

تصمیم‌گیری چندمعیاره برای آینده‌نگری ذخیره‌سازی انرژی در ایران

رضا فلاح

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سارا محمودیان یونسی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مجید زندی*

دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و نوسان تولید آنها، ضرورت توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی را در ایران برجسته کرده است. با توجه به پتانسیل بالای منابع خورشیدی، این پژوهش هشت فناوری شامل ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ، باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد، ذخیره‌سازی هوای فشرده، گرمایی، چرخ‌طیار، هیدروژنی و ابرخازن را با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی کرده است. معیارهای مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک با روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی و داده‌ها در سناریوهای مختلف (وزن برابر، مالی، فنی، زیست‌محیطی، ترکیبی و آینده‌نگر) تحلیل شدند. نتایج نشان داد فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژنی، گرمایی و هوای فشرده در بیش‌تر سناریوها برترند. در حالی که باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد به دلیل هزینه بالا و عمر کم‌تر رتبه‌های پایین‌تری دارند. در نهایت، توسعه بومی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند امنیت انرژی کشور را تقویت کرده، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و گذار ایران به نظام انرژی پایدار و کم‌کربن را تسهیل کند.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی انرژی، آینده‌نگری انرژی، تحلیل سلسله‌مراتبی، سناریوهای انرژی، هیدروژنی، ایران

Multi-Criteria Decision-Making Approach for Energy Storage Foresight in Iran

Reza Fallah

Master of Science student, Department of Energy Conversion Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Rez.fallah@mail.sbu.ac.ir

Sara Mahmoudian Younesi

Phd student, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, s_mahmoodian@sbu.ac.ir

Majid Zandi

Associate Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Abstract

The increasing share of renewable energy and the intermittency of its generation have highlighted the need to develop energy storage technologies in Iran. Given the country's high solar energy potential, this study evaluates eight energy storage technologies, including pumped hydro storage, lithium-ion batteries, sodium-sulfur batteries, compressed air energy storage, thermal energy storage, flywheel energy storage, hydrogen energy storage, and supercapacitors, using a multi-criteria decision-making approach. Financial, technical, environmental, social, and risk-related criteria were weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the data were analyzed under different scenarios, including equal weighting, financial priority, technical priority, environmental priority, combined weighting, and a future-oriented approach. The results showed that hydrogen energy storage, thermal energy storage, and compressed air energy storage performed better than the other technologies in most scenarios, whereas lithium-ion and sodium-sulfur batteries ranked lower due to their higher costs and shorter service life. Finally, the development and localization of energy storage technologies can strengthen the country's energy security, reduce dependence on fossil fuels, and facilitate Iran's transition to a sustainable and low-carbon energy system.

Keywords: Energy Storage, Energy Foresight, Analytic Hierarchy Process (AHP), Hydrogen storage, Energy Scenarios, Iran.

۱- مقدمه

ایران با در اختیار داشتن حدود ۱۰ درصد از ذخایر نفت و ۱۵ درصد از منابع گاز طبیعی جهان، یکی از کشورهای غنی از منابع انرژی فسیلی به شمار می‌رود. با این حال، شدت بالای مصرف انرژی (حدود ۸ مگاژول به ازای هر دلار تولید ناخالص داخلی) موجب شده که در یک دهه اخیر، ایران در فهرست کشورهای دارای بیشترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن قرار گیرد. افزون بر آن، تغییر اقلیم و بحران آب موجب کاهش تولید انرژی برق‌آبی شده است. پتانسیل بالای کشور در زمینه تابش خورشیدی (میانگین روزانه ۵/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال) فرصت مهمی برای توسعه منابع تجدیدپذیر فراهم کرده است. این شرایط، گذار به سامانه‌های انرژی پایدار و هوشمند را به ضرورتی راهبردی برای ایران تبدیل کرده و نقش ذخیره‌سازی انرژی در این مسیر، حیاتی شده است [۱].

پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی انرژی، نه تنها راه‌کاری موثر برای کاهش نوسان منابع تجدیدپذیر است، بلکه در بهبود پایداری شبکه، افزایش امنیت انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند [۲]. انرژی زمین‌گرمایی به دلیل پایداری و استقلال از شرایط جوی، گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ است. ترکیب آن با فناوری‌هایی مانند مایع‌سازی هیدروژن و آب‌شیرین‌کن‌ها می‌تواند با تولید هم‌زمان برق، گرما، آب شیرین و هیدروژن، بهره‌وری سامانه را افزایش دهد [۳].

علاوه بر این سامانه‌ها، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در پایداری شبکه‌های نوین شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها با پشتیبانی از منابع تجدیدپذیر، کاهش بار پیک و بهبود عملکرد شبکه، نقش مهمی در سامانه‌های انرژی ایفا می‌کنند. همچنین، رحمان و همکاران چارچوبی مبتنی بر مجموعه‌های فازی مردد پیچیده برای انتخاب بهینه سامانه‌های باتری ارائه کرده‌اند که با در نظر گرفتن عدم قطعیت، دقت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد [۴].

علاوه بر موارد ذکرشده، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده^۱ در کاربردهایی مانند زنجیره سرد مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج مطالعات حاکی از کاهش قابل‌توجه مصرف برق و هزینه‌های عملیاتی در این سامانه‌ها است [۵].

در پژوهش‌هایی نشان داده شده است که در حوزه خودروهای برقی، استفاده از سامانه‌های هیبریدی ذخیره‌سازی انرژی^۲ شامل باتری و ابرخازن، منجر به کاهش جریان پیک و افزایش راندمان انرژی می‌شود. در پژوهش ذکرشده، با طراحی یک الگوریتم بهبود یافته ازدحام ذره‌ها، عملکرد سامانه در شرایط مختلف رانندگی بهینه‌سازی شده است [۶].

در کنار گزینه‌های متداول، فناوری‌های ذخیره‌سازی نوین‌تری همچون ذخیره‌سازی هوای فشرده در سازندهای زمین‌شناسی^۳ نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. گاسان‌زاده و همکاران با طراحی یک چارچوب جامع ارزیابی، نشان داده‌اند که این فناوری، توانایی تامین ۱۱۵ مگاوات توان خروجی و تا ۴۹/۹ گیگاوات‌ساعت

انرژی را برای دوره‌هایی تا ۴۲۹ ساعت دارد [۷]. همچنین طراحی بهینه چاه‌ها در این سامانه‌ها، منجر به کاهش افت فشار و افزایش کارایی سامانه شده است.

از سوی دیگر، دونگ و همکارش [۸] یک سامانه انرژی ترکیبی شامل پیل‌سوختی اکسید جامد با کمک شعله^۴، ذخیره‌سازی هوای فشرده^۵ و موتور احتراق داخلی طراحی کرده‌اند. این پژوهش با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، عملکرد سامانه را از نظر انرژی، اگزروی و زیست‌محیطی ارزیابی کرده و نتایج آن، حاکی از کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها و انتشار کربن دی‌اکسید بوده است.

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در پنج گروه اصلی الکتروشیمیایی، مکانیکی، گرمایی، شیمیایی و الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. این فناوری‌ها با توجه به ویژگی‌هایی مانند ظرفیت ذخیره‌سازی، سرعت پاسخ‌گویی و دوره ذخیره انرژی، در کاربردهای مختلف شبکه و سامانه‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

در میان فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی بلندمدت و پشتیبانی از سامانه‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شود و می‌تواند در افزایش پایداری شبکه و جبران نوسان تولید انرژی نقش موثری ایفا کند [۱۰].

گاز طبیعی مایع‌شده به‌عنوان یک سوخت انتقالی، به دلیل قابلیت ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل مناسب، نقش مهمی در تامین امنیت انرژی و پشتیبانی از سامانه‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر ایفا می‌کند و در سناریوهای گذار کم‌کربن به‌عنوان یکی از گزینه‌های مکمل مورد توجه قرار دارد [۱۱].

در کنار این موارد، سامانه‌های ذخیره‌سازی ترکیبی و فناوری‌های نوظهوری مانند آمونیاک سبز و سوخت‌های مصنوعی نیز به‌عنوان راهکارهایی برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، ذخیره‌سازی بلندمدت انرژی و تسهیل گذار به سامانه‌های کم‌کربن مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۱].

با وجود مزایا و محدودیت‌های متفاوت فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، انتخاب گزینه مناسب نیازمند ارزیابی هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی است و از این رو به تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیاز دارد [۹].

با توجه به تنوع ویژگی‌ها و معیارهای ارزیابی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، انتخاب گزینه مناسب به مسئله‌ای پیچیده تبدیل شده است. از این رو، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌عنوان ابزاری موثر برای ارزیابی و اولویت‌بندی این فناوری‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹].

تصمیم‌گیری چندمعیاره مجموعه‌ای از روش‌ها برای تحلیل مسائل پیچیده با معیارهای متعدد و گاه متضاد است. این روش‌ها امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را فراهم کرده و به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب گزینه‌های مناسب‌تر کمک می‌کنند. [۱۲].

^۴ Solid Oxide Fuel Cell

^۵ Compressed Air Energy Storage

^۱ Phase Change Materials

^۲ Hybrid Energy Storage Systems

^۳ Porous Media Compressed Air Energy Storage

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در ایران و با بهره‌گیری از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده است. با وجود مطالعات متعدد، بررسی جامع این فناوری‌ها با در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک در بستر بومی ایران همچنان محدود است. از این‌رو، در این پژوهش یک چارچوب بومی‌سازی شده مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، سناریوپردازی و تحلیل حساسیت به‌کار گرفته شده است تا نتایجی قابل اتکا برای پشتیبانی از سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی در شرایط عدم قطعیت نشان داده شود.

۲- روش‌شناسی

تدوین سیاست‌های توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در ایران نیازمند رویکردی نظام‌مند است که ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک را به‌صورت هم‌زمان در نظر بگیرد. در این پژوهش، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان چارچوب اصلی تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. انتخاب این روش به دلیل توانایی ترکیب داده‌های کمی و کیفی، ساختاربندی مناسب مسئله و کاربرد گسترده آن در مطالعات سیاست‌گذاری انرژی صورت گرفت.

مدل تصمیم‌گیری در چهار سطح طراحی شد؛ هدف اصلی «انتخاب بهینه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی برای آینده ایران»، گروه‌های معیار، زیرمعیارها و در نهایت گزینه‌های فناوری. اگرچه روش‌های پیشرفته‌تری مانند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، فرایند شبکه‌ای و بهترین-بدترین توسعه یافته‌اند، اما به دلیل ضرورت شفافیت نتایج برای سیاست‌گذاران، محدودیت داده‌ها و تعداد خبرگان، روش تحلیل سلسله‌مراتبی کلاسیک برای این مطالعه مناسب‌تر تشخیص داده شد.

داده‌های پژوهش از ترکیب اطلاعات کمی معتبر بین‌المللی و قضاوت خبرگان به‌دست آمد. همچنین برای کاهش اثر عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های ذاتی این روش، از تحلیل سناریو و تحلیل حساسیت استفاده شد. بدین منظور، هفت سناریوی وزنی مختلف تعریف گردید تا پایداری نتایج در برابر تغییر اولویت معیارها ارزیابی شود.

هدف این پژوهش توسعه یک روش جدید تصمیم‌گیری نیست، بلکه نمایش چارچوبی کاربردی و متناسب با شرایط ایران برای ارزیابی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی است. از این‌رو، روش تحلیل سلسله‌مراتبی کلاسیک توازن مناسبی میان دقت تحلیلی، سادگی اجرا و قابلیت استفاده عملی فراهم می‌کند.

فرآیند تحلیل با شناسایی گزینه‌های فناوری آغاز شد. بر اساس مرور ادبیات و شرایط بومی ایران، هشت فناوری شامل ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ، باتری لیتیوم-یون، باتری سدیم-گوگرد، ذخیره‌سازی هوای فشرده، ذخیره‌سازی گرمایی، چرخ‌طیار، ذخیره‌سازی هیدروژنی و ابرخازن به‌عنوان گزینه‌های مورد بررسی انتخاب شدند. این فناوری‌ها از نظر بلوغ فناوری، قابلیت توسعه در مقیاس‌های مختلف و تناسب با

تصمیم‌گیری چندمعیاره به دو دسته اصلی روش‌های جبرانی و غیرجبرانی تقسیم می‌شود. روش‌های جبرانی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۱، تاپسیس^۲، ویکور^۳ و پرومتی^۴ فرض می‌کنند که ضعف یک معیار را می‌توان با قوت معیار دیگر جبران کرد. در حالی که روش‌های غیرجبرانی مانند الکتراه^۵ چنین امکانی را نمی‌دهند. در میان این روش‌ها، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌دلیل سادگی، شفافیت و قابلیت ساختاردهی سلسله‌مراتبی بسیار رایج است. این روش بر مقایسه‌های زوجی استوار است و برای مسائل مکان‌یابی، انتخاب تامین‌کننده، یا تحلیل سیاستی بسیار کاربرد دارد [۱۳].

در ایران نیز استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در برنامه‌ریزی انرژی به تدریج در حال گسترش است. برای نمونه، کاربین و رشیدی کومچان [۱۲] با استفاده از روش پرومتی به اولویت‌بندی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در ایران پرداختند. در این مدل، معیارها در چهار خوشه فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی دسته‌بندی شده و تحلیل به‌صورت گروهی انجام شده است. نتایج نشان دادند که این چارچوب توانسته است گزینه‌های مختلف را با دقت بالا و در تطابق با ترجیح ذی‌نفعان رتبه‌بندی کند.

هم‌چنین، شهنوازی و علی‌محمدلو [۱۱] با استفاده از ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر مجموعه‌های فازی نوع دوم مجموعه‌های فازی نوع دوبازه‌ای^۶ به تحلیل ریسک در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران پرداختند. آن‌ها با ترکیب روش‌هایی مانند بهترین-بدترین^۷، دیمتل^۸ و مدل‌سازی ساختاری تفسیری^۹، توانستند ساختار علی و شدت اثرگذاری ریسک‌های مختلف مانند نرخ ارز، تحریم‌ها، فساد اداری و ریسک‌های قراردادی را شناسایی و اولویت‌بندی کنند.

در مطالعه‌های مکان‌یابی مزرعه‌های بادی نیز از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌ویژه تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. برای مثال، یوسفی و همکاران [۱۳] در مطالعات خود، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مسائلی مانند مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی استفاده شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان‌دهنده توانایی و انعطاف‌پذیری بالای این روش‌ها در تحلیل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری است.

با توجه به ماهیت بلندمدت و پیچیده تصمیم‌گیری در حوزه انرژی، بهره‌گیری از رویکردهای آینده‌نگر و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و انتخاب فناوری‌ها ضروری است. از این‌رو، پژوهش حاضر با در نظر گرفتن شاخص‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجرایی، به ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی متناسب با نیازهای آینده ایران می‌پردازد.

پژوهش‌های متعددی [۱-۱۳] در زمینه کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب فناوری‌های انرژی انجام شده

¹ Analytic Hierarchy Process

² TOPSIS

³ VIKOR

⁴ PROMETHEE

⁵ ELECTRE

⁶ Interval Type-2 Fuzzy Sets

⁷ Best-Worst Method

⁸ DEMATEL

⁹ Interpretive Structural Modeling

زیرساخت‌های انرژی کشور ارزیابی شدند. ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ یکی از رایج‌ترین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ است که با بهره‌گیری از چرخه پمپاژ و تخلیه آب، امکان ذخیره‌سازی حجم بالایی از انرژی را فراهم می‌کند، هرچند اجرای آن به شرایط جغرافیایی و منابع آبی مناسب وابسته است [۱۴].

باتری‌های لیتیوم-یون به واسطه بازدهی مناسب، چگالی انرژی بالا و کاربرپذیری گسترده در سطوح مختلف از مصارف خانگی تا صنعتی و نیروگاهی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مهم در حوزه ذخیره‌سازی انرژی مطرح هستند. با این حال، هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه و همچنین وابستگی این فناوری به مواد معدنی به‌طور عمده وارداتی، از جمله محدودیت‌ها و چالش‌های اساسی آن به‌شمار می‌آید. [۱۵].

باتری‌های سدیم-گوگرد قابلیت ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ و طول عمر مناسب، به‌ویژه در شبکه‌های برق شهری مورتوجه قرار گرفته‌اند. این باتری‌ها امکان تامین توان پایدار را فراهم می‌کنند، اما به‌دلیل نیاز به دمای عملیاتی بالا و ملاحظه‌های ایمنی، کاربرد آن‌ها محدودیت‌هایی دارد [۱۶].

ذخیره‌سازی هوای فشرده روشی است که در آن انرژی به شکل هوای فشرده در مخازن زیرزمینی ذخیره می‌شود و در زمان نیاز از طریق انبساط و عبور از توربین به برق تبدیل می‌شود. مزیت اصلی این فناوری مقیاس‌پذیری بالا و هزینه سرمایه‌ای کمتر نسبت به باتری‌هاست، هرچند بازدهی آن به‌نسبت پایین‌تر است [۱۷، ۱۸].

انرژی گرمایی را اغلب در موادی نظیر نمک‌های مذاب یا مواد تغییر فاز دهنده ذخیره می‌کنند. این فناوری به‌ویژه در ترکیب با نیروگاه‌های خورشیدی گرمایی^۱ کاربرد گسترده دارد و امکان ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بالا با هزینه پایین را فراهم می‌آورد، اما بازده تبدیل حرارت به برق محدودیت اصلی آن است [۱۹].

چرخ‌طیارها انرژی را به‌صورت جنبشی در روتورهای با سرعت بسیار بالا ذخیره می‌کنند. این فناوری به‌دلیل پاسخ‌دهی سریع، طول عمر بالا و توان لحظه‌ای زیاد شناخته شده است، اما ظرفیت ذخیره‌سازی آن محدود بوده و بیش‌تر برای پایداری کوتاه‌مدت و بهبود کیفیت توان به‌کار می‌رود [۲۰].

ذخیره‌سازی هیدروژنی یا همان فناوری تبدیل توان به هیدروژن^۲، با استفاده از الکترولیز برق مازاد را به هیدروژن تبدیل می‌کند و در زمان نیاز از طریق پیل سوختی مجدد به برق بازمی‌گرداند. مزیت اصلی این روش امکان ذخیره‌سازی بلندمدت و انعطاف‌پذیری برای کاربرد در بخش‌های مختلف انرژی است، اما هزینه بالا و بازده به‌نسبت پایین از چالش‌های آن محسوب می‌شود [۲۱، ۲۲].

در نهایت، ابرخازن‌ها به‌عنوان فناوری ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی سریع، قابلیت شارژ و دشارژ آبی را فراهم می‌کنند. این فناوری دارای طول عمر بسیار بالا و توان لحظه‌ای زیاد است، اما ظرفیت انرژی پایین آن باعث شده است که اغلب در کاربردهای خاص همچون خودروهای برقی یا پشتیبانی کوتاه‌مدت شبکه مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

در گام بعدی، معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی فناوری‌ها تعیین شدند. به‌منظور پوشش ابعاد مختلف تصمیم‌گیری، پنج خوشه اصلی شامل معیارهای مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک تعریف شد. این خوشه‌ها مجموعه‌ای از شاخص‌ها نظیر هزینه‌ها، عملکرد فنی، آثار زیست‌محیطی، پذیرش اجتماعی، امنیت انرژی و ملاحظات ایمنی را در بر می‌گرفتند و برای هر یک، تعریف و واحد اندازه‌گیری مشخص شد.

داده‌های موردنیاز از منابع معتبر بین‌المللی شامل گزارش‌های سازمان‌های انرژی و مطالعات علمی، به همراه گزارش‌های صنعتی گردآوری شد. در مواردی که داده‌های بومی در دسترس نبود، از مقادیر میانگین جهانی استفاده و سپس متناسب با شرایط اقتصادی، اقلیمی و زیرساختی ایران تعدیل گردید. این تعدیل‌ها با بهره‌گیری از مرور ادبیات، گزارش‌های ملی و قضاوت خبرگان انجام شد تا نتایج از واقع‌گرایی بیشتری برخوردار باشند.

لازم به ذکر است که هدف از این فرآیند، جایگزینی داده‌های جهانی نبوده، بلکه افزایش انطباق تحلیل با شرایط ایران بوده است. این تعدیل‌ها ساختار مقایسه‌ای مدل را تغییر نداده و فقط برای بازتاب بهتر محدودیت‌ها و ویژگی‌های بومی کشور اعمال شده‌اند. اطلاعات و داده‌های نهایی مورد استفاده در تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است.

هشت فناوری ذخیره‌سازی انرژی شامل ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ، باتری لیتیوم-یون، باتری سدیم-گوگرد، ذخیره‌سازی هوای فشرده، ذخیره‌سازی گرمایی، چرخ‌طیار، ذخیره‌سازی هیدروژنی و ابرخازن از منظر معیارهای مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده شامل شاخص‌هایی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، هزینه سطحی‌شده ذخیره‌سازی، بازده چرخه، چگالی انرژی، توان، زمان پاسخ‌گویی، طول عمر، آثار زیست‌محیطی، پذیرش اجتماعی، نقش در امنیت انرژی و خطر ایمنی بود. مقادیر هر شاخص از منابع معتبر بین‌المللی استخراج و پس از تعدیل متناسب با شرایط ایران در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفت.

در مرحله بعد مطابق جدول ۲ و ۳ امتیاز هر فناوری بر اساس معیارها نرمال‌سازی شد. به‌منظور قابل‌مقایسه شدن معیارهایی با مقیاس‌ها و واحدهای متفاوت، از روش نرمال‌سازی خطی مبتنی بر مقادیر حداقل و حداکثر استفاده شد. بر این اساس، اگرچه مقادیر خام برخی معیارها (مانند چگالی انرژی) در جدول داده‌های اولیه غیرصفر هستند، اما در صورتی که مقدار آن‌ها نسبت به سایر گزینه‌ها حداقل باشد، پس از نرمال‌سازی مقدار صفر به آن‌ها اختصاص می‌یابد. همچنین، مقادیر بسیار کوچک نرمال‌سازی‌شده در جدول با دقت محدود گزارش شده و به‌صورت صفر نمایش داده شده‌اند.

پس از نرمال‌سازی داده‌ها، برای تکمیل داده‌های کیفی و همچنین ارزیابی و وزن‌دهی معیارهایی همچون پذیرش اجتماعی و ریسک ایمنی، از نظرهای خبرگان استفاده شد. پانلی شامل تعدادی خبره منتخب از دانشگاه، صنعت و سازندگان و سیاست‌گذاران و رگولاتورها تشکیل شد. گردآوری نظرها از طریق پرسش‌نامه مقایسه زوجی و فرم‌های امتیازدهی انجام شد و برای تجمیع قضاوت‌ها از میانگین هندسی استفاده شد. ساخت و تحلیل مدل با استفاده از نرم‌افزار SuperDecisions انجام شد. بدین منظور، گروهی ۵۰ نفره متشکل

¹ Concentrated Solar Power

² Power-to-Hydrogen

ریسک	خطر ایمنی	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان
انرژی			

جدول ۲- امتیاز نرمال شده گزینه‌های ذخیره‌سازی بر اساس معیارها.

معیار	ذخیره‌سازی تلفیه به‌میان	باتری لیتیوم یون	باتری سدیم-گوگرد	ذخیره‌سازی هوای فشرده
هزینه سطحی شده ذخیره‌سازی	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۹
هزینه سرمایه	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۶
هزینه عملیات و نگهداری	۰/۲۹	۰/۷۲	۰/۵۴	۰/۸
بازده چرخه	۰/۷	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۳۹
چگالی انرژی	۰	۰	۰	۰
توان	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰
طول عمر	۱	۰/۱	۰	۰/۳۸
زمان پاسخ‌گویی	۰/۶۶	۱	۱	۰/۶۶
انتشار گازهای گل‌خانه‌ای	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
مصرف زمین	۱	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۶۶
مصرف آب	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۱
پذیرش اجتماعی	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶
ایجاد اشتغال	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶	۱
نقش در امنیت انرژی	۱	۰/۶۶	۰/۶۶	۱
ریسک	۰/۳۳	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶

جدول ۳- امتیاز نرمال شده گزینه‌های ذخیره‌سازی بر اساس معیارها.

معیار	ذخیره‌سازی گرمایی	توربین‌ها	ذخیره‌سازی هیدروژنی	ابری‌ها
هزینه سطحی شده ذخیره‌سازی	۱	۰/۶۳	۰/۷۳	۰
هزینه سرمایه	۱	۰/۹۸	۰/۹۲	۰
هزینه عملیات و نگهداری	۰/۹۶	۰	۰/۶۸	۱
بازده چرخه	۰/۷۹	۰/۹۶	۰	۱
چگالی انرژی	۰	۰	۱	۰
توان	۰/۰۷	۰/۳۷	۰	۱
طول عمر	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۰۷

از خبرگان حوزه انرژی انتخاب گردید که شامل اعضای هیئت علمی دانشگاه، کارشناسان صنعت انرژی و متخصصان فعال در حوزه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی بودند. معیار انتخاب خبرگان، سابقه علمی یا اجرایی مرتبط، آشنایی با فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و تجربه تصمیم‌گیری در پروژه‌های انرژی بوده است.

گردآوری نظرات خبرگان از طریق پرسش‌نامه‌های مقایسه زوجی و فرم‌های امتیازدهی انجام شد. به‌منظور کاهش اثر سوگیری‌های فردی و افزایش قابلیت اتکای نتایج، نظرهای جمع‌آوری شده با استفاده از میانگین هندسی تجمیع گردید. همچنین، سازگاری قضاوت‌ها بررسی شد و تنها پاسخ‌هایی که دارای نرخ ناسازگاری قابل‌قبول بودند در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- معیارها، واحدهای سنجش و منابع مورد استفاده در ارزیابی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی.

هدف	معیار	واحد	منابع
مالی	هزینه سطحی شده ذخیره‌سازی	MWh/\$	[۲۵][۲۴]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
	هزینه سرمایه	kW/\$	[۲۵]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]
	هزینه عملیات و نگهداری	kW-\$/year	[۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
فنی	بازده چرخه	%	[۲۵][۲۴]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
	چگالی انرژی	Wh/kg	[۲۵][۲۴]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
	توان	W/kg	[۲۵][۲۴]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]
	زمان پاسخ‌گویی	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۲۹]، [۳۰]
زیست‌محیطی	طول عمر	سال	[۲۴]، [۳۲]
	انتشار گازهای گل‌خانه‌ای	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۲۵]، [۲۸]
	مصرف زمین	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۳۲]
	مصرف آب	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۳۲]
اجتماعی	پذیرش اجتماعی	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]
	ایجاد اشتغال	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۲۶]، [۲۷]
	نقش در امنیت	رتبه‌بندی کیفی	نظر خبرگان و [۲۵]



شکل ۱- چارچوب روش‌شناسی پژوهش برای ارزیابی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی.

۳- نتایج

پیش از ورود به تحلیل سناریوها و ارزیابی فناوری‌های مختلف، ضروری است نتایج مربوط به پرسشنامه‌های تخصصی که مبنای اصلی استخراج وزن معیارها هستند نمایش داده شود تا چارچوب تحلیلی پژوهش به‌صورت روشن و منسجم شکل گیرد.

۳-۱- نتایج پرسشنامه

به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها، از پرسشنامه‌های مقایسه زوجی مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. پرسشنامه‌ها در میان خبرگان دانشگاهی و صنعتی حوزه انرژی توزیع و نتایج با استفاده از نرم‌افزار SuperDecisions تحلیل گردید. وزن معیارها و زیرمعیارها از قضاوت خبرگان استخراج شد و نرخ سازگاری برای تمامی خوشه‌ها کمتر از ۰/۱ به‌دست آمد که بیانگر اعتبار و سازگاری مناسب داده‌ها است. وزن نهایی خوشه‌ها و زیرمعیارها در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- وزن دهی معیارهای تصمیم‌گیری.

خوشه	زیرمعیار	وزن محلی	CRخوشه
مالی	هزینه سطحی‌شده ذخیره‌سازی	۰/۳۴۸۷	۰/۰۲
مالی	هزینه سرمایه	۰/۲۴۱۳	۰/۰۲
مالی	هزینه عملیات و نگهداری	۰/۴۰۹۹	۰/۰۲
فنی	بازده چرخه	۰/۰۷۲۸	۰/۰۶۲

زمان پاسخ‌گویی	۰/۶۶	۱	۰/۶۶	۱
انتشار گازهای گل‌خانه‌ای	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
مصرف زمین	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
مصرف آب	۱	۰/۳۳	۱	۰/۳۳
پذیرش اجتماعی	۱	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶
ایجاد اشتغال	۱	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۶
نقش در امنیت انرژی	۱	۱	۱	۰/۶۶
ریسک	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۶۶	۰/۳۳

برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها، از مقایسه‌های زوجی بر اساس مقیاس ۹ امتیازی ساعتی استفاده شد [۳۶]. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه، وزن معیارها از طریق بردار ویژه استخراج و نرخ ناسازگاری برای تمامی ماتریس‌ها کنترل شد تا کمتر از ۰/۱ باشد. سپس عملکرد فناوری‌ها نسبت به هر زیرمعیار ارزیابی و رتبه نهایی آن‌ها از طریق ترکیب وزن معیارها و امتیاز گزینه‌ها محاسبه شد.

به‌منظور بررسی اثر تغییر اولویت معیارها بر انتخاب فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، هفت سناریوی تصمیم‌گیری شامل وزن برابر، اولویت مالی، اولویت فنی، اولویت زیست‌محیطی، ترکیب فنی-اقتصادی، ترکیب زیست‌محیطی-فنی-اقتصادی و ریسک زنجیره تامین تعریف شد. وزن زیرمعیارها بر اساس قضاوت خبرگان تعیین و با تغییر وزن خوشه‌های اصلی، پایداری رتبه‌بندی فناوری‌ها در شرایط مختلف ارزیابی گردید. همچنین، روند کلی پژوهش از انتخاب فناوری‌ها و گردآوری داده‌ها تا وزن‌دهی، اجرای سناریوها و تحلیل حساسیت در قالب فلوجارت روش‌شناسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۵۷۹
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۵۱۲
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۴۹۷
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۴۷۶
۷	چرخ طیار	۰/۴۲۹
۸	ابرازن‌ها	۰/۳۷۸

جدول ۶- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی اولویت مالی.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۷۱۹
۲	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۶۸۰
۳	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۶۷۰
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۵۸۷
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۵۵۹
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۵۲۰
۷	چرخ طیار	۰/۴۳۶
۸	ابرازن‌ها	۰/۳۸۶

در سناریو اول نتایج نشان می‌دهد که فناوری ذخیره‌سازی هیدروژنی بالاترین امتیاز را کسب کرده است. پس از آن، ذخیره‌سازی هوای فشرده و ذخیره‌سازی گرمایی در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. همچنین باتری لیتیوم-یون و باتری سدیم-گوگرد در رده‌های میانی جای گرفته‌اند. در مقابل، چرخ‌طیارها و ابرازن‌ها به دلیل هزینه بالا و کارایی پایین، کم‌ترین امتیاز را به دست آورده‌اند.

همچنین همان‌طور که انتظار می‌رفت، در سناریو دوم فناوری ذخیره‌سازی هیدروژنی بالاترین امتیاز را کسب کرد و پس از آن ذخیره‌سازی گرمایی و هوای فشرده در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد عملکردی متوسط داشتند، در حالی که چرخ‌طیارها و ابرازن‌ها کم‌ترین امتیاز را به دست آوردند.

در سناریوی اولویت مالی نیز ذخیره‌سازی هیدروژنی رتبه نخست را حفظ کرد. اگرچه بازده چرخ‌های این فناوری از برخی گزینه‌ها کم‌تر است، اما قابلیت ذخیره‌سازی بلندمدت، مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری عملیاتی و نقش آن در پشتیبانی از شبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر موجب برتری آن در ارزیابی کلی شد. این نتایج نشان می‌دهد که در تحلیل‌های کلان مالی، شاخص‌هایی مانند قابلیت ذخیره‌سازی بلندمدت و پایداری شبکه می‌توانند تاثیر بیش‌تری نسبت به بازده چرخ‌های داشته باشند.

در سناریو سوم که اولویت فنی نام‌گذاری شده وزن خوشه فنی برابر ۰/۴ در نظر گرفته شد و سایر خوشه‌ها اهمیت کم‌تری یافتند. امتیاز هرفناوری در این سناریو مطابق جدول ۷ است. این سناریو برای شرایطی است که عملکرد فنی شامل بازده، توان، چگالی انرژی و طول عمر بیش‌ترین اهمیت را داشته باشد.

در چهارمین سناریو اولویت زیست‌محیطی وزن خوشه زیست‌محیطی ۰/۴ فرض شد؛ امتیاز هرفناوری در این سناریو مطابق

فنی	چگالی انرژی	۰/۷۳۶۵	۰/۰۶۲
فنی	توان	۰/۰۶۱۲	۰/۰۶۲
فنی	زمان پاسخ‌گویی	۰/۰۶۴۱	۰/۰۶۲
فنی	طول عمر	۰/۰۶۴۵	۰/۰۶۲
زیست‌محیطی	انتشار گازهای گل‌خانه‌ای	۰/۵۹۲۱	۰/۰۳۶
زیست‌محیطی	مصرف آب	۰/۲۰۳۷	۰/۰۳۶
زیست‌محیطی	قابلیت بازیافت	۰/۱۲۱۶	۰/۰۳۶
زیست‌محیطی	مصرف زمین	۰/۰۸۲۶	۰/۰۳۶
اجتماعی	نقش در امنیت انرژی	۰/۶۹۳۴	۰/۰۶۳
اجتماعی	پذیرش اجتماعی	۰/۲۰۶۷	۰/۰۶۳
اجتماعی	ایجاد اشتغال	۰/۰۹۹۹	۰/۰۶۳
ریسک	ریسک	۱	—

۲-۳- نتایج سناریوها

ارزیابی فناوری‌ها در هریک از سناریوها به صورت مستقل انجام شد. نتایج نشان داد که ذخیره‌سازی هیدروژنی در اغلب سناریوها بالاترین رتبه را کسب کرده و پس از آن، ذخیره‌سازی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده قرار دارند. باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد در رتبه‌های میانی قرار گرفتند، درحالی‌که ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ به دلیل محدودیت‌های جغرافیایی و منابع آبی کشور نتوانست جایگاه بالایی کسب کند. همچنین، فناوری‌های چرخ‌طیار و ابرازن‌ها به دلیل هزینه بالا و ظرفیت ذخیره‌سازی محدود، کم‌ترین امتیاز را به دست آوردند.

این نتایج نشان می‌دهد که فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژنی، ذخیره‌سازی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای توسعه آتی ذخیره‌سازی انرژی در ایران هستند. در سناریوی پایه، تمامی خوشه‌های معیار شامل مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک دارای وزن یکسان ۰/۲ در نظر گرفته شدند و نتایج حاصل از آن به عنوان مبنای مقایسه سایر سناریوها مورد استفاده قرار گرفت. امتیاز فناوری‌ها در این سناریو در جدول ۵ نشان داده شده است.

در سناریو بعدی فرض شد که معیارهای مالی از اهمیت بیش‌تری برخوردار باشند (وزن = ۰/۴). سایر خوشه‌ها وزن‌های کم‌تری دارند؛ امتیاز هرفناوری در این سناریو مطابق جدول ۶ است. هدف بررسی این است که اگر سیاست‌گذاری تنها بر مبنای کاهش هزینه‌ها باشد، کدام فناوری‌ها برتری خواهند داشت.

جدول ۵- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی وزن برابر.

رتبه	فناوری	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۷۰۷
۲	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۶۰۲

جدول ۸ است. این سناریو اهمیت ملاحظه‌های زیست‌محیطی همچون انتشار گازهای گل‌خانه‌ای، مصرف زمین و مصرف آب را منعکس می‌کند.

جدول ۷- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی اولویت فنی.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۶۲۴
۲	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۵۶۸
۳	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۵۶۷
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۵۵
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۵۴۲
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۵۴۲
۷	چرخ طیار	۰/۵۳۶
۸	ابرخازن‌ها	۰/۵۱۹

جدول ۸- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی اولویت زیست‌محیطی.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۷۳۱
۲	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۴۷۶
۳	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۴۶۵
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۴۱۸
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۴۰۶
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۳۹۷
۷	چرخ طیار	۰/۳۶۵
۸	ابرخازن‌ها	۰/۳۳۵

نتایج سناریو سوم نشان داد فناوری ذخیره‌سازی گرمایی فناوری برتر مشخص شده، اما تفاوت امتیاز فناوری‌ها کم‌تر شد. باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد در این سناریو موقعیت بهتری یافتند زیرا بازده و چگالی انرژی بالاتری دارند. ابرخازن‌ها نسبت به سناریوی مالی اندکی ارتقا یافتند، اما همچنان جایگاه پایینی دارند.

نتایج سناریو چهارم نشان داد که در این سناریو فناوری ذخیره‌سازی هیدروژنی بالاترین امتیاز را به دست آورد. پس از آن، ذخیره‌سازی هوای فشرده و ذخیره‌سازی گرمایی در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد به دلیل بازده چرخه مناسب و عملکرد فنی قابل قبول، در جایگاه‌های میانی قرار

گرفتند. در مقابل، چرخ‌طیارها و ابرخازن‌ها همچنان کم‌ترین امتیاز را کسب کردند و در رتبه‌های پایین باقی ماندند.

در پنجمین سناریو ترکیبی از دو خوشه مالی و فنی در اولویت قرار گرفتند (هر کدام با وزن ۰/۳۵). سایر خوشه‌ها وزن کم‌تری دارند. این سناریو منعکس‌کننده شرایطی است که تصمیم‌گیران به دنبال توازن میان کارایی فنی و توجیه اقتصادی باشند هم‌چنین امتیاز هرفناوری در این سناریو مطابق جدول ۹ است.

در سناریو ششم ترکیب سه‌گانه صورت گرفته که سه خوشه مالی، فنی و زیست‌محیطی هر کدام وزن ۰/۳ به دست آوردند و خوشه‌های اجتماعی و ریسک در اولویت پایین‌تر (۰/۵) قرار گرفتند. امتیاز هرفناوری در این سناریو مطابق جدول ۱۰ است. این سناریو منعکس‌کننده رویکرد توسعه پایدار است که ابعاد مختلف کارایی، هزینه و محیط‌زیست را هم‌زمان در نظر می‌گیرد.

جدول ۹- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی ترکیب فنی-اقتصادی.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۷۴۳
۲	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۵۶۶
۳	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۵۴۳
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۴۹۴
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۴۶۸
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۴۴۱
۷	چرخ طیار	۰/۳۷۱
۸	ابرخازن‌ها	۰/۳۴۲

جدول ۱۰- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی ترکیب سه‌گانه.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۶۷۲
۲	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۵۳۵
۳	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۵۰۶
۴	باتری لیتیوم-یون	۰/۴۳۸
۵	باتری سدیم-گوگرد	۰/۴۱۶
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۴۰۸
۷	چرخ طیار	۰/۳۳۷
۸	ابرخازن‌ها	۰/۳۲۰

نتایج سناریو پنجم نشان می‌دهد که فناوری ذخیره‌سازی هیدروژنی با اختلاف قابل‌توجهی بالاترین امتیاز را به دست آورده است. ذخیره‌سازی گرمایی و هوای فشرده در رتبه‌های دوم و سوم قرار

در نهایت، تحلیل حساسیت با تغییر وزن خوشه‌های معیار در قالب هفت سناریوی مختلف انجام شد تا میزان پایداری رتبه‌بندی فناوری‌ها و حساسیت نتایج نسبت به تغییر اولویت‌ها بررسی شود.

در این پژوهش، تحلیل حساسیت با تغییر وزن خوشه‌های اصلی معیارها انجام شد، زیرا تغییر اولویت میان ابعاد مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ریسک بیش‌ترین تاثیر را بر تصمیم‌گیری‌های کلان دارد. این رویکرد امکان ارزیابی پایداری رتبه‌بندی فناوری‌ها در برابر تغییر دیدگاه تصمیم‌گیرندگان را فراهم می‌کند.

وزن زیرمعیارها بر اساس نظر خبرگان و با نرخ سازگاری قابل‌قبول تعیین شد و داده‌های ورودی نیز از منابع معتبر استخراج گردید. از این‌رو، تحلیل حساسیت در سطح زیرمعیارها و داده‌های ورودی در این پژوهش انجام نشد و می‌تواند به‌عنوان یکی از مسیرهای پژوهشی آینده مورد بررسی قرار گیرد.

برای وضوح بیش‌تر نتایج، فناوری‌ها در دو گروه تفکیک شدند:

- گروه اول (فناوری‌های برتر): ذخیره‌سازی گرمایی، ذخیره‌سازی هوای فشرده و ذخیره‌سازی هیدروژنی که در اغلب سناریوها رتبه‌های بالاتری کسب کرده‌اند (مطابق شکل ۲).
- گروه دوم (فناوری‌های میانی و پایین‌تر): باتری لیتیوم-یون، باتری سدیم-گوگرد، ذخیره‌سازی تلمبه-پمپاژ، چرخ‌طیار و ابرخازن‌ها که در بیش‌تر سناریوها جایگاه میانی یا پایین داشته‌اند (مطابق شکل ۳).

این تفکیک باعث می‌شود روند تغییر در هر گروه با دقت بیش‌تری قابل مشاهده باشد. نتایج نشان داد که ذخیره‌سازی هیدروژنی، گرمایی و هوای فشرده از پایداری بالایی برخوردار بوده و در اغلب سناریوها در صدر قرار می‌گیرند. در مقابل، فناوری‌های گروه دوم نوسان بیش‌تری داشته و نسبت به تغییر وزن معیارها حساس‌تر هستند. این موضوع بیانگر آن است که توسعه و کاربرد گسترده آن‌ها در ایران نیازمند سیاست‌های حمایتی، ارتقای فناوری و کاهش هزینه‌ها خواهد بود.



شکل ۲- نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی تحت سناریوهای مختلف وزنی و پایداری گزینه‌های میانی و ضعیف‌تر نسبت به تغییر اولویت معیارها.

گرفتند. همچنین باتری لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد در جایگاه‌های میانی قرار دارند. در مقابل، چرخ‌طیارها و ابرخازن‌ها کم‌ترین امتیاز را کسب کردند.

نتایج سناریو ششم نشان می‌دهد که فناوری ذخیره‌سازی هیدروژنی بالاترین امتیاز را کسب کرده است و پس از آن ذخیره‌سازی گرمایی و هوای فشرده قرار دارند. این امر نشان می‌دهد که در یک رویکرد متوازن توسعه پایدار، فناوری هیدروژنی به همراه ذخیره‌سازی گرمایی می‌توانند نقش پررنگ‌تری ایفا کنند.

در سناریو هفتم خوشه ریسک با وزن ۰/۴ اهمیت ویژه‌ای پیدا کرد. این سناریو برای شرایطی است که عدم اطمینان در تامین مواد اولیه، ایمنی و مسائل ژئوپلیتیکی بر تصمیم‌گیری‌ها تاثیرگذار باشند امتیاز هر فناوری در این سناریو مطابق جدول ۱۱ است.

جدول ۱۱- رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی در سناریوی ریسک
زنجیره تامین.

رتبه	فناوری ذخیره‌سازی	امتیاز
۱	ذخیره‌سازی هیدروژنی	۰/۶۹۶
۲	ذخیره‌سازی هوای فشرده	۰/۶۱۷
۳	باتری لیتیوم-یون	۰/۵۴۹
۴	باتری سدیم-گوگرد	۰/۵۳۸
۵	ذخیره‌سازی گرمایی	۰/۵۱۶
۶	تلمبه-پمپاژ	۰/۴۴۰
۷	چرخ‌طیار	۰/۴۰۴
۸	ابرخازن‌ها	۰/۳۶۶

نتایج نشان داد که ذخیره‌سازی هیدروژنی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت ذخیره‌سازی بلندمدت و وابستگی کم‌تر به محدودیت‌های زنجیره تامین، در اغلب سناریوها بالاترین رتبه را کسب کرده است. پس از آن، ذخیره‌سازی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده در رتبه‌های بعدی قرار دارند، در حالی که باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد در جایگاه‌های میانی و فناوری‌های چرخ‌طیار و ابرخازن در پایین‌ترین رتبه‌ها قرار گرفتند.

ذخیره‌سازی هیدروژنی اگرچه مزیت راهبردی در ذخیره‌سازی بلندمدت دارد، اما با چالش‌هایی نظیر بازده چرخه پایین‌تر و نیاز به زیرساخت‌های مناسب مواجه است. در مقابل، ذخیره‌سازی گرمایی از نظر هزینه و سادگی اجرا در بسیاری از کاربردها جذاب است و ذخیره‌سازی هوای فشرده نیز به دلیل مقیاس‌پذیری مناسب، گزینه‌ای قابل توجه برای پشتیبانی شبکه محسوب می‌شود.

برتری ذخیره‌سازی هیدروژنی در این پژوهش بیش از آن که بیانگر برتری مطلق آن باشد، ناشی از چارچوب ارزیابی و تاکید بر ذخیره‌سازی بلندمدت، امنیت انرژی و انعطاف‌پذیری سامانه است. از این‌رو، نتایج نشان می‌دهد که توسعه آینده ذخیره‌سازی انرژی در ایران باید بر ترکیبی از فناوری‌ها متناسب با نوع کاربری و شرایط زیرساختی کشور استوار باشد.



شکل ۳- نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی تحت سناریوهای مختلف وزنی و پایداری گزینه‌های برتر نسبت به تغییر اولویت معیارها.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در ایران باید فراتر از ملاحظات فقط فنی یا اقتصادی بوده و چالش‌هایی نظیر کمبود منابع آب، محدودیت‌های زنجیره تامین ناشی از تحریم‌ها و ضعف زیرساخت‌های شبکه برق را به‌طور جدی در نظر گیرد. برتری فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژنی، ذخیره‌سازی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده در اغلب سناریوها بیانگر سازگاری بیشتر این گزینه‌ها با شرایط اقلیمی، اقتصادی و ژئوپلیتیکی کشور است.

۳-۳- قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج و مقایسه با روندهای جهانی

مقایسه نتایج این پژوهش با روند جهانی استقرار فناوری‌ها نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی شبکه‌ای در جهان همچنان به‌طور عمده بر فناوری‌های بالنی مانند تلمبه-پمپاژ و باتری‌های لیتیوم‌یون متکی است. در مقابل، فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژنی و گرمایی بیشتر به‌عنوان گزینه‌های ذخیره‌سازی بلندمدت و چندبخشی در حال توسعه هستند.

برتری ذخیره‌سازی هیدروژنی و گرمایی در این پژوهش را می‌توان تا حد زیادی ناشی از شرایط بومی ایران، از جمله محدودیت منابع آب، ملاحظات امنیت انرژی، ریسک زنجیره تامین و نیاز به ذخیره‌سازی بلندمدت دانست. با این حال، هم‌راستایی نتایج با توجه روزافزون جهانی به فناوری‌های ذخیره‌سازی بلندمدت نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی، با تنظیم وزن معیارها متناسب با شرایط محلی، قابلیت کاربرد در سایر کشورها را نیز دارد.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از دستاوردهای اصلی این پژوهش، نمایش یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره بومی‌سازی‌شده برای ارزیابی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در ایران است. در این چارچوب، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، سناریوهای وزنی مختلف و تحلیل حساسیت، پایداری رتبه‌بندی فناوری‌ها در شرایط گوناگون سیاست‌گذاری بررسی شد.

نتایج نشان داد که فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژنی، ذخیره‌سازی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده در اغلب سناریوها

بالاترین رتبه‌ها را کسب کرده و از پایداری بیشتری برخوردارند. در مقابل، باتری‌های لیتیوم-یون و سدیم-گوگرد در رتبه‌های میانی و فناوری‌های چرخ‌طیار و ابرخازن در رتبه‌های پایین‌تر قرار گرفتند. همچنین، تحلیل حساسیت نشان داد که اگرچه تغییر وزن معیارها می‌تواند موجب جابه‌جایی رتبه‌ها شود، اما فناوری‌های برتر جایگاه خود را در اکثر سناریوها حفظ می‌کنند.

با این حال، هیچ فناوری به‌تنهایی برای تمامی کاربردها گزینه بهینه محسوب نمی‌شود. ذخیره‌سازی هیدروژنی مزیت ذخیره‌سازی بلندمدت و نقش راهبردی در امنیت انرژی را دارد، اما با چالش‌هایی مانند بازده چرخه پایین‌تر و نیاز به زیرساخت مناسب مواجه است. ذخیره‌سازی گرمایی در کاربردهای برق-حرارت و صنایع انرژی‌بر عملکرد مناسبی دارد، در حالی که ذخیره‌سازی هوای فشرده به دلیل مقیاس‌پذیری بالا برای پشتیبانی شبکه جذاب است، هرچند به شرایط زمین‌شناسی مناسب وابسته است.

بر این اساس، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توسعه آینده ذخیره‌سازی انرژی در ایران باید بر ترکیبی از فناوری‌ها متناسب با نوع کاربری، افق زمانی ذخیره‌سازی و شرایط زیرساختی کشور استوار باشد. همچنین، حمایت از توسعه زیرساخت‌ها، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و توجه به ملاحظات نظیر امنیت انرژی، ریسک زنجیره تامین و آثار زیست‌محیطی می‌تواند نقش مهمی در استقرار پایدار فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در کشور ایفا کند.

۵- مراجع

- [1] Bozorgmehri S, Salimi M, Azarm D, Rahimi Takami M, Khalaj M, Haghparsat Kasahani A, Hosseinpour M, Golmohammad M. Future prospects for solar energy production and storage in Iran. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*. 2024;11(4):247-258.
- [2] Khalili R, Khaledi A, Marzband M, Nematollahi AF, Vahidi B, Siano P. Robust multi-objective optimization for the Iranian electricity market considering green hydrogen and analyzing the performance of different demand response programs. *Applied Energy*. 2023;334:120737.
- [3] Abdollahi SA, Faramarzi S, Mafi M, Ranjbar SF, Motavalli SS. Proposing a hydrogen liquefaction cycle for geothermal energy storage in an innovative multi-generation system. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*. 2025;12(1):1-8.
- [4] Ur Rehman U, Mahmood T, Waqas HM. Managing uncertainty in battery energy storage system evaluation using complex hesitant fuzzy multi-criteria decision-making technique with Einstein operators. *Journal of Energy Storage*. 2025;125:116968.
- [5] Hua W, Li M, Shi Y, Zhang X. New low carbon path for cold store—Research progress of new type of cold store based on phase change thermal energy storage technology. *Journal of Energy Storage*. 2025;126:117109.
- [6] Shu H. Hybrid energy storage system for intelligent electric vehicles incorporating improved PSO algorithm. *Energy Informatics*. 2025;8(1):1-16.
- [7] Gasanzade F, Witte F, Tuschy I, Bauer S. Integration of geological compressed air energy storage into future energy supply systems dominated by renewable

- [۲۲] رضایور دولق ب، قندهاریون س. ذخیره انرژی گرمایی با استفاده از هیدرید فلزی و ماده تغییر فازدهنده. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۴۰۴. د. ۵. ش. ۱. ص. ۱-۵.
- [23] Cao G, Dang Y, Guo S, Liang Y, Jia R. Optimal allocation of supercapacitor energy storage system capacity for mitigating wind power fluctuations. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2025;29(1):129-138.
- [24] Viswanathan V, Mongird K, Franks R, Li X, Sprengle V, Baxter R. 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. 2022.
- [25] U.S. Department of Energy, "Findings from Storage Innovations 2030: Compressed Air Energy Storage." [Online]. Available: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>.
- [26] Newsom G, Brown EG. Flywheel systems for utility-scale energy storage: A transformative flywheel project for commercial readiness. California Energy Commission. [Online]. Available from: <https://www.energy.ca.gov/research/>
- [27] U.S. Department of Energy. Technology Strategy Assessment Findings from Storage Innovations 2030: Supercapacitors. [Online]. 2023. Available from: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>
- [28] U.S. Department of Energy. Technology Strategy Assessment Findings from Storage Innovations 2030: Sodium Batteries. [Online]. 2023. Available from: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>
- [29] U.S. Department of Energy. Technology Strategy Assessment Findings from Storage Innovations 2030: Bidirectional Hydrogen Storage. [Online]. 2023. Available from: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>
- [30] U.S. Department of Energy. Technology Strategy Assessment Findings from Storage Innovations 2030: Pumped Storage Hydropower. [Online]. 2023. Available from: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>
- [31] U.S. Department of Energy. Findings from Storage Innovations 2030: Thermal Energy Storage. [Online]. Available from: <https://www.energy.gov/oe/storage-innovations-2030>
- [32] Diyono D, Cappon H, Kujawa-Roeleveld K, Keesman KJ. Empowering off-river pumped hydro energy storage: An economic and environmental analysis of renewable energy production-storage systems. *Energy Reports*. 2025;14:310-319. doi:10.1016/j.egyr.2025.06.026.
- [33] Cohen S, Ramasamy V, Inman D. A component-level bottom-up cost model for pumped storage hydropower. *National Renewable Energy Laboratory*. [Online]. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84875>
- [34] Ammendoerfer A, Tietze I, Hottenroth H, Viere T. Life-cycle impacts of pumped hydropower storage and battery storage. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017;8(3):231-245. doi:10.1007/s40095-017-0237-5.
- [35] Karve G, Thakre M, Vaidya G. Impact of extreme weather parameters on optimum sizing of solar photovoltaic-battery energy storage systems: A case study. *International Journal of Electrical and Electronics Research*. 2024;12(4):1357-1563. doi:10.37391/IJEER.120429.
- Saaty TL. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. 1990;48(1):9-26.
- power sources. *Energy Conversion and Management*. 2023;277:116643.
- [8] Dong C, Gunina MG. ANN-driven optimization and dynamic performance assessment of a hybrid energy system with enhanced SOFC and compressed air energy storage. *Energy*. 2025;328:136448.
- [9] Elalfy DA, Gouda E, Kotb MF, Bureš V, Sedhom BE. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2024;54:101482.
- [10] Zhang Z, Chen Y, Ma T, Tian H, Liu J, Zhou M, Wang W. Multi-type energy storage expansion planning: A review for high-penetration renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025;219:115853.
- [11] Shahnazi R, Alimohammadlou M. Investigating risks in renewable energy in oil-producing countries through multi-criteria decision-making methods based on interval type-2 fuzzy sets: A case study of Iran. *Renewable Energy*. 2022;191:1009-1027.
- [12] Karbin H, Rashidi Komijan A. An MCDM-based approach for renewable energy planning in Iran. *Journal of Energy and Economic Development*. 2022;1(3):60-79.
- [13] Yousefi H, Motlagh SG, Montazeri M. Multi-criteria decision-making system for wind farm site-selection using geographic information system (GIS): Case study of Semnan Province, Iran. *Sustainability*. 2022;14(13):7640.
- [14] Migliari L, Micheletto D, Cocco D. Green hydrogen generation for mitigating the impact of curtailment in floating photovoltaic-pumped hydro energy storage (FPV-PHES) systems. *Journal of Energy Storage*. 2025;132:117997.
- [۱۵] میرمحمدی ع، الهیاری س. طراحی سیستم خنک‌کاری برای باتری لیتیوم‌یون در نرخ دشارژهای مختلف با مدل‌سازی الکتریکی-حرارتی. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰. د. ۵۱. ش. ۱. ص. ۲۳۹.
- [16] Vineeth S, Yamauchi Y, Kumar V. Electrolytes for room-temperature sodium-sulfur batteries: A holistic approach to understand solvation. In: *Room-temperature Sodium-Sulfur Batteries*. CRC Press; 2023. p. 79-114.
- [17] Liang R, Ma H, Li H, Wang X, Zeng Z, Zheng Z, Li W, Huang Y, Zhao K. Techno-economic analysis of compressed air energy storage in abandoned salt caverns: A case study in China. *Renewable Energy*. 2025;123:595.
- [۱۸] امیری دلونی ا، سجادی ح، نعیمی ه، صیوری ع، حسین‌پور ا. بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به‌وسیله هوای فشرده به‌منظور مدیریت مصرف در اوج بار. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲. د. ۵۳. ش. ۱. ص. ۹۱-۹۹.
- [19] D'Angelo P, Scafuri A, Zamboni W. Modelling, optimisation and management strategies for a microgrid with integrated thermal energy storage. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2025.
- [20] Guo W, Min R, Xu G, Lan J, He Z, Yang Y, Jia Z. A novel flywheel frequency and voltage stabilization system. *SSRN Electronic Journal*. Available from: <https://ssrn.com/abstract=5052196>
- [21] Janke S, Crawford C, Truelove A, Lenio M, Hashemi B. Regenerative hydrogen energy storage modelling for northern microgrid energy design. *Renewable Energy*. 2025;123:979.