1986
Imam Hossein
Comprehensive
University

Construction Science and Technology
Volume 6, Issue 2 , page : 25-38
https://stc.ihu.ac.ir/

The Optimal Location and Suitable Transport System Selection in Open-Pit Mines Using the Fuzzy TOPSIS Model and Integer Programming(Case Study: Zaghdareh Copper Mine)

Ali Bameri [1*], Javad ziaie [2]

[1 *]Correspondence: PhD candidate in Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan,Iran. a.bameriii@gmail.com
[2] PhD in Mining Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood,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:
Fuzzy TOPSIS,
Integer Programming,
Crusher and Conveyor System,
Mining Transportation Systems

ABSTRACT

The present study aims to select the optimal location and transport system in the Zaghder Copper Mine. To achieve this, a combination of the Fuzzy TOPSIS model and mathematical programming is utilized. The Fuzzy TOPSIS model, as a powerful tool for analyzing and prioritizing alternatives under uncertainty, is used to evaluate three main transport system options: mobile crusher and conveyor, truck-conveyor, and full conveyor system. The results indicate that the mobile crusher and conveyor system, based on criteria such as productivity, cost, and efficiency, is identified as the best option. In the second part of the study, integer programming is applied for the optimal location of IPCC. This model can determine the best locations for installing and relocating the crusher and conveyor throughout the project's lifespan, taking into account operational and capital costs and constraints. The results show that in the first to third years, installing the crusher at location 1 (the beginning of the pit) incurs the lowest cost and reduces material transportation time. From years three to seven, relocating the crusher to location 2 (pit number 7) is suggested, which shortens the transportation distance and improves access to new resources. In years seven to thirteen, location 2 remains the optimal choice, reducing the costs of frequent relocations.

Cite this article: Bameri, A., & Ziaie, J. (2025). Optimization of Conveyor and Crusher System for Open-Pit Mining Using Fuzzy TOPSIS and Integer Programming. Construction science and technology, 6(2), 25-38. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.3.9

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 ۳۸-۲۵

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

انتخاب بهینه‌ترین مکان و سیستم ترابری مناسب در معادن روباز با استفاده از مدل فازی تاپسیس و برنامه‌ریزی عدد صحیح (مطالعه موردی: معدن مس زاغدره)

علی بامری[*۱]، جواد ضیائی[۲]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران a.bameriii@gmail.com

[۲] دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود ، شاهرود ، ایران

چکیده

پژوهش حاضر با هدف انتخاب بهینه‌ترین مکان و سیستم حمل‌ونقل در معدن مس زاغدره انجام شده‌است. برای این منظور، ترکیبی از مدل فازی تاپسیس و برنامه‌ریزی ریاضی به‌کار گرفته می‌شود. مدل فازی تاپسیس به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها در شرایط عدم قطعیت، به‌منظور ارزیابی سه گزینه اصلی سیستم حمل و نقل، شامل سنگ‌شکن متحرک و نوار نقاله، کامیون-نوار نقاله و نوار نقاله کامل، استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که سیستم سنگ‌شکن متحرک و نوار نقاله، با توجه به معیارهایی مانند بهره‌وری، هزینه و کارایی، به‌عنوان بهترین گزینه معرفی می‌شود. در بخش دوم پژوهش، برای مکان‌یابی مناسب سنگ‌شکن داخل پیت (IPCC)، از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده می‌شود. این مدل قادر است با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای، بهترین نقاط برای نصب و جابجایی سنگ‌شکن و نوار نقاله را در طول عمر پروژه تعیین کند. نتایج نشان می‌دهد که در سال‌های اول تا سوم، نصب سنگ‌شکن در نقطه شماره ۱ (ابتدای پیت معدن) کمترین هزینه را به‌دنبال دارد و زمان انتقال مواد را کاهش می‌دهد. در سال‌های سوم تا هفتم، جابجایی سنگ‌شکن به نقطه شماره ۲ (ابتدای پیت در سال ۷) پیشنهاد می‌شود که مسافت حمل مواد را کوتاه‌تر کرده و دسترسی به منابع جدید را بهبود می‌بخشد. در سال‌های هفتم تا سیزدهم، نقطه شماره ۲ به‌عنوان مکان مناسب باقی می‌ماند و هزینه‌های جابجایی‌های مکرر کاهش می‌یابد.

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:

فازی تاپسیس،

برنامه‌ریزی عدد صحیح،

سیستم سنگ‌شکن و نوار نقاله،

سیستم‌های ترابری معدنی

استناد: بامری, علی, & ضیائی, جواد. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی سیستم حمل‌ونقل در معادن روباز با استفاده از مدل فازی تاپسیس و برنامه‌ریزی عدد صحیح: مطالعه موردی معدن مس زاغدره. علوم و فنون سازندگی, ۶(۲), ۲۵-۳۸. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.3.9

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

OPEN ACCESS

CC BY

© نویسندگان.

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

1 Multi-objective decision making
2 multi-attribute decision making

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 می‌شوند. با ادامه استخراج در بلوک‌های 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 کواری سنگ آهک در نزدیکی شهر ایزمیر در ترکیه به دست آوردند آن‌ها تصمیم گرفتند که دستگاه های سنگ شکنی و

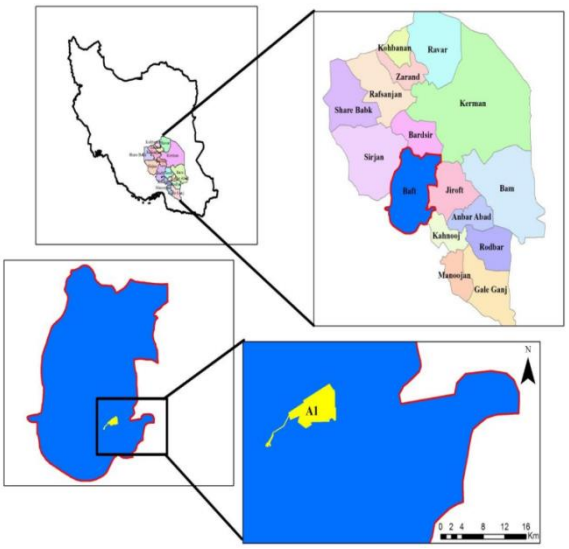
1 Dos Santos
2 Erodenberg
3 MacPhail
4 Richards
5 Onur
6 Karakus

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 زاغده

معدن مس زاغده 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 الترامافیک 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].

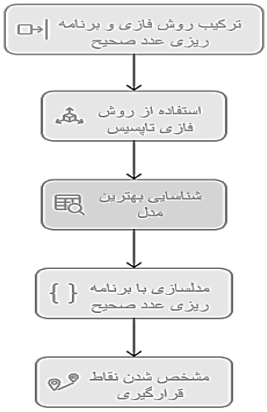


شکل (۱). موقعیت معدن مس زاغده بر روی نقشه تقسیمات استان کرمان

مقدار ذخیره زمین شناسی این معدن حدود ۱۸,۹میلیون 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

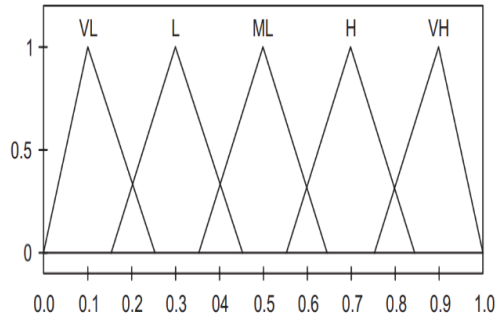
1 Boyd
2 Utley
3 Atchison
4 Morrison

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].



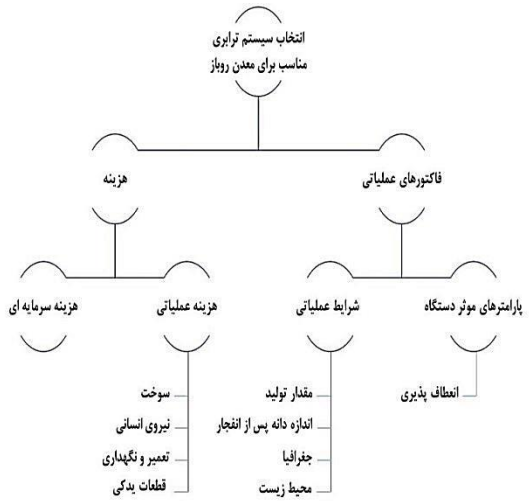
شکل(۳) .توابع عضویت فازی مثلثی

جدول (۲). طیف امتیازدهی فازی به گزینه ها

بیان کیفی	درجه‌اهمیت	مقیاس فازی
بسیار کم (VL)	۱	(۰،۰۰،۰،۱،۰،۲۵)
کم (L)	۲	(۰،۱۵،۰،۳،۰،۴۵)
متوسط (M)	۳	(۰،۳۵،۰،۵،۰،۶۵)
زیاد (H)	۴	(۰،۵۵،۰،۷،۰،۸۵)
بسیار زیاد (VH)	۵	(۰،۷۵،۰،۹،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 می شوند. در این تحقیق عوامل فرعی به دو عامل اصلی فاکتورهای عملیاتی و هزینه ای 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:

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

برای داده های کمتر از میانگین:

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

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 به ترتیب 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 می‌شوند. 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 می دهد.

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

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

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

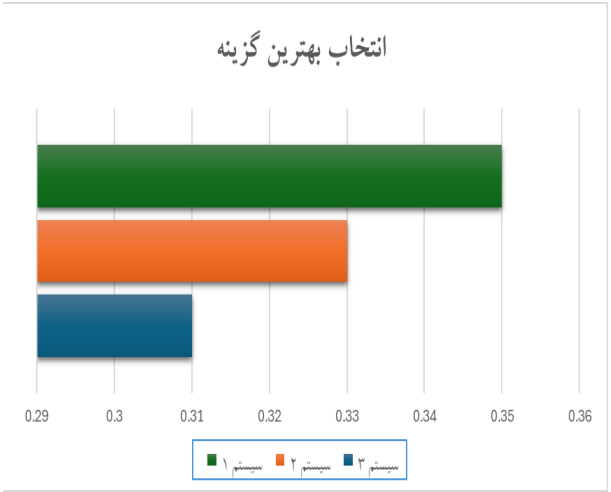
کاملاً روشن است که اگر گزینه ای بر گزینه ایده آل منطبق باشد آنگاه فاصله آن تا حل ایده آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی یک خواهد بود و در صورتی که گزینه ای بر گزینه ضد ایده آل منطبق باشد آنگاه فاصله آن تا حل ضد ایده آل مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی صفر خواهد بود. لذا برای رتبه بندی گزینه ها بر اساس 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.

(۷)

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

Subject to:

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

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

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

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

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

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.

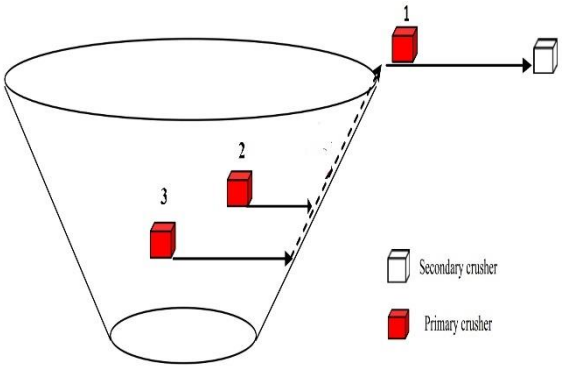
سناریو دوم

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.نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل در معدن مس زاغده، 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] H. Taherkhani and R. Doostmohammadi, “Transportation costs: A tool for evaluating the effect of rock mass mechanical parameters on blasting results in open pit mining,” *J. Min. Sci.*, vol. 51, pp. 730–742, 2015.

[2] L. Zhang and X. Xia, “An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1779–1784, 2015.

[3] M. Javanshirgiv and M. Safari, “The selection of an underground mining method using the fuzzy topsis method: A case study in the Kamar Mahdi II fluorine mine,” *Min. Sci.*, vol. 24, 2017.

[4] F. Sitorus, J. J. Cilliers, and P. R. Brito-Parada, “Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 121, pp. 393–417, 2019.

[5] F. S. Namin, A. Ghadi, and F. Saki, “A literature review of Multi Criteria Decision-Making (MCDM) towards mining method selection (MMS),” *Resour. policy*, vol. 77, p. 102676, 2022.

[6] S. Mijalkovski, O. F. Efe, Z. Despodov, D. Mirakovski, and D. Mijalkovska, “Underground mining method selection with the application of TOPSIS method,” *Geosci. Eng. J.*, vol. 68, no. 2, pp. 125–133, 2022.

[7] M. Yavuz, “Application of the TOPSIS method to solve some decision-making problems in mining operations,” *J. Undergr. Resour.*, vol. 2, pp. 21–34, 2012.

[8] O. Rivera Letelier, D. Espinoza, M. Goycoolea, E. Moreno, and G. Muñoz, “Production scheduling for strategic open pit mine planning: a mixed-integer programming approach,” *Oper. Res.*, vol. 68, no. 5, pp. 1425–1444, 2020.

[9] H. Eivazy and H. Askari-Nasab, “A mixed integer linear programming model for short-term open pit mine production scheduling,” *Min. Technol.*, vol. 121, no. 2, pp. 97–108, 2012.

[10] M. Monjezi, H. Dehghani, T. N. Singh, A. R. Sayadi, and A. Gholinejad, "Application of TOPSIS method for selecting the most appropriate blast design," *Arab. J. Geosci.*, vol. 5, no. 1, p. 95, 2012.

[11] M. J. Rahimdel and M. Karamoozian, "Fuzzy TOPSIS method to primary crusher selection for Golegohar Iron Mine (Iran)," *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, pp. 4352–4359, 2014.

[12] M. J. Rahimdel and R. Bagherpour, "Haulage system selection for open pit mines using fuzzy MCDM and the view on energy saving," *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, pp. 187–199, 2018.

[13] R. Kopa, A. S. Muji, and D. Ahmad, "Selection of Most Proper Blasting using TOPSIS Method in PT Pamapersada Nusantara Jobsite TOPB," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2019, p. 12026.

[14] S. Mijalkovski, D. Peltechki, K. Zeqiri, J. Kortnik, and D. Mirakovski, "Risk assessment at workplace in underground lead and zinc mine with application of fuzzy TOPSIS method," *J. Inst. Electron. Comput.*, vol. 2, no. 1, pp. 121–141, 2020.

[15] M. A. M. Ali and J.-G. Kim, "Selection mining methods via multiple criteria decision analysis using TOPSIS and modification of the UBC method," *J. Sustain. Min.*, vol. 20, no. 2, pp. 49–55, 2021.

[16] G. Zhang, Y. Xue, C. Bai, M. Su, K. Zhang, and Y. Tao, "Risk assessment of floor water inrush in coal mines based on MFIM-TOPSIS variable weight model," *J. Cent. South Univ.*, vol. 28, no. 8, pp. 2360–2374, 2021.

[17] S. Li *et al.*, "Mining method optimization of difficult-to-mine complicated orebody using Pythagorean fuzzy sets and TOPSIS method," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3692, 2023.

[18] I. Nikolić, A. Stojanović, and M. Mitrović, "A NOVEL HYBRID DECISION-MAKING MODEL: FUZZY AHP-TOPSIS APPROACH FOR PRIORITISING COPPER SMELTING PROCESSES," *Mater. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 147–157, 2024.

[19] S. Sherin and S. Raza, "Risk Analysis and Prioritization with AHP and Fuzzy TOPSIS Techniques in Surface Mines of Pakistan," *J. Min. Environ.*, vol. 15, no. 2, pp. 463–479, 2024.

[20] L. Yin *et al.*, "Evaluation of green mine construction level in Tibet based on entropy method and TOPSIS," *Resour. Policy*, vol. 88, p. 104491, 2024.

[21] M. Mohammadi, S. Hashemi, and F. Moosakazemi, "Review of in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in Copper Industry," in *World Copper Conference*, 2011.

[22] A. Kamrani, Y. Pourrahimian, and H. Askari-Nasab, "In-Pit Crushing and Conveying Systems in Long-term Open Pit Mine Planning–Literature," *Min. Optim. Lab.*, vol. 1, no. 780, p. 21, 2022.

[23] D. Turnbull and A. Cooper, "In-pit crushing and conveying (IPCC)-a tried and tested alternative to trucks: Part 1," *AusIMM Bull.*, no. 5, pp. 60–64, 2010.

[24] J. A. Dos Santos, "Theory and design of Sandwich Belt High Angle Conveyors according to the Expanded Conveyor Technology," *Bulk Solids Handl.*, vol. 20, no. 1, pp. 27–38, 2000.

[25] J. Erodenberg, S. R. Winzer, and D. J. Nordin, "Direct dumping mining systems–Application and economics," *Int. J. Surf. Mining, Reclam. Environ.*, vol. 2, no. 4, pp. 193–208, 1988.

[26] A. D. MacPhail and D. M. Richards, "In-pit crushing and conveying at Highland Valley Copper," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, p. 121A.

[27] G. Konak Onur, AH & Karakus, D, "Selection of the optimum in-pit crusher location for an aggregate producer," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 107, no. 3, pp. 161–166, 2007.

[28] K. Boyd and R. W. Utley, "In-pit crushing design and layout consideration," *Miner. Process. plant Des. Pract. Control. Publ. by SME*, vol. 1, 2002.

[29] Y. Changzhi, "In-pit crushing and conveying system in Dexin pit copper haulage optimization for ore transport," in *Fifth Large Open Pit Mining Conference*, 2003, pp. 49–53.

[30] T. Atchison and D. Morrison, "In-pit crushing and conveying bench operations," in *Proceedings of the tenth Iron Ore Conference*, 2011, pp. 123–131.

[31] R. Dimitrakopoulos and S. Ramazan, “Stochastic integer programming for optimising long term production schedules of open pit mines: methods, application and value of stochastic solutions,” *Min. Technol.*, vol. 117, no. 4, pp. 155–160, 2008.

[32] J. L. E. Topal, “Strategies to assist in obtaining an optimal solution for an underground mine planning problem using Mixed Integer Programming,” *Int. J. Min. Miner. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 152–172, 2011.

[33] J. Ziyayi . and L Mineri “Simulation based on multi-criteria decision making for the transportation fleet selection problem, case study of Zaghadara copper mine,” *Construction Science and Technology* , vol. 1, no. 4, pp. 77–89, 2021, [Online]. Available: https://stc.ihu.ac.ir/article_206064.html

[34] S. Nădăban, S. Dzitac, and I. Dzitac, “Fuzzy TOPSIS: a general view,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 91, pp. 823–831, 2016.

[35] H. Abbaspour and C. Drebenstedt, “IPCC systems as a bulk material handling method in mines: a review regarding the technical, economic, environmental, safety and social factors,” in *Proceedings of the 8th International Symposium of Young Researchers Transport Problems*, 2019, pp. 785–796.

[36] D. Tutton and W. Streck, “The application of mobile in-pit crushing and conveying in large, hard rock open pit mines,” in *Mining Magazine Congress, Canada*, 2009.

[37] M. Dean, P. Knights, M. S. Kizil, and M. Nehring, “Selection and planning of fully mobile in-pit crusher and conveyor systems for deep open pit metalliferous applications,” in *AusIMM 2015 3rd International Future Mining Conference, Sydney, NSW, Australia*, 2015, pp. 4–6.

[38] M. Osanloo and M. Paricheh, “In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda,” *Int. J. Mining, Reclam. Environ.*, vol. 34, no. 6, pp. 430–457, 2020.