1986
Imam Hossein
Comprehensive
University

Construction Science and Technology

Volume 6, Issue 2 , page : 65-76
https://stc.ihu.ac.ir/

Investigating the optimal conditions of copper flotation in Bayche Bagh mine (Case study: Khoshnodi vein)

Arash Sobuti [1*], Amir Zeynali [2]

[1] *Correspondence: PhD student, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] Master of Science in Mineral Processing, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 2025 February 1
Revised: 2025 August 28
Accepted: 2025 September 3
Available online: 2025 September 3

Keywords:
Concentration,
Flotation,
Copper,
Bayche Bagh mine

ABSTRACT

In this research, after preparing a representative sample from the Khoshnodi vein's. Identification and property evaluation studies were conducted. Based on petrographic and microscopic studies, the main minerals in the sample include chalcopyrite, pyrite, iron oxide minerals such as hematite, goethite, and limonite, and copper carbonate minerals such as malachite and azurite. The XRD analysis reveals that the sample primarily consists of quartz, albite, muscovite-illite, dolomite, potassium feldspar, kaolinite, smectite group clay minerals, and calcite. AAS analysis results showed that the copper and gold grades in the sample were 0.5% and 186 ppb, respectively. Based on scanning electron microscopy studies, no free gold was observed, and gold was mainly present as a substitute in the chalcopyrite mineral lattice and in small amounts in iron oxides. Effective parameters such as pH, collector concentration and type, and sulfidation concentration in flotation enrichment were investigated. Optimization of parameters can have various impacts on mining operations, such as reducing costs as well as decreasing pollution levels or improving the utilization of resources. The results showed that under optimal conditions, at pH = 10, a concentration of 150 g/ton of potassium amyl xanthate (PAX) collector and a concentration of 200 g/ton of sodium sulfide, the recovery of oxidized and sulfide copper was 66.6% and 75.3%, respectively, and with two stages of cleaning on the obtained concentrate, a concentrate with a copper grade of 24.09% was obtained.

Cite this article: Sobuti, A., & Zeynali, A. (2025). Investigating the optimal conditions of copper flotation in Bayche Bagh mine (Case study: Khoshnodi vein). Construction science and technology, 6(2), 65-76. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.6.2

OPEN ACCESS

CC BY

Publisher: Imam Hossein University. © The Author(s).

علوم و فنون سازندگی

علوم و فنون سازندگی / سال ۱۴۰۴/ دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۷۶-۶۵

https://stc.ihu.ac.ir/

بررسی شرایط بهینه فلوتاسیون مس در معدن بایچه باغ (مطالعه موردی: رگه خشنودی)

آرش ثبوتی [۱]، امیر زینالی [۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[۲] کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، بعد از تهیه نمونه معرف از رگه خشنودی معدن، مطالعات شناسایی و خواص سنجی صورت گرفت. بر اساس مطالعات پتروگرافی و میکروسکوپی؛ کانی‌های اصلی نمونه شامل کالکوپیریت، پیریت، کانی‌های اکسید آهن مانند هماتیت، گوتیت و لیمونیت و کانی‌های کربناته مس مانند مالاکیت و آزوریت می‌باشد. بر اساس آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، نمونه عمدتا از کانی‌های کوارتز، آلبیت، موسکویت-ایلیت، دولومیت، پتاسیم فلدسپات، کائولینیت، کانی های رسی گروه اسمکتیت و کلسیت تشکیل شده است. نتایج آنالیز AAS نشان داد که عیار مس و طلا در نمونه به ترتیب ۰/۵ درصد و ۱۸۶ ppb است. بر اساس مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی، هیچ‌گونه طلای آزاد مشاهده نشد و طلا عمدتا به صورت جایگزینی در شبکه کانی کالکوپیریت و به مقدار کم در اکسیدهای آهن حضور دارد. پارامترهای موثر مانند pH، غلظت و نوع کلکتور و غلظت سولفیداسیون در پرعیارسازی به روش فلوتاسیون بررسی شد. بهینه سازی پارامترها می‌تواند تأثیرات مختلفی بر عملیات معدن مانند کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش میزان آلودگی یا استفاده بهتر از منابع همراه باشد. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، در pH=۱۰، غلظت ۱۵۰ گرم بر تن از کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات و غلظت ۲۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم، بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی به ترتیب ۶۶/۶ و ۷۵/۳ درصد بدست آمد که با دو مرحله کلینر بر روی کنسانتره بدست آمده، کنسانتره‌ای با عیار مس ۲۴/۰۹ درصد حاصل شد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

کلید واژه ها:

پرعیارسازی،

فلوتاسیون،

مس،

معدن بایچه باغ

استناد: ثبوتی, آرش, & زینالی, امیر. (۱۴۰۴). بررسی شرایط بهینه فلوتاسیون مس در معدن بایچه باغ (مطالعه موردی: رگه خشنودی). علوم و فنون سازندگی, ۶(۲), ۶۵-۷۶. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.6.2

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

© نویسندگان.

OPEN ACCESS

۱. مقدمه

معادن به‌عنوان یکی از منابع اساسی استخراج مواد معدنی در سراسر جهان شناخته می‌شوند. در بیشتر معادن روباز جهان، روش اولیه‌ای که برای استخراج مواد معدنی به کار گرفته می‌شود، روش استخراج روباز است که با ایجاد پله‌های متعدد در داخل زمین همراه است. پس از حفاری و آتشباری، مواد به اندازه‌هایی قابل حمل تقسیم شده و با کامیون‌ها منتقل می‌شوند. شاول و لودر، مواد را به داخل صندوقه کامیون بارگیری کرده و کامیون‌ها از رمپ‌های نصب‌شده در دامنه پیت و پله‌ها، مواد را به سمت سنگ‌شکن، انبار کانسنگ پرعیار یا دامپ باطله در بیرون از پیت حمل می‌کنند. با این حال، فرآیند استخراج مواد معدنی از معادن بسیار پیچیده و چالش‌برانگیز است و ترابری یکی از مهم‌ترین مسائلی است که باید به آن توجه ویژه شود. ترابری مواد معدنی از معادن به سایر نقاط داخل و خارج از معدن، شامل انتقال مواد به کارخانه‌های فرآوری و انتقال محصولات نهایی به بازارهای مصرف، از جمله مواردی است که نیازمند هزینه و انرژی زیادی است [۱ و ۲].

در جهان امروز، پیچیدگی ذاتی بسیاری از محیط‌های تصمیم‌گیری لزوم جامع‌نگری در این تصمیم‌ها را ایجاب می‌کند. امروزه بهره‌گیری از افراد مختلف با مشاغل تخصصی، تجربیات، سوابق و دیدگاه‌های علمی گوناگون کاملاً معمول شده است. این موارد ضرورت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری گروهی و چندمعیاره را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در برخی مسائل، معیارها ممکن است با یکدیگر متضاد باشند؛ به‌طوری که افزایش یک عامل یا معیار موجب کاهش عامل دیگر شود. تبدیل معیارها (اعم از کیفی و کمی) به یکدیگر نیز مشکلات خاص خود را دارد. با توجه به چالش‌های مربوط به فرآیند تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، می‌توان گفت که در این حالت تصمیم‌گیری ساده نبوده و به دلیل عدم وجود استاندارد، سرعت و دقت تصمیم‌گیری به‌شدت کاهش می‌یابد. این شرایط باعث می‌شود که فرآیند تصمیم‌گیری تا حد زیادی به فرد تصمیم‌گیرنده وابسته باشد. برای رفع این مشکل و یا حداقل کاهش آثار جانبی آن، روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه طراحی شده‌اند [۳ و ۴ و ۵]:

۱) مدل های چند هدفه[1](MODM)
۲) مدل های چندشاخصه[2](MADM)

مدل های چند هدفه به منظور طراحی به کار گرفته می‌شود در حالی که مدل های چند شاخصه به منظور انتخاب گزینه برتر استفاده می شود.یکی دیگر از روش های مهم مدل های چندشاخصه روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) است که با توجه به نزدیک بودن به شرایط ایده‌آل نزدیک ترین گزینه انتخاب می‌شود. از این روش در مسائل مهم معدنکاری استفاده می‌شود[۶ و ۷].

از سوی دیگر برنامه‌ریزی عدد صحیح یکی از شاخه‌های مهم و پرکاربرد در بهینه‌سازی ریاضی است که برای حل مسائل تصمیم‌گیری با متغیرهای گسسته طراحی شده است. در این شاخه، متغیرهای تصمیم‌گیری باید حتماً مقادیر صحیح (اعداد گسسته) بگیرند و نمی‌توانند پیوسته باشند. این ویژگی باعث شده است که برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل مسائل واقعی در حوزه‌های مختلف بسیار کاربردی باشد. در حوزه معدنکاری، برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی عملیات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد[۸ و ۹].

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل در معدن مس زاغدره، ترکیبی از مدل فازی تاپسیس و برنامه‌ریزی ریاضی را به‌کار گرفت تا با ارائه یک چارچوب جامع، بهترین سیستم حمل‌ونقل را انتخاب کرده و آن را بهینه‌سازی کند. در بخش نخست، مدل فازی تاپسیس به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، برای ارزیابی سه گزینه اصلی سیستم حمل‌ونقل، شامل سنگ‌شکن متحرک و نوار نقاله، کامیون-نوار نقاله، و نوار نقاله کامل استفاده شد. در بخش دوم، برای بهینه‌سازی مکان‌یابی تجهیزات، از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح بهره‌برداری شد تا بهترین نقاط برای قرارگیری سنگ‌شکن‌ها براساس مقدار سالیانه تولید معدن انتخاب شود.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌طور گسترده‌ای در حوزه معدنکاری به‌کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها با استفاده از ارزیابی هم‌زمان چندین معیار مختلف، امکان تصمیم‌گیری بهتر و دقیق‌تر را فراهم می‌کنند و در بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف در معدنکاری نقش مهمی ایفا می‌کنند. به‌ویژه در فرآیند استخراج مواد معدنی، انتخاب تجهیزات، و ارزیابی ریسک‌های مرتبط با پروژه‌ها، این روش‌ها به‌شدت مفید واقع شده‌اند. استفاده از این تکنیک‌ها به معدنکاران این امکان را می‌دهد که تصمیمات خود را بر اساس تحلیل جامع و مقایسه‌ی چندین گزینه مختلف اتخاذ کنند و به‌این‌ترتیب بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی حاصل شود. در جدول ۱،

1. Multi-Objective Decision Making
2. Multi-Attribute Decision Making

پژوهش‌های انجام‌شده در معادن مختلف با استفاده از این روش‌ها به‌طور خلاصه آورده شده است.

جدول(۱). پژوهش های صورت گرفته در معادن با استفاده از روش TOPSIS

ردیف	نویسنده و سال	مساله و روش مورد مطالعه
۱	منجزی و همکاران ۲۰۱۲[۱۰]	انتخاب مناسب ترین طرح انفجار
۲	رحیم دل و همکاران ۲۰۱۴[۱۱]	انتخاب ماشین آلات بر اساس نظریه فازی
۳	رحیم دل و همکاران ۲۰۱۸[۱۲]	انتخاب سیستم ترابری مناسب با درنظر گرفتن انرژی
۴	کوپا و همکاران ۲۰۱۹[۱۳]	انتخاب صحیح ترین الگوی انفجار
۵	میجالکووسکی و همکاران ۲۰۲۰[۱۴]	ارزیابی ریسک در معدن سرب
۶	علی محمد ۲۰۲۱[۱۵]	انتخاب روش استخراج بر مبنای روشubc
۷	گوانگ ژنگ و همکاران ۲۰۲۱[۱۶]	ارزیابی ریسک در معدن زغال سنگ
۸	لی و همکاران۲۰۲۳ [۱۷]	بهینه‌سازی روش استخراج برای کانسارهای پیچیده
۹	نیکولیچ و همکاران ۲۰۲۴[۱۸]	اولویت بندی برای احداث کارخانه مس
۱۰	سلیم رضا و همکاران۲۰۲۴[۱۹]	ارزیابی ریسک در معادن پاکستان
۱۱	یین و همکاران۲۰۲۴[۲۰]	ارزیابی ریسک معادن سبز

از سوی دیگر روش‌هایی برای جایگزینی روش باربری سنتی کامیون و شاول وجود دارد. سامانه سنگ‌شکن و نوار نقاله درون پیت یکی از روش هایی است که امروزه مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر آن است که این سامانه در سالهای اخیر در برخی از معادن روباز بزرگ دنیا به کار گرفته شده و نتایج موفقیت آمیزی به همراه داشته است[۲۱]. در روش کامیون و شاول سنتی کامیون ها مواد استخراجی را از طریق رمپ ها به سنگ شکن اولیه که در بیرون از پیت مستقر است می رسانند. دراین روش سنگ شکن به داخل پیت وارد شده و مواد استخراج شده پس از خردایش به وسیله سنگ شکن،از طریق نوار نقاله به بیرون از پیت انتقال داده می شوند. با ادامه استخراج در بلوک های پایین دستی در معدن، زمان باربری افزایش پیدا می کند. علاوه بر آن استهلاک کامیون‌ها، مصرف سوخت، مصرف لاستیک بالا می رود. بنابر این هزینه عملیاتی افزایش پیدا می کند. با افزایش فاصله حمل، برای جواب گویی در پای شاول مجبور به افزودن ناوگان کامیونی هستیم که سبب افزایش هزینه سرمایه ای می‌شود. با افزودن به تعداد کامیون ها، علاوه بر هزینه احداث رمپ و هزینه نگهداری، ایمنی نیز پایین می‌آید و به دلیل ترافیک احتمال تصادف کامیون‌ها بالا می رود. هم چنین با افزایش میزان گاز گلخانه ای که از کامیون ها تولید می شود و افزایش سر و صدا، گرد و غبار، آلودگی محیط زیست نیز بیشتر میشود. این وضعیت در شرایطی که افزایش عمق با کاهش عیار کانسنگ همراه باشد، زودتر هم فرامی رسد. به کار گیری از این سامانه می‌تواند راه حل مناسبی برای خارج شدن از این مشکلات است[۲۲]. علاوه بر رفع این مسائل استفاده از این سامانه به علت پیوسته بودن عملیات، افزایش تولید را به همراه دارد که در صورت کاهش عیار کانسگ باز هم عملیات استخراج توجیه پذیر خواهد بود و میتوان استخراج را تا اعماق بیشتر زمین انجام داد[۲۳].

دوس سانتوس[1] در سال ۱۹۸۵ بر روی کاربردهای نوار نقاله ها در شیب زیاد در معادن روباز مطالعاتی را انجام داد. پیشرفت این تکنولوژی مزایایی مانند کارایی انرژی بالاتر میزان حفاری کمتر به ازای همان مقدار کانسنگ پرعیار و هزینه‌های احداث و نگهداری رمپ کمتر نسبت به حمل کامیونی به همراه داشت. در این تحقیقات انواع سامانه های نقاله‌ای با شیب زیاد و مشخصات متناظر آنها بحث شده است[۲۴]. ادنبرگ[2] و همکاران در ۱۹۸۷ مقاله‌ای را ارائه دادند که در مورد سرعت توسعه و گسترش تأسیسات سنگ شکنی سیار از ظرفیت توان عملیاتی ۲۰۰ تن بر ساعت تا ظرفیت بالاتر این تاسیسات (۳۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن بر ساعت طی سالهای متفاوت بحث می‌کند[۲۵].

مکفیل[3] و ریچارد[4] در سال ۱۹۹۴ طی مقاله ای کارایی سامانه سنگ شکن درون پیت و نوار نقاله و تکامل دریجی اش را برای معدن مس هایلند ولی، توصیف کردند[۲۶]. انور[5] و کاراکوس[6]، در سال ۲۰۰۷ محل بهینه سنگ شکن را در معدن

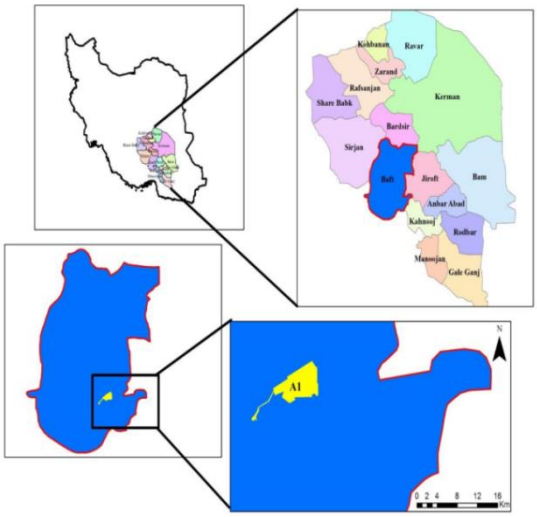
1. Dos Santos
2. Erodenberg
3. MacPhail
4. Richards
5. Onur
6. Karakus

کواری سنگ آهک در نزدیکی شهر ایزمیر در ترکیه به دست آوردند آن‌ها تصمیم گرفتند که دستگاه های سنگ شکنی و سرند کردن را به محل پیت جدید انتقال دهند. سؤالی که مطرح شد این بود که چه محلی را برای نصب جدید سنگ شکن در نظر بگیرند که موجب حداقل شدن هزینه باربری شود. فرض اصلی این بود که دستگاه سنگ شکنی درون معدن نصب شود تا موجب حداقل هزینه های حمل و نقل مواد شود. اما آن مانع از دسترسی به ذخیره سنگ آهک بود بنابراین آنها تصمیم گرفتند که سنگ شکن را پس از مدتی حرکت دهند و در یک تراز آن را ثابت نگاه ندارند به علت هزینه نصب خیلی بالای تجهیزات، تصمیم بر این شد که تاسیسات تنها یکبار در طول عمر ۱۸ سال معدن حرکت داده شوند[۲۷]. بوید[1] و آتلی[2] توسعه یافتگی‌های سامانه سنگ شکن و نوار نقاله درون پیت را بیان نمودند. همچنین از مزایا و معایب این سامانه نیز حرفی به میان آوردند. آنها در مطالب خود، به طور مفصل، پارامترهای طراحی این سامانه را عنوان نمودند و از انواع مختلف این سامانه ها را معرفی کردند[۲۸]. چانگژی تأثیر سامانه سنگ شکنی و نقاله ای دورن پیت را در کاهش هزینه های حمل در معدن مس بررسی نمود. وی همچنین ترازهای بهینه جهت استقرار این سامانه و استقرار دوباره آن را نیز بررسی نمود[۲۹]. آتچیسان[3] و موریسان[4]، در مورد معیارهای انتخاب سامانه های سنگ شکنی و نقاله کردن درون پیت تحقیقی ارائه دادند[۳۰].

تاکر و همکاران، در سال ۲۰۲۳، به بررسی برنامه‌ریزی عدد صحیح تصادفی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید بلندمدت در معادن روباز پرداخته‌اند. این مقاله روش‌ها، کاربردها و ارزش راه‌حل‌های تصادفی را در فرآیند بهینه‌سازی استخراج مورد تحلیل قرار می‌دهد. این تحقیق به‌ویژه بر اهمیت مدل‌های تصادفی در مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در هزینه‌ها و تقاضا، و تأثیر آن‌ها بر بهبود تصمیم‌گیری در عملیات معدنکاری تأکید دارد.[۳۱] آدامز و همکاران، در سال ۲۰۱۹، به بررسی استراتژی‌هایی برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه در مسائل برنامه‌ریزی معدن زیرزمینی با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) پرداخته‌اند. آن‌ها در این مطالعه، نحوه استفاده از MIP برای حل مسائل پیچیده معدنکاری، به‌ویژه در معادن زیرزمینی، و همچنین چالش‌های موجود در استفاده از این روش را مورد تحلیل قرار دادند[۳۲].

۳. مشخصات زمین شناسی معدن مس زاغدره

معدن مس زاغدره که در استان کرمان و در نزدیکی شهرستان بافت قرار دارد، به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق معدنی ایران به شمار می‌رود. این منطقه، به دلیل وجود سنگ‌های آتشفشانی و التراماfیک که کانسارهای مس و کرومیت را در خود جای داده‌اند، از پتانسیل‌های بالای زمین‌شناسی برخوردار است. بررسی‌های دقیق چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری، اهمیت ویژه‌ای را برای این معدن از منظر اقتصادی و صنعتی مشخص کرده‌اند[۳۳].

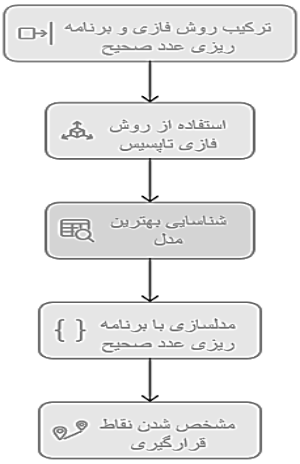


شکل (۱). موقعیت معدن مس زاغدره بر روی نقشه تقسیمات استان کرمان

مقدار ذخیره زمین شناسی این معدن حدود ۱۸/۹ میلیون تن ماده معدنی با عیار ۰/۳۵ درصد مس برآورد شده است.

۴. روش تحقیق

در ابتدای این بخش استفاده از روش فازی تاپسیس بررسی می شود و در بخش دوم بهترین مدل با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح مدلسازی می شود تا نقاط قرارگیری بهترین مدل مشخص شوند. در شکل ۲ مراحل انجام این پژوهش قرارداده شده است.



شکل(۲). شماتیک مراحل تحقیق

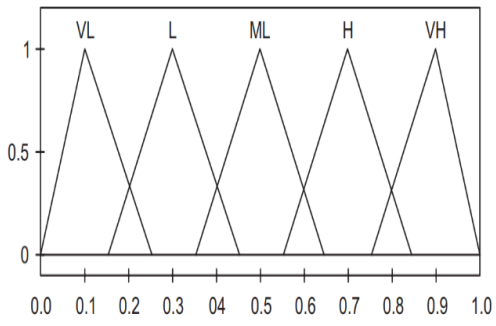
1 Boyd
2 Utley
3 Atchison
4 Morrison

۵. استفاده از روش فازی تاپسیس

در این بخش به بررسی و انتخاب بهترین سیستم ترابری در معدن مس زاغدره با استفاده از مدل فازی تاپسیس پرداخته می‌شود. مدل فازی تاپسیس به دلیل قابلیت آن در تحلیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها در شرایط عدم قطعیت و ابهام، به‌عنوان یک روش مؤثر در این پژوهش انتخاب شده است. در مدل فازی تاپسیس از اعداد فازی مثلثی استفاده می شود. یک عدد فازی مثلثی $\tilde{a}$ را می توان با یک سه گانه (a_1 ،a_2 ،a_3) تعریف کرد[۳۴]. معادله مفهومی و شکل ریاضی آن با معادله ۱ نشان داده شده است:

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} 0 & x \le a_1 \\ \dfrac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \le a_2 \\ \dfrac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 < x \le a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases}$$

کلاس های هر نقشه می توانند با مقدارهای عضویت فازی در یک جدول خصوصیت ها همراه شوند. همان طور که اشاره شد مقدارهای عضویت فازی باید در محدوده (۱،۰) قرار بگیرند اما هیچ مانع و محدودیت عملی در مورد انتخاب مقدارهای عضویت فازی وجود ندارد. تصمیم گیرندگان از متغیرهای زبانی برای ارزیابی اهمیت ویژگی ها و رتبه بندی گزینه ها با توجه به ویژگی های مختلف استفاده می کنند. در این پژوهش مقادیر دقیقی برای رتبه‌بندی عملکرد و وزن‌های ویژگی در نظر گرفته شده است. به منظور نشان دادن ایده MACD فازی، عمداً مقادیر دقیق موجود را به پنج سطح، متغیرهای زبانی فازی تبدیل شده است. بسیار کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و بسیار زیاد (VH). شکل ۳ و جدول ۲ توابع عضویت فازی را نشان می‌دهد[۳۴].



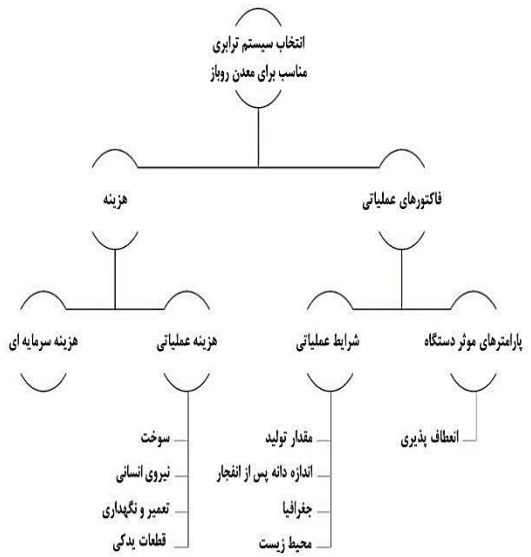
شکل(۳). توابع عضویت فازی مثلثی

جدول (۲). طیف امتیازدهی فازی به گزینه ها

بیان کیفی	درجه‌اهمیت	مقیاس فازی
بسیار کم (VL)	۱	(۰،۰۰،۰،۱۰،۰،۲۵)
کم (L)	۲	(۰،۱۵،۰،۳۰،۰،۴۵)
متوسط (M)	۳	(۰،۳۵،۰،۵۰،۰،۶۵)
زیاد (H)	۴	(۰،۵۵،۰،۷۰،۰،۸۵)
بسیار زیاد (VH)	۵	(۰،۷۵،۰،۹۰،۱،۰۰)

۵-۱. پارامترهای موثر در انتخاب بهترین سیستم

برای انتخاب گزینه مناسب عوامل بسیاری باید مورد توجه قرار بگیرند. این عوامل بر اساس شناخت معیارهای موثر و بررسی سوابق علمی با توجه به شرایط معدن انتخاب می‌شوند. در این تحقیق عوامل فرعی به دو عامل اصلی فاکتورهای عملیاتی و هزینه‌ای تقسیم بندی می شوند که در شکل ۴ به آن ها اشاره شده است.



شکل(۴). پارامترهای موثر برای انتخاب بهترین سیستم

برای وزن دهی به شاخص ها باید ماتریس مقایسات زوجی تشکیل شود به منظور محاسبه وزن شاخص ها، پرسشنامه‌ای طراحی شد که براساس شاخص های قید شده در گزارش قبلی آماده شده است. این پرسشنامه در اختیار متخصصین این حوزه در معادن و اساتید دانشگاه قرار گرفته است تا با اعمال نظرات وزن شاخص ها قابل محاسبه شود. این پرسشنامه برای حل یک مسئله تصمیم گیری چندمعیاره طراحی شده است. هدف از این مسئله انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه های سنگ شکن متحرک و نوارنقاله(سیستم ۱)، کامیون - نوار نقاله(سیستم۲) و نوار نقاله کامل(سیستم ۳) می باشد.

۲-۵. وزن دهی پارامترها

بعد از وارد کردن میانگین پاسخ پرسشنامه‌های طرح شده از متخصصین معدن وزن معیارها و زیرمعیارها مشخص شد که در جدول۳ گزارش شده است.

جدول(۳). وزن پارامترها

گزینه / معیار	سنگ شکن متحرک و نوارنقاله (سیستم۱)	کامیون - نوار نقاله (سیستم۲)	نوار نقاله کامل (سیستم۳)	وزن AHP
هزینه عملیاتی	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۵۶	۰/۲۸
هزینه سرمایه‌ای	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۶۱	۰/۱۶
شرایط عملیاتی	۰/۶	۰/۴۴	۰/۲۸	۰/۱۹
پارامترهای موثر بر دستگاه	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۱۷
سوخت	۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۱
نیروی انسانی	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۲۳
قطعات یدکی	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۱۶
تعمیر و نگهداری	۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۴۷	۰/۱۸
مقدار تولید	۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۱۷
اندازه دانه پس از انفجار	۰/۴۶	۰/۲۸	۰/۵۳	۰/۱۵
جغرافیا	۰/۵۲	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۱۷
محیط زیست	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۱۷

براساس جدول۳ بیشترین وزن برای هزینه عملیاتی و کمترین وزن برای سوخت می باشد. با توجه به اهمیت هزینه‌های عملیاتی و قیمت پایین سوخت در کشور این خروجی معقول به نظر می‌رسد. بعد از نرمال سازی جدول ۳ که به منظور رتبه بندی عملکرد متغیرهای زبانی با استفاده از معادلات زیر انجام شد.

داده های بالاتر از میانگین:

معادله (۲) $$r_{ij} = \frac{x_{ij} - min\{x_{ij}\}}{[max\{x_{ij}\} - min\{x_{ij}\}]}$$

برای داده‌های کمتر از میانگین:

(۳) $$r_{ij} = \frac{max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{[max\{x_{ij}\} - min\{x_{ij}\}]}$$

به طور مثال وزن پارامتر معیار هزینه عملیاتی در گزینه سنگ شکن متحرک و نوار نقاله بر اساس معادله ۳ به طور زیر محاسبه می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{0.59 - 0.32}{0.59 - 0.24} = 0.78$$

در این مثال اعداد ۰/۵۹ و ۰/۳۲ به‌ترتیب ماکزیمم و مینیمم مقدار سنگ شکن متحرک و نوارنقاله در جدول ۳ است. براساس محاسبات بالا جدول ۴ که اعداد نرمال شده با استفاده از معادلات ۲ و ۳ هستند تشکیل می‌شود.

جدول(۴). اعداد نرمال شده

گزینه / معیار	سنگ شکن متحرک و نوارنقاله (سیستم ۱)	کامیون - نوار نقاله (سیستم۲)	نوار نقاله کامل (سیستم۳)	وزن AHP
هزینه عملیاتی	۰/۷۸	۰/۵۷	۰/۸۶	۰/۱۱
هزینه سرمایه ای	۰/۸۱	۰/۳۵	۱/۰۰	۰/۲۲
شرایط عملیاتی	۰/۹۷	۰/۵۴	۰/۱۱	۰/۱۴
پارامترهای موثر بر دستگاه	۱/۰۰	۰/۴۹	۰/۸۹	۰/۱۹
سوخت	۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۵۴	۰/۳۸
نیروی انسانی	۰/۷۰	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۳۸
قطعات یدکی	۰/۶۲	۰/۲۷	۰/۷۶	۰/۲۲
تعمیر و نگهداری	۰/۷۶	۰/۲۷	۰/۶۲	۰/۱۶
مقدار تولید	۱/۰۰	۰/۵۴	۰/۱۱	۰/۱۹
اندازه دانه پس از انفجار	۰/۴۱	۰/۸۹	۰/۲۲	۰/۲۴
جغرافیا	۰/۲۴	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۱۹
محیط زیست	۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۱۹

حال با استفاده از تابع عضویت فازی متغیرها را براساس منطق فازی دسته بندی می شوند تا بتوان در رابطه با آن بحث شود. سپس متغیر زبانی به یک تابع عضویت مثلثی فازی تبدیل می شوند. این اولین مرحله از تحلیل تاپسیس فازی است. جدول۵ نشان دهنده اعداد فازی تاپسیس است.

جدول(۵). جدول تبدیل متغیرهای زبانی به تابع مثلثی فازی

گزینه / معیار	سنگ شکن متحرک و نوارنقاله (سیستم ۱)	کامیون - نوار نقاله (سیستم۲)	نوار نقاله کامل (سیستم۳)
هزینه عملیاتی	(۰/۴۱,۰/۶۳,۰/۸۵)	(۰/۲۶,۰/۴۵,۰/۶۵)	(۰/۵۶,۰/۸۱,۱)
هزینه سرمایه‌ای	(۰/۱۱,۰/۲۷,۰/۴۵)	(۰/۰۲,۰/۰۹,۰/۲)	(۰/۱۱,۰/۲۷,۰/۴۵)
شرایط عملیاتی	(۰/۰,۰/۰۹,۰/۲۵)	(۰/۰,۰/۰۵,۰/۱۶)	(۰/۰,۰/۰۱,۰/۰۶)
پارامترهای موثر بر دستگاه	(۰/۰,۰/۰۹,۰/۲۵)	(۰/۰,۰/۰۵,۰/۱۶)	(۰/۰,۰/۰۹,۰/۲۵)
سوخت	(۰/۱۱,۰/۲۷,۰/۴۵)	(۰/۰,۰/۰۳,۰/۱۱)	(۰/۰۵,۰/۱۵,۰/۲۹)
نیروی انسانی	(۰/۰۸,۰/۲۱,۰/۳۸)	(۰/۰۵,۰/۱۵,۰/۲۹)	(۰/۰,۰/۰۳,۰/۱۱)
قطعات یدکی	(۰/۱۹,۰/۳۵,۰/۲۹)	(۰/۰۵,۰/۱۵,۰/۲۹)	(۰/۱۹,۰/۳۵,۰/۵۵)
تعمیر و نگهداری	(۰/۰,۰/۰۷,۰/۲۱)	(۰/۰,۰/۰۳,۰/۱۱)	(۰/۰,۰/۰۷,۰/۲۱)
مقدار تولید	(۰/۰,۰/۰۹,۰/۲۵)	(۰/۰,۰/۰۵,۰/۱۶)	(۰/۰,۰/۰۱,۰.۰۶)
اندازه دانه پس از انفجار	(۰/۱۹,۰/۳۵,۰/۵۵)	(۰/۴۱,۰/۶۳۰,۰/۸۵)	(۰/۰۸,۰/۲۱,۰/۳۸)
جغرافیا	(۰/۰,۰/۰۳,۰/۱۱)	(۰/۰,۰/۰۷,۰/۲۱)	(۰/۰,۰/۰۷,۰/۲۱)
محیط زیست	(۰/۰,۰/۰۵,۰/۱۶)	(۰/۰,۰/۰۷,۰/۲۱)	(۰/۰,۰/۰۵,۰/۱۶)

سپس با استفاده معادلات ذیل فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل را بدست می آید.

معادله (۴) $$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v_j^+)^2}$$

معادله (۵) $$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v_j^-)^2}$$

که در این روابط اندیس j معرف معیار موردنظر و اندیس i معرف گزینه مورد نظر می باشد.

به طور مثال برای محاسبه فاصله از ایده‌آل و ضد ایده‌آل سیستم اول(سنگ شکن متحرک و نوارنقاله) با توجه به معادلات ۴ و ۵ و جدول.. داریم:

$$s^+ = \sqrt{\frac{1}{3}[(1-0.41)^2 + (1-0.63)^2 + (1-0.85)^2]} +$$
$$\sqrt{\frac{1}{3}[(1-0.11)^2 + (1-0.27)^2 + (1-0.45)^2]} +$$
$$\sqrt{\frac{1}{3}[(1-0.00)^2 + (1-0.09)^2 + (1-0.25)^2]} + \cdots +$$
$$\sqrt{\frac{1}{3}[(1-0)^2 + (1-0.09)^2 + (1-0.25)^2]} +$$
$$\sqrt{\frac{1}{3}[(1-0.19)^2 + (1-0.35)^2 + (1-0.55)^2]} +$$
$$\sqrt{\frac{1}{3}[(1-0.00)^2 + (1-0.03)^2 + (1-0.11)^2]} = 24.74$$

$$s^- = \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0.41)^2 + (0-0.63)^2 + (0-0.85)^2]}$$
$$+ \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0.11)^2 + (0-0.27)^2 + (0-0.45)^2]}$$
$$+ \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0.00)^2 + (1-0.09)^2 + (1-0.25)^2]} + \cdots$$
$$+ \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0)^2 + (0-0.09)^2 + (0-0.25)^2]}$$
$$+ \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0.19)^2 + (0-0.35)^2 + (0-0.55)^2]}$$
$$+ \sqrt{\frac{1}{3}[(0-0.00)^2 + (0-0.03)^2 + (0-0.11)^2]} = 8.43$$

در آخرین مرحله شاخص شباهت محاسبه می شود. مقدار شاخص شباهت بین صفر و یک تغییر می کند. هر چه گزینه مورد نظر به ایده آل مشابه تر باشد مقدار شاخص شباهت آن به یک نزدیک تر خواهد بود. معادله ۶ شاخص شباهت را نشان می‌دهد.

$$CC_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-} \qquad (۶)$$

به طور معادله شاخص شباهت برای گزینه اول که بر اساس مثال معادله ۴ و ۵ تشکیل شده است به صورت زیر است:

$$cc_1 = \frac{{d_1}^-}{{d_1}^- + {d_1}^+} = \frac{8.43}{24.74 + 8.43} = 0.26$$

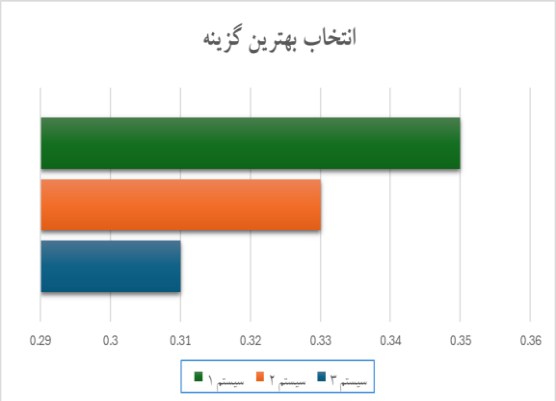
کاملاً روشن است که اگر گزینه ای بر گزینه ایده آل منطبق باشد آنگاه فاصله آن تا حل ایده آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی یک خواهد بود و در صورتی که گزینه ای بر گزینه ضد ایده آل منطبق باشد آنگاه فاصله آن تا حل ضد ایده آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی صفر خواهد بود. لذا برای رتبه بندی گزینه ها بر اساس مقدار شاخص شباهت گزینه‌ای که دارای بیشترین شاخص شباهت است در رتبه اول و گزینه ای که دارای کمترین شاخص شباهت است، در رتبه آخر قرار می‌گیرد.

در نتیجه، سنگ شکن متحرک و نوارنقاله (سیستم ۱) به عنوان مطلوب ترین سیستم در بین سه گزینه با ارزش عملکرد نهایی نرمال شده ۰,۳۵ است. در حالی که کامیون - نوار نقاله (سیستم ۲) و نوار نقاله کامل (سیستم ۳) به ترتیب با ۰,۳۳ و ۰,۳۱ به عنوان مقادیر عملکرد نهایی در رتبه های دوم و سوم

قرار گرفته اند. جدول ۶ و شکل ۵ عملکرد نهایی برای گزینه ها را نشان می‌دهد.

جدول(۶). عملکرد نهایی گزینه های متفاوت

گزینه	d_i^+	d_i^-	cc_i	cc_i نرمال شده	رتبه
سنگ شکن متحرک و نوارنقاله	۲۴/۷۴	۸/۴۳	۰/۲۶	۰/۳۵	۱
کامیون – نوار نقاله	۲۴/۱۴	۷/۷۴	۰/۲۵	۰/۳۳	۲
نوار نقاله کامل	۲۳/۸۷	۷/۲۵	۰/۲۳	۰/۳۱	۳



شکل (۵). نتایج الگوریتم فازی تاپسیس

۶. چالش‌های عملیاتی سیستم‌های حمل‌ونقل در معادن

سیستم‌های حمل‌ونقل نظیر کامیون-نوار نقاله، سنگ‌شکن و نوار نقاله، و نوار نقاله کامل، هر یک مزایا و چالش‌های عملیاتی خاص خود را دارند که تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، هزینه‌ها و پایداری عملیات می‌گذارند. چالش‌های عملیاتی این سیستم‌ها شامل مواردی چون هزینه‌های اولیه و نگهداری، انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات معدن، قابلیت اطمینان، و تأثیرات زیست‌محیطی است. شناخت دقیق این چالش‌ها و مقایسه آن‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر برای انتخاب سیستم بهینه و کاهش ریسک‌های عملیاتی کمک کند. در جدول ۷، به بررسی و مقایسه چالش‌های عملیاتی این سه سیستم پرداخته شده است[۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸].

جدول (۷). مقایسه چالش‌های عملیاتی سیستم‌های حمل‌ونقل در معادن

معیار چالش	سیستم کامیون-نوار نقاله	سیستم سنگ‌شکن و نوار نقاله (IPCC)	سیستم نوار نقاله
هزینه اولیه	متوسط (نیازمند سرمایه‌گذاری برای هر دو بخش)	هزینه اولیه بالا(سرمایه‌گذاری اولیه با سود بلندمدت)	هزینه اولیه بالا (بدون سودآوری بلندمدت)
انعطاف‌پذیری	متوسط(وابستگی به مسیر ثابت نوار نقاله)	مطلوب (طراحی بهینه جابه‌جایی را تسهیل می‌کند)	پایین (وابسته به مسیر غیرقابل‌تغییر)
قابلیت اطمینان	وابستگی نسبی (اختلال در هر بخش عملیات را مختل می‌کند)	قابلیت اطمینان بالا (سیستم یکپارچه با پایش پیشرفته)	وابستگی متوسط (خرابی کل سیستم را متوقف می‌کند)
نگهداری و تعمیرات	نگهداری ترکیبی (کامیون‌ها ساده، نوار نقاله پیچیده)	نگهداری پیچیده (نیاز به تخصص بالا و قطعات خاص برای سنگ‌شکن و نوار نقاله)	نگهداری پیچیده
تأثیرات زیست‌محیطی	متوسط (مصرف سوخت انتشارات را افزایش می‌دهد)	مصرف انرژی کمتر و کاهش آلودگی	مصرف انرژی کم
راندمان عملیاتی	راندمان پایین (وابسته به هماهنگی کند کامیون و نوار نقاله)	راندمان بسیار بالا (انتقال مداوم و بدون وقفه مواد)	راندمان متوسط (وابسته به تأمین مواد از منبع خارجی)
ایمنی	کم (تصادفات کامیون)	ایمنی بالا (اتوماسیون کامل و کاهش حضور انسانی در مناطق پرخطر)	ایمنی بالا

۶. مدلسازی ریاضی مکان مناسب سنگ شکن IPCC

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل مسئله مکان‌یابی سنگ‌شکن در معادن ارائه شده است. این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که بهینه‌سازی تصمیمات کلیدی در طول عمر پروژه را امکان‌پذیر سازد. این تصمیمات با هدف کمینه‌سازی تمام هزینه‌ها در سیستم حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. در این مدل، فرض بر این است که برنامه‌ریزی تولید معدن از قبل تعیین شده و ثابت است. به عبارت دیگر، میزان استخراج ماده معدنی و برنامه زمانی استخراج آن‌ها پیشاپیش مشخص شده و مدل نیازی به تصمیم‌گیری در مورد این پارامترها ندارد. بنابراین، تمرکز اصلی مدل بر بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل است و تصمیماتی که در خصوص مکان‌یابی و جابجایی سنگ‌شکن گرفته می‌شود، متناسب با برنامه تولیدی ثابت خواهند بود. این بدان معناست که تصمیمات مربوط به نصب و جابجایی باید به گونه‌ای باشد که نیازهای تولیدی معدن در هر مرحله از پروژه به بهترین شکل ممکن برآورده شود[۳۸].

مدل ارائه‌شده بر اساس شش رابطه ریاضی اصلی بنا شده است که هر یک از این روابط نشان‌دهنده ارتباط بین متغیرهای تصمیم‌گیری و پارامترهای هزینه‌ای هستند. این روابط به مدل کمک می‌کنند تا با در نظر گرفتن تمامی هزینه‌ها و محدودیت‌ها، بهترین تصمیمات ممکن را اتخاذ کنند.

در ادامه، مدلی از برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل مسئله مکان‌یابی سنگ‌شکن معرفی می‌شود (روابط ۷ تا ۱۲). این مدل به منظور تصمیم‌گیری درباره محل نصب سنگ‌شکن و نوار نقاله، زمان جابجایی آن‌ها در طول دوره پروژه طراحی شده است. هدف این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سیستم حمل‌ونقل است. هزینه‌های سرمایه‌ای شامل خرید کامیون‌ها و همچنین هزینه‌های مرتبط با خرید و یا جابجایی نصب سنگ‌شکن و نوار نقاله در نظر گرفته می‌شود. همچنین، هزینه‌های عملیاتی مرتبط با حمل و نقل توسط کامیون‌ها و نوار نقاله‌ها نیز لحاظ شده است. در این مدل، فرض بر این است که برنامه‌ریزی و تولید پیشاپیش تعیین شده است. علاوه بر این، استفاده از سیستم IPCC (سیستم حمل و نقل پیوسته در معدن) تنها برای حمل ماده معدنی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این مدل بیان می‌شود.

$$\text{Min } Z = \sum_{i\in j}\sum_{t\in T}(T_t \times HC_i^t + CC_i^t)\, S_i^t + \sum_{i\in j}\sum_{t\in T} PC_i^t\, Z_i^t + \sum_{i\in j}\sum_{i\in j}\sum_{t\in T} RC_{i,j}^t\, y_{i,j}^t + \sum_{t\in T} TP_t n_t \quad (۷)$$

Subject to:

$$z_i^t + \sum_{j\in J} y_{j,i}^t = s_i^t \qquad \forall i \in J, t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{j\in J} s_i^t = 1 \qquad \forall t \in T \quad (۹)$$

$$y_{i,j}^t \le s_i^{t-1} \qquad \forall i, j \in J, t \in T \quad (۱۰)$$

$$z_i^t + \sum_{j\in J} y_{j,i}^t \le 1 \qquad \forall i \in J, t \in T \quad (۱۱)$$

$$\sum_{\tau\in T,\tau\le t} EOH\, n_\tau \ge \sum_{j\in J} THT_i^t\, s_i^t \qquad \forall t \in T \quad (۱۲)$$

مجموعه ها

$i, j \in J$ مجموعه نقاط کاندید برای قرارگیری سنگ شکن

$t, \tau \in T$ مجموعه دوره های زمانی برنامه ریزی

پارامترها

T_t تناژ ماده معدنی که باید از معدن به کارخانه فراوری در سال حمل شود.

HC_i^t هزینه عملیاتی حمل کامیون از معدن به نقطه کاندید i در دوره برنامه ریزی t (دلار بر تن)

CC_i^t هزینه عملیاتی سالانه حمل نوار از نقطه کاندید i تا کارخانه در سال t برحسب دلار

PC_i^t هزینه خرید و نصب سنگ شکن در نقطه i و نواری که این نقطه را به کارخانه در سال t وصل می کند.

$RC_{i,j}^t$ هزینه جابجایی سنگ شکن و نوار نقاله از نقطه کاندید i به نقطه j در سال t

TP هزینه خرید کامیون

EOH ساعت کار مفید سالانه کامیون

THT_i^t مقدار ساعت کار مفید لازم کامیون ها برای حمل تمام مواد استخراج شده در سال t به نقطه کاندید i

متغیرها

s_i^t متغیر باینری، ۱ اگر سنگ شکنی در سال t در نقطه کاندید i قرار بگیرد و صفر در غیر این صورت

z_i^t متغیر باینری، ۱ اگر سنگ شکن در دوره t خریداری و در نقطه کاندید i نصب شود و صفر در غیر این صورت

$y_{j,i}^t$ متغیر باینری، ۱ اگر سنگ شکن در دوره t از نقطه کاندید i به نقطه کاندید j جابجا گردد و صفر در غیر این صورت

n_t تعداد کامیون های خریداری شده در دوره t

رابطه ۷ تابع هدف مدل بوده و به دنبال کمینه سازی مجموع ارزش خالص فعلی هزینه های عملیاتی و سرمایه‌ای حمل و نقل شامل هزینه‌های سرمایه ای برای خرید کامیون و خرید و جابجایی نوار و سنگ شکن و همچنین هزینه های عملیاتی کامیون و نوار می باشد. رابطه ۸ تضمین می کند که در هر

نقطه کاندید و در هر دوره زمانی، سنگ شکن می تواند یا برای اولین بار خریداری و نصب شود و یا از نقطه دیگری به آن نقطه جابجا گردد. رابطه ۹ نشان می دهد که در هر دوره تنها یک سنگ شکن مکان‌یابی گردد. رابطه ۱۰ از جابجایی سنگ شکنی که خریداری و نصب نشده است جلوگیری می نماید. رابطه ۱۱ نشان می دهد که در هر نقطه کاندید، سنگ شکن یا می تواند برای اولین بار نصب شود و یا از این نقطه به نقطه دیگری منتقل گردد. رابطه ۱۲ نیز تضمین می کند که در هر دوره تعداد کامیون کافی برای انجام عملیات حمل به سنگ شکن وجود داشته باشد[۳۸].

برای اجرای مدل از زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شده است که این زبان در بستر محیط جوپیتر اجرا شده است. استفاده از جوپیتر در این تحقیق به دلیل قابلیت‌های تعاملی و پشتیبانی گسترده از کتابخانه‌های مرتبط با بهینه‌سازی ریاضی مانند Pulp، بسیار موثر است. در این محیط، مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح به راحتی تعریف می شود و محدودیت‌ها و تابع هدف قابل تنظیم هستند. در نهایت با اجرای مدل، بهینه‌ترین راه‌حل‌ها برای مسئله پیدا می‌شود.

۶-۱. سناریوهای مدنظر برای قرارگیری سنگ شکن

برای شرایط مدلسازی، سه سناریو تعریف شده‌اند که بر اساس محل قرارگیری سنگ‌شکن در سال‌های مختلف، به‌طور متفاوتی تعیین می‌شوند. در ادامه، به شرح هر یک از این سه سناریو پرداخته می‌شود.

سناریو اول

در این سناریو، سنگ‌شکن ابتدا در لبه ابتدایی پیت قرار می‌گیرد و از سال سوم عمر معدن قابل استفاده خواهد بود. دلیل این انتخاب، شروع استخراج ماده معدنی در سال سوم است. بنابراین، داده‌های مربوط به سال سوم برای این سناریو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

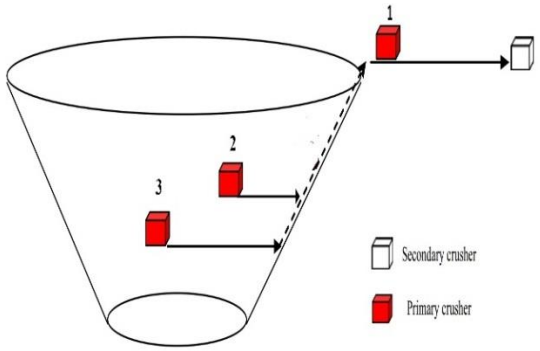
سناریو دوم

در این سناریو، سنگ‌شکن به داخل پیت منتقل می‌شود و در سال هفتم از عمر معدن جابه‌جا خواهد شد. علت این انتخاب، هزینه‌های سنگین جابه‌جایی در سال‌های اولیه به دلیل بزرگی فضای داخل پیت است. همچنین، فاصله دهانه استخراجی به ابتدای پیت، با توجه به وجود ماشین‌آلات، به‌صرفه‌تر خواهد بود.

سناریو سوم

در این سناریو، سنگ‌شکن در سال دهم به ابتدای پیت منتقل می‌شود. نکته مهم در این سناریو این است که عمر معدن ۱۳ سال است و جابه‌جایی تنها برای سه سال پایانی پیش‌بینی شده است. در این سال‌ها، عیار ماده معدنی کاهش یافته و ارزش خالص معدن نیز به تدریج رو به کاهش خواهد بود. همچنین، عیار حد ۰/۲ و پایین‌تر قابلیت استخراج ندارد.

شکل ۶ نشان دهنده محل قرار گیری سنگ شکن در سناریوهای مختلف می باشد.



شکل(۶). شماتیک نقاط برای جایگذاری سنگ شکن

بعد از اجرای کد مشخص شد که در سال های ۱تا ۳ بهترین مکان نقطه شماره ۱ (در ابتدای پیت) می باشد، این نقطه بر اساس سناریو اول می باشد. در سال های۳ تا ۷ که سناریو دوم می‌باشد بهترین نقطه، مکان شماره ۲ است. در آخرین سناریو ۳ که برای سال های ۷ تا ۱۳ می باشد نقطه پیشنهادی برای مکان مناسب نقطه ۲ می باشد. ذکر این نکته ضروری است که مدلسازی بر اساس دستور در وضعیت بهینه می باشد.

۷.تحلیل حساسیت

به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترهای کلیدی بر تصمیم‌گیری مکان‌یابی سنگ‌شکن، تحلیل حساسیت بر روی مدل پیشنهادی انجام شد. در این تحلیل، پارامترهای ورودی با تغییرات ۱۰٪ افزایش داده شدند و اثر این تغییرات بر خروجی مدل بررسی گردید.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که هزینه جابه‌جایی سنگ‌شکن و حداقل مقدار تناژ ورودی به کارخانه بیشترین تأثیر را بر تعیین مکان سنگ‌شکن دارند. به‌ویژه، تغییرات در حداقل مقدار تناژ ورودی که به عوامل مختلفی مانند هزینه جابه‌جایی و ظرفیت حمل وابسته است، باعث تغییر در مکان سنگ‌شکن می‌شود. این امر به دلیل وابستگی تناژ ورودی به سایر پارامترهاست، به‌طوری‌که تغییر در آن می‌تواند موجب تغییر در تصمیمات مربوط به مکان‌گذاری و تخصیص منابع گردد.

با این حال، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تغییرات این پارامترها در اغلب موارد منجر به عدم جابه‌جایی سنگ‌شکن در طول دوره‌های برنامه‌ریزی شده است. این موضوع بیانگر آن است که مدل ارائه‌شده به‌گونه‌ای طراحی شده که در شرایط مختلف، تا حد امکان از جابه‌جایی‌های غیرضروری جلوگیری

کرده و به یک الگوی پایدار در مکان‌یابی دست یابد. در جدول۷ مکان مناسب با تغییر در پارامترهای بیان شده بر اساس شکل ۷ قابل مشاهده است.

جدول(۷). مکان سنگ شکن به ازای ۱۰٪تغییر در هزینه جابه جایی و تناژ ورودی به کارخانه

۱۰٪ تغییر در مقدار تناژ ورودی به کارخانه	۱۰٪ تغییر در هزینه جابه جایی سنگ شکن	خروجی بر اساس داده های اصلی
۱	۱	۱
۱	۱	۲
۱	۱	۲

۸. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل در معدن مس زاغدره، ترکیبی از مدل فازی تاپسیس و برنامه‌ریزی ریاضی را به کار برده است تا با ارائه چارچوبی جامع، به انتخاب بهینه‌ترین سیستم حمل‌ونقل و طراحی کارآمد آن بپردازد. یافته‌های این مطالعه نه‌تنها کارایی روش‌های انتخاب‌شده را تأیید می‌کند، بلکه بر اهمیت بهره‌گیری از رویکردهای تلفیقی در حل مسائل پیچیده معدنی تأکید دارد.

نتایج تحلیل فازی تاپسیس نشان داد که سیستم سنگ‌شکن متحرک و نوار نقاله، با توجه به معیارهایی نظیر بهره‌وری، هزینه و کارایی، به‌عنوان گزینه بهینه برگزیده شده است. این سیستم، با ترکیب انعطاف‌پذیری بالای سنگ‌شکن متحرک و ظرفیت حمل مؤثر نوار نقاله، نیازهای عملیاتی معدن را برآورده کرده و نقش برجسته‌ای در کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کارایی ایفا می‌کند. همچنین، برای بهینه‌سازی مکان‌یابی تجهیزات، از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شد. این مدل امکان شناسایی بهینه‌ترین نقاط نصب و جابجایی سنگ‌شکن‌ها و نوار نقاله‌ها را در طول عمر پروژه فراهم می‌سازد. نتایج این بخش به شرح زیر است:

- در سال‌های ۱ تا ۳، نصب سنگ‌شکن در نقطه شماره ۱ (ابتدای پیت معدن) به دلیل کمترین هزینه و کاهش زمان انتقال مواد، به‌عنوان گزینه بهینه شناسایی شد.
- در بازه سال‌های ۳ تا ۷، جابجایی سنگ‌شکن به نقطه شماره ۲ پیشنهاد شد که این مکان با کاهش مسافت حمل و بهبود دسترسی به منابع جدید همراه بود.

در سال‌های ۷ تا ۱۳، نقطه شماره ۲ همچنان به‌عنوان مکان مناسب باقی ماند که پایداری عملیات را تضمین کرده و هزینه‌های ناشی از جابجایی‌های مکرر را کاهش داد.

۷. مراجع

[1] M. Lotfi and M. Karimi, "Mineralogy and ore genesis of Bayche Bagh five elements (Ag-Ni-Co-As-Bi) vein deposit (NW Zanjan, Iran)," *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, vol. 12, no. 53, pp. 40-55, 2004.

[2] Q. Feng, W. Yang, S. Wen, H. Wang, W. Zhao, and G. Han, "Flotation of copper oxide minerals: A review," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 32, no. 6, pp. 1351-1364, 2022.

[3] Z.-F. Cao, H. Zhong, G.-Y. Liu, and S.-J. Zhao, "Techniques of copper recovery from Mexican copper oxide ore," *Mining Science and Technology (China)*, vol. 19, no. 1, pp. 45-48, 2009.

[4] M. Zhang, L. Huang, X. Sun, B. Hu, Y. Li, and Z. Lan, "A new perspective on copper oxide flotation: Synthesis and mechanism study of a surfactant for sulfide-free flotation," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 155, p. 110990, 2023.

[5] J. Cai *et al.*, "Role of ammonium sulfate in sulfurization flotation of azurite: Inhibiting the formation of copper sulfide colloid and its mechanism," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 575-584, 2022.

[6] K. Lee, D. Archibald, J. McLean, and M. Reuter, "Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors," *Minerals engineering*, vol. 22, no. 4 ,pp. 395-401, 2009.

[7] B. L. Ge, Y. X. Fu, and Q. Li, "A Copper Oxide Ore Treatment by Flotation," *Advanced Materials Research*, vol. 813, pp. 230-233, 2013.

[8] M. Asadi, F. Soltani, M. R. T. Mohammadi, D. A. Khodadadi, and M. Abdollahy, "A successful operational initiative in copper oxide flotation: Sequential sulphidisation-flotation technique," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 55, 2019.

[9] R. Zhu, G. Gu, Z. Chen, Y. Wang, and S. Song, "A new collector for effectively increasing recovery in copper oxide ore-staged flotation," *Minerals*, vol. 9, no. 10, p. 595, 2019.

[10] S. Koleini, F. Soltani, and M. Abdollahy, "Optimization of the reagent types and dosage in selective flotation of Cu-Zn Taknar mine by using D-Optimal method of statistical experiments design," *Journal of Mining Engineering*, vol. 8, no. 19, pp. 1-11, 2013.

[11] T. Kundu, S. Senapati, S. K. Das, S. I. Angadi, and S. S. Rath, "A comprehensive review on the recovery of copper values from copper slag," *Powder Technology* ,vol. 426, p. 118693, 2023.