



Multi-Criteria Evaluation Green Sustainable Hydrogen: Sources, Productions, and Storage

A. Sadeghi¹, A. Karimi^{2*}, H. Rajabi Aghbash¹, S. Alipour³

1- B. Sc. Chemical Engineering, University of Maragheh

2- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Maragheh

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Maragheh

Email: a.karimi@maragheh.ac.ir

Abstract

Hydrogen has been introduced as a clean energy source for various demands and has been studied from different aspects. Therefore, the leading challenges are choosing the best renewable source, determining environmentally friendly processes, and selecting storing methods in the hydrogen supply chain. The analytic hierarchy process is a multidimensional decision-making method based on organized calculations to make logical decisions, which is used in this study to make decisions among these cases. For hydrogen sources, issue economic justification with 47% priority as the main criterion, and hydro resources with 33% priority as the most preferred option are determined. In the production process, the selected criterion is economic justification as the most preferred one, and the thermal method with 32% preference has the highest priority. In the storage topic, economic justification has the highest priority, and storage in the form of nanomaterials is identified as the best option. The calculated inconsistency in all three evaluated sections is less than 10% and is acceptable.

Received: 7 April 2023

Accepted: 9 July 2023

Page Number: 30-40

Keywords:

Analytic Hierarchy Process,
Hydrogen Source,
Hydrogen Generation,
Hydrogen Storage System

Please Cite this Article Using:

Sadeghi, A., Karimi, A., Rajabi Aghbash, H. & Alipour, S. (2024). Multi-Criteria Evaluation Green Sustainable Hydrogen: Sources, Productions, and Storage. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(134), 30-40, [In Persian].



تحلیل سلسله‌مراتبی منابع پایدار، روش‌های تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن

آرش صادقی^۱، اسداله کریمی^{۲*}، حسن رجبی‌آقباش^۱، سیامک علیپور^۳

۱- کارشناس مهندسی شیمی، دانشگاه مراغه

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه مراغه

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه مراغه

پیام‌نگار: a.karimi@maragheh.ac.ir

چکیده

هیدروژن به‌عنوان یک منبع انرژی پاک برای نیازهای گوناگون معرفی و از جنبه‌های مختلف مطالعه شده است؛ از این رو چالش پیش رو انتخاب بهترین منبع تجدیدپذیر، فرایند دوستدار محیط زیست و ذخیره‌سازی در چرخه تأمین هیدروژن است. تحلیل سلسله‌مراتبی روش چندوجهی تصمیم‌گیری برمبنای محاسبات سازمان‌یافته برای اخذ تصمیم منطقی است که در این تحقیق برای گزینش در بین این موارد گسترده، از آن استفاده شد. در پایش منابع، توجه اقتصادی با ۴۷٪ اولویت به‌عنوان معیار اصلی و منابع هیدرو با ۳۳٪ اولویت به‌عنوان گزینه نخست دارای بیشترین ارجحیت هستند. در موضوع فرایند تولید معیار منتخب توجه اقتصادی با بیشترین ارجحیت و روش گرمایی با ۳۲٪ ارجحیت نشانگر بالاترین اولویت است. در بحث ذخیره‌سازی معیار اقتصادی مجدداً دارای بالاترین اولویت و ذخیره‌سازی به‌شکل نانومواد برترین گزینه است. ناسازگاری حساب‌شده در هر سه بخش مورد ارزیابی کمتر از ۱۰٪ و قابل قبول است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

شماره صفحات: ۳۰ تا ۴۰

کلیدواژه‌ها:

تحلیل سلسله‌مراتبی،

منابع هیدروژن،

تولید هیدروژن،

سامانه‌های ذخیره‌سازی هیدروژن

* مراغه، دانشگاه مراغه، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

صادقی، آرش، کریمی، اسداله، رجبی‌آقباش، حسن، و علیپور، سیامک. (۱۴۰۳). تحلیل سلسله‌مراتبی منابع پایدار، روش‌های تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۴): ۳۰-۴۰.

۱. مقدمه

مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه افزایش انباشت گازهای گلخانه‌ای به تدریج به گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی در زمین منجر خواهد شد، از دیگر سو، تقاضای انرژی جهانی به دلیل فعالیت‌های روزمره در زندگی انسان‌ها در حال افزایش است. از مهم‌ترین مشکلات می‌توان به تأمین انرژی برای نیازهای موجود با در نظر گرفتن رشد شتاب مصرف اشاره کرد. از منظر دیگر، ذخایر انرژی فسیلی در جهان محدود است و به نظر می‌آید که اگر منابع انرژی پاک بهره‌برداری نشوند، بحران انرژی به همراه تخریب محیط زیست غیرقابل جلوگیری خواهند بود؛ بنابراین، تلاش‌ها برای توسعه منابع انرژی جای‌گزین در سراسر جهان محل توجه قرار گرفته است [۱].

هیدروژن یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر است و به‌عنوان جای‌گزینی برای تأمین انرژی در مصارف به‌شیوه سنتی و یک حامل انرژی امیدبخش برای انواع تقاضای انرژی آینده در جهان است. هیدروژن دو برابر بیشتر از همه هیدروکربن‌های موجود در احتراق انرژی تولید می‌کند [۲]. متداول‌ترین روش تولید هیدروژن در حال حاضر اصلاح بخار، اکسایش جزئی، اصلاح گرمایشی و تجزیه گرمایی هیدروکربن‌هاست. در واحدهای تولیدی موجود ۴۸٪ از گاز طبیعی، ۱۸٪ از زغال سنگ، ۳۰٪ از روغن‌های سنگین مانند نفتا و ۴٪ سایر هیدروکربن‌ها به‌عنوان خوراک استفاده می‌کنند [۳]. با توجه به محدودیت‌های منابع فسیلی و ایجاد مشکلات اجتناب‌ناپذیر محیط زیستی در صورت مصرف آن‌ها، می‌توان از منابع پایدار متنوع مانند آب، زیست‌توده‌ها، پسماندهای آلی، دورریز و باقی‌مانده محصولات کشاورزی برای سنتز هیدروژن استفاده کرد. تلاش‌ها فقط در زمینه تغییر خوراک متوقف نشده و فرایندهای مختلف دوستدار محیط زیست برای تهیه هیدروژن بررسی و توسعه داده شده‌اند؛ به‌عنوان مثال شکافت آب با الکتروسیته تهیه‌شده از مزارع توربین بادی یا سلول‌های خورشیدی، تجزیه آب با انرژی گرمایی تأمین‌شده از منابع تجدیدپذیر، تخمیر زیست‌توده‌ها با ریزاندامگان در تاریکی یا به کمک نور خورشید و تبدیل زیست‌توده‌ها به هیدروژن در فرایند تجزیه گرمایی از آن جمله هستند [۴-۷].

با در نظر گرفتن این نکته که مدت‌های طولانی از منابع فسیلی استفاده شده‌است، زیرساخت‌های ذخیره‌سازی نیز به‌منظور

بهره‌برداری بهینه از آن‌ها طراحی شده‌اند، این در حالی است که به دلیل خواص فیزیکی متفاوت هیدروژن در مقایسه با هیدروکربن‌ها استفاده از همان زیرساخت‌ها امکان‌پذیر است، به‌عنوان مثال دمای ذوب طبیعی هیدروژن 253°C - است، در صورتی که دمای ذوب برای سوخت‌های هیدروکربنی بسیار بیشتر است و در شرایط محیطی اغلب در حالت مایع هستند، در نتیجه برای تغییر دمای ذوب هیدروژن و نگهداری آن به شکل مایع، به کارگیری روشی مانند اعمال فشار و ساخت مخازن برای مقاومت در شرایط سخت ضروری است، از این رو مطالعات گسترده‌ای نیز برای ذخیره‌سازی و مواد مورد استفاده در مخازن نگهداری انجام گرفته‌است [۸].

گستره وسیع منابع، فرایندهای تولید و ذخیره‌سازی، گزینه‌های متعددی در این زمینه در اختیار قرار می‌دهد بنابراین با در نظر گرفتن تمامی موارد و مشخصه‌ها، انتخاب بهینه بسیار مشکل بود که نیازمند به‌کارگیری یک روش سازمان‌یافته تصمیم‌گیری است. روش تحلیل سلسله‌مراتبی با صورت‌بندی مسأله به شکل هرمی و تعریف هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها و اعمال اهمیت و رتبه‌بندی عددی براساس کارهای گذشته و صاحبان نظر به شکل کمی فرایند تصمیم‌گیری را به‌انجام می‌رساند، به‌خصوص این روش در موضوعات پیچیده شامل مصلحت‌های احتمالاً متناقض و مشخصه‌های گوناگون مطلوب است. تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان ابزار قدرتمند در موارد گوناگون برای تصمیم‌گیری و انتخاب به‌کار گرفته شده است؛ به‌عنوان مثال، ونگ و لی با ارائه الگویی در ارزیابی فرایندهای پیچیده شیمیایی از این روش بهره‌برداری کرده‌اند [۹].

هم‌چنین برای تحلیل تصمیم‌گیری در زمینه مدل‌سازی انرژی، این رویه ارزیابی شده‌است [۱۰]. لویز و همکاران با در نظر گرفتن شاخص‌های محیط زیستی، اقتصادی و تکنیکی بررسی تولید مواد شیمیایی مختلف از دی‌اکسیدکربن را با این اصول تحلیل کرده‌اند [۱۱]. به‌علاوه، توسعه پایدار به دلیل این‌که ذاتاً موضوع پیچیده‌ای است و دربرگیرنده موضوعات متفاوتی است، دوسانتوس و همکاران با در نظر گرفتن تعاملات پیچیده بین جنبه‌های اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی با به‌کارگیری تحلیل سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری عوامل مؤثر بر توسعه پایدار را برآورد کرده‌اند [۱۲]. این روش در انتخاب محل تولید هیدروژن و الکتروسته در کشور قطر با در نظر گرفتن سناریوهای گوناگون و با در نظر گرفتن مشخصه‌های

مسیرها و روش‌های متنوعی برای رسیدن به محاسبات فرایند AHP وجود دارد که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. همان‌طور که در معادله (۱) نشان داده شده، ماتریس A براساس امتیاز معیارها تهیه می‌شود. در این ماتریس، به هر عنصر مقداری تخصیص داده می‌شود که معیار i th را به صورت زوجی با نتیجه اولویت معیار j th مقایسه می‌کند. این روش به‌طور مشابه برای گزینه‌ها اجرا می‌شود. مقیاس ۹ نقطه‌ای ساعتی [۱۸] برای تهیه اهمیت مقایسه‌ای دو معیار یا گزینه استفاده می‌شود، اعداد در ماتریس با در نظر گرفتن شرایط منظور می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \dots & d_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n,1} & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

شرایط حاکم بر این ماتریس عبارتند از:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$$

در نهایت، نسبت ناسازگاری ماتریس A حساب می‌شود. برای انجام این کار، ابتدا باید شاخص سازگاری (CI) محاسبه شود، که برای این منظور از معادله (۲) استفاده می‌شود. در این معادله n اندازه ماتریس و λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (2)$$

CR را می‌توان با تقسیم CI بر RI (برای توضیحات بیشتر به مرجع [۱۹] مراجعه کنید) حساب کرد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

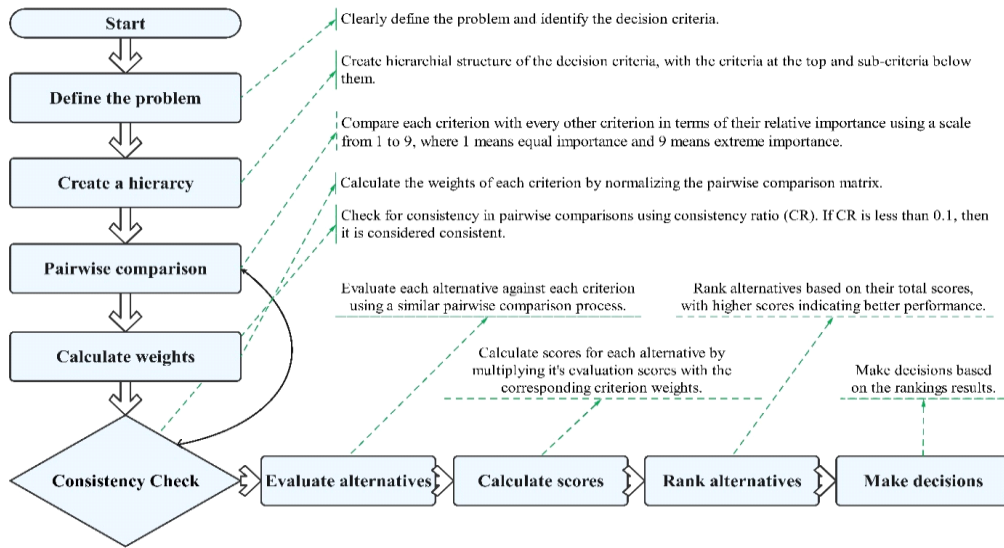
برای این که نتایج تصمیم‌گیری قابل قبول و اعتماد باشد، مقدار ناسازگاری باید کمتر از ۱/۰ شود. در غیر این صورت اعتبارسنجی مقبول نیست و فرایند بررسی باید دوباره انجام پذیرد. روند نمای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در شکل (۱) آورده شده است.

اقتصادی و متناسب با محیط زیست، در تحقیق جهانگیری و همکاران به کار گرفته شده است [۱۳]. به‌منظور تعیین انواع پیل سوختی به‌عنوان منبع انرژی در کشتی‌ها از تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است [۱۴].

با این همه، در حال حاضر تولید و استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی شده است. به‌همین دلیل، نیاز به سوخت‌های جای‌گزين و پایدار برای کاهش آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی احساس می‌شود. چندین روش برای تولید سوخت‌های پایدار وجود دارد، اما هیدروژن پایدار سبز به‌عنوان یک سوخت پایدار با قابلیت استفاده در خودروها و صنعت، جذاب است؛ اما بررسی کامل عملکرد هیدروژن پایدار سبز نسبت به منابع، روش‌های تولید و ذخیره‌سازی آن، چالش‌های بسیار زیادی را دربر دارد. هدف این پژوهش، ارزیابی چندمعیاره هیدروژن پایدار سبز برای اولین بار در این زمینه با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است. در این پژوهش، به بررسی منابع، روش‌های تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن پایدار سبز پرداخته خواهد شد و بهترین مسیر دستیابی به هیدروژن پایدار سبز شناسایی خواهد شد. با استفاده از نتایج حاصل از این پژوهش، محققان و صنعتگران می‌توانند در تولید هیدروژن پایدار سبز با کم‌ترین آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی مطمئن‌تر عمل کنند.

۲. مواد و روش‌ها

روش تحلیل سلسله‌مراتبی یک روش سیستماتیک و کاملاً منطقی است که به‌طور کمی گزینه‌ها (روش، فرایند) را براساس برتری‌ها و کاستی‌های معیارهای مختلف تحلیل و جایگاه هر یک از گزینه‌ها را براساس چندین معیار معرفی می‌کند. این روش فرصت‌هایی را برای مقایسه زوجی انتخاب‌ها براساس معیارهای متعدد فراهم و سپس آن‌ها را برای انتخاب نهایی رتبه‌بندی می‌کند. در این روش هدف، معیارها و گزینه‌ها به‌ترتیب در سطوح اول، دوم و سوم قرار می‌گیرند. تحلیل سلسله‌مراتبی در چندین مرحله انجام می‌شود. در مرحله نخست هدف، معیارها و گزینه‌ها شناسایی و سپس براساس داده‌های جمع‌آوری شده از کارهای گذشته (با در نظر گرفتن برتری‌ها و کاستی‌ها)، معیارها و گزینه‌ها با توجه به هدف با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۱۷-۱۵].



شکل ۱. فلوجارت الگوریتم AHP.

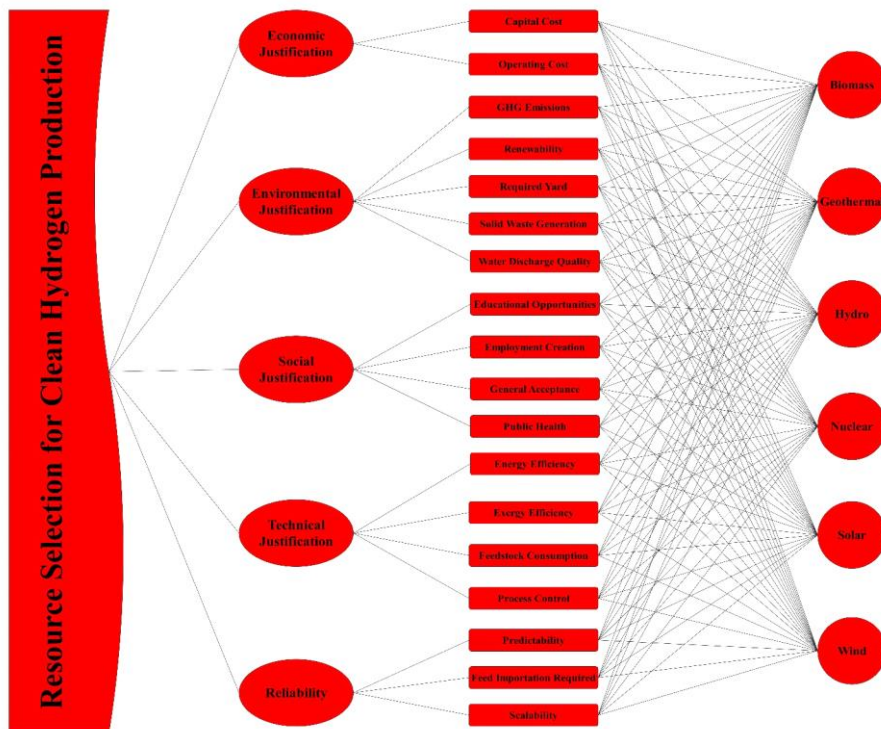
Figure 1. The AHP algorithm flowchart.

متون و منابع قبلی استخراج و به کار بسته شوند. در بخش منابع تولید هیدروژن، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها براساس اصول ذکر شده تعیین شدند، که در شکل (۲) آورده شده است.

۳. بحث و نتایج

۳-۱ ارزیابی منابع برای تولید هیدروژن

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، برای انجام این هر یک از اهداف تعیین شده در هر بخش لازم است تا مشخصه‌های تأثیرگذار براساس



شکل ۲. فلوجارت AHP برای انتخاب منابع تولید هیدروژن.

Figure 2: The AHP flowchart for the hydrogen generation resource selection.

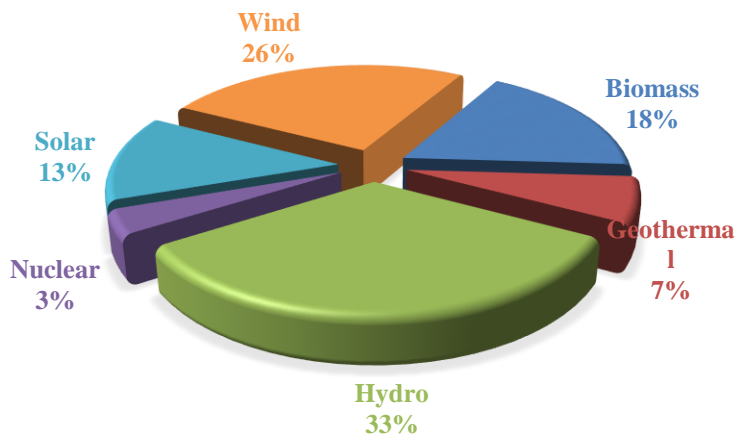
جدول ۱. امتیازات نهایی براساس AHP برای اولویت‌بندی گزینه‌های منابع تولید هیدروژن.

Table 1. Final scores of AHP for prioritizing of hydrogen preparation resources.

| Criteria & Sub-criteria | | Alternatives | Biomass | Geothermal | Hydro | Nuclear | Solar | Wind |
|-------------------------------------|---|--------------|---------|------------|--------|---------|--------|--------|
| Economic Justification (0.471) | Capital Cost (0.157) | | 0.013 | 0.011 | 0.028 | 0.006 | 0.035 | 0.065 |
| | Operating Cost (0.314) | | 0.070 | 0.021 | 0.129 | 0.011 | 0.026 | 0.056 |
| Environmental Justification (0.268) | GHG Emissions (0.126) | | 0.006 | 0.012 | 0.024 | 0.012 | 0.024 | 0.047 |
| | Renewability (0.020) | | 0.001 | 0.005 | 0.005 | 0.001 | 0.005 | 0.005 |
| | Required Yard (0.012) | | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.0001 | 0.005 | 0.003 |
| | Solid Waste Generation (0.072) | | 0.006 | 0.013 | 0.013 | 0.003 | 0.024 | 0.013 |
| | Water Discharge Quality (0.38) | | 0.003 | 0.002 | 0.007 | 0.002 | 0.012 | 0.012 |
| Social Justification (0.044) | Educational Opportunities (0.012) | | 0.002 | 0.0001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.005 |
| | Employment Creation (0.006) | | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.0001 | 0.0001 |
| | General Acceptance (0.003) | | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0001 | 0.001 | 0.0001 |
| | Public Health (0.022) | | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.005 | 0.009 |
| Technical Justification (0.143) | Energy Efficiency (0.039) | | 0.007 | 0.003 | 0.009 | 0.016 | 0.003 | 0.001 |
| | Exergy Efficiency (0.073) | | 0.016 | 0.006 | 0.013 | 0.030 | 0.005 | 0.003 |
| | Feedstock Consumption (0.02) | | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.008 | 0.004 |
| | Process Control (0.11) | | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.0001 | 0.004 | 0.002 |
| Reliability (0.075) | Predictability (0.053) | | 0.012 | 0.002 | 0.004 | 0.022 | 0.010 | 0.004 |
| | Raw Material Importation Required (0.017) | | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.007 |
| | Scalability (0.005) | | 0.001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.002 | 0.001 | 0.0001 |
| Total Weight | | | 0.149 | 0.089 | 0.242 | 0.112 | 0.176 | 0.232 |
| Rank | | | 4 | 6 | 1 | 5 | 3 | 2 |
| Inconsistency Ratio = 0.0101 | | | | | | | | |

می‌شود که این یافته در همان راستاست و هزینه‌های عملیاتی در تأمین منبع اغلب در صدر موارد قرار می‌گیرد. براساس نمره‌دهی نهایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی گزینه‌ها نیز مرتبه‌بندی شده‌اند که در میان منابع باد، زیست‌توده، هیدرو، خورشیدی، ژئوترمال و خورشیدی، منبع هیدرو در مکان نخست قرار گرفته‌است. البته محاسبات نشانگر مقدار ناسازگاری در محدوده مطلوب است (جدول (۱)) هم‌چنین با انجام سنجش‌های اولویت‌بندی گزینه‌ها نسبت به هدف که در این بخش منبع پایدار تولید هیدروژن بود، مشخص شده‌اند. نتایج نشان داده‌شده در شکل (۳) حاکی از اهمیت منبع هیدرو با ۳۳٪ است، سپس به منابع باد و زیست‌توده به ترتیب با ۲۶٪ و ۱۸٪ می‌توان اشاره کرد.

با انجام تحلیل سلسله‌مراتبی بنابر توضیحات ارائه‌شده، مشخص شد که معیار توجیه اقتصادی با ۴۷۱٪ وزن حائز رتبه نخست در میان معیارهاست. در رتبه‌های بعدی به ترتیب توجیه‌های محیط زیستی، تکنیکی، قابل اطمینان بودن و توجیه اجتماعی قرار دارند. هم‌چنین براساس داده‌های ارائه‌شده در جدول (۱)، مقدار ناسازگاری کمتر از ۰/۱ است که نشانگر تصمیم‌گیری قابل اطمینان است. هزینه عملیاتی تأمین منبع هیدروژن در بین زیرمعیارهای متعدد با وزن جهانی ۰/۳۱۴ در رتبه نخست قرار گرفته‌است. به علاوه، مقدار ناسازگاری تعیین‌شده کمتر از ۰/۱ است که نشانگر قابل اتکاب بودن این آنالیز است. در صورت مقایسه با سایر مقالات منتشرشده در زمینه تحلیل اقتصادی فرایند (مراجعه کنید به [۲۰ و ۲۱]) مشخص



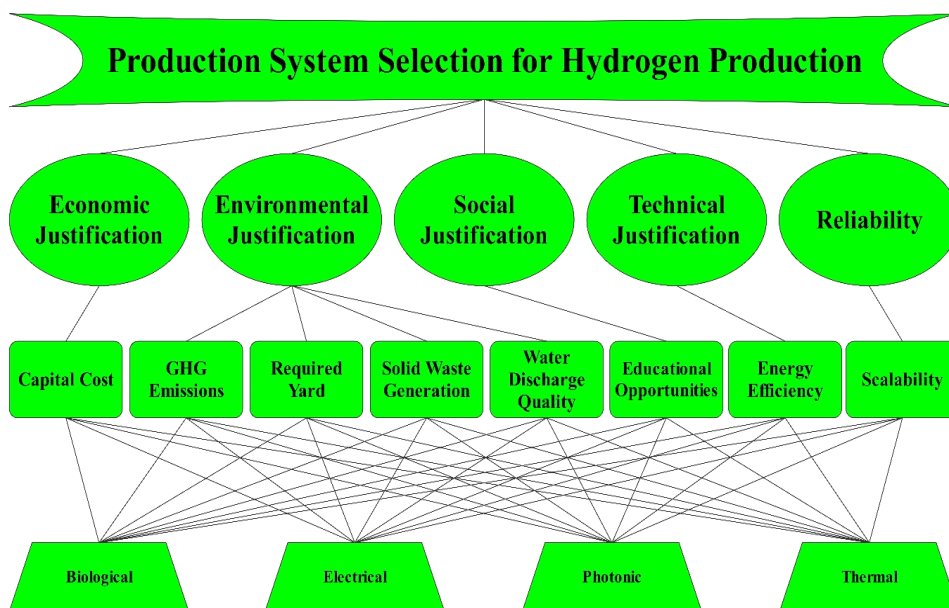
شکل ۳. اولویت گزینه‌ها براساس اهمیت نسبت به منابع تأمین هیدروژن.

Figure 3. Priorities of alternative according to importance with respect to hydrogen production resources.

حساب‌شده نیز کمتر از ۰/۱ است. در مرحله بعدی در میان هشت زیرمعیار بررسی شده، سرمایه اولیه با وزن ۰/۴۷۱ در رتبه نخست بوده و مقدار ناسازگاری حساب شده برای این موارد بیانگر قابل اتکابودن این تحلیل است. سایر زیرمعیارها به ترتیب عبارتند از: بازدهی انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید ضایعات جامد، قابلیت تغییر مقیاس، فرصت‌های آموزشی، کیفیت آب خروجی و زمین مورد نیاز. در گام آخر گزینه‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پس از تخمین، روش گرمایی با وزن ۰/۳۲۰ در مکان اول قرار گرفته‌است.

۲-۳ ارزیابی سامانه‌های تولید هیدروژن

با هدف قراردادن فرایندهای تولید هیدروژن همانند مرحله پیشین از تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی استفاده می‌شود. در شکل (۴) سلسله‌فرایند تصمیم‌گیری شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها ارائه شده‌اند. پس از انجام محاسبات مشخص شد که توجیه اقتصادی با ۰/۴۷۱ وزن در رتبه نخست باید قرار گیرد. در رتبه‌های بعدی به ترتیب توجیه‌های محیط زیستی، اجتماعی، فنی و درنهایت قابل اطمینان بودن، قرار دارند. در این مرحله مقدار ناسازگاری



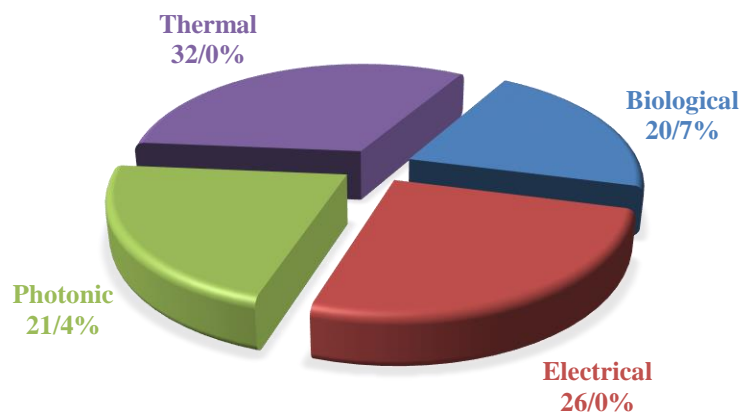
شکل ۴. ساختار تصمیم‌گیری روش‌های تولید هیدروژن.

Figure 4. Decision structure of hydrogen generation methods.

جدول ۲. امتیازهای نهایی برپایه AHP برای اولویت‌بندی روش‌های تأمین هیدروژن.

Table 2. Final scores of AHP for prioritizing hydrogen providing pathways.

| Criteria & Sub-criteria | | Alternatives | Biological | Electrical | Photonic | Thermal |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------|------------|------------|----------|---------|
| Economic Justification (0.471) | Capital Cost (0.) | | 0.111 | 0.111 | 0.028 | 0.222 |
| Environmental Justification (0.268) | CHG Emissions (0.138) | | 0.031 | 0.009 | 0.089 | 0.009 |
| | Required Yard (0.013) | | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.001 |
| | Solid Waste Generation (0.076) | | 0.031 | 0.009 | 0.031 | 0.003 |
| | Water Discharge Quality (0.040) | | 0.006 | 0.006 | 0.023 | 0.006 |
| Social Justification (0.044) | Educational Opportunities (0.044) | | 0.006 | 0.012 | 0.003 | 0.023 |
| Technical Justification (0.143) | Energy Efficiency (0.143) | | 0.016 | 0.062 | 0.021 | 0.043 |
| Reliability (0.075) | Scalability (0.075) | | 0.004 | 0.045 | 0.013 | 0.013 |
| Total Weight | | | 0.207 | 0.259 | 0.214 | 0.320 |
| Rank | | | 4 | 2 | 3 | 1 |
| Inconsistency Ratio = 0.0150 | | | | | | |



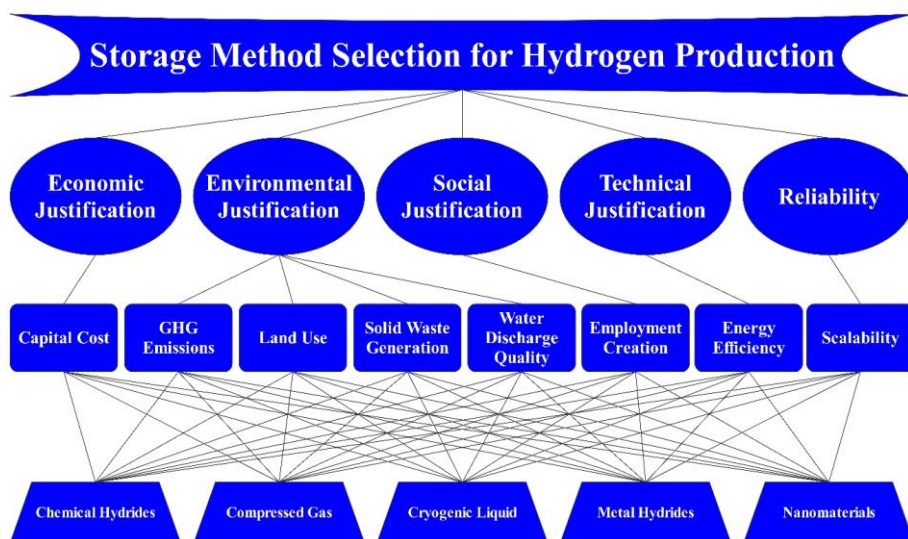
شکل ۵. مقدار اولویت‌های گزینه‌ها در روش‌های تولید براساس اهمیت نسبت به هدف.

Figure 5. Priorities of production methods alternatives according to importance with respect to the goal.

به‌عنوان مهم‌ترین معیار با وزن ۰/۴۵۵ تعیین شد. در محاسبات انجام‌شده ناسازگاری نیز کمتر از ۰/۱ تخمین زده‌شد که نشانگر قابل اطمینان بودن ارزیابی است.

۳-۳ ارزیابی روش‌های ذخیره هیدروژن

ساختار تخلیل سلسله‌مراتبی روش‌های ذخیره هیدروژن در شکل (۶) نشان داده شده‌است. در این بررسی توجیه اقتصادی



شکل ۶. ساختار رویه‌های ذخیره‌سازی هیدروژن.

Figure 6. Framework of hydrogen storage approaches.

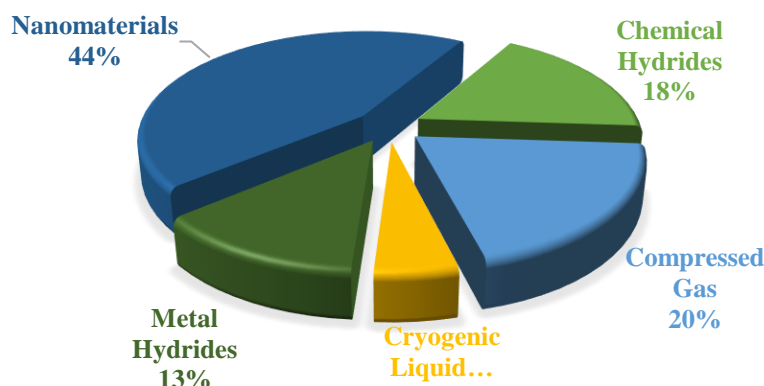
فشرده‌سازی گاز و مایعات سرمایشی به‌عنوان گزینه‌ها با یکدیگر و براساس داده‌های ورودی مقایسه شدند. نتایج تحلیل در جدول (۳) و شکل (۷) ارائه شده‌اند.

در میان زیرمعیارها هزینه اولیه برپایی متد ذخیره‌سازی با ضریب ۰/۴۵۵ در میان هشت زیرمعیار محاسبه‌شده در رتبه نخست قرار دارد. در این ارزیابی نیز ناسازگاری در محدوده مناسب قرار دارد. در گام نهایی نانومواد، هیدریدهای شیمیایی، هیدریدهای فلزی،

جدول ۳. نتایج نهایی AHP برای اولویت‌بندی ذخیره‌سازی هیدروژن.

Table 3. Final scores of AHP for prioritizing of hydrogen storage.

| Criteria & Sub-criteria | | Alternatives | Chemical Hydrides | Compressed Gas | Cryogenic Liquid | Metal Hydrides | Nanomaterials |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|----------------|------------------|----------------|---------------|
| Economic Justification (0.455) | Capital Cost (0.455) | | 0.065 | 0.122 | 0.020 | 0.034 | 0.214 |
| Environmental Justification (0.120) | CHG Emissions (0.033) | | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.007 | 0.013 |
| | Land Use (0.062) | | 0.013 | 0.007 | 0.004 | 0.013 | 0.025 |
| | Solid Waste Generation (0.009) | | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.004 |
| | Water Discharge Quality (0.017) | | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.008 |
| Social Justification (0.240) | Employment Creation (0.240) | | 0.063 | 0.017 | 0.017 | 0.031 | 0.113 |
| Technical Justification (0.064) | Energy Efficiency (0.064) | | 0.014 | 0.007 | 0.002 | 0.014 | 0.026 |
| Reliability (0.120) | Scalability (0.120) | | 0.012 | 0.041 | 0.004 | 0.022 | 0.041 |
| Total Weight | | | 0.177 | 0.201 | 0.051 | 0.126 | 0.444 |
| Rank | | | 3 | 2 | 5 | 4 | 1 |
| Inconsistency Ratio = 0.0035 | | | | | | | |



شکل ۷. مقدار اولویتهای گزینه‌ها در روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن براساس اهمیت با در نظر گرفتن هدف.

Figure 7. Priorities of hydrogen storage methods alternatives according to importance with respect to the goal.

ناسازگاری روش AHP در کلیه هر سه بخش ارزیابی شده کمتر از ۱۰٪ است.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان از پژوهشگاه نفت به دلیل فراهم آوردن دسترسی به بانک‌های اطلاعاتی نرم‌افزاری تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] Sagir, E., & Alipour, S. (2021). Photofermentative hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria: Current perspectives and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110796.
- [2] Sagir, E., Alipour, S., Elkhallout, K., Koku, H., Gunduz, U., Eroglu, I., & Yucel, M. (2017). Scale-up studies for stable, long-term indoor and outdoor production of hydrogen by immobilized *Rhodobacter capsulatus*. *international journal of hydrogen energy*, 42(36), 22743-22755.
- [3] Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850-866.
- [4] Dincer, I., & Acar, C. (2017). Innovation in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(22), 14843-14864.
- [5] Ceran, B. (2020). Multi-Criteria comparative analysis of clean hydrogen production scenarios. *Energies*, 13(16), 4180.

ذخیره‌سازی به‌شکل نانومواد در رتبه اول گزینه‌ها ضریب وزنی ۰/۴۴۴ قرار دارد. نتایج ذکر شده در جدول (۳) حاکی از ناسازگاری کمتر از ۰/۱ است که تأیید کننده روش سنجش است. فشرده‌کردن گاز، تبدیل به هیدرید شیمیایی، هیدرید فلزی و مایعات کروژنیک در رتبه‌های بعدی گزینه‌ها قرار دارند.

۴. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر هیدروژن به‌عنوان یک سوخت راه‌بردی به‌لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی بسیار محل توجه قرار گرفته‌است. بنابراین منابع تولید، روش‌های تولید هیدروژن و فناوری ذخیره‌سازی آن بسیار مهم است. در این مقاله انتخاب ارزیابی منابع هیدروژن، سامانه‌های تولید هیدروژن و فناوری ذخیره‌سازی بررسی شد. به‌همین منظور، برای انتخاب صحیح و مناسب فناوری‌های موجود در هر سه بخش روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌کار گرفته شد. پس از انجام محاسبات نتایج هر یک از بخش‌ها به‌تهایی مقایسه و ارزیابی شد. نتایج خروجی از قسمت ارزیابی منابع تولید حاکی از این است که معیار توجیه اقتصادی با ۴۷٪ اولویت به‌عنوان معیار اصلی و منابع هیدرو با ۳۳٪ اولویت به‌عنوان گزینه اول دارای بیشترین ارجحیت هستند. در قسمت فناوری‌های تولید هیدروژن معیار توجیه اقتصادی دارای بیشترین ارجحیت و روش گرمایی با ۳۲٪ ارجحیت دارای بالاترین اولویت است. در قسمت ذخیره‌سازی معیار و زیرمعیار اقتصادی مجدداً دارای بیشترین اولویت است و ذخیره‌سازی به‌شکل نانومواد در جایگاه اول گزینه‌ها قرار دارد.

- [6] Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 597-611.
- [7] Acar, C., & Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of cleaner production*, 218, 835-849.
- [8] Jastrzębski, K., & Kula, P. (2021). Emerging technology for a green, sustainable energy-promising materials for hydrogen storage, from nanotubes to graphene—a review. *Materials*, 14(10), 2499.
- [9] Wang, Y., & Li, H. (2019). Complex Chemical Process Evaluation Methods Using a New Analytic Hierarchy Process Model Integrating Deep Residual Network with Multiway Principal Component Analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(31), 13889-13899.
- [10] Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. *Energy*, 31(14), 2604-2622.
- [11] Lopes, J. V. M., Bresciani, A. E., Carvalho, K. D. M., Kulay, L. A., & Alves, R. M. D. B. (2021). Multi-criteria decision approach to select carbon dioxide and hydrogen sources as potential raw materials for the production of chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111542.
- [12] Dos Santos, P. H., Neves, S. M., Sant'Anna, D. O., De Oliveira, C. H., & Carvalho, H. D. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. *Journal of cleaner production*, 212, 119-138.
- [13] Jahangiri, M., Shamsabadi, A. A., Mostafaeipour, A., Rezaei, M., Yousefi, Y., & Pomares, L. M. (2020). Using fuzzy MCDM technique to find the best location in Qatar for exploiting wind and solar energy to generate hydrogen and electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13862-13875.
- [14] Inal, O. B., & Deniz, C. (2020). Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121734.
- [15] Karimi, A., Mohamadmoradi, H. R. (2020). Study of Reducing the Amount of Green Oil in the CCR Plant of Oil Refinery Unit. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18(107), 6-14.
- [16] Karimi, A., Nejhab Abyaz, H., Rahimzadeh, K., & Fatehifar, E. (2022). Using the Analytical Hierarchy Process to Study the Industrial Air Pollution Control Equipment: Optimal Choice. *Farayandno*, 17(79), 5-14.
- [17] Karimi, A., & Sadeghi, A. (2022). AHP-Based amine selection in sour gas treating process: simulation and optimization. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, (Articles in Press).
- [18] Alipour, S., Sadeghi, A., Omidvarborna, H., & Karimi, A. (2022). Techno-economic assessment of the AHP based selected method for separating formic acid from an aqueous effluent. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 56(1), 105-121.
- [19] Alipour, S., Sagir, E., & Sadeghi, A. (2022). Multi-criteria decision-making approach assisting to select materials for low-temperature solid oxide fuel cell: Electrolyte, cathode & anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19810-19820.
- [20] Alipour, S., Karimi, A., & Savari, C. (2018). Techno-economic analysis of small scale electricity generation from the lignocellulosic biomass. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 52(2), 193-200.
- [21] Alipour, S., Ghafelebaashi, A. H., & Savari, C. (2021). Techno-Economic Analysis of the Levulinic Acid Synthesis from Monosaccharides. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(118), 7-21.