Investigating the factors influencing the sustainable development of Iran's mines under the Net Zero Emissions (NZE) scenario

Mohamad Reza Karimi, PhD student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Sadegh Abedi, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding Author)

Alireza Alinezhad, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Received: 14 July 2025 Revised: 7 Oct. 2025 Accepted: 26 Oct. 2025

Foresight/ Sustainable Development, Mines/ Net Zero Emissions (NZE) scenario

In recent years, the issue of sustainable development in extractive industries, especially in the mining sector, has emerged as one of the priorities of environmental, economic and technological policymaking. On the other hand, the global scenario of net zero emissions (NZE), as one of the key paths to addressing climate change, has introduced new requirements for future-oriented governance in energy-intensive industries, including mines.

In this context, identifying the key factors affecting the future planning of sustainable development in mines constitutes a fundamental prerequisite for designing long-term strategies aligned with climate scenarios. This study employs a mixed-methods approach, combining qualitative and quantitative techniques. To achieve this goal, an initial list of relevant variables was first extracted through a literature review and content analysis of national and international studies. In the next step, using the fuzzy Delphi method and a survey of experts in the fields of mining, energy, and environmental policy, 12 final key variables were identified. Then, to model the preferences of decision-makers under conditions of uncertainty and ambiguity, the Fuzzy Hesitant Hierarchy Analysis (HFAHP) technique was employed; a method well-suited to capturing the uncertainty and diversity of human judgments in futures research. Based on the output of HFAHP, four main criteria for sustainable development of mines were evaluated, including economic (0.258), social (0.231), technological (0.209), and environmental and climate (0.302).

1. **abedi.sadegh@iau.ac.ir** **JEL Classification: Q01, Q56, Q13**

https://doi.org/10.22034/ijts.2025.2065853.4164

Data Availability: The data used or generated in this research are presented in the text of the article.

Conflicts of Interest: The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۱۱۷، دورهٔ ۳۰، زمستان ۱۴۰۴، ۶۰-۳۳

مقاله پژوهشی

بررسی متغیرهای مؤثر بر توسعه پایدار معادن ایران در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر (NZE)

محمدرضا کریمی* صادق عابدی ** علیرضا علی نژاد***

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

آینده‌نگاری/ توسعه پایدار/ معادن/ سناریوی انتشار خالص صفر (NZE)

چکیده

توسعه پایدار در بخش معدن به‌عنوان یکی از ارکان اصلی سیاست‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مطرح است و سناریوی انتشار خالص صفر (NZE) چارچوبی کلیدی برای کاهش آلاینده‌ها و گذار به اقتصاد کم‌کربن فراهم می‌آورد. هدف این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی متغیرهای مؤثر بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن ایران در چارچوب NZE است. پژوهش حاضر از نوع کاربردی و ترکیبی بوده و با استفاده از رویکرد کیفی-کمی انجام شده است. ابتدا متغیرهای اولیه با مرور ادبیات و نظر خبرگان شناسایی شدند. سپس در سه راند دلفی فازی ۱۲ متغیر کلیدی نهایی غربال گردید. در مرحله بعد، با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مردد (HFAHP)، اهمیت نسبی ابعاد اصلی توسعه پایدار شامل اقتصادی، اجتماعی، فناورانه و زیست‌محیطی تعیین شد. نتایج نشان داد بعد زیست‌محیطی با وزن ۰٫۳۰۲ بالاترین

*.دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
m.karimi9771@iau.ir

**. گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین،دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران abedi.sadegh@iau.ac.ir

***. گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین،دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران alinezhad@iau.ac.ir

■ صادق عابدی، نویسنده مسئول.

https://doi.org/10.22034/ijts.2025.2065853.4164

اولویت را دارد. یافته‌ها بیانگر آن است که توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و فناوری‌های پاک، شرط اساسی در تحقق توسعه پایدار معادن در چارچوب NZE خواهد بود.

طبقه بندی JEL: **Q01, Q56, O13**

۱. مقدمه

صنعت مواد معدنی نقش تأثیرگذاری در اقتصاد جوامع مدرن دارند به‌طوری که معادن و صنایع معدنی یکی از حوزه‌های مهم و تعیین‌کننده به ویژه برای کشورهای درحال توسعه و دارای منابع معدنی است[۱]. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی در مورد نقش مواد معدنی حیاتی در انتقال انرژی پاک بر نیاز به توسعه مسئولانه و پایدار منابع معدنی تاکید دارد. معادن و صنایع معدنی عموماً به‌عنوان صنایع آلاینده و مضر برای محیط‌زیست شناخته شده‌اند.[۲] همین عوامل موجب توجه به فعالیت‌های معدنی ایمن و توسعه پایدار در این بخش شده است بنابراین در عین اینکه معادن و صنایع معدنی موجب ارتقای سطح زندگی بشر می‌شود باید الزامات صیانت از محیط‌زیست و حقوق نسل‌های آینده به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.[۳] بی‌توجهی به شاخص‌های توسعه پایدار در این بخش توسعه‌ای نامتوازن و ناپایدار را منجر خواهد داشت. تا در عین بهره‌برداری از پتانسیل‌ها و منابع معدنی و کسب درآمد از زنجیره ارزش محصولات معدنی، آسیب‌های بعضاً برگشت‌ناپذیر و جبران‌ناپذیری به زندگی اجتماعی افراد و محیط‌زیست وارد شود. تعریف توسعه پایدار براساس گزارش‌های بین‌المللی توسعه‌ای است که ضمن برطرف ساختن نیازهای امروز، امکان بهره‌مندی نسل‌های آینده به منظور تأمین نیازهایشان را نیز فراهم می‌کند[۴]. بنابراین مفهوم «توسعه پایدار» ابعاد جدیدی به مفهوم توسعه اضافه می‌کند. پذیرفتن این مفهوم به‌عنوان یک مفهوم پیشرو، امکان توسعه همه جانبه جوامع را در عین بهره‌مندی از منابع طبیعی و ظرفیت‌های انسانی فراهم می سازد و آثار سوء توسعه را بر جوامع انسانی و محیط‌زیست خنثی می‌کند.[۵] در بخش معدن و صنایع معدنی به دلیل ارتباط تنگاتنگ فعالیت‌های معدنی با جوامع محلی منابع طبیعی و محیط‌زیست و آثار انکارناپذیر این فعالیت‌ها بر زندگی بشر و طبیعت بررسی همه جانبه این موضوع و ارائه راه‌کارها و الزامات قانونی به منظور تحقق توسعه پایدار در بخش معدن و صنایع معدنی ضروری است. از سوی دیگر سناریوی صفر خالص تا سال ۲۰۵۰ توضیح می‌دهد که اگر جهان تا سال ۲۰۵۰ به انتشار خالص صفر کربن برسد، چگونه تقاضای انرژی و ترکیب انرژی باید تکامل یابد. بخش فلزات و معادن نقش مهمی در سناریوی انتشار خالص صفر و مبارزه با تغییرات آب و هوایی دارد. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی در مورد نقش مواد معدنی حیاتی در انتقال انرژی پاک، تجزیه و تحلیل جامعی از پیوندهای پیچیده بین این مواد معدنی و چشم‌انداز یک تحول امن و سریع در بخش انرژی ارائه می‌دهد.[۶] تاکنون مسئله توسعه پایدار و الزامات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی آن به‌طور جدی مورد توجه نهادهای اجرایی و قانون‌گذاری کشور قرار نگرفته است و به دلیل فقدان استراتژی جامع توسعه

1. Paul & Mahapatra (2025)
2. Muhirwa et al. (2023)
3. Machado de Lima et al. (2025)
4. de Lima et al. (2025)
5. Liu et al. (2018)
6. Ahmad et al. (2025)

پایدار معادن و صنایع معدنی چالش متعدد اجتماعی و زیست محیطی در نقاط دارای پتانسیل‌های معدنی و واحدهای تولید محصولات معدنی و فلزی ایجاد شده‌اند. سیاستگذاری چارچوب‌های محکم و مؤثر قانونی و تدوین قوانین و مقررات در این حوزه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بنابراین مسئله اصلی در پژوهش این می‌باشد که در مسیر حرکت به سمت توسعه پایدار و سناریوی تولید بدون کربن چه اقدامات و متغیرهایی جهت تدوین یک مدل آینده نگاری نیاز است. همچنین توجه به وجود ابهام و عدم قطعیت آینده در این مسیر از چه روش‌هایی علمی مبتنی بر عدم قطعیت می‌توان استفاده نمود. چه راه‌کارهایی جهت تحقق این چشم‌انداز می‌توان ارائه نمود.

اهداف این پژوهش بر پایه مبانی‌نظری و مرور ادبیات، به چند پرسش کلیدی پژوهشی منتهی می‌شود که جهت‌گیری تحقیق را روشن می‌سازد: نخست اینکه چه عوامل کلیدی در شرایط عدم قطعیت در توسعه پایدار معادن ایران در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر (NZE) تأثیرگذارند؟ و دوم اینکه کدام یک از آن‌ها در اولویت سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری قرار دارند؟ از آنجا که تحلیل در مورد آینده در فضای تردید و عدم قطعیت می‌باشد لذا در این پژوهش از روش‌های تصمیم‌گیری فازی مردد استفاده می‌شود.

۲.مبانی‌نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱.حکمرانی منابع، بوم‌شناسی و توسعه پایدار

چارچوب نظری پژوهش بر پایه رویکردهای گوناگون در حوزه توسعه پایدار و مدیریت منابع طبیعی شکل گرفته است. مفهوم توسعه پایدار نخستین بار در گزارش برانتلند[1] در سال ۱۹۸۷ مطرح شد و تأکید داشت که توسعه باید به گونه‌ای باشد که نیازهای نسل حاضر را برآورده کند بدون آنکه توان نسل‌های آینده برای تأمین نیازهایشان به خطر بیفتد. در ادامه این رویکرد، نظریه‌های مختلفی شکل گرفتند که هر یک جنبه‌ای از چگونگی تحقق توسعه پایدار را توضیح می‌دهند. نظریه حکمرانی منابع مشترک الینور استروم [2] نشان داد که استفاده پایدار از منابع طبیعی مشاع مانند آب، جنگل یا معادن الزاماً از طریق کنترل دولتی یا خصوصی‌سازی ممکن نیست. بلکه با طراحی نهادهای محلی، قواعد جمعی و مشارکت فعال ذی‌نفعان نیز می‌توان به بهره‌برداری کارآمد و پایدار دست یافت. نظریه بوم‌شناسی انسانی [3] نیز بر تعامل متقابل انسان، فناوری و محیط‌زیست تأکید می‌کند و بیان می‌دارد که فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی باید در چارچوب ظرفیت‌های اکولوژیک تعریف شوند. بی‌توجهی به محدودیت‌های زیست‌محیطی منجر به بحران‌های برگشت‌ناپذیر خواهد شد. در همین راستا، مدل سه‌گانه توسعه پایدار [4] که توسط جان الکینگتون [5] مطرح شد، توسعه پایدار را حاصل توازن میان سه بُعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌داند. او معتقد

1. Brundtland Report, 1987
2. Elinor Ostrom,1990
3. Human Ecology
4. Triple Bottom Line
5. John Elkington ,1994

است که سیاست‌گذاری‌ها و تصمیمات باید به گونه‌ای اتخاذ شوند که سودآوری اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفاظت محیط‌زیست هم‌زمان تحقق یابند. از سوی دیگر، نظریه رشد سبز[1] و اقتصاد اکولوژیک[2] نشان می‌دهد که رشد اقتصادی می‌تواند همراه با کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود بهره‌وری منابع باشد مشروط بر آنکه سیاست‌های نوآوری فناورانه، حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر و قیمت‌گذاری کربن به‌درستی اجرا شوند. این دیدگاه ارتباط مستقیمی با سناریوی انتشار خالص صفر دارد زیرا هدف آن حرکت به سوی اقتصاد کم‌کربن و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. به‌این ترتیب، ترکیب این چارچوب‌های نظری بیانگر آن است که دستیابی به توسعه پایدار در بخش‌های مختلف صنعتی و معدنی نیازمند توجه همزمان به حکمرانی مشارکتی، ظرفیت‌های بوم‌شناختی، توازن سه‌گانه میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و به‌کارگیری سیاست‌های رشد سبز است. بر همین اساس چارچوب نظری پژوهش حاضر بنیانی علمی برای شناسایی و رتبه‌بندی متغیرهای مؤثر بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر فراهم می‌سازد.

۲-۲. سناریوی انتشار خالص صفر

سناریوی (NZE) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهبردهای جهانی برای مقابله با تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر مطرح شده است. ریشه‌های این سناریو را می‌توان در بحران‌های زیست‌محیطی قرن بیستم جست‌وجو کرد، زمانی که استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی و انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای، پیامدهایی چون گرمایش جهانی، ذوب شدن یخچال‌های قطبی، و افزایش سطح دریاها را به همراه داشت. با افزایش آگاهی جهانی نسبت به این چالش‌ها، اولین تلاش‌های رسمی برای کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای در دهه ۱۹۹۰ شکل گرفت[3]. توافق‌نامه کیوتو در سال ۱۹۹۷ و پس از آن، توافق‌نامه پاریس در سال ۲۰۱۵، نقاط عطف مهمی در ایجاد تعهدات جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بودند. در توافق‌نامه پاریس، جامعه جهانی به هدف محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد، و ترجیحاً ۱٫۵ درجه سانتی‌گراد، نسبت به دوران پیش از صنعتی‌شدن، متعهد شد. در این راستا، بسیاری از کشورها، سازمان‌ها و صنایع به سمت اجرای سناریوی NZE حرکت کردند، که هدف آن حذف یا جبران کامل انتشار گازهای گلخانه‌ای تا نیمه دوم قرن ۲۱ است[4]. علت اصلی شکل‌گیری این سناریو، تهدیدات گسترده‌ای است که تغییرات اقلیمی برای اکوسیستم‌ها، اقتصاد جهانی و کیفیت زندگی انسان‌ها به همراه دارد. انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO^2)، ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌های انرژی، حمل‌ونقل و صنعت، عامل اصلی گرمایش جهانی است. تغییرات اقلیمی نه تنها به افزایش دمای زمین و ناپایداری آب‌وهوایی منجر شده، بلکه باعث بروز پدیده‌هایی مانند طوفان‌های شدید، سیل،

1. Green Growth Theory
2. Ecological Economics
3. Renné (2022)
4. Fernandez et al. (2024)

خشکسالی و آتش‌سوزی‌های گسترده نیز شده است[1]. در کنار تهدیدات زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی فشار زیادی بر اقتصاد جهانی وارد کرده است. هزینه‌های ناشی از بلایای طبیعی، از دست رفتن تنوع زیستی و کاهش بهره‌وری کشاورزی، دولت‌ها و شرکت‌ها را به این نتیجه رسانده که اقدام فوری برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است. سناریوی انتشار خالص صفر به دلیل تأثیر گسترده آن بر تمامی بخش‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی پیدا کرده است[2].

۲-۳. استراتژی‌های کلیدی برای تحقق (NZE) در صنایع معدنی

تحقق سناریوی انتشار خالص صفر در صنایع معدنی نیازمند استراتژی‌های جامع و هماهنگ است که تمامی جنبه‌های فعالیت‌های معدنی، از استخراج تا فرآوری و زنجیره تأمین را در بر گیرد. این استراتژی‌ها باید کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهره‌وری انرژی، توسعه فناوری‌های سبز و تعامل موثر با جوامع محلی را هدف قرار دهند. در ادامه، استراتژی‌های کلیدی برای دستیابی به NZE در صنایع معدنی به تفصیل توضیح داده شده است.[3] یکی از گام‌های اساسی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر است. صنایع معدنی می‌توانند با استفاده از برق تولید شده از منابع خورشیدی، بادی و هیدروژنی، مصرف سوخت‌های فسیلی را به حداقل برسانند. نصب پنل‌های خورشیدی در سایت‌های معدنی یا بهره‌گیری از نیروگاه‌های بادی می‌تواند نیاز انرژی عملیات‌های معدنی را تأمین کند. تجهیزات معدنی سنتی معمولاً از سوخت‌های فسیلی مانند دیزل استفاده می‌کنند که منجر به انتشار بالای دی‌اکسید کربن می‌شود. جایگزینی این تجهیزات با ماشین‌آلات الکتریکی می‌تواند انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. شرکت‌های معدنی می‌توانند با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های الکتریکی و هیبریدی، این انتقال را تسریع کنند. بهینه‌سازی مصرف انرژی یکی از مهم‌ترین استراتژی‌ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این امر می‌تواند با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند حسگرهای هوشمند، اتوماسیون و تحلیل داده‌ها انجام شود. بهبود بهره‌وری انرژی در فرآیندهای استخراج و فرآوری مواد معدنی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و پایداری عملیاتی را افزایش دهد. فناوری‌های جذب و ذخیره کربن(CCS) به صنایع معدنی اجازه می‌دهند که دی‌اکسید کربن تولیدشده در فرآیندهای صنعتی را جذب کرده و به‌صورت ایمن در زیرزمین ذخیره کنند. ایجاد فرصت‌های شغلی پایدار، آموزش نیروی کار محلی و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های منطقه‌ای می‌تواند به کاهش اثرات اجتماعی و بهبود تصویر عمومی صنایع معدنی کمک کند. اجرای موفقیت‌آمیز NZE در صنایع معدنی نیازمند حمایت دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی است. این حمایت می‌تواند شامل یارانه‌ها برای انرژی‌های تجدیدپذیر، معافیت‌های مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز، و وضع مقررات سخت‌گیرانه‌تر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد. استراتژی‌های کلیدی برای تحقق NZE در صنایع معدنی، بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش بهره‌وری انرژی و تعامل پایدار

1. Ampah et al. (2024)
2. Sindhwani et al. (2022)
3. Shamsi & Zakerinejad (2025)

با جوامع و محیط‌زیست تمرکز دارند. این اقدامات نه تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند، بلکه موقعیت صنایع معدنی را در زنجیره ارزش جهانی تقویت کرده و جایگاه آن‌ها را در اقتصاد سبز آینده تضمین می‌کنند. همکاری گسترده میان دولت‌ها، شرکت‌ها و جوامع محلی برای اجرای این استراتژی‌ها ضروری است.

۲-۴.پیشینه پژوهش

در حوزه توسعه پایدار معادن، لی و همکاران[1] (۲۰۲۲) به برنامه‌ریزی یکپارچه استخراج زیرزمینی و بازسازی محیطی با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش کارایی اشاره کردند. مویله و بیشوگه[2](۲۰۲۴) به تحلیل نقش صنعت معدن در تحقق اهداف توسعه پایدار در قاره آفریقا پرداختند. دونگ و همکاران[3] (۲۰۲۴) نیز ردپای منابع معدنی در بستر تجارت الکترونیک را تحلیل کرده و محرک‌های توسعه پایدار در این حوزه را معرفی نمودند. بانینلا و همکاران[4](۲۰۲۵) پیشرفت و فرصت‌های بهبود نقش صنعت معدن در تحقق اهداف SDGs را مورد ارزیابی قرار دادند. میرزهی و افراپولی[5] (۲۰۲۴) با تلفیق هزینه‌های زیست‌محیطی و قیمت‌گذاری کربن در طراحی معادن روباز، الگویی نوین برای توسعه معدن‌کاری سبز ارائه دادند. شمسی و ذاکرین‌نژاد[6](۲۰۲۵) با بهره‌گیری از مدل فازی-لیکرت، سیاست‌های بازیافت پسماندهای معدنی در بستر صنعت ۴٫۰ را توسعه دادند. موهیرا و همکاران[7](۲۰۲۳) نیز چالش‌های موجود در هم‌راستایی منافع صنایع بزرگ معدنی با توسعه اجتماعی جوامع روستایی را در قاره آفریقا بررسی کردند.

در محور اقتصاد چرخشی و پایداری در صنعت معدن، دی لیما و همکاران[8] (۲۰۲۵) در دو مقاله به ضرورت مدیریت پایدار منابع آبی در معادن پرداخته و راه‌کارهایی برای بازچرخانی و کاهش مصرف آب ارائه دادند. هیرونز[9] (۲۰۲۰) خطرات نادیده گرفتن مسائل اجتماعی و محیطی در معادن کوچک‌مقیاس تحت سیاست‌های کلان توسعه پایدار را هشدار داد. بربروغلو و همکاران[10] (۲۰۲۴) چالش‌های پایداری در اقتصادهای نوظهور معدنی را مورد تحلیل قرار داده و بر لزوم سیاست‌گذاری مؤثر تأکید کردند. کاترینا-تئاتینو و مارکوئینا-آراخو[11] (۲۰۲۵) با مرور نظام‌مند و بیبلیومتریک، ادبیات اقتصاد چرخشی در صنعت

1. Li et al. (2022)
2. Mvile & Bishoge (2024)
3. Dong et al. (2024)
4. Baninla et al. (2025)
5. Mirzehi & Afrapoli (2024)
6. Shamsi & Zakerinejad (2025)
7. Muhirwa et al. (2023)
8. de Lima et al. (2025)
9. Hirons (2020)
10. Berberoglu et al. (2024)
11. Cotrina-Teatino & Marquina-Araujo (2025)

معدن را طبقه‌بندی و روندهای پژوهشی را مشخص کردند. در محور فناوری، نوآوری و دیجیتالی‌سازی در معادن، ابوسو و فریمپونگ[1](۲۰۲۵) به نقش پررنگ اتوماسیون و رباتیک در آینده معدن‌کاری پرداختند و توسعه معدن دیجیتال را پیش‌شرط بقا دانستند. رئوفی و همکاران[2](۲۰۲۵) با تحلیل وضعیت برنامه‌ریزی تولید تجمیعی در شرایط عدم قطعیت، اولویت توجه به ابعاد پایداری و ریسک را نشان دادند. چاترجی و همکاران[3](۲۰۲۵) نیز نقش فناوری‌های نوین از جمله اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و بلاک‌چین را در توانمندسازی معادن پایدار بررسی کرد در محور سنجش پایداری، ایمنی و شاخص‌های عملکرد در معادن، فرناندز-هرناندز و همکاران[4](۲۰۲۵) با طراحی شاخص جامع پایداری برای شرکت‌های معدنی، معیارهای مرتبط با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل را یکپارچه‌سازی نمودند. با توجه به انجام بررسی‌های گسترده در پایگاه‌های اطلاعات علمی داخلی، مشخص شد که پژوهش مستقلی که به‌طور هم‌زمان به موضوع آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر بپردازد، تاکنون در ادبیات علمی کشور انجام نشده است. همچنین اگرچه برخی مطالعات داخلی به موضوع انرژی‌های پاک، پایداری زیست‌محیطی یا آینده‌نگاری در حوزه‌های عمومی مدیریت انرژی اشاره کرده‌اند، اما ترکیب این مؤلفه‌ها در بستر سیاست‌گذاری معدن و آینده‌نگاری توسعه پایدار در فضای سناریویی همچنان مغفول مانده است. از این رو، با توجه به نبود پیشینه منسجم داخلی در این حوزه، تمرکز اصلی این پژوهش بر بهره‌گیری از مطالعات بین‌المللی و ادبیات جهانی در حوزه توسعه پایدار معادن و سناریوی NZE قرار گرفته است تا چارچوبی نوآورانه و متناسب با شرایط ایران ارائه گردد. تحقیقات بررسی‌شده طیف گسترده‌ای از موضوعات مرتبط با آینده‌نگاری، مدیریت توسعه پایدار و انرژی پاک را پوشش داده‌اند. این موضوعات شامل تحلیل تقاضای مواد معدنی برای انرژی پاک، مدل‌سازی نیازهای انرژی‌های تجدیدپذیر، و اثرات اجتماعی فناوری‌های نوین انرژی است.

جدول ۱-پژوهش‌های مرتبط با آینده‌نگاری، مدیریت توسعه پایدار در حوزه معدن

ردیف	نویسنده	حوزه موضوعی	روش تحقیق	کشور / منطقه	هدف مقاله
۱	Li et al.(۲۰۲۲)	معدن و توسعه پایدار	مدل‌سازی یکپارچه	چین	برنامه‌ریزی یکپارچه استخراج و بازسازی معدن
۲	Mvile & Bishoge (۲۰۲۴)	معدن و SDGs	تحلیل سیاستی	آفریقا	بررسی ارتباط معادن و اهداف توسعه پایدار در آفریقا

1. Obosu & Frimpong (2025)
2. Raoufi et al. (2025)
3. Chatterjee et al. (2025)
4. Fernández-Hernández et al. (2025)

ردیف	نویسنده	حوزه موضوعی	روش تحقیق	کشور / منطقه	هدف مقاله
۳	Dong et al. (۲۰۲۴)	معدن و تجارت الکترونیک	تحلیل علّی	چین	شناسایی محرک‌های توسعه معدن پایدار در تجارت دیجیتال
۴	Cotrina-Teatino & Marquina-Araujo(۲۰۲۵)	اقتصاد چرخشی در معدن	مرور کتاب‌سنجی	جهانی	تحلیل روندهای پژوهشی اقتصاد چرخشی در معدن
۵	Berberoglu et al. (۲۰۲۴)	معدن پایدار	ارزیابی چالش‌ها	ترکیه	شناسایی چالش‌های پایداری در معادن کشورهای در حال توسعه
۶	Hirons(۲۰۲۰)	معدن کوچک‌مقیاس	تحلیل انتقادی	جهانی	نقد اهداف SDG و تأثیر آن بر معدن‌کاری کوچک‌مقیاس
۷	Machado de Lima et al. (۲۰۲۵)	مدیریت آب در معدن	تحلیل موردی	برزیل	مدیریت پایدار آب در صنایع معدنی
۸	de Lima et al. (۲۰۲۵)	مدیریت آب در معدن	تحلیل موردی	برزیل	مدیریت پایدار آب در صنایع معدنی
۹	Baninla et al. (۲۰۲۵)	معدن و SDGs	تحلیل عملکرد	چین	ارزیابی پیشرفت معادن در دستیابی به SDGs
۱۰	Mirzehi & Afrapoli(۲۰۲۴)	معدن‌کاری سبز	چارچوب نوآورانه	ایران	ادغام قیمت‌گذاری کربن در برنامه‌ریزی معادن روباز
۱۱	Shamsi & Zakerinejad(۲۰۲۵)	بازیافت پسماند معدن	مدل‌سازی سیاستی فازی	ایران	بازیافت پسماند معدنی با مقیاس فازی در عصر صنعت ۴
۱۲	Obosu & Frimpong(۲۰۲۵)	اتوماسیون در معدن	مروری فناورانه	جهانی	پیشرفت‌های اتوماسیون و رباتیک در صنعت معدن آینده
۱۳	Raoufi et al. (۲۰۲۵)	برنامه‌ریزی تولید کل	مرور تحلیلی	ایران	چالش‌ها و فرصت‌های برنامه‌ریزی تولید در شرایط عدم قطعیت
۱۴	Chatterjee et al. (۲۰۲۵)	دیجیتالی‌سازی معدن	تحلیل مفهومی	جهانی	تکنولوژی‌های دیجیتال برای پایداری معادن

ردیف	نویسنده	حوزه موضوعی	روش تحقیق	کشور / منطقه	هدف مقاله
۱۵	Fernendez-Hernendez et al. (۲۰۲۵)	شاخص پایداری	توسعه مدل	اسپانیا	تدوین شاخص جامع پایداری برای شرکت‌های معدنی
۱۶	Paul & Mahapatra(۲۰۲۵)	زنجیره تأمین معدن	فازی AHP-DEMATEL	هند	تحلیل عوامل پایداری در زنجیره تأمین معدن
۱۷	Guo & Yang(۲۰۲۳)	ایمنی معدن	مرور پژوهشی	چین	تحلیل روندهای تحقیقاتی ایمنی معدن در چین
۱۸	Xiao et al. (۲۰۲۴)	آموزش سبز و معدن	تحلیل مفهومی	اقتصادهای در حال توسعه	ادغام آموزش زیست‌محیطی با معدن مسئولانه
۱۹	Muhirwa et al. (۲۰۲۳)	صنایع استخراجی بزرگ	تحلیل موردی	آفریقا	رابطه توسعه روستایی و صنایع بزرگ معدنی

با وجود این، برخی خلاهای پژوهشی قابل‌توجه در این حوزه وجود دارد. یکی از مهم‌ترین خلاها، تمرکز محدود بر نقش معادن و تأثیر آن‌ها در سناریوی انتشار خالص صفر است. اگرچه برخی مقالات به نیازهای معدنی برای فناوری‌های پاک اشاره داشته‌اند، بررسی عمیق و جامع در این زمینه مشاهده نمی‌شود. همچنین، بسیاری از مقالات تنها بر یک یا دو بعد از توسعه پایدار، مانند اقتصادی یا زیست‌محیطی، تمرکز کرده‌اند و تحقیقات چندبعدی که به‌طور هم‌زمان ابعاد اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی را در نظر بگیرند، بسیار کم هستند. بر اساس چارچوب‌های نظری مطرح‌شده شامل نظریه حکمرانی منابع مشترک الینور استروم، نظریه‌های بوم‌شناسی انسانی، مدل سه‌گانه توسعه پایدار و رویکرد رشد سبز و توسعه پایدار در بخش معدن متأثر از چهار بعد کلیدی اقتصادی، اجتماعی، فناورانه و زیست‌محیطی است. این چارچوب‌ها تبیین می‌کنند که چرا و چگونه این ابعاد بر آینده‌نگاری توسعه پایدار اثرگذارند و ضرورت توجه به تفاوت وزن و اهمیت آن‌ها را نشان می‌دهند. بر مبنای این مبانی‌نظری، پژوهش حاضر فرض می‌گیرد که متغیرهای منتخب در هر بعد دارای تأثیر معنادار و متفاوتی بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر هستند. به‌این ترتیب، روش پژوهش به‌عنوان ابزاری عملیاتی برای آزمون چارچوب نظری و استخراج وزن نهایی عوامل اثرگذار مورد استفاده قرار گرفته است.

۳. روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از منظر هدف کاربردی از منظر اطلاعات مورد نیاز، اکتشافی و ترکیبی از داده‌های کیفی و کمی است. در مراحل شناسایی متغیرها و تعیین روابط بین آن‌ها، داده‌های کیفی از طریق نظر خبرگان جمع‌آوری شده و در مراحل بعد با استفاده از روش‌های تحلیل فازی، به داده‌های کمی تبدیل شده‌اند و از حیث روش اجرای پژوهش مبتنی بر ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی است.

برای دستیابی به داده‌های موردنیاز و پوشش ابعاد مختلف موضوع پژوهش، از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی به‌صورت ترکیبی استفاده شده است. در این پژوهش از ابزارهای ترکیبی برای گردآوری داده استفاده شده است که متناسب با ماهیت کیفی و کمی هر مرحله از پژوهش طراحی شده‌اند.

جدول ۲-ابزارهای گردآوری داده‌ها در مراحل مختلف پژوهش

ابزار گردآوری داده‌ها	مرحله پژوهش
پرسشنامه دلفی فازی و جمع‌بندی نظرات خبرگان	شناسایی متغیرهای کلیدی و غربالگری متغیرها
پرسشنامه مقایسه زوجی فازی مردد توسط خبرگان	(HFAHP) وزن‌دهی و رتبه‌بندی عوامل

در این پژوهش جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت هدفمند و صرفاً از طریق نظرات خبرگان انجام شده است. نمونه‌گیری در این پژوهش به‌صورت هدفمند[1] و بر مبنای معیارهای تخصص و تجربه انجام شد. خبرگان شامل مدیران و کارشناسان ارشد صنعت معدن از شرکت ایمیدور و اساتید دانشگاهی بودند که دارای مدرک دکتری و بیش از ۲۰ سال تجربه حرفه‌ای در حوزه‌های محیط‌زیست، مهندسی معدن، مدیریت منابع طبیعی، آینده‌پژوهی بودند. همچنین میزان علاقه‌مندی به همکاری در این پژوهش هم یکی از معیارها بود. در این مطالعه، ۳۰ نفر از خبرگان به‌صورت هدفمند انتخاب شده‌اند.

۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱. شناسایی عوامل کلیدی مؤثر در آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن

با هدف طراحی چارچوبی مفهومی برای آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن در راستای سناریوی (NZE)، تلاش شد تا متغیرهای کلیدی و اولیه مؤثر بر آینده این صنعت شناسایی شوند. به این منظور، بر مبنای مرور ادبیات نظری و استفاده از منابع علمی به‌روز، چهار عامل کلان مؤثر شامل عوامل اقتصادی، اجتماعی-فرهنگی، فناورانه، و زیست‌محیطی و اقلیمی انتخاب شدند. برای هر عامل، هفت متغیر مهم و تأثیرگذار استخراج گردید تا به‌عنوان ورودی اولیه برای غربالگری با روش دلفی فازی مورد استفاده قرار گیرند. در جدول (۳)، ۲۸ متغیر اولیه به‌صورت دسته‌بندی‌شده بر اساس عامل کلان، همراه با منابع اصلی آن‌ها ارائه شده است:

1. Purposeful Sampling

جدول ۳-لیست متغیرهای اولیه مؤثر بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن با محوریت NZE

عامل کلیدی	متغیر شناسایی‌شده	منبع
اقتصادی	هزینه سرمایه‌گذاری، نرخ بازگشت سرمایه، نوسانات بازار صادرات، قیمت جهانی فلزات، مشوق‌های مالیاتی، سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، هزینه انتقال فناوری	Elavarasan et al. (۲۰۲۴), Renné (۲۰۲۲), Fernandez et al. (۲۰۲۴), Sumrit (۲۰۲۵)
اجتماعی-فرهنگی	مشارکت جوامع محلی، مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، آموزش زیست‌محیطی، پذیرش اجتماعی فناوری، سطح رفاه اجتماعی، فرهنگ ایمنی، شاخص کیفیت زندگی	Liang et al. (۲۰۲۳), Siregar (۲۰۲۴), Oshiro & Fujimori (۲۰۲۴)
فناوری	سطح نوآوری فناورانه، دیجیتال‌سازی فرآیندها، انرژی خورشیدی، هوش مصنوعی در استخراج، زیرساخت‌های فناورانه، فناوری ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	Yadav et al. (۲۰۲۳), Makhloufi & Louafi (۲۰۲۴), Sher (۲۰۲۴)
زیست‌محیطی	انتشار گازهای گلخانه‌ای، شاخص شدت انرژی، ارزیابی چرخه حیات، میزان مصرف آب، سلامت اکوسیستم، بازیافت پسماند، تاب‌آوری اقلیمی	Fernandez et al. (۲۰۲۴), Sumrit (۲۰۲۵)

به‌منظور انتخاب متغیرهای نهایی مؤثر بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن، از تکنیک دلفی فازی در سه راند استفاده شده است. این روش از ابزار منطق فازی برای تبدیل داده‌های کیفی خبرگان به مقادیر کمی بهره می‌گیرد تا نظرات در شرایط عدم قطعیت و ذهنی بودن با دقت بیشتری ترکیب شوند. در این پژوهش، از تابع فازی مثلثی برای ارزیابی زبانی استفاده شده و سپس با استفاده از روش مرکز ثقل (Centroid Method) عملیات دی‌فازی انجام شده است. این روش رایج‌ترین و معتبرترین روش دی‌فازی در مطالعات آینده‌نگاری محسوب می‌شود.

- **راند اول دلفی فازی: تجمیع نظرات خبرگان**

در مرحله نخست، پرسشنامه‌ای در اختیار ۳۰ نفر از خبرگان قرار گرفت. این خبرگان بر اساس مقیاس فازی مثلثی، میزان اهمیت ۲۸ متغیر اولیه را ارزیابی کردند. در این پژوهش از روش مقدار میانگین، استفاده می‌شود. در این روش از تفکیک‌های چپ و راست، که علاوه بر ساده بودن ار همه اطلاعات تابع عضویت نیز استفاده می‌شود، برای فازی‌زدایی استفاده می‌شود. نتایج اولیه به صورت مثلث فازی و سپس با روش مرکز ثقل دی‌فازی گردید و در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ۴-تجمیع نظرات خبرگان در راند اول دلفی فازی

کد متغیر	نام متغیر	عدد فازی مثلثی (L, M, U)	مقدار دی‌فازی‌شده
E۱	هزینه سرمایه‌گذاری	(۱٫۰ ,۰٫۹ ,۰٫۷)	۰٫۸۶۶
E۲	نرخ بازگشت سرمایه	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰

کد متغیر	نام متغیر	عدد فازی مثلثی (L, M, U)	مقدار دی‌فازی‌شده
E۳	نوسانات بازار صادرات	(۰٫۸ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۶۰۰
E۴	قیمت جهانی فلزات	(۰٫۷ ,۰٫۵ ,۰٫۳)	۰٫۵۰۰
E۵	مشوق‌های مالیاتی	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
E۶	سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰
E۷	هزینه انتقال فناوری	(۰٫۶ ,۰٫۴ ,۰٫۳)	۰٫۴۳۳
S۱	مشارکت جوامع محلی	(۰٫۸ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۶۰۰
S۲	مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها	(۰٫۸ ,۰٫۶ ,۰٫۵)	۰٫۶۳۳
S۳	آموزش زیست‌محیطی	(۰٫۷ ,۰٫۵ ,۰٫۳)	۰٫۵۰۰
S۴	پذیرش اجتماعی فناوری	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
S۵	سطح رفاه اجتماعی	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰
S۶	فرهنگ ایمنی	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
S۷	کیفیت زندگی	(۰٫۷ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۵۶۶
T۱	نوآوری فناورانه	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰
T۲	دیجیتال‌سازی فرآیندها	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
T۳	استفاده از انرژی خورشیدی	(۰٫۸ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۶۰۰
T۴	هوش مصنوعی در استخراج	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰
T۵	زیرساخت‌های فناورانه	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
T۶	ذخیره‌سازی انرژی	(۰٫۷ ,۰٫۵ ,۰٫۳)	۰٫۵۰۰
T۷	سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	(۰٫۷ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۵۶۶
EN۱	انتشار گازهای گلخانه‌ای	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
EN۲	شدت انرژی	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰
EN۳	ارزیابی چرخه حیات	(۰٫۷ ,۰٫۵ ,۰٫۳)	۰٫۵۰۰
EN۴	میزان مصرف آب	(۰٫۸ ,۰٫۶ ,۰٫۵)	۰٫۶۳۳
EN۵	سلامت اکوسیستم	(۰٫۷ ,۰٫۶ ,۰٫۴)	۰٫۵۶۶
EN۶	بازیافت پسماند	(۰٫۹ ,۰٫۷ ,۰٫۵)	۰٫۷۰۰
EN۷	تاب‌آوری اقلیمی	(۱٫۰ ,۰٫۸ ,۰٫۶)	۰٫۸۰۰

- **راند دوم دلفی فازی: همگرایی پاسخ‌ها**

در این مرحله از اجرای روش دلفی فازی، متغیرهایی که در راند اول دارای مقدار دی‌فازی‌شده کمتر از ۰.۶ بودند، مجدداً مورد ارزیابی خبرگان قرار گرفتند تا میزان اجماع و همگرایی نظرات افزایش یابد. هدف اصلی در راند دوم، سنجش ثبات و پایداری ارزیابی‌ها و حصول اطمینان از اعتبار متغیرها برای ورود به مرحله نهایی غربالگری است.

جدول ۵- متغیرهای بررسی‌شده در راند دوم دلفی فازی

تغییر	مقدار دی‌فازی راند اول	مقدار دی‌فازی راند دوم	عدد فازی مثلثی جدید (L, M, U)	نام متغیر	کد متغیر
↑	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	(۰٫۴, ۰٫۶, ۰٫۷)	قیمت جهانی فلزات	E۴
↑	۰٫۴۳۳	۰٫۵۶۶	(۰٫۴, ۰٫۶, ۰٫۷)	هزینه انتقال فناوری	E۷
↑	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	(۰٫۴, ۰٫۶, ۰٫۷)	آموزش زیست‌محیطی	S۳
↑	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	(۰٫۴, ۰٫۶, ۰٫۷)	ذخیره‌سازی انرژی	T۶
↑	۰٫۵۶۶	۰٫۶۳۳	(۰٫۵, ۰٫۶, ۰٫۸)	سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	T۷
↑	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	(۰٫۴, ۰٫۶, ۰٫۷)	ارزیابی چرخه حیات	EN۳
↑	۰٫۵۶۶	۰٫۶۳۳	(۰٫۵, ۰٫۶, ۰٫۸)	سلامت اکوسیستم	EN۵

- **راند سوم دلفی فازی: تصمیم‌گیری**

در نتیجه راند دوم، مقدار دی‌فازی اکثر متغیرها افزایش یافت و به آستانه پذیرش (۰.۶) نزدیک یا از آن عبور کرد. جدول «مقایسه سه راند دلفی فازی» شامل امتیازات دی‌فازی‌شده برای متغیرهایی است که در سه راند ارزیابی شده‌اند. بر اساس نتایج این سه راند و دستیابی به اجماع نهایی، متغیرهایی با امتیاز نهایی برابر یا بیشتر از ۰.۶ در راند سوم به‌عنوان متغیرهای نهایی انتخاب می‌شوند. بر این اساس، برای هر یک از چهار عامل کلان (اقتصادی، اجتماعی، فناوری و زیست‌محیطی) تعداد ۳ متغیر انتخاب شده است و در مجموع ۱۲ متغیر نهایی به‌دست آمده‌اند که در مراحل بعدی تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.جدول مربوط به مقایسه سه راند دلفی فازی ارائه می‌شود.

جدول ۶- مقایسه مقادیر دی‌فازی در سه راند دلفی فازی

کد متغیر	نام متغیر	راند اول	راند دوم	راند سوم
E۴	قیمت جهانی فلزات	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	۰٫۶۰۰
E۷	هزینه انتقال فناوری	۰٫۴۳۳	۰٫۵۶۶	۰٫۶۰۰
S۳	آموزش زیست‌محیطی	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	۰٫۶۰۰

کد متغیر	نام متغیر	راند اول	راند دوم	راند سوم
T۶	ذخیره‌سازی انرژی	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	۰٫۶۰۰
T۷	سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	۰٫۵۶۶	۰٫۶۳۳	۰٫۶۶۶
EN۳	ارزیابی چرخه حیات	۰٫۵۰۰	۰٫۵۶۶	۰٫۶۰۰
EN۵	سلامت اکوسیستم	۰٫۵۶۶	۰٫۶۳۳	۰٫۶۶۶

با در نظر گرفتن کلیه ارزیابی‌ها، در نهایت ۱۲ متغیر برتر با امتیاز دی‌فازی بالاتر یا مساوی ۰٫۶ به‌عنوان متغیرهای نهایی انتخاب شدند(شامل متغیرهای تأییدشده در راند اول به‌علاوه متغیرهای تأییدشده پس از راند سوم). در ادامه، جدول نهایی متغیر منتخب بر اساس نتایج سه راند دلفی فازی و به تفکیک چهار عامل کلان (اقتصادی، اجتماعی، فناوری و زیست‌محیطی) ارائه می‌شود.

جدول ۷- متغیرهای نهایی بر اساس خروجی دلفی

عامل کلان	متغیرهای نهایی
اقتصادی	هزینه سرمایه‌گذاری (۰٫۸۶۶) سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن (۰٫۸۰۰) قیمت جهانی فلزات (۰٫۶۰۰)
اجتماعی	سطح رفاه اجتماعی (۰٫۸۰۰) پذیرش اجتماعی فناوری (۰٫۷۰۰) آموزش زیست‌محیطی (۰٫۶۰۰)
فناوری	نوآوری فناورانه (۰٫۸۰۰) آموزش زیست‌محیطی (۰٫۶۰۰) سیستم‌های پایش هوشمند محیطی (۰٫۶۶۶)
زیست‌محیطی	شدت انرژی(۰٫۸۰۰) بازیافت پسماند (۰٫۷۰۰) سلامت اکوسیستم (۰٫۶۶۶)

بر اساس نتایج حاصل از روش دلفی فازی، در هر یک از چهار عامل کلان توسعه پایدار، سه متغیر به‌عنوان مؤلفه‌های نهایی اثرگذار بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن ایران در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر(NZE) شناسایی شده‌اند. در بعد اقتصادی، متغیر «هزینه سرمایه‌گذاری» با وزن ۰٫۸۶۶، در بعد اجتماعی، متغیر «سطح رفاه اجتماعی» با وزن ۰٫۸۰۰، در عامل فناورانه، متغیر «نوآوری فناورانه» با وزن ۰٫۸۰۰ در نهایت، در بعد زیست‌محیطی و اقلیمی، متغیر «شدت انرژی» با وزن ۰٫۸۰۰، شناسایی شده‌اند.

در مجموع، یافته‌های این جدول بیانگر آن است که هر چهار بعد توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی) دارای یک متغیر شاخص با وزن بالا (۰٫۸۰۰ یا بالاتر) هستند. این موضوع نشان

می‌دهد که برای سیاست‌گذاری مؤثر در جهت تحقق سناریوی NZE در صنعت معدن، هیچ‌یک از این ابعاد را نمی‌توان نادیده گرفت. بلکه سیاست‌گذار باید به‌طور هم‌زمان به موضوع تأمین مالی، ارتقاء رفاه اجتماعی، توسعه فناوری‌های سبز و بهبود بهره‌وری زیست‌محیطی توجه داشته باشد. این نتایج تأکید می‌کنند که توسعه پایدار در بخش معدن، مفهومی چندبعدی است و تحقق آن مستلزم یک رویکرد تلفیقی و هماهنگ میان سیاست‌های صنعتی، اجتماعی، فناورانه و زیست‌محیطی خواهد بود.

۴-۲. رتبه‌بندی عوامل با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مردد

در این پژوهش برای تعیین وزن معیارها با استفاده از تکنیک تحلیل سلسه‌مراتبی فازی مردد (HFAHP) استفاده شده است. تکنیک تحلیل سلسه‌مراتبی فازی مردد یک تکنیک رتبه‌بندی است و رتبه‌بندی در این تکنیک براساس مقایسه‌های زوجی صورت می‌گیرد. در حالت تردید، برای هر مقایسه زوجی ممکن است چند عبارت زبانی متفاوت (مثلاً بین "اهمیت نسبتاً بالا" و "اهمیت بسیار زیاد") از سوی خبرگان داده شود. در این شرایط، برای ادغام این قضاوت‌ها، میانگین عددی عناصر فازی مثلثی در هر سطح (L, M, U) برای تمام نظرات گرفته می‌شود. قوانین پایه ای در روش حل AHP فازی مردد شامل موارد زیر می‌باشد:

در جدول (۸) متغیرهای کلامی به اعداد فازی با استفاده از مقیاس داده شده مشاهده می‌شود.

جدول ۸-تعریف متغیرهای کلامی

متغیر زبانی	کد	عدد فازی مثلثی (L, M, U)
اهمیت فوق‌العاده بالا	AHI	(۹ ,۹ ,۷)
اهمیت بسیار زیاد	VHI	(۹ ,۷ ,۵)
اهمیت نسبتاً بالا	ESHI	(۷ ,۵ ,۳)
کم اهمیت	WHI	(۵ ,۳ ,۱)
اهمیت تقریباً یکسان	EHI	(۳ ,۱ ,۱)
دقیقاً برابر	EE	(۱ ,۱ ,۱)
کم اهمیت	ELI	(۱ ,۱ ,۰٫۳۳)
اهمیت ضعیف	WLI	(۱ ,۰٫۳۳ ,۰٫۲)
اهمیت نسبتاً کم	ESLI	(۰٫۳۳ ,۰٫۲ ,۰٫۱۴)
اهمیت بسیار کم	VLI	(۰٫۲ ,۰٫۱۴ ,۰٫۱۱)
کاملاً کم اهمیت	ALI	(۰٫۱۴ ,۰٫۱۱ ,۰٫۱۱)

همانگونه که در جدول (۹) مشاهده می‌شود خبرگان در مقایسات زوجی معیارها دارای ابهام در پاسخ می‌باشند. به‌عنوان مثال خبرگان در مقایسات زوجی بین اقتصادی، اجتماعی از نظرات با هم یکسان نمی‌باشند و دو نظر متفاوت ارائه شده است. بنابراین برای همگان‌سازی نظرات محدوده نظرات را در نظر می‌گیریم. هر سلول بیانگر ادغام نظر چند خبره در مقایسه دو عامل است.

جدول ۹- ادغام نظرات در حالت تردید مقایسه عوامل کلان توسعه پایدار در آینده‌نگاری معادن

عوامل/ابعاد	اقتصادی	اجتماعی	فناوری	زیست‌محیطی
اقتصادی	EE	EHI, WHI	ESHI, WHI	AHI, VHI
اجتماعی	WHI, ELI	EE	ESHI, VHI	AHI, EHI
فناوری	WHI, ESLI	WHI, ESHI	EE	VHI, AHI
زیست‌محیطی	VHI, AHI	WHI, ESHI	EHI, AHI	EE

برای محاسبه مجموعه فازی مثلثی مرتبط با اعداد فازی مردد استفاده می‌شود. در جدول زیر مجموعه‌های فازی مثلثی به‌دست آمده از اعداد جدول فوق را ارائه می‌دهد.

جدول ۱۰- مقادیر مجموعه فازی مثلثی مردد- عوامل کلان توسعه پایدار در معادن

عوامل/ابعاد	اقتصادی	اجتماعی	فناوری	زیست‌محیطی
اقتصادی	(۱٫۰۰ ,۱٫۰۰ ,۱٫۰۰)	(۰٫۷۵ ,۰٫۶۰ ,۰٫۴۵)	(۰٫۶۰ ,۰٫۴۵ ,۰٫۳۰)	(۰٫۹۵ ,۰٫۸۵ ,۰٫۷۰)
اجتماعی	(۲٫۲۲ ,۱٫۶۷ ,۱٫۳۳)	(۱٫۰۰ ,۱٫۰۰ ,۱٫۰۰)	(۰٫۷۵ ,۰٫۶۰ ,۰٫۴۵)	(۰٫۹۰ ,۰٫۷۵ ,۰٫۶۰)
فناوری	(۳٫۳۳ ,۲٫۲۲ ,۱٫۶۷)	(۲٫۲۲ ,۱٫۶۷ ,۱٫۳۳)	(۱٫۰۰ ,۱٫۰۰ ,۱٫۰۰)	(۰٫۷۵ ,۰٫۶۰ ,۰٫۴۵)
زیست‌محیطی	(۱٫۴۳ ,۱٫۱۸ ,۱٫۰۵)	(۱٫۶۷ ,۱٫۳۳ ,۱٫۱۱)	(۲٫۲۲ ,۱٫۶۷ ,۱٫۳۳)	(۱٫۰۰ ,۱٫۰۰ ,۱٫۰۰)

در گام بعدی وزن معیارها را بر اساس مقادیر میانگین هندسی بر بالاترین عدد[عدد ۹] در مقیاس فازی مردد محاسبه می کنیم. مرحله بعدی فازی زدایی می‌باشد. در این پژوهش از روش مقدار میانگین، استفاده می‌شود.

جدول ۱۱- وزن معیارهای توسعه پایدار با رویکرد فازی مردد

معیار توسعه پایدار	وزن فازی (L, M, U)	وزن دی‌فازی‌شده	وزن نهایی نرمال‌شده
اقتصادی	(۰٫۳۲۰ ,۰٫۲۰۰ ,۰٫۱۲۰)	۰٫۲۱۰	۰٫۲۵۸
اجتماعی	(۰٫۲۹۰ ,۰٫۱۸۰ ,۰٫۱۰۰)	۰٫۱۸۸	۰٫۲۳۱
فناوری	(۰٫۲۷۰ ,۰٫۱۶۰ ,۰٫۰۹۰)	۰٫۱۷۰	۰٫۲۰۹
زیست‌محیطی و اقلیمی	(۰٫۳۵۰ ,۰٫۲۲۰ ,۰٫۱۳۰)	۰٫۲۳۰	۰٫۳۰۲
جمع کل	-	۰٫۷۹۸	۱٫۰۰۰

وزن نرمال‌شده از طریق تقسیم مقدار دی‌فازی هر معیار بر جمع کل دی‌فازی‌ها (۰.۷۹۸) به دست آمده

است. بالاترین وزن متعلق به معیار «زیست‌محیطی و اقلیمی» است که اولویت بیشتری در تحلیل‌های بعدی دارد. در این مرحله، برای بررسی اعتبار ساختار مقایسه‌های زوجی، نرخ سازگاری (Consistency Ratio) محاسبه گردید. با استفاده از روش استاندارد تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مردد و پس از تعیین ماتریس مقایسه فازی، شاخص سازگاری (CI) و شاخص تصادفی (RI) نیز استخراج شده و در نهایت نرخ سازگاری (C.R) برابر با ۰٫۰۶ به‌دست آمد. از آنجا که این مقدار کمتر از آستانه قابل قبول ۰٫۱ است، می‌توان نتیجه گرفت که قضاوت‌های خبرگان از ثبات منطقی لازم برخوردار بوده و ماتریس مقایسه دارای سازگاری کافی می‌باشد. بنابراین این ماتریس مورد تأیید است و می‌تواند به‌عنوان مبنای معتبر برای تصمیم‌گیری باشد. به‌منظور ارزیابی استحکام روش‌شناختی و بررسی پایداری نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مردد (HFAHP)، تحلیل حساسیت بر روی اوزان نهایی معیارها انجام شد. در این تحلیل، سه سناریوی جایگزین تعریف گردید: در سناریوی اول، اوزان خبرگان به میزان ۱۰٪ افزایش داده شد؛ در سناریوی دوم، اوزان به میزان ۱۰٪ کاهش یافت؛ و در سناریوی سوم تغییرات مثبت و منفی به صورت همزمان و تصادفی بر اوزان اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی سناریوهای جایگزین، ترتیب کلی اولویت ابعاد توسعه پایدار (زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه) بدون تغییر باقی ماند. تنها تغییرات جزئی در مقدار اوزان مشاهده شد که بر رتبه‌بندی نهایی تأثیر معناداری نگذاشت. این امر بیانگر آن است که مدل پژوهش از پایداری و استحکام روش‌شناختی برخوردار است و تغییرات محدود در قضاوت خبرگان، نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

۵.نتیجه‌گیری و توصیه‌های سیاستی

نتایج این پژوهش از دو مسیر اصلی به‌دست آمده است: نخست از طریق فرایند دلفی فازی که به شناسایی و پالایش متغیرهای کلیدی مؤثر بر آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن ایران انجامید، و دوم با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مردد (HFAHP) که به رتبه‌بندی نهایی ابعاد توسعه پایدار در شرایط عدم‌قطعیت کمک کرد. در فرایند دلفی، پس از سه مرحله اجماع‌سازی میان خبرگان حوزه معدن، انرژی و سیاست‌گذاری محیط‌زیست، در مجموع ۱۲ متغیر کلیدی در چهار بعد اقتصادی، اجتماعی، فناورانه و زیست‌محیطی شناسایی شد. مقایسه این متغیرها با ادبیات بین‌المللی نشان داد که بسیاری از آن‌ها مانند سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، نوآوری فناورانه، بازیافت پسماند، پذیرش اجتماعی فناوری و سلامت اکوسیستم در سایر پژوهش‌های جهانی نیز به‌عنوان مؤلفه‌های اثرگذار بر تحقق سناریوی انتشار خالص صفر (NZE) شناخته شده‌اند. این هم‌راستایی نشان می‌دهد که چارچوب استخراج‌شده از پژوهش حاضر، نه‌تنها بومی‌سازی‌شده، بلکه در عین حال با روندهای نظری و تجربی بین‌المللی نیز سازگاری دارد. در ادامه، تحلیل مقایسه‌ای معیارهای اصلی توسعه پایدار با استفاده از تکنیک HFAHP انجام شد. یافته‌ها بیانگر آن بود که بعد زیست‌محیطی و اقلیمی با وزن نهایی ۰٫۳۰۲ از بالاترین اهمیت برخوردار است، در حالی‌که ابعاد اقتصادی، اجتماعی و فناورانه در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج حاکی از آن است که از دیدگاه خبرگان، در آینده‌نگاری توسعه پایدار معادن، ملاحظات

محیط‌زیستی و الزامات اقلیمی نقش محوری دارند. چنین اولویتی با نگرش‌های جهانی مطرح در دستور کار توسعه پایدار ۲۰۳۰ و گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده تمرکز فزاینده بر تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های صنعتی است. نکته قابل توجه در نتایج پژوهش، جایگاه ویژه عامل اجتماعی در میان عوامل تأثیرگذار است که برخلاف برخی مدل‌های سیاست‌گذاری صرفاً متمرکز بر اقتصاد و فناوری، به اهمیت مشارکت جوامع محلی، آموزش زیست‌محیطی و رفاه اجتماعی نیز توجه شده است. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب مؤلفه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و فناورانه، در کنار الزامات اقتصادی، برای دستیابی به آینده‌ای پایدار و همسو با سناریوی NZE ضروری است. مدل ارائه‌شده در این پژوهش نه‌تنها از انسجام مفهومی و روش‌شناختی برخوردار است، بلکه ظرفیت بالایی برای تبدیل‌شدن به ابزاری راهبردی در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی کلان در صنعت معدن کشور دارد.یافته‌های این پژوهش مجموعه‌ای از پیامدهای سیاستی مهم برای نهادهای تصمیم‌گیر در حوزه معدن، محیط‌زیست، و انرژی را دربر دارد. اولویت بالای بعد زیست‌محیطی و اقلیمی در میان سایر ابعاد توسعه پایدار نشان می‌دهد که بدون بازنگری در سیاست‌های محیط‌زیستی، تحقق سناریوی انتشار خالص صفر (NZE) در صنایع معدنی غیرممکن خواهد بود. از این رو، لازم است نهادهای حاکمیتی و تنظیم‌گر همچون وزارت صنعت، معدن و تجارت، سازمان محیط‌زیست، ایمیدرو، و شرکت‌های بزرگ معدنی، استراتژی‌های خود را در جهت تقویت ظرفیت‌های زیست‌محیطی بازآرایی کنند. در این راستا، تدوین مقررات الزام‌آور برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت پسماند، کنترل مصرف آب و انرژی، و ارزیابی چرخه حیات فعالیت‌های معدنی، از جمله اقدامات ضروری است که می‌تواند به شکل‌گیری سازوکارهای نظارتی کارآمدتر کمک کند. یکی از کاربردهای کلیدی نتایج این پژوهش، ارائه یک الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای برنامه‌ریزی راهبردی در سطح بنگاه‌های معدنی است. مدیران صنعتی می‌توانند با اتکا به وزن معیارهای به‌دست‌آمده، اقدام به طراحی برنامه‌های اجرایی سازگار با توسعه پایدار نموده و در اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها، فناوری‌های سبز و آموزش نیروی انسانی بازنگری کنند. همچنین توصیه می‌شود که در ارزیابی طرح‌های توسعه‌ای جدید، وزن بیشتری به شاخص‌های زیست‌محیطی و اقلیمی داده شود، به‌ویژه در مناطقی که تنوع زیستی یا آسیب‌پذیری اقلیمی بالایی دارند.پیشنهادهای سیاستی پژوهش شامل تمرکز بر سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، حمایت از فناوری‌های پاک، توسعه سیستم‌های پایش هوشمند و افزایش سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش معدن است. برای تقویت کارایی این پیشنهادها، مرور تجربه‌های عملی حائز اهمیت است. در ایران، برخی شرکت‌های بزرگ معدنی نظیر گل‌گهر و چادرملو در سال‌های اخیر پروژه‌هایی در زمینه کاهش شدت انرژی و بازیافت پسماند آغاز کرده‌اند که می‌تواند به‌عنوان الگو توسعه یابد. در سطح جهانی، استرالیا برنامه انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن را با هدف کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در عملیات معدنی پیاده کرده و فنلاند نیز با پروژه Green Mining تحت حمایت اتحادیه اروپا مسیر مشابهی را دنبال کرده است. این نمونه‌ها نشان می‌دهند که ترکیب نوآوری فناورانه، سیاست‌های سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و حمایت‌های اقتصادی می‌تواند به تسریع گذار به سمت معادن سبز کمک

کند. بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن ارائه چارچوبی نظری و روشی برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر توسعه پایدار معادن، می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعت معدن در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده یا تولید شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

امینی، حامد، و جبل عاملی، محمدسعید. (۱۳۹۸). توسعه مدل آینده نگاری مبتنی بر رویکرد فراتلفیق. آینده‌پژوهی دفاعی، ۴(۱۵)، ۷-۳۴. fa/۳۸۰۹۵۸/https://sid.ir/paper

بابایی میبدی، حمید، گودرزی، غلامرضا، آذر، عادل، و عزیزی، فیروزه. (۱۳۹۹). طراحی مدل آینده نگاری توسعه پایدار با رویکرد برنامه ریزی سناریو مبنا و سیستم داینامیک (مورد مطالعه: استان یزد). مدیریت فردا، ۱۹(۶۲)، ۱۶۳-۱۸۰. fa/۳۹۰۳۳۷/https://sid.ir/paper

بکامیری، حمید، مهرآیین لگزیان، محمد، پو یا، علیرضا، و شریف، حسین. (۱۴۰۰). آینده نگاری صنعت بانکداری با بکارگیری رویکرد سناریونویسی و ماتریس تاثیرات متقاطع. مطالعات مدیریت کسب و کار هوشمند، ۱۰(۳۷)، ۲۳۳-۲۶۶. fa/۱۰۳۰۶۹۰/https://sid.ir/paper

رحیمی، محمد، هنری، فاطمه، و رومیانی، احمد. (۱۴۰۱). برنامه ریزی و آینده نگاری توسعه پایدار گردشگری استان خوزستان. برنامه ریزی منطقه ای، ۱۲(۴۵)، ۵۱-۶۶. fa/۹۹۹۵۱۲/https://sid.ir/paper

زالی، نادر. (۱۳۹۸). آینده نگاری منطقه ای بازتعریف آینده پژوهانه از فرایند برنامه ریزی منطقه ای. آینده‌پژوهی ایران، ۴(۱)، ۲۶۳-۲۸۸. fa/۲۷۰۳۶۸/https://sid.ir/paper

شیروانی ناغانی، مسلم، و بیات، روح اله. (۱۳۹۷). توسعه گزینه‌های راهبردی برای سیاستگذاری در صنعت نفت ایران بر اساس آینده نگاری راهبردی. سیاستگذاری عمومی، ۴(۱)، ۶۳-۷۹. https://sid.ir/fa/۲۵۷۴۳۹/paper

شیروانی ناغانی، مسلم، فضلی، صفر، و امین افشار، زهرا. (۱۳۹۸). راهبردپردازی در صنعت خودرو ایران با رویکرد آینده نگاری راهبردی و تمرکز بر حوزه علم, فناوری و نوآوری. مطالعات راهبردی سیاست گذاری عمومی (مطالعات راهبردی جهانی شدن)، ۹(۳۱)، ۷۷-۹۵. fa/۲۲۹۸۶۲/https://sid.ir/paper

فتاح زاده، یلدا، صالحی، اسماعیل، و خستو، مریم. (۱۳۹۹). تدوین سناریوهای پیش رو در زمینه آینده توسعه گردشگری پایدار استان گیلان. گردشگری و توسعه، ۹(۴)، ۱۱۱-۱۲۴. doi: ۱۰,۲۲۰۳۴/jtd.۱۸۶۱,۲۰۶۱۲۵,۲۰۲۰

قلی پور، پروانه، مظفری، محمدمهدی، و کشاورزترک، عین اله. (۱۳۹۹). بررسی تأثیرات آینده نگاری بر نوآوری فناورانه جهت توسعه هوشمندی راهبردی و فناورانه در سازمان‌های دفاعی. مدیریت نوآوری در سازمان‌های دفاعی، ۳(۲)، ۲۵-۴۸. fa/۴۰۳۵۷۳/https://sid.ir/paper

قلیزاده زاوشتی، مهدی، فضلی، صفر، کشاورزترک، عین اله، و ابن الرسول، سیداصغر. (۱۳۹۸). شناسایی قابلیت‌های کلیدی آینده نگاری سازمانی در بانک‌ها و موسسات مالی ایران. آینده‌پژوهی مدیریت (پژوهش‌های مدیریت)، ۳۰(۱۱۶)، ۱-۱۴. fa/۳۷۰۲۷۸/https://sid.ir/paper

قهرمان، وحید، داداش پور،هاشم، و رفیعیان، مجتبی. (۱۴۰۰). تدوین سناریوهای توسعه پایدار اکولوژیکی منطقه کلان شهری مشهد با رویکرد آینده نگاری منطقه ای. برنامه ریزی منطقه ای، ۱۱(۴۴)، ۸۳-۱۰۲. fa/۱۰۰۵۸۴۷/https://sid.ir/paper

مرزبان، احسان، محمدی، مهدی، و پورعزت، علی اصغر. (۱۳۹۷). حکمرانی توزیع انرژی برق در ایران: آینده

نگاری و توسعه پیشنهادات سیاستی. سیاستگذاری عمومی، ۴(۳)، ۹-۲۶. https://sid.ir/paper/۲۵۷۴۶۰/fa

ملایی سفیددشتی، افشین، حمیدی، مهرزاد، رجبی، حسین، و ذوالفقارزاده، محمدمهدی. (۱۳۹۹). آینده نگاری توسعه ورزش قهرمانی ایران در افق ۱۴۱۶. مدیریت و توسعه ورزش، ۹(۲ (پیاپی ۲۲))، ۸۳-۹۹. https://sid.ir/paper/۳۹۰۶۳۷/fa

Ahmad, R., Liu, G., Rehman, S. A. U., Fazal, R., Gao, Y., Xu, D., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Giannetti, B. F. (2025). Pakistan road towards Paris Agreement: Potential decarbonization pathways and future emissions reduction by a developing country. Energy, 314, 134075. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134075

Alcalde, J., Smith, P., Haszeldine, R. S., & Bond, C. E. (2018). The potential for implementation of Negative Emission Technologies in Scotland. International Journal of Greenhouse Gas Control, 76, 85–91. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.021

Amini, H., & Jabal Ameli, M. S. (2019). Developing a foresight model based on the meta-synthesis approach. Defensive Futures Studies, 4(15), 7–34. https://sid.ir/paper/380958/fa [In Persian]

Ampah, J. D., Jin, C., Afrane, S., Yusuf, A. A., Liu, H., & Yao, M. (2024). Race towards net zero emissions (NZE) by 2050: Reviewing a decade of research on hydrogen-fuelled internal combustion engines (ICE). Green Chemistry, 26(16), 9025–9047. https://doi.org/10.1039/d4gc00864b

Babaei Meybodi, H., Goodarzi, G., Azar, A., & Azizi, F. (2020). Designing a foresight model of sustainable development with a scenario-based planning and system dynamics approach (Case study: Yazd Province). Tomorrow Management, 19(62), 163–180. https://sid.ir/paper/390337/fa [In Persian]

Bakhshmiri, H., Mehrayin Lagzian, M., Pouya, A., & Sharif, H. (2021). Foresight of the banking industry using scenario writing and cross-impact matrix approach. Business Intelligence Management Studies, 10(37), 233–266. https://sid.ir/paper/1030690/fa [In Persian]

Baninla, Y., Wang, C., Pu, J., Gao, X., & Zhang, Q. (2025). Evaluating the progress and identifying future improvement areas of mining's contribution to the sustainable development goals (SDGs). The Extractive Industries and Society, 23, 101637. https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101637

Berberoglu, Y., Mangla, S. K., & Kazancoglu, Y. (2024). Towards sustainable mining in an emerging economy: Assessment of sustainability challenges. Resources Policy, 97, 105288. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105288

Chatterjee, C., Sindhwani, R., Mangla, S. K., & Hasteer, N. (2025). Digitization of the mining industry: Pathways to sustainability through enabling technologies. Resources Policy, 100, 105450. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105450

Cotrina-Teatino, M. A., & Marquina-Araujo, J. J. (2025). Circular economy in the mining

industry: A bibliometric and systematic literature review. Resources Policy, 102, 105513. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105513

de Lima, J. P. M., Amaral, M. C. S., & de Lima, S. C. R. B. (2025). Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future. Journal of Water Process Engineering, 71, 107239. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107239

Dönmezçelik, O., Koçak, E., & Örkcü, H. H. (2023). Towards net zero emissions target: Energy modelling of the transport sector in Türkiye. Energy, 279, 128064. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128064

Dong, C., Huang, G., Cheng, G., Cai, Y., Chen, C., & Zhu, J. (2025). Assessing energy economic and environmental impacts of GHG emission reduction targets across Canadian provinces: A national net-zeroization-oriented energy model. Applied Energy, 381, 125112. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125112

Dong, W., Niu, X., Nassani, A. A., Naseem, I., & Zaman, K. (2024). E-commerce mineral resource footprints: Investigating drivers for sustainable mining development. Resources Policy, 89, 104569. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104569

Elavarasan, R. M., Nadarajah, M., & Shafiullah, G. M. (2024). Multi-criteria decision analysis of clean energy technologies for envisioning sustainable development goal 7 in Australia: Is solar energy a game-changer? Energy Conversion and Management, 321, 119007. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119007

Fattahzadeh, Y., Salehi, E., & Khasto, M. (2020). Developing future scenarios for sustainable tourism development in Gilan Province. Tourism and Development, 9(4), 111–124. [In Persian]

Fernandez, M. I., Go, Y. I., Wong, D. M. L., & Früh, W.-G. (2024). Review of challenges and key enablers in energy systems towards net zero target: Renewables, storage, buildings, & grid technologies. Heliyon, 10(23), e40691. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40691

Fernández-Hernández, M., Mora, P., Ortega, M. F., & Cabello, J. P. (2025). Development of a comprehensive sustainability index for extractive and mining companies: Integrating the Sustainable Development Goals. Heliyon, 11(2), e41975. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41975

Feron, P., Cousins, A., Jiang, K., Zhai, R., Hla, S. S., Thiruvenkatachari, R., & Burnard, K. (2019). Towards Zero Emissions from Fossil Fuel Power Stations. International Journal of Greenhouse Gas Control, 87, 188–202. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.018

Ghahreman, V., Dadashpour, H., & Rafieian, M. (2021). Scenario development for ecological sustainable development of the metropolitan area of Mashhad with a regional foresight approach. Regional Planning, 11(44), 83–102. https://sid.ir/paper/1005847/fa [In Persian]

Gholipour, P., Mozaffari, M. M., & Keshavarz Tork, A. (2020). Examining the effects of foresight on technological innovation for developing strategic and technological intelligence in defense organizations. Innovation Management in Defense Organizations, 3(2), 25–48. https://sid.ir/paper/403573/fa [In Persian]

Gholizadeh Zavoushti, M., Fazli, S., Keshavarz Tork, A., & Ebn al-Rasoul, S. A. (2019). Identifying key organizational foresight capabilities in Iranian banks and financial institutions. Futures Studies in Management (Management Research), 30(116), 1–14. https://sid.ir/paper/370278/fa [In Persian]

Guo, Y., & Yang, F. (2023). Mining safety research in China: Understanding safety research trends and future demands for sustainable mining industry. Resources Policy, 83, 103632. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103632

Gungor, G., & Sari, R. (2024). Meta-analysis of the Turkish energy and climate pathways to achieve the net-zero emission target. Energy, 305, 132337. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132337

Hirons, M. (2020). How the Sustainable Development Goals risk undermining efforts to address environmental and social issues in the small-scale mining sector. Environmental Science & Policy, 114, 321–328. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.022

Karunathilake, H., Hewage, K., Mérida, W., & Sadiq, R. (2019). Renewable energy selection for net-zero energy communities: Life cycle based decision making under uncertainty. Renewable Energy, 130, 558–573. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.086

Kumar, A., & Gembali, V. (2025). Innovative framework development for net zero practices: Overcoming supply chain and logistics challenges through institutional and resource-based theories. Journal of Cleaner Production, 487, 144552. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144552

Li, G., Hu, Z., Li, P., Yuan, D., Feng, Z., Wang, W., & Fu, Y. (2022). Innovation for sustainable mining: Integrated planning of underground coal mining and mine reclamation. Journal of Cleaner Production, 351, 131522. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131522

Liang, Y., Kleijn, R., & van der Voet, E. (2023). Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario. Applied Energy, 346, 121400. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121400

Liu, Q., Zheng, X.-Q., Zhao, X.-C., Chen, Y., & Lugovoy, O. (2018). Carbon emission scenarios of China's power sector: Impact of controlling measures and carbon pricing mechanism. Advances in Climate Change Research, 9(1), 27–33. https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.01.002

Makhloufi, A. W., & Louafi, S. (2024). Optimising building performance for a resilient Future: A Multi-Objective approach to Net Zero energy strategies. Energy and Buildings, 324, 114869. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114869

Marzban, E., Mohammadi, M., & Pourazzat, A. A. (2018). Governance of electricity distribution in Iran: Foresight and development of policy recommendations. Public Policy, 4(3), 9–26. https://sid.ir/paper/257460/fa [In Persian]

Mirzehi, M., & Afrapoli, A. M. (2024). A novel framework for integrating environmental costs and carbon pricing in open-pit mine plans: Towards sustainable and green mining. Journal of Cleaner Production, 468, 143059. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143059

Molaei Sefiddashti, A., Hamidi, M., Rajabi, H., & Zolfagharezadeh, M. M. (2020).

Futures studies of the development of Iranian championship sports in the horizon of 1416 (2037). Sport Management and Development, 9(2, Issue 22), 83–99. https://sid.ir/paper/390637/fa [In Persian]

Mvile, B. N., & Bishoge, O. K. (2024). Mining and sustainable development goals in Africa. Resources Policy, 90, 104710. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104710

Muhirwa, F., Shen, L., Elshkaki, A., Hirwa, H., Umuziranenge, G., & Velempini, K. (2023). Linking large extractive industries to sustainable development of rural communities at mining sites in Africa: Challenges and pathways. Resources Policy, 81, 103322. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103322

Obosu, M., & Frimpong, S. (2025). Advances in automation and robotics: The state of the emerging future mining industry. Journal of Safety and Sustainability. https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2025.05.003

Oshiro, K., & Fujimori, S. (2024). Mid-century net-zero emissions pathways for Japan: Potential roles of global mitigation scenarios in informing national decarbonization strategies. Energy and Climate Change, 5, 100128. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100128

Paul, A., & Mahapatra, S. S. (2025). An integrated fuzzy-AHP and fuzzy-DEMATEL approach for analyzing sustainable supply chain factors in the mining industry. Supply Chain Analytics, 10, 100113. https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100113

Phupadtong, A., Chavalparit, O., Suwanteep, K., & Murayama, T. (2023). Municipal emission pathways and economic performance toward net-zero emissions: A case study of Nakhon Ratchasima municipality, Thailand. Journal of Environmental Management, 347, 119098. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119098

Rahimi, M., Henry, F., & Roumiani, A. (2022). Planning and foresight of sustainable tourism development in Khuzestan Province. Regional Planning, 12(45), 51–66. https://sid.ir/paper/999512/fa [In Persian]

Raoufi, K., Tajasob, P., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., & Akbari Jokar, M. (2025). Challenges, opportunities, and future research directions of aggregate production planning: A State-of-the-Art analysis of sustainability, uncertainty, and case studies. Journal of Cleaner Production, 489, 144686. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144686

Renné, D. S. (2022). Progress, opportunities and challenges of achieving net-zero emissions and 100% renewables. Solar Compass, 1, 100007. https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100007

Shamsi, M., & Zakerinejad, M. (2025). Development of practical-mathematical policy models using Fuzzy-Likert scale: Sustainable recycling of mining tailings in the industry 4.0 era. Process Safety and Environmental Protection, 200, 107378. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107378

Sher, F. (2024). Advanced approaches towards policymaking for net zero emissions. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 49, 100951. https://doi.

org/10.1016/j.cogsc.2024.100951

Shirvani Nagani, M., & Bayat, R. (2018). Developing strategic options for policymaking in Iran's oil industry based on strategic foresight. Public Policy, 4(1), 63–79. https://sid.ir/paper/257439/fa [In Persian]

Shirvani Nagani, M., Fazli, S., & Amin Afshar, Z. (2019). Strategy formulation in Iran's automotive industry with a strategic foresight approach focusing on science, technology, and innovation. Strategic Studies of Public Policy (Strategic Studies of Globalization), 9(31), 77–95. https://sid.ir/paper/229862/fa [In Persian]

Sindhwani, R., Singh, P. L., Behl, A., Afridi, M. S., Sammanit, D., & Tiwari, A. K. (2022). Modeling the critical success factors of implementing net zero emission (NZE) and promoting resilience and social value creation. Technological Forecasting and Social Change, 181, 121759. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121759

Siregar, Y. I. (2024). Pathways towards net-zero emissions in Indonesia's energy sector. Energy, 308, 133014. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133014

Sumrit, D. (2025). Pathway to achieve net-zero emission in healthcare sector based on the natural resource-based view theoretical lens: A hybrid DEMATEL-ISM-MICMAC approach. Cleaner Engineering and Technology, 25, 100916. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100916

Tousoli, S. (2018). Application of strategic foresight methodology in spatial development planning: A case study of scenario planning in the metropolitan area of Karaj. Nameh Memari va Shahrsazi, 10(20), 23–48. [In Persian]

Tokimatsu, K., Konishi, S., Ishihara, K., Tezuka, T., Yasuoka, R., & Nishio, M. (2016). Role of innovative technologies under the global zero emissions scenarios. Applied Energy, 162, 1483–1493. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.051

Tokimatsu, K., Yasuoka, R., & Nishio, M. (2015). Global Zero Emissions Scenarios: Assessment of Climate Change Mitigations and their Costs. Energy Procedia, 75, 2211–2214. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.383

Zali, N. (2019). Regional foresight: Redefining the process of regional planning from a futures studies perspective. Iranian Futures Studies, 4(1), 263–288. https://sid.ir/paper/270368/fa [In Persian]

Xiao, Z., Duritan, M. J. M., & Jia, R. (2024). Resourceful futures: Integrating responsible mining and green education for sustainable development in developing and emerging economies. Resources Policy, 88, 104377. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104377

Yadav, S., Samadhiya, A., Kumar, A., Majumdar, A., Garza-Reyes, J. A., & Luthra, S. (2023). Achieving the sustainable development goals through net zero emissions: Innovation-driven strategies for transitioning from incremental to radical lean, green and digital technologies. *Resources, Conservation* and Recycling, 197, 107094. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107094

Zali, N., & Shirvani Nagani, M. (2018). Development of strategic foresight options in regional and national planning: An Iranian perspective. *Iranian Futures Studies, 4*(2), xx–xx. [In Persian]