراین با به کارگیری این فناوری می‌توان به تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن و متان پرداخت. طبق بررسی‌های به عمل آمده، فناوری PtG به خوبی تمام پارامترهای مهم در ذخیره‌سازی را پاسخگو است؛ به طوری که این فناوری ضمن داشتن بازدهی انرژی مناسب، بسته به سطح کاربرد آن، می‌تواند پاسخگوی ظرفیت‌های پایین (مقیاس کیلووات) تا بالا (مقیاس مگاوات) و مدت ذخیره‌سازی بالا باشد.

در مورد پیشینه استفاده از فناوری PtG باید اشاره نمود که تاکنون در سطح ملی هیچ پروژه و حتی پژوهشی پیرامون این فناوری صورت نگرفته و اکثر پروژه‌های انجام شده به صورت پایلوت و تماماً در سطح بین‌المللی صورت گرفته‌اند. این در حالی است که طبق مطالب پیشین، با به کارگیری این فناوری نوین (به ویژه در ظرفیت‌های بالا)، تقریباً تمام فاکتورهای اساسی یک سیستم ذخیره‌سازی مناسب انرژی برآورده خواهد شد. بر این اساس نیاز به آشنایی با بخش‌های مختلف این فناوری جهت بهره‌برداری از آن در سطح ملی ضروری می‌نماید.

در این مقاله، ابتدا انواع روش‌های مرسوم که تاکنون برای ذخیره‌سازی انرژی در ظرفیت‌های بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند بررسی می‌شود، سپس به معرفی و بررسی اجزای مختلف فناوری PtG پرداخته خواهد شد.

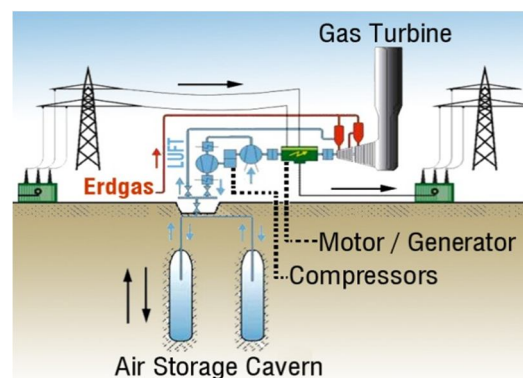
## ۲. روش‌های مرسوم ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بالا

برای پیک‌سازی انرژی و یکنواخت و یکپارچه کردن انرژی نامنظم، باید از ذخیره‌سازی انرژی استفاده نمود. فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ، طیف گسترده‌ای از کاربردها را تحت پوشش قرار می‌دهند که در جهت کاربردهای کیفیت بالا و سرعت عمل در پشتیبانی از انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند و باعث کاهش مدیریت انرژی و افزایش سودآوری می‌شود. کاربردهای استفاده از ذخیره انرژی شامل موارد قدرت بالا برای کسری از ثانیه یا برای کاربردهای با انرژی زیاد برای ساعات طولانی می‌باشد.

### ۲-۱. سیستم ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده

ذخیره‌سازی انرژی به صورت هوای فشرده<sup>۵</sup> روشی است که برای پیک‌سازی شبکه برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از

انرژی برق در ساعات غیرپیک برای فشرده کردن هوا توسط کمپرسور و ذخیره سازی آن در مخازن زیرزمینی استفاده می شود و در ساعات پیک، هوای ذخیره شده برای به حرکت درآوردن توربین مورد بهره برداری قرار می گیرد و برق تولید می کند. فناوری ذخیره سازی انرژی با ذخیره نمودن هوای فشرده یکی از موارد قابل بررسی به عنوان تجهیزات تولید توان با بازدهی بالا و آلاینده گی کم می تواند انتخاب مناسبی باشد. چون نیروگاه های ذخیره ساز انرژی به روش هوای فشرده بر پایه نیروگاه های توربین گاز کار می کنند، در صورت توجه، پتانسیل بالایی برای گسترش سریع تر این نوع نیروگاه ها برای تولید توان وجود دارد. شکل ۱ نشان دهنده طرحواره یک سیستم ذخیره هوای فشرده می باشد.



شکل ۱. شماتیک یک سیستم ذخیره ساز انرژی هوای فشرده

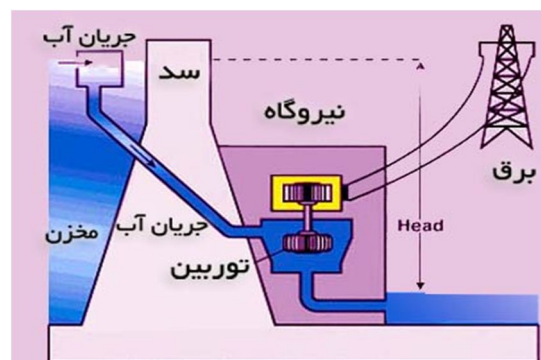
در این روش ذخیره سازی، هوای فشرده ذخیره شده در مخزن می تواند حتی برای مدت های طولانی (ماه ها) نگهداری شود. لذا این روش، از نظر مدت زمان نگهداری انرژی ذخیره شده دارای عملکرد مناسبی است. بازدهی این روش نیز مناسب است و در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد می باشد. یکی از بزرگترین معایب این روش این است که چنانچه بخواهیم مقدار قابل توجهی انرژی ذخیره نماییم، باید مخزن بسیار بزرگ زیرزمینی در نظر بگیریم که هزینه زیادی نیاز دارد. لذا این روش برای ذخیره انرژی در سطوح بالا هزینه بر است. برای ساخت مخازن زیرزمینی، حل کردن نمک های موجود در گنبد های زیرزمینی نمکی واقع در بیابان ها با تزریق جریان زیاد آب و خارج کردن آب حاوی نمک محلول در آن، ساده ترین روش محسوب می شود. این روش بارها در گذشته و در بخش انرژی، برای ساخت مخازن زیرزمینی ذخیره سازی گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مخازن متروکه گاز طبیعی روش دیگری است که مورد استفاده قرار می گیرد.

هرچند پایداری و دوام این مخازن نگهداری هوای فشرده در فشارهای بالا، تردیدهایی را میان متخصصان پدید آورده است. چالش دیگر فرآوری گسترش چنین روشی این است که هوا پس از فشرده شدن گرم می شود، اما هنگام خروج گاز از مخزن و کاسته شدن از فشار آن دوباره سرد می شود. لذا حجم قابل توجهی از اتلاف انرژی در این روش وجود دارد. همچنین امکان منجمد شدن تجهیزات طرح به دلیل کاهش سریع دما، کاملاً محتمل است. در چند مرکز، برای گرم کردن هوای خروجی از سوزاندن گاز طبیعی بهره برده می شود که تولید گاز گلخانه ای دی اکسید کربن از معایب این روش است. برای حل این مشکل، عایق کاری مخزن ذخیره سازی گاز پیشنهاد شده است تا گرمای هوا حفظ شود. انتقال جریان گرما به مخزن هوای سرد از طریق یک مایع واسطه، از دیگر راهکارهای پیشنهاد شده به شمار می رود تا سوزاندن گاز از این روش حذف شود [۴].

## ۲-۲. سیستم ذخیره ساز انرژی تلمبه ذخیره ای

نیروگاه تلمبه ذخیره ای برق آبی یا پمپاژی نوع خاصی از نیروگاه آبی است که در آن، آب پمپاژ شده برای تأمین منبع انرژی نسبت به آب جریان طبیعی رودخانه نقش بیشتری را ایفا می کند. دیدگاه اصلی در طرح این پروژه ها عبارت است از: ذخیره انرژی تولید شده توسط انواع نیروگاه ها و استفاده از این انرژی در پیک مصرف برق. در ایالات متحده ۳۸ مرکز پمپاژ آب وجود دارد که ۲ درصد ظرفیت تولید برق آمریکا را به خود اختصاص داده اند. این در حالی است که سهم این روش در اروپا ۵ درصد و در ژاپن بیش از ۱۰ درصد است. شکل ۲ نشان دهنده طرحواره ذخیره انرژی به روش تلمبه ذخیره ای است. بازدهی این روش ذخیره سازی، بسته به اندازه نیروگاه، قطر دریچه تنظیم آب، توربین آبی مورد استفاده و ارتفاع بین انبار بالا و پایین در محدوده ۷۰ تا ۸۵ درصد است و دارای مدت زمان حفظ انرژی مناسبی نیز می باشد. از دیگر مزایای این روش، عدم آلودگی محیط زیست است. این در حالی است که ظرفیت ذخیره سازی انرژی در این روش محدود است. از جمله معایب دیگر روش تلمبه ذخیره ای می توان به هزینه بالای ساخت و ساز مربوط به آن، هزینه بالای خطوط انتقال در آن و تحت تأثیر قرار گرفتن خروجی آن در فصول خشک مدت اشاره کرد [۵]. مهم ترین چالش این روش این است که جریان یافتن مداوم حجم زیادی از آب از مخزن بالادست به مخزن پایین دست،

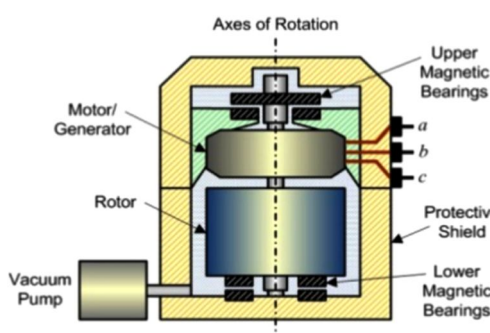
به فرسایش و نابودی سریع اکوسیستم‌های طبیعی می‌انجامد. برای رفع این مشکل، آلمان به ساخت یک مخزن مصنوعی در یک معدن آهن روباز و در پایین دست مخزن سد ذخیره‌سازی آب طرح زده است.



شکل ۲. شماتیک یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی تلمبه ذخیره‌ای

## ۲-۳. ذخیره‌سازی انرژی در چرخ طیار

اخیراً صنعت شاهد پیدایش مجدد یکی از قدیمی‌ترین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی؛ یعنی چرخ طیار یا فلاپویل بوده است. چرخ طیارهای جدید دارای شکل‌های متنوعی هستند؛ از چرخ طیارهای کامپوزیتی که برای سرعت‌های دورانی بسیار بالا مناسب‌اند گرفته تا چرخ‌های فولادی قدیمی که به موتورهای دورانی کویل می‌شوند. واحدی که یکی از جالب‌ترین گونه‌های چرخ طیارهای نوین و قدیمی می‌باشد. این سیستم در حالی که فضایی در حدود ۱۱ فوت مربع را اشغال می‌کند، قادر است توانی برابر ۵۰۰ کیلووات را منتقل نماید. اساس کار آن نیز از یک قانون قدیمی ناشی شده که یک جسم در حال دوران به حرکت خود ادامه می‌دهد تا زمانی که یک نیروی خارجی آن را متوقف کند. سیستم‌های چرخ طیار بازدهی و قابلیت اعتماد بسیار بالایی دارند؛ به‌طوری‌که غالباً بازدهی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد دارند. این سیستم‌ها در گروه سیستم‌های ذخیره‌ساز کوتاه مدت انرژی قرار گرفته، به‌طوری‌که قابلیت ذخیره و آزادسازی مقدار قابل توجهی انرژی را در چندین ثانیه دارند. طرح‌واره‌ای از یک سیستم چرخ طیار در شکل ۳ نمایش داده شده است [۶].



شکل ۳. شماتیک یک سیستم چرخ طیار

## ۲-۴. ذخیره‌سازی انرژی در باتری‌ها

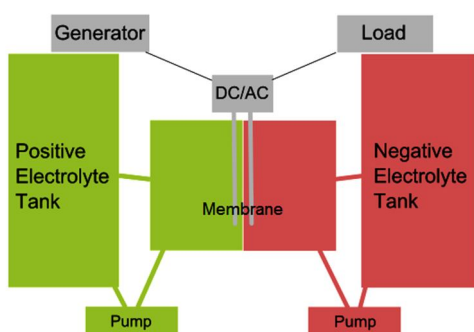
باتری انرژی پتانسیل را طی واکنش‌های شیمیایی در اجزای الکتروشیمیایی خود ذخیره می‌کند. عمل شارژ سبب واکنش‌هایی در ترکیبات باتری شده و انرژی به‌صورت شیمیایی ذخیره می‌گردد. باتری‌ها احتمالاً بهترین وسیله ذخیره‌سازی جریان برق

متنوب هستند که به سرعت شارژ می‌شوند و جریان خروجی به‌راحتی قابل قطع و وصل کردن است. همچنین به‌راحتی می‌توان صدها باتری را در کنار هم به‌کار برد. پاسخ سریع یکی از ویژگی‌های استفاده از فناوری ذخیره‌سازی انرژی در باتری است. برخی از باتری‌ها می‌توانند به تغییرات بار در طی حدود ۲۰ میلی‌ثانیه پاسخ دهند. مزیت دیگر باتری‌ها این است که بازدهی بالایی دارند و بسته به نوع ماده شیمیایی و اینکه چند بار شارژ و دشارژ می‌شوند، بازدهی بین ۶۰ تا ۹۰ درصد دارند. در مورد مدت ذخیره‌سازی انرژی در باتری‌ها نیز باید گفت که بسته به نوع و سطح مصرف از آنها، متفاوت است. اصلی‌ترین ضعف باتری‌ها میزان انرژی قابل ذخیره در آنهاست؛ به‌طوری‌که باتری‌ها عموماً از این منظر در سطح پایین قرار می‌گیرند. از سوی دیگر در صورت استفاده از آنها برای ذخیره انرژی در مقیاس بالا، علاوه بر بالا بودن هزینه‌ها، باتری‌ها فضای زیادی نیز اشغال می‌کنند. باتری‌های مرسوم انواع مختلفی دارند که از آنها می‌توان به باتری‌های سربی - اسیدی<sup>۷</sup>، لیتیوم - یونی<sup>۸</sup>، لیتوم - پلیمری<sup>۹</sup>، نیکل - کادمیومی<sup>۱۰</sup> و جز این‌ها اشاره نمود. در شکل ۴ چگالی انرژی انواع باتری‌های مرسوم ظرفیت پایین مقایسه شده است [۷]. به تازگی نسل جدید از باتری‌ها تحت عنوان باتری جاری<sup>۱۱</sup> معرفی شده است و فناوری جدیدی است که چشم‌انداز مقرون به‌صرفه و منبع ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در مقیاس شبکه سراسری برق را براساس استفاده از ملکول‌های آلی کوچک دوست‌دار محیط زیست ترسیم می‌کند. در شکل ۵ شماتیک ساختمان یک باتری جاری نمایش داده شده است. باتری‌های جاری نوعی سلول سوختی قابل شارژند که برای ذخیره مقدار زیادی انرژی الکتریکی در قالب مواد شیمیایی مایع شکل گرفته‌اند.

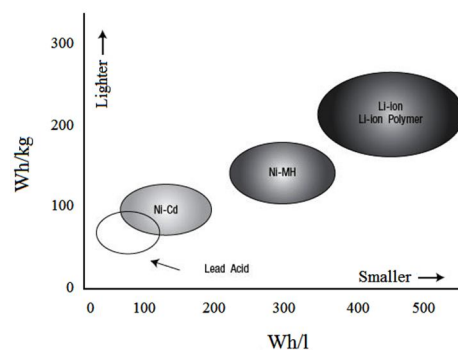
۲-۵. ذخیره‌سازی انرژی براساس فناوری تبدیل توان به گاز  
از جمله فناوری‌های جدید ذخیره‌سازی انرژی بر پایه هیدروژن، می‌توان به فناوری تبدیل توان به گاز اشاره کرد. فناوری PtG

روشی است که در آن با تبدیل مقداری توان به گاز، امکان ذخیره‌سازی هیدروژن و متان به‌عنوان منابع انرژی وجود دارد. این روش، در حالت کلی شامل یک واحد تولید گاز هیدروژن است. علاوه بر تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن، می‌توان یک واحد تولید متان نیز به‌صورت اختیاری برای این روش احداث نمود. لذا در این روش علاوه بر تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن امکان تولید متان نیز وجود دارد. لذا متفاوت از سایر فناوری‌هایی است که در آنها انرژی الکتریسیته در ابتدا تحت گونه‌ای دیگری از انرژی ذخیره‌سازی شده و مجدداً در موارد نیاز به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌گردد. در فناوری PtG توان اولیه از هر طریقی می‌تواند تأمین گردد (به‌عنوان نمونه از طریق تأمین مستقیم الکتریسیته از شبکه برق سراسری یا تولید الکتریسیته از انرژی بادی) و سپس طی فرایندهایی (به‌عنوان نمونه از طریق الکترولیز)، توان اولیه به هیدروژن تبدیل می‌گردد. شکل ۶ نشان‌دهنده اجزای مختلف یک

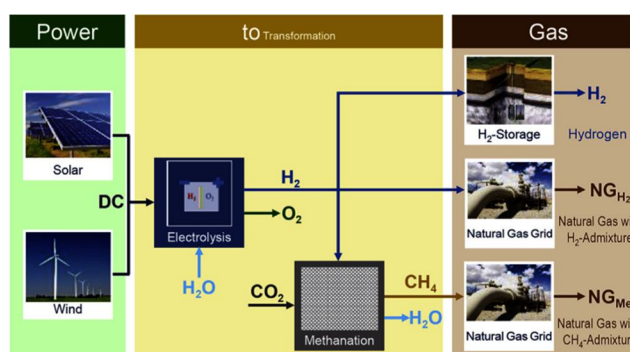
سیستم PtG و نحوه ارتباط بین آنهاست. در ادامه بخش‌های گوناگون تشکیل‌دهنده یک سیستم PtG معرفی خواهند شد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با استفاده از یک توان اولیه ورودی (که از راه‌های مختلف می‌تواند تأمین گردد) و با بهره‌گیری از پدیده الکترولیز، هیدروژن تولید می‌شود. در ادامه، مطابق مرحله دومی که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، گاز (هیدروژن) تولیدشده را می‌توان با به‌کارگیری یک واحد تولید متان، به متان تولید کرد. علاوه بر تولید متان از هیدروژن، هیدروژن تولیدی را می‌توان مستقیماً ذخیره و یا به خطوط لوله گاز طبیعی تزریق نمود. بسته به سطح و ظرفیت مورد استفاده از سیستم PtG، هزینه‌های مربوط به آن نیز تغییر پیدا می‌کند. بدین‌صورت که هرچه این فناوری در ظرفیت‌های بالا مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از آن صرفه اقتصادی بیشتری خواهد داشت. جدول ۱ نشان‌دهنده سطح‌بندی فناوری در ابعاد مختلف است.



شکل ۵. شماتیک ساختمان یک باتری جریان



شکل ۴. مقایسه چگالی انرژی انواع باتری‌های مقیاس کوچک



شکل ۶. بخش‌های مختلف یک سیستم PtG و ارتباط بین آنها [۸]

جدول ۱. تقسیم‌بندی انواع سیستم‌های PtG

| نوع فرایند تولید متان مورد استفاده | منبع تأمین کربن دی اکسید | سطح سامانه PtG                            |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| زیستی (بیولوژیکی)                  | بیوگاز                   | کوچک (مقیاس کیلووات؛ کمتر از ۱۰۰ کیلووات) |
| شیمیایی                            | منابع صنعتی              | بزرگ (مقیاس مگاوات)                       |

## ۲-۵-۱. واحد الکترولیز

مهم‌ترین بخش فناوری PtG تولید هیدروژن است که روش‌های گوناگون برای تولید آن ابداع شده است. تولید هیدروژن و نحوه انتقال و توزیع آن متناسب با شرایط و مزایای جغرافیایی متفاوت می‌باشد. اگرچه طبق بررسی‌های به‌عمل آمده بخش اعظمی از هیدروژن تولیدی در سطح جهان از سوخت‌های فسیلی به‌دست می‌آید، اما با توجه به نیاز روافزون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و نو، در پژوهش‌های جدید تأکید بر تولید هیدروژن از طریق روش الکترولیز می‌باشد. فرایند الکترولیز آب به‌معنای واکنش شکافت (تجزیه) آب با استفاده از انرژی برق و تبدیل آن به هیدروژن و اکسیژن، بر اساس واکنش شیمیایی ۱ می‌باشد. بدین‌صورت که جریان برق از میان محلولی که شامل آب و الکتروود مثبت (آند) و الکتروود منفی (کاتد) می‌باشد، گذرانده می‌شود. قطب منفی جریان برق به کاتد (الکتروود منفی) و قطب مثبت آن به آند (الکتروود مثبت) متصل می‌شود. در الکتروود آندتمایل به جذب الکترون‌ها وجود دارد. آب دارای هدایت الکتریکی پایینی برای عبور جریان الکتریکی می‌باشد و به این دلیل برای افزایش هدایت الکتریکی در فرایند الکترولیز به آن الکتروولیت اضافه می‌کنند.



دو مورد از پرکاربردترین روش‌هایی که برای انجام فرایند الکترولیز مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از: الکترولیز آب قلیایی (آلکالین)<sup>۱۲</sup> و الکترولیز غشای الکتروولیت پلیمری<sup>۱۳</sup>.

## ۲-۵-۱-۱. سلول الکترولیزر آب قلیایی<sup>۱۴</sup>

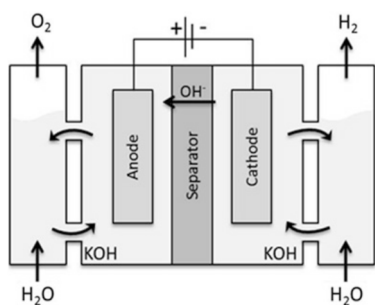
این نوع دستگاه‌های الکترولیز متشکل از یک کاتد، یک آند و یک غشاء جداکننده است. شکل ۷ نشان‌دهنده طرح‌واره یک الکترولیزر آلکالین می‌باشد و نیمه - واکنش شیمیایی که در کاتد و آند این دستگاه انجام می‌گیرد به‌ترتیب به‌صورت روابط ۲ و ۳ می‌باشد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در سلول الکترولیزر AEC دو الکتروود مثبت و منفی کاملاً غوطه‌ور در محلول الکتروولیتی متشکل از ۲۰ تا ۴۰ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید مایع (KOH) می‌باشند و دو قسمت آندیک و کاتدیک توسط یک دیافراگم متخلخل از یکدیگر جدا می‌شوند. در این نوع الکترولیزرها محلول پتاسیم هیدروکسید به دلیل هدایت (رسانش) بیشتر، بر محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) ترجیح داده

می‌شود. اعمال جریان الکتریکی مستقیم به سلول الکترولیزر آلکالین، باعث تشکیل هیدروژن و یون‌های هیدروکسید ( $\text{OH}^-$ ) براساس نیمه - واکنش ۲ می‌گردد. یون‌های هیدروکسید تولیدشده، از طریق جداکننده متخلخل به سمت آند مهاجرت کرده براساس نیمه - واکنش ۳ اکسیده می‌شوند. از جمله مواردی که در طراحی این نوع الکترولیزرها باید به آن توجه کرد، فاصله<sup>۱۵</sup> (گپ) بین الکتروودها و غشاء جداکننده است؛ به این صورت که هرچه این گپ کمتر باشد، رسانش الکتروولیت و حباب‌های گاز در حال تکامل محدودتر شده و به دنبال آن مقاومت اهمی سلول الکترولیز کمتر می‌گردد. اگر اندازه گپ به صفر نیز میل کند، به آن سیستم الکترولیز آلکالین گپ - صفر گفته می‌شود که این نوع سیستم‌ها در حال حاضر در حال توسعه و پیشرفت می‌باشند. در دستگاه‌های الکترولیز آلکالین، دو مورد باعث نامطلوب بودن کارکرد سیستم می‌شوند:

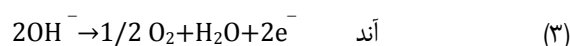
پایین بودن چگالی جریان: چگالی جریان به‌طور قابل ملاحظه‌ای اندازه سیستم و هزینه تولید هیدروژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری چگالی جریان اقداماتی نظیر این موارد می‌توان انجام داد:

۱. فعالیت‌های کاتالیزوری بهبوددهنده الکتروودها
۲. طرح‌های الکتروود پیشرفته
۳. بهبود جداکننده‌ها
۴. افزایش فشار سیستم

پایین بودن فشار کاری: از دیگر مواردی که عملکرد یک الکترولیزر آب آلکالین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، فشار کاری سیستم است. به‌هنگام ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن تولیدی، به کمپرسورهای خارجی جهت متراکم‌سازی هیدروژن تولیدی نیاز است. برای این منظور، افزایش فشار کاری مفید است. امروز تلاش بر این است که فشار کاری را به بیش از ۶۰ بار افزایش داد.



شکل ۷. طرح‌واره سلول الکترولیز آلکالین [۹]



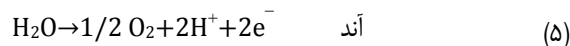
## ۲-۵-۱. سلول الکترولیز غشای الکترولیت پلیمری<sup>۱۶</sup>

فناوری الکترولیز PEMEC نسبت به فناوری AEC کمتر رشد و تکامل یافته است و تاکنون فقط برای کاربردهای سطح کوچک مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، این فناوری به دلائل زیر در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است:

۱. بازدهی سلول این الکترولیزر بالاست
  ۲. چگالی جریان در ولتاژ پایین سلول این الکترولیزر بالاست، لذا شدت توان آن بالا می باشد
  ۳. توانایی تولید هیدروژن با تراکم بالا
  ۴. با اینکه در سطح فشار بالا کار می کند، به کمپرسور خارجی برای تراکم هیدروژن تولیدی نیازی ندارند
- نقاط ضعف این نوع الکترولیزر نیز عبارتند از:

۱. سخت بودن استفاده در کاربردهای سطح بزرگ به دلیل پیچیدگی سیستم
۲. بالا بودن هزینه مربوط به مواد تشکیل دهنده اجزای سیستم
۳. بالا بودن هزینه های خاص سیستم

شکل ۸ و نیمه - واکنش های ۴ و ۵، به ترتیب نشان دهنده یک سلول الکترولیزر غشای الکترولیت پلیمری و واکنش های شیمیایی است که در آن انجام می شود. در این نوع الکترولیزرها، به جای مایع الکترولیتی که در الکترولیزهای آلاکالین مورد استفاده قرار می گیرد، یک غشای باریک ( $\sim 250-500 \mu\text{m}$ ) هدایتگر پروتون به عنوان الکترولیت پلیمری جامد به کار برده می شود. مطابق شکل ۸، از سمت آندیک آب خالص به دستگاه تزریق شده و بر اثر جریان برق اعمالی، طبق نیمه - واکنش ۵، یون های هیدروژن تولید شده و از طریق غشای تبادل پروتون به سمت کاتد انتقال یافته و در آن سمت، طبق نیمه - واکنش ۴، هیدروژن تولید می گردد.



## ۲-۵-۲. واحد ذخیره سازی هیدروژن

پس از تولید هیدروژن به یکی از روش های اشاره شده، امکان ذخیره سازی آن در مخازن ذخیره هیدروژن یا در خطوط انتقال و

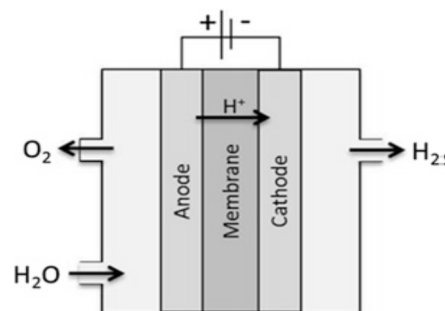
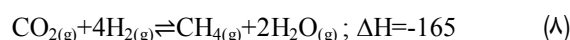
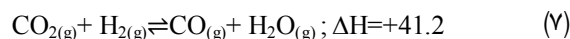
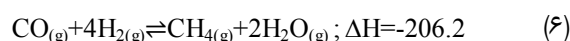
توزیع گاز طبیعی وجود خواهد داشت. طبق مطالعات صورت گرفته، حدود ۹۰ درصد از پروژه های پایلوت PtG که در سطح بین المللی اجرا شده و یا در حال اجرا می باشند، از مخازن تحت فشار برای ذخیره سازی هیدروژن تولید شده استفاده می کنند. از بین کل پروژه ها، فقط ۵ در پروژه از مخازن هیدریدی فلزی<sup>۱۷</sup> استفاده شده است و ۲ پروژه نیز در حال آزمون هر دو شیوه ذخیره سازی ذکر شده می باشند [۱۰]. شکل ۹ نشان دهنده نوعی مخزن ذخیره هیدریدی فلزی می باشد. بسته به نوع کاربری، فشار مورد نیاز برای ذخیره سازی هیدروژن در بازه ۴ تا ۴۰۰ بار متغیر می باشد. ذخیره سازی فشار - بالا این مزیت را دارد که در فضا صرفه جویی می گردد، اما استفاده از یک کمپرسور هیدروژن در آنها ضروری می باشد که بازدهی کل سیستم را کاهش می دهد [۱۱]. طبق مطالب اشاره شده، علاوه بر مخازن ذخیره هیدروژن، خطوط انتقال و توزیع گاز طبیعی به دلیل پتانسیل ذخیره سازی کم هزینه و در دسترس، در فناوری PtG نقش مهم و حیاتی دارند؛ بدین صورت که با تزریق هیدروژن تولیدی به خطوط لوله گاز طبیعی، نوع دیگری از ذخیره سازی آن صورت می گیرد.

## ۲-۵-۳. واحد تولید متان

همان گونه که اشاره شد، علاوه بر ذخیره سازی انرژی در فناوری PtG، امکان تولید انرژی نیز در آن وجود دارد. یکی از کاربردهای فناوری PtG، تولید متان در یک واحد تولید متان است. در صورتی که از یک واحد تولید متان در سیستم PtG استفاده شود، برای تولید متان نیازمند منابع کربن دی اکسید هستیم. لذا در فناوری PtG امکان به کارگیری دی اکسید کربن، به عنوان عامل اصلی گرمایش زمین، در فرایند تولید متان فراهم می باشد. فرایندی که طی آن متان تولید می گردد، فرایند ساباتیر<sup>۱۸</sup> نام دارد و فرایندی است بر مبنای هیدروژن کردن کاتالیزوری کربن دی اکسید به متان، مطابق با واکنش شیمیایی به صورت معادله ۸، فرایند ساباتیر در دمای ۲۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و در فشار ۱ تا ۸۰ بار و با استفاده از نیکل و روتنیوم به عنوان کاتالیزور انجام می پذیرد. از آنجا که واکنش تولید متان حرارت زاست، حداکثر میزان تبدیل در دماهای پایین حاصل می گردد [۱۳]. همان طور که مشاهده می شود، فرایند تولید متان اغلب به صورت دومرحله ای انجام می گردد و عبارت است از مجموع واکنش های ۶ و ۷. گفتنی است در این روابط  $\Delta H$  نشان دهنده آنتالپی واکنش و بر حسب کیلوژول



بر مول می‌باشد. در طی واکنش، به دلیل محدودیت حداکثر بازدهی قابل حصول ۸۳ درصدی، حدود ۱۷ درصد از انرژی شیمیایی هیدروژن به صورت حرارت آزاد می‌گردد.



شکل ۸. طرحواره سلول الکترولیز غشای الکترولیت پلیمری



شکل ۹. مخزن ذخیره هیدروژن [۲]

فرایند تولید متان می‌تواند به صورت‌های مختلفی انجام شود که عبارت‌اند از: بستر ثابت<sup>۱۹</sup>، بستر سیال<sup>۲۰</sup> و ستون حباب<sup>۲۱</sup>؛ طرحواره نمودار جریان فرایند تولید متان به روش‌های اشاره شده به ترتیب در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. گاز تولیدشده خروجی از راکتور، در کنار متان، شامل بخار، کربن مونو اکسید و جز این‌ها می‌باشد. چون واکنش‌های انجام‌شده در راکتورها شدیداً گرمازا می‌باشند، دمای گازهای پیش‌گرم شده به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. چنانچه این واکنش در راکتور با بستر ثابت انجام شود، برحسب فشار کاری و شدت تبدیل، دما تا بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و این حرارت بالای تولیدی موجب غیرفعال شدن سریع کاتالیست و ایجاد نقاط داغ شده و در پی آن باعث تغییر درصد تبدیل مواد اولیه و کاهش آن می‌شود. در بهترین شرایط عملیاتی شاید بتوان به تبدیل ۴۴

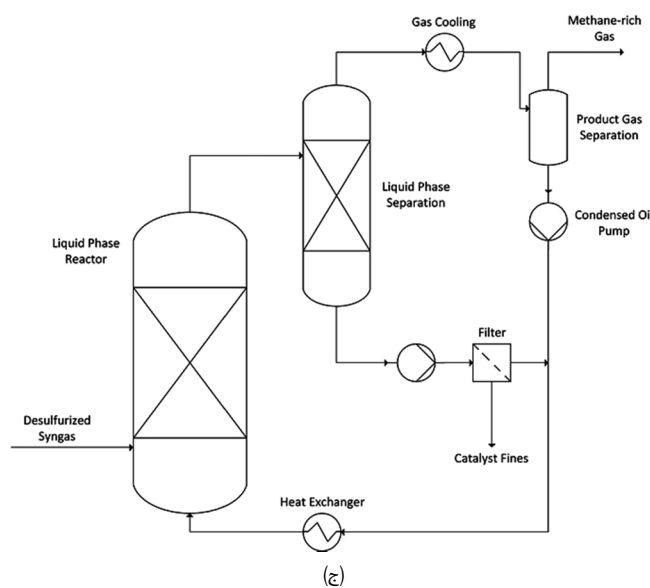
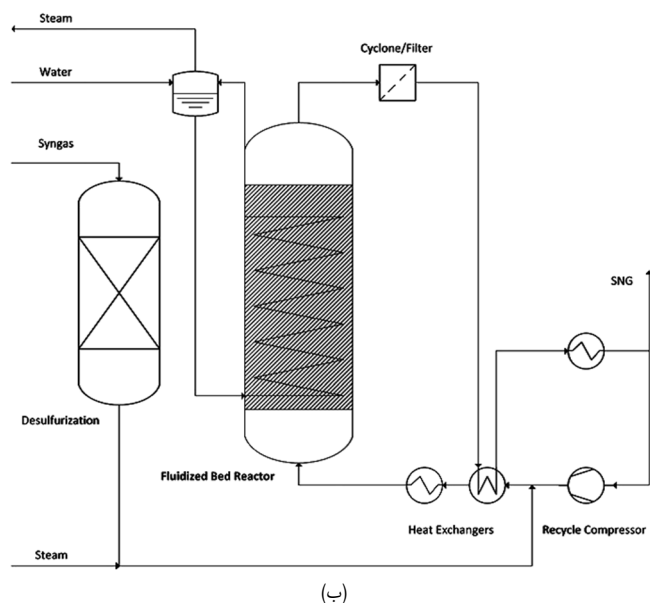
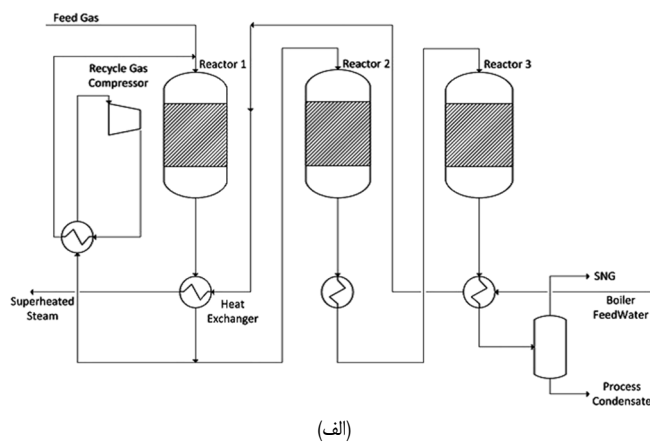
درصد دست یافت [۱۴]. جهت حل مشکل این نقاط داغ از راکتور با بستر سیال به جای راکتورهای بستر ثابت می‌توان استفاده نمود و جهت تسریع واکنش نیز از غشای جداکننده محصول استفاده نمود. در راکتورهای بستر سیال، به سبب سیال شدن بستر کاتالیست، انتقال حرارت به طور تقریباً یکنواخت صورت می‌گیرد؛ یعنی می‌توان با کمی خطا، راکتور بستر سیال را هم‌دما در نظر گرفت.

## ۲-۶. چشم‌اندازی از آینده فناوری PtG

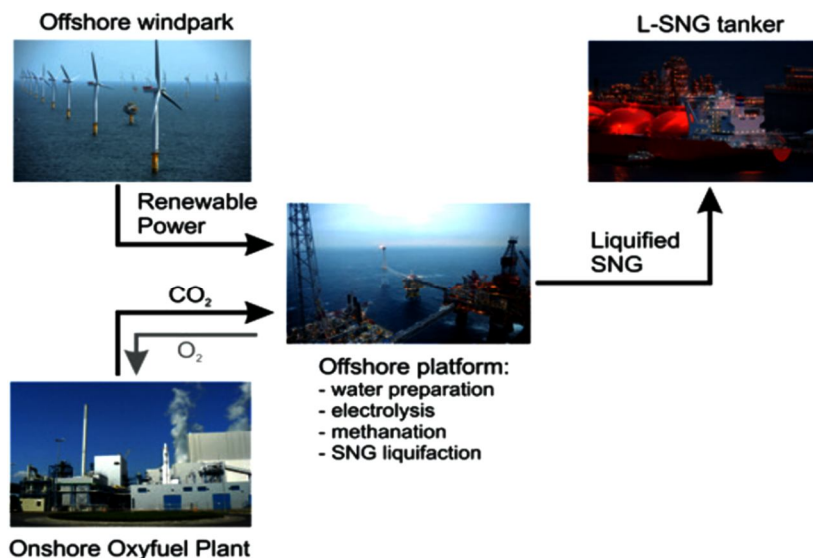
مناطق دورافتاده پتانسیل بالایی در تولید منابع انرژی تجدیدپذیر (همانند بادی و خورشیدی) دارند؛ زیرا در این مناطق غالباً تقاضای مصرف انرژی الکتریسیته وجود ندارد. بنابراین در این مناطق استفاده از انرژی الکتریکی جهت استفاده به عنوان اولیه سیستم PtG بسیار مناسب است. بدین صورت می‌توان انرژی را در مناطق دورافتاده تولید و انرژی تولیدشده به مراکز تقاضا منتقل نمود. نتیجه اینکه به جای انتقال مستقیم انرژی الکتریکی تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر به مراکز تقاضا، می‌توان با به کارگیری یک سیستم PtG، انرژی الکتریکی تولیدی را به هیدروژن یا متان تبدیل کرد و با تغذیه به خطوط انتقال گاز طبیعی آن را به مراکز تقاضا انتقال داد. به عنوان یک چشم‌انداز برای سیستم‌های PtG در ظرفیت‌های بالا، می‌توان طرحی به صورت شکل ۱۱ متصور شد. مطابق شکل ۱۱، این طرح از سه جزء اصلی تشکیل شده است: اولین جزء، یک پارک بادی مستقر در دریاست که به عنوان تأمین کننده الکتریسیته مورد نیاز سیستم PtG از انرژی پاک و تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. دومین بخش یک سکوی دریایی است که در نزدیکی پارک بادی استقرار یافته است. تمامی فرایندهای الکترولیز آب، تولید گاز طبیعی مصنوعی و مایع‌سازی گاز در این سکوی دریایی انجام می‌گیرد؛ ضمن اینکه آب مورد استفاده در فرایند الکترولیز هم از همان منابع آب دریا تأمین می‌گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای تولید متان نیازمند منابع کربن‌دی‌اکسید می‌باشیم؛ لذا یک جزء سوم به صورت یک کارخانه اکسیژن‌سوز<sup>۲۲</sup> مستقر در خشکی در این طرح در نظر گرفته شده است که وظیفه تأمین کربن دی اکسید را برعهده دارد. یک از محصولات فرایند الکترولیز اکسیژن است. لذا چنانچه منبع تأمین‌کننده کربن دی اکسید یک کارخانه اکسیژن‌سوز در نظر گرفته شود، در کنار استفاده از کربن دی



اکسید و کاهش آلاینده‌گی محیط زیست، سوخت اولیه مورد نیاز یک کارخانه را نیز تأمین نموده‌ایم.



شکل ۱۰. نمودار جریان فرآیند تولید متان به روش: الف) بستر ثابت، ب) بستر سیال، ج) ستون حباب [۹]



شکل ۱۱. چشم‌اندازی از آینده فناوری PtG

### ۳. نتیجه‌گیری

سیستم با استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر می‌باشد. علاوه بر ذخیره‌سازی هیدروژن، با به‌کارگیری یک واحد تولید متان، در این روش امکان تولید متان از هیدروژن تولید در مرحله قبل نیز وجود دارد. لذا مزیت دیگر این فناوری این است که در کنار ذخیره‌سازی هیدروژن و متان، با به‌کارگیری منابع کربن دی‌اکسید در زمینه کاهش آلودگی محیط زیست نیز گام بزرگی برداشته خواهد شد.

### قدردانی

مقاله حاضر برآمده از طرحی پژوهشی است که با حمایت شرکت گاز استان خراسان رضوی (شرکت گاز مشهد) در حال انجام است. بدین‌وسیله نویسندگان از زحمات مسئولان آن شرکت قدردانی می‌کنند.

در این مقاله، نخست روش‌های مرسوم ذخیره‌سازی انرژی معرفی و مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها بررسی شد. در ادامه فناوری نوین PtG، که یکی از جدیدترین روش‌های ذخیره‌سازی انرژی است، بررسی شد. یک مکانیزم مناسب ذخیره‌سازی باید بتواند به‌طور مناسبی پاسخگوی تمام پارامترهای مهمی چون ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، مدت زمان تخلیه و باردهی و هزینه‌های مربوطه باشد. طبق بررسی‌های به‌عمل آمده، روش PtG تنها روشی است علاوه بر باردهی انرژی مناسب، در کنار قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در تمام سطوح، توانایی ذخیره به‌مدت زمان طولانی را داراست. فناوری PtG روشی است که در آن انرژی ورودی اولیه به سیستم، توسط روش‌های گوناگونی به هیدروژن تبدیل می‌شود. طبق مطالعات صورت‌گرفته، با توجه به روبه اتمام بودن سوخت‌های فسیلی، تأمین انرژی اولیه مورد نیاز

### ۴. مأخذ

ملی انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر، خمینی‌شهر، ۱۳۹۴.

[3] P. Kaiser, F. Pöhlmann, A. Jess, Intrinsic and Effective Kinetics of Cobalt-Catalyzed Fischer-Tropsch Synthesis in View of a Power-to-Liquid Process Based on Renewable Energy, *Chemical Engineering Technology*, Vol. 37, pp. 964-972, 2014.

[۱] ه. آقازاده، ح. مددی کجبابادی، ا. صادقی یزدان‌خواه، بررسی روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی در تولیدات پراکنده، اولین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، بیرجند، ۱۳۸۸.

[۲] ا. عشقی، م. رضایی، بررسی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی و مطالعه اثرات روش ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، همایش

*International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 2039-2061, 2013.

- [11] C. Meurer, H. Barthels, W. A. Brocke, B. Emonts, H. G. Groehn, PHOEBUS-an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts, *Solar Energy*, Vol. 67, pp. 131-138, 1999.
- [12] R. Winkler-Goldstein, A. Rastetter, Power to Gas: The Final Breakthrough for the Hydrogen Economy? *Green*, Vol. 3, pp. 69-78, 2013.
- [13] J. De Sain, M., Pierre Baurens, C. Bouallou, Parametric study of an efficient renewable power-to-substitute natural-gas process including high-temperature steam electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 17024-17039, 2014.
- [۱۴] ک. کیهانی، ش. فاطمی، ر. میناسیان، مدلسازی ریاضی فرآیند تولید گاز سنتز توسط اکسیداسیون جزئی متان در رآکتورهای غشایی بستر سیال، یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، تهران، ۱۳۸۵.

- [4] <http://www.pogc.ir> (accessed on June 23, 2012).
- [5] E. Spahic, G. Balzer, H. Britta, M. Wolfram, Wind Energy Storages-Possibilities, *IEEE Lausanne*, Vol. 55, pp. 615-620, 2007.
- [6] Ch. Zhang, K. J. Tseng, A Novel Flywheel Energy Storage System with Partially-Self-Bearing Flywheel-Rotor, *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 477-487, 2007.
- [7] *EPRI-DoE Handbook of Energy Storage for Trans. and Distribution Applications*, EPRI Product 1001834, Dec 2003.
- [8] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinus, V. Tietze, B. Kumar, D. Stolten, Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 4285-4294, 2015.
- [9] M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmuller, M. Koppe, *Power-toGas: Technology and Business Models*, Springer, 2014.
- [10] G. Gahleitner, Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications,

پی نوشت

- 
1. Power to Gas: PtG
  2. Methanation
  3. Geothermal
  4. Flywheel
  5. Compressed Air Energy Strong: CAES
  6. Pump Storage Hydroelectricity
  7. Lead-Acid
  8. Li-Ion
  9. Li Polymer
  10. Ni-Cd
  11. Flow Battery
  12. Alkaline Water Electrolysis
  13. Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis
  14. AEC
  15. Gap
  16. PEMEC
  17. Metal Hydride (MH) Tanks
  18. Sabatier
  19. Fixed Bed
  20. Fluidized Bed
  21. Bubble Column
  22. Oxyfuel Plant