

تعیین توأم مکان و زمان استقرار و جابجایی‌های سیستم IPCC در معادن روباز با در نظر گرفتن تأثیر ارزش زمانی پول

فردین شیرمحمدی، سجاد افرائی*، مجید عطایی‌پور

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

*sajjad.afraei@aut.ac.ir

چکیده

هزینه‌های حمل‌ونقل در معادن روباز سهمی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به نیاز به استخراج کانسنگ با تناژ بالا، روش استخراج روباز به‌طور گسترده در معادن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش عمق معدن، نرخ بارگیری کامیون‌ها در واحد زمان کاهش یافته و برای حفظ تولید، معمولاً لازم است تعداد کامیون‌ها افزایش یابد که این امر موجب رشد چشمگیر هزینه‌های عملیاتی می‌شود. در مقابل، سیستم‌های حمل‌ونقل پیوسته نظیر نوار نقاله، به دلیل ظرفیت حمل بالا و عملکرد مناسب در شیب‌های زیاد، توان جابه‌جایی حجم بیشتری از ماده معدنی و باطله را دارند. از این‌رو، استفاده از سیستم سنگ‌شکنی و حمل توسط نوار نقاله درون‌معدنی (IPCC) و تعیین مکان بهینه استقرار آن‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در این پژوهش، با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌ای بالای سیستم IPCC، مکان و زمان بهینه استقرار ایستگاه سنگ‌شکن درون‌معدنی به‌گونه‌ای تعیین شده است که ارزش خالص فعلی (NPV) مجموع هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی سیستم‌های کامیون و نوار نقاله کمینه گردد. برای این منظور، تابع هدفی اصلاح‌شده توسعه داده شد که ضمن لحاظ کردن ارزش زمانی پول، تأثیر هم‌زمان هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی هر دو سیستم را در طول عمر معدن در نظر می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که تغییر روش حمل از سیستم شاول-کامیون به سیستم IPCC در سالی که منجر به کمترین NPV هزینه‌ها شود، بهینه‌ترین تصمیم اقتصادی است. در مطالعه موردی انجام‌شده بر روی یک معدن فرضی، تراز پنجم در سال پنجم به‌عنوان مکان و زمان بهینه استقرار ایستگاه سنگ‌شکن تعیین گردید. این انتخاب منجر به کاهش ۵/۱۶ درصدی هزینه‌ها نسبت به اجرای سیستم در سال نخست عمر معدن شد. تمامی مراحل تحلیل و بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار GAMS انجام گرفته است.

کلمات کلیدی

معدن روباز، سیستم شاول-کامیون، سیستم حمل نوار نقاله و سنگ‌شکن درون معدنی، مکان‌یابی سنگ‌شکن

روش روباز به دلیل استفاده از ماشین آلات بارگیری و حمل عظیم الجثه که از قدرت و ظرفیت بالایی برخوردارند، برای معادن بزرگ با شرایط ژئومکانیکی سخت و بسیار سخت کاملاً مناسب است. در بیش از ۸۰ درصد از معادن روباز جهان، از سیستم شاول-تراک برای عملیات بارگیری و حمل استفاده می‌شود [۱].

همان‌گونه که مشخص است، معدن‌کاری به روش روباز یک عملیات عظیم حفاری به شمار می‌آید که در آن باید حجم قابل توجهی از مواد معدنی استخراج و از محدوده معدن خارج شود. عملیات باربری بر اساس نوع ماده استخراج‌شده، توسط سیستم حمل‌ونقل به محل از پیش تعیین‌شده منتقل می‌شود. در معادن روباز، هزینه حمل‌ونقل حدود ۵۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شود [۲]. با افزایش عمق معدن، به‌منظور جلوگیری از کاهش تولید خالص، باید میزان تناژ استخراجی افزایش یابد. از سوی دیگر، افزایش عمق موجب افزایش فاصله حمل کامیون‌ها و در نتیجه کاهش تعداد بارهای حمل‌شده توسط هر کامیون می‌شود. در این شرایط، ناگزیر باید تعداد و ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل افزایش یابد که این امر باعث رشد قابل توجه هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری میان‌دوره‌ای خواهد شد. در نهایت، این روند ممکن است سبب شود که بخش‌هایی از ذخیره معدنی از نظر اقتصادی غیرقابل استخراج شوند.

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم سنگ‌شکنی و انتقال درون معدنی^۱ IPCC مورد توجه بسیاری از محققان و شرکت‌های معدنی قرار گرفته است. هدف اصلی این سیستم، کاهش هزینه‌های عملیاتی مربوط به حمل‌ونقل مواد معدنی است. علاوه بر انتخاب نوع مناسب سنگ‌شکن و نوار نقاله، مکان‌یابی بهینه سنگ‌شکن نیز از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چراکه مکان نامناسب می‌تواند هزینه‌های حمل‌ونقل را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

حل این‌گونه مسائل نیازمند ترکیب دانش برنامه‌ریزی تولید و مکان‌یابی تجهیزات است. بر اساس مطالعات اخیر، مسئله مکان‌یابی سنگ‌شکن از نوع NP-Hard^۲ شناخته شده است [۳] و در ابعاد بزرگ، کارایی روش‌های کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی برای حل آن محدود است. با این حال، برخی از پژوهشگران با انجام ساده‌سازی‌هایی، تلاش کرده‌اند تا به راه‌حل‌های قابل قبولی دست یابند.

در این تحقیق، هدف بهینه‌سازی مکان سنگ‌شکن در دوره‌های مختلف عمر معدن است. برای این منظور، یک معدن فرضی روباز با عمق ۲۲۵ متر مورد مطالعه قرار گرفته است. بالاترین تراز این معدن در ارتفاع ۳۰۵۷ و پایین‌ترین تراز در ارتفاع ۲۸۳۲ متر از سطح دریا قرار دارد. حجم کل ذخیره معدنی برابر با ۱۵۳ میلیون تن و میزان باطله‌برداری مورد نیاز ۲۸۵ میلیون تن است. تعداد بلوک‌های ماده معدنی و باطله به ترتیب ۱۳۶۲ و ۳۴۵۹ عدد بوده و وزن مخصوص آنها به ترتیب ۳ و ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نسبت باطله‌برداری (Stripping Ratio) در این معدن برابر با ۱/۸۶ برآورد شده است.

۲- بیان مسئله

هزینه‌های حمل‌ونقل در معادن روباز سهم قابل توجهی از کل هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد، به‌گونه‌ای که در برخی معادن این هزینه‌ها بین ۵۰ تا ۶۰ درصد کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند. روش استخراج روباز به دلیل قابلیت استفاده از ماشین‌آلات بزرگ و بارگیری با ظرفیت بالا، برای معادن با تناژ استخراج زیاد و شرایط ژئومکانیکی سخت، روش غالب محسوب می‌شود. با افزایش عمق معدن، نرخ بارگیری کامیون‌ها کاهش یافته و برای حفظ سطح تولید، لازم است تعداد و ظرفیت ناوگان حمل افزایش یابد که این امر هزینه‌های عملیاتی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، سیستم‌های حمل پیوسته مانند نوار نقاله، به دلیل ظرفیت حمل بالا و قابلیت عملکرد در شیب‌های زیاد، توان جابه‌جایی حجم بیشتری از مواد معدنی و باطله را دارند. استفاده از سیستم ترکیبی بارگیری و حمل شامل شاول-کامیون و نوار نقاله درون معدنی (IPCC) می‌تواند مزایای هر دو روش را همزمان فراهم کرده و هزینه‌های حمل‌ونقل را کاهش دهد. با این حال، موفقیت اقتصادی و عملیاتی سیستم IPCC به مکان و زمان استقرار ایستگاه سنگ‌شکن وابسته است؛ تصمیم‌گیری نادرست در این زمینه می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها، کاهش بهره‌وری و ناکارآمدی سیستم شود.

¹ In Pit Crushing and Conveying

² Non-deterministic Polynomial-time Hard, a classification of computational problems for which no polynomial-time solution is known.

بنابراین مسئله اصلی این پژوهش این است که چگونه می‌توان مکان و زمان بهینه استقرار ایستگاه سنگ‌شکن در سیستم IPCC را تعیین کرد به گونه‌ای که هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی کل سیستم حداقل شود و همزمان با برنامه‌ریزی تولید معدن هماهنگ باشد. حل این مسئله نیازمند مدلی است که ضمن در نظر گرفتن ارزش زمانی پول، اثرات اقتصادی و عملیاتی هر دو سیستم حمل را در طول عمر معدن تحلیل و مکان‌یابی و زمان‌بندی بهینه را به صورت یکپارچه ارائه دهد.

۳- نوآوری تحقیق

در اغلب پژوهش‌های پیشین، فرآیند مکان‌یابی ایستگاه سنگ‌شکن و تعیین زمان به کارگیری سیستم نوار نقاله (IPCC) به صورت دو مرحله جداگانه انجام گرفته است یا اینکه زمان دقیق استفاده از این سیستم را به درستی بیان نکرده‌اند که این موضوع موجب کاهش دقت در ارزیابی اقتصادی و تعیین نقطه بهینه انتقال روش حمل شده است. در این تحقیق، برای نخستین بار، تأثیر هم‌زمان سه عامل کلیدی شامل زمان تغییر روش حمل، مکان ایستگاه سنگ‌شکن و ترتیب استخراج بلوک‌ها به صورت یکپارچه در مدل بهینه‌سازی لحاظ شده است.

همچنین در مدل پیشنهادی، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی هر دو سیستم کامیون و نوار نقاله بر اساس ارزش زمانی پول (NPV) به صورت پویا محاسبه شده و اثر تغییر ترازهای مختلف معدن بر هزینه کل حمل بررسی گردیده است. برخلاف مطالعات پیشین که فرض می‌کردند سیستم IPCC از ابتدای عمر معدن مورد استفاده قرار گیرد یا زمان تغییر روش را ثابت در نظر می‌گرفتند، در این پژوهش، سال بهینه استفاده از سیستم نوار نقاله به عنوان یک متغیر تصمیم در مدل وارد شده است. به طور کلی، نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق هم‌زمان زمان و مکان بهینه استقرار ایستگاه سنگ‌شکن درون معدنی با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی، برنامه‌ریزی تولید و هزینه‌های سرمایه‌ای سیستم IPCC است؛ بدین ترتیب، مدل ارائه شده دیدگاهی جامع‌تر و واقع‌گرایانه‌تر برای انتخاب اقتصادی‌ترین زمان و مکان استقرار سیستم حمل پیوسته فراهم می‌سازد.

۴- پیشینه پژوهش

استورگل در سال ۱۹۸۷ با برنامه GPSS^۱ و روش سعی و خطا مکان‌هایی که بیشترین تعداد بار حمل شده، مکان کاندید اعلام کرد [۴]. هانچی در سال ۲۰۰۳ با استفاده از روش ریاضی تابع هدفی برای کمینه کردن ارزش خالص فعلی هزینه حمل سیستم کامیون و IPCC ارائه کرد [۵]. کوناک و همکاران در سال ۲۰۰۷ با نوشتن برنامه کامپیوتری و روش سعی و خطا هزینه کلی حمل یک معدن را کمینه کردند [۶]. در سال ۲۰۱۴ رحمانپور و همکاران با استفاده از روش مسئله مکان‌یابی هاب هزینه حمل و نقل را به حداقل رساندند [۷]. در سال ۲۰۱۶ پریچه و اصائلو با استفاده از یک مدل ریاضی مکان و زمان تغییر روش به نوار نقاله را به صورت جداگانه تعیین کردند [۸]. در سال ۲۰۱۷ پریچه و همکاران با استفاده از مدل ریاضی مکان ایستگاه را با هدف به حداقل رساندن فاصله حمل پیدا کردند [۹]. در سال ۲۰۱۹ اصائلو و پریچه ۳ مدل ریاضی ارائه کردند که در آن مکان ایستگاه سنگ‌شکن را با توجه به برنامه‌ریزی تولید، بدون برنامه‌ریزی تولید و با اندازه ناوگان حمل و نقل در نظر گرفتند [۱۰]. در سال ۲۰۲۰ چن و همکاران با استفاده از الگوریتم ابتکاری PSO^۲ به مکان‌یابی ایستگاه سنگ‌شکن ثابت پرداختند [۳]. در سال ۲۰۲۰ سماواتی و همکاران با یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید معدن را با مکان سنگ‌شکن و باهدف به حداکثر رساندن سود خالص حل کردند [۱۱]. در سال ۲۰۲۱ لیو و پوررحیمیان توسط یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و با به حداقل رساندن هزینه حمل و نقل، زمان جابجایی سنگ‌شکن را تعیین کردند [۱۲]. در سال ۲۰۲۲ شمسی و همکاران با مقایسه اقتصادی کف هر پوششک برای انتقال سیستم نوار نقاله به تعیین عمق بهینه استفاده از این سیستم پرداختند [۱۳]. در سال ۲۰۲۴ کامرانی و همکاران با استفاده از یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای هزینه‌های حمل را کمینه کردند. در مرحله نخست بهترین موقعیت‌های پیشنهادی برای سنگ‌شکن تعیین شدند و در مرحله دوم یک برنامه زمان‌بندی با رعایت تقدم مکانی برای ایستگاه‌های سنگ‌شکن پیشنهاد گردید [۱۴]. در سال ۲۰۲۴ فیندلی و دیمیتراکوپولوس سعی کردند با یک روش حل هیبریدی مبتنی بر شبیه‌سازی آنیلینگ و الگوریتم‌های تکاملی سنگ‌شکن را به محل‌های استخراج نزدیک کنند برای این منظور برنامه‌ریزی تولید بلند مدت معدن را بر اساس سیستم IPCC بهینه سازی کردند [۱۵]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۲۵ با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

² General Purpose Simulation Software

³ Particle Swarm Optimization

و با هدف افزایش ارزش خالص فعلی و کاهش هزینه‌های حمل به برنامه‌ریزی استراتژیک استخراج بلوک‌های معدن بر اساس سیستم نوارنقاله کاملاً متحرک پرداختند [۱۶]. نیکبین و همکاران در سال ۲۰۲۵ با مقایسه روش حمل کامیون و نوارنقاله نیمه متحرک توسط مدل‌های Extreme Gradient Boosting و Random Forest بیان کردند که سیستم^۱ SMIPCC مصرف انرژی کامیون‌ها را تا ۲۴ درصد کاهش می‌دهد [۱۷]. در سال ۲۰۲۵ کامرانی و همکاران با هدف کاهش هزینه‌های حمل و بهینه‌سازی محل استقرار و جابجایی‌های سنگ‌شکن در سیستم IPCC توسط یک رویکرد خوشه‌بندی دو مرحله‌ای که در آن الگوریتم‌های k-medoids و سلسله‌مراتبی (hierarchical) برای تعریف ایستگاه‌های سنگ‌شکن در نظر گرفتند [۱۸].

۵- روش تحقیق

در این تحقیق، مکان‌یابی سنگ‌شکن و تعیین سالی از عمر معدن که در آن ارزش خالص فعلی^۲ NPV هزینه‌ها حداقل می‌شود، مورد توجه قرار گرفته است. مکان‌یابی ایستگاه سنگ‌شکن همواره ارتباط نزدیکی با برنامه‌ریزی تولید دارد؛ در این مطالعه، برنامه‌ریزی تولید به‌عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که سیستم نوار نقاله در طول عمر معدن در امتداد یکی از دیواره‌های کاواک نهایی ثابت باقی می‌ماند. مواد استخراج‌شده ابتدا توسط کامیون به ایستگاه سنگ‌شکن واقع در مسیر نوار نقاله منتقل می‌شوند (زیرا ممکن است سنگ‌شکن تنها در انتهای نوار نقاله قرار نداشته باشد) و سپس از طریق سیستم نوار نقاله به بیرون از معدن انتقال می‌یابند.

استخراج از سمتی از معدن که نوار نقاله در آن نصب شده آغاز می‌شود و به‌تدریج به سمت مقابل گسترش می‌یابد. به‌منظور رعایت محدودیت‌های ناشی از استقرار نوار نقاله، داده‌های مورد استفاده به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که ترتیب استخراج بلوک‌ها از یک سمت معدن آغاز شود و استخراج بلوک‌های نزدیک‌تر به نوار نقاله در اولویت قرار گیرد. بنابراین، محل نوار نقاله بر توالی استخراج و در نتیجه بر NPV تأثیرگذار است.

در مرحله نخست، داده‌های هندسی و تولیدی معدن شامل مدل بلوکی، توالی استخراج، حجم باطله‌برداری و موقعیت احتمالی نوار نقاله از برنامه‌ریزی تولید استخراج شدند. فرض شد که مسیر نوار نقاله در امتداد یکی از دیواره‌های محدوده نهایی ثابت است و عملیات استخراج از همان سمت آغاز می‌شود. این فرض باعث شد محدودیت‌های مکانی سیستم و تقدم استخراج بلوک‌های مجاور نوار نقاله در مدل لحاظ شود.

در بسیاری از پژوهش‌ها اشاره شده است که هزینه سرمایه‌ای سیستم IPCC چندین برابر ناوگان کامیون بوده و از این‌رو، پیاده‌سازی آن در سال‌های ابتدایی عمر معدن به‌دلیل سرمایه اولیه بالا، توصیه نمی‌شود. با این حال، برخی محققان با فرض به‌کارگیری سیستم IPCC از ابتدای عمر معدن، به مکان‌یابی تسهیلات و ایستگاه سنگ‌شکن پرداخته‌اند [۳]. در پژوهش پریچه [۱۹]، بر اهمیت تعیین سال بهینه برای تغییر روش حمل با توجه به هزینه سرمایه‌ای اولیه تأکید شده است، اما به‌دلیل جدید بودن موضوع، تمامی جنبه‌ها به‌صورت جامع بررسی نشده‌اند. در آن پژوهش، ابتدا مکان‌یابی سنگ‌شکن انجام و سپس زمان استفاده از سیستم نوار نقاله برای چند مکان کاندید به‌صورت جداگانه بررسی شد که موجب کاهش دقت در حل مسئله گردید. دلیل این امر آن است که تعیین جداگانه زمان و مکان تغییر روش حمل، به‌طور هم‌زمان با جابجایی‌های آتی معدن هماهنگ نبوده و منجر به حداقل‌سازی واقعی هزینه‌ها نمی‌شود.

لیو [۱۲] فرض کرده است که سیستم IPCC از همان سال نخست بهره‌برداری معدن مورد استفاده قرار گیرد و مکان‌یابی سنگ‌شکن را بر این اساس انجام داده است؛ در نتیجه از اثر هزینه سرمایه‌ای بالای سیستم صرف‌نظر شده است. با این حال، هزینه‌های سرمایه‌ای بالا سبب می‌شوند که استفاده از سیستم IPCC در سال‌های ابتدایی، ارزش خالص فعلی سود معدن را کاهش یا ارزش خالص فعلی هزینه‌ها را افزایش دهد.

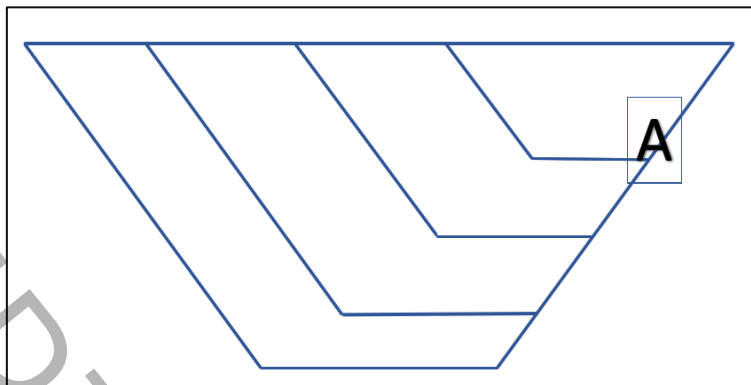
در مطالعات اخیر مشخص شد که سال تغییر روش حمل هم‌زمان با مکان‌یابی سنگ‌شکن و با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌ها و جابجایی سنگ‌شکن انجام نشده است در صورتی که در این مطالعه نشان داده شد که تمامی این عوامل را توأم در نظر گرفت و دقت محاسبات را بسیار بالاتر برد.

علاوه بر این، اگر شرایط توپوگرافی معدن اجازه استقرار سیستم IPCC را در سال‌های نخست ندهد، ناچار باید چند سال ابتدایی تنها از سیستم کامیون-شاوول برای استخراج استفاده شود تا فضای لازم برای نصب سیستم نوار نقاله فراهم گردد. به‌عنوان مثال، در شکل

¹ Semi-Mobile In-Pit Crushing and Conveying

² Net Present Value

(۱)، اگر نقطه A مکان کاندید سنگ شکن باشد، تنها در صورتی امکان پیاده سازی سیستم IPCC وجود دارد که پوششک های مربوطه استخراج شده باشند.



شکل ۱: نمایی از قرارگیری سنگ شکن بر روی دیواره محدوده نهایی

Figure 1. A view of the placement of the crusher on the wall of the final pit limit

با اینکه اهمیت استخراج توسط کامیون و شاول تنها در سال های ابتدایی مشخص شد، سوال دیگری با این عنوان مطرح می شود: هدف از پیاده سازی سیستم IPCC چیست؟ آیا به محض قابل اجرا بودن از لحاظ عملیاتی، این سیستم پیاده سازی شود یا با توجه به اینکه چه سالی ارزش خالص فعلی هزینه های سرمایه ای و عملیاتی حمل توسط کامیون بیشتر از نوار نقاله می شود، آنگاه این انتقال (استفاده از سیستم نوار نقاله به جای سیستم کامیون) انجام گیرد.

به منظور پاسخ به این سوال، فرایندی چند مرحله ای طراحی شد که شامل تحلیل هزینه ها در بازه زمانی عمر معدن و ارزیابی مکان های مختلف استقرار ایستگاه سنگ شکن بود. در این فرایند، برای هر مکان کاندید، هزینه های سرمایه ای، عملیاتی و اثر آن بر ارزش خالص فعلی معدن در سال های مختلف استخراج محاسبه و مقایسه شد.

سپس، سالی که مجموع هزینه های سرمایه ای و عملیاتی سیستم های حمل (کامیون و نوار نقاله) به کمترین مقدار می رسید، به عنوان زمان بهینه آغاز استفاده از سیستم IPCC انتخاب شد. پس از تعیین این سال، مکان بهینه سنگ شکن نیز با توجه به توپوگرافی معدن، مسیر نوار نقاله و دسترسی کامیون ها مشخص گردید.

در این مطالعه به کمینه کردن ارزش خالص فعلی هزینه های سرمایه ای و عملیاتی مربوط به ناوگان کامیون و سیستم IPCC و سپس از سالی که این هزینه ها به حالت کمینه رسید به یافتن مکان و زمان استفاده از ایستگاه سنگ شکن (سالی که هزینه سرمایه ای بالای سیستم نوار نقاله منجر به کاهش زیاد ارزش خالص فعلی درآمد معدن نشود و بعد از آن سال مکان و زمان در هر سال از عمر معدن تعیین گردد) پرداخته شده است. بنابراین به یک سری محاسبات اولیه و پیش نیاز برای یافتن حالت بهینه میان هزینه سرمایه ای سیستم نوار نقاله و هزینه عملیاتی و سرمایه ای ناوگان کامیون نیازمند است.

در این راستا، تحلیل سناریو و تکرار محاسبات برای سال های مختلف عمر معدن انجام شد تا پایداری نتایج و حساسیت پاسخ ها نسبت به تغییرات نرخ تنزیل بررسی شود. این رویکرد باعث شد ارتباط میان مکان یابی ایستگاه سنگ شکن، توالی استخراج و زمان بهینه استفاده از سیستم IPCC به صورت یکپارچه و واقع بینانه تحلیل گردد.

لازم به ذکر است که هزینه سرمایه ای سیستم نوار نقاله به دلیل اینکه ظرفیت آن از ابتدا تا انتها ثابت است و تنها طول نوار کم یا زیاد می شود، در طول عمر معدن تغییر زیادی نمی کند. اما با افزایش فاصله حمل، تعداد بار کامیون در واحد زمان کاهش یافته و به طبع باید از تعداد کامیون های بیشتری استفاده نمود. همچنین در بعضی از معادن به دلیل کاهش عیار ماده معدنی در اعماق بیشتر برای تأمین میزان خوراک کارخانه فرآوری باید مقدار بیشتری مواد معدنی استخراج کرد که منجر به نسبت باطله برداری بیشتری نیز می شود.

۶- داده ها و فرضیات مورد استفاده

برای پیاده سازی مدل مکان و زمان از اطلاعات یک معدن فرضی استفاده شده تا کارایی مدل مورد بررسی قرار گیرد. برای این معدن، داده ها تغییر یافته است. لازم به ذکر است که فقط اطلاعاتی که برای کمینه سازی هزینه حمل مورد نیاز است، شرح داده شده است. در

جدول (۱) پارامترهای معدن فرضی مورد مطالعه و جدول (۲) پارامترهای محاسبه تعداد کامیون و تخمین هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی سیستم نوارنقاله و کامیون شرح داده شده است.

جدول ۱: پارامترهای موردنیاز برای حل مسئله کمینه‌سازی هزینه حمل

Table 1. Parameters required for solving the transportation cost minimization problem

پارامتر	کمیت
مشخصات طرح نهایی معدن	
ذخیره قابل استخراج	۴۵۰ میلیون تن
عمر معدن	۲۰ سال
نسبت باطله‌برداری	۱:۱/۸۶
تراز اولین پله معدن	۳۰۵۷
تراز آخرین پله معدن	۲۸۳۳
پارامترهای طراحی معدن	
ظرفیت استخراج سالانه	۷ سال اول ۱۴ میلیون تن و بعداز آن ۲۷ میلیون تن
تعداد روز کاری سالانه	۳۰۰ روز در سال
شیب جاده‌های ارتباطی	۱۰ درصد
مشخصات مدل بلوکی	تعداد بلوک در هر جهت
	تعداد کل بلوک‌ها
	ابعاد هر بلوک
شیب کاواک در سمت دیواره نوار نقاله	۲۵ درجه

جدول ۲: مفروضات جهت تعیین هزینه سرمایه‌ای کامیون [۲۰، ۱۹]

Table 2. Assumptions for determining the capital cost of trucks [19, 20]

پارامترهای محاسبه تعداد کامیون	
ظرفیت کامیون	۱۵۰ تن
سرعت کامیون پر	۲۵ کیلومتر در ساعت
سرعت کامیون خالی	۳۲ کیلومتر در ساعت
زمان دامپ، انتظار و مانور در هر سیکل	۲ دقیقه
زمان بارگیری کامیون	۳ دقیقه
فاکتور تورم	۰/۶
فاکتور پرشوندگی	۰/۸
ساعت کار در سال با در نظر گرفتن تمامی زمان‌های بیکاری	۳۰۰۰ ساعت در سال
پارامترهای محاسبه تعداد کامیون	
پارامترهای هزینه‌ای	
متوسط فاصله حمل در ابتدای عمر معدن	۱/۵ کیلومتر
هزینه سرمایه‌ای برای خرید یک کامیون	۲/۱۵ میلیون دلار
پارامترهای هزینه‌ای	
متوسط هزینه عملیاتی حمل توسط کامیون پر و خالی	۱ دلار بر تن در هر کیلومتر
پارامترهای هزینه‌ای سیستم IPCC و کامیون	
تعداد کامیون موردنیاز سیستم تراک-شاول	۲۱ عدد
هزینه سرمایه‌ای کامیون	۲۵/۶۲ میلیون دلار
هزینه سرمایه‌ای پیاده‌سازی سیستم IPCC	۷۰ میلیون دلار
هزینه سرمایه‌ای جابجایی سنگ‌شکن اولیه	۳ میلیون دلار
هزینه عملیاتی حمل توسط نوار نقاله	۰/۱ دلار بر تن در هر کیلومتر

۷- کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل

تابع هدف و ۶ محدودیتی که ليو در نظر گرفتند به ترتيب در روابط (۱) و (۶) تا (۱۱) نمایش داده شده است [۱۲]. و محدودیتی که در این تحقیق به آن اضافه شده در رابطه (۱۲) به آن اشاره شده است. اما این محدودیت که مانع نصب سنگ‌شکن در محلی که استخراج نشده است را باعث می‌شود که در کارهای قبلی وارد نشده است. مقدار تابع هدف در رابطه (۱) جهت برآورد کمترین هزینه عملیاتی تنزیل یافته میان حمل کامیون و نوار نقاله است که تأثیر هزینه سرمایه‌ای بالای سیستم نوار نقاله در نظر گرفته نشده است [۱۲]. اگر هزینه سرمایه‌ای نوار نقاله سه برابر ناوگان کامیون سال اول در نظر گرفته شود، مشخصاً استفاده از سیستم نوار نقاله در اوایل عمر معدن تا زمانی که هزینه عملیاتی بالای حمل کامیون (مجموع هزینه‌های عملیاتی تنزیل یافته کامیون)، بیشتر از هزینه پیاده‌سازی سیستم نوار نقاله شود، صرفه اقتصادی نخواهد داشت. اصلاح شده رابطه (۱) در رابطه (۲) آمده است. که این رابطه (۱) بعلاوه C_d شده که برابر مقدار هزینه سرمایه‌ای خرید کامیون در ابتدا و هزینه سرمایه‌ای سیستم IPCC در سالی که قرار است پیاده‌سازی شود است. تا دوره t که از سیستم IPCC استفاده نشده، هزینه عملیاتی کامیون افزایش یافته و به C_d اضافه می‌شود. رابطه (۳) و (۴) به ترتیب طریقه محاسبه C_d و fC_{jt} را نشان می‌دهد که fC_{jt} مجموع هزینه‌های تنزیل یافته جابجایی مواد استخراج و ارسال شده به سنگ‌شکن j در دوره t می‌باشد. لازم به ذکر است که توابع هدف ذکر شده در نرم‌افزار گمز^۱ پیاده‌سازی شده است.

$$\min \sum_j \sum_t fC_{jt} \times y_{jt} + \sum_j C_t \times z_{jt} \quad (۱)$$

$$\min C_d + \sum_j \sum_t fC_{jt} \times y_{jt} + \sum_j C_t \times z_{jt} \quad (۲)$$

$$C_d = CT + \sum_{d=1}^t \frac{OT}{(1+r)^d} + \frac{CC}{(1+r)^t} \quad (۳)$$

$$fC_{jt} = \sum_i F_{ij} \times X_{it} \times \frac{1}{(1+r)^t} \quad (۴)$$

$$F_{ij} = (DT_{ij} \times CT + DC_j \times CC) \times (Ton_i^o + Ton_i^w) \quad (۵)$$

که در این رابطه‌ها به ترتیب هزینه‌ها، پارامترها و متغیرها در ادامه آورده شده است:

۷-۱- هزینه‌ها

C_d : مجموع هزینه سرمایه‌ای خرید کامیون در ابتدا، هزینه عملیاتی حمل توسط کامیون تا سال t که از سیستم IPCC استفاده نمی‌شود و هزینه سرمایه‌ای تجهیزات سیستم IPCC که در سال t پیاده‌سازی می‌شود.

CT : هزینه سرمایه‌ای خرید کامیون

OT : هزینه عملیاتی جابجایی مواد توسط کامیون

CC : هزینه سرمایه‌ای پیاده‌سازی سیستم IPCC

C_t : هزینه جابجایی تجهیزات سنگ‌شکن در سال t

F_{ij} : هزینه حمل بلوک i به مکان کاندید سنگ‌شکن j توسط کامیون و انتقال آن توسط نوار نقاله به بیرون از معدن و هزینه خردایش

یا هزینه عملیاتی سنگ‌شکن

CT : هزینه حمل یک تن مواد به فاصله یک کیلومتر توسط کامیون

^۱ General Algebraic Modeling System

CC : هزینه حمل یک تن مواد به فاصله یک کیلومتر توسط نوار نقاله
 fc_{jt} : مجموع هزینه‌های تنزیل یافته جابجایی مواد استخراج شده به سنگ شکن j در دوره t

۷-۲- پارامترها

r : نرخ تنزیل
 T : عمر معدن
 t : سالی از عمر معدن که سیستم IPCC پیاده‌سازی می‌شود
 I : تعداد کل بلوک‌ها
 i : شماره بلوکی که در سال t باید استخراج شود
 J : تعداد نقاط کاندید ایستگاه سنگ شکن
 DT_{ij} : فاصله حمل بلوک i به سنگ شکن j
 DC_j : فاصله حمل از سنگ شکن j به بیرون از معدن
 Ton_i^o : تناژ ماده معدنی بلوک i
 Ton_i^w : تناژ باطله بلوک i

۷-۳- متغیرها

y_{jt} : متغیر باینری که اگر برابر یک باشد نشان‌دهنده این است که سنگ شکن j در سال t استفاده می‌شود.
 z_{jt} : متغیر باینری که اگر برابر یک باشد نشان‌دهنده این است که سنگ شکن به ایستگاه j در سال t جابجا می‌شود.
 X_{it} : متغیر باینری که نشان می‌دهد بلوک i در سال t استخراج می‌شود یا خیر
 محدودیت‌ها به ترتیب در رابطه‌های (۶) تا (۱۱) آورده شده‌اند [۱۲]:

$$\forall t \in \{1, \dots, T\} \sum_{j=1}^J y_{jt} = 1 \quad (6)$$

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t \in \{2, \dots, T\} \sum_j y_{jt-1} \geq \sum_j y_{jt} \quad (7)$$

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t \in \{1, \dots, T\} z_{jt} \geq y_{jt} - y_{jt-1} \quad (8)$$

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t \in \{2, \dots, T\} z_{jt} \leq y_{jt} \quad (9)$$

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t = 1 \quad z_{jt} = y_{jt} \quad (10)$$

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t \in \{1, \dots, T\} \sum_t y_{jt} - N_n \times \sum_t z_{jt} \geq 0 \quad (11)$$

که در این رابطه‌ها:

N_n : تعداد سالی که سنگ شکن در یک تراز قرار دارد.

مفهوم محدودیت‌ها به ترتیب بیان می‌کند که،

محدودیت (۶): هر سال فقط یک سنگ شکن در دسترس است.

محدودیت (۷): ایستگاه تنها به سمت پایین می تواند حرکت کند یا اینکه در یک پله باقی بماند.

محدودیت (۸) تا (۱۰): شرایط جابجایی ایستگاه است که اگر مقدار Z_{jt} برابر ۱ باشد ایستگاه جابجا می گردد.

محدودیت (۱۱): مدت زمان باقی ماندن سنگ شکن در یک ایستگاه را قبل از جابجایی آن تنظیم می کند.

لیو برای استفاده از نوار نقاله با زاویه بالا در قسمتی که از روش دوم مرحله ای استفاده کرده اند از محدودیتی که از مکان یابی سنگ شکن را برای سالی که سطح ز استخراج نشده مانع آن شود، استفاده نکرده اند [۱۲]. محدودیت پیشنهادی در رابطه (۱۲) بیان شده است. رابطه (۱۲) در واقع هفتمین محدودیت است.

$$\forall j \in \{1, \dots, J\}, t \in \{1, \dots, T\} \quad y_{jt} \leq c_{jt} \quad (12)$$

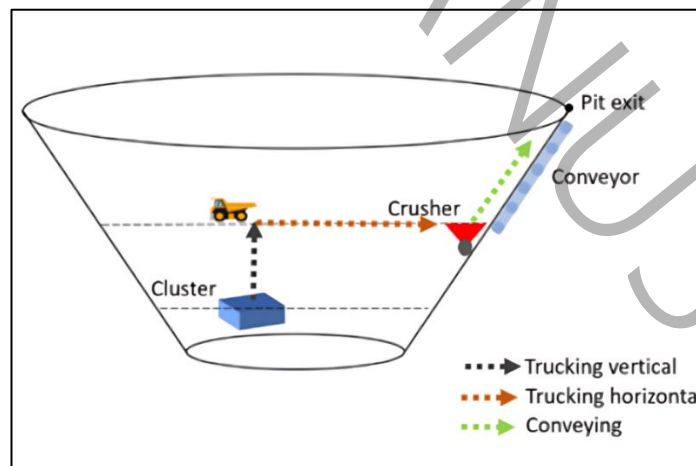
در این رابطه:

y_{jt} : متغیر باینری که اگر برابر یک باشد نشان دهنده این است که سنگ شکن j در سال t استفاده می شود.

c_{jt} : متغیر باینری که امکان پذیری استفاده از سنگ شکن را در مکان j و سال t تعیین می کند.

۸- محاسبه فاصله حمل

طبق تحقیق پریچه و لیو که به ترتیب از مرکز ثقل تراز و مؤلفه های افقی و عمودی برای محاسبه فاصله حمل استفاده شده اما هر دو روش ممکن است از نتیجه ی مطلوب فاصله بگیرد [۱۲، ۱۹]. طبیعی است که محدودیت های استخراج روش روباز این اجازه را نمی دهد که کامیون ها مواد حمل شده را به صورت مستقیم به سمت سنگ شکن حمل نمایند یا اینکه نوار نقاله مواد حمل شده را در مسیری مستقیم انتقال دهد. مسیر کامیون ها در اکثر موارد به صورت یک کمان دایره و مسیر نقاله در شیب های متغیر است. در پژوهش لیو دو مسیر به صورت مستقیم و بدون پیچ و خم در نظر گرفته شده اند به طوری که فقط مسیر کامیون شامل یک مسیر عمودی و یک مسیر افقی می باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای محاسبه فاصله حمل کامیون و نقاله به ترتیب از رابطه های (۱۳) و (۱۴) استفاده شده است.



شکل ۲: طریقه محاسبه فاصله حمل توسط کامیون و نوار نقاله [۱۲]

Figure 2. Method for calculating the haulage distance by truck and conveyor [12]

$$DT_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + |z_i - z_j| \quad (13)$$

$$DC_{ij} = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2} \quad (14)$$

که در این معادلات:

DT_{ij} : فاصله حمل بلوک i ام به سنگ شکن j
 DC_j : فاصله حمل از سنگ شکن j به بیرون از معدن
 x_i, y_i, z_i : مختصات مرکز بلوک i
 x_j, y_j, z_j : مختصات نقاط کاندید برای ایستگاه سنگ شکن
 x_0, y_0, z_0 : مختصات نقطه لبه اولین پله معدن در محدوده نهایی است.

اگر فرض شود که رمپ کامیون شیب ۱۰ درصدی داشته باشد و خوشه یا بلوک در فاصله افقی برابر ۱۰۰ متر و اختلاف ارتفاع ۱۰۰ متر از ایستگاه سنگ شکن قرار داشته باشد آنگاه مسیر حمل کامیون با توجه به رابطه (۱۳) برابر با ۲۰۰ متر محاسبه خواهد شد در صورتی که برای اختلاف ارتفاع ۱۰۰ متری یک کامیون باید مسیری به طول یک کیلومتر را طی نماید که در این صورت خطای محاسبه ۸۰ درصد می شود. تنها در حالتی که جابجایی فقط در یک تراز (سطح) رخ بدهد استفاده از رابطه ۵-۱۳ به واقعیت نزدیک است و در بیشتر موارد همراه با خطا است. به دلیل شیب عملیاتی کامیون ها افزایش عمق بسیار بیشتر از افزایش فاصله افقی بر روی فاصله حمل کامیون ها تأثیرگذار است. اکنون حالتی در نظر گرفته می شود که فاصله افقی برابر ۴۰۰ متر و اختلاف ارتفاع برابر ۱۰ متر باشد در این صورت این اشتباه است که فرض شود برای این اختلاف ارتفاع با توجه به شیب عملیاتی، فاصله حمل کامیون ۱۰۰ متر در نظر گرفته شود. همچنین رابطه ۵-۱۳ نیز جواب درست را نخواهد داد. برای حل این مشکل پیشنهاد می شود که مقدار ماکزیمم فاصله مستقیم دونقطه و فاصله بر اساس شیب عملیاتی کامیون در نظر گرفته شود. برای این منظور رابطه ۵-۱۵ پیشنهاد می شود.

$$DT_{ij} = \max \left(\sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2}, \frac{|z_j - z_i|}{10} \times 100.5 \right) \quad (15)$$

۹- تولید خط نقاله و نقاط کاندید ایستگاه سنگ شکن

نقاط j مکان هایی هستند که برای ایستگاه سنگ شکن در نظر گرفته شده اند. نوار نقاله به دیواره محدوده نهایی مماس است و فرض شده است که ایستگاه های سنگ شکن در امتداد نوار نقاله قرار دارند بنابراین بدیهی است که سنگ شکن در مختصات یکی از بلوک ها قرار گیرد. برای یافتن نقاط سنگ شکن به طوری که درون محدوده نهایی باشند ابتدا یک نقطه در "لبه" اولین پله و یک نقطه در "پایه" پایین ترین پله معدن مشخص می شود اگر این نقاط بیرون از محدوده نهایی نیز باشد مشکلی وجود نخواهد داشت. با داشتن این نقاط شیب محدوده نهایی معدن مشخص می شود و همین طور شیبی که نوار نقاله با زاویه بالا در آن قرار خواهد داشت. با داشتن این دونقطه رابطه خط آن قابل نوشتن است و بر اساس آن می توان خط نوار نقاله را به چند قسمت تقسیم کرده و هر نقطه را یک مکان ایستگاه سنگ شکن تعبیر نمود. رابطه (۱۶) رابطه یک خط است که از نقطه $A(x_0, y_0, z_0)$ می گذرد و با بردار $L = (a, b, c)$ موازی است در حقیقت بردار L برداری است که شیب خط را نشان می دهد. برای یافتن این بردار باید هر کسر را برابر با یک عدد حقیقی ثابت t قرارداد. رابطه (۱۶) را به صورت مجموعه رابطه پارامتری (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نیز نوشت.

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c} \quad (16)$$

$$x = x_0 - at \quad (17)$$

$$y = y_0 - bt \quad (18)$$

$$Z = Z_0 - Ct$$

(۱۹)

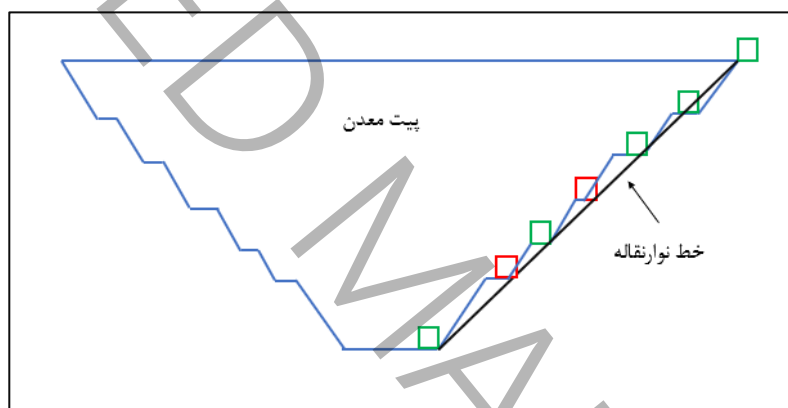
که در این روابط:

Z_0 و Y_0 ، X_0 : مختصات نقطه لبه اولین پله معدن در محدوده نهایی

Z ، Y و X : مختصات نقطه پایه آخرین پله معدن در محدوده نهایی

t : یک عدد حقیقی است.

در صورتی که این خط نقاله به پله‌های اول و آخر مماس باشد نیز ممکن است که نقاط سنگ‌شکن با پستی و بلندی دیواره نهایی بیرون از محدوده قرار گیرند که با توجه به فرضیات مسئله قرار نیست که موادی بیشتر از حد تعیین شده استخراج شود و علاوه بر آن منجر به افزایش فاصله حمل غیرواقعی توسط کامیون خواهد شد. بنابراین برای این منظور باید هر نقطه را مماس بر محدوده نهایی نمود. برای این منظور کافی است نزدیک‌ترین بلوک به هر نقطه را پیدا کرده و سپس با نقطه قبلی جایگزین می‌شود. شکل (۳) نمای ساده‌ای از بیرون‌زدگی ایستگاه سنگ‌شکن از درون محدوده نهایی را نشان می‌دهد. این نقطه بعد از اصلاح بر روی مختصات یک بلوک واقع در دیواره محدوده نهایی قرار می‌گیرد.



شکل ۳: نمایی از حالت قرارگیری نقاط کاندید سنگ‌شکن درون محدوده نهایی و خارج از آن

Figure 3. A view of the arrangement of candidate crusher locations inside and outside the final pit limit

۱۰- نحوه اجرای فرآیند بهینه‌سازی

برای اجرای بهینه‌سازی باید ابتدا مختصات سه‌بعدی بلوک‌های محدوده مورد مطالعه آماده‌سازی شود در مرحله دوم تناژ هر بلوک محاسبه شود. در مرحله سوم مختصات مکان‌های کاندید برای ایستگاه سنگ‌شکن با توجه به مدل بلوکی پیدا شوند در مرحله چهارم اطلاعات توالی استخراج برای هر بلوک برای تعیین زمانی که امکان استخراج بلوک امکان‌پذیر است آماده‌سازی می‌شود در مرحله پنجم مکان‌هایی که قابلیت جانمایی ایستگاه سنگ‌شکن می‌باشد مشخص می‌شوند. تمامی هزینه‌های سرمایه‌ای برای خرید تجهیزات و هزینه‌های عملیاتی به ازای واحد فاصله حمل که قبلاً ذکر شد، آماده‌سازی شده و همگی به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار گمز داده می‌شوند. نرم‌افزار نیز بر اساس تابع هدف و محدودیت‌هایی که قبلاً ذکر شد شروع به بهینه‌سازی مکان ایستگاه با توجه به هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی می‌کند و سال با کمترین ارزش خالص فعلی هزینه، به‌عنوان سال بهینه تغییر روش حمل و اطلاعات مکان‌یابی از آن سال به بعد مدنظر خواهد بود. لازم به ذکر است که از نسخه ۲۵,۱,۲ نرم‌افزار گمز و از حل‌کننده CPLEX استفاده شده که تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۶۴۰ بوده و زمان محاسبات در کمتر از ۲ دقیقه و با استفاده از سیستمی با پردازنده (CPU) برابر Intel Core i3 و سرعت پردازنده 2GHz انجام شده است. جزئیات داده‌هایی که به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار گمز داده شده است عبارت است از:

۱- مختصات ۴۸۲۱ بلوک شامل ماده معدنی و باطله

۲- تناژ ماده معدنی و باطله هر بلوک (یک بلوک حاوی باطله یا ماده معدنی است و حالت دیگری ندارد).

۳- مختصات ۱۶ مکان کاندید برای سنگ‌شکن در ۱۶ تراز که برابر تعداد کل ترازهای معدن بوده و در واقع یک سمت معدن در ۱۶ تراز آن برای نقاط کاندید انتخاب گردیده که این عمل را می‌توان برای جهت‌های مختلف معدن انجام داد.

۴- توالی استخراج تمامی بلوک‌ها برای ۲۰ سال که در هر سال تعداد بلوک مشخصی برای استخراج آزاد هستند که باید استخراج شوند و این بلوک‌ها در هیچ سالی در دسترس نیستند که نرم‌افزار محاسبه هزینه حمل را برایشان اعمال کند، که در یک ماتریس 4821×20 می‌باشد.

۵- هزینه جابجایی سنگ‌شکن برای هر سال (که ثابت در نظر گرفته شده است).

۶- مشخص کردن سال آزاد برای پیاده‌سازی ایستگاه سنگ‌شکن در یک ماتریس 16×20 که برای ۱۶ تراز و ۲۰ سال می‌باشد.

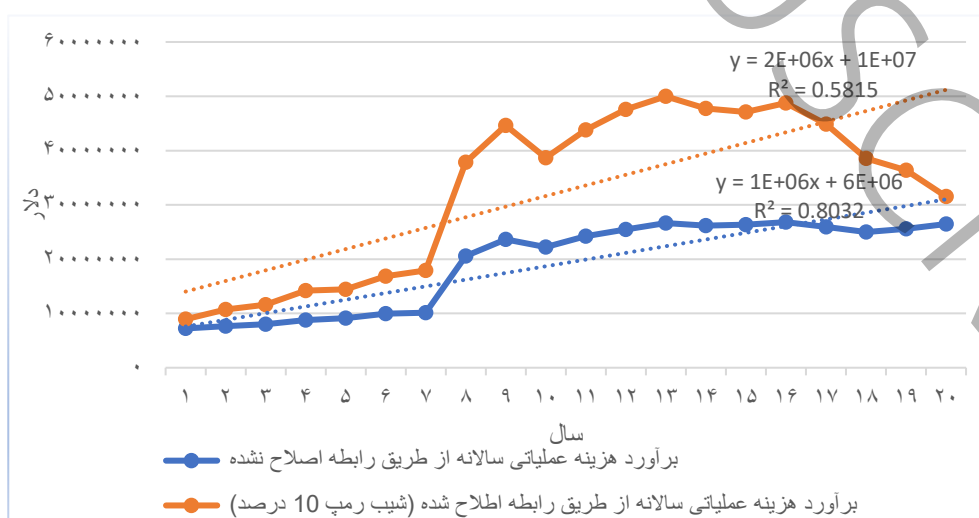
۷- هزینه عملیاتی سالانه کامیون که برای ۲۰ سال عمر معدن محاسبه شده است.

۱۱- یافته‌های تحقیق

در ادامه درباره روش‌های مختلف محاسبه فاصله حمل، پیاده‌سازی مدل تعیین هم‌زمان مکان و زمان و مکان‌یابی با و بدون در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌ای بحث شده است.

۱۱-۱- تأثیر روش محاسبه فاصله حمل بر هزینه عملیاتی در هر سال

در تحقیق پریچه برای محاسبه فاصله از مرکز ثقل هر تراز استفاده شده و همچنین لیو از مؤلفه‌های افقی و عمودی برای محاسبه فواصل استفاده نموده‌اند که هر دو ممکن است خطای زیادی را برای محاسبات اعمال کنند [۱۹، ۱۲]. اصل میانگین و مرکز ثقل موقعی صادق است که به‌عنوان مثال بلوک‌هایی که فاصله افقی کم و فاصله عمودی زیادی دارند، فاصله آن‌ها از لبه یا سنگ‌شکن برابر صفر باشد. در صورتی که این چنین نیست و باید کامیون این فاصله افقی کم را با مسیر شیب‌دار و فاصله زیادی را طی نماید. به همین منظور برای درک بهتر از تأثیر روش محاسبه فاصله حمل لازم است که تأثیر آن را بر کل هزینه‌های عملیاتی بررسی کنیم. فرمول محاسبه فاصله حمل در با توجه به اینکه روش محاسبه فاصله حمل توسط کامیون در فصل قبلی اصلاح گردید، در این قسمت هر دو رابطه محاسبه فاصله آورده شده است. برای محاسبه فواصل حمل از رابطه اصلاح شده (در نظر گرفتن شیب ۱۰ درصد برای رمپ کامیون) در رابطه (۱۵) و محاسبه فواصل حمل به‌صورت مؤلفه‌های افقی و عمودی (رابطه ۱۳)) استفاده شده است. بعد از محاسبه فواصل حمل، با در نظر گرفتن هزینه عملیاتی ۰/۵ دلار بر تن بر کیلومتر برای ۱۵ سال از عمر معدن در شکل (۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت کامیون که باید برای بارگیری دوباره به محل بازگردد و این خود هزینه‌بر است، هزینه رفت و برگشت کامیون به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است با شیب بیشتری به هزینه عملیاتی افزوده شده و اختلاف زیادی دارند. با برآورد هزینه در رابطه اصلاح نشده که از طریق محاسبه فاصله حمل در تحقیق لیو است و با مقایسه آن با رابطه اصلاح شده مشخص است که استفاده از رابطه اصلاح نشده خطای زیادی را برای محاسبه سالی که استفاده از سیستم IPCC ارزش خالص فعلی هزینه کمتری را می‌دهد اعمال خواهد کرد. در این فصل معیار، استفاده از روش محاسبه فاصله حمل از طریق رابطه اصلاح شده (۱۵) خواهد بود.



شکل ۴: برآورد هزینه عملیاتی سالانه از طریق رابطه‌های مختلف محاسبه فاصله حمل کامیون

Figure 4. Estimation of annual operating cost using different truck haulage distance calculation equations

۱۱-۲ مکان‌یابی بدون در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌ای

برای مکان‌یابی از ابتدای عمر معدن نیازی به اعمال کردن هزینه سرمایه‌ای نیست و تنها با استفاده از هزینه‌های عملیاتی قادر به تعیین مکان بهینه در سال‌های عمر معدن برای سنگ‌شکن هستیم که این با استفاده از تابع هدف اول در رابطه (۱) انجام می‌شود. طبیعتاً چون در این حالت مکان‌یابی از سال اول تا آخر موردنظر است و سال‌های بیشتری از سیستم نوار نقاله استفاده می‌شود، به همان نسبت نیز انتظار می‌رود تعداد جابجایی‌های بیشتری برای ایستگاه سنگ‌شکن رخ بدهد. در این قسمت تأثیر استفاده از محدودیت هفتم (رابطه (۱۲)) بر روی حل مدل مورد آزمایش قرار داده شده است و در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: مکان و زمان سنگ‌شکن از ابتدای عمر معدن با محدودیت و بدون محدودیت هفتم

Table 3. Crusher location and timing from the beginning of the mine life with and without the seventh constraint

بدون استفاده از محدودیت هفتم																						
سال																						
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	مکان
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۷	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	
با استفاده از محدودیت هفتم																						
سال																						
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	مکان	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰		۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۷		
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰		

مقدار کل هزینه حمل با توجه به ۴ جابجایی سنگ‌شکن در حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت هفتم برابر با ۴۴,۵۴۴,۴۶۰ دلار به دست آمد. اما با توجه به جدول (۳) امکان استفاده از مکان (یا تراز) ۲ در سال اول وجود ندارد. در قسمت دوم جدول (۳) با در نظر گرفتن محدودیت هفتم این نقص جبران شده است. مقدار کل هزینه حمل با توجه به ۴ جابجایی سنگ‌شکن در حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت هفتم برابر با ۴۵,۰۱۹,۸۹۰ دلار به دست آمد.

۱۱-۳ مکان‌یابی و زمان انتقال به سیستم IPCC با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌ای

در قسمت قبلی سال تغییر روش حمل از سیستم حمل کامیون به نوار نقاله مدنظر نبود و برای تمامی بلوک‌های معدن هزینه‌های عملیاتی حمل توسط نوار نقاله در نظر گرفته شد. در این قسمت هزینه‌های عملیاتی نوار نقاله از سال انتقال، محاسبه شده. بنابراین برای

سال‌های قبل‌تر از آن کل هزینه عملیاتی سالانه با سیستم حمل فقط کامیون باید در نظر گرفته شود. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد هزینه عملیاتی بالای سیستم حمل کامیون و هزینه عملیاتی بسیار پایین حمل توسط نوار نقاله دلیل اصلی تغییر روش به حمل از کامیون به نوار نقاله بوده است. از طرفی هزینه سرمایه‌ای بالای سیستم IPCC (بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های جایگاه و ظرفیت نوار نقاله) دلیل بر استفاده نکردن از این سیستم در ابتدای عمر معادن بوده. از طرف دیگر استفاده و پیاده‌سازی سیستم IPCC در انتهای عمر معدن نیز توصیه نشده است. پس این‌گونه فرض می‌شود که زمان انتقال بر اساس استفاده نکردن از سیستم IPCC در ابتدای عمر معدن به دلیل هزینه سرمایه‌ای بالای آن بوده است که با توجه به نرخ تنزیل ممکن است منجر به افزایش ارزش خالص فعلی کل هزینه‌ها می‌شده است. با این تفاسیر با یک نرخ تنزیل ۱۵ درصدی تلاش شد تا اثر سرمایه اولیه و عملیاتی هر دو سیستم بر روی ارزش خالص فعلی هزینه‌ها مورد آزمایش قرار گیرد تا بررسی زمان مناسب انتقال از این دیدگاه نیز مورد بررسی قرار گیرد. این کار با استفاده از تابع هدف دوم در رابطه (۲) انجام می‌شود.

در جدول (۴) نتایج یافتن سال بهینه انتقال با و بدون استفاده از محدودیت هفتم و در نظر گرفتن شیب عملیاتی برای کامیون ارائه شده و با توجه به تغییر در سال بهینه محاسبه شده مشخص است که تأثیرگذار هستند. نتایج موجود در جدول (۴) این فرض را تایید می‌کند که اختلاف هزینه سرمایه‌ای و هزینه عملیاتی دو سیستم می‌تواند یک سال با کمترین ارزش خالص فعلی کل هزینه‌ها در میانه عمر معدن را معرفی کند.

جدول ۴: نتایج حاصل از استفاده تابع هدف دوم برای تعیین سال بهینه تغییر روش حمل با نرخ تنزیل ۱۵ درصد

Table 4. Results obtained from applying the second objective function to determine the optimal year for changing the haulage method with a 15% discount rate

سال تغییر روش حمل	بدون محدودیت هفت و شیب عملیاتی ۱۰ درصد برای کامیون	با محدودیت هفت و شیب عملیاتی ۱۰ درصد برای کامیون
۱	1.196994×10^8	1.394535×10^8
۲	1.156338×10^8	1.363249×10^8
۳	1.123170×10^8	1.338614×10^8
۴	1.096793×10^8	1.333615×10^8
۵	1.075159×10^8	1.322608×10^8
۶	1.060048×10^8	1.324553×10^8
۷	1.043723×10^8	1.327888×10^8
۸	1.058560×10^8	1.396459×10^8
۹	1.077481×10^8	1.462355×10^8
۱۰	1.086600×10^8	1.499541×10^8
۱۱	1.099422×10^8	1.540237×10^8
۱۲	1.113043×10^8	1.583635×10^8
۱۳	1.125223×10^8	1.625905×10^8
۱۴	1.135139×10^8	1.659006×10^8
۱۵	1.144352×10^8	1.687296×10^8

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد در مکان‌یابی ایستگاه سنگ‌شکن در حالتی که سرمایه اولیه در نظر گرفته شود، لازم است تا ابتدا زمان بهینه برای انتقال از سیستم حمل کامیون به سیستم نوار نقاله تعیین گردد و سپس به مکان‌یابی آن پرداخته شود. بدیهی است که مکان‌یابی بر روی تعداد بلوک‌های باقی‌مانده اعمال خواهد شد و بلوک‌های قبلی در هزینه عملیاتی سالانه کامیون منظور می‌شوند که خود عاملی مهم در محاسبه سال تغییر روش است. در ادامه با توجه به جدول (۴) و با ملاک قرار دادن استفاده از محدودیت هفت و

شیب عملیاتی ۱۰ درصد برای کامیون می‌توان سال بهینه تغییر روش را سال پنجم با کل هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی تنزیل یافت 1.322608×10^8 برای آن مکان‌یابی را برای سال‌های مختلف تعیین نمود. نتایج با استفاده از تابع هدف دوم و هفت محدودیت آن به صورتی که در جدول (۵) آورده شده است، می‌باشد. که با ۳ بار جابجایی سنگ‌شکن اولیه در سال‌های ۵، ۶ و ۱۱ و به ترتیب در ترازهای پنج، هفت و دهم تعیین می‌گردد.

جدول ۵: تعیین مکان سنگ‌شکن از سالی که انتقال انجام شده

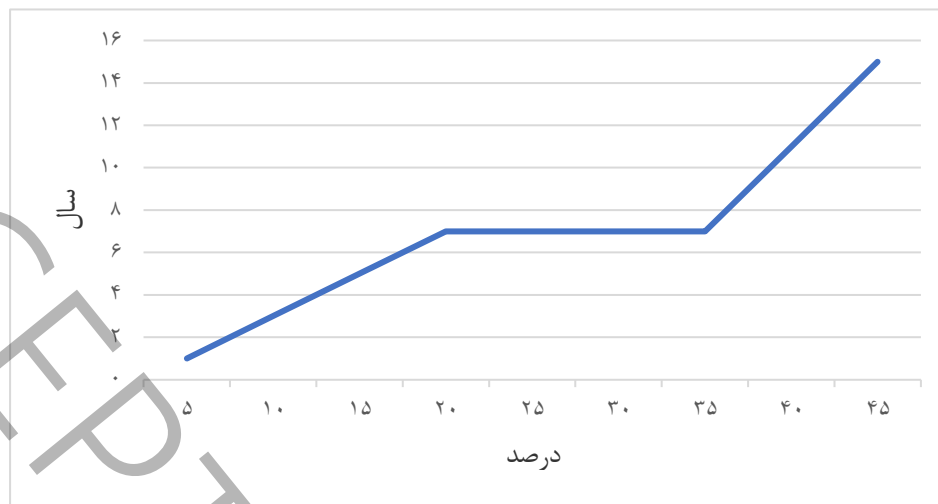
Table 5. Determination of crusher location from the year the transfer was carried out

سال															مکان		
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶		۵	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		۱	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱		۰	۷
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	

با توجه به اینکه هدف یافتن سال بهینه با کمترین ارزش خالص فعلی کل هزینه‌ها بوده است محاسبه مقدار کاهش هزینه نیز موضوع بااهمیتی است. در زیر مقدار درصد بهبود در هزینه محاسبه شده که برابر ۵/۱۶ درصد است که مقدار قابل توجهی هم می‌باشد.

$$\text{مقدار کاهش هزینه} = \frac{|1.394535 \times 10^8 - 1.322608 \times 10^8|}{1.394535 \times 10^8} \times 100 = 5.16\%$$

طبق جدول (۴) مشخص شد که با نرخ تنزیل ۱۵ درصد سال پنجم سالی است که مقدار هزینه‌ها کمینه می‌شود. اما برای نرخ تنزیل‌های بالاتر و کمتر نیز باید دید که چه تأثیری بر روی سال تغییر روش حمل با کمینه هزینه دارد. برای این منظور یک تحلیل حساسیت بر روی نرخ تنزیل و اثر آن بر نزدیک شدن سال انتقال به سال‌های ابتدایی یا انتهایی عمر معدن انجام شد که نتایج در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است اگر نرخ تنزیل کمتر از ۲۰ درصد باشد، سال انتقال از سیستم کامیون به سیستم IPCC به سال‌های انتهایی نزدیک‌تر، و از ۲۰ تا ۳۵ درصد سال انتقال، ثابت و برابر با سال هفتم بوده است. و در کل با افزایش نرخ تنزیل استفاده از سیستم IPCC به تعویق خواهد افتاد. لازم به ذکر است که به دست آوردن این جدول زمان محاسباتی بالایی داشته و باید برای هر درصد از نرخ تنزیل به تعداد ۱۵ بار محاسبات را انجام داد تا سال بهینه تغییر روش حمل در نرخ تنزیل مورد نظر مشخص گردد. بدیهی است که تأثیر هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی روش حمل با نقاله به هر میزانی که افزایش یابد، استفاده از این سیستم حمل در سال‌های ابتدایی عمر معدن به صرفه نخواهد بود.



شکل ۵: سال بهینه انتقال با توجه به تغییرات نرخ تنزیل

Figure 5. Optimal transfer year considering variations in the discount rate

۱۲- جمع‌بندی

سیستم بارگیری و حمل با شاول و کامیون به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و انطباق‌پذیری مناسب با شرایط معادن روباز، در بیش از ۸۰ درصد معادن جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر روش حمل‌ونقل مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد؛ بزرگ‌ترین محدودیت کامیون‌ها این است که هزینه حمل آن‌ها با افزایش فاصله حمل و میزان تولید به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که سیستم‌های نوار نقاله به‌ویژه در مسافت‌های طولانی و حجم‌های بالا، هزینه‌های عملیاتی پایین‌تری دارند. با این حال، کاربرد کامیون‌ها اجتناب‌ناپذیر است، زیرا شرایط استخراج در بسیاری از معادن روباز تنها با کامیون‌ها قابل انطباق است.

به همین دلیل، روش حمل ترکیبی کامیون و نوار نقاله سیستم IPCC به منظور بهره‌مندی از مزایای هر دو سیستم مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم، مکان سنگ‌شکن به‌عنوان یک عامل کلیدی، می‌تواند حتی اقتصادی بودن کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین جابجایی و مکان‌یابی سنگ‌شکن باید با تغییرات برنامه‌ریزی تولید هماهنگ باشد.

در پژوهش‌های گذشته، محققان یا تنها به تعیین عمق بهینه توجه کرده‌اند بدون در نظر گرفتن هزینه‌های حمل هر دو سیستم، در حالی که تغییرات این هزینه‌ها می‌تواند مکان بهینه سنگ‌شکن را دستخوش تغییر کند، یا اینکه ابتدا عمق بهینه تعیین و سپس سال تغییر روش برآورد شده است. روش‌های جداگانه منجر به این مشکل می‌شوند که عمق و زمان بهینه تغییر روش به‌صورت هم‌زمان بهینه نمی‌شوند و این امر می‌تواند خطا و ناهماهنگی در تعیین مکان و زمان بهینه ایجاد کند.

در این پژوهش، تلاش شده است تا مدلی یکپارچه برای تعیین مکان و زمان بهینه استفاده از سیستم IPCC به‌صورت هم‌زمان ارائه شود، به‌گونه‌ای که تمامی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی و ارزش زمانی پول در محاسبات لحاظ گردد. این مدل سپس بر روی یک معدن روباز فرضی پیاده‌سازی شد. علاوه بر آن، یک مکان‌یابی اولیه با توجه به برنامه‌ریزی تولید معدن، صرفاً با استفاده از هزینه‌های عملیاتی، برای تعیین مکان‌های بهینه سنگ‌شکن نیز انجام گرفت تا مقایسه‌ای جامع صورت پذیرد.

۱۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل یکپارچه‌ای برای تعیین مکان و زمان بهینه استقرار ایستگاه سنگ‌شکن در سیستم IPCC ارائه شد که هم هزینه‌های سرمایه‌ای و هم عملیاتی هر دو سیستم حمل (کامیون و نوار نقاله) را با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول، در طول عمر معدن تحلیل می‌کند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که زمان تغییر روش حمل به سیستم IPCC و مکان بهینه سنگ‌شکن باید به‌صورت هم‌زمان تعیین شود، چرا که بهینه‌سازی جداگانه هر یک از این عوامل می‌تواند منجر به ناهماهنگی و افزایش هزینه‌ها شود.

مطالعه موردی بر روی یک معدن فرضی نشان داد که انتخاب تراز پنجم در سال پنجم به‌عنوان مکان و زمان بهینه، هزینه‌ها را نسبت به اجرای سیستم در سال اول عمر معدن حدود ۵/۱۶ درصد کاهش می‌دهد. این یافته اهمیت هماهنگی بین برنامه‌ریزی تولید و مکان‌یابی

تجهیزات را نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که تحلیل هم‌زمان عوامل اقتصادی و عملیاتی می‌تواند تصمیمات مدیریت معدن را از نظر هزینه و بهره‌وری بهینه سازد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملی برای برنامه‌ریزان و مهندسان معدن جهت تعیین استراتژی بهینه تغییر روش حمل در طول عمر معدن مورد استفاده قرار گیرد و محدودیت‌های عملیاتی مانند مسیر نوار نقاله، شیب معدن و ترتیب استخراج بلوک‌ها را نیز به‌دقت لحاظ می‌کند.

مقایسه با مطالعات گذشته نشان می‌دهد که برخلاف روش‌های سنتی که مکان و زمان تغییر روش را به‌صورت جداگانه یا تنها با توجه به فاصله حمل کامیون تعیین می‌کردند، این مدل با در نظر گرفتن تمامی هزینه‌های مرتبط و تحلیل هم‌زمان نتایج، دقت و قابلیت کاربرد بالاتری دارد.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که اتخاذ رویکرد تحلیلی و یکپارچه برای مکان‌یابی و زمان‌بندی سیستم IPCC می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای معدن، افزایش بهره‌وری سیستم حمل و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید کمک شایانی کند. این مدل همچنین می‌تواند پایه‌ای برای توسعه تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های حمل در معادن روباز باشد.

دستاوردهای کلیدی این پژوهش عبارتند از:

- (۱) مدل ارائه‌شده قادر است به‌صورت هم‌زمان مکان و زمان بهینه سنگ‌شکن را مشخص کند و بنابراین هماهنگی میان برنامه‌ریزی تولید و تغییر روش حمل بهبود یافته است.
 - (۲) برخلاف مطالعات پیشین که یا از تحلیل اقتصادی جامع بهره نمی‌بردند یا مکان و زمان تغییر روش را به‌صورت جداگانه تعیین می‌کردند، این مدل معایب روش‌های قبلی را برطرف کرده و دقت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد.
 - (۳) بررسی‌های اقتصادی نشان داد که اگر مکان‌یابی سنگ‌شکن صرفاً با توجه به فاصله حمل کامیون انجام شود، هزینه‌ها و مکان‌یابی نهایی می‌تواند دچار خطا شود، در حالی که مدل پیشنهادی این خطا را کاهش می‌دهد.
 - (۴) تراز و مکان قرارگیری سنگ‌شکن به‌طور دقیق مشخص شد، به گونه‌ای که پس از برداشت بلوک موردنظر، امکان‌سنجی جایگاه سنگ‌شکن انجام شده و فاصله حمل به‌درستی با برنامه‌ریزی تولید هماهنگ گردیده است.
- به طور خلاصه، این پژوهش یک رویکرد جامع و عملی برای بهینه‌سازی سیستم IPCC در معادن روباز ارائه کرده است که با در نظر گرفتن تمامی هزینه‌ها و توالی استخراج، می‌تواند کارایی و اقتصادی بودن عملیات حمل و نقل معدن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

منابع و مراجع

- [1] M. Osanloo, Surface Mining Methods, Amirkabir University of Technology Press, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [2] A. Bozorgebrahimi, R. Hall, M. Morin, Equipment size effects on open pit mining performance, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 19(1) (2005) 41-56.
- [3] Q. Gu, X. Li, L. Chen, C. Lu, Layout optimization of crushing station in open-pit mine based on two-stage fusion particle swarm algorithm, Engineering Optimization, 53(10) (2021) 1671-1694.
- [4] J. Stughul, "How to determine the optimum location of in-pit movable crushers", International Journal of Mining and Geological Engineering, vol 5, pp 143-148, 1987.
- [5] Y. Changzhi, In-pit crushing and conveying system and Dexin pit copper haulage optimisation for ore transport, in: Fifth Large Open Pit Mining Conference, 2003, pp. 49-53.
- [6] G. Konak, Onur, AH, D. Karakus, Selection of the optimum in-pit crusher location for an aggregate producer, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107(3) (2007) 161-166.
- [7] M. Rahmanpour, M. Osanloo, N. Adibee, M. AkbarpourShirazi, An approach to locate an in pit crusher in open pit mines, International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects, 27(9) (2014) 1475.

- [8] M. Paricheh, M. Osanloo, Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties, in: 16th International Conference on Computer Applications in the Mineral Industries, 2016, pp. 34.
- [9] M. Paricheh, M. Osanloo, M. Rahmanpour, In-pit crusher location as a dynamic location problem, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(6) (2017) 599-607.
- [10] M. Paricheh, M. Osanloo, Concurrent open-pit mine production and in-pit crushing-conveying system planning, *Engineering optimization*, 52(10) (2020) 1780-1795.
- [11] M. Samavati, D. Essam, M. Nehring, R. Sarker, Production planning and scheduling in mining scenarios under IPCC mining systems, *Computers & Operations Research*, 115 (2020) 104714.
- [12] D. Liu, Y. Pourrahimian, A framework for open-pit mine production scheduling under semi-mobile in-pit crushing and conveying systems with the high-angle conveyor, *Mining*, 1(1) (2021) 59-79.
- [13] M. Shamsi, Y. Pourrahimian, M. Rahmanpour, Optimisation of open-pit mine production scheduling considering optimum transportation system between truck haulage and semi-mobile in-pit crushing and conveying, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(2) (2022) 142-158.
- [14] A. Kamrani, M.M. Badiozamani, Y. Pourrahimian, H. Askari-Nasab, Evaluating the semi-mobile in-pit crusher option through a two-step mathematical model, *Resources Policy*, 95 (2024) 105113.
- [15] L. Findlay, R. Dimitrakopoulos, Stochastic Optimization for Long-Term Planning of a Mining Complex with In-Pit Crushing and Conveying Systems, *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(4) (2024) 1677-1691.
- [16] Y. Cheng, M. Nehring, M. Forbes, M. Kizil, P. Knights, A novel strategic planning and sequencing optimisation model for Fully Mobile In-Pit Crusher Conveyor (FMIPCC) systems, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, (2025) 1-18.
- [17] R. Nikbin, R. Bagherpour, E. Purhamadani, A. Taherinia, Enhancing sustainability in mining by reducing hauling energy consumption through optimization of distance and slope with semi-mobile in-pit crushers and conveyors, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 22119.
- [18] A. Kamrani, H. Askari-Nasab, Y. Pourrahimian, Optimising in-pit crushing and conveying systems for cost-effective open pit mine scheduling—a sensitivity analysis on material throughput and haulage costs.
- [19] M. Paricheh, Possibility of using a conveyor belt system and in pit crusher in open pit mines under conditions of production uncertainty (determining the optimal time an place of using the system), Amirkabir University of Technology, Thesis, 2014.
- [20] M. Osanloo, Design, planning and methods of surface mining, Ladan Publications, 1995.(In Persian)

ACCEPTED MANUSCRIPT