DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.2.14.3

سال هفتم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۹، ص ص ۱۲۰- ۱۳۰

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۶

مروری بر پایداری منابع و سیستم‌های تولید و ذخیره سازی هیدروژن و آینده‌ی آن

افسانه سادات لاریمی[1*]

۱- استادیار، مهندسی شیمی، پژوهشگاه نیرو، تهران

* تهران،۵۱۷-۱۴۶۶۵، alarimi@nri.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، شش منبع تولید هیدروژن (زیست توده، زمین گرمایی، آبی، هسته ای، خورشیدی و بادی)، چهار سیستم تولید هیدروژن (بیولوژیکی، الکتریکی، نوری و حرارتی) و پنج گزینه‌ی ذخیره سازی هیدروژن (هیدریدهای شیمیایی، گاز فشرده، مایع کرایوژنیک، هیدریدهای فلزی و نانو مواد) از نقطه نظر زیست محیطی و پایداری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پنج معیار اصلی پایداری (قابلیت اطمینان و عملکرد اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و فنی) و چهار معیار عملکرد زیست محیطی (میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان اراضی مورد نیاز، کیفیت فاضلاب و میزان زباله‌ی جامد تولید شده) برای هر یک از گزینه‌های نامبرده شده در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰ امتیازدهی شدند. ۱۰ نشانگر بهترین عملکرد و ۰ نشانگر ضعیف‌ترین عملکرد است. از نقطه نظر پایداری، منبع خورشیدی و زمین گرمایی به ترتیب با کسب امتیازهای ۷/۴ و ۴/۶، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را دارند. سیستم‌های الکتریکی و نوری به ترتیب با کسب ۷/۶ و ۵/۴ امتیاز بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را در تولید هیدروژن دارا هستند. نانومواد و مایع کرایوژنیک به ترتیب با کسب امتیازهای ۸/۴ و ۳/۴ بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را در ذخیره سازی هیدروژن دارند. تولید الکتریکی هیدروژن بر پایه‌ی انرژی خورشیدی همراه با ذخیره‌ی آن با نانو مواد می‌تواند پایدارترین و مناسب‌ترین گزینه از منظر زیست محطی باشد.

کلیدواژگان: منابع تولید هیدروژن، سیستم‌های تولید هیدروژن، ذخیره سازی هیدروژنی، عملکرد زیست محیطی، پایداری

Overview of the sustainability of hydrogen resources, production and storage systems and its future

Afsanehsadat Larimi[1*]

1- Chemical and Process Engineering Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

* P.O.B. 14665517 Tehran, Iran, alarimi@nri.ac.ir

Received: 10 December 2019 Accepted: 26 January 2020

Abstract

In this study, environmental and sustainability aspects of six sources of hydrogen production (biomass, geothermal, hydro, nuclear, solar and wind), four systems of hydrogen production (biological, electrical, photonic and thermal) and five sources of hydrogen storage (chemical hydrides, compressed gas, cryogenic liquids, metal hydrides and nanomaterials) are compared. Five sustainability criteria (economic, environmental, social and technical dimensions and reliability) and four environmental performance criteria (greenhouse gas emissions, land use, water dischaqrge quality and solid waste generation) of the selected options are ranged from 0 to 10 points, where 10 indicates the best and 0 weak indicates the lowest performance. From the sustainability point of view, solar and geothermal sources, with ratings of 7.4 and 4.6, have the highest and lowest performances, respectively. Electrical and photonic systems with 7.6 and 5.4 points have the highest and lowest performances in hydrogen production, respectively. Nanomaterials and cryogenic liquids with 8.4 and 3.4 points have the highest and lowest performances in hydrogen storage, respectively. Electrical hydrogen production based on solar energy according with the nanomaterial storage system are the most sustainable and best options from the environmental point of view.

Keywords: Hydrogen production sources, Hydrogen production systems, Hydrogen storage, Environmental performance, Sustainability

۱- مقدمه

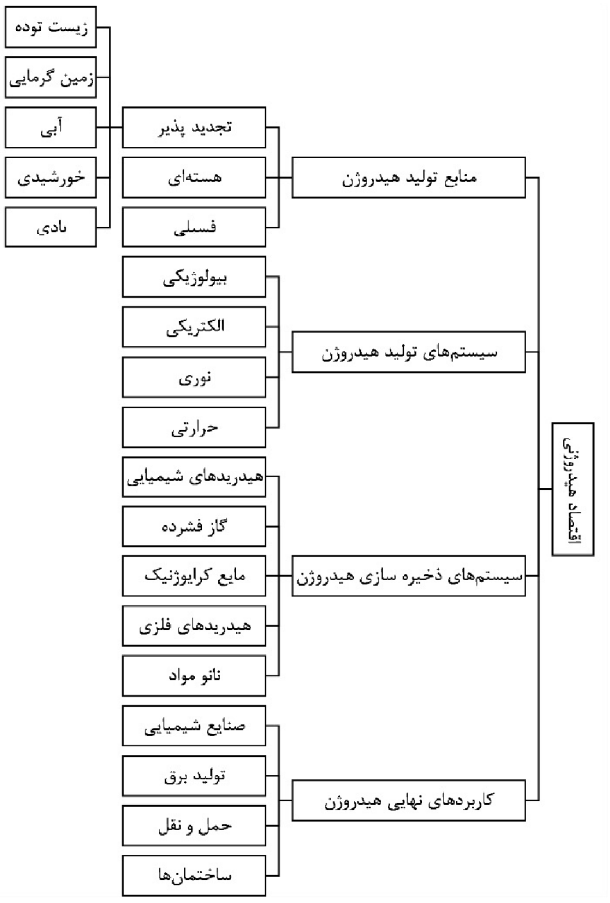
نگاهی به گذشته نشان می‌دهد که مصرف انرژی در جهان سالانه به طور متوسط ۳,۲ درصد افزایش داشته است. با توجه به اینکه هم اکنون ۸۶ درصد از سوخت مورد نیاز در دنیا توسط منابع فسیلی تامین می‌شود و با در نظر گرفتن محدودیت منابع سوخت فسیلی از یک طرف و افزایش جمعیت از طرف دیگر، دورنمای آینده بایستی به گونه‌ای ترسیم شود که در آن کاهش منابع فسیلی سبب در هم فرو ریختن جوامع بشری نگردد. اما تجدید ناپذیری تنها مشکلی نیست که در رابطه با سوخت‌های فسیلی با آن مواجه هستیم. عمده‌ترین مشکلی که در رابطه با این سوخت‌ها وجود دارد پدیده‌ی گرمایش جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسیدکربن در اثر احتراق این سوخت‌هاست [۱].

بخش تولید برق با ۳۸ درصد و بخش حمل و نقل با ۲۲ درصد به ترتیب دارای بالاترین سهم در انتشار دی‌اکسیدکربن در جهان هستند. بنابراین با توجه به کاهش منابع فسیلی و اثرات زیست محیطی مخرب آنها، یک انتقال جهانی از سوخت‌های فسیلی به حامل‌های انرژی پایدار و تجدیدپذیر در اسرع وقت برای جامعه‌ی امروزی ضروری‌ست. در مقایسه با شرایط فعلی، که تقریبا تمام نیازهای انرژی از یک منبع واحد تامین می‌شود، یک سیستم انعطاف پذیرتر شامل منابع چندگانه انرژی می‌تواند به عنوان یک راه حل طولانی مدت مطرح گردد [۲]. بنابراین در حالت ایده‌آل، آینده جهانی است با منابع انرژی تجدید پذیر و بدون آلودگی برای هر چیزی از شبکه‌های برق گرفته تا وسایل نقلیه‌ی شخصی و قطعا هیدروژن بخشی از این آینده آرمانگرایانه هست و احتمالا مهمترین بخش از آن خواهد بود [۳]. زیرا نه تنها احتراق آن پاک است، بلکه قابل استفاده در تمامی بخش‌های نیازمند به انرژی شامل ساختمان‌ها، تولید برق، حمل و نقل و سایر صنایع می‌باشد. به این صورت که می‌تواند از طریق استفاده در پیل سوختی جایگزین موتورهای احتراق داخلی در بخش حمل و نقل گردد. همچنین قابل ادغام در شبکه‌ی گاز شهری جهت تامین گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع ساختمان‌هاست و می‌تواند به عنوان خوراک در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر آن، در اثر واکنش با دی‌اکسیدکربن قابلیت تولید حامل‌های انرژی با ارزش افزوده را دارد که منجر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن هم می‌شود. و به عبارتی دیگر یک تیر و دو نشان [۱].

بنابراین در دهه‌ی اخیر مفهومی به نام اقتصاد هیدروژنی پایدار در دنیا شکل گرفته است و کشورهای متعددی گذار از اقتصاد مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به اقتصاد هیدروژنی را پیش گرفته‌اند [۴]. هنگامی که صحبت از اقتصاد هیدروژنی پایدار می‌شود، منظور پایداری در بخش‌های مختلف، از منابع و سیستم‌های تولید گرفته تا ذخیره سازی، توزیع و کاربرد نهایی‌ست. سلسله مراتب اقتصاد هیدروژنی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

منابع تولید هیدروژن عبارتند از: زیست توده، زمین گرمایی، آبی، هسته‌ای، خورشیدی و بادی.

در سیستم‌های انرژی هیدروژنی، اولین نکته‌ای که باید به آن توجه کنیم انتخاب منبع تولید است [۵]. برای اینکه اقتصاد هیدروژنی کاملا پایدار و سازگار با محیط زیست باشد، باید هیدروژن از منابع و مواد پاک، فراوان، قابل دسترس و مقرون به صرفه تولید شود [۶]. در مواردی که منبع دائمی و پیوسته نباشد، مثلا منبع خورشیدی که در طول شب در دسترس نیست، نیاز است تا یک سیستم ذخیره سازی مناسب در شبکه‌ی تولید هیدروژن به کار گرفته شود [۷]. منابع تجدیدپذیر از نظر اقتصادی برای سیستم‌های تولید هیدروژن بسیار مناسب هستند [۸]. با این وجود، استفاده از اغلب منابع تجدید پذیر در سیستم‌های با مقیاس بزرگ بسیار پر هزینه است. بنابراین، در مراحل اولیه‌ی گذار به اقتصاد هیدروژنی کاملا توسعه یافته می‌توان از سیستم‌های سنتی‌تر (یعنی فرآیندهای دارای سوخت فسیلی) در کنار سیستم‌های جذب مناسب کربن و کنترل انتشار آلاینده برای تولید هیدروژن استفاده نمود [۹]. در این دوره انتظار می‌رود پیشرفت در علوم و فن‌آوری مواد منتج به کاهش هزینه و افزایش کارآیی گردد و در پی آن استفاده از منابع تجدید پذیر برای سیستم‌های بزرگ مقیاس امکان پذیر گردد [۱۰].



شکل ۱ سلسله مراتب اقتصاد هیدروژنی.

سیستم‌های تولید هیدروژن عبارتند از: بیولوژیکی، الکتریکی، نوری و حرارتی.

اگرچه انتخاب مناسب‌ترین منبع انرژی و مواد در سیستم‌های انرژی هیدروژنی پر اهمیت است [۱۱]، لیکن اگر با سیستم مناسب همراه نباشد، نتیجه‌ی مطلوب حاصل نمی‌گردد [۱۲]. سیستم‌های تولید هیدروژن، علاوه بر پاک و ایمن بودن می‌بایست در مقیاس‌های کوچک و بزرگ کارآمد بوده و به صورت ثابت و قابل حمل در دسترس باشند [۱۳].

سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن عبارتند از: هیدریدهای شیمیایی، گاز فشرده، مایع کرایوژنیک، هیدریدهای فلزی و نانو مواد.

انتظارات اصلی از سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن را می‌توان چنین تعریف کرد [۱۴]:

- چگالی انرژی جرمی و حجمی بالا
- تولید توان بالا
- مصرف کم برق و انرژی

- انتشار آلاینده و ضایعات صفر یا حداقل
- عملیات ایمن
- در دسترس بودن
- راحتی در استفاده
- عملکرد مؤثر
- عمر طولانی
- حداقل هدر رفت هیدروژن در هنگام شارژ / ذخیره سازی / تخلیه

کاربردهای نهایی هیدروژن عبارتند از: صنایع شیمیایی، تولید برق، حمل و نقل و ساختمان‌ها.

در حال حاضر، بخش حمل و نقل تا حدود زیادی به سوخت‌های فسیلی وابسته است و سهم این بخش در انتشار جهانی CO_2 بیش از ۲۰٪ می‌باشد [۱۵]. با جایگزین کردن هیدروژن بجای سوخت‌های فسیلی انتشار آلاینده‌های بخش حمل و نقل به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت [۱۶]. می‌توان از هیدروژن در سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی در همه‌ی حوزه‌های حمل و نقل از جمله زمینی، هوایی و دریایی استفاده کرد [۱۷].

در حال حاضر، سهم صنعت از مصرف جهانی انرژی بیش از ۳۰٪ است [۱۸]. بخش صنعت نیز به شدت وابسته به سوخت‌های فسیلی است و حدود ۲۵٪ از انتشار جهانی CO_2 را به خود اختصاص داده است [۱۹]. پنج صنعت با بالاترین مصرف انرژی به ترتیب عبارتند از: آهن و فولاد (۲۸٪ از مصرف انرژی صنعتی)، صنایع شیمیایی، پتروشیمیایی و پالایشگاهی (۱۴٪ از مصرف انرژی صنعتی)، سیمان (۸٪ از مصرف انرژی صنعتی)، آلومینیوم (۵٪ از مصرف انرژی صنعتی) و خمیر کاغذ و کاغذ (۵٪ از مصرف انرژی صنعتی) [۲۰]. قسمت اعظم انرژی مورد نیاز در این صنایع، برای تامین گرما مصرف می‌شود [۲۱]. هیدروژن می‌تواند گزینه‌ی بسیار مقرون به صرفه‌تر، پاک و کارآمدتری نسبت به سوخت‌های فسیلی یا برق برای تولید گرما در این صنایع باشد [۲۲]. از سوی دیگر، مقادیر قابل توجهی از هیدروژن به عنوان ماده اولیه صنایع شیمیایی و پتروشیمی در تولید و پالایش متانول، سنتز آمونیاک و صنایع آهن و فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳]. از میان صنایع مذکور، تولید آمونیاک برای اوره و سایر کودها بیشترین میزان مصرف هیدروژن را به خود اختصاص داده است (حدود ۵۱٪ از کل نیاز صنعت به هیدروژن) [۲۴]. دومین مصرف کننده بزرگ هیدروژن در صنعت، پالایشگاه است که در آن از هیدروژن برای فرآیندهای هیدروکراکینگ و هیدروژناسیون مانند سولفورزدایی استفاده می شود. روی هم رفته ۸۲٪ از کل نیاز صنعت به هیدروژن مربوط به صنایع آمونیاک و پالایشگاه‌هاست. باقی صنایع مصرف کننده‌ی هیدروژن عبارتند از: تولید متانول، فرآوری سوخت، تولید شیشه و غیره. با تامین هیدروژن مورد نیاز صنایع از منابع پاک می‌توان تا حدود زیادی از تأثیر منفی بر گرمایش جهانی کاست. علاوه بر این، با استفاده از هیدروژن می‌توان CO_2 انتشار یافته در صنعت را به محصولات با ارزش تجاری مانند متانول تبدیل کرد.

برخی از موارد مصرف انرژی در ساختمان‌ها عبارتند از: تامین گرمایش و سرمایش، آب گرم، روشنایی، لوازم برقی و غیره [۲۵]. تقاضای انرژی در ساختمان‌های مسکونی و تجاری بسیار بیشتر از بخش حمل و نقل و تقریباً به اندازه‌ی تقاضای انرژی در کل صنعت است [۲۶]. از آنجا که این تقاضا عمدتاً توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود، ساختمان‌ها نیز در گرمایش جهانی موثرند [۲۷]. برای مقابله با این مسئله، سبز سازی ساختمان‌ها می‌تواند از طریق انتقال به انرژی هیدروژنی انجام شود [۲۸]. مزیت مهم استفاده از هیدروژن در ساختمان‌ها قابلیت استفاده از آن در زیرساخت‌های فعلی گاز طبیعی در ساختمان‌هاست [۲۹].

بنابراین هیدروژن یک عنصر اساسی در فرآیند انتقال از سیستم‌های انرژی سنتی به سیستم‌های انرژی ۱۰۰٪ تجدید پذیر است و از طریق ایفای چهار نقش اساسی:

- حمل و نقل پاک‌تر از طریق سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی هیدروژن سوز
- منبع انرژی پاک‌تر برای صنایع، بخش‌های مسکونی، ساختمان‌ها و غیره
- تامین گرمایش، سرمایش، تهویه و برق پاک برای تمام کاربران نهایی بخش انرژی
- خوراک پاک برای صنایع

تاثیر بسزایی در مبارزه با گرمایش جهانی دارد.

برای دستیابی به اقتصاد هیدروژنی پایدار و تبدیل هیدروژن به یک عنصر کلیدی در بازار انرژی، تحقیقات و سرمایه‌گذاری‌های کلان در سیستم‌های تولید هیدروژن مورد نیاز است [۳۰]. با این هدف که سیستم‌های تولید هیدروژن کارآمد، مقرون به صرفه، قابل اعتماد، ایمن و قابل استفاده برای انواع مختلف نیازهای کاربر نهایی از جمله کوچک/بزرگ مقیاس، قابل حمل/ثابت و غیره باشد. همچنین پایدار بودن اقتصاد هیدروژنی بسیار حائز اهمیت است.

در این مطالعه، آنالیز پایداری برای هر یک از سه مورد (الف) منابع تولید هیدروژن، (ب) سیستم‌های تولید هیدروژن و (ج) سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن به صورت مجزا صورت پذیرفته است. معیارهای ارزیابی پایداری عبارتند از: عملکرد فنی، اجتماعی، زیست محیطی و اقتصادی و همچنین قابلیت اطمینان. به دلیل اهمیت مسائل زیست محیطی به ویژه در دهه‌ی اخیر، آنالیز عملکرد زیست محیطی برای هر یک از سه مورد مذکور به صورت جداگانه صورت پذیرفته است. معیارهای ارزیابی عملکرد زیست محیطی عبارتند از: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان اراضی مورد نیاز، کیفیت فاضلاب و میزان زباله‌ی جامد تولید شده.

در ادامه کاربردهای هیدروژن در آینده به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز نیازهای تحقیقاتی و مراحل گذار به سمت اقتصاد هیدروژنی پایدار ارائه شده است.

۲- رویکرد مطالعات پایداری

همانطور که اشاره شد، سیستم‌های انرژی هیدروژنی باید از منبع گرفته تا سیستم‌های تولید، ذخیره سازی و کاربردهای نهایی پایدار باشند [۳۱]. مطالعات تجزیه و تحلیل پایداری برای منابع و سیستم‌های تولید و ذخیره سازی هیدروژن بر اساس خصیصه‌های پایداری نشان داده شده در شکل ۲ صورت گرفت. پنج خصیصه‌ی اصلی پایداری عبارتند از: عملکرد اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی، فنی و قابلیت اطمینان.

به منظور بررسی دقیق‌تر، هر یک از این خصیصه‌ها به صورت مجموعه‌ای از مفاهیم کلیدی در نظر گرفته شدند. سپس با بهره‌گیری از داده‌های موجود در ادبیات به عنوان مرجع، امتیازی در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰ به آن‌ها تعلق گرفت. هر یک از این مفاهیم کمی توسط فرمول زیر در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰ امتیازدهی شدند:

$$\text{امتیاز مفهوم کمی} = \frac{\text{حداکثر} - \text{داده‌ی مربوط به مفهوم کمی}}{\text{حداکثر} - \text{حداقل}} \quad (۱)$$

در اینجا حداکثر و حداقل، به ترتیب بالاترین و کمترین مقدار مربوط به مفاهیم کمی مذکور را نشان می‌دهد. نحوه‌ی امتیازدهی مفاهیم کیفی نیز در ادامه شرح داده خواهد شد.

شکل ۲ خصیصه‌های مورد مطالعه جهت امتیازدهی به گزینه‌های مختلف منابع و سیستم‌های تولید و ذخیره سازی هیدروژن.

۲-۱- عملکرد زیست محیطی

عملکرد زیست محیطی شامل مجموعه‌ای از سه مفهوم کمی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان اراضی مورد نیاز، میزان زباله‌ی جامد تولید شده و یک مفهوم کیفی کیفیت فاضلاب در نظر گرفته شد. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس (kg CO_2 eq./kg H_2) بیان می‌شود و میزان اراضی مورد نیاز نیز مقدار مساحت زمین مورد نیاز برای تولید یا ذخیره هیدروژن است و بر اساس (kg H_2/متر مربع مورد نیاز زمین) بیان می‌شود. میزان زباله‌ی جامد تولید شده بر اساس (kg H_2/کیلوگرم زباله‌ی جامد) بیان می‌گردد. کیفیت فاضلاب در محدوده‌ی ۱۰-۰ طبقه بندی می‌گردد. ۰ به معنای کیفیت کم است که نشانگر دفع فاضلاب آلوده و یا بسیار گرم و یا بسیار سرد است که سبب مختل شدن اکوسیستم می‌گردد. از طرف دیگر، ۱۰ به معنای بهترین کیفیت است و برای تخلیه‌ی فاضلاب تمیز در دماهای نزدیک به دمای محیط در نظر گرفته می‌شود. امتیاز کلی عملکرد زیست محیطی با در نظر گرفتن میانگین امتیاز مربوط به هر یک از چهار مفهوم میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان اراضی مورد نیاز، کیفیت فاضلاب و میزان زباله‌ی جامد تولید شده محاسبه می‌شود.

۲-۲- عملکرد اقتصادی

عملکرد اقتصادی شامل مجموعه‌ای از هزینه‌های اولیه و جاری در نظر گرفته شد که هر دو مفاهیم کمی هستند. هزینه‌ی اولیه هزینه‌ی مورد نیاز سرمایه گذاری است که بر اساس (USD/kg H_2) بیان می‌شود. هزینه‌های جاری شامل هزینه‌های بهره برداری و نگهداری است که بر اساس (USD/kg H_2) بیان می‌شود. امتیاز کلی عملکرد اقتصادی با در نظر گرفتن میانگین امتیاز هزینه‌های اولیه و جاری محاسبه می‌شود.

۲-۳- عملکرد اجتماعی

عملکرد اجتماعی شامل مجموعه‌ای از چهار مفهوم کیفی تاثیر بر سلامت عمومی، فرصت‌های شغلی، فرصتهای آموزشی و پذیرش عمومی در نظر گرفته شد. هر یک از این مفاهیم در محدوده‌ی ۱۰-۰ امتیازدهی می‌شود. به این صورت که ۰ نشان دهنده‌ی تأثیر منفی زیاد بر سلامت عمومی و یا عدم ایجاد فرصت‌های شغلی و آموزشی و یا عدم پذیرش عمومی است. بالعکس، ۱۰ به معنای عدم تأثیر منفی بر سلامت عمومی و یا ایجاد فرصت‌های شغلی و آموزشی گسترده و یا پذیرش عمومی کامل است. امتیاز کلی عملکرد اجتماعی با در نظر گرفتن میانگین امتیاز تأثیر بر سلامت عمومی، فرصت‌های شغلی وآموزشی و پذیرش عمومی محاسبه می‌شود.

۲-۴- عملکرد فنی

عملکرد فنی شامل مجموعه‌ای از بازده انرژی، بازده اکسرژی، کنترل فرآیند و میزان مصرف مواد اولیه در نظر گرفته شد. امتیازدهی بازده‌های انرژی و اگسرژی در محدوده‌ی ۱۰-۰ و ارزیابی بر اساس معادله‌ی زیر انجام می‌شود:

$$\text{امتیاز بازده} = \frac{\text{محتوای انرژی محصول}}{\text{محتوای انرژی ورودی}} \times ۱۰ \qquad (۲)$$

مفهوم کمی کنترل فرآیند نیز در محدوده‌ی ۱۰-۰ امتیازدهی شده است که ۰ و ۱۰ به ترتیب به معنای دشوارترین و ساده‌ترین امکان کنترل فرآیند می‌باشد. مفهوم کمی مصرف مواد اولیه شامل هر نوع ماده‌ی مورد نیاز مانند آب، کاتالیست، زیست توده و غیره است و بر اساس (kg H_2/کیلوگرم مواد اولیه) بیان می‌گردد. امتیازدهی کلی عملکرد فنی با در نظر گرفتن میانگین امتیاز بازده انرژی، بازده اگسرژی، کنترل فرآیند و مصرف مواد اولیه محاسبه می‌شود.

۲-۵- قابلیت اطمینان

در نهایت قابلیت اطمینان شامل مجموعه‌ای از مفاهیم کیفی وابستگی به منابع وارداتی، قابل پیش بینی بودن و مقیاس پذیری در نظر گرفته شد. این مفاهیم نیز در محدوده ۱۰-۰ امتیازدهی می‌شوند که در آن ۰ نشان‌دهنده‌ی وابستگی کامل به منابع وارداتی و یا قابل پیش بینی نبودن و یا مقیاس پذیر نبودن است. بالعکس، ۱۰ به معنای عدم وابستگی به منابع وارداتی و یا قابل پیش بینی بودن و یا مقیاس پذیر بودن به روش‌های متعدد است. امتیاز کلی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن میانگین امتیاز وابستگی به منابع وارداتی، قابل پیش بینی بودن و مقیاس پذیری محاسبه می‌شود.

هدف اصلی از امتیازدهی به خصیصه‌های پایداری در مقیاس ۱۰-۰ که در این بخش توضیح داده شد، ارائه‌ی یک روش ملموس جهت مقایسه‌ی موثر تمام گزینه‌های انتخاب شده است. به این صورت که ۰ نشان دهنده‌ی ضعیف‌ترین گزینه از نقطه نظر پایداری و ۱۰ نشان دهنده‌ی گزینه‌ی ایده آل از منظر پایداری است.

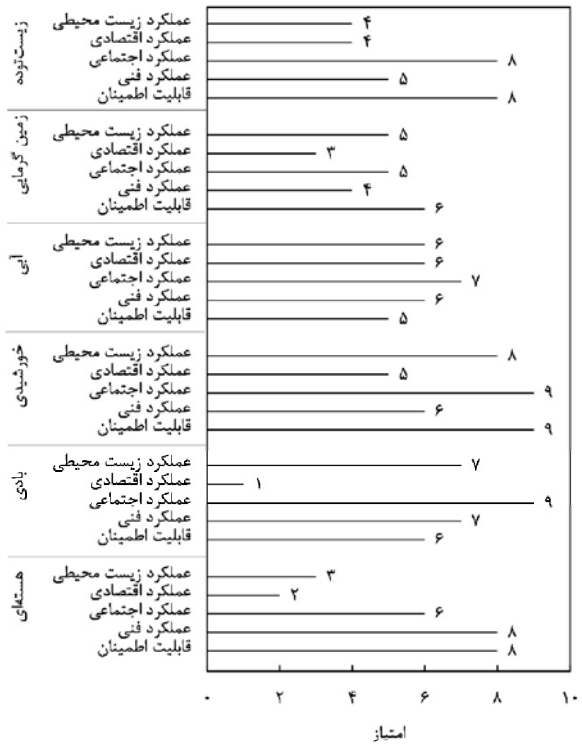
۳- تحلیل نتایج

در این بخش نتایج مربوط به امتیازدهی عملکرد اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی، فنی و قابلیت اطمینان برای هر یک از موارد (الف) منابع تولید هیدروژن، (ب) سیستم‌های تولید هیدروژن و (ج) سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و در نهایت با مشخص شدن پایدارترین گزینه‌ها، سناریوی ایده‌آل جهت دستیابی به اقتصاد پایدار هیدروزنی ارائه خواهد شد. در همه‌ی موارد، ۰ به معنای عملکرد ضعیف و بسیار دور از شرایط پایداری می‌باشد. به عنوان مثال انتشار زیاد آلاینده، استفاده‌ی زیاد از زمین، آسیب بیشتر به محیط زیست، هزینه‌های بالا، تأثیر

منفی زیاد بر جامعه یا مزایای کمتر اجتماعی، بازده کم، نیاز به مواد اولیه‌ی زیاد، وابستگی زیاد به منابع وارداتی، پیش بینی پذیری کم و عدم مقیاس پذیری. بالعکس، ۱۰ به معنای عملکرد ایده‌آل و بسیار نزدیک به شرایط پایداری می‌باشد. به عنوان مثال انتشار کم آلاینده‌ها، استفاده از زمین کمتر، آسیب کمتر به محیط زیست، هزینه‌های کم، تأثیر منفی کم بر جامعه یا مزایای بیشتر اجتماعی، بازده بالا، نیاز کمتر به مواد اولیه، وابستگی کمتر به منابع وارداتی، پیش بینی پذیری بالا و مقیاس پذیری. در ادامه پیشنهاد

۱-۳- ارزیابی منابع تولید هیدروژن

همانطور که قبلا اشاره شد، منابع مورد بررسی برای هیدروژن عبارتند از زیست توده، زمین گرمایی، آبی، هسته‌ای، خورشیدی و بادی. نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری منابع تولید هیدروژن در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳ نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری منابع تولید هیدروژن.

خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- عملکرد زیست محیطی
  خورشیدی > بادی > آبی > زمین گرمایی > زیست توده > هسته‌ای
- عملکرد اقتصادی
  آبی > خورشیدی > زیست توده > زمین گرمایی > هسته‌ای > بادی
- عملکرد اجتماعی
  خورشیدی = بادی > زیست توده > آبی > هسته‌ای > زمین گرمایی
- عملکرد فنی
  هسته‌ای > بادی > خورشیدی = آبی > زیست توده > زمین گرمایی
- عملکرد قابلیت اطمینان
  خورشیدی > زیست توده = هسته‌ای > بادی = زمین گرمایی > آبی

❖ امتیاز کلی پایداری
خورشیدی > باد = آبی > زیست توده > هسته‌ای > زمین گرمایی

آنالیز پایداری منابع نشان داد که از منظر عملکرد زیست محیطی، عملکرد اجتماعی و قابلیت اطمینان منبع خورشیدی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. بدیهی است که تمام فرآیندهای مبتنی بر انرژی خورشیدی مانند سلول‌های فوتوالکتروشیمیایی، چرخه‌های حرارتی خورشیدی، فرآیندهای فوتوبیولوژیکی و غیره تأثیر منفی بسیار کمی در آلایندگی خاک، هوا و آب دارند. از این رو، بر سلامت عمومی نیز تأثیر منفی بسیار کمی خواهند داشت که متعاقبا سبب افزایش عملکرد اجتماعی نیز می‌شود.

اما منبع خورشیدی در حوزه‌های فنی و اقتصادی عملکرد متوسط دارد. لذا برای اینکه فرآیندهای تولید هیدروژن مبتنی بر انرژی خورشیدی با سیستم‌های سنتی قابل رقابت باشند، باید با بهبود دانش فنی و کاهش هزینه‌های اولیه و نگهداری، عملکرد فنی و اقتصادی آنها نیز افزایش یابد.

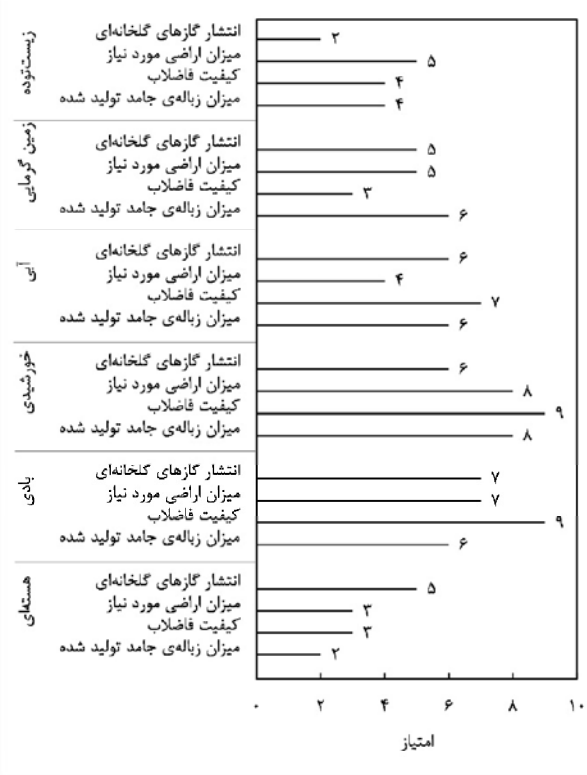
منبع هسته‌ای با دارا بودن زباله‌های جامد پر خطر و متعاقبا عدم پذیرش عمومی، در حوزه‌های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارای عملکرد بسیار ضعیف است. چنانچه این موارد برطرف شوند و هزینه‌ها نیز کاهش یابند، منبع هسته‌ای می‌تواند برای تولید هیدروژن پایدار در آینده‌ای مناسب باشد.

منبع بادی نیز در کنار منبع خورشیدی دارای بهترین عملکرد اجتماعی است زیرا نه تنها تأثیر منفی چندانی بر سلامت عمومی ندارد بلکه قادر به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید نیز می‌باشد.

منبع آبی بالاترین امتیاز را در حوزه‌ی ارزیابی اقتصادی دارد زیرا فناوری‌های مرتبط با منبع آبی به خوبی توسعه یافته‌اند و در مقیاس بزرگ نیز قابل اجرا می‌باشند.

چنانچه امتیاز کلی پایداری در نظر گرفته شود منبع خورشیدی با امتیاز بهترین و منبع زمین گرمایی ضعیف ترین منابع برای تولید هیدروژن هستند.

نتایج امتیازدهی مربوط به عملکرد زیست محیطی در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴ نتایج امتیازدهی عملکرد زیست محیطی منابع تولید هیدروژن.

خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- انتشار گازهای گلخانه‌ای

بادی > خورشیدی = آبی > زمین گرمایی = هسته‌ای > زیست توده

- میزان اراضی مورد نیاز

خورشیدی > بادی > زیست توده = زمین گرمایی > آبی > هسته‌ای

- کیفیت فاضلاب

خورشیدی = بادی > آبی > زیست توده > هسته‌ای = زمین گرمایی

- میزان زباله‌ی جامد تولید شده

خورشیدی > بادی = آبی = زمین گرمایی > زیست توده > هسته‌ای

❖ امتیاز کلی زیست محیطی

خورشیدی > بادی = آبی > زمین گرمایی > زیست توده > هسته‌ای

نتایج رتبه بندی عملکرد زیست محیطی نشان می‌دهد که منابع خورشیدی و بادی با کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای، کمترین میزان اراضی مورد نیاز، بالاترین کیفیت فاضلاب و کمترین میزان زباله‌ی جامد تولید شده دارای مطلوب‌ترین عملکرد زیست محیطی هستند.

زیست توده بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را داراست و تلاش‌ها در حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط با تولید هیدروژن از منابع زیست توده باید بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای متمرکز شود.

انرژی‌های زمین گرمایی و هسته‌ای پایین‌ترین کیفیت فاضلاب را دارند. تأثیر منفی انرژی زمین گرمایی ناشی از خطر آلودگی منابع آب زیرزمینی است. انرژی هسته ای نیز به دلیل دمای نامناسب فاضلاب ناشی از برج‌های خنک کننده که مستقیماً به دریاچه‌ها و رودخانه‌ها تخلیه می‌شود به اکوسیستم آب آسیب می‌رساند. همچنین انرژی هسته‌ای با دارا بودن حجم زیادی از زباله‌های جامد رادیواکتیو، پایین‌ترین امتیاز مربوط به تولید زباله‌ی جامد را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر به دلیل ملاحظات ایمنی بالا و نیازهای کنترلی گسترده مانند خنک کاری، مدیریت زباله‌های جامد رادیواکتیو و کنترل فشار، استفاده از منبع هسته‌ای برای تولید هیدروژن نیازمند سطح وسیعی از اراضی است.

با در نظر گرفتن تمام معیارهای عملکرد زیست محیطی، منابع خورشیدی و هسته‌ای به ترتیب مناسب‌ترین و مضرترین گزینه‌های تولید هیدروژن برای محیط زیست هستند.

۲-۳- ارزیابی سیستم‌های تولید هیدروژن

همانطور که قبلا اشاره شد، سیستم‌های تولید هیدروژن مورد بررسی در این مطالعه عبارتند از بیولوژیکی، الکتریکی، نوری و حرارتی. نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری سیستم‌ای تولید هیدروژن در شکل ۵ قابل مشاهده است.

خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- عملکرد زیست محیطی

نوری > بیولوژیکی > الکتریکی > حرارتی

- عملکرد اقتصادی

الکتریکی > حرارتی > بیولوژیکی > نوری

- عملکرد اجتماعی

حرارتی > الکتریکی > بیولوژیکی > نوری

- عملکرد فنی

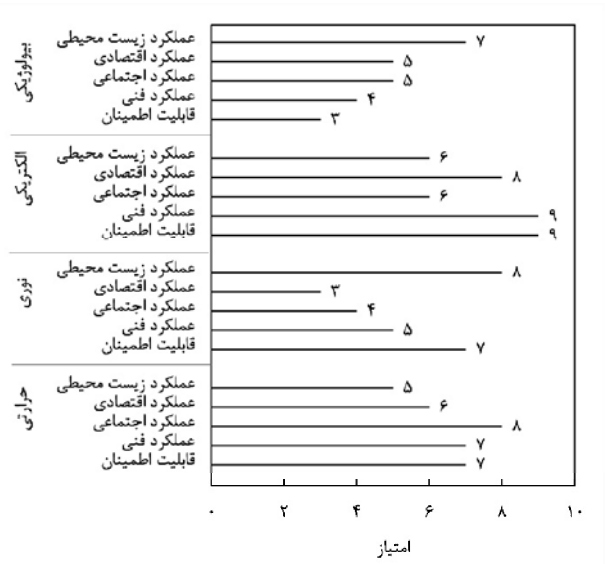
الکتریکی > حرارتی > نوری > بیولوژیکی

- عملکرد قابلیت اطمینان

الکتریکی > حرارتی = نوری > بیولوژیکی

❖ امتیاز کلی پایداری

الکتریکی > حرارتی > بیولوژیکی > نوری



شکل ۵ نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری سیستم‌های تولید هیدروژن.

نتایج آنالیز پایداری نشان می‌دهد که از منظر عملکرد اقتصادی، عملکرد فنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های الکتریکی مناسب‌ترین سیستم‌ها می‌باشند. زیرا نه تنها فناوری سیستم‌های الکتریکی تولید هیدروژن (مانند الکترولیز آب) به صورت تجاری در دسترس هستند، بلکه توانایی تولید هیدروژن با خلوص بسیار بالا را نیز دارا بوده و در مقیاس‌های کوچک و بزرگ و همچنین ثابت و قابل حمل در دسترس می‌باشند.

این نکته را نیز باید در نظر داشت که ممکن است در آینده با کاهش هزینه‌ی سرمایه گذاری سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، عملکرد اقتصادی همه‌ی گزینه‌های ذکر شده به طور قابل توجهی افزایش یابد.

سیستم‌های تولید بیولوژیکی هیدروژن در حوزه‌های عملکرد فنی و قابلیت اطمینان با چالش‌هایی روبه‌رو هستند زیرا نه تنها کنترل و پیش بینی رفتار ارگانیسم‌های بیولوژیکی بسیار پیچیده و دشوار است، بلکه تولید هیدروژن نیز در این سیستم‌ها به آهستگی صورت می‌پذیرد که خود معضلات مقیاس پذیری را به دنبال دارد.

سیستم‌های نوری سازگار با محیط زیست هستند لیکن از آنجا که این فناوری نسبتاً جدید و در نتیجه گران‌قیمت است، همچنان نیاز به تحقیقات برای یافتن مواد جدید جهت بهره‌برداری موثر و مقرون به صرفه از انرژی خورشیدی احساس می‌شود.

از آنجا که بسیاری از سیستم‌های ذکر شده می‌توانند با منابع تجدید پذیر و پاک ادغام شوند، عملکرد زیست محیطی آنها رضایت بخش به نظر می‌رسد.

چنانچه امتیاز کلی پایداری در نظر گرفته شود سیستم‌های الکتریکی تولید هیدروژن دارای بهترین عملکرد می‌باشد. در حالی که سیستم‌های بیولوژیکی ضعیف‌ترین سیستم‌ها برای تولید هیدروژن هستند.

نتایج رتبه بندی عملکرد زیست محیطی سیستم‌های تولید هیدروژن در شکل ۶ آورده شده است. خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

شکل ۶ نتایج امتیازدهی عملکرد زیست محیطی سیستم‌های تولید هیدروژن.

- انتشار گازهای گلخانه‌ای

نوری > بیولوژیکی > الکتریکی = حرارتی

- میزان اراضی مورد نیاز

نوری = الکتریکی > بیولوژیکی > حرارتی

- کیفیت فاضلاب

نوری > بیولوژیکی = الکتریکی = حرارتی

- میزان زباله‌ی جامد تولید شده

نوری = بیولوژیکی > الکتریکی > حرارتی

❖ امتیاز کلی زیست محیطی

نوری > بیولوژیکی > الکتریکی > حرارتی

نتایج نشان می‌دهد که از منظر تمامی معیارهای عملکرد زیست محیطی، سیستم‌های نوری و حرارتی تولید هیدروژن به ترتیب بسیار ایده‌آل و بسیار مضر هستند.

۳-۳- ارزیابی سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن

همانطور که قبلا اشاره شد، سیستم‌های مورد بررسی برای ذخیره سازی هیدروژن عبارتند از هیدریدهای شیمیایی، گاز فشرده، مایع کرایوژنیک، هیدریدهای فلزی و نانو مواد. نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن در شکل ۷ قابل مشاهده است. خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- عملکرد زیست محیطی

نانومواد > هیدریدهای شیمیایی = هیدریدهای فلزی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

- عملکرد اقتصادی

نانومواد > گاز فشرده > هیدریدهای شیمیایی > هیدریدهای فلزی > مایع کرایوژنیک

- عملکرد اجتماعی

نانومواد > هیدریدهای شیمیایی > هیدریدهای فلزی > گاز فشرده = مایع کرایوژنیک

- عملکرد فنی

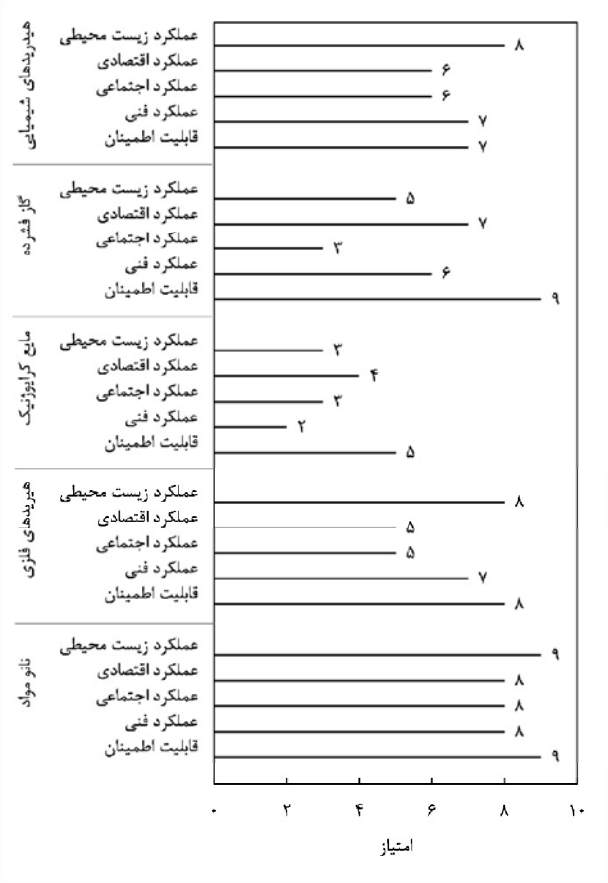
نانومواد > هیدریدهای شیمیایی = هیدریدهای فلزی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

- عملکرد قابلیت اطمینان

نانومواد = گاز فشرده > هیدریدهای فلزی > هیدریدهای شیمیایی > مایع کرایوژنیک

❖ امتیاز کلی پایداری

نانومواد > هیدریدهای شیمیایی > هیدریدهای فلزی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک



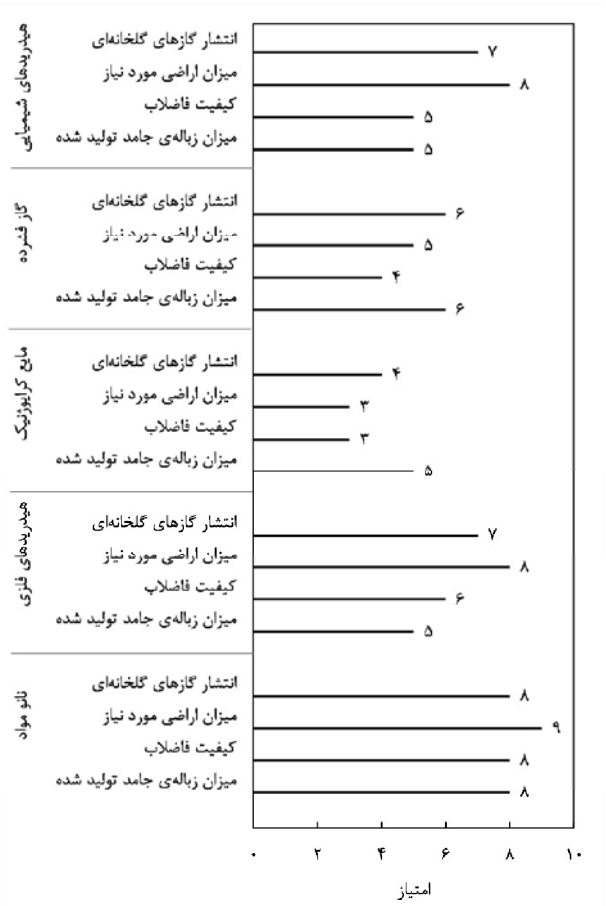
شکل ۷ نتایج امتیازدهی خصیصه‌های پایداری سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن.

آنالیز پایداری منابع نشان داد که از منظر تمامی معیارهای عملکرد زیست محیطی، سیستم‌های نانومواد و مایع کرایوژنیک به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را دارند.

دلیل عدم کارآیی مایعات کرایوژنیک، کار در محدوده‌ی دماهای بسیار پایین است که علاوه بر خطرات ایمنی، افزایش هزینه را نیز به دنبال دارد. علاوه بر این، هدر رفت هیدروژن در سیستم‌های ذخیره سازی کرایوژنیک در مقایسه با سایر گزینه‌های مطرح شده بسیار زیاد است. برای به حداقل رساندن هدر رفت، سیستم‌های کرایوژنیک باید به شدت عایق بندی شوند که باعث افزایش پیچیدگی و بالا رفتن هزینه می‌شود. به طور مشابه، گاز فشرده نیز به دلیل کار در محدوده‌ی فشارهای بالا، نیازمند تجهیزات خاص است که علاوه بر ایجاد چالش‌های ایمنی، بر هزینه‌ی سیستم و عملکرد اجتماعی نیز تأثیر منفی دارد. به طور کلی، به نظر می‌رسد که سیستم‌های مبتنی بر نانومواد برای سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن در آینده بسیار مناسب باشند. نانو مواد کمترین میزان انتشار مواد زاید، بالاترین بازده و حداقل هدررفت را دارا می‌باشند. بنابراین قابلیت اطمینان بالا و همچنین قابلیت ایجاد اشتغال را دارند.

چنانچه امتیاز کلی پایداری در نظر گرفته شود سیستم‌های نانومواد و مایع کرایوژنیک به ترتیب پایدارترین و ناپایدارترین سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن هستند.

نتایج امتیازدهی مربوط به عملکرد زیست محیطی در شکل ۸ ارائه شده است. که در آن مزایای زیست محیطی نانومواد را به وضوح می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۸ نتایج امتیازدهی عملکرد زیست محیطی سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن.

خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر است:

- انتشار گازهای گلخانه‌ای

نانومواد > هیدریدهای فلزی = هیدریدهای شیمیایی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

- میزان اراضی مورد نیاز

نانومواد > هیدریدهای فلزی = هیدریدهای شیمیایی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

- کیفیت فاضلاب

نانومواد > هیدریدهای فلزی > هیدریدهای شیمیایی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

- میزان زباله‌ی جامد تولید شده

نانومواد > گاز فشرده > هیدریدهای فلزی = هیدریدهای شیمیایی = مایع کرایوژنیک

❖ امتیاز کلی زیست محیطی

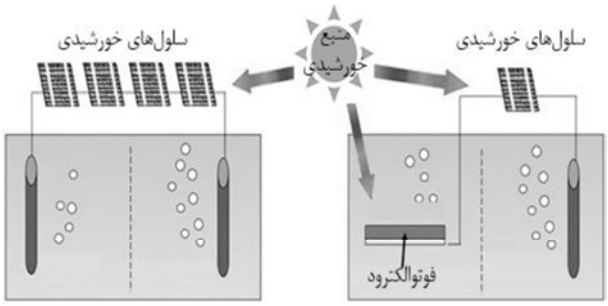
نانومواد > هیدریدهای فلزی > هیدریدهای شیمیایی > گاز فشرده > مایع کرایوژنیک

هیدریدهای شیمیایی و فلزی اگرچه تراکم ذخیره سازی بالایی دارند لیکن دارای معضلات تولید زباله‌ی جامد و بازیافت مواد می‌باشند.

نتایج رتبه بندی عملکرد زیست محیطی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تمام معیارهای عملکرد زیست محیطی، سیستم‌های نانومواد و مایع کرایوژنیک به ترتیب مناسب‌ترین و مضرترین گزینه‌های ذخیره سازی هیدروژن برای محیط زیست هستند.

پس اگر نتایج ذکر شده را جمع بندی کنیم، پایدارترین و سازگارترین گزینه با محیط زیست برای تولید هیدروژن استفاده از منبع خورشیدی در درجه ی اول و منبع بادی در درجه ی دوم، سیستم تولید الکتریکی و سیستم ذخیره سازی توسط نانومواد است.

به عبارت دیگر همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می کنید، پایدارترین شیوه‌ی تولید هیدروژن، الکترولیزی است که برق آن توسط انرژی خورشیدی تامین شده باشد. لیکن نیاز است تا قیمت تمام شده‌ی هیدروژن تولید شده توسط این سیستم‌ها کاهش یابد تا اقتصاد هیدروژنی پایدار به تحقق بپیوندد. به این منظور نیاز است تا سیستم‌های تولید در مقیاس‌های بزرگ کارآمد شوند و همچنین مواد جدید و ارزان قیمت برای سیستم‌های تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی ابداع شوند.



شکل ۹ بهره گیری از منبع خورشیدی برای تولید هیدروژن.

۴-۳- مسیر آینده

در حال حاضر هیدروژن استفاده‌های متعددی دارد. قسمت عمده‌ی هیدروژن در صنایع پالایشگاهی و تولید مواد شیمیایی استفاده می‌شود. همچنین استفاده‌های متعدد دیگری در صنایع غذایی، الکترونیک، صنعت شیشه، صنعت استیل و غیره دارد. کاربردهایی که برای آینده‌ی هیدروژن می‌توان در نظر گرفت عبارتند از: سنتز مواد شیمیایی به عنوان حامل‌های تجدیدپذیر هیدروژن و تامین انرژی در بخش حمل و نقل، ساختمان‌ها و صنایع. تامین انرژی می‌تواند با به کار گیری هیدوژن در پیل‌های سوختی، موتورهای احتراق داخلی و توربین‌ها تحقق یابد.

در صنعت، هیدروژن هم به عنوان ماده اولیه جهت تولید محصولات شیمیایی و هم به عنوان سوخت برای تامین انرژی کاربرد دارد. به منظور تامین انرژی الکتریکی، هیدروژن می‌تواند به تدریج جایگزین گاز طبیعی در توربین‌های گاز شود تا جایی که با ۱۰۰ درصد جایگزینی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صفر برساند. استفاده‌ی گسترده از هیدروژن در صنعت نیازمند آن است که قیمت هیدروژن برابر و یا کمتر از قیمت سوخت‌های فسیلی باشد. اگرچه در حال حاضر نیز نمونه‌هایی از نیروگاه‌ها با سوخت هیدروژن در سرتاسر دنیا مشغول به کار هستند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۷ نیروگاه با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات در ابوظبی امارات متحده‌ی عربی شروع به کار کرد. هزینه‌ی احداث آن ۲ میلیارد دلار براورد شده است. نمونه‌ی دیگر، نیروگاه هیدروژن سوز با ظرفیت ۳۰۰ مگاوات در کالیفرنیای امریکا است که در سال ۲۰۱۷ به بهره برداری رسید. در فوسینای ایتالیا نیز یک نیروگاه هیدروژن سوز ۱۶ مگاواتی مشغول به کار است. تخمین زده می‌شود که استفاده از هیدروژن به جای سوخت‌های فسیلی در این نیروگاه موجب جلوگیری از انتشار ۱۷ هزار تن دی‌اکسیدکربن در سال می‌شود. همچنین یک مجموعه‌ی تولید برق از هیدروژن در استرالیا در حال احداث است که شامل دو توربین گاز ۱۶ مگاواتی و یک پیل سوختی ۵ مگاواتی است. در فرآیندهای صنعتی به طور پیوسته به مقادیر زیادی از هیدروژن نیاز است، بنابراین ذخیره سازی هیدروژن در مقیاس بزرگ و به طور موثر برای صنایع ضروری است.

همانگونه که اشاره شد، هیدروژن می‌تواند در پیل‌های سوختی هم به کار گرفته شود که آنها نیز به نوبه‌ی خود می‌توانند جایگزین موتورهای احتراق

داخلی در بخش حمل و نقل شوند. به غیر از خودروهای شخصی، بخش حمل و نقل عمومی نیز در مناطقی از اروپا به پیل‌های سوختی مجهز شده‌اند. اتوبوس‌ها، قطارها و کشتی‌ها با نیروی محرکه‌ی هیدروژنی هم اکنون در سرتاسر اروپا مانند انگلستان و آلمان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور گسترش استفاده از هیدروژن در بخش حمل و نقل بایستی قیمت وسایل نقلیه‌ی هیدروژنی با وسایل نقلیه‌ی معمولی قابل رقابت باشد. علاوه بر این، قیمت خرده فروشی هیدروژن باید با سوخت‌های متداول در بخش حمل و نقل رقابت کند. همچنین نیاز است تا شبکه‌ی توزیع هیدروژن باید به خوبی توسعه یابد و ایستگاه‌های سوخت رسانی به تعداد کافی برای کاربران نهایی در دسترس باشند. در صنعت حمل و نقل هوایی نیز عملکرد سیستم‌های ذخیره سازی هیدروژن باید به طور قابل توجهی بهبود یابد. افزون بر آن، باید این نکته را در نظر داشت که ایمنی وسایل نقلیه‌ی هیدروژنی در اولویت قرار دارد.

استفاده‌ی گسترده‌ی هیدروژن در ساختمان‌ها در مقایسه با صنعت حمل و نقل از پیچیدگی کمتری برخوردار است. به عنوان مثال اولین گام می‌تواند ادغام هیدروژن در شبکه‌ی گاز طبیعی موجود در ساختمان‌ها برای نیازهای مسکونی مانند آشپزی، آب گرم، گرمایش و سرمایش باشد. با ادغام هیدروژن در خطوط لوله‌ی گاز شهری، می‌توان انتشار دی‌اکسید کربن را تا ۱۸ درصد کاهش داد. در گام بعدی باید برای به حداقل رساندن تلفات هیدروژن در خطوط لوله‌ی گاز شهری، تغییرات تغییراتی اعمال شود. همچنین، پیل‌های سوختی در مقیاس‌های بزرگتر می‌توانند برای تامین انرژی مورد نیاز ساختمان‌ها در بخش گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع مورد استفاده قرار بگیرند. به این صورت که از سلول‌های خورشیدی و/یا ژنراتورهای بادی به طور مستقیم برای تامین انرژی ساختمان استفاده می‌شود و مازاد آن توسط الکترولایزر به هیدروژن تبدیل می‌شود تا ذخیره شده و در آینده نیازهای انرژی ساختمان را از طریق احتراق مستقیم و یا از طریق پیل‌های سوختی پوشش دهد. ساختمان‌های مسکونی به ذخیره سازی هیدروژن به صورت طولانی مدت و در مقیاس متوسط تا بزرگ نیاز دارند. همانند صنعت حمل و نقل، قیمت هیدروژن برای مصرف در ساختمان‌ها نیز باید مناسب باشد. افزون بر آن، هیدروژن مورد استفاده در ساختمان‌ها نه تنها باید پایدار باشد، بلکه باید ایمنی و کارآیی قابل قبولی نیز داشته باشد.

به طور خلاصه، در بخش صنعت می‌بایست سیستم‌های توزیع و ذخیره سازی در مقیاس بزرگ و به صورت پیوسته کارآمد باشند. در بخش حمل و نقل نیاز به توسعه‌ی سیستم سوخت رسانی هیدروژنی، کاهش قیمت خودروهای هیدروژنی، افزایش ایمنی و کارایی احساس می شود. در حوزه‌ی استفاده از هیدروژن در ساختمان‌ها باید سیستم هیدروژنی قابل ادغام در شبکه‌ی فعلی گاز شهری بوده و کارایی و ایمنی سیستم‌های ذخیره سازی در مقیاس‌های بزرگ و نیز برای ذخیره سازی طولانی مدت هیدروژن افزایش یابد. در این میان آنچه حائز اهمیت است کاهش قیمت هیدروژن می‌باشد. در حال حاضر قیمت آن ۲,۵ دلار به ازای هر کیلوگرم است که در آینده با استفاده از منبع تجدیدپذیر خورشیدی و سیستم‌های بهینه‌ی الکترولیز انتظار می‌رود قیمت آن به ۱ دلار به ازای هر کیلوگرم کاهش یابد. پیش بینی می‌شود که قیمت هیدروژن تولید شده توسط روش الکترولیز و با استفاده از منبع خورشیدی تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۳۰ درصد دیگر هم کاهش پیدا کند. به این ترتیب جامعه‌ی بشری خواهد توانست در مسیر اقتصاد پایدار هیدروژنی گام بردارد.

لذا بنابر آنچه که گفته شد، گسترش و توسعه‌ی سیستم‌های انرژی هیدروژنی برای تأمین نیازهای انرژی در آینده، نیازمند تحقیقات نوآورانه در سرتاسر زنجیره‌ی انرژی هیدروژنی است. نیازهای اصلی تحقیقاتی در حوزه‌های مختلف زنجیره‌ی انرژی هیدروژنی عبارتند از:

❖ **تولید**
- سیستم‌های ایمن و کارآمد در مقیاس بزرگ
- تولید مواد جدید و کم هزینه برای سیستم‌های نوری
- سیستم‌های تولید پراکنده قابل کاربرد در مناطق دور افتاده

❖ **ذخیره سازی**
- سیستم‌های ذخیره‌سازی کوچک‌تر و سبک‌تر با چگالی بالا
- سیستم‌های کارآمد و کم هزینه در دماها و فشارهای پایین‌تر
- قابلیت بازیافت مواد ذخیره‌سازی

❖ **توزیع**
- ارتقا خطوط لوله‌ی گاز شهری برای دستیابی به شبکه‌های بزرگ هیدروژن
- به حداقل رساندن تلفات حمل و نقل
- کاهش هزینه‌ها

❖ **حمل و نقل**
- کاتالیست کارآمد و مقرون به صرفه برای سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی
- توسعه‌ی ایستگاه‌های سوخت رسانی
- وسایل نقلیه‌ی هیدروژن سوز با قیمت مناسب
- افزایش ایمنی
- افزایش بازده

❖ **ساختمان‌ها**
- منعطف‌سازی تجهیزات برای استفاده از هیدروژن
- ذخیره سازی طولانی مدت
- ذخیره سازی در مقیاس بزرگ
- افزایش ایمنی
- افزایش بازده
- کاهش هزینه‌ها

❖ **صنایع**
- ادغام هیدروژن در سیستم‌های تولید چندگانه
- فراهم نمودن زیرساخت‌های استفاده از هیدروژن پاک
- ذخیره سازی و توزیع کارآمد
- سیستم‌های با مقیاس بزرگ
- عملیات پیوسته
- کاهش هزینه‌ها

به علاوه، پس از گام تحقیق و توسعه و تجاری سازی و یا همزمان با آن، نیاز است زیرساخت های بازار توسعه یابد تا به تدریج اقتصاد هیدروژنی پایدار تحقق یابد. مراحل انتقال به اقتصاد هیدروژنی کاملاً توسعه یافته و پایدار در

شکل ۱۰ ارائه شده است. اولین مرحله تحقیق و توسعه‌ی فناوری است که شامل تحقیقات در حوزه‌هایی است که ذکر آن رفت. در این مرحله سناریوی تجاری سازی شکل می‌گیرد. مرحله‌ی دوم، ورود به بازار اولیه است که در آن تجاری سازی سیستم‌های انرژی هیدروژنی اولیه صورت می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم هدف تقویت عملکرد نسل اولیه‌ی سیستم‌های انرژی هیدروژنی و ورود آن‌ها به بازار است. در مرحله‌ی سوم، سرمایه گذاری لازم است تا بازار و زیرساخت‌ها توسعه یابد. به این معنا که هیدروژن برای انواع کاربر نهایی و نیازهای گوناگون آن‌ها در دسترس باشد. در مرحله‌ی چهارم، یک بازار و زیرساخت کاملاً توسعه یافته برای هیدروژن پیش بینی می‌شود که در آن هیدروژن پاک، مقرون به صرفه، قابل اعتماد و ایمن است و به طور مؤثر برای انواع نیاز به انرژی از برق گرفته تا گرمایش و سرمایش، تهویه، تولید آب شیرین و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مرحله، وابستگی به سوخت‌های فسیلی از بین می‌رود و یا به حداقل می‌رسد و به این ترتیب اقتصاد هیدروژنی پایدار و کاملا توسعه یافته محقق می‌گردد.

شکل ۱۰ مراحل انتقال به اقتصاد هیدروژنی کاملاً توسعه یافته و پایدار.

۴- جمع بندی

گذار از سیستم‌های انرژی متکی بر منابع فسیلی به سیستم‌های انرژی هیدروژنی به عنوان اساسی‌ترین راه حل برای کاهش پیامدهای منفی گرمایش جهانی هستند. از سوی دیگر، برای داشتن آینده‌ای پایدار، به اقتصاد هیدروژنی پایدار نیاز است. بنابراین در این مطالعه، پایداری منابع تولید، سیستم‌های تولید، سیستم‌های ذخیره سازی از نقطه نظر پایداری ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بدین منظور پنج خصیصه‌ی اصلی پایداری یعنی عملکرد فنی، زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و قابلیت اطمینان با بهره‌گیری از منابع موجود امتیازدهی شده‌اند. در نهایت نیز کاربردهای هیدروژن و مسیر دستیابی به اقتصاد هیدروژنی پایدار در آینده ترسیم شده است. با انتخاب پایدارترین منبع و سیستم تولید و ذخیره سازی هیدروژن و با افزایش کارایی فناوری‌های مربوط به کاربرد نهایی هیدروژن مانند سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق هیدروژن سوز، می‌توان به تدریج نقش سوخت‌های فسیلی در سیستم‌های انرژی را از میان برداشته و هیدروژن را جایگزین آن نمود. نتایج اصلی این مطالعه به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- از نقطه نظر پایداری، منبع خورشیدی بالاترین امتیاز عملکرد (۷/۴ از ۱۰) را دارد، در حالی که منبع زمین گرمایی دارای کمترین امتیاز (۴/۶ از ۱۰) است.
- از منظر عملکرد زیست محیطی، منبع خورشیدی پر مزیت‌ترین منبع تولید هیدروژن با امتیاز ۷/۷ از ۱۰ و انرژی هسته‌ای دارای کمترین امتیاز ۳/۲ از ۱۰ است.
- با در نظر گرفتن کلیه‌ی خصیصه‌های پایداری، سیستم‌های الکتریکی برای تولید هیدروژن بیشترین مزیت را دارند (۷/۶ از ۱۰) و سیستم‌های نوری دارای کمترین امتیاز (۵/۴ از ۱۰) هستند.
- مقایسه‌ی رتبه بندی عملکرد زیست محیطی سیستم‌های تولید هیدروژن نشان می‌دهد که سیستم‌های نوری دارای بالاترین امتیاز (۷/۲ از ۱۰) و سیستم‌های حرارتی دارای کمترین امتیاز (۵/۷ از ۱۰) هستند.
- هنگامی که تمام معیارهای پایداری در نظر گرفته شود، نانو مواد بیشترین مزایا را دارا هستند (۸/۴ از ۱۰) درحالی‌که مایع کرایوژنیک کمترین میانگین امتیاز کلی را دارد (۳/۴ از ۱۰).
- در میان گزینه‌های ذخیره سازی هیدروژن، نانو مواد بالاترین امتیاز (۸/۲ از ۱۰) را در عملکرد زیست محیطی دارند و مایع کرایوژنیک کمترین امتیاز (۳/۷ از ۱۰) را دارد.

❖ تولید الکتریکی هیدروژن بر پایه‌ی انرژی خورشیدی (مانند روش فوتوالکتروشیمیایی) همراه با ذخیره‌ی آن با نانو مواد می‌تواند پایدارترین و مناسب‌ترین گزینه از منظر زیست محطی باشد.

در پایان، این مطالعه به جنبه‌های پایداری منابع و سیستم‌های تولید و ذخیره سازی هیدروژن پرداخته است. اغلب مطالعات موجود تنها به بررسی یک مورد اکتفا نموده‌اند. علاوه بر این، فقدان مطالعات در مورد جنبه‌های اجتماعی، فنی، مالی و زیست محیطی در خصوص منابع و سیستم‌های مورد نیاز برای تولید پایدار هیدروژن نیاز به مطالعه‌ی فعلی را بیش از پیش برجسته می‌سازد. با در نظر گرفتن عملکرد فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی، این مطالعه ارزیابی گسترده‌ای در خصوص پایداری تولید و ذخیره سازی هیدروژن ارائه داده است. در مطالعات آتی می‌توان گزینه‌های استفاده‌ی نهایی از هیدروژن (مانند سلول‌های سوختی و موتورهای احتراق داخلی مختلف) را جهت تجزیه و تحلیل پایداری سیستم‌های انرژی هیدروژنی مورد ارزیابی قرار داد.

۵- مراجع

[1] S. Dutta,. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource, *J. Ind. Eng. Chem.,* Vol. 20, No. 9, pp. 1148-1156, 2014.
[2] E. Shafiei, B. Davidsdottir, J. Leaver, H. Stefansson, E.I., Asgeirsson, Energy, economic, and mitigation cost implications of transition toward a carbon-neutral transport sector: a simulation-based comparison between hydrogen and electricity, *J. Clean. Prod.,* Vol. 141, pp. 237-247,2017.
[3] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, *Int. J. Hydrog. Energy,* Vol. 41, No. 33, pp. 14535-14552, 2016.
[4] Y. Bicer, I. Dincer, C. Zamfirescu, G. Vezina, F. Raso, Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *J. Clean. Prod.,* Vol. 135, 1379-1395, 2016.
[5] S. Sharma, S. K. Ghoshal, Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.,* Vol. 43, 1151-1158, 2015.
[6] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, M. M. Jamil, A .A. Azli, M. F. Misbah, A review on biomass-based hydrogen production for renewable energy supply, *Int. J. Energy Res.,* Vol. 39, No. 12, 1597-1615, 2015.
[7] G. Sethia, , A. Sayari, Activated carbon with optimum pore size distribution for hydrogen storage, *Carbon*, Vol. 99, 289-294, 2016.
[8] M. R. Shaner, H. A. Atwater, N. S. Lewis, E. W. McFarland, A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 9 (7), 2354-2371, 2016.
[9] L. Gradisher, B. Dutcher, M. Fan, Catalytic hydrogen production from fossil fuels via the water gas shift reaction, *Appl. Energy*, Vol. 139, 335-349, 2015.

[10] B. Nastasi, G. L. Basso, Hydrogen to link heat and electricity in the transition towards future smart energy systems, *Energy,* Vol. 110, 5-22, 2016.
[11] F. Yilmaz, M. T. Balta, R. Selbas , A review of solar based hydrogen production methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.,* Vol. 56, 171-178, 2016.
[12] M. Z. Bundhoo, R. Mohee, Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: a review, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 41, No. 16, 6713-6733, 2016.
[13] A. Asghar, A. A. A. Raman, W. M. A. W. Daud, Advanced oxidation processes for in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for textile wastewater treatment: a review, *J. Clean. Prod.,* Vol. 87, 826-838, 2015.
[14] L. F. Chanchetti, S. M. O. Diaz, D. H. Milanez, D. R. Leiva, L. I. L. de Faria, T. T. Ishikawa, Technological forecasting of hydrogen storage materials using patent indicators, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 41, No. 41, 18301-18310, 2016.
[15] Y. Van Fan, S. Perry, J. J. Kleme˘s, C. T. Lee, A review on air emissions assessment: transportation, *J. Clean. Prod.,* Vol. 194, 673-684, 2018.
[16] S. H. Siyal, D. Mentis, U. Mo€rtberg, S. R. Samo, M. Howells, A preliminary assessment of wind generated hydrogen production potential to reduce the gasoline fuel used in road transport sector of Sweden, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 40, No. 20, 6501-6511, 2015.
[17] P. Maniatopoulos, J. Andrews, B. Shabani, Towards a sustainable strategy for road transportation in Australia: the potential contribution of hydrogen, *Renew. Sustain. Energy Rev.,* Vol. 52, 24-34, 2015.
[18] B. Fais, N. Sabio, N. Strachan, The critical role of the industrial sector in reaching long-term emission reduction, energy efficiency and renewable targets, *Appl. Energy,* Vol. 162, 699-712, 2016.
[19] H. Schandl, S. Hatfield-Dodds, T. Wiedmann, A. Geschke, Y. Cai, J. West, D. Newth, T. Baynes, M. Lenzen, A. Owen, Decoupling global environmental pressure and economic growth: scenarios for energy use, materials use and carbon emissions, *J. Clean. Prod.,* Vol. 132, 45-56, 2016.
[20] S. Sorrell, Reducing energy demand: a review of issues, challenges and approaches, *Renew. Sustain. Energy Rev.,* Vol. 47, 74-82, 2015.
[21] M. Schulze, H. Nehler, M. Ottosson, P. Thollander, Energy management in industryea systematic review of previous findings and an integrative concep- tual framework, *J. Clean. Prod.,* Vol. 112, 3692-3708, 2016.
[22] A. Bakenne, W. Nuttall, N. Kazantzis, Sankey-Diagram-based insights into the hydrogen economy of today, *Int. J. Hydrog. Energy,* Vol. 41, No. 19, 7744-7753, 2016.
[23] M. Ball, M. Weeda, The hydrogen economyeVision or reality?, *Int. J. Hydrog. Energy,* Vol. 40, No. 25, 7903-7919, 2015.
[24] P. Kuntke, M. Rodríguez Arredondo, L. Widyakristi, A. ter Heijne, T. H. Sleutels, H. V. Hamelers, C. J. Buisman, Hydrogen gas recycling for energy efficient ammonia recovery in electrochemical systems, *Environ. Sci. Technol,* Vol. 51, No. 5, 3110-3116, 2017.
[25] I. Yarbrough, Q. Sun, D. C. Reeves, K. Hackman, R. Bennett, D. S. Henshel, Visualizing building energy demand for building peak energy analysis, *Energy Build.,* Vol. 91, 10-15, 2015.
[26] C. F. Reinhart, C. C. Davila, Urban building energy modelingeA review of a nascent field, *Build. Environ.*, Vol. 97, 196-202, 2016.
[27] C. Delmastro, F. Martinsson, G. Mutani, S. P. Corgnati, Modeling building energy demand profiles and district heating networks for low carbon urban areas, *Procedia Eng.,* Vol. 198, 386-397, 2017.
[28] P. S. Wong, A. Lindsay, L. Crameri, S. Holdsworth, Can energy efficiency rating and carbon accounting foster greener building design decision? An empirical study, *Build. Environ.,* Vol. 87, 255-264, 2015.
[29] M. Gong, D. Y. Wang, C. C. Chen, B. J. Hwang, H. Dai, A mini review on nickel- based electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution reaction, *Nano Res.*, Vol. 9, No. 1, 28-46, 2016.
[30] V. Chintala, K. A. Subramanian, Experimental investigations on effect of different compression ratios on enhancement of maximum hydrogen energy share in a compression ignition engine under dual-fuel mode, *Energy,* Vol. 87, 448-462, 2015.
[31] S. B. Walker, U. Mukherjee, M. Fowler, A. Elkamel, Benchmarking and selection of Power-to-Gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative, *Int. J. Hydrog. Energy,* Vol. 41, No. 19, 7717-7731, 2016.