



مدل سازی عوامل کلیدی و روابط متقابل در مسیر دستیابی به توسعه پایدار معادن با چشم انداز

NZE با رویکرد به کارگیری ترکیبی ISM و Dematel فازی

محمدرضا کریمی

صادق عابدی*

علیرضا علی نژاد

دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه: توسعه پایدار در بخش معدن به عنوان یکی از صنایع زیربنایی، نقشی کلیدی در گذار به سمت اقتصاد کم کربن و تحقق سناریوی انتشار خالص صفر دارد. این صنعت از یک سو به عنوان موتور رشد اقتصادی و تأمین کننده مواد اولیه برای فناوری های نوین شناخته می شود و از سوی دیگر، اثرات قابل توجهی بر محیط زیست و جوامع محلی برجای می گذارد. بنابراین، شناسایی متغیرهای کلیدی و تحلیل روابط میان آنها برای دستیابی به آینده ای پایدار در این بخش ضرورتی انکارناپذیر است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

مواد و روش ها: پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. جامعه آماری شامل ۸۰ خبره در حوزه معدن، محیط زیست و سیاست گذاری انرژی بود که با روش نمونه گیری هدفمند و گلوله برفی انتخاب شدند. ابتدا متغیرهای مؤثر بر توسعه پایدار معادن با بهره گیری از روش دلفی فازی شناسایی و نهایی شدند. سپس روابط علی و معلولی میان متغیرها با استفاده از روش دیماتل فازی تحلیل گردید و در نهایت، ساختار روابط میان متغیرهای کلیدی با بهره گیری از مدل سازی ساختاری تفسیری (ISM) تدوین شد.

نتایج و بحث: بر اساس نتایج دلفی فازی، ۱۲ متغیر کلیدی در چهار بعد اقتصادی، اجتماعی، فناورانه و زیست محیطی شناسایی شد. تحلیل دیماتل نشان داد متغیرهایی هم چون هزینه سرمایه گذاری، قیمت جهانی فلزات، سطح رفاه اجتماعی و آموزش زیست محیطی در گروه تأثیرگذار قرار دارند، در حالی که متغیرهایی مانند شدت انرژی، بازیافت پسماند و سلامت اکوسیستم بیشتر تأثیرپذیر هستند. در مدل سازی ساختاری تفسیری، سه متغیر سیاست های قیمت گذاری کربن، هزینه سرمایه گذاری و قیمت جهانی فلزات به عنوان عوامل پایه و پیشران شناسایی شدند که نقش کلیدی در هدایت سایر متغیرها ایفا می کنند. متغیرهای میانی مانند پذیرش اجتماعی فناوری و نوآوری فناورانه نقش واسطه ای داشته و متغیرهای وابسته نظیر شدت انرژی و سلامت اکوسیستم به عنوان خروجی های نهایی شناخته شدند. مقایسه دو روش دیماتل و مدل سازی ساختاری تفسیری نشان دهنده هماهنگی بالای نتایج و روایی یافته هاست.

واژه های کلیدی: توسعه پایدار، سناریوی NZE، معادن، مدل سازی، ISM، Dematel

نتیجه گیری: نتایج نشان می دهد دستیابی به توسعه پایدار معادن و هم سویی با سناریوی انتشار خالص صفر، مستلزم تمرکز سیاستی بر متغیرهای پایه و ایجاد هماهنگی میان متغیرهای میانی است تا بتوان در نهایت پیامدهای زیست محیطی و اجتماعی مطلوب را محقق ساخت. این مدل ساختاری می تواند به سیاست گذاران کمک کند منابع را بهینه تخصیص دهند و مسیر گذار به معادن پایدار را تسهیل نمایند. بر اساس یافته ها، توصیه می شود سیاست گذاران در گام نخست سازوکارهای شفاف قیمت گذاری کربن و حمایت های مالی برای کاهش هزینه سرمایه گذاری را طراحی کنند. در گام دوم، برنامه های حمایتی برای نوآوری فناورانه و توسعه هوش مصنوعی در استخراج ایجاد شود تا پذیرش اجتماعی فناوری و آموزش زیست محیطی تقویت گردد. در گام سوم، با بهبود نظام پایش هوشمند، زیرساخت های بازیافت و ارتقای بهره وری انرژی، امکان دستیابی به اهداف زیست محیطی و بهبود سلامت اکوسیستم فراهم گردد. این مسیر سه مرحله ای می تواند نقشه راهی عملی برای سیاست گذاری و برنامه ریزی آینده معادن در چارچوب توسعه پایدار و سناریوی انتشار خالص صفر باشد.

نویسنده مسئول: صادق عابدی

نشانی: گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۸۱۷۳۶۶۲

پست الکترونیکی: abedi.sadegh@iau.ac.ir

استناد: کریمی محمدرضا، عابدی صادق، علی نژاد علیرضا. مدل سازی عوامل کلیدی و روابط متقابل در مسیر دستیابی به توسعه پایدار معادن با چشم انداز NZE با رویکرد بکارگیری ترکیبی ISM و Dematel فازی. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ ۳(۱۰): ۴۰-۲۵.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه 4.0 http://creativecommons.org/licenses/by/4.0 در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

توسعه پایدار به‌عنوان یک رویکرد جامع، بر ایجاد توازن میان سه بعد اصلی اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست تأکید دارد. بعد اقتصادی آن ناظر بر بهره‌برداری کارآمد از منابع و ایجاد رشد اقتصادی بلندمدت است، بعد اجتماعی بر عدالت، رفاه و بهبود کیفیت زندگی افراد تأکید می‌کند و بعد زیست‌محیطی بر حفاظت از اکوسیستم‌ها، کاهش آلودگی و استفاده بهینه از منابع طبیعی تمرکز دارد. این سه بعد در تعامل با یکدیگر قرار داشته و تحقق توسعه پایدار تنها زمانی امکان‌پذیر است که میان آن‌ها هماهنگی برقرار شود (احمد و همکاران ۲۰۲۵، آکالد و همکاران ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، توسعه پایدار به‌عنوان یکی از اهداف کلان جهانی و ملی مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گرفته و صنایع مختلف موظف شده‌اند فعالیت‌های خود را در چارچوب این اصول بازنگری کنند. در این میان، بخش معدن جایگاهی ویژه دارد، زیرا از یک‌سو به‌عنوان یکی از پیشران‌های اصلی رشد اقتصادی و توسعه صنعتی کشور شناخته می‌شود و نقشی کلیدی در تأمین مواد اولیه حیاتی برای صنایع پایین‌دستی و ایجاد اشتغال ایفا می‌کند و از سوی دیگر، فعالیت‌های معدنی به دلیل مصرف گسترده انرژی و منابع طبیعی، ایجاد آلاینده‌ها و اثرگذاری بر جوامع محلی، چالش‌های متعددی را در ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه دارد (بربروغلو و همکاران ۲۰۲۴، چاترجی و همکاران ۲۰۲۵، کوترینا تئاتینو و مارکینا آراخو ۲۰۲۵).

اهمیت توسعه پایدار در بخش معدن در این است که بدون بازنگری در شیوه‌های بهره‌برداری، مدیریت منابع و سیاست‌های مرتبط، تداوم فعالیت‌های معدنی می‌تواند منجر به پیامدهای جبران‌ناپذیری شود. از این رو، دستیابی به توسعه پایدار در این بخش نه تنها به معنای حفاظت از محیط‌زیست و کاهش پیامدهای منفی اجتماعی است، بلکه به‌عنوان شرط لازم برای حفظ منافع اقتصادی بلندمدت و همسویی با اهداف کلان کشور در زمینه مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار آلاینده‌ها نیز محسوب می‌شود (دونمزچلیک و همکاران ۲۰۲۳، دونگ و همکاران ۲۰۲۵). در دهه اخیر، سناریوی انتشار خالص صفر (NZE)^۱ به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین اهداف جامعه جهانی در مقابله با تغییرات اقلیمی معرفی شده است. سناریوی انتشار خالص صفر بیانگر وضعیتی است که در آن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی با میزان جذب یا جبران آن‌ها به صفر می‌رسد (چاترجی و همکاران ۲۰۲۵). تحقق این هدف نه تنها مستلزم گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی است، بلکه نیازمند بازطراحی فرایندها و فناوری‌ها در

صنایع مادر همچون معدن می‌باشد. اهمیت سناریوی انتشار خالص صفر در این است که بدون کاهش شدید وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تغییر در الگوی بهره‌برداری از معادن، دستیابی به اهداف توافق پاریس و محدود کردن افزایش دمای زمین به زیر ۱/۵ درجه سلسیوس امکان‌پذیر نخواهد بود. در واقع، معادن به‌عنوان تأمین‌کننده مواد اولیه حیاتی برای فناوری‌های انرژی پاک (مانند لیتیوم، مس و نیکل برای باتری‌ها و انرژی‌های نو) نقشی دوگانه دارند. از یک‌سو عامل انتشار گازهای گلخانه‌ای و از سوی دیگر محرک گذار به اقتصاد کم‌کربن (امینی و جبل عاملی ۲۰۱۹، امپاه و همکاران ۲۰۲۴).

در ایران، بخش معدن سهم قابل توجهی در تولید ناخالص داخلی، صادرات و اشتغال دارد و به‌عنوان یکی از محورهای توسعه صنعتی شناخته می‌شود. با این حال، فعالیت‌های معدنی در کشور با چالش‌هایی نظیر مصرف بالای انرژی، تولید پسماند، فرسایش خاک، تخریب پوشش گیاهی و اثرات اجتماعی بر جوامع محلی همراه است. از سوی دیگر، فشارهای بین‌المللی در زمینه تغییرات اقلیمی و نیاز به هم‌گرایی با اهداف جهانی، ضرورت توجه به توسعه پایدار و انطباق با سناریوی انتشار خالص صفر را بیش از پیش نمایان ساخته است. نبود چارچوب‌های تحلیلی جامع برای شناسایی و ارزیابی متغیرهای کلیدی پایداری در معادن ایران، موجب پراکندگی تصمیم‌گیری‌ها و ناکارآمدی سیاست‌ها شده و این مسأله بر ضرورت انجام پژوهش حاضر تأکید دارد. بر این اساس، مسأله اصلی پژوهش این است که چگونه می‌توان متغیرهای کلیدی مؤثر بر توسعه پایدار معادن را شناسایی کرد، روابط علی و معلولی میان آن‌ها را تحلیل نمود و در نهایت یک مدل ساختاری یکپارچه برای هدایت تصمیم‌گیری‌ها در مسیر دستیابی به سناریوی انتشار خالص صفر ارائه داد. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب هم‌زمان سه رویکرد تصمیم‌گیری فازی شامل دلفی فازی، مقایسه زوجی فازی و دیماتل فازی برای تحلیل روابط علی و معلولی میان ابعاد توسعه پایدار معادن در چارچوب سناریوی انتشار خالص صفر است. برخلاف پیش‌تر مطالعات پیشین که هر یک از ابعاد اقتصادی، اجتماعی، فناورانه یا زیست‌محیطی را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، این پژوهش با رویکردی یکپارچه و مبتنی بر شرایط عدم قطعیت، شبکه تعاملات میان این ابعاد را مدل‌سازی کرده است. سهم دانش‌افزایی مقاله در توسعه چارچوبی تحلیلی است که به سیاست‌گذاران و مدیران در کشورهای درحال توسعه کمک می‌کند تا تصمیمات خود را در شرایط ابهام و نوسان بازار بر پایه

تحلیل‌های علمی و روابط علی اتخاذ نمایند. همچنین، استفاده از منطق فازی مورد به‌عنوان ابزاری برای لحاظ کردن تردید و ذهنیت خبرگان، دقت و قابلیت اعتماد تصمیم‌گیری‌ها را در حوزه توسعه پایدار معادن افزایش داده است. اهداف پژوهش به ترتیب شامل شناسایی متغیرهای کلیدی با روش دلفی فازی، تحلیل روابط علی- معلولی با بهره‌گیری از دیماتل فازی، و تدوین مدل ساختاری روابط با رویکرد مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)^۲ است. این رویکرد ترکیبی به سیاست‌گذاران و مدیران کمک می‌کند تا تصویری جامع از عوامل و روابط میان آن‌ها به دست آورده و مسیر گذار به معادن پایدار و همسو با سناریوی انتشار خالص صفر را ترسیم نمایند. ساختار مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا مبانی نظری و پیشینه پژوهش مرور می‌شود، سپس روش‌شناسی تحقیق شامل مراحل اجرای دلفی فازی، دیماتل فازی و ISM توضیح داده می‌شود. در ادامه یافته‌های پژوهش شامل متغیرهای شناسایی‌شده، شبکه روابط علی و مدل ساختاری ارائه می‌گردد. در نهایت، بحث و نتیجه‌گیری با تمرکز بر کاربردهای سیاستی و مدیریتی، محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

در دهه‌های اخیر، توسعه پایدار در صنایع مختلف به‌ویژه در بخش معدن با رویکرد دستیابی به سناریوی انتشار خالص صفر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در حوزه انرژی و اقتصاد، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی و اعمال سیاست‌های کربن‌زدایی نقش اساسی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند (مخلوفی و لوافی ۲۰۲۴، مرزبان و همکاران ۲۰۱۸). این مطالعات همچنین بر اهمیت سرمایه‌گذاری و سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن در ایجاد مسیرهای پایدار تأکید دارند (دلیما و همکاران ۲۰۲۵، دنومن‌چلیک و همکاران ۲۰۲۳). ادبیات مرتبط با توسعه پایدار در معادن، چهار حوزه محوری اقتصادی، اجتماعی- فرهنگی، فناوری و زیست‌محیطی را به‌عنوان ستون‌های تحلیل معرفی می‌کند. در بعد اقتصادی، مطالعات بر نقش متغیرهایی چون هزینه سرمایه‌گذاری، سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، نوسانات قیمت جهانی فلزات و مشوق‌های مالیاتی در مسیر تحقق سناریوی انتشار خالص صفر تأکید دارند. مرورهای کلان و سیاست‌نگارانه نشان می‌دهند ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری و سازوکارهای کربن‌زدایی، مسیرهای کم‌هزینه‌تر کاهش انتشار را می‌گشاید و به پایداری مالی پروژه‌های معدنی کمک می‌کند (میرزحی و افرامپلی ۲۰۲۴، زالی ۲۰۱۹). هم‌زمان، مدل‌های سناریویی ملی- بخشی اثر سیاست‌های کربنی و اهداف

کاهش انتشار را بر ساختار هزینه و سرمایه‌گذاری تبیین کرده‌اند و نقش قیمت جهانی فلزات و مواد حیاتی را در ریسک- بازده پروژه‌ها برجسته ساخته‌اند. در این راستا، شواهد مبتنی بر مدل‌سازی نشان می‌دهد گذار به سناریوی انتشار خالص صفر بدون بازتنظیم مشوق‌ها و مدیریت هزینه انتقال فناوری در زنجیره معدن امکان‌پذیر نیست (احمد و همکاران ۲۰۲۵). حوزه اجتماعی- فرهنگی، در پیوند مستقیم با پذیرش اجتماعی فناوری، مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، مشارکت جوامع محلی و بهبود کیفیت زندگی قرار دارد. ادبیات نشان می‌دهد موفقیت گذار کم‌کربن زمانی پایدار است که منافع محلی و ادراک عدالت توزیعی تقویت شود و پیوند معدن با توسعه جوامع پیرامونی به‌صورت نهادمند طراحی گردد. پژوهش‌های روندی در ایمنی و سرمایه انسانی نیز بر اهمیت فرهنگ ایمنی و آموزش به‌عنوان پیش‌نیازهای پذیرش تغییرات فناورانه در معادن تأکید دارند (آلکالد و همکاران ۲۰۱۸، امینی و جبل عاملی ۲۰۱۹). از سوی دیگر، شاخص‌های ترکیبی پایداری شرکتی نشان می‌دهند هم‌ترازی با اهداف توسعه پایدار و گزارش‌دهی شفاف، پذیرش اجتماعی و مشروعیت عملیاتی را تقویت می‌کند (دونگ و همکاران ۲۰۲۴). در بعد فناورانه، متغیرهایی مانند سطح نوآوری، دیجیتال‌سازی فرآیندها، هوش مصنوعی در استخراج، زیرساخت‌های فناورانه، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و سیستم‌های پایش هوشمند محیطی در ادبیات به‌عنوان پیشران‌های کلیدی بهره‌وری و کربن‌زدایی شناخته شده‌اند. مسیرهای فناورانه گذار به سناریوهای صفر خالص، نقش نوآوری‌های تحول‌آفرین و هم‌افزایی فناوری- سیاست را برجسته می‌سازند (بانینلا و همکاران ۲۰۲۵). در سطح بنگاه و عملیات، ادغام هوش مصنوعی، رباتیک و اتوماسیون با مدیریت داده و تحلیل‌های برخط، ایمنی، بهره‌وری انرژی و کیفیت تصمیم را بهبود می‌دهد. همچنین، برنامه‌ریزی یکپارچه معدن- بازسازی و الگوهای انتخاب فناوری انرژی برای سایت‌های معدنی، پیوند نوآوری با بازیابی زمین و تاب‌آوری زیرساخت را نشان می‌دهد. شواهد سیاستی نیز بر لزوم هم‌تکامی حمایت‌های تنظیمی با سرمایه‌گذاری فناورانه برای تسریع گذار تأکید دارند (بانینلا و همکاران ۲۰۲۵، ببروگلو و همکاران ۲۰۲۴). بُعد زیست‌محیطی با متغیرهایی مانند شدت انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، ارزیابی چرخه عمر، مصرف آب، بازیافت پسماند و سلامت اکوسیستم- محور اصلی انطباق با سناریوی انتشار خالص صفر است. بدنه پژوهشی قابل‌توجهی نشان داده است که ادغام هزینه کربن در طرح‌های معدن‌کاری سطح- باز می‌تواند بهینه‌سازی‌های

عملیاتی و کاهش ردپای کربنی را ممکن سازد (امینی و جبل عاملی ۲۰۱۹، امپاه و همکاران ۲۰۲۴، بابایی میبدی و همکاران ۲۰۲۰). در کنار آن، سیاست‌های بازیافت با رویکرد فازی-کاربردی و اقتصاد چرخشی، نقش کاهش‌دهنده فشار بر منابع اولیه و بهبود تاب‌آوری اکوسیستم را تقویت می‌کنند (دونگ و همکاران ۲۰۲۴، الاواراسان و همکاران ۲۰۲۴). مدیریت آب به‌عنوان رگ‌حیات معدن پایدار، در شواهد جدید با چارچوب‌های عملیاتی آبی پیوند خورده و به‌صورت نظام‌مند تبیین شده است (میرزحی و افرامیلی ۲۰۲۴). از سوی دیگر، مطالعات فناوری‌های منفی‌کننده انتشار و کربن‌گیری، همراه با سناریوهای قیمت‌گذاری کربن در بخش برق، نشان می‌دهند که ترکیب ابزارهای فنی و اقتصادی برای رسیدن به صفر خالص ضروری است (مخلوفی و لوافی ۲۰۲۴، مرزبان و همکاران ۲۰۱۸).

به‌طور هم‌پیوند، ادبیات موضوعی نشان می‌دهد گذار جهانی به سناریوی انتشار خالص صفر فشار تقاضا بر مواد و فلزات حیاتی را افزایش می‌دهد و این امر پیامدهای اقتصادی-زیست‌محیطی گسترده‌ای در زنجیره ارزش معدن دارد. نیازمند سیاست‌های سمت عرضه، تنوع‌بخشی و استانداردهای استخراج مسئولانه در سطح ملی-خشکی نیز مدل‌سازی‌های مسیرهای صفر خالص، نقش سیاست‌های سرمایه‌گذاری، اصلاح قیمت‌گذاری و

بهینه‌سازی زیرساخت را برجسته کرده‌اند (شیاو و همکاران ۲۰۲۴، یاداو و همکاران ۲۰۲۳). در ادبیات موجود اگرچه مطالعات متعددی در زمینه توسعه پایدار و سناریوی انتشار خالص صفر انجام شده است، اما هم‌چنان چندین خلأ اساسی وجود دارد. نخست، بیش‌تر پژوهش‌ها تنها یکی از ابعاد اقتصادی، اجتماعی-فرهنگی، فناورانه یا زیست‌محیطی را بررسی کرده‌اند و چارچوبی جامع که این چهار بعد را به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه تحلیل کند کمتر ارائه شده است. دوم، اغلب تحقیقات به تحلیل روند یا مدل‌سازی سناریو محدود بوده و کمتر به سنجش کمی احتمال تحقق سناریوی انتشار خالص صفر پرداخته‌اند. سوم، پیوند میان سیاست‌های کلان و مسیرهای نوآوری فناورانه در بخش معدن به‌طور کافی مورد توجه قرار نگرفته است. چهارم، بیشتر مطالعات در حوزه‌هایی مانند انرژی، ساختمان یا حمل‌ونقل متمرکز بوده و بخش معدن به‌ویژه در ارتباط با نقش منابع معدنی حیاتی در انتقال انرژی پاک کمتر بررسی شده است. نهایتاً، بازنمایی روابط پیچیده و چندبعدی میان متغیرها در پژوهش‌ها محدود بوده و نیاز به چارچوب‌های تحلیلی جامع‌تر احساس می‌شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. تمرکز پژوهش بر تحلیل روابط میان ابعاد مختلف توسعه پایدار معادن در چارچوب سناریوی کربن صفر می‌باشد. قلمرو مکانی این پژوهش شامل شرکت‌های حوزه معدنی فعال در کشور می‌باشند. جامعه آماری شامل خبرگان و متخصصان حوزه معدن، محیط‌زیست و سیاست‌گذاری انرژی که حداقل پنج

سال تجربه مدیریتی یا پژوهشی در زمینه توسعه پایدار معادن دارند. انتخاب خبرگان به روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله برفی صورت گرفته و تعداد نهایی مشارکت‌کنندگان بر اساس معیار کفایت نظری تعیین شده است. در نهایت با توجه به این معیارها، ۸۰ نفر خبره انتخاب شدند. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان

تعداد (نفر)	دسته‌بندی / وضعیت	ویژگی
۶۰	کارشناسی ارشد	تحصیلات
۲۰	دکتری	
۴۶	۲۰-۲۵ سال	سابقه کاری
۳۴	بیش از ۲۵ سال	
۱۲	مدیریت فناوری	رشته تحصیلی
۱۴	مدیریت انرژی	
۲۸	مهندسی معدن	
۲۶	محیط‌زیست	

استاد دانشگاه	۲۲
مدیر شرکت‌های معدنی	۱۸
سمت سازمانی	۳۰
کارشناس شرکت‌های معدنی	۱۰
مشاور شرکت‌های معدنی	۱۵
اکتشاف	۲۵
زنجیره معدنی	۴۰
استخراج	
فرآوری	

- روش دلفی فازی

روش دلفی فازی یک تکنیک ترکیبی از روش دلفی و منطق فازی است که برای شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی در شرایط عدم قطعیت و پیچیدگی استفاده می‌شود. این روش از نظرات خبرگان بهره می‌برد و آن‌ها را با استفاده از طیف فازی برای دستیابی به اجماع و رتبه‌بندی عوامل به کار می‌گیرد. در رابطه ۱ عدد فازی متعلق عبارت زبانی که توسط خبره i ام می‌باشد. در رابطه ۲ میانگین فازی مثلی خبره بدست می‌آید. در رابطه ۳ میانگین غیر فازی امتیازی که توسط خبرگان داده شده است را بدست می‌آورد.

روش تحلیل داده‌ها شامل سه گام اصلی می‌باشد:

۱- شناسایی و غربالگری متغیرهای کلیدی با استفاده از روش دلفی فازی ۲- تحلیل روابط علی و ساختاری میان متغیرها با روش‌های دیماتل فازی ۳- تدوین و مدل‌سازی ساختار روابط میان متغیرهای کلیدی توسعه پایدار معادن با رویکرد ISM در راستای دستیابی به سناریوی انتشار خالص صفر. ترکیب این روش‌ها امکان تحلیل جامع و چندوجهی مسئله را فراهم کرده و به ارائه مدلی معتبر و کاربردی در حوزه توسعه پایدار معادن انجامید.

$$A^i = (a_1^i, a_2^i, a_3^i), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$A_m = (a_{m1}^i, a_{m2}^i, a_{m3}^i) = \frac{1}{n} \sum a_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum a_2^{(i)}, \frac{1}{n} \sum a_3^{(i)} \quad (2)$$

$$S(A) = \frac{1}{2}(S_L(A) + S_R(A)) \quad (3)$$

$$S(A) = \frac{1}{2} \left[\left(a_{2i} - \int_{a_{1i}}^{a_{2i}} f_{\bar{A}}(x) \right) + \left(a_{2i} - \int_{a_{2i}}^{a_{3i}} f_{\bar{A}}(x) \right) \right] = \frac{a_{1i} + 2a_{2i} + a_{3i}}{4}$$

- روش دیماتل فازی:

ماتریس شدت ارتباطات کل T از رابطه ۶ و روابط غیرمستقیم از رابطه ۷ بدست می‌آید. مقدار شاخص تاثیرگذار D و مقدار شاخص تاثیر پذیر R در رابطه ۸ و ۹ محاسبه می‌شود. در رابطه ۱۰، اگر مقدار شاخص $D - R > 0$ باشد، شاخص مورد نظر یک تاثیرگذار قطعی یا اصطلاحاً شاخص علی در مجموعه مورد نظر می‌باشد. اگر مقدار شاخص $D - R < 0$ باشد، شاخص مورد نظر یک تاثیرپذیر قطعی یا اصطلاحاً شاخص معلول در مجموعه مورد نظر می‌باشد.

روش دیماتل فازی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای شناسایی و تحلیل روابط متقابل بین عوامل پیچیده در محیط‌های دارای عدم قطعیت به کار می‌رود. در این روش، از منطق فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و ابهامات در ارزیابی‌ها استفاده می‌شود. دیماتل فازی کمک می‌کند تا تأثیرگذاری و تأثیرپذیری عوامل شناسایی و دسته‌بندی شوند و ساختاری شفاف برای تحلیل شبکه‌ای ارائه شود. در رابطه ۴ میانگین نظرات خبرگان برای هر درایه ماتریس تصمیم‌گیری بدست می‌آید. جهت نرمال‌سازی از رابطه ۵ استفاده می‌شود. شاخص λ ضریب نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشد.

$$X'_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k x_{ijl} \quad (4)$$

$$N = \lambda x$$

$$\lambda = \frac{1}{\max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (5)$$

$$T_{t \rightarrow \infty} = N + N^2 + N^3 + \dots + N^t = \frac{N(I - N^t)}{(I - N)}; \lim N_{t \rightarrow \infty}^t = 0 \quad (6)$$

$$= \frac{N}{(I - N)} = N(I - N)^{-1}$$

$$T'_{t \rightarrow \infty} = N^2 + N^3 + N^4 + \dots + N^t = N^2(I - N)^{-1} \quad (7)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$D > R \Rightarrow D - R > 0 \rightarrow \text{positive Relation} \quad (10)$$

$$D < R \Rightarrow D - R < 0 \rightarrow \text{Negetive Relation}$$

نتایج و بحث

انتخاب متغیرهای کلیدی مؤثر با استفاده از روش دلفی‌فازی:

با هدف طراحی چارچوبی مفهومی برای توسعه پایدار معادن در راستای سناریوی انتشار خالص صفر 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. این متغیرها حاصل تجميع مطالعات موردی، تحلیل‌های نظری و ارجاعات علمی هستند که با توجه به شرایط صنعت معدن‌کاری و مسیر جهانی کاهش کربن انتخاب شده‌اند. ۲۸ متغیر اولیه به‌صورت دسته‌بندی‌شده بر اساس عامل کلان، همراه با منابع اصلی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- متغیرهای اولیه مؤثر توسعه پایدار معادن

عامل کلیدی	متغیر شناسایی شده	منبع
اقتصادی	هزینه سرمایه‌گذاری، نرخ بازگشت سرمایه، نوسانات بازار صادرات، قیمت جهانی فلزات، مشوق‌های مالیاتی، سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، هزینه انتقال فناوری	شیاو و همکاران (۲۰۲۴)، یاداو و همکاران (۲۰۲۳)، دونگ و همکاران (۲۰۲۴)
اجتماعی-فرهنگی	مشارکت جوامع محلی، مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، آموزش زیست‌محیطی، پذیرش اجتماعی فناوری، سطح رفاه اجتماعی، فرهنگ ایمنی، شاخص کیفیت زندگی	امینی و جبل عاملی (۲۰۱۹)، بربروغلو و همکاران (۲۰۲۴)، چاترجی و همکاران (۲۰۲۵)، میرزهی و افرامپلی (۲۰۲۴)، زالی (۲۰۱۹)
فناورانه	سطح نوآوری فناورانه، دیجیتال‌سازی فرآیندها، انرژی خورشیدی، هوش مصنوعی در استخراج، زیرساخت‌های فناورانه، فناوری ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	امپاه و همکاران (۲۰۲۴)، بابایی میبیدی و همکاران (۲۰۲۰)، بخش‌میری و همکاران (۲۰۲۱)، بانینلا و همکاران (۲۰۲۵)، دونگ و همکاران (۲۰۲۵)، دونگ و همکاران (۲۰۲۴)
زیست‌محیطی	انتشار گازهای گلخانه‌ای، شاخص شدت انرژی، ارزیابی چرخه حیات، میزان مصرف آب، سلامت اکوسیستم، بازیافت پسماند، تاب‌آوری اقلیمی	احمد و همکاران (۲۰۲۵)، آلکالده و همکاران (۲۰۱۸)، کوترینا تگاتینو و مارکوینا آراخو (۲۰۲۵)، دلیما و همکاران (۲۰۲۵)، دونمزچلیک و همکاران (۲۰۲۳)

برای ارزیابی زبانی استفاده شده و سپس با استفاده از روش مرکز ثقل عملیات دی‌فازی انجام شده است. این روش رایج‌ترین و معتبرترین روش دی‌فازی در مطالعات محسوب می‌شود. طیف فازی مثلی برای ارزیابی اهمیت متغیرها در جدول ۳ نشان داده شده است.

به‌منظور انتخاب متغیرهای نهایی مؤثر بر 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 مثلی

جدول ۳ - طیف فازی مثلی برای ارزیابی اهمیت متغیرها

عبارت زبانی	عدد فازی مثلی (L,M,U)
خیلی کم اهمیت	(۰/۰، ۰/۱، ۰/۳)
کم اهمیت	(۰/۱، ۰/۳، ۰/۵)
تا حدی اهمیت دارد	(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)
با اهمیت	(۰/۵، ۰/۷، ۰/۹)
بسیار با اهمیت	(۰/۷، ۰/۹، ۱/۰)

در این مرحله، مجدداً خبرگان همان شاخص‌ها را ارزیابی کرده و اختلاف مقادیر دی‌فازی دو راند بررسی شد. از آنجا که تمامی اختلاف‌ها کمتر از حد آستانه بودند، فرآیند به اجماع خبرگان منتهی شد. نهایتاً شاخص‌هایی که مقدار دی‌فازی آن‌ها در راند دوم بیشتر از ۰/۷۰ بود، به‌عنوان شاخص‌های نهایی انتخاب و در جدول ۴ ارائه گردید. این روند موجب شفافیت، اعتبار و روایی نتایج حاصل از روش دلفی شد.

فرآیند اجرای روش دلفی در این پژوهش با مشارکت ۸۰ خبره تخصصی در حوزه‌های مرتبط انجام شد. در گام نخست، مجموعه‌ای از شاخص‌ها بر اساس مرور ادبیات و نظرات اولیه خبرگان شناسایی گردید. سپس در راند اول، هر شاخص توسط خبرگان بر اساس طیف فازی مثلی (L, M, U) امتیازدهی شد و مقادیر دی‌فازی استخراج گردید. در ادامه با توجه به حد آستانه اختلاف بین دو راند (۰/۱۰) راند دوم جهت تثبیت نظرات اجرا شد.

جدول ۴ - خلاصه روش دلفی فازی

نام متغیر	(L,M,U) راند اول	(L,M,U) راند دوم	اختلاف (Δ)	انتخاب
قیمت‌گذاری کربن	(۰/۷۲، ۰/۸۰، ۰/۸۸)	(۰/۷۳، ۰/۸۲، ۰/۹۰)	۰/۰۴	بله
هزینه سرمایه‌گذاری	(۰/۷۰، ۰/۷۹، ۰/۸۷)	(۰/۷۰، ۰/۷۹، ۰/۸۷)	۰/۰۰	بله
قیمت جهانی فلزات	(۰/۷۱، ۰/۸۰، ۰/۸۸)	(۰/۷۲، ۰/۸۰، ۰/۸۸)	۰/۰۰	بله
نوسانات بازار صادرات	(۰/۴۵، ۰/۵۵، ۰/۶۳)	(۰/۴۶، ۰/۵۷، ۰/۶۶)	۰/۰۷	خیر
مشوق‌های مالیاتی	(۰/۴۸، ۰/۵۷، ۰/۶۵)	(۰/۵۰، ۰/۵۹، ۰/۶۸)	۰/۰۸	خیر
سطح رفاه اجتماعی	(۰/۷۳، ۰/۸۱، ۰/۸۹)	(۰/۷۳، ۰/۸۱، ۰/۸۹)	۰/۰۰	بله
پذیرش اجتماعی فناوری	(۰/۷۴، ۰/۸۲، ۰/۹۰)	(۰/۷۴، ۰/۸۲، ۰/۹۰)	۰/۰۰	بله
فرهنگ ایمنی	(۰/۵۲، ۰/۶۰، ۰/۶۸)	(۰/۵۴، ۰/۶۲، ۰/۷۱)	۰/۰۸	خیر
کیفیت زندگی	(۰/۵۶، ۰/۶۴، ۰/۷۱)	(۰/۵۷، ۰/۶۶، ۰/۷۴)	۰/۰۷	خیر
نوآوری فناورانه	(۰/۷۵، ۰/۸۳، ۰/۹۱)	(۰/۷۵، ۰/۸۳، ۰/۹۱)	۰/۰۰	بله
آموزش زیست‌محیطی	(۰/۶۹، ۰/۷۷، ۰/۸۵)	(۰/۷۱، ۰/۷۹، ۰/۸۷)	۰/۰۰	بله
دیجیتال‌سازی فرآیندها	(۰/۵۰، ۰/۵۹، ۰/۶۷)	(۰/۵۲، ۰/۶۱، ۰/۶۹)	۰/۰۸	خیر
هوش مصنوعی در استخراج	(۰/۷۳، ۰/۸۲، ۰/۸۹)	(۰/۷۳، ۰/۸۱، ۰/۸۹)	۰/۰۰	بله
زیرساخت‌های فناورانه	(۰/۵۴، ۰/۶۲، ۰/۷۰)	(۰/۵۶، ۰/۶۵، ۰/۷۴)	۰/۰۸	خیر
ذخیره‌سازی انرژی	(۰/۴۹، ۰/۵۷، ۰/۶۵)	(۰/۵۰، ۰/۵۹، ۰/۶۷)	۰/۰۷	خیر
شدت انرژی	(۰/۷۰، ۰/۷۸، ۰/۸۶)	(۰/۷۰، ۰/۷۸، ۰/۸۶)	۰/۰۰	بله
سیستم‌های پایش هوشمند	(۰/۷۳، ۰/۸۱، ۰/۸۹)	(۰/۷۲، ۰/۸۱، ۰/۸۹)	۰/۰۰	بله
انتشار گازهای گلخانه‌ای	(۰/۷۳، ۰/۸۵، ۰/۹۵)	(۰/۴۸، ۰/۵۶، ۰/۶۵)	۰/۰۶	خیر
ارزیابی چرخه حیات	(۰/۵۲، ۰/۶۱، ۰/۶۹)	(۰/۵۲، ۰/۶۱، ۰/۷۰)	۰/۰۵	خیر

میزان مصرف آب	(۰/۶۳، ۰/۵۵، ۰/۴۷)	(۰/۶۶، ۰/۵۷، ۰/۴۸)	۰/۰۵	خیر
سلامت اکوسیستم	(۰/۸۷، ۰/۷۹، ۰/۷۱)	(۰/۸۷، ۰/۷۹، ۰/۷۱)	۰/۰۰	بله
باز یافت پسماند	(۰/۸۸، ۰/۸۰، ۰/۷۲)	(۰/۸۸، ۰/۸۰، ۰/۷۲)	۰/۰۰	بله
تاب‌آوری اقلیمی	(۰/۷۰، ۰/۶۲، ۰/۵۴)	(۰/۶۹، ۰/۶۱، ۰/۵۲)	۰/۰۸	خیر
مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها	(۰/۶۹، ۰/۶۱، ۰/۵۳)	(۰/۷۲، ۰/۶۳، ۰/۵۵)	۰/۰۷	خیر
مشارکت جوامع محلی	(۰/۷۰، ۰/۶۳، ۰/۵۵)	(۰/۷۱، ۰/۶۳، ۰/۵۵)	۰/۰۰	خیر

بر این اساس، برای هر یک از چهار عامل کلان (اقتصادی، اجتماعی، فناوری و زیست‌محیطی) تعداد ۳ متغیر انتخاب و در مجموع ۱۲ متغیر نهایی به‌دست آمد، که در مراحل بعدی تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند (جدول ۵).

جدول ۵ - متغیرهای نهایی بر اساس خروجی دلفی

عامل کلان	مولفه های نهایی
اقتصادی	- هزینه سرمایه‌گذاری (۰/۷۹)
	- سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن (۰/۸۴)
	- قیمت جهانی فلزات (۰/۸۰)
اجتماعی	- سطح رفاه اجتماعی (۰/۸۱)
	- پذیرش اجتماعی فناوری (۰/۸۲)
	- آموزش زیست‌محیطی (۰/۷۹)
فناوری	- نوآوری فناورانه (۰/۸۳)
	- هوش مصنوعی در استخراج (۰/۸۱)
	- سیستم‌های پایش هوشمند محیطی (۰/۸۱)
زیست‌محیطی	- شدت انرژی (۰/۷۸)
	- باز یافت پسماند (۰/۸۰)
	- سلامت اکوسیستم (۰/۷۹)

- تحلیل روابط علی و معلولی مولفه های تصمیم گیری با استفاده از روش دیماتل فازی:

در این مرحله، از روش دیماتل فازی برای تحلیل روابط علی و معلولی بین ۱۲ متغیر نهایی استخراج‌شده از مراحل پیشین استفاده می‌شود. این متغیرها شامل: سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن (M1)، هزینه سرمایه‌گذاری (M2)، قیمت جهانی فلزات (M3)، سطح رفاه اجتماعی (M4)، پذیرش اجتماعی فناوری (M5)، نوآوری فناورانه (M6)، آموزش زیست‌محیطی (M7)، هوش مصنوعی در استخراج (M8)، شدت انرژی (M9)، سیستم‌های پایش هوشمند محیطی (M10)، باز یافت پسماند (M11) و سلامت اکوسیستم (M12) می‌باشند. این کدگذاری به‌منظور تسهیل در نمایش ماتریس‌ها، تحلیل روابط علی و معلولی و ارائه نتایج بصری و گرافیکی در مراحل بعدی تحقیق صورت گرفته است. این کدگذاری، نمایش ماتریس‌ها، تحلیل روابط علی و معلولی و تجسم نتایج را در مراحل بعدی تحقیق تسهیل می‌کند.

روش دیماتل نه تنها امکان شناسایی وابستگی‌های متقابل بین متغیرها، بلکه امکان طبقه‌بندی متغیرها به عنوان عوامل علی (تأثیرگذار) یا معلول (تأثیرپذیر) را در سیستم پیش‌بینی توسعه پایدار معدن فراهم می‌کند. در این مرحله، بر اساس قضاوت‌های ۸۰ متخصص (با استفاده از مقیاس زبانی فازی)، ماتریس تأثیر مستقیم بین ۱۲ متغیر نهایی ساخته شد. نظرات متخصصان با استفاده از اصطلاحات زبانی مانند "بدون تأثیر"، "تأثیر کم"، "متوسط"، "زیاد" و "بسیار زیاد" بیان شد که سپس به اعداد فازی مثلثی معادل آن‌ها تبدیل شدند. پس از تجمیع ارزیابی‌های متخصصان، ماتریس حاصل در جدول ۶ ارائه شده است که ماتریس اولیه فازی تأثیر مستقیم برای هر سه متغیر فازی M، L، U پس از نرمال‌سازی بر مبنای حداکثر مجموع سطری نان داده می‌شود. این ماتریس‌ها گام دوم در روش دیماتل فازی هستند و برای ادامه تحلیل کاربرد دارند.

جدول ۶- ماتریس کل تأثیر (T)

از / به →	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
M1	۰/۰۰۰	۰/۱۷۳	۰/۱۶۹	۰/۱۵۷	۰/۱۵۱	۰/۱۴۵	۰/۱۵۵	۰/۱۷۷	۰/۱۷۱	۰/۱۶۷	۰/۱۷۵	۰/۱۶۱
M2	۰/۱۷۰	۰/۰۰۰	۰/۱۵۲	۰/۱۷۳	۰/۱۶۹	۰/۱۹۱	۰/۱۷۳	۰/۱۵۶	۰/۱۶۹	۰/۱۶۳	۰/۱۵۶	۰/۱۴۲
M3	۰/۱۴۰	۰/۱۸۹	۰/۰۰۰	۰/۱۵۷	۰/۱۷۰	۰/۱۳۵	۰/۱۶۹	۰/۱۳۹	۰/۱۶۸	۰/۱۸۷	۰/۲۰۴	۰/۱۵۷
M4	۰/۱۷۲	۰/۱۵۲	۰/۱۸۷	۰/۰۰۰	۰/۱۴۵	۰/۱۶۵	۰/۱۵۷	۰/۱۸۴	۰/۱۴۵	۰/۱۵۲	۰/۱۳۱	۰/۱۶۹
M5	۰/۱۸۹	۰/۱۶۳	۰/۱۷۶	۰/۱۵۲	۰/۰۰۰	۰/۱۸۱	۰/۱۶۹	۰/۱۸۳	۰/۱۴۶	۰/۱۴۱	۰/۱۳۹	۰/۱۵۶
M6	۰/۱۵۸	۰/۱۷۶	۰/۱۶۷	۰/۱۷۹	۰/۱۶۰	۰/۰۰۰	۰/۱۷۷	۰/۱۶۷	۰/۱۷۸	۰/۱۶۳	۰/۱۵۷	۰/۱۶۵
M7	۰/۱۵۳	۰/۱۴۴	۰/۱۷۹	۰/۱۷۶	۰/۱۷۶	۰/۱۶۰	۰/۰۰۰	۰/۱۷۴	۰/۱۷۷	۰/۱۶۳	۰/۱۶۰	۰/۱۷۵
M8	۰/۱۷۶	۰/۱۶۲	۰/۱۷۵	۰/۱۸۴	۰/۱۸۳	۰/۱۵۷	۰/۱۷۳	۰/۰۰۰	۰/۱۷۸	۰/۱۵۵	۰/۱۵۳	۰/۱۷۰
M9	۰/۱۶۵	۰/۱۶۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۲	۰/۱۸۲	۰/۱۵۴	۰/۱۶۹	۰/۱۷۴	۰/۰۰۰	۰/۱۶۳	۰/۱۵۸	۰/۱۶۶
M10	۰/۱۶۳	۰/۱۶۲	۰/۱۸۳	۰/۱۸۵	۰/۱۸۳	۰/۱۵۷	۰/۱۷۰	۰/۱۷۲	۰/۱۶۱	۰/۰۰۰	۰/۱۷۵	۰/۱۶۴
M11	۰/۱۷۵	۰/۱۶۷	۰/۱۸۹	۰/۱۸۸	۰/۱۸۳	۰/۱۶۴	۰/۱۷۶	۰/۱۷۸	۰/۱۷۸	۰/۱۷۰	۰/۰۰۰	۰/۱۷۶
M12	۰/۱۷۰	۰/۱۶۴	۰/۱۸۴	۰/۱۸۰	۰/۱۸۱	۰/۱۵۱	۰/۱۷۴	۰/۱۷۳	۰/۱۷۵	۰/۱۶۳	۰/۱۷۶	۰/۰۰۰

در جدول ۷، تحلیل نهایی روش دیماتل فازی بر اساس متغیر میانی (M) برای ۱۲ مولفه کلیدی مؤثر در توسعه پایدار معادن ارائه شده می‌باشد.

است. این تحلیل شامل محاسبه شاخص‌های کلیدی مطابق با جدول ۸

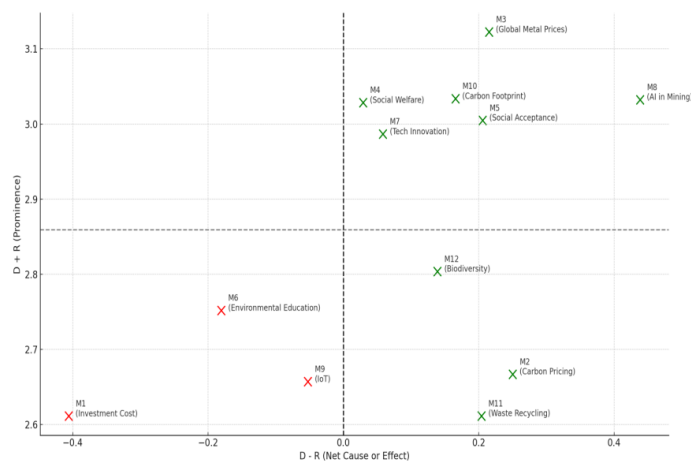
جدول ۷ - تحلیل نهایی روش دیماتل فازی

متغیر	D	R	D + R	D - R
M1	۱/۱۰۲۷۶۴	۱/۵۰۸۵۲۸	۲/۶۱۱۲۹۲	-۰/۴۰۵۷۶۴
M2	۱/۴۵۸۵۳۵	۱/۲۰۸۳۰۱	۲/۶۶۶۸۳۶	۰/۲۵۰۲۳۴
M3	۱/۶۶۸۸۳۵	۱/۴۵۳۴۵۹	۳/۱۲۲۲۹۴	۰/۲۱۵۳۷۶
M4	۱/۵۲۸۷۶۸	۱/۴۹۹۵۲۲	۳/۰۲۸۲۹۰	۰/۰۲۹۲۴۶
M5	۱/۶۰۵۲۲۹	۱/۳۹۹۴۰۳	۳/۰۰۴۶۳۲	۰/۲۰۵۸۲۶
M6	۱/۲۸۵۶۹۳	۱/۴۶۶۰۶۶	۲/۷۵۱۷۵۹	-۰/۱۸۰۳۷۳
M7	۱/۵۲۲۴۷۴	۱/۴۶۴۰۳۳	۲/۹۸۶۵۰۷	۰/۰۵۸۴۴۱
M8	۱/۷۳۵۲۹۷	۱/۲۹۶۷۹۱	۳/۰۳۲۰۸۸	۰/۴۳۸۵۰۶
M9	۱/۳۰۲۳۳۳	۱/۳۵۴۷۴۴	۲/۶۵۷۰۷۷	-۰/۰۵۲۴۱۱
M10	۱/۵۹۹۶۳۹	۱/۴۳۳۸۷۴	۳/۰۳۳۵۱۳	۰/۱۶۵۷۶۵
M11	۱/۴۰۷۷۲۵	۱/۲۰۳۵۸۷	۲/۶۱۱۳۱۲	۰/۲۰۴۱۳۸
M12	۱/۴۷۱۲۹۸	۱/۳۳۲۳۱۸	۲/۸۰۳۶۱۶	۰/۱۳۸۹۸۰

جدول ۸ - تعریف مفاهیم تحلیل در روش دیماتل

شاخص	مفهوم
D (تأثیرگذار بودن)	میزان تأثیرگذاری هر معیار بر سایر معیارها (جمع سطری ماتریس T)
R (تأثیرپذیری)	میزان تأثیرپذیری هر معیار از سایر معیارها (جمع ستونی ماتریس T)
D + R (برجستگی)	میزان اهمیت یا برجستگی هر معیار در کل شبکه روابط
D - R (نوع رابطه)	نوع نقش هر معیار

شکل ۱، نمودار علی و معلولی^۳ متغیرهای کلیدی مؤثر در توسعه پایدار معادن را بر مبنای دو محور ترسیم می‌کند. محور افقی D-R نمایانگر "خالص تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری" است. اگر مقدار مثبت باشد، آن متغیر تأثیرگذار (عامل علی) است و اگر منفی باشد، تأثیرپذیر (عامل معلولی) تلقی می‌شود. محور عمودی D+R میزان "تعامل" متغیر در کل شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار علی و معلولی مولفه های کلیدی مؤثر توسعه پایدار معادن

تأثیرپذیری را کمی سازی می کند، ISM با ایجاد ساختار درختی، سطوح تصمیم گیری را روشن می سازد و نحوه جریان تأثیر میان متغیرها را مرحله به مرحله به تصویر می کشد. تعداد ۱۲ متغیر کلیدی اثرگذار بر توسعه پایدار معادن شناسایی شده اند که از مراحل قبلی شامل دلفی فازی و تحلیل دیماتل فازی استخراج شده اند. جهت بررسی تعیین روابط علی میان متغیرها، از طریق روش دیماتل فازی در پژوهش حاضر انجام شده است. بنابراین به جای پرسشنامه های جدید یا ماتریس قضاوت مستقیم در ISM، از ماتریس تأثیر کل (T) که در دیماتل فازی محاسبه شده استفاده می شود. گام بعدی، تعیین آستانه تأثیرگذاری و تبدیل ماتریس دیماتل به ماتریس دستیابی^۴ می باشد. در این مرحله باید یک آستانه^۵ مناسب تعیین شود تا ماتریس T به یک ماتریس صفر و یک تبدیل گردد. مقادیر بزرگ تر یا مساوی آستانه به صورت ۱ و مقادیر پایین تر به صورت ۰ در نظر گرفته می شوند. گام بعدی تعیین ماتریس دستیابی می باشد. در گام سوم مدل سازی ISM، ماتریس دستیابی بر اساس ماتریس تأثیر مستقیم و یک مقدار آستانه مشخص (در اینجا مقدار آستانه برابر با ۲/۱۲ در نظر گرفته شده) تهیه می شود. این کار برای ساده سازی روابط پیچیده بین متغیرها و تبدیل آن ها به یک ساختار سلسله مراتبی منطقی انجام می شود. سپس این ماتریس پایه برای استخراج سطوح و تحلیل ساختاری استفاده می شود. در جدول ۹، ماتریس دستیابی را مشاهده می کنید.

متغیرهای تأثیرپذیر (معلولی - رنگ قرمز): سیاست های قیمت گذاری کربن (M1)، نوآوری فناوریانه (M6)، شدت انرژی (M9)، این متغیرها در سمت چپ محور عمودی قرار دارند و بیشتر تحت تأثیر سایر متغیرها هستند.

متغیرهای تأثیرگذار (علی - رنگ سبز): هزینه سرمایه گذاری (M2)، قیمت جهانی فلزات (M3)، سطح رفاه اجتماعی (M4)، پذیرش اجتماعی فناوری (M5)، آموزش زیست محیطی (M7)، هوش مصنوعی در استخراج (M8)، سیستم های پایش هوشمند محیطی (M10)، بازیافت پسماند (M11) و سلامت اکوسیستم (M12) این ها نقش رهبری و هدایت گری در شکل گیری آینده توسعه پایدار معادن دارند.

تحلیل ساختار روابط میان متغیرهای کلیدی توسعه پایدار در معادن:

در این پژوهش، مدل سازی ساختاری تفسیری به عنوان رویکردی مکمل برای تحلیل ساختار روابط میان متغیرهای کلیدی توسعه پایدار در معادن با محوریت فناوری های انرژی پاک و سناریوی به کار گرفته می شود. هدف اصلی این مرحله، تعیین سطح و جایگاه هر یک از متغیرها در ساختار علی - معلولی و ارائه یک نمای سلسله مراتبی از روابط میان آن ها است تا در فرآیند برنامه ریزی و سیاست گذاری، مسیرهای اثرگذاری بهتر شناسایی شود. روش ISM در این تحقیق به صورت مکمل روش دیماتل فازی عمل می کند. در حالی که دیماتل فازی شدت روابط تأثیرگذاری و

4- Reachability Matrix

5- Threshold

جدول ۹- ماتریس دستیابی

عنوان متغیر	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن	M1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه سرمایه‌گذاری	M2	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
قیمت جهانی فلزات	M3	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سطح رفاه اجتماعی	M4	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
پذیرش اجتماعی فناوری	M5	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نوآوری فناورانه	M6	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
آموزش زیست‌محیطی	M7	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
هوش مصنوعی در استخراج	M8	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
شدت انرژی	M9	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	M10	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
بازیافت پسماند	M11	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سلامت اکوسیستم	M12	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

• AS^۶: مجموعه متغیرهایی که بر آن متغیر تأثیر می‌گذارند.
 • IS^۷ از اشتراک دو مجموعه بالا تعیین می‌شود.
 اگر RS و IS برای یک متغیر برابر باشند، آن متغیر در سطح بالای سلسله‌مراتب قرار می‌گیرد و از ماتریس حذف شده و همین فرآیند برای سایر متغیرها ادامه می‌یابد تا تمام سطوح تعیین شوند.
 در جدول ۱۰، سطح‌بندی متغیرها نشان داده شده است.

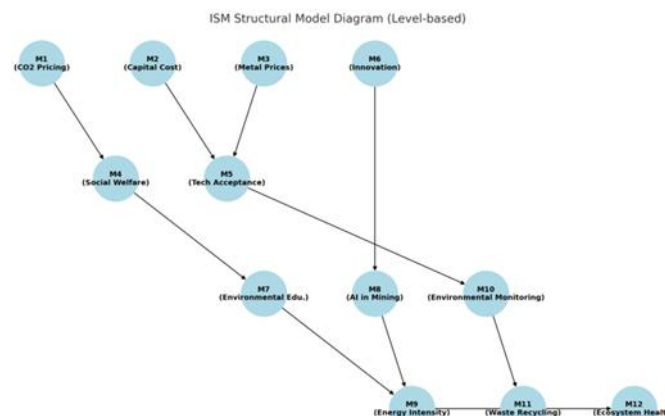
در گام بعدی سطح‌بندی سطوح مدل مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در این گام از، تحلیل سطح‌بندی انجام می‌شود. هدف این مرحله تعیین جایگاه هر متغیر در سطوح مختلف ساختار سلسله‌مراتبی است. برای این منظور، از دو مجموعه برای هر متغیر استفاده می‌شود:
 • RS^۸: مجموعه متغیرهایی که یک متغیر می‌تواند بر آن‌ها تأثیر بگذارد (از روی ماتریس دستیابی).

جدول ۱۰- سطح‌بندی متغیرها

سطح ۱:	M11 بازیافت پسماند / M12 سلامت اکوسیستم
سطح ۲:	M10 سیستم‌های پایش هوشمند محیطی / M9 شدت انرژی
سطح ۳:	M8 هوش مصنوعی در استخراج / M7 آموزش زیست‌محیطی
سطح ۴:	M6 نوآوری فناورانه / M5 پذیرش اجتماعی فناوری
سطح ۵:	M4 سطح رفاه اجتماعی
سطح ۶:	M2 هزینه سرمایه‌گذاری / M3 قیمت جهانی فلزات
سطح ۷:	M1 سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن

شکل ۲، نمودار ساختار مدل ISM با سطوح مختلف نشان داده می‌شود. این مدل نمایانگر مسیرهای علی بین متغیرهاست، از عوامل پایه مانند سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن (M1) و هزینه سرمایه‌گذاری (M2) تا متغیرهای سطح بالا مانند سلامت اکوسیستم (M12). شکل ۲، تصویری شفاف از تأثیرگذاری و وابستگی متغیرها ارائه می‌دهد و در تدوین راهبردهای آینده‌نگر توسعه پایدار در معادن بسیار مؤثر است.

متغیرهای M1، M2 و M3 در پایین‌ترین سطح و به‌عنوان متغیرهای ریشه‌ای شناخته می‌شوند که سایر متغیرها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مقابل، M11 و M12 در بالاترین سطح قرار دارند و بیش‌ترین تأثیر را از سایر عوامل می‌پذیرند. ساختار سلسله‌مراتبی به ما نشان می‌دهد که طراحی مداخلات راهبردی باید از سطوح پایین شروع شود تا به متغیرهای بالایی مانند حفاظت محیط‌زیست و بازیافت دست یافت.



شکل ۲- نمودار ساختار مدل ISM با سطوح مختلف

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هماهنگی میان‌بخشی هستند. در مقابل، متغیرهایی مانند شدت انرژی، سیستم‌های پایش هوشمند محیطی، بازیافت پسماند و سلامت اکوسیستم به‌عنوان عوامل وابسته معرفی می‌شوند. این متغیرها در سطوح بالاتر ساختار قرار دارند و اغلب به عنوان پیامد یا خروجی تأثیرپذیر از سایر متغیرها در نظر گرفته می‌شوند. به عبارتی دیگر، میزان بهبود این متغیرها به شدت به اثربخشی مدیریت در متغیرهای پایه و واسط بستگی دارد. در نتیجه، تحلیل ساختاری نشان می‌دهد که برای دستیابی به توسعه پایدار معادن با رویکرد سناریوی انتشار خالص صفر، تمرکز راهبردی باید بر هدایت متغیرهای پایه و ارتقاء هماهنگی با متغیرهای میانی باشد تا بتوان در نهایت به بهبود عوامل وابسته دست یافت. این رویکرد همچنین به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا منابع و اقدامات را به گونه‌ای تخصیص دهند که بیش‌ترین تأثیر را در بهبود عملکرد کل سیستم داشته باشد. در جدول ۱۱، مقایسه‌ای بین نتایج دو روش دیماتل فازی و ISM ارائه گردیده است. این جدول نشان می‌دهد که هر متغیر در کدام نقش (عامل محرک یا وابسته) و در چه سطحی قرار دارد. سه مولفه قیمت‌گذاری کربن، هزینه سرمایه‌گذاری، قیمت جهانی فلزات به‌عنوان عامل پایه‌ای و مولفه نوآوری فناورانه به‌عنوان عامل محرک در سطح ۱ قرار گرفتند.

در تفسیر مدل ساختاری که بر اساس ۱۲ متغیر کلیدی توسعه پایدار معادن طراحی شده، هدف اصلی تحلیل روابط علی و جهت‌دار بین متغیرها و استخراج بینش راهبردی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری است. در این مدل، متغیرهایی که در سطوح پایین‌تری از ساختار قرار گرفته‌اند، به‌عنوان عوامل پایه یا نیروی پیشران شناخته می‌شوند. این‌ها متغیرهایی هستند که بیش‌ترین تأثیر را بر سایر متغیرها دارند و نقشی کلیدی در شکل‌گیری و هدایت پویایی کل سیستم ایفا می‌کنند. بر این اساس، سه متغیری سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، هزینه سرمایه‌گذاری و قیمت جهانی فلزات به‌عنوان عوامل پایه شناخته می‌شوند. این متغیرها نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم سیاست‌ها، سرمایه‌گذاری‌های کلان و پایداری اقتصادی در حوزه معادن دارند. این عوامل از نظر ساختار مدل، نقاط آغاز زنجیره‌های تأثیرگذاری هستند و مسیر توسعه سایر متغیرها را جهت‌دهی می‌کنند. در سطوح میانی مدل، متغیرهایی مانند پذیرش اجتماعی فناوری، نوآوری فناورانه، آموزش زیست‌محیطی و هوش مصنوعی در استخراج قرار گرفته‌اند که نقش‌های ترکیبی از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری را دارا می‌باشند. این متغیرها پل‌های ارتباطی بین عوامل پایه و متغیرهای وابسته هستند و برای موفقیت سیاست‌های کلان، نیازمند پشتیبانی و

جدول ۱۱- مقایسه‌ای میان نتایج روش دیماتل فازی و ISM

عنوان متغیر	نقش در دیماتل فازی	نقش در ISM	سطح در ISM
سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن	تأثیرگذار (علت)	عامل پایه	سطح ۱
هزینه سرمایه‌گذاری	تأثیرگذار (علت)	عامل پایه	سطح ۱
قیمت جهانی فلزات	تأثیرگذار (علت)	عامل پایه	سطح ۱
سطح رفاه اجتماعی	نسبتاً وابسته	میانجی	سطح ۲
پذیرش اجتماعی فناوری	نسبتاً وابسته	میانجی	سطح ۲
نوآوری فناوریانه	تأثیرگذار (علت)	عامل محرک	سطح ۱
آموزش زیست‌محیطی	وابسته	وابسته	سطح ۳
هوش مصنوعی در استخراج	وابسته	وابسته	سطح ۳
شدت انرژی	وابسته	وابسته	سطح ۴
سیستم‌های پایش هوشمند محیطی	نسبتاً وابسته	وابسته	سطح ۳
بازيافت پسماند	وابسته	وابسته	سطح ۴
سلامت اکوسیستم	وابسته	وابسته	سطح ۴

مطابق جدول ۱۱، متغیرهایی چون سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، هزینه سرمایه‌گذاری، قیمت جهانی فلزات و نوآوری فناوریانه در هر دو روش به‌عنوان محرک‌های اصلی و پیش‌ران‌های ساختاری تحلیل شده‌اند. این هماهنگی بین دو روش، دقت و روایی یافته‌ها را تقویت می‌کند. در مقابل، متغیرهایی نظیر شدت انرژی، بازیافت پسماند و سلامت اکوسیستم در پایین‌ترین سطح قرار دارند که نشان می‌دهد موفقیت آن‌ها نیازمند فراهم شدن زیرساخت‌های بالادستی‌تر است. متغیرهای میانی مانند پذیرش اجتماعی فناوری و آموزش زیست‌محیطی نقش واسط در انتقال اثرات دارند و نقطه‌های کلیدی مداخله سیاست‌گذارانه هستند. با توجه به یافته‌های پژوهش، سیاست‌گذاران و مدیران بخش معدن باید تمرکز اصلی خود را بر تقویت و هدایت متغیرهای پایه همچون سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، هزینه سرمایه‌گذاری و قیمت جهانی فلزات قرار دهند، زیرا این متغیرها

بیش‌ترین اثرگذاری را بر سایر اجزای سیستم دارند. طراحی سیاست‌های حمایتی مالی و سرمایه‌گذاری‌های هوشمند می‌تواند زمینه را برای توسعه فناوری‌های نوین و پذیرش اجتماعی آن‌ها فراهم سازد. در سطح میانی، تقویت آموزش زیست‌محیطی و ترویج نوآوری فناوریانه از طریق حمایت از پژوهش‌های صنعتی، ایجاد زیرساخت‌های دیجیتال و بهره‌گیری از هوش مصنوعی در استخراج ضروری است تا پل ارتباطی میان عوامل پایه و پیامدهای نهایی ایجاد شود. در نهایت، تمرکز بر متغیرهای وابسته نظیر کاهش شدت انرژی، ارتقای سیستم‌های پایش هوشمند محیطی، بازیافت پسماند و بهبود سلامت اکوسیستم باید به‌عنوان خروجی سیاست‌های کلان در نظر گرفته شود. این رویکرد موجب خواهد شد منابع محدود به‌گونه‌ای تخصیص یابند که بیشترین اثر را در دستیابی به اهداف توسعه پایدار معادن و همسویی با سناریوی انتشار خالص صفر داشته باشند.

References

1. 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>
2. 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>
3. 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]
4. 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>
5. 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]
6. Bakhshmiri, H., Mehryar 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]
7. 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>
8. 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>
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. Dönmezçelik, O., Koçak, E., & Örkücü, 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>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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>
18. 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>
 19. 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]
 20. Mirzei, 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>
 21. 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]
 22. 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>
 23. 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>



Integrated Modeling of Key Factors and Their Interrelationships in Achieving Sustainable Mining Development under the NZE Scenario

MohamadReza 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

Alireza Alinezhad

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

Extended Abstract

Received: 13 Jul 2025**Accepted:** 13 Sep 2025**Keywords:** Sustainable development, NZE scenario, mines, modeling, ISM, Dematel

Introduction: Sustainable development in the mining sector, as one of the infrastructure industries, plays a key role in the transition to a low-carbon economy and the realization of the net zero emission scenario. On the one hand, this industry is known as an engine of economic growth and a supplier of raw materials for new technologies, and on the other hand, it leaves significant impacts on the environment and local communities. Therefore, identifying key variables and analyzing the relationships between them is an undeniable necessity to achieve a sustainable future in this sector.

Materials and Methods: The present study is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in nature. The statistical population included 80 experts in the fields of mining, environment, and energy policy, who were selected using purposive and snowball sampling methods. First, the variables affecting the sustainable development of mines were identified and finalized using the fuzzy Delphi method. Then, the causal relationships between the variables were analyzed using the fuzzy Dematel method, and finally, the structure of the relationships between the key variables was developed using interpretive structural modeling (ISM).

Results and Discussion: Based on the results of the fuzzy Delphi, 12 key variables were identified in four dimensions: economic, social, technological, and environmental. Dematel analysis showed that variables such as investment cost, global metal prices, social welfare level, and environmental education are in the influential group, while variables such as energy intensity, waste recycling, and ecosystem health are more influential. In interpretive structural modeling, three variables of carbon pricing policies, investment cost, and global metal prices were identified as basic and driving factors that play a key role in guiding other variables. Intermediate variables such as social acceptance of technology and technological innovation played a mediating role, and dependent variables such as energy intensity and ecosystem health were identified as final outputs. The comparison of the two methods, Dematel and interpretive structural modeling, shows a high degree of consistency of the results and the validity of the findings.

Conclusion: The results show that achieving sustainable mining development and alignment with the net zero emission scenario requires policy focus on basic variables and coordination between intermediate variables in order to ultimately achieve desirable environmental and social outcomes. This structural model can help policymakers allocate resources optimally and facilitate the transition to sustainable mining. Based on the findings, it is recommended that policymakers, in the first step, design transparent carbon pricing mechanisms and financial supports to reduce investment costs. In the second step, support programs for technological innovation and the development of artificial intelligence in mining should be created to strengthen social acceptance of technology and environmental education. In the third step, by improving the smart monitoring system, recycling infrastructure, and promoting energy efficiency, it is possible to achieve environmental goals and improve ecosystem health. This three-step path can be a practical roadmap for future mining policy and planning within the framework of sustainable development and a net zero emissions scenario.

Corresponding author: Sadegh Abedi**Address:** PhD student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran**Tel:** +989128173662**Email:** abedi.sadegh@iau.ac.ir**Citation:** Karimi M R, Abedi S, Alinezhad A. Integrated Modeling of Key Factors and Their Interrelationships in Achieving Sustainable Mining Development under the NZE Scenario. *Journal of New Researches in Environmental Engineering*. 2025; 3(10): 25-40.

© 2024, This article published in *Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE)* as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.