نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۳۷۱ تا ۳۳۸۶
DOI: 10.22060/ceej.2021.17885.6710

تلفیق تکنیک‌های تجربی انتخاب روش استخراج معادن با تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (مطالعه موردی: معدن سرب و روی مهدی‌آباد)

سجاد درگاه پور[۱]، رضا شکورشهابی[۱*] ، فرهاد صمیمی نمین[۲]، محسن جمشیدی[۳]

[۱] گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
[۲] گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
[۳] شرکت مهندسین کاوشگران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۲۱

کلمات کلیدی:
انتخاب روش استخراج معدن
تصمیم‌گیری چند معیاره فازی
تحلیل سلسله مراتبی فازی پرامیتی
سرب و روی مهدی‌آباد

خلاصه: انتخاب روش استخراج معدن به عنوان یکی از تصمیم گیری های مهم در مطالعات مفهومی و پیش امکان‌سنجی طرح های معدنی، با هدف معرفی کم‌هزینه‌ترین روش بهره برداری می باشد، که در هماهنگی با مشخصات ذخیره از قبیل زمین‌شناسی، هندسی و ژئومکانیکی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی، فنی و اقتصادی صورت می گیرد. تکنیک های انتخاب روش استخراج را می‌توان در سه دسته تکنیک های کیفی، الگوهای تجربی و تصمیم‌گیری طبقه بندی کرد. در این تحقیق برای رفع نقاط ضعف الگوهای تجربی، با تلفیق آن با تکنیک سلسله مراتب تحلیلی فازی و تصمیم گیری پرامیتی فازی، روش‌های مناسب استخراج معدن سرب و روی مهدی‌آباد بررسی و پیشنهاد شد. در این الگو، ابتدا با استفاده از تکنیک های تجربی نیکلاس، نیکلاس اصلاح شده، UBC و UBC اصلاح شده، گزینه‌های محتمل شامل استخراج روباز، استخراج از طبقات فرعی، اتاق و پایه، کندن و آکندن که بیشترین امتیاز را کسب کرده بودند انتخاب، سپس معیارهای مؤثر در انتخاب روش استخراج مانند فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی و غیره، بر اساس نظرات خبرگان و همچنین مرور و بررسی تحقیقات انجام شده تعیین و وزن آن ها بر اساس تکنیک FAHP گروهی محاسبه گردید. در مرحله آخر با پیاده‌سازی تکنیک پرامیتی فازی، اولویت‌بندی روش استخراج انجام گرفت. بر این اساس روش استخراج روباز با بیشترین امتیاز به عنوان مناسب ترین گزینه انتخاب شد. الگوی پیشنهادی مزایایی از جمله وزن دهی شاخص ها به روش FAHP، بکارگیری اطلاعات فازی مشابه شرایط واقعی در پروسه انتخاب و همچنین داشتن مبانی تئوری قوی بر پایه FPROMETHEE می‌باشد.

۱- مقدمه

هدف از انتخاب روش استخراج معادن، انتخاب مناسبترین روش بهره برداری از ذخیره بر مبنای ویژگیهای زمین شناسی، هندسی و ژئومکانیکی و غیره با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی، فنی و اقتصادی میباشد، به نحوی که کمترین هزینه و بیشترین سود بدست آید. معمولاً پس از پیاده سازی روش استخراج، جایگزین کردن آن با روش دیگر دشوار است، زیرا باعث ایجاد هزینه‌های سرمایه گذاری و آمادهسازی جدید می‌شود. اگر چه انتخاب روش استخراج معدن بستگی به ویژگی‌های زمین‌شناسی و هندسی معدن دارد، لیکن تأثیرگذاری آن بر پارامترهای مختلف اقتصادی عملیات بهره برداری، بررسی‌های تکمیلی انتخاب صحیح روش بهره‌برداری ذخیره معدنی را توجیه‌پذیر می‌کند [۱]. یکی از چالشهای پیشرو، عدم وجود یک فرمول خاص برای انتخاب روش استخراج است. با توجه به حساسیت این تصمیمگیری راه حل‌های مختلفی توسط محققین مختلف ارائه شده است [۲]. تکنیک‌های انتخاب روش استخراج را می‌توان در سه گروه الگوهای کیفی، الگوهای امتیازدهی عددی و الگوهای تصمیم‌گیری طبقه بندی کرد. الگوهای کیفی انتخاب روش استخراج به عنوان راهنمای اولیه انتخاب، بر مبنای استفاده از چارت‌ها و یا جداول طبقه بندی تکنیک های استخراج، ارائه گردیده است. در این

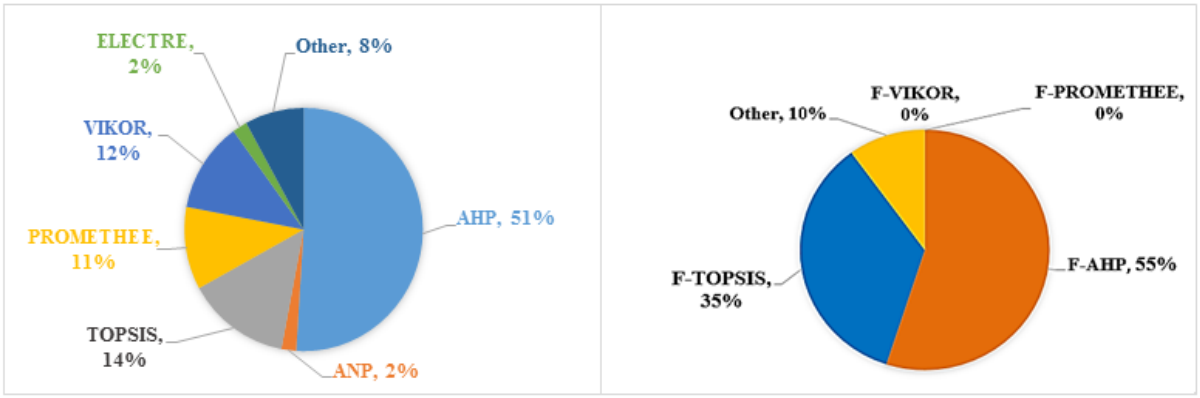
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shahabi@eng.ikiu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

الگوها، مقایسه مشخصات کانسار با شرایط به کارگیری روش‌های استخراجی صورت میگیرد و یک یا گروهی از روش‌های استخراج تحت شرایط مشخصی از ذخیره معدنی (از قبیل شیب، شکل و نظایر آن) پیشنهاد می‌شوند. مبنای روشهای امتیازدهی تجربی انتخاب روش استخراج، وزن‌دهی به شاخص‌های بیان کننده شرایط ذخیره معدنی نظیر عمق، ضخامت، مقاومت و نظایر آن‌ها است. شاخص‌های مؤثر در این الگوها به دستههایی تقسیم شده و برای هر طبقه در هر روش استخراج، امتیازی در نظر گرفته شده است. بالاتر بودن مجموع امتیازات پارامترهای مؤثر برای هر روش، نشانگر تناسب بیشتر روش پیشنهادی با شرایط ذخیره است. در این گونه مطالعات، نتایج حاصله، وابستگی شدیدی به تجربه اشخاص دارند، همچنین اهمیت هر یک از معیارهای انتخاب در نظر گرفته نمی‌شود و عدم قطعیت مربوط به شرایط مرزی دستهبندی به کار رفته برای توصیف متغیرهای ورودی در نظر گرفته نمیشود [۳]. این الگوها، عمدتاً برای انتخاب روش استخراج ذخیره معدنی در مرحله مطالعات مفهومی و پیش‌امکان‌سنجی کارایی دارند. علاوه بر این در الگوهای تجربی، بسیاری از معیارهای مؤثر از جمله معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی و نظایر آن لحاظ نشده است. تعدد معیارهای مؤثر بر انتخاب روش استخراج، نیاز به استفاده از روش‌های علمی کارآمد، مناسب و جامع را ایجاب می‌کند، تا بتوان با لحاظ کردن منطقی و موزون اهمیت این معیارها، به سازوکار رتبه‌بندی جامع و شفاف دست یافت. تکنیکهای مختلف تصمیمگیری چندشاخصه MADM [1] به عنوان ابزار اصلی رتبه بندی در مسائل پیچیده و چند بعدی به کار گرفته می‌شوند. در این‌گونه مسائل تصمیم‌گیرنده معمولاً با در نظرگرفتن معیارهایی دارای اهمیت متفاوت، اقدام به رتبه‌بندی گزینه‌های موجود یا انتخاب یک گزینه از میان گزینه‌های مختلف می‌نماید. در بسیاری از مطالعات گذشته، تکنیک‌های تصمیمگیری چند معیاره جایگزین روش‌های تجربی انتخاب روش استخراج شده است. با توجه به پیچیدگی فرآیند انتخاب روش استخراج مناسب و تأثیر پارامترهای متعدد، جایگزینی روشهای تصمیم‌گیری چند معیاره میتواند موجب رفع نواقص مربوط به تکنیک‌های تجربی از جمله در نظر گرفتن اهمیت برابر معیارها و بسیاری نواقص دیگر شود. لیکن با توجه به ماهیت فنی و اقتصادی مسأله انتخاب روش استخراج و نیز ارتباط متقابل با شرایط محیط، نباید فراموش شود که نمی‌توان به مسأله صرفاً با نگاه تصمیم‌گیری پرداخته شده و روشهای تجربی کنار گذاشته شوند. در واقع روشهای تجربی نتایج تجربیات جهانی معدن‌کاری بوده که در طی سالیان گذشته گردآوری شده و معرف تکنولوژیهای معدن‌کاری موجود و شرایط بکارگیری آن میباشد. لذا به منظور رفع نقطه ضعف مدل‌های تجربی و یا عددی، می‌توان از ترکیب الگوهای تجربی انتخاب روش با تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده نمود. هدف از این مقاله ارائه روش تلفیقی تکنیک‌های تجربی با مدلهای تصمیمگیری می‌باشد تا با فیلترینگ اولیه روشهای تجربی از تعداد گزینهها کاسته شده و تصمیم‌گیرنده بتواند فرآیند تصمیم‌گیری را با گزینه‌های محدودتر، در زمان کمتری انجام دهد. از طرف دیگر بسیاری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره قادر به در نظر گرفتن عدم قطعیت همراه متغیرهای ورودی انتخاب روش استخراج نیستند. درحالی‌که در مسائل انتخاب روش استخراج، آنهم در مرحله طراحی مفهومی و یا پیش‌امکان‌سنجی، تمام و یا قسمتی از داده‌های مسأله تصمیم-گیری چند شاخصه بصورت داده‌های همراه با ابهام و غیرقطعی می-باشند. در این شرایط، استفاده از تکنیک MADM کلاسیک ممکن است با محدودیت‌های عملی جدی مواجه شود. در دهه‌های اخیر بکارگیری الگوهای تصمیمگیری در فرآیند انتخاب روش استخراج جایگزین شیوه‌های تجربی انتخاب شده‌است. همزمان با جایگزینی الگوهای تصمیم‌گیری در فرآیند انتخاب روش استخراج، تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفت و مقالات زیادی به چاپ رسید. در این تحیق با بررسی مقالات فوق مشخص گردید، الگوهای استفاده شده در اکثر تحقیقات داخلی و خارجی از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۹، مطابق شکل ۱ در چند روش تصمیمگیری (اکثراً قطعی) محدود شده‌است. از بین تکنیک‌های تصمیم‌گیری، تکنیک پرامیتی [2] (PROMETHEE) گزینه‌ها را بر اساس توابع ارجحیت تعریف شده نسبت به معیارها مقایسه مینماید. برای مسأله انتخاب روش استخراج، که معیارهای ورودی مبهم هستند، این روش به صورت فازی می‌تواند نتایج مطلوبی را ارائه حاصل نماید. به عنوان یکی از نوآوریهای این تحقیق میتوان به بکارگیری روش پرامیتی فازی در انتخاب روش استخراج اشاره نمود. ادغام محاسبات فازی در تکنیک پرامیتی برای مسأله انتخاب روش استخراج، که داده‌ها مبهم هستند، می‌تواند نتایج مطلوبی را ارائه دهد.

1 Multiple Attributes Decision Making (MADM)

2 Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)



شکل ۱. بررسی کاربرد تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی و قطعی در انتخاب روش استخراج معادن
Fig. 1. Analysis of crisp and Fuzzy MADM aaplication in Mining Method Selection

در این تحقیق، برای بکارگیری مزایای دو روش تجربی و تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، تلفیق تکنیک‌های تجربی و تحلیل سلسله مراتبی فازی[1] (FAHP) و پرامیتی فازی[2] (FPROMETHEE) پیشنهاد خواهد شد. به منظور بررسی کارایی و ارزیابی الگوی پیشنهادی، معدن سرب و روی مهدی‌آباد یزد به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و بررسی خواهد شد. در این الگو سعی میشود تا نتایج تکنیک‌های تجربی توسط مدلهای تصمیمگیری فازی بهبود یابند. فیلترینگ اولیه با مدل های تجربی انجام گرفته و باعث سادهترشدن حل مسأله و کمتر شدن زمان محاسبات میگردد. برای دسترسی به این هدف، ابتدا مدل تلفیقی انتخاب روش استخراج بر اساس تلفیق تکنیکهای تجربی انتخاب روش استخراج، FAHP و FPROMETHEE ارائه خواهد شد. در ادامه کانسار سرب و روی مهدی آباد معرفی و الگو در آن پیاده و نتیجه آن با روش اجرایی مقایسه خواهد شد.

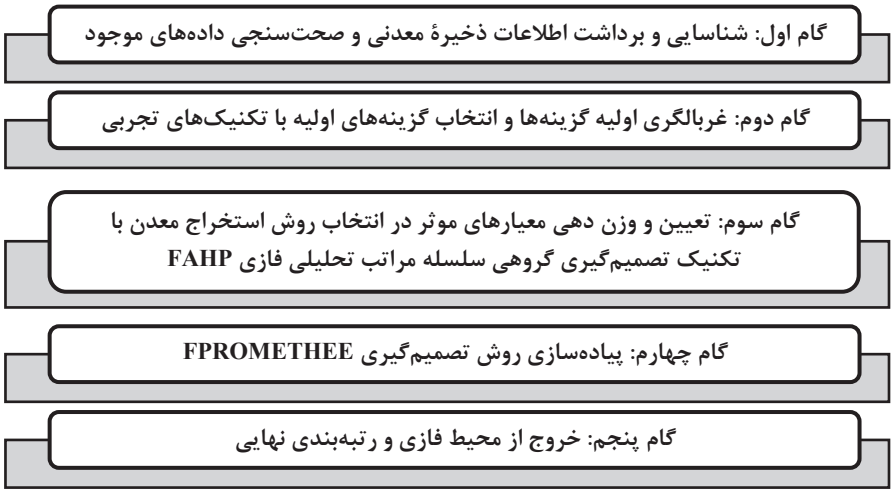
۲- مدل انتخاب روش استخراج بر اساس تلفیق تکنیکهای تجربی، FAHP و FPROMETHEE

در مدل پیشنهادی برای انتخاب روش استخراج، ابتدا با استفاده از تکنیکهای تجربی انتخاب روش استخراج، گزینههای محتمل برای استخراج ذخیرهٔ معدنی مورد نظر از دیدگاه معیارهای هندسی و ژئومکانیکی تعیین میگردد، تا تعداد گزینهها برای مرحله بعد کاهش یابد. این مرحله به ساده شدن مسأله تصمیمگیری و کاهش محاسبات کمک مینماید. مدل تصمیمگیری نیز مبتنی بر تعیین وزن معیارهای مؤثر در انتخاب روش استخراج ذخایر معدنی به صورت سلسله مراتبی فازی (FAHP) و سپس تعیین اولویت گزینهها به کمک تکنیک پرامیتی فازی (FPROMETHEE) میباشد. فلوچارت مدل انتخاب روش استخراج بر اساس تلفیق تکنیکهای تجربی، FAHP و FPROMETHEE در شکل ۲ ارائه شده است. انتخاب روش استخراج طبق این الگو در پنج گام صورت میگیرد. گام اول شامل شناسایی و برداشت اطلاعات ذخیرهٔ معدنی و صحتسنجی اطلاعات کانسار معدنی میباشد. در گام دوم، فیلترینگ اولیه گزینهها بر اساس روشهای تجربی انتخاب روش استخراج انجام میشود، در گام بعدی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به شکل گروهی معیارهای مؤثر در انتخاب مشخص و وزن آنها محاسبه میگردد. در گام چهارم از مدلسازی تصمیمگیری فازی برای حل مسأله استفاده شده و در پایان با غیرفازی‌سازی نتایج، گزینه مناسب انتخاب و پیشنهاد می‌شود. در ادامه جزئیات محاسباتی الگوی تلفیقی روشهای تجربی و تصمیم-گیری چند معیاره فازی ارائه خواهد شد.

۲-۱- الگوهای تجربی انتخاب روش استخراج معادن

الگوهای کیفی اولیه انتخاب روش استخراج به عنوان راهنمای اولیه انتخاب، بر مبنای استفاده از فلوچارت‌ها و یا جداول طبقه‌بندی روش‌های استخراج، ارائه گردیده است. برای تعیین روش استخراج مناسب در این الگو، مقایسه مشخصات کانسار با شرایط بکارگیری روش‌های استخراجی بکار می‌رود. در الگوهای کیفی، یک یا گروهی از روش‌های استخراج تحت شرایط مشخصی از ذخیره معدنی (از قبیل شیب، شکل و نظایر آن) معرفی می‌شوند. از جمله این الگوها می‌توان به

1 Fuzzy Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (FPROMETHEE)
2 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)



شکل ۲. فلوچارت پیشنهادی انتخاب روش استخراج معادن
Fig. 2. Mining method selection process

الگوی پیل[1] (۱۹۴۱)، باشکوف و رایت[2] (۱۹۳۷)، موریسون[3] (۱۹۷۶)، آگاشکف[4] (۱۹۷۸)، همرین[5] (۱۹۸۲) و هارتمن[6] (۱۹۸۷) اشاره نمود [۳]. مبنای تکنیکهای عددی انتخاب روش، وزن‌دهی به شاخص‌های بیانکننده شرایط ذخیره معدنی نظیر عمق، ضخامت، مقاومت و نظایر آن‌ها است و روشی که مجموع امتیاز مربوط به شاخص‌های مختلف در آن بیشتر شود، به عنوان مناسبترین گزینه انتخاب می‌شود. شاخص‌های مؤثر در این الگوها به طبقاتی تقسیم شده و برای هر طبقه در هر روش استخراج امتیازی در نظر گرفته شده است. بالاتر بودن مجموع امتیازات پارامترهای مؤثر در انتخاب روش استخراج برای یک روش نشان‌دهنده هماهنگی بیشتر آن با شرایط ذخیره است [۳]. از جمله این روشها میتوان به تکنیک نیکلاس[7] (۱۹۸۱)، نیکلاس اصلاح شده (۱۹۹۲)، لابشر[8] (۱۹۸۱)، تکنیک UBC[9] (۱۹۹۵) و تکنیک UBC اصلاح شده (۲۰۰۰) اشاره نمود. الگوهای تجربی نمی‌توانند یک جواب قطعی ارائه نماید و روش پیشنهادی فقط می‌تواند به عنوان یک راهنمای اولیه در مطالعات مفهومی استفاده شود [۳]. در مدل تلفیقی پیشنهادی از روشهای تجربی برای فیلتر کردن و کاهش تعداد گزینهها استفاده میشود. این روشها میتوانند برای انتخاب گزینه‌های اولیه و کاهش تعداد آن‌ها مفید باشند.

1 Peele
2 Boshkov and Wright
3 Morison
4 Agoshkov
5 Hamrin
6 Hartman
7 Nicholas
8 Lubscher
9 University of British Colombia (UBC)

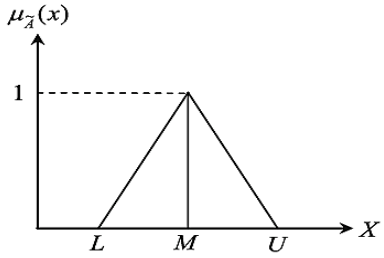
۲-۲- تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره پرامیتی فازی

تکنیک پرامیتی توسط برنس[10] در سال ۱۹۸۲ معرفی و در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۹۴ با همکاری وینکه[11] و مارشال[12] با ایشان توسعه داده شد [۴، ۵ و ۶]. در مطالعات قبلی از میان تکنیک‌های تصمیمگیری چند معیاره، معیارهای متعددی برای انجام مقایسه میان روش‌ها در نظر گرفته شده است که برخی از این معیارها شامل سهولت استفاده، تفسیر پارامترها، پایداری نتایج، میزان تعامل کاربر با مدل و سهولت درک نتایج هستند که همگی معرف کارایی بالاتر تکنیک پرامیتی نسبت به سایر تکنیک‌های شناخته شده می‌باشد [۷]. تکنیک پرامیتی توانایی تحلیل حساسیت نتیجه نسبت به مؤثرترین معیار تصمیم‌گیری را داشته و مضافاً میتواند مسائل با داده‌های نامشخص و فازی را حل نماید [۸]. به همین دلیل ادغام منطق فازی با این تکنیک برای حل مسأله انتخاب روش استخراج که داده‌ها غیر قطعی و همراه با ابهام هستند، می‌تواند نتایج مطلوبی را ارائه دهد [۹]. از دیدگاه قاهرامان[13] تکنیک پرامیتی برخلاف سایر الگوها، یک مقدار مطلوبیت قطعی به هر گزینه تخصیص نمی‌دهد (نه به صورت کلی روی همه معیارها و نه برای هر معیار) بلکه ساختار پرامیتی بر اساس مقایسات زوجی ارجحیت گزینه‌ها استوار شده است [۱۰].

10 Brans
11 Vincke
12 Marschal
13 Kahraman

جدول ۱. عدد فازی مثلثی [۱۴]

Table 1. Triangular fuzzy Number [14]

نوع عدد فازی	شکل	رابطه
مثلثی		$\mu\tilde{A}(x)\begin{cases}0 & x<L\\ \frac{x-L}{M-L} & L\le x\le M\\ \frac{x-U}{U-M} & M\le x\le U\\ 0 & x>U\end{cases}$

ساختار تصمیمگیری بر اساس تکنیک پرامیتی بر اساس مقایسات زوجی ترجیح بین گزینهها بنا نهاده شده و مقدار اختلاف ارجحیت دو گزینه نسبت به یک معیار بررسی میشود [۱۱]. تکنیک پرامیتی برای تصمیمگیرنده بسیار قابل درک است و از اطلاعات مربوط به اهمیت نسبی (یعنی وزن) معیارهای در نظر گرفته شده و اطلاعات مربوط به توابع ترجیحی تصمیمگیرنده استفاده میکند [۱۲]. تصمیمگیری گروهی برای رتبه دهی گزینهها توسط از روش پرامیتی فازی طی مراحل زیر انجام میگیرد. به منظور پیش پردازش اطلاعات مورد نیاز برای اعداد فازی قبل از انجام محاسبات پرامیتی باید مراحل زیر طی گردد [۱۳]:

- تعیین گزینهها و معیارها: این فرآیند با تعیین گزینهها و معیارها توسط یک تسهیلکننده[1] شروع میشود که موضوع تصمیمگیری بر اساس بررسی مستندات قبلی، تجارب و دیدگاهها به تصمیمگیرنده منتقل میشود. نظرات تصمیمگیرندهها توسط تسهیلکننده اخذ میشود؛ به طوری که هر تصمیمگیرنده گزینهها و معیارهای ممکن را پیشنهاد میکند. تلفیق و تجمیع معیارها و گزینهها به صورت جلسات مصاحبه و در صورت نیاز با تکنیک دلفی انجام میگیرد تا در نهایت معیارها و گزینههای نهایی مسأله مشخص شود.

- فازیسازی ورودیها: ترجیحات تصمیمگیرندگان به صورت صفتهای کلامی (متغیرهای بیانی) از قبیل «بسیار قوی» و «ضعیف» به جای اعداد قطعی[2] مدلسازی میشوند. سپس اعداد فازی معادل متغیرهای بیانی در محاسبات بکار گرفته میشود. عدد فازی تعمیمی از اعداد حقیقی است به صورتی که یک عدد فازی نه به یک مقدار بلکه به مجموعهای از مقادیر ممکن اشاره میکند، بهطوریکه هر یک از مقادیر ممکن، وزنی بین ۰ و ۱ (درجه عضویت فازی) دارد. یک عدد فازی میتواند با تابع درجه عضویتهایی به شکل مثلثی[3]، ذوزنقهای[4]، گوسی[5] و زنگولهای[6] تعریف شود. برای اعمال عدم قطعیت همراه مقادیر ورودی الگوی پیشنهادی، به منظور سادهسازی محاسبات و دستیابی سریعتر به پاسخ، از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. دلیل استفاده از عدد مثلثی فازی علاوه بر کاهش تعداد محاسبات و دستیابی به پاسخ سریعتر، مطابقت بهتر صفات کلامی (متغیرهای بیانی) بکار رفته در تحقیق و انتخاب متغیرهای بیانی تحقیق به دلیل آسان بودن فهم آن برای کارشناسان بخش معدن، بوده است. در بیشتر تحقیقات گذشته مرتبط در زمینه معدن نیز از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. لیکن مدل ارائه شده میتواند بر حسب نیاز به سایر اعداد فازی بسط داده شود.

یک عدد فازی مثلثی A بصورت (L، M، U) با تابع عضویت $\mu\tilde{A}(x)$ مطابق با جدول ۱ تعیین میشود که در آن پارامترهای U، M و N به ترتیب بیانگر کمترین مقدار (کران پایین)، محتملترین مقدار (میانه) و بیشترین مقدار (کران بالا) این عدد هستند. پارامتر μ تابع عضویت هر عدد فازی بوده که به هر x مقداری بین صفر و یک میدهد.

برای اجرای محاسبات و پرهیز از نیاز به اصل گسترش فازی در پیادهسازی پرامیتی فازی از فرم LR فازی برای نشان دادن پهنای چپ و راست هر عدد فازی مثلثی استفاده میشود که ابتدا توسط دبیرس و پراد معرفی و توسط گلدرمن و همکاران[7] نیز بکار برده شد. فرم LR فازی یک عدد فازی مثلثی به صورت رابطه (۱) میباشد

1 facilitator
2 Crisp

3 Triangular fuzzy number (TFN)
4 Trapezoidal fuzzy number
5 Gaussian fuzzy number
6 Bell shape fuzzy number
7 Geldermann et al.

جدول ۲. عملیات اصلی در فرم LR فازی [۱۴]
Table 2. Operators in form of Fuzzy *LR* [14]

جمع	$(m,\alpha,\beta)_{LR}+(n,\gamma,\delta)_{LR}=(m+n,\alpha+\gamma,\beta+\delta)_{LR}$
منفی	$-(m,\alpha,\beta)_{LR}=(-m,\beta,\alpha)_{LR}$
تفریق	$(m,\alpha,\beta)_{LR}-(n,\gamma,\delta)_{LR}=(m-n,\alpha+\delta,\beta+\gamma)_{LR}$
ضرب عدد اسکالر	$(m,\alpha,\beta)_{LR}*(n,0,0)_{LR}=(mn,\alpha n,\beta n)_{LR}$
ضرب اعداد فازی	
m>۰ , n>۰	$(m,\alpha,\beta)_{LR}*(n,\gamma,\delta)_{LR}=(mn,m\gamma+n\alpha,m\delta+n\beta)_{LR}$
m<۰ , n>۰	$(m,\alpha,\beta)_{LR}*(n,\gamma,\delta)_{LR}=(mn,n\alpha-m\delta,n\beta-m\gamma)_{LR}$
m<۰ , n<۰	$(m,\alpha,\beta)_{LR}*(n,\gamma,\delta)_{LR}=(mn,-n\beta-m\delta,n\alpha-m\gamma)_{LR}$
نمادی از کران‌ها و میانه‌های اعداد فازی مثلثی می‌باشند. $m,\alpha,\beta,n,\gamma,\delta$	

[۱۷]. در این تحقیق برای اعداد مثلثی فازی که قبلاً تعریف شد، مقایسه گزینه‌ها و معیارها با استفاده از فرم فازی LR که در رابطه (۱) ارائه شده، استفاده می‌شود.

$$(L,M,U)=(M,M-L,U-M)_{LR} \quad (۱)$$

در رابطه (۱): L، M و U به ترتیب کران پایین، میانه و کران بالای هر عدد فازی و LR نماد شکل گسترده چپ و راست عدد فازی میباشد. همچنین برای اجرای مدلهای فازی نیاز به بیان عملیات اصلی می‌باشد که عملیات اصلی مورد نیاز مدل در مراحل محاسبات FAHP و FPROMETHEE در جدول ۲ ارائه شده است. از روابط جدول ۲ برای محاسبه تقریبی حاصل فازی عملیات اصلی بین دو عدد فازی استفاده میشود.

• تعیین وزن معیارها: تصمیم‌گیرندگان اهمیت یا وزن هر معیار را با استفاده از متغیرهای زبانی تعریف می‌کنند. این وزن می‌تواند با استفاده از سایر تکنیک‌های تصمیمگیری چندمعیاره محاسبه گردیده و وارد مدل شود. بردار وزن معیارها ($\tilde{W}$) به شکل رابطه (۲) وارد مدل می‌شود که در آن $\tilde{w}_j$ وزن هر شاخص میباشد که به صورت یک عدد فازی است.

$$\tilde{W}=\left(\tilde{w}_1,\ldots,\tilde{w}_j,\tilde{w}_n\right)\quad j=1,2,\ldots,n \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\tilde{W}$ بردار وزن فازی معیارها و $\tilde{w}_j$ که j از ۱ تا n تغییر می‌کند، وزن هر معیار است.

• ماتریس تصمیم‌گیری فازی: هر پاسخ تصمیم‌گیرنده kام می‌تواند در قالب یک ماتریس (رابطه (۳)) بیان شود که x_{ij} امتیاز گزینه A_i در رابطه با معیار c_j است که در قالب اعداد فازی مثلثی بیان شده اند.

$$\tilde{D}=\begin{matrix}A_1\\A_2\\\vdots\\A_m\end{matrix}\begin{bmatrix}C_1 & C_2 & \cdots & C_n\\ \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n}\\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & & \tilde{x}_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn}\end{bmatrix},i=1,2,\ldots,m;j=1,2,\ldots,n \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، ماتریس $\tilde{D}$ ماتریس تصمیم، و $\tilde{x}_{mn}$ درایه‌های آن A نماد گزینه و C نماد معیارها می‌باشد. در شرایطی که در یک مسأله تصمیمگیری، m گزینه و n معیار توسط kتصمیم‌گیرنده ارزیابی شود، میتوان $\tilde{x}_{ij}^k=\left(l_{ij}^k,m_{ij}^k,u_{ij}^k\right)$ را امتیاز فازی تخصیص داده شده به گزینه iام در ارتباط با معیار jام توسط تصمیم‌گیرنده k ام لحاظ نمود.

• ادغام نظرات تصمیم‌گیرندگان: در این مرحله، وزن‌های فازی معیارها و امتیازات تصمیمگیرندگان را می‌توان با هر یک از تکنیک‌های میانگینگیری تلفیق نمود که در معادلات (۴) و (۵)، روابط فازی محاسبه میانگینگیری هندسی و حسابی بین قضاوت‌های گروهی ارائه شده است [۱۶].

$$l_{ij}=\left(\prod_{k=1}^{k} l_{ijk}\right)^{1/k}, m_{ij}=\left(\prod_{k=1}^{k} m_{ijk}\right)^{1/k}, u_{ij}=\left(\prod_{k=1}^{k} u_{ijk}\right)^{1/k} \quad (۴)$$

$$\tilde{x}_{ij}=\frac{1}{K}\left[\tilde{x}_{ij}^{1}+\tilde{x}_{ij}^{2}+\ldots,\tilde{x}_{ij}^{n}\right] \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵) به ترتیب l_{ij} میانگین هندسی و $\tilde{x}_{ij}$ میانگین حسابی، i شماره گزینه و jشماره معیار و k شماره تصمیم‌گیرنده l کران پایین و m میانه و u کران بالای اعداد فازی می‌باشد. پارامتر $\tilde{x}_{ij}^{n}$ بیان کننده نظر تصمیم‌گیرنده n ام می‌باشد که به صورت یک عدد فازی بیان شده است. میانگین هندسی اعداد غیرفازی مثبت همواره کوچکتر مساوی با میانگین حسابی می‌باشد، که برای اعداد فازی نیز می باید صدق نماید. در میانگین، برآیند اثر داده‌ها به صورت جمع ظاهر می‌شود (مانند میانگین نمرات یا میانگین حقوق و نظایر آن). اگر تأثیر دادهها بر برآیند آثار به صورت ضرب مد نظر باشد (مانند میانگین نرخ رشد تولید سالیانه، نرخ رشد جمعیت و نظایر آن) بکارگیری میانگین هندسی توصیه شده است. از آنجا که اکزل و ساعتی (۱۹۸۳) استفاده از میانگین هندسی را مناسب‌ترین روش برای ترکیب مقایسات زوجی در تصمیمگیری گروهی معرفی کرده‌اند[۱۷]، لذا در مدل پیشنهادی این تحقیق از میانگین هندسی (رابطه (۴)) استفاده شده است.

• ارزیابی دو به دو (زوجی) گزینه‌ها نسبت به هر معیار از نظر هر تصمیم‌گیرنده: در روش پرامیتی فازی امتیاز تفاوت بین دو گزینه برای معیار jام که با ($\tilde{d}_j$) نشان داده شده و یک عدد فازی می‌باشد، از رابطهٔ (۶) بدست می‌آید. در این رابطه C_j نشان‌دهنده تابع عضویت برای معیار jام است که به شکل عدد فازی مثلثی در حالت گسترده فازی LR است.

$$\tilde{d}_j=C_j\left(\tilde{a}\right)-C_j\left(\tilde{b}\right) \quad (۶)$$

• تعیین تابع اولویت و انتخاب آستانه برای هر معیار از نظر هر تصمیم‌گیرنده: برانس و همکارانش شش شکل انتخاب ممکن از توابع اولویت را برای کمک به انتخاب تصمیم‌گیرنده‌ها پیشنهاد دادند. توابع ارجحیت در پرامیتی در اشکال عادی، u شکل، v شکل، هم سطح، v شکل با محدوده خنثی و گوسی شکل پیشنهاد شدهاند [۴]. با توجه به ماهیت هر معیار (مدلسازی) تصمیم‌گیرنده یکی از توابع اولویت را انتخاب می‌نماید. در واقع پرامیتی بر این اصل استوار است که مطلوبیت گزینه‌ها نسبت به معیارها به صورت خطی کاهش و یا افزایش نمی‌یابد.

• محاسبه شاخص برتری برای هر تصمیم‌گیرنده: با توجه به این که وزن معیارها در رتبه‌بندی گزینه‌ها لحاظ شده است، لذا شاخص ترجیحی وزنی برای پرامیتی فازی می‌تواند به صورت رابطه (۷) بیان شود:

$$\pi(\tilde{d}_j)=\sum w_j P(\tilde{d}_j) \quad (۷)$$

در رابطه (۷) پارامتر P نشانگر تابع اولویت انتخاب شده توسط تصمیمگیرنده در مرحله قبل می‌باشد و $P\left(\tilde{d}_j\right)$ مقدار این تابع به ازای $\tilde{d}_j$ است که برای معیار j از رابطه (۶) بدست آمده است.

• محاسبه جریان‌های مثبت و منفی: جریان خروجی فازی (جریان مثبت فازی) ($\tilde{\emptyset}^{+}$) نشان‌دهنده این است که یک گزینه تا اندازه بر گزینه‌های دیگر غلبه کرده است. هر چقدر این مقدار بیشتر باشد آن گزینه، گزینه مطلوب‌تری خواهد بود و جریان ورودی فازی (جریان منفی فازی) ($\tilde{\emptyset}^{-}$) نشان‌دهنده این است که یک گزینه تا چه اندازه توسط گزینه‌های دیگر مغلوب شده است. هر چقدر این مقدار کمتر باشد آن گزینه، گزینه بهتری خواهد بود. جریان خروجی و ورودی فازی برای هر گزینه $\tilde{a}$ به ترتیب از روابط (۸) و (۹) بدست می آید.

$$\tilde{\emptyset}^{+}(\tilde{a})=\frac{1}{m-1}\sum_{x\in A}\tilde{\pi}(\tilde{a},\tilde{x}) \quad (۸)$$

$$\tilde{\emptyset}^{-}(\tilde{a})=\frac{1}{m-1}\sum_{x\in A}\tilde{\pi}(\tilde{x},\tilde{a}) \quad (۹)$$

در روابط (۸) و (۹) مجموعه گزینه‌ها با A که m تعداد اعضای آن بوده و جریان خروجی فازی با $\tilde{\emptyset}^{+}$ و جریان ورودی فازی با $\tilde{\emptyset}^{-}$ نشان داده شده است. منظور از $\tilde{\pi}$ تابع ترجیح فازی می‌باشد.

• محاسبه جریان خالص: جریان خالص ($\tilde{\emptyset}(a)$) گزینهٔ a برابر اختلاف جریان خروجی $\tilde{\emptyset}^{+}$ و جریان ورودی $\tilde{\emptyset}^{-}$ می‌باشد که طبق رابطه (۱۰) بدست میآید.

$$\tilde{\emptyset}(a)=\tilde{\emptyset}^{+}(a)-\tilde{\emptyset}^{-}(a) \quad (۱۰)$$

• غیرفازی‌سازی: به منظور ارائه رتبه‌بندی نهایی از گزینه‌ها، نیاز است که از حالت فازی خارج و نتایج نهایی به شکل غیرفازی ارائه

جدول ۳. مشخصات کانسار برای انتخاب روش استخراج معدن سرب و روی مهدی‌آباد
Table 3. Mehdiabad deposit parameters for mining method selection

ویژگی	شاخص	توضیحات	ویژگی	شاخص	توضیحات
ماده معدنی	شکل	لایه ای	کمر بالای ماده معدنی	RQD	٪۷۰-۴۰
	ضخامت	۴ الی ۲۵ متر		RSS	۸/۴۵
	شیب	۰ الی ۲۰ درجه		RMR	۸۰-۶۰
	توزیع عیار	تدریجی		شرایط درزه‌ها	مستحکم
	عمق	۲۳۰ الی ۳۹۰ متر	کمر پایین ماده معدنی	RQD	٪۷۰-۴۰
	RQD	٪۷۰-۴۰		RSS	۸/۴۵
	RSS	۸/۴۵		RMR	۸۰-۶۰
	RMR	۸۰-۶۰		شرایط درزه‌ها	مستحکم
	شرایط درزه‌ها	مستحکم			

شوند. اعداد فازی مثلثی LR با استفاده از تکنیک یاگر[1] به یک عدد غیرفازی تبدیل می‌شود. بر اساس عدد بدست آمده رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها انجام میگیرد. دفازی کردن یاگر در رابطه (۱۱) ارائه شده است که در آن M میانه، M-L پهنای چپ و U-M پهنای راست یک عدد فازی مثلثی LR می‌باشد.

$$(\mathrm{M}, \mathrm{M}-\mathrm{L}, \mathrm{U}-\mathrm{M})_{LR} = [3M-(M-L)+(U-M)]/3 \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، L کران پایین، M میانه و U کران بالای عدد فازی مثلثی است.

۳- انتخاب روش استخراج معدن سرب و روی مهدی‌آباد با مدل تلفیقی روشهای تجربی، FAHP و FPROMETHEE

به منظور بررسی کارایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، در ادامه مسأله انتخاب روش استخراج معدن سرب و روی مهدی‌آباد بررسی خواهد شد. معدن سرب و روی مهدی‌آباد در حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر یزد در حاشیه کویر مرکزی ایران واقع شده است. ارتفاع این منطقه حدود ۱۸۵۰ متر بالاتر از سطح دریا و با آب و هوای گرم و خشک است. در قسمت‌های شمالی، شرقی، غربی مهدی‌آباد رشته کوه‌هایی با گسترش محدود وجود دارد. مشخصات کانسار سرب و روی مهدی‌آباد که در مراحل انتخاب روش استخراج مورد نیاز می‌باشد، در جدول ۳ ارائه شده است.

با هدف اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی برای انتخاب روش استخراج برای ذخیره معدنی سرب و روی مهدی‌آباد انتخاب روش استخراج انجام شد. در ادامه مراحل مدل شامل پیاده‌سازی تکنیکهای تجربی تعیین روش استخراج، انتخاب روش‌های مطلوب اولیه و تعیین معیارهای ارزیابی روشهای استخراج، تعیین وزن معیارهای تأثیرگذار با FAHP و در پایان تعیین اولویت نهایی با FPROMETHEE پیاده‌سازی و نتایج تفسیر خواهد شد.

۳-۱- گام اول و دوم: گردآوری اطلاعات ذخیرهٔ معدنی و پیاده‌سازی تکنیک‌های تجربی تعیین روش استخراج

در بخش قبل کانسار سرب و روی مهدی‌آباد معرفی شد. اطلاعات مورد نیاز برای انتخاب روش استخراج این کانسار در جدول ۳ به طور خلاصه ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات جدول ۳ برای پارامترهای ژئومتری و ژئومکانیکی ماده معدنی به هر یک از پارامترها امتیازاتی اختصاص می‌یابد. در تکنیکهای تجربی شاخص‌های مؤثر در الگوهای نیکلاس، نیکلاس اصلاح شده و UBC به طبقاتی تقسیم شده و برای هر طبقه در هر روش استخراج امتیازاتی در نظر گرفته میشود. روشهای استخراج در نظر گرفته شده شامل: استخراج روباز (OP)، تخریب بلوکی (BC)، استخراج از طبقات فرعی (SS)، تخریب در طبقات فرعی (SC)، جبهه کار طولانی (LW)، اتاق و پایه (RP)، انباره‌ای (SH)، کندن و آکندن (CF)، برش از بالا (TS) و کرسی چینی (SQ)، می‌باشد. در جدول ۴ امتیازات و طبقه بندی مربوط به معیارهای هندسی از جمله شکل، شیب و ضخامت ماده معدنی در روش نیکلاس ارائه شده است.

در الگوی نیکلاس اصلاح شده مطابق جدول ۵ سه مدل بر اساس تأثیر وزن معیارهای هندسی، ژئومکانیکی و توزیع عیار می‌باشد.

1 Yager

جدول ۴. امتیازات روش‌های استخراج در شرایط مختلف ژئومتری (شکل، شیب و ضخامت ماده معدنی) [۱۸]
Table 4. Mining method scores in different Geometrical condition [18]

	شکل			شیب			ضخامت				
روش	توده‌ای	صفحه‌ای	نامنظم	افقی	متوسط	پرشیب	خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	ضخیم	خیلی ضخیم
Open pit	۴	۲	۳	۳	۳	۱	۱	۲	۳	۴	۴
Block caving	۴	۲	۰	۳	۲	۴	-۴۹	-۴۹	۰	۳	۴
Sublevel stoping	۳	۴	۱	۲	۱	۴	-۱۰	۱	۳	۴	۳
Sublevel caving	۳	۴	۱	۱	۱	۴	-۴۹	-۴۹	۰	۴	۴
Longwall	-۴۹	۴	-۴۹	۴	۰	-۴۹	۴	۳	۰	-۴۹	-۴۹
Room and pillar	۰	۴	۲	۴	۰	-۴۹	۴	۳	۱	-۴۹	-۴۹
Shrinkage	۰	۴	۲	-۴۹	۰	۴	۴	۴	۰	-۴۹	-۴۹
Cut and Fill	۱	۴	۴	۱	۳	۴	۳	۴	۴	۱	۰
Top slice	۱	۲	۰	۴	۲	۰	۱	۱	۰	۲	۱
Square set	۰	۱	۴	۲	۳	۲	۴	۳	۲	۰	۰

جدول ۵. تأثیر وزنی شاخص‌ها در شرایط مختلف در روش نیکلاس اصلاح شده [۱۸]
Table 5. The scores of reserve condition in modified Nicholas Techniques [18]

روش نیکلاس اصلاح شده با تأثیر وزنی ضرایب							
امتیازات ژئومتری		مدل ۱	۱	مدل ۲	۱	مدل ۳	۱
	ماده معدنی		۱		۰/۸		۱/۳
خواص مکانیک سنگی	کمر بالا		۰/۸		۰/۶		۱/۳
	کمر پایین		۰/۵		۰/۴		۱/۳

جدول۶. مجموع امتیازات روش‌های استخراج با استفاده از تکنیک‌های تجربی
Table 6. The total scores of mining method with experimental techniques

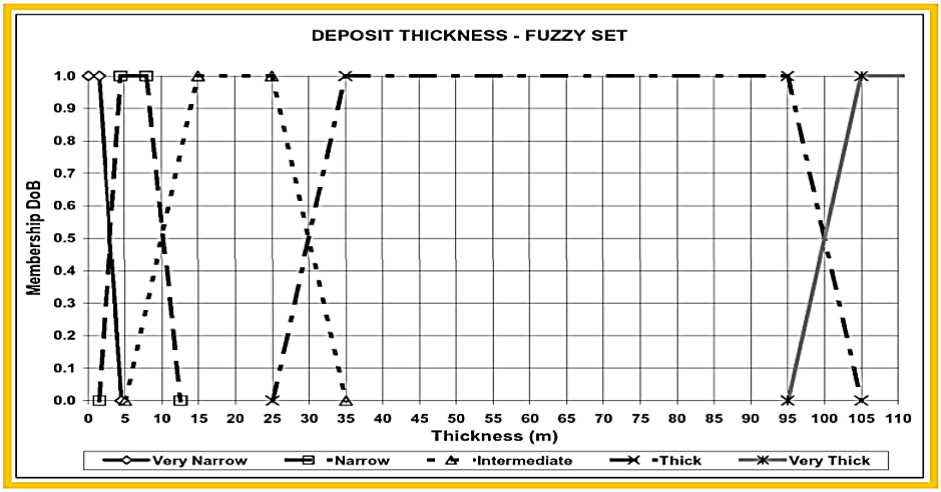
	OP	BC	SS	SC	LW	RP	SH	CF	TS	SQ
	مجموع امتیازات									
تکنیک نیکلاس	۴۷	۲۳	۳۱	۲۶	۲۲	۳۵	۳۰	۲۵	۲۹	۲۶
تکنیک نیکلاس اصلاح شده (مدل ۱)	۳۸/۶	۱۷/۵	۲۵/۴	۲۰/۵	۱۶	۲۹/۲	۲۴/۵	۲۰/۸	۲۳/۵	۲۱/۸
تکنیک نیکلاس اصلاح شده (مدل ۲)	۳۲/۶	۱۴/۸	۲۱/۴	۱۶/۸	۱۳/۸	۲۴/۸	۲۰/۶	۱۷/۸	۱۹/۸	۱۹
تکنیک نیکلاس اصلاح شده (مدل ۳)	۵۷/۸	۲۸/۴	۳۸/۲	۳۲/۹	۲۶/۸	۴۲/۸	۳۷/۲	۳۰/۴	۳۵/۹	۳۱/۱
تکنیک UBC	۳۳	۱۹	۳۹	۲۲	۲۰	۲۹	-۲۱	۳۳	۱۸	۹
تکنیک UBC اصلاح شده	۳۱/۶۱	۲۱/۸۷	۳۲/۸۲	۲۳/۶۲	۲۳/۳۶	۲۲/۲۷	-۰/۹۶	۳۱/۳۳	۱۸/۰۲	۱۳/۷۹

همچنین برای امتیازدهی روش‌های استخراج در الگوی UBC اصلاح شده از نمودارهای فازی استفاده می‌شود که به عنوان نمونه، در شکل ۳ نمودار طبقه‌بندی فازی ضخامت نشان داده شده است. در نهایت، مجموع امتیازات روش‌های استخراج معادن در چهار الگوی تجربی تعیین و محاسبه میشود که مقادیر آن در جدول ۶ ارائه شده است.

با توجه به مجموع امتیازات بدست آمده برای هر روش استخراج برای ذخیره مهدی‌آباد در جدول ۶، چهار روش استخراج که بیشترین امتیاز را بر مبنای تکنیک‌های مختلف تجربی بدست آورده‌اند شامل استخراج روباز، استخراج از طبقات فرعی، اتاق و پایه، کندو آکند می‌باشند انتخاب شدند تا بر مبنای الگوهای تصمیم‌گیری چند معیاره، مورد ارزیابی مجدد قرار گیرند. در جدول ۷ امتیاز نهایی هر یک از روش‌های دارای اولویت به ازای تکنیک‌های تجربی ارائه گردیده است.

۳-۲- گام سوم: تعیین و وزندهی معیارهای ارزیابی با استفاده از تکنیک AHP فازی

با توجه به این که از پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی در الگوهای



شکل ۳. نمودار توزیع درجه عضویت افرازهای فازی ضخامت کانسار [۱۹]
Fig. 3. Fuzzy membership functions for Deposit Thickness

تجربی استفاده شده است، مهم‌ترین معیارهای اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی مؤثر در انتخاب روش استخراج بررسی گردید و بر اساس نظرات خبرگان و همچنین مرور و بررسی تحقیقات انجام شده، مطابق جدول ۷، هفت معیار کمی فنی و اقتصادی شامل: نرخ تولید، توان تولید، عمر معدن، هزینه عملیاتی، هزینه سرمایه‌ای، بازیابی و ترقیق و شش معیار کیفی فنی شامل: صعوبت اجرایی، انعطاف‌پذیری روش، سطح مکانیزاسیون، تأثیرات زیست‌محیطی، ایمنی عملیات و دسترسی به نیروی کار ماهر انتخاب گردید که به عنوان معیارهای سیزده گانه ارزیابی روش استخراج با تصمیم‌گیری چند معیاره فازی تعیین گردیدند.

پس از تعیین معیارها، به منظور تعیین میزان اهمیت هر یک، پرسشنامه‌ای تهیه شد و توسط ۱۵ نفر از کارشناسان خبره و با تجربه تکمیل شد. قضاوتهای انجام شده در ماتریس مقایسات زوجی باید سازگار باشند که این مسأله در AHP با محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس کنترل میگردد. از آنجا که در در مدل از اعداد فازی مثلثی استفاده شده برای محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی میتوان نرخ ناسازگاری میانهها و متوسط کرانهای بالا و پایین اعداد فازی مربوط به قضاوتها را در یک ماتریس مربعی مقایسه زوجی کنترل نمود. در این تحقیق نرخ ناسازگاری میانه مقایسات زوجی و متوسط کرانهای بالا و پایین مقایسات زوجی محاسبه و کنترل گردید. نرخ ناسازگاری میانگین کرانهای اعداد فازی قضاوتها و میانه اعداد فازی به ترتیب برابر ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۳۲ بدست آمد، که کمتر از ۰/۱

جدول ۷. معیارهای مؤثر در انتخاب روش استخراج
Table 7. Effective criteriaes in Mining Method Selection (MMS)

معیار	نماد	معیار	نماد
نرخ تولید	C۱	ترقیق	C۸
توان تولید	C۲	انعطاف‌پذیری روش	C۹
عمر معدن	C۳	سطح مکانیزاسیون	C۱۰
هزینه عملیاتی	C٤	تأثیرات زیست‌محیطی	C۱۱
هزینه سرمایه‌ای	C٥	ایمنی عملیات	C۱۲
صعوبت اجرایی	C٦	دسترسی به نیروی کار ماهر	C۱۳
بازیابی	C۷		

بوده و نشانگر آن است که قضاوتها سازگار می‌باشد. در نهایت وزن نهایی معیارها با استفاده از تکنیک AHP فازی در جدول ۸ و نمودار اهمیت هر یک از معیارها در شکل ۴ ارائه شده است.

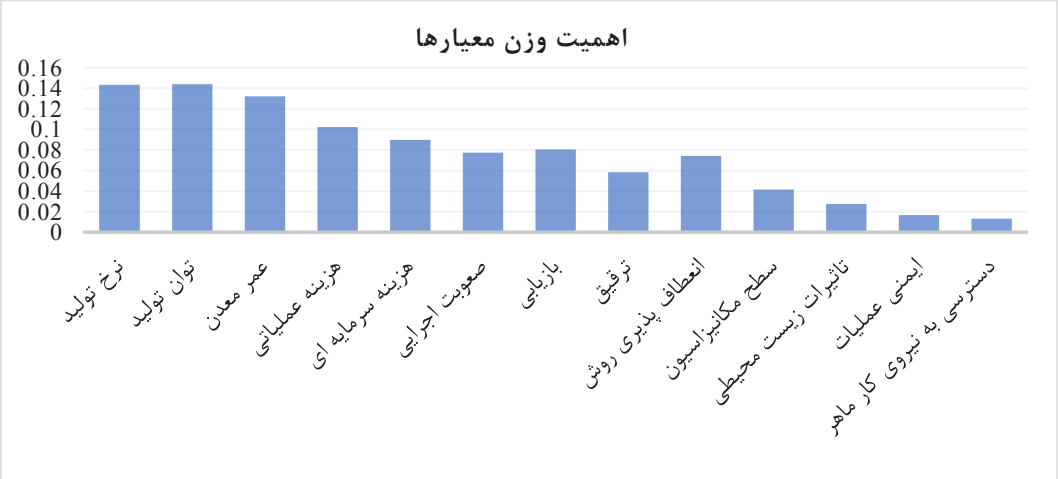
۳-۳- گام چهارم: پیاده‌سازی تکنیک پرامیتی فازی

مرحله ۱ - تعیین معیارها و گزینه‌های روش استخراج: در این مسأله ۱۳ معیار مطابق جدول ۷ و چهار گزینه محتمل تعیین شده بر اساس نتایج تکنیک‌های تجربی به عنوان گزینه‌های مسأله تعیین روش استخراج مناسب تعیین شدند.

مرحله ۲ - تعریف اعداد فازی برای ارزیابی معیارها: در این تحقیق، هفت عبارت کلامی برای ارزیابی گزینه‌ها نسبت به معیارها و

جدول ۸. وزن‌های محاسبه شده با استفاده از تکنیک FAHP
Table 8. Importance weight of the criteria calculated by FAHP

نماد معیار	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
وزن نرمال نشده	۰/۹۹۶	۱	۰/۹۱۷	۰/۷۱۱	۰/۶۲۵	۰/۵۳۶	۰/۵۵۹	۰/۴۰۵	۰/۵۱۵	۰/۲۸۸	۰/۱۹	۰/۱۱۶	۰/۰۹۱
وزن نرمال شده	۰/۱۴۳	۰/۱۴۴	۰/۱۳۲	۰/۱۰۲	۰/۰۹	۰/۰۷۷	۰/۰۸	۰/۰۵۸	۰/۰۷۴	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳



شکل ۴. نمودار اهمیت معیارهای حاصل از FAHP
Fig. 4. Graph of importance of criteria obtained from FAHP

مقادیر فازی معادل هرعبارت مطابق جدول ۹ و شکل ۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مرحله ۳- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری: برای تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری از مصاحبه شوندگان خواسته شد تا با استفاده از عبارات کلامی مطابق جدول ۹، گزینه‌ها را نسبت معیارها مورد ارزیابی قرار دهند. بعد از تکمیل شدن فرم‌های مصاحبه توسط خبرگان، تلفیق امتیازات داده شده توسط خبرگان صورت گرفت. جدول ۱۰ نتیجه تلفیق امتیازات مصاحبه شوندگان را نشان می‌دهد. برای تلفیق امتیازات از رابطه (۴) استفاده شده است. در مرحله بعد اعداد فازی ماتریس تصمیم‌گیری مطابق جدول ۱۱ و با توجه به رابطه (۱) به فرم LR که توسط گلدرمن و همکاران ارائه شده است تبدیل می‌شود [۱۳]. لازم به ذکر است که در ماتریس تصمیم‌گیری، معیارهای C_1، C_2، C_3، C_7، C_9، C_{10}، C_{12} و C_{13} ماهیت مثبت و معیارهای C_4، C_5، C_6، C_8 و C_{11} ماهیت منفی دارند.

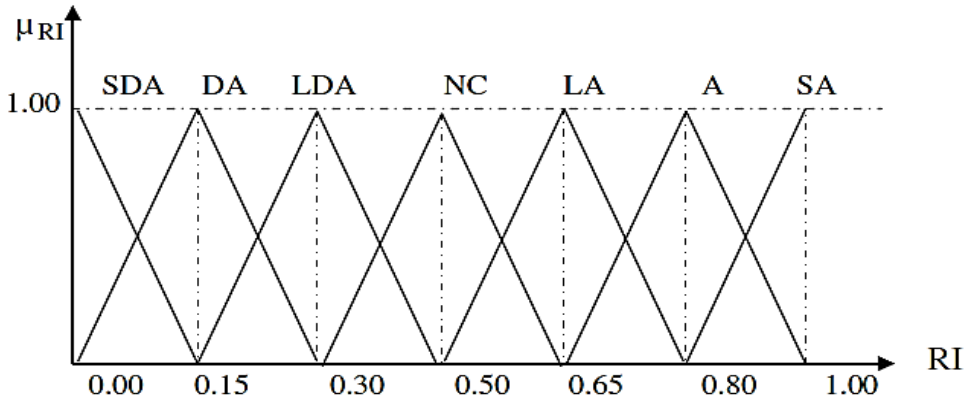
مرحله ۴- محاسبه ترجیح گزینه‌ها نسبت به یکدیگر: در تکنیک پرامیتی ارجحیت دو گزینه تحت هر معیار با تعیین مقادیر p و q توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. در این تحقیق از تابع ارجحیت

جدول ۹. عبارات کلامی برای درجه اهمیت [۲۰]
Table 9. Linguistic scale for importance [20]

	L (کران پایین)	***M*** (میانه)	***U*** (کران بالا)
بسیار کم اهمیت (**SDA**)	۰	۰	۰/۱۵
کم اهمیت (**DA**)	۰	۰/۱۵	۰/۳
نسبتاً کم اهمیت (**LDA**)	۰/۱۵	۰/۳	۰/۵
متوسط (**NC**)	۰/۳	۰/۵	۰/۶۵
نسبتاً مهم (**LA**)	۰/۵	۰/۶۵	۰/۸
مهم (**A**)	۰/۶۵	۰/۸	۱
بسیار مهم (**SA**)	۰/۸	۱	۱

نوع ۵ (جدول ۱۲) استفاده شده است و مقادیر p و q به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. به عنوان نمونه، در جدول ۱۳ تفاوت بین گزینه‌ها و جدول ۱۴ ماتریس میزان برتری گزینه‌ها با توجه به معیار نرخ تولید ارائه شده است. جداول مشابهی برای هریک از معیارها تشکیل و مقادیر متناظر محاسبه می‌شود.

مرحله ۵- محاسبه شاخص برتری گزینه‌ها نسبت به یکدیگر: شاخص ترجیحی وزنی برای پرامیتی فازی با توجه به رابطه (۷) که در بخش قبل توضیح داده شده است محاسبه می‌شود. بنابراین هریک از



شکل ۵. نمودارهای فازی معرف متغیرهای کلامی [۲۰]
Fig. 5. Phase graphs for linguistic variables

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم‌گیری تلفیق شده برای امتیازات هر یک از روش‌ها نسبت به معیارهای مؤثر
Table 10. Decision Matrix of ine extraction Method selection

	C_1			C_2			C_3			C_4			C_5		
OP	۰/۷۹۰	۰/۹۸۷	۱	۰/۷۴۰	۰/۹۲۳	۰/۹۸۷	۰/۴۹۳	۰/۶۳۳	۰/۷۲۷	۰/۲	۰/۳۰۷	۰/۴۵۷	۰/۶۰۳	۰/۷۶۰	۰/۸۸۳
SS	۰/۴۴۷	۰/۵۹۷	۰/۷۴۳	۰/۴۷۷	۰/۶۳۰	۰/۷۷۰	۰/۴۶۷	۰/۶۴۳	۰/۷۹۷	۰/۳۸۰	۰/۵۲۷	۰/۶۸۰	۰/۵۸۷	۰/۷۴۷	۰/۸۹۷
RP	۰/۲۷۳	۰/۴۲۰	۰/۵۶۳	۰/۲۷۰	۰/۴۲۳	۰/۵۶۳	۰/۴۹۰	۰/۶۵۳	۰/۷۹۰	۰/۴۷۰	۰/۶۴۰	۰/۷۸۷	۰/۴۷۰	۰/۶۴۳	۰/۷۸۳
CF	۰/۱۱۰	۰/۲۲۳	۰/۳۷۳	۰/۱	۰/۲	۰/۳۴۳	۰/۴۸۰	۰/۶۴۰	۰/۷۹۰	۰/۵۸۰	۰/۷۴۰	۰/۸۶۰	۰/۳۹۰	۰/۵۵۷	۰/۷۱۷
	C_6			C_7			C_8			C_9			C_{10}		
OP	۰/۵۷۷	۰/۷۳۷	۰/۸۸۳	۰/۶۴۳	۰/۸۱۳	۰/۸۸۳	۰/۳۳۰	۰/۴۸۳	۰/۶۴۰	۰/۶۶۷	۱/۳۹۰	۰/۶۵۷	۰/۷۲۷	۰/۹۰۷	۰/۹۳۳
SS	۰/۳۷۰	۰/۵۳۷	۰/۷۱۰	۰/۴۵۳	۰/۶۱۰	۰/۷۴۷	۰/۵۰۰	۰/۶۴۳	۰/۸۱۰	۰/۷۳۳	۱/۰۳۰	۰/۳۵۳	۰/۴۲۳	۰/۵۷۳	۰/۷۲۳
RP	۰/۴۱۷	۰/۵۸۳	۰/۷۵۰	۰/۲۹۳	۰/۴۵۳	۰/۵۹۷	۰/۱۵۷	۰/۲۸۰	۰/۴۲۳	۰/۳۸۷	۰/۶۶۳	۰/۹۶۳	۰/۳۵۷	۰/۵۳۰	۰/۶۹۷
CF	۰/۲۶۷	۰/۴۴۰	۰/۶۱۰	۰/۵۹۳	۰/۷۵۷	۰/۹۱۳	۰/۰۹۳	۰/۱۹۳	۰/۳۵۳	۰/۶۴۳	۰/۹۳۰	۱/۲	۰/۲۴۳	۰/۳۵۳	۰/۵۲۰
	C_{11}			C_{12}			C_{13}								
OP	۰/۷	۰/۸۷۳	۰/۹۷۳	۰/۶۱۳	۰/۷۷۷	۰/۸۷۰	۰/۵۲۰	۰/۶۶۰	۰/۷۹۰						
SS	۰/۳۴۰	۰/۴۹۳	۰/۶۵۳	۰/۳۷۰	۰/۵۳۳	۰/۶۸۳	۰/۲۷۳	۰/۴۴۳	۰/۵۷۳						
RP	۰/۲۹۷	۰/۴۶۳	۰/۶۲۳	۰/۳۷۰	۰/۵۳۷	۰/۶۸۰	۰/۳۳۳	۰/۵۰۷	۰/۶۴۷						
CF	۰/۱۷۳	۰/۳۱۳	۰/۴۷۷	۰/۲۹۷	۰/۴۴۰	۰/۵۸۷	۰/۳۴۰	۰/۴۸۷	۰/۶۳۰						

درایه‌های ماتریس برتری در جدول ۱۴ در وزن معیار مربوطه ضرب و سپس ماتریس‌های وزن دار با هم جمع خواهند شد. ماتریس حاصل، ماتریس شاخص برتری است که به صورت جدول ۱۵ نمایش داده شده است.

مرحله ۶- محاسبه جریان‌های خروجی مثبت و ورودی منفی و خالص: نتایج حاصل از محاسبه جریان‌های خروجی مثبت و ورودی منفی و خالص هر گزینه که به ترتیب از روابط (۸) تا (۱۰) استفاده شده است در جدول ۱۶ ارائه شده است.

مرحله ۷- رتبه‌بندی کلی گزینه‌ها: برای رتبه‌بندی گزینه‌ها ابتدا مقادیر فازی جریان خالص محاسبه شده در ستون های آخر جدول ۱۵، غیرفازی می‌گردد و رتبه‌بندی نهایی بر اساس اعداد قطعی به دست آمده انجام می‌پذیرد. برای غیرفازی‌سازی اعداد فازی از رابطه (۱۱) که در بخش قبل به آن اشاره گردید استفاده و مطابق جدول ۱۷ و شکل ۶ ارائه شده است.

اساس مدل پیشنهادی ارائه شده در این مقاله تلفیق تکنیکهای تجربی و FAHP و FPROMETHEE است. که در آن از روش-های تجربی برای فیلترینگ اولیه و انتخاب گزینهها و از FAHP گروهی برای تعیین و وزن‌دهی شاخصهای مؤثر و از پرامیتی فازی برای انتخاب نهایی استفاده شده است. مدل تلفیقی فوق دارای تئوری مطمئن بر اساس متغیرهای بیانی، ریاضیات فازی و ساختار مقایسه

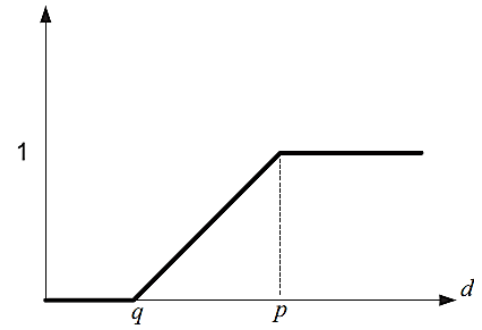
جدول ۱۱. ماتریس تصمیم‌گیری تکنیک پرامیتی فازی
Table 11. Fuzzy PROMEETE Decision Matrix

	C_1			C_2			C_3			C_4			C_5		
OP	۰/۹۸۷	۰/۱۹۷	۰/۰۱۳	۰/۹۲۳	۰/۱۸۳	۰/۰۶۳	۰/۶۳۳	۰/۱۴۰	۰/۰۹۳	۰/۳۰۷	۰/۱۰۷	۰/۱۵۰	۰/۷۶۰	۰/۱۵۷	۰/۱۲۳
SS	۰/۵۹۷	۰/۱۵۰	۰/۱۴۷	۰/۶۳۰	۰/۱۵۳	۰/۱۴۰	۰/۶۴۳	۰/۱۷۷	۰/۱۵۳	۰/۵۲۷	۰/۱۴۷	۰/۱۵۳	۰/۷۴۷	۰/۱۶۰	۰/۱۵۰
RP	۰/۴۲۰	۰/۱۴۷	۰/۱۴۳	۰/۴۲۳	۰/۱۵۳	۰/۱۴۰	۰/۶۵۳	۰/۱۶۳	۰/۱۳۷	۰/۶۴۰	۰/۱۷۰	۰/۱۴۷	۰/۶۴۳	۰/۱۷۳	۰/۱۴۰
CF	۰/۲۲۳	۰/۱۱۳	۰/۱۵۰	۰/۲۰۰	۰/۱۰۰	۰/۱۴۳	۰/۶۴۰	۰/۱۶۰	۰/۱۵۰	۰/۷۴۰	۰/۱۶۰	۰/۱۲۰	۰/۵۵۷	۰/۱۶۷	۰/۱۶۰
	C_6			C_7			C_8			C_9			C_{10}		
OP	۰/۷۳۷	۰/۱۶۰	۰/۱۴۷	۰/۸۱۳	۰/۱۷۰	۰/۰۷۰	۰/۴۸۳	۰/۱۵۳	۰/۱۵۷	۱/۳۹۰	۰/۷۲۳	۰/۲۶۷	۰/۹۰۷	۰/۱۸۰	۰/۰۲۷
SS	۰/۵۳۷	۰/۱۶۷	۰/۱۷۳	۰/۶۱۰	۰/۱۵۷	۰/۱۳۷	۰/۶۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۱/۰۳۰	۰/۲۹۷	۰/۳۲۳	۰/۵۷۳	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰
RP	۰/۵۸۳	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۰/۴۵۳	۰/۱۶۰	۰/۱۴۳	۰/۲۸۰	۰/۱۲۳	۰/۱۴۳	۰/۶۶۳	۰/۲۷۷	۰/۳۰۰	۰/۵۳۰	۰/۱۷۳	۰/۱۶۷
CF	۰/۴۴۰	۰/۱۷۳	۰/۱۷۰	۰/۷۵۷	۰/۱۶۳	۰/۱۵۷	۰/۱۹۳	۰/۱۰۰	۰/۱۶۰	۰/۹۳۰	۰/۲۸۷	۰/۲۷۰	۰/۳۵۳	۰/۱۱۰	۰/۱۶۷
	C_{11}			C_{12}			C_{13}								
OP	۰/۸۷۳	۰/۱۷۳	۰/۱۰۰	۰/۷۷۷	۰/۱۶۳	۰/۰۹۳	۰/۶۶۰	۰/۱۴۰	۰/۱۳۰						
SS	۰/۴۹۳	۰/۱۵۳	۰/۱۶۰	۰/۵۳۳	۰/۱۶۳	۰/۱۵۰	۰/۴۴۳	۰/۱۷۰	۰/۱۳۰						
RP	۰/۴۶۳	۰/۱۶۷	۰/۱۶۰	۰/۵۳۷	۰/۱۶۷	۰/۱۴۳	۰/۵۰۷	۰/۱۷۳	۰/۱۴۰						
CF	۰/۳۱۳	۰/۱۴۰	۰/۱۶۳	۰/۴۴۰	۰/۱۴۳	۰/۱۴۷	۰/۴۸۷	۰/۱۴۷	۰/۱۴۳						

جدول ۱۲. تابع ارجحیت V شکل با ناحیه بی‌تفاوتی [۶]
Table 12. V-shaped preference function [6]

$$P_j\left(a_i, a_{i'}\right)=\begin{cases} 0, if\ 0 < d_{a_i,a_{i'}} \le q \quad (indifference \\ \dfrac{d_{a_i,a_{i'}}-q}{p-q}\ if\ q < d_{a_i,a_{i'}} \le p \\ 1, if\ d_{a_i,a_{i'}} > p\ (strict\ indifference \end{cases}$$

$d_{a_i,a_{i'}}$ تفاوت دو گزینه بوده و تابع $P_j\left(a_i, a_{i'}\right)$ تابع ارجحیت بین دو گزینه و p و q روی شکل نشان داده شده است.



جدول ۱۳. ماتریس تفاوت بین گزینه‌ها برای معیار نرخ تولید
Table 13. The fuzzy preference function for production Rate criteria

	C۱											
	OP			SS			RP			CF		
OP	۰	۰	۰	-۰/۳۹۰	۰/۱۶۳	۰/۳۴۳	-۰/۵۶۷	۰/۱۶۰	۰/۳۴۰	-۰/۷۶۳	۰/۱۲۷	۰/۳۴۷
SS	۰/۳۹۰	۰/۳۴۳	۰/۱۶۳	۰	۰	۰	-۰/۱۷۷	۰/۲۹۳	۰/۲۹۳	-۰/۳۷۳	۰/۲۶۰	۰/۳۰۰
RP	۰/۵۶۷	۰/۳۴۰	۰/۱۶۰	۰/۱۷۷	۰/۲۹۳	۰/۲۹۳	۰	۰	۰	-۰/۱۹۷	۰/۲۵۷	۰/۲۹۷
CF	۰/۷۶۳	۰/۳۴۷	۰/۱۲۷	۰/۳۷۳	۰/۳۰۰	۰/۲۶۰	۰/۱۹۷	۰/۲۹۷	۰/۲۵۷	۰	۰	۰

ارجحیتهای پرامیتی است. از جمله مزایای این مدل در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده میتوان به انتخاب گزینههای اولیه بر اساس روشهای تجربی و کاهش تعداد گزینهها، عدم محدودیت در تعداد شاخصها، تعیین تعداد و وزن شاخص‌ها با روش تحلیل سلسله

جدول ۱۴. ماتریس میزان برتری گزینه‌ها نسبت به معیار نرخ تولید

Table 14. The preference index Matrices for Production Rate criteria

	C۱											
	OP			SS			RP			CF		
OP	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
SS	۰	۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
RP	۰/۶۴۱	۰/۲۹۲	۰/۰۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
CF	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۵. ماتریس شاخص برتری هر گزینه

Table 15. The multicriteria preference index Matrix

	OP			SS			RP			CF		
OP	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۶۹	۰/۰۸	۰/۰۱۶	۰/۳۱۲	۰/۲۹۹	۰/۲۸۶
SS	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
RP	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
CF	۰/۰۱۷۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۳۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۶. رتبه‌بندی روش‌ها به تکنیک پرامیتی فازی

Table 16. Negative, positive and net flow value of alternatives

	φ_+			φ_-			خالص		
OP	۰/۱۶۰	۰/۱۲۶	۰/۱۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۲	۰/۱۵۴	۰/۱۲۴	۰/۰۹۹
SS	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
RP	۰	۰	۰	۰/۰۵۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۵۶	-۰/۰۵۶	-۰/۰۲۶	-۰/۰۰۵
CF	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۲	۰/۱۰۴	۰/۰۹۹	۰/۰۹۵	-۰/۰۹۸	-۰/۰۹۷	-۰/۰۹۴

جدول ۱۷. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس پرامیتی فازی

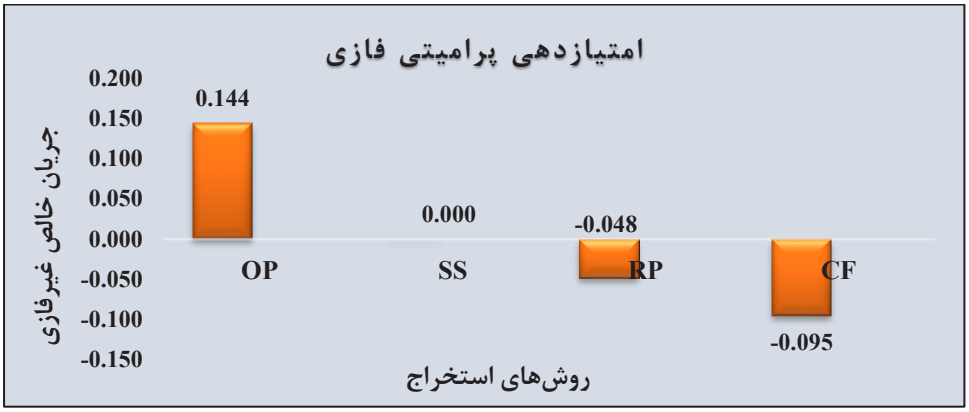
Table 17. Final ranking of alternatives using fuzzy PROMEETE

گزینه‌ها	نماد گزینه	جریان خالص غیرفازی‌سازی شده	رتبه‌بندی
استخراج روباز	OP	۰/۱۴۴	۱
استخراج از طبقات	SS	۰	۲
اتاق و پایه	RP	-۰/۰۴۸	۳
کندن و آکندن	CF	-۰/۰۹۵	۴

مراتبی فازی به صورت گروهی، اعمال عدم قطعیت‌ها با بکارگیری اعداد مثلثی فازی در قضاوت‌ها، بکارگیری متغیرهای بیانی و سادگی قضاوت، استفاده از مزیت بکارگیری روش پرامیتی با در نظر گرفتن توابع ارجحیت معیارها اشاره شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای حل مسأله انتخاب روش بهره‌برداری مناسب ذخایر معدنی، الگویی بر اساس تلفیق روشهای تجربی انتخاب روش استخراج و مدلهای تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی ارائه شد. برای انتخاب روش استخراج ابتدا بر اساس روشهای تجربی تعدادی گزینه محدود انتخاب و سپس بر اساس روش تصمیمگیری گروهی تحلیل سلسله مراتبی فازی معیارهای مؤثر انتخاب و وزندهی می‌شوند. در ادامه با روش تصمیمگیری پرامیتی فازی انتخاب گزینه مناسب انجام میشود. با استفاده از الگوی تلفیقی پیشنهادی، روش استخراج مناسب



شکل ۶. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها با استفاده از پرامیتی فازی

Fig. 6. Final ranking of alternatives using fuzzy PROMEETE

معدن سرب و روی مهدی‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفت. با اجرای مدل در این معدن روش استخراج روباز با امتیاز ۰/۱۴۴ به عنوان مناسب‌ترین روش استخراج انتخاب شد و استخراج از طبقات فرعی، اتاق و پایه و کندن و آکندن به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرارگرفتند. مقایسه نتیجه با واقعیتهای اجرایی میتواند تأییدکننده نتیجه و کارایی مدل پیشنهادی باشد، هرچند بکارگیری این الگو در اول راه بوده و باید روی مطالعه های موردی متعددی امتحان گردد. در مطالعات گذشته، تکنیک‌های تصمیمگیری صرفاً جایگزین تکنیک‌های موجود تجربی شده است، لیکن وجه تمایز این الگو بکارگیری از مزایای هر دو تکنیک تجربی با تصمیم‌گیری فازی با تلفیق تکنیکهای خواهد بود. بکارگیری غربالگری اولیه با تکنیکهای تجربی باعث کاهش تعداد گزینه‌ها شده و در ادامه، پروسه تصمیمگیری با انتخاب از میان گزینههای کمتر و قابل اطمینان تر، نتیجه مناسب‌تری را به دست خواهد داد. تصمیمگیری در محیط فازی منجر به اعمال عدم قطعیت-های قضاوت و بکارگیری پرامیتی نیز قابلیت در نظر گرفتن انواع توابع ارجحیت را در پروسه تصمیمگیری فراهم می‌سازد. وزنهای شاخص‌ها از مقایسه زوجی با روش FAHP گروهی بدست میآید که می‌تواند از نقاط قوت الگو به شمار رود.

مراجع

[1] Dehghani, H., A. Siami, and P. Haghi, A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods. Journal of Mining and Environment, 2017. 8(1): p. 49-60.

[2] S Shariati, S., A. Yazdani-Chamzini, and B. Pourghaffari Bashari, Mining method selection by using an integrated model. International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 2013. 6(2): p. 199-214.

[3] F.Samimi Namin, K Shahriar, A.Bascetin, and S.H.Ghodsypour, Practical applications from decision-making techniques for selection of suitable mining method in Iran. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2009. 25: p. 57-77.

[4] J.P Brans. Lingenierie de la decision, Elaboration dinstruments daide a la decision. Methode PROMETHEE. In: Nadeau, R., Landry, M. (Eds.), Laide a la Decision: Nature, Instrument s et Perspectives Davenir. Presses de Universite Laval, Qu ebec, Canada, 1982, pp. 183–213.

[5] J.P.Brans, P.Vincke, B, Mareschal, How to select and how to rank projects: The Promethee method. European J. Oper. Res. 1986, 24, 228-238.

[6] J.P Brans, B.Mareschal, PROMCALC and GAIA: A new decision support system for multicriteria decision aid. Decision Support Systems, 1994, 12, 297-310.

[7] M. Gul, E. Celik, A.T. Gumus, A.F. Guneri, A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems, Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 7(1) (2018) 68-79.

[8] D. Bogdanovic, D. Nikolic, I. Ilic, Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84(1) (2012)

219-233.

[9] A. De Almeida, L. Alencar, C. De Miranda, Mining methods selection based on multicriteria models, in, Taylor and Francis Group, London, 2005, pp. 19-24.

[10] C. Kahraman, Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments, Springer Science & Business Media, 2008.

[11] A.Shahmardan, and M.H. Zadeh, An integrated approach for solving a MCDM problem, Combination of Entropy Fuzzy and F-PROMETHEE techniques. Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM), 2013. 6(4): p. 1124-1138.

[12] Y.-H. Chen, T.-C. Wang, C.-Y. Wu, Strategic decisions using the fuzzy PROMETHEE for IS outsourcing, Expert Systems with Applications, 38(10) (2011) 13216-13222.

[13] S.M.H. Motlagh, M. Behzadian, J. Ignatius, M. Goh, M.M. Sepehri, T.K. Hua, Fuzzy PROMETHEE GDSS for technical requirements ranking in HOQ, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(9) (2015) 1993-2002.

[14] Klir, G. J., Yuan, B., Fuzzy sets and fuzzy logic, Theory and applications, Prentice Hall PTR Publisher, 1995, 97-99

[15] J.Geldermann, T., Spengler, Rentz, O., Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. Fuzzy Sets Syst, 115 (1), 45–65.

[16] G. Popović, B. Đorđević, D. Milanović, Multiple criteria approach in the mining method selection, Industrija, 47(4) (2019) 47-62.

[17] J., Aczel, T. L Saaty, Proceduar for synthesizing ratio judgments, Journal of mathematical pcychology, 1983, 27, 93-102.

[18] D.Nicholas, , J.Mark, "Feasibility study–selection of a mining method integrating rock mechanics and mine planning, 5th Rapid Excavation and Tunneling Conference, San Francisco, 1981, Vol.2, P:1018-1031,

[19] C.Clayton, , R.Pakalnis, J.Meech, , "A knowledge-based system for selecting a mining method", International conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (IPPM), 2002, Canada

[20] O. Senvar., G. Tuzkaya, and C. Kahraman, Multi criteria supplier selection using fuzzy PROMETHEE method, in Supply chain management under fuzziness 2014, Springer. p. 21-34.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Dargahpoor, R. Shakoor Shahabi, F. Samimi Namin, M. Jamshidi, Combining the Experimental Techniques of Mining Method Selection with Fuzzy Decision Making (Case Study: Mehdi Abad Lead & Zinc Mine) , Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3371-3386.

DOI: 10.22060/ceej.2021.17885.6710