



Research Note

Analytical Based Simulation Modeling for Short-Term and Long-Term Planning in Open Pit Mining

Milad Abolghasemian¹, Maryam Daneshmand-Mehr² and Erfan Hasannayebi^{*3}

¹Department of Industrial Engineering, Ayandegan University, Tonekabon, Iran.

²Department of Industrial engineering, Branch of Lahijan, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

³Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* corresponding author: (hassannayebi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received:29 October 2023

Revised:25 May 2024

Accepted:23 July 2024

Keywords:

Hierarchical framework,
simulation based on
optimization,
long-term planning,
short-term planning,
design of experiment.

Abstract

Open-pit mining operations are complex and multifaceted, requiring meticulous planning to optimize resource extraction, operational efficiency, and cost-effectiveness. In this paper, a two-level hierarchical framework based on simulation is presented for production planning and material loading machines in Iran's largest open-pit copper mine. Analytical-based simulation modeling offers a powerful tool for mining engineers and planners to simulate various scenarios, assess the impact of different decisions, and optimize mining operations. By integrating mathematical models, statistical analysis, and simulation techniques, this approach enables the evaluation of alternative strategies, risk assessment, and performance forecasting in open-pit mining environments. This paper aims to explore the application of analytical-based simulation modeling in the context of short-term and long-term planning in open-pit mining. It will delve into the methodology, tools, and techniques employed in developing simulation models for optimizing operational processes, enhancing productivity, and mitigating risks in open-pit mining operations. The study will also highlight the benefits, challenges, and future prospects of utilizing analytical-based simulation modeling for effective planning and decision-making in the dynamic field of open-pit mining. To solve the problem of planning machinery in mining, a planning problem has been formulated and applied in the framework of the proposed two-level hierarchical method. The Opt Quest software package to solve the optimization problem at the high level of the proposed framework in order to prepare a long-term optimal production plan. At the lower level of the framework, with the help of a meta-modeling approach, a deterministic function has been fitted to accurately estimate the number of loading machines by determining the optimal number of shovels using the design of experiments. The calculations performed in this mining complex show how the proposed framework can have a favorable effect on the amount of production, material handling costs and income. By embracing analytical-based simulation modeling, mining managers can make informed decisions, mitigate risks, and drive operational excellence in open-pit mining environments. This approach empowers managers to proactively address challenges, capitalize on opportunities, and steer mining operations towards greater efficiency, profitability, and sustainability in both the short and long term.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Abolghasemian, M., Daneshmand-Mehr, M. and Hasannayebi, E. 2026. Analytical based simulation modeling for short-term and long-term planning in open pit mining, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(2), pp.127-139. <https://doi.org/10.24200/ij65.2024.64326.2401>



مدل سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه ریزی های کوتاه مدت و بلندمدت در معدن روباز

میلاذ ابوالقاسمیان^۱، مریم دانشمندمهر^۲ و عرفان حسن ناییبی^{۳*}

^۱ گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مدیریت راهبردی، دانشگاه آیندگان، تنکابن، ایران.

^۲ گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

^۳ دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول (hassannayebi@sharif.edu)

چکیده

در نوشتار حاضر، یک چارچوب سلسله مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه ریزی تولید و ماشین آلات بارگذاری مواد در بزرگ ترین معدن روباز مس ایران ارائه شده است. برای حل مسئله ی برنامه ریزی ماشین آلات در معدن، یک مسئله ی برنامه ریزی فرمول بندی شده و در چارچوب روش سلسله مراتبی دوسطحی پیشنهادی استفاده شده است. از بسته ی نرم افزاری Opt Quest برای حل مسئله ی بهینه سازی در سطح بالای چارچوب پیشنهادی به منظور تهیه ی یک برنامه ی بلندمدت بهینه ی تولیدی استفاده شده است. در سطح پایین چارچوب، به کمک رویکرد شبه مدل محور یک تابع قطعی جهت برآورد دقیق میزان ماشین آلات بارگذاری با تعیین مقدار بهینه ی بیل های مکانیکی با استفاده از طراحی آزمایش ها، یک برنامه ی کوتاه مدت متناسب سازی شده است. محاسبات انجام شده در مجتمع معدنی مس سرچشمه نشان می دهد که چگونه چارچوب پیشنهادی قادر است در میزان تولیدها، هزینه های جابجایی مواد، و درآمد، اثر مطلوب بگذارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

واژگان کلیدی:

چارچوب سلسله مراتبی،

شبیه سازی مبتنی بر

بهینه سازی،

برنامه ریزی بلندمدت،

برنامه ریزی کوتاه مدت،

طراحی آزمایش.

۱. مقدمه

طریق تولید بیشتر افزایش دهد. برای بیشینه سازی میزان تولیدها و به دنبال آن، افزایش درآمد در هر روز، یک چارچوب سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه سازی در نوشتار حاضر ارائه شده است. برنامه ریزی سلسله مراتبی، یک ابزار مفید برای کاهش فضای متغیر تصمیم مسئله ی پیچیده محسوب می شود.^[۱] زیرا، معادن شامل چند پارامتر احتمالی هستند، که مدل سازی از طریق روش های سنتی، آن را خیلی پیچیده می سازد. در سیستم های مذکور، در نظر گرفتن تمام جنبه های مسئله از طریق مدل سازی ریاضی امکان پذیر نیست؛ زیرا در مدل سازی ریاضی فرض می شود که پارامترها قطعی هستند. یکی از مناسب ترین روش هایی که می تواند برای شناخت وضعیت جاری سیستم های اخیر استفاده شود، ابزار قدرتمند شبیه سازی است.^[۲] شبیه سازی، تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است، که این امکان را برای کاربر فراهم می سازد تا با انجام آزمایش، رفتار سیستم واقعی را حدس بزند.^[۳]

مزیت اصلی چارچوب توسعه داده شده این است که قادر به انجام راستی آزمایی برنامه ریزی تولید در سطح بالایی است. برای حل مسئله ی موجود به کمک چارچوب پیشنهادی لازم است یک برنامه بهینه سازی و مدل ریاضی توسعه داده شوند، که سطوح اصلی الگوی ذکر شده به حساب می آیند. سطح پایین

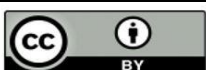
یکی از مهم ترین و اساسی ترین پایه های اقتصاد هر کشور، منابع معدنی و ذخایر تحت الارضی آن کشور است. امروزه، سنگ معدنی مس، به عنوان یکی از منابع تأمین درآمد در جهان بشمار می رود؛ بر این اساس، به دلیل وابستگی زیاد به تأمین درآمد یک کشور به آن، ضروری است تا هزینه های موجود در درون یک معدن، که شامل: مراحل اکتشاف، حمل و نقل، و... است، کاهش یابد. بخش معدن، به عنوان یکی از حفره های زیربنایی اقتصاد، نقش اساسی در تأمین مواد اولیه ی صنایع دیگر را نیز دارد و توسعه ی سرمایه گذاری در بخش معدن می تواند موجب کسب ارزش افزوده ی مناسب در بسیاری از بخش های دیگر اقتصادی کشور شود. نقش معادن و منابع در رشد اقتصادی هر کشوری انکارناپذیر است. بدون تردید، بهره برداری صحیح از معادن کشور، یک عامل مثبت و مهم در رشد و توسعه ی اقتصادی محسوب می شود. در بین تمامی اجزاء صنایع معدن، سیستم جابجایی، نقش قابل توجهی در هزینه های عملیاتی معدن دارد.^[۴]

هر تن سنگ مس بارگذاری شده در کامیون ها نزدیک به ۱۰۰ هزار دلار ارزش دارد.^[۵] به همین دلیل، یک معدن مس می تواند درآمد خود را در هر روز از

استناد به این مقاله:

ابوالقاسمیان، میلاذ، دانشمندمهر، مریم و حسن ناییبی، عرفان، ۱۴۰۴. مدل سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه ریزی های کوتاه مدت و بلندمدت در معدن روباز. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۲)، صص. ۱۲۷-۱۳۹.

<https://doi.org/10.24200/j65.2024.64326.2401>



هر شبیه سازی از طریق الگوریتم تعریف شده ی موجود در نرم افزار برای تعیین بهترین ترکیب ممکن سیستم با در نظر گرفتن جنبه هایی که در تابع هدف و محدودیت ها تعریف شده است، ایجاد می شود. در این راستا، قاسمی و همکاران (۲۰۲۴)^[۷] و تکین و سابانچوقلو^۲ (۲۰۰۴)^[۸] در زمینه ی معرفی الگوریتم های بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی بحث کرده اند. تک^۳ و همکاران (۲۰۲۴)^[۹] به معرفی نرم افزارهایی که می توان برای بهینه سازی مدل شبیه سازی از آن ها استفاده کرد، پرداخته اند. ابزار Opt Quest و نرم افزار Sim Runner، معروف ترین نرم افزارهای بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی هستند، که در این حوزه استفاده می شوند. جعفرعلی و همکاران (۲۰۰۵)^[۱۰] به مقایسه ی بین عملکردهای Opt Quest و Sim Runner در تعیین زمان بندی بهینه برای سیستم های تولیدی پرداخته و مشخص کرده اند که نرم افزار Opt Quest، بهترین مقدار نزدیک به بهینه را به دست می آورد.

دیگر مطالعات گوناگونی را که در سال های اخیر برای مسئله ی برنامه ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معادن توسط پژوهشگران در حوزه ی مذکور انجام شده اند، در دو دسته ی روش تک مرحله ای و روش چندمرحله ای می توان طبقه بندی کرد. براساس نتایج حاصل شده از مطالعه ی منابع تئوریک موجود می توان به این نتیجه رسید که روش های چندمرحله ای قادر هستند اهداف تولید را به خوبی پوشش دهند. روش چندمرحله ای، مسئله ی تخصیص را به دو زیرمسئله تقسیم می کند: مسئله ی اول، که در رأس توجهات قرار دارد، مسئله ی تولید است؛ و مسئله ی دوم، تجهیز ادوات جابجایی است. در میان نوشتارهای منتشر شده، توجه بسیاری به روش های هیورستیک برای حل مسئله ی تجهیز کامیون شده است.^[۱۱] گرچه می توان مسائل در ابعاد کوچک را به شکل دقیق حل کرد؛ اما به هر حال، روش های مذکور جزء راه حل های مسئله ی تخصیص محسوب می شوند. زیرا برای معیارهای مدنظر، خواه بیشینه سازی میزان تولیدها و یا کمینه سازی عدم فعالیت تجهیزات، مثل زمان انتظار کامیون ها و یا زمان بیکاری بیل های مکانیکی استفاده می شوند. روش های ذکر شده، حل بهینه ای همانند روش دقیق، برای مسئله فراهم نمی آورند؛ بلکه حل نزدیک به بهینه ایجاد می کنند.^[۱۲] چانگ و لین^۴ (۲۰۲۳)^[۱۳] با استفاده از روش های احتمالات به مطالعه و تجزیه و تحلیل سیستم معدن روباز پرداخته اند. شیشوان و بندروف^۵ (۲۰۱۹)^[۱۴] سیستم خودکنترلی را جهت تخصیص کامیون بهینه به منظور افزایش بهره وری طراحی کرده اند. در مطالعه یی، کوئینیبرگ^۶ (۱۹۸۲)^[۱۵] به بهینه سازی سیستم کامیون- بیل برای یک معدن روباز از طریق به کارگیری مبانی نظریه ی صف و برنامه ریزی ریاضی پرداخته است. میراندا و همکاران (۲۰۱۴)^[۱۶] اولین مدل شبکه جهت اعزام کامیون به بیل مکانیکی در یک سیستم کامیون- بیل را برای معادن روباز معرفی کرده اند. پاتل و دسای^۷ (۲۰۱۸)^[۱۷] مدل توسعه داده شده ی میراندا و همکاران^[۱۶] را به صورت دو مرحله ای توسعه داده اند، به طوری که ابتدا هر بیل، تعداد معینی کامیون را بارگذاری کند؛ سپس، کامیون ها به مناطق مشخص اعزام شوند. چینبات و تاکاکو^۸ (۲۰۰۹)^[۱۸] به ارزیابی اعزام کامیون در یک معدن روباز با استفاده از برنامه ریزی خطی پرداخته اند. اسباربارو^۹ (۲۰۲۱)^[۱۹] مدل پاتل و دسای^[۱۷] را توسعه داده و آن را با استفاده از برنامه ریزی پویا برای تخصیص کامیون در

چارچوب که با هدف کاهش فضای متغیر تصمیم قابل قبول مسئله طراحی شده است، شامل: توسعه ی مدل شبیه سازی و یک برنامه ی بهینه سازی، و اعمال محدودیت های موجود به آن از طریق مطالعه های پیشین سیستم و آنالیز "چه می شود، اگر است". سطح بالای چارچوب، شامل توسعه ی بهترین روش قابل قبول برای به دست آوردن راه حل بهینه برای هدف اصلی مسئله در یک زمان کم است. چارچوب ارائه شده بعد از انجام راستی آزمایی های لازم، قابل پیاده سازی در مورد مطالعاتی خواهد بود. علاوه بر این، یک برنامه ریزی بلندمدت و کوتاه مدت را برای مجتمع معدنی مشخص می کند. این کار را ابتدا با تعیین حجم بهینه ی تولید و سپس، تعیین منابع اثرگذار در بارگذاری مواد استخراجی مشخص می کند. برای این منظور، پس از برآورد، مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه سازی به منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه کردن محدودیت های سیستمی ارائه شده است. بنابراین، مهم ترین نوآوری ها و سهم اصلی مشارکت پژوهش حاضر شامل این موارد است:

- ارائه ی برنامه ریزی توأماً کوتاه مدت و بلندمدت برای شبیه سازی فرآیندهای استخراج و برنامه ریزی در معدن روباز، که به تحلیل دقیق تری از آثار مختلف در عملکرد معدن کمک می کند.
 - توسعه ی مدل هایی برای شبیه سازی هزینه ها و سودهای مرتبط با برنامه ریزی های کوتاه مدت و بلندمدت، که می تواند به تصمیم گیری های مالی بهتر در عملیات معدن کمک کند.
 - ایجاد سازوکاری برای شبیه سازی و مدل سازی، که می تواند به تسهیل فرآیندهای برنامه ریزی و بهبود کارایی عملیات معدن کمک کند.
- ادامه ی نوشتار حاضر به این صورت سازمان دهی شده است:

در بخش ۲، یک مرور تاریخی از موضوع، که یکی از عناوین مهم نوشتار حاضر محسوب می شود، فراهم شده است. جزئیات بیشتر معدن مس سرچشمه و معرفی چارچوب اجرایی پژوهش در بخش ۳ توضیح داده شده است، در بخش ۴، نتایج به کارگیری چارچوب برنامه ریزی بهینه ی پیشنهادی و آزمایش هایی که نشان دهنده ی کارایی چارچوب ارائه شده هستند، بررسی شده اند. سرانجام در بخش ۵، نتایج به دست آمده ارائه شده اند.

۲. مرور ادبیات

توزیع سلسله مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه سازی ارائه شده در نوشتار حاضر، شباهت بسیاری به چارچوب برنامه ریزی تولید سلسله مراتبی دارد؛ که در ادبیات مربوط به آن، تلاش های بسیاری برای حل برنامه ریزی یکپارچه و مسئله ی زمان بندی انجام شده است. چارچوب برنامه ریزی تولید سلسله مراتبی (HPP)^۱ کاربرد گسترده ای برای حل مسائل زنجیره ی تأمین با ترکیب های مختلف، مانند: محیط محصول های چندانگانه، تجهیزات چندانگانه، و محیط محصولات چندانگانه ی دسته ای دارد.^[۶] عموماً در بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی، مدل شبیه سازی را به عنوان یک جعبه ی سیاه در نظر می گیرند. خروجی تخمینی

⁶ Koenigsberg

⁷ Patel & Desai

⁸ Chinbat & Takakuwa

⁹ Sbarbaro

¹ Hierarchical Production Planning

² Tekin & Sabuncuoglu

³ Teck

⁴ Chang & Lin

⁵ Shishvan & Benndorf

این صورت، با توجه به اینکه بیان جزئیات جریان در معدن واقعی در مسئله خیلی مشکل است، لذا ساخت مدل شبیه سازی سیستم، شامل متغیرهای تصمیم برای حل مسئله ضروری است.

۳. روش پژوهش

در بخش حاضر پژوهش، ابتدا جزئیات مربوط به معدن مس سرچشمه به عنوان مطالعه موردی و همچنین چارچوب پیشنهادی پژوهش توضیح داده شده است.

۱.۳. معرفی مجتمع معدن مس سرچشمه

مجتمع مس سرچشمه در استان کرمان در جنوب شرقی ایران واقع شده است. سرچشمه، یک معدن بزرگ روباز دارد، که دومین معدن بزرگ مس جهان محسوب می شود؛ که در ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان کرمان و ۵۰ کیلومتری جنوب شهرستان رفسنجان واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه در حدود ۲۶۰۰ متر است، که بالاترین نقطه ی آن حدود ۳۰۰۰ متر ارتفاع دارد. در معدن مس سرچشمه، مطالعه ی زمین و حفر کانال های زیرزمینی بخش اولیه ی فرآیند استخراج سنگ را شامل می شود، که جمع آوری داده، تجزیه و تحلیل، روزرسانی اطلاعات از حفاری تا استخراج مراحل اصلی آن محسوب می شوند. نتایج حاصل از پردازش داده ها در اختیار بخش مهندسی به منظور توسعه ی برنامه های حفاری قرار می گیرد. در بخش برنامه ریزی حفاری، طرح حفاری میان مدت برنامه ریزی می شود. بخش عملیاتی، مسئول اجرای برنامه های حفاری بخش برنامه ریزی است. پس از اجرای حفاری، نوع مواد معدنی استخراج شده باید مشخص شود.^[۱] در حالت کلی مواد استخراج شده در معدن مس سرچشمه، در ۴ گروه طبقه بندی می شوند، که عبارت اند از:

۱. **سنگ معدن سولفید:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه ی مس در آن، بیشتر از ۰/۷٪ است.
۲. **سنگ معدن اکسید:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه ی مس در آن، بین ۰/۲۵ و ۰/۷ درصد است.
۳. **سنگ درجه ی پایین:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه ی مس در آن، بین ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد است.
۴. **ضایعات:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه ی مس در آن، کمتر از ۰/۱۵٪ است.

نسبت مقدار استخراج انواع مختلف سنگ ها در معدن مذکور به ترتیب ۵، ۴۴، و ۶ درصد است. براساس انواع مختلف سنگ معدن، یک راهبرد جابجایی و ذخیره سازی برای سنگ معدن استخراجی انتخاب می شود. اولین نوع ماده ی معدنی، سنگ معدن سولفید است، که ابتدا پس از بارگیری به یک ایستگاه سنگ شکن منتقل می شود. در معدن روباز اخیر، یک ایستگاه سنگ شکن با ظرفیت ۶۰۰۰۰ تن در هر روز وجود دارد. پس از آن ماده به یک سیلوی ذخیره سازی مس با ظرفیت ۱۵۰۰۰۰ تن انتقال می یابد، که پس از گذراندن مرحله ی خردایش سنگ معدن مس نرم در انبار موردنظر ذخیره می شود.

مسیر استفاده کرده اند؛ به طوری که طول صف و زمان انتظار برای بارگیری و زمان بیکاری بیل های مکانیکی را کاهش داده اند. آلاریه و گاماچه^{۱۰} (۲۰۰۲)،^[۲۰] به مطالعه ی روش های حل موجود برای اعزام کامیون در معدن روباز پرداخته اند. سگورف^{۱۱} و همکاران (۱۹۸۹)،^[۲۱] به مطالعه ی کنترل زمان کامیون های صنعتی در معدن روباز پرداخته اند.

در تمامی مطالعات اخیر از روش های برنامه ریزی ریاضی، مانند نظریه ی صف استفاده شده است. بنابراین، به نظر می رسد که مدل سازی به کمک برنامه ریزی ریاضی قادر نیست تمام جنبه های مسئله را در نظر بگیرد. زیرا مدل های ریاضی فرض می کنند که پارامترهایی مثل: زمان حمل و نقل، زمان تعمیرات، و... همگی به صورت قطعی هستند. بنابراین، رویکرد مدل سازی شبیه سازی برای ارزیابی سیستم حمل و نقل در چنین مسائلی مناسب است. چاندا و داگدلن^{۱۲} (۱۹۹۵)،^[۲۲] با استفاده از رویکرد برنامه ریزی آرمانی، چارچوبی برای کمینه سازی مجموع انحراف های پارامترهای کیفیت و مقدار تولید ارائه داده اند. شیه و فری^{۱۳} (۱۹۹۵)،^[۲۳] یک رویکرد برنامه ریزی مبتنی بر محدودیت را برای کمینه سازی انحراف از معیار مراحل تولید در یک معدن زغال سنگ با در نظر گرفتن جزئیات احتمالی ارائه داده اند. چانگ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۶] اقدام به تجزیه و تحلیل سیستم حمل و نقل معدن روباز از طریق شبیه سازی کرده اند. رانیکمن^{۱۴} و همکاران (۱۹۹۷)،^[۲۴] با استفاده از نرم افزار WITNESS سیستم حمل و نقل کامیون را به منظور افزایش میانگین تولیدها به مقایسه ی سناریوهای مختلف پرداخته اند. چینبات و تاکایوا^{۱۵} (۲۰۰۸)،^[۲۵] با استفاده از ترکیب مدل شبیه سازی و روش DAMIC برای افزایش تولید و حذف گلوگاه اقدام کرده اند. منا^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۳)،^[۲۶] ارائه دهنده ی روشی با استفاده از بهینه سازی مدل های شبیه سازی به منظور بهینه سازی بهره وری کلی ناوگان حمل و نقل در یک معدن روباز هستند. تقی زاده و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۷] یک مدل برنامه ریزی تولید با استفاده از برنامه ریزی فازی آرمانی ارائه و کاهش هزینه ی تولید و افزایش درآمد منجر به افزایش سود را بررسی کرده اند. عابدی سعیدآباد و تقی زاده (۲۰۱۵)،^[۲۸] ارزیابی و بهبود عملکرد خط تولید را از طریق شبیه سازی کامپیوتری در یکی از کارخانه های آهن سازی ایران انجام داده اند. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱] یک مسئله ی برنامه ریزی دوفازی برای اجرای برنامه ریزی های بلندمدت و کوتاه مدت در یک معدن روباز در ایران ارائه داده اند. براساس مطالعه ی اخیر، ابتدا یک مقدار برای میزان استخراج ها در درازمدت برآورد و سپس مقدار تجهیزات جابجایی، که برای تحقق هدف مذکور مورد نیاز است، محاسبه شده است. همچنین ایشان (۲۰۲۲)،^[۴] در مطالعه ی دیگری، یک برنامه ریزی چندهدفه برای کنترل میزان استخراج ها و مدت زمان اعزام کامیون ها برای حمل بار را به منظور کاهش هزینه ها انجام داده اند. جهانگیری و همکاران (۲۰۲۳)،^[۵] یک برنامه ریزی برای تعیین ترکیب بهینه ی کادر درمان در بخش اورژانس با استفاده از بهینه سازی مدل شبیه سازی شبه مدل محور ارائه کرده و توانسته اند با ارائه ی یک شبه مدل مبتنی بر رگرسیون، ۴۸٪ زمان انتظار پذیرش بیماران را در بخش اورژانس در زمان فراگیری کرونا کاهش دهند.

با توجه به بررسی منابع تئوریک موجود در ادبیات موضوع، برنامه ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معدن را می توان در دسته ی برنامه ریزی احتمالی قرار داد. در

¹⁴ Runciman

¹⁵ Chinbat & Takakuwa

¹⁶ Mena

¹⁰ Alarie & Gamache

¹¹ Sgurev

¹² Chanda & Dagdelen

¹³ Shih & Frey

جدول ۲. نمادها.

Variables	Description
TP	(Total production amount)
NS_i	(Shovel types i and $i = 1, 2, 3, 4$)
TC_{in}	Amount of incoming cargo to the crusher (tons)
S_{out}	Sulfide ore production rate (tons)
O_{out}	Oxide ore production rate (tons)
L_{out}	Low grade stone production rate (tons)
W_{out}	Waste generation rate (tons)
Parameters	Description
C_i	Cost of using a shovel (dollars) $i = 1, 2, 3, 4$
B	Budget (Dollars)
C_c	Crusher capacity (tons)
Other factor	Description
Response surface variables	Total production rate of the complex
Controllable items of the simulation model	The production rate of sulfide ore, oxide ore, low-grade ore, and waste, and the amount of incoming cargo to the crusher.

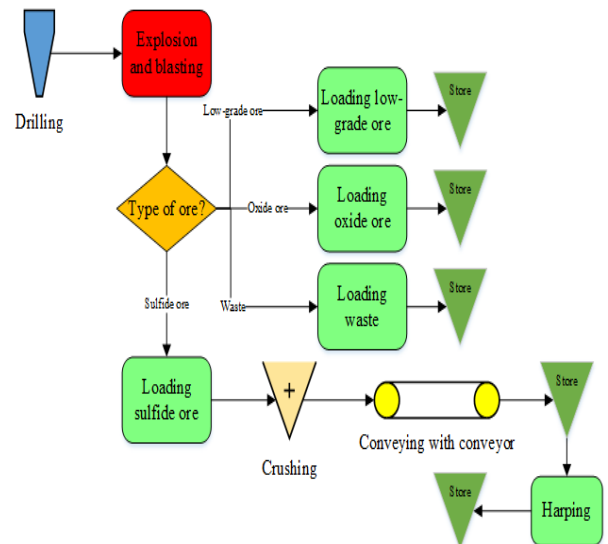
۳.۳. روش بهینه سازی مدل شبیه سازی سلسله مراتبی پیشنهادی
چارچوب پیشنهادی دوسطحی سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه سازی^{۱۷} به منظور افزایش درآمد از طریق کنترل فرآیند تولید مجتمع معدن مس سرچشمه در بخش حاضر شرح داده شده است. در سطح بالای چارچوب مذکور، کنترل مطلوب تولید وضعیت جاری مجتمع انجام می شود (شکل ۲).

با استفاده از سطح بالای چارچوب پیشنهادی، مقدار نزدیک به بهینه ی متغیرهای کنترل شده در مدل شبیه سازی براساس تقاضای موجود و ظرفیت مجتمع به دست می آید. تحقق هدف در سطح بالای فرآیند سبب می شود تا برنامه ریزی بلندمدت در سیستم تعیین شود. حل مسئله ی حاضر، مقدار متغیرهای تصمیم را با توجه به ظرفیت محدود ایستگاه سنگ شکن تعیین می کند. در واقع، بعد از حل مسئله ی ایجاد شده، میزان تولید هر یک از اقلام معدنی یا مقدار نزدیک به بهینه ی متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده، به دست می آید. متغیرهای تصمیم ذکر شده، عبارت اند از: میزان محموله ی ورودی به ایستگاه سنگ شکن، میزان تولید سنگ سولفید، میزان تولید سنگ اکسید، میزان تولید سنگ درجه ی پایین، و میزان ضایعات. بعد از تعیین مقادیر بهینه ی به دست آمده از حل مسئله در سطح بالا، در واقع برنامه ی بهینه ی تولیدی برای مجتمع تنظیم می شود؛ که همان برنامه ی برنامه ریزی کوتاه مدت در مجتمع معدنی خواهد بود. براساس برنامه ی تهیه شده ی مذکور، با تشکیل سطح پاسخ متناظر با سطح بالا، از طریق رویکرد شبه مدل محور^{۱۸}، یک برنامه ی جدید برای تجهیز ادوات جابجایی لازم است تعریف شود. مدل ریاضی فرمول بندی شده در

جدول ۱. مشخصات ادوات لازم برای تجهیز کامیون به منظور

جابجایی.^{۱۹}

Vehicle type	Upper bound	Lower bound	Current quantity	Hourly Cost (\$)
(Shovel 1)	11	9	10	45
(Shovel 2)	9	7	8	69
(Shovel 3)	9	7	8	67
(Shovel 4)	2	1	1	118



شکل ۱. مدل انیمیشن شبیه سازی شده ی سیستم معدن مس سرچشمه.

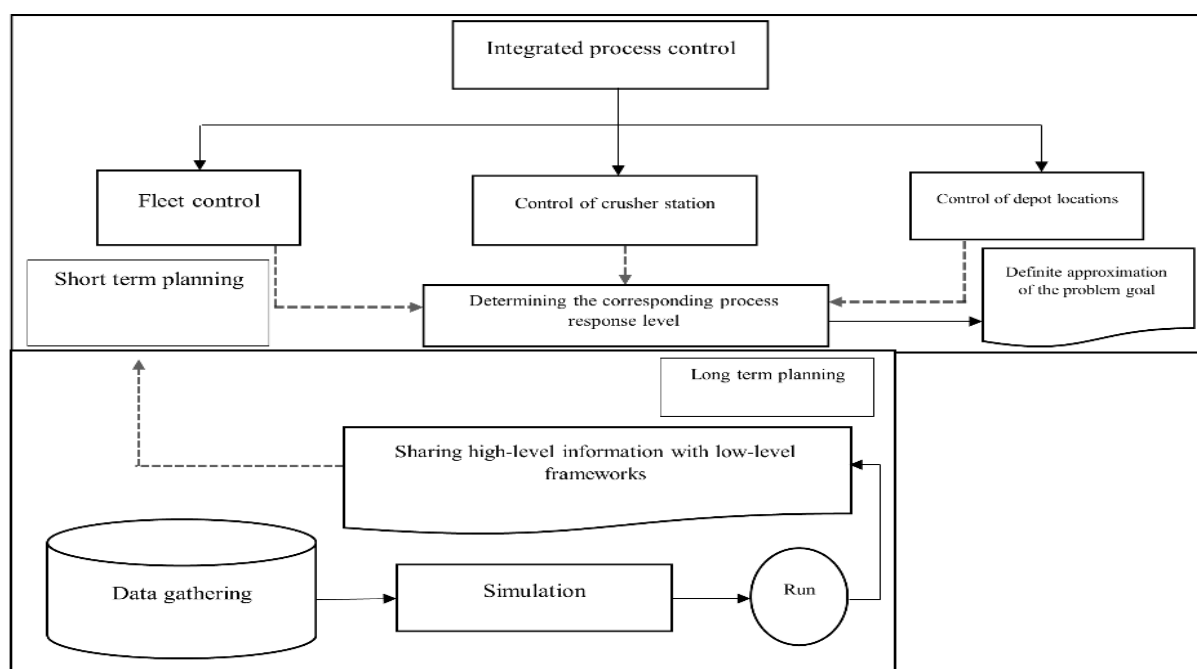
سنگ های معدن اکسید، درجه ی پایین و ضایعات هر کدام به ایستگاه ذخیره سازی دامپینگ خود منتقل می شوند. هزینه ی عملیاتی به کارگیری هر ساعت بیل نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

مدیریت برای بیشینه سازی میزان تولیدها و درآمد حاصل از معدن، محدودیت هایی را در نظر گرفته است، که عبارت اند از:

۱. تعداد بیل در دسترس محدود است؛
 ۲. میزان سنگ سولفید بارگذاری شده از منابع استخراجی باید مطابق ظرفیت معدن باشد؛
 ۳. میزان سنگ سولفید، اکسید، درجه ی پایین، و ضایعات استخراج شده باید مطابق با تقاضای موجود باشد؛
 ۴. کل هزینه های بارگذاری موجود در معدن، که شامل هزینه های بارگذاری مواد در کامیون ها توسط بیل ها می شود، باید کمینه شود.
- در شکل ۱، مدل انیمیشن شبیه سازی شده ساختار در نظر گرفته شده برای سازوکار مجتمع معدنی مشاهده می شود. علاوه بر این، در شکل های ۱ الی ۵ (مندرج در پیوست)، محیط نرم افزاری به منظور شبیه سازی در نرم افزار ARENA نشان داده شده اند.

۲.۳. نمادگذاری

در جدول ۲، نمادهایی که برای متغیرها و پارامترها در مدل توسعه داده شده استفاده شده اند، ارائه شده اند.



شکل ۲. ساختار چارچوب دوسطحی سلسله‌مراتبی شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی.

ابتکاری بهینه‌سازی Opt Quest موجود در نرم‌افزار Arena در سطح بالای چارچوب پیشنهادی استفاده شده است. ابزار Opt Quest، یک روش ابتکاری برای جستجوی راهبرد بهینه است، که جستجوهای را از طریق تجزیه و تحلیل تخمینی خروجی مدل شبیه‌سازی انجام می‌دهد. نرم‌افزار Arena با استفاده از روش‌های جستجوی هوشمندی، همچون جستجوی ممنوع، به جستجوی ترکیب بهینه‌ی مدل شبیه‌سازی ساخته‌شده در نرم‌افزار Arena، تحت وضعیتی که برای متغیرها تعریف شده است، از طریق تعریف اطلاعات مدل، مثل تعریف متغیر سطح پاسخ و متغیرهای قابل کنترل می‌پردازد. Opt Quest یک راه‌حل بالقوه برای مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار Arena ارائه می‌دهد. Opt Quest نتایج شبیه‌سازی را تحلیل می‌کند و به واسطه‌ی جستجوی هوشمندانه‌ای که انجام می‌دهد، یک راه‌حل جدید بالقوه مهیا می‌سازد.^[۱] برای استفاده از Opt Quest، ابتدا باید ساختار مسئله‌ی بهینه‌سازی مشخص شود. به عبارت دیگر، متغیرهای تصمیم و تابع هدف باید تعریف شوند. هدف پژوهش حاضر این است که از طریق تعیین مقدار بهینه برای متغیرهای تصمیم اثرگذار در فرآیند استخراج در مجتمع معدن مس سرچشمه، میزان تولیدهای ماهانه براساس برنامه‌ها و ظرفیت معدن افزایش داده شود. همان‌طور که مشخص است از طریق تولید بیشتر، می‌توان درآمد بیشتر حاصل کرد. برای این منظور، حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم به‌عنوان پارامترهای از پیش تعیین‌شده در Opt Quest قرار داده شده‌اند (جدول ۳). ساختار کلی مسئله‌ی برنامه‌ریزی، که برای افزایش تولیدهای ماهانه‌ی مجتمع، که در Opt Quest ساخته شده است، در معادله‌های ۱ الی ۷ نشان داده شده است.

۲.۳.۳. چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت

یک مدل شبیه‌سازی ساده‌شده، یک سیستم واقعی است که برای یک زیرمجموعه از متغیرهای ورودی (عوامل)، پاسخ مدل شبیه‌سازی به‌عنوان تابع زیرمجموعه‌ی اخیر تعریف می‌شود. یک شبه‌مدل، یک مدل انتزاعی^{۱۹} از زیرمجموعه‌ی متغیرهای ورودی شبیه‌سازی است، که قادر است سیستم را تشریح کند.^[۵] در نوشتار حاضر، ساخت شبه‌مدل براساس روش ابوالقاسمیان و

سطح بالا، در حقیقت مسئله‌ی تولید بهینه‌ای است که با هدف بیشینه‌سازی درآمد دنبال می‌شود. بدیهی است هر چه میزان مواد تولیدی بیشتر باشد، میزان درآمد نیز بیشتر خواهد بود؛ اما این میزان باید به گونه‌ای باشد که با محدودیت‌های موجود در مجتمع سازگار باشد. در واقع، مسئله‌ی اخیر قادر است مقدار تولید انتظاری را که باعث افزایش درآمد می‌شود، بیشینه سازد (معادله‌ی ۱). در سطح بالای چارچوب، تابع تولید انتظاری از جمع خروجی واحدهای تولیدی در مجتمع معدنی اخیر به‌دست می‌آید.

این تذکر لازم است که معادله‌ی ۱، در سطح بالای چارچوب از طریق روش فراابتکاری و به‌صورت تخمینی در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ۲، بیشترین سطح ظرفیت ایستگاه سنگ‌شکن را بیان می‌کند. معادله‌های ۳ الی ۶، میزان تولید مواد معدنی استخراجی را برای هر یک از اقسام طبقه‌بندی‌شده کنترل می‌کنند و محدودیت ۷، تضمین می‌کند که متغیرهای تصمیم مثبت گزارش شوند.

$$MaxTP = Total\ Solphide\ Throughput \quad (1)$$

$s.t$

$$Tc_{in} \leq C_c \quad \text{برای } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$L \leq S_{out} \leq U \quad (3)$$

$$L \leq O_{out} \leq U \quad (4)$$

$$L \leq L_{out} \leq U \quad (5)$$

$$L \leq W_{out} \leq U \quad (6)$$

$$Tc_{in}, S_{out}, O_{out}, L_{out}, W_{out} \geq 0 \quad (7)$$

۱.۳.۳. چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بلندمدت

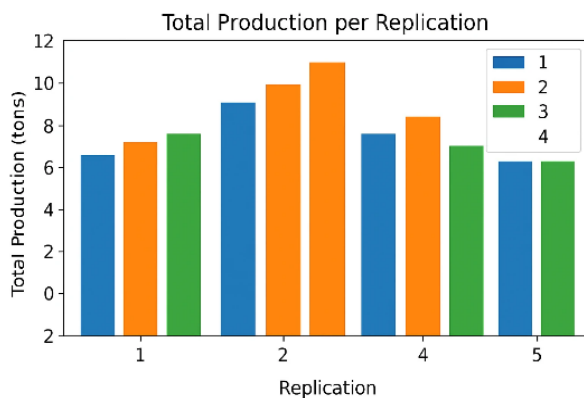
در بخش حاضر، به بحث بهینه‌سازی تولیدها در مجتمع معدن مس سرچشمه برای افزایش درآمد حاصل از آن پرداخته شده است. برای این منظور، از ابزار

جدول ۳. مقدار پارامترهای از پیش تعیین شده.

Parameter	Upper bound	Lower bound	Unit
Crusher capacity	60000	0	tons
Sulfide ore production quantity	35000	20000	tons
Oxide ore production quantity	20000	15000	tons
Low grade ore production quantity	3500	3000	tons
Waste ore production quantity	1500	0	tons
Budget	1656	0	dollars

جدول ۴. مقایسه بین وضعیت تولید موجود و بهینه.

Status	Variables					Production (Tons)	Income (Dollars)
	L_{out}	O_{out}	S_{out}	W_{out}	Tc_{in}		
Current	17422	6094	15121	9019	35000	47703	4770300
Optimum	3043	15336	31254	1191	57897	57799	5779900



شکل ۳. مقدار تولید کل مجتمع در هر تکرار شبیه سازی.

۱۰ بار به مدت ۳۰ روز به اجرا در آمده اند، تا اطمینان حاصل شود که دقت خطا در تخمین میانگین نرخ تولیدها کمتر از ۰/۰۵ است. همچنین تحلیل های به عمل آمده از اندازه گیری عملکرد سیستم نشان می دهند که دوره ی گرم کردن سیستم معادل ۴ روز است، که باید در تنظیم های مدل، قبل از به اجرا در آوردن در نظر گرفته شود.

۴. یافته های پژوهش

با اعمال تنظیم های ذکر شده در معادله های ۱ الی ۷ و تعریف مسئله، مدل در Opt Quest به اجرا در می آید. بعد از ۶۳۸ بار اجرای مدل شبیه سازی در ابزار Opt Quest، بهترین مقدار شبیه سازی در تکرار ۸۵ از بین ۲۵ راه حل ممکن، که در مجموعه ی معادله های تعریف شده صدق می کند، به دست می آید. در این تکرار مقدار تولیدها به ۵۷۷۹۹ تن می رسد. میزان تولید سنگ درجه ی پایین در وضعیت به دست آمده: ۳۰۴۲ تن، سنگ اکسید: ۱۵۳۳۶ تن، سنگ سولفید: ۳۱۲۵۴ تن، و ضایعات: ۱۱۹۶ تن گزارش شده است. همچنین مقدار ظرفیت بهینه برای ایستگاه سنگ شکن، ۵۷۸۹۷ تن به دست آمده است. در شکل ۳، مقدار تولید در هر تکرار شبیه سازی مشاهده می شود.

در جدول ۴، مقایسه ای بین وضعیت موجود و بهینه ی تولید ارائه شده است. علاوه بر اینکه وضعیت بهینه نسبت به وضعیت موجود متوازن شده است، با توجه به ترکیب به دست آمده، مقدار تولیدها ۲۱٪ افزایش یافته است، که نشان می دهد می توان از طریق آن، درآمد را نیز افزایش داد.

با لحاظ کردن هدف عملیاتی اخیر به عنوان هدف بلندمدت مجتمع، در ادامه، ترکیب اجرای تجهیزات بارگیری برای تحقق هدف مذکور در کوتاه مدت تعیین

همکاران (۲۰۲۰)^[۱] انجام شده است. مدل شبیه سازی ساخته شده برای تعیین میزان تولیدهای سیستم به منظور به دست آوردن پاسخ متغیرها به ازاء سناریوهای مختلف 2^k (k ، تعداد متغیرها) طرح عاملی کامل برای این ۴ عامل در نظر گرفته شده است:

۱. X_1 : تعداد بیل های مکانیکی نوع ۱،

۲. X_2 : تعداد بیل های مکانیکی نوع ۲،

۳. X_3 : تعداد بیل های مکانیکی نوع ۳،

۴. X_4 : تعداد بیل های مکانیکی نوع ۴.

حدود قابل قبول برای متغیرها عبارتند از: $9 \leq X_1 \leq 11$ ، $7 \leq X_2 \leq 9$ ، $7 \leq X_3 \leq 9$ ، $7 \leq X_4 \leq 9$.

عوامل مذکور، متغیرهای مستقل هستند که به عنوان متغیرهای ورودی به مدل شبیه سازی برای ساخت متغیر وابسته (میزان تولیدهای TP) استفاده می شوند. تمام ترکیب های ممکن ۴ متغیر مستقل (عوامل) و نتایج خروجی آن ها به تعداد $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ باید جمع آوری و برای متناسب سازی شبه مدل استفاده شوند. این در حالی است که برای جمع آوری تعداد داده های ذکر شده، به منظور برآورد معادله ی رگرسیون، مخصوصاً زمانی که تعداد عوامل زیاد است، نیازمند صرف زمان زیادی است. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)^[۱] نشان داده اند که می توان با استفاده از طرح آزمایش عاملی کامل 2^k ، یک شبه مدل معتبر ارائه داد. طرح آزمایش عاملی کامل، طرحی است مشتمل بر k عامل هر یک در دو سطح، و چون پاسخ چنین طرحی نیاز به $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ مشاهده دارد، آن را طرح 2^k می نامند. وقتی در یک طرح عاملی، k عامل وجود دارد، این طرح به کمترین تعداد اجرا نیاز دارد. سطح هر عامل می تواند کمی، کیفی، و یا حتی اعمال و عدم اعمال باشد. مدل آماری طرح 2^k شامل: $\binom{k}{1} = 1$ اثر اصلی، $\binom{k}{2}$

اثر متقابل دو عاملی، $\binom{k}{3}$ اثر متقابل سه عاملی، و بالاخره $\binom{k}{k} = 1$

اثر متقابل k عاملی است. بنابراین، طرح 2^k جمعاً

$$1 - 2^k = \binom{k}{1} + \binom{k}{2} + \binom{k}{3} + \dots + \binom{k}{k}$$

طرح مذکور نیاز به ۱۶ ترکیب دارد، که فقط سطوح بالا و پایین هر عامل در جریان شبیه سازی برای جمع آوری اطلاعات استفاده شده اند. هر ترکیب عوامل،

نتایج Auto select مدل رگرسیون در نرم افزار DX، مدل رگرسیون چندجمله‌ای را به صورت معادله ۹ متناسب سازی کرده است.

$$TP = 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4 \quad (9)$$

مقدار آماره P ، برای مدل، معنی دار و برابر با ۰/۰۱ گزارش شده است. در مدل رگرسیون، آثار متقابل نشانگر اثر هم زمان تغییرات متناظر متغیرهای تصمیم در سطح پاسخ هستند. شبه مدل ارائه شده در معادله ۱۱، به کمک مدل شبیه سازی سیستم واقعی، که در نوشتار حاضر بررسی شده است، ساخته شده است. با روشن شدن معادله ی اخیر می توان بهترین ترکیب ممکن مجموعه ی متغیرهای تصمیم را از طریق بهینه سازی مدل، تحت محدودیت های مدیریتی بعد از تأیید اعتبار آن به دست آورد.

۱.۴. اعتبارسنجی شبه مدل

میزان اعتبار شبیه سازی نشان می دهد که چگونه مدل می تواند رفتار سیستم واقعی را بازگو کند. اعتبار شبه مدل از طریق روش های بسیاری که به صورت مقایسه بین خروجی های شبه مدل و شبیه سازی است، انجام می شود. در نوشتار حاضر، جهت پذیرش شبه مدل از روش خطای مطلق نسبی (ARE)^{۲۰} استفاده شده است، که در آن SO خروجی شبیه سازی و MO خروجی شبه مدل است (ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)^۱).

برای حصول اطمینان از اعتبار شبه مدل ساخته شده، لازم است شبه مدل و مدل شبیه سازی در ۵ نقطه ی دیگر طراحی - به جز نقاط طرح 2^4 - به تصادف در محدوده ی قابل پذیرش اجرا شوند و سپس نتایج به دست آمده از اجرای شبیه سازی با مقادیر به دست آمده از شبه مدل مقایسه شوند.

چهار ستون اول در جدول ۶، نشانگر نقاط تصادفی انتخاب شده برای عامل های X_1 ، X_2 ، X_3 و X_4 هستند. به ترتیب دو ستون بعد (SO, MO) نشان دهنده ی مقادیر به دست آمده از شبه مدل رگرسیون و مدل شبیه سازی هستند. متعاقباً، در ستون آخر مقدار خطای مطلق نسبی محاسبه شده است.

شده است. برای این منظور، آثار اصلی چهار عامل، تقابل میان عوامل در مدل رگرسیون در معادله ۸ نشان داده شده است.

$$TP = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \beta_{ijk} X_i X_j X_k + \beta_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4 + \varepsilon \quad (8)$$

که در آن،

TP : میزان کل تولیدها،

β_i : جزء ثابت معادله ی رگرسیون،

β_{ij} : اثر تقابل دوطرفه بین عامل های i و j ،

β_{ijk} : اثر تقابل سه طرفه بین عامل های i ، j و k ،

β_{1234} : اثر تقابل چهار طرفه بین تمامی متغیرها،

ε : خطای جزئی متناسب سازی مدل رگرسیون است.

نتایج شبیه سازی برای $2^4 = 16$ ، نقطه ی طراحی جمع آوری شده است (جدول پیوست ۲)، و ضرایب β برای شبه مدل چندجمله ای رگرسیون تخمین زده شده است. نتایج آزمایش با تحلیل آماری در نرم افزار DX انجام شده است، که در جدول ۵، نتایج تحلیل مذکور ارائه شده است.

در جدول ۵، در ستون اول، آثار اصلی و همه ی آثار متقابل معنی دار؛ در ستون دوم، اثر بالقوه ی جملات؛ در ستون سوم، ضرایب آثار؛ و در دو ستون آخر، مقدار احتمالات و مقدار P نشان داده شده اند. با توجه به نتایج موجود در جدول ۵، مقدار آماره ی F ، برای مدل برابر ۵/۵۲ به دست آمده است؛ که نشان می دهد مدل مذکور معنی دار است. در حقیقت با توجه به مقدار F ، فقط ۱/۸۲٪ ممکن است مدل در محدوده ی تعریف شده دچار اختلال شود. مقادیر $Prob > F$ برای جملاتی که کمتر از ۰/۰۵ در جدول اخیر گزارش شده اند، معنی دار هستند و در متناسب سازی مدل از آن جملات استفاده می شود و مقادیر بالای ۰/۱ نشان می دهند که جمله معنی دار نیست. البته باید توجه شود که اگرچه متغیرهای X_3 و X_4 معنی دار نیستند، اما از آن ها برای تحلیل استفاده شده است؛ زیرا متغیرهای اخیر جزء متغیرهای تصمیم سیستم مورد نظر هستند و هدف، محاسبه ی مقدار بهینه ی آن ها در آینده بوده است.

جدول ۵. تحلیل آماری شبه مدل رگرسیون.

term	Effect	Coefficient	F-value	$Prob > F$
Constant	47897	39382.25	5.52	0.01
X_1	-327.94	-1640.25	11.96	0.01
X_2	-44.69	2331.81	0.22	0.65
X_3	33.56	827.37	0.12	0.73
X_4	-185.94	8055.37	3.75	0.09
X_1X_3	240.19	240.19	6.25	0.04
X_1X_4	-203.6	-406.12	4.47	0.05
X_2X_3	-297.6	-297.06	9.57	0.01
X_3X_4	-273.06	-546.12	8.08	0.02

جدول ۶. اعتبارسنجی شبه مدل.

ARE	Simulation output	Meta model output	Design point			
			X_4	X_3	X_2	X_1
0.008	47656±329	48081	1	8	8	10
0.02	47433±502	48717	2	7	8	9
0.01	48600±427	47912	1	8	9	11
0.02	49201±556	47751	2	8	7	10
0.01	49045±484	48251	1	8	7	9

جدول ۷. تغییرات بر روی مقدار عوامل.

Status	Factors				Production (tons)
	Shovel 1	Shovel 2	Shovel 3	Shovel 4	
Optimum	9	8	7	7	48210
Increase	10	9	8	8	47986
Decrease	8	7	6	6	42025

دیگر به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده اند. با توجه به اینکه برای هدف هزینه، کران بالای B در نظر گرفته شده است؛ لذا، در نوشتار حاضر، تابع هزینه کل به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. ساختار تابع هزینه

$$C_T = \sum_{i=1}^4 C_i NS_i \leq B$$

کل سیستم بارگذاری به صورت C_T نشان داده شده

است. این محدودیت هزینه در مدل به صورت

$$C_1 NS_1 + C_2 NS_2 + C_3 NS_3 + C_4 NS_4 \leq B$$

در نظر گرفته شده است؛ که در آن B ، کران بالای سطح بودجه در دست برای ادوات بارگذاری در مجتمع معدن مس سرچشمه است، که باید از طریق تعیین مقدار بهینه ی تجهیزات بارگذاری، بهبود یابد یا سطح اخیر حفظ شود. مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح غیرخطی، با استفاده از نرم افزار LINGO حل شده و ترکیب بهینه ی منابع بارگذاری به صورت

$X_1^* = 9, X_2^* = 8, X_3^* = 7, X_4^* = 7$ به دست آمده است. همچنین مقدار شبه مدل به ازاء ترکیب بهینه، یعنی $TP(X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*)$ برابر با ۴۸۲۱۰ تن به دست آمده است، که بیانگر افزایش میزان تولید از ۴۷۷۰۳ به ۴۸۲۱۰ تن است.

۳.۴. تحلیل حساسیت

در بخش کنونی، تأثیر تغییر در پارامترهای مدل بر روی تابع هدف بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا در مقدار عامل های کلیدی، یعنی بیل های مکانیکی نوع اول، نوع دوم، نوع سوم، و نوع چهارم نسبت به وضع بهینه تغییر یافته و مقدار تابع هدف بررسی شده است. در جدول ۷، تغییرات ناشی از پارامترهای ذکر شده بر روی مدل نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، در صورت افزایش مقدار عامل های کلیدی، تجهیزات جابجایی نسبت به وضع موجود از ۴۷۷۰۳ تن تولیدات به ۴۷۹۸۶ تن تولیدات کل افزایش پیدا کرده است؛ اما نسبت به وضع بهینه، علیرغم به کارگیری بیشتر منابع، تولیدهای بیشتری حاصل نشده است. علاوه بر این، در صورت کاهش منابع نیز میزان تولیدها کاهش پیدا می کند.

علاوه بر تغییر اخیر، در مقدار بودجه ی در دسترس نیز تغییراتی به وجود آمده و تأثیر تغییرهای کاهش و افزایش آن در مقدار تابع هدف و میزان کل استخراج بررسی شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، در صورتی که مقدار بودجه نسبت به وضعیت موجود افزایش یابد، ضمن افزایش در مقدار هزینه ها، مقدار

متوسط ARE برای شبه مدل، ۱/۳٪ به دست آمده است. بنابراین نتیجه گرفته شده است که شبه مدل قادر است به خوبی مقادیر نزدیک به بهینه ی متغیرهای تصمیم را تعیین کند. لذا می توان از معادله ی ۱۰ در تصمیم گیری های مدیریتی استفاده کرد. به طوری که در آینده با اعمال محدودیت های تکنولوژیکی بتوان ترکیب بهینه ی ماشین آلات بارگذاری را برای مسئله تعیین کرد.

۲.۴. حل مسئله ی تعیین ماشین آلات بارگذاری

ترکیب بهینه ی منابع اثرگذار بارگذاری به منظور بیشینه سازی کل خروجی های سیستم، که براساس محدودیت های مدیریتی و متغیرهای تصمیم قابل تعریف است، را می توان به صورت روابط ۱۰ الی ۱۳ نشان داد. برای این منظور، پس از برآورد مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه سازی به منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه کردن محدودیت های سیستمی ارائه شده است.

$$\begin{aligned} Max TP = & 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + \\ & 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - \\ & 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4 \end{aligned} \quad (10)$$

$$s.t : \sum_{i=1}^4 C_i NS_i \leq B \quad (11)$$

$$L_i \leq NS_i \leq U_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

$$X_i \text{ integer} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

معادله ی ۱۰، تابع هدف را نشان می دهد که طبق مراحل قبل تعیین شده است. معادله ی ۱۱، تضمین می کند که هزینه ی ماشین آلات بارگذاری از سطح بودجه ی در دسترس تجاوز نکند. در معادله ی ۱۲، محدوده ی تعریف شده برای بیل ها در نظر گرفته شده است. برای این منظور، حدود بالا و پایین، تعداد موجود، و هزینه ی به کارگیری ساعتی متغیرهای تصمیم به عنوان پارامترهای از پیش تعیین شده ی استفاده شده در Opt Quest قرار داده شده است. در جدول ۱، مقادیر جمع آوری شده ی مذکور نشان داده اند.

در این سطح از پژوهش حاضر، اهداف افزایش درآمد از طریق تولیدهای بیشتر و کاهش هزینه های جابجایی تجهیزات بارگذاری موجود مد نظر بوده است بنابراین، برای حل مسئله ی دو هدفی مذکور از روش اسپیلون محدودیت استفاده شده است؛ که مطابق آن، یکی از اهداف به عنوان تابع اصلی و هدف

جدول ۸. تغییرات بر روی مقدار هزینه.

Status	Cost (Dollar)	Production (Tons)
Current	33870	48210
Increase	42870	48315
Decrease	15369	23458

تولید افزایش می‌کند. اما، مقدار تولید در مقایسه با وضعیت بهینه، که برابر با ۳۸۸ به‌دست آمده است، تغییر محسوسی کرده و برابر با ۴۸۳۱۲ تن محاسبه شده است. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش در مقدار هزینه‌ها با توجه به افزایش در مقدار هزینه و تغییر محسوس در میزان تولید به صلاح نیست. اما در صورتی که مقدار بودجه کاهش یابد، علی‌رغم اینکه هزینه‌ها کاهش می‌یابند، اما افت بسیار شدیدی در مقدار تولید حاصل می‌شود. در جدول ۸ تغییرات افزایشی و کاهش‌ی مربوط به مقدار هزینه و تاثیر آن بر میزان تولیدات نشان داده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک چارچوب سلسله‌مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی تولید و بارگذاری ماشین‌آلات در مجتمع معدن مس سرچشمه پیشنهاد شده است؛ که هدف از آن، بیشینه‌سازی درآمد معدن در هر شیفت کاری از طریق تعیین برنامه‌ی تولیدی بهینه‌ی انواع سنگ‌های معدنی مجتمع در سطح بالا و حل مسئله‌ی بارگذاری ماشین‌آلات (بیل‌های مکانیکی)، در سطح پایین بوده است. برای این منظور، از یک مدل شبیه‌سازی توسعه داده‌شده در نرم‌افزار ARENA، استفاده شده است. از ابزار Opt Quest جهت حل مسئله در سطح بالا و تعیین مقدار بهینه‌ی انواع مواد معدنی در مجتمع استفاده شده است. در سطح پایین چارچوب پیشنهادی اخیر، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر بهینه‌سازی شبیه‌سازی یکپارچه به کمک شبه‌مدل رگرسیون و طراحی آزمایش‌ها طراحی شده است؛ که قادر است به‌منظور ارزیابی اثر تکنولوژی تولید در عملکرد یک سازمان به تصمیم‌گیران کمک کند. علاوه بر این، در سطح پایین چارچوب پیشنهادی نشان داده شده است که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی شبیه‌سازی و شبه‌مدل رگرسیون، مقدار بهینه‌ی ترکیب منابع بارگذاری را به‌دست آورد.

در مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده، به‌طور کلی روش‌های مختلفی از لحاظ نظری برای رویکرد شبه مدل‌محور^[۵-۱] توسعه داده شده است. اما مهم‌ترین مزیت چارچوب پیشنهادی، ساختار سلسله‌مراتبی بودن آن است که به‌دلیل

برنامه‌ریزی توأمان کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن هم از رویکرد شبه مدل‌محور و هم مدل‌محور استفاده شده است. این در حالی است که در هر یک از مطالعات مذکور، فقط از یک رویکرد شبه مدل‌محور و توسعه‌ی یک شبه‌مدل استفاده شده است. اما در پژوهش حاضر، فقط به توسعه‌ی یک شبه‌مدل بسنده نشده است. زیرا هر کدام از رویکردهای ذکرشده قادر به احصاء نیازهای برنامه‌های معدنی به‌طور جداگانه هستند. اما در پژوهش حاضر، با توسعه‌ی مبانی نظری و معرفی رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی به‌طور سلسله‌مراتبی، قابلیت اخیر به‌صورت هم‌زمان فراهم آورده شده است. این در حالی است که در برخی مطالعات^[۱۱، ۱۴ و ۲۶] فقط به برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در یک معدن از طریق مطالعه بر روی سیستم اعزام بهینه‌ی ترکیب‌های تجهیزات حمل‌ونقل پرداخته شده است؛ اما در پژوهش حاضر، به برنامه‌ریزی بلندمدت از طریق تعیین سطح بهینه‌ی تولیدها در درازمدت نیز توجه شده است.

با توجه به موارد اشاره‌شده و نتایج به‌دست‌آمده، بینش‌های مدیریتی مختلفی از اجرای پژوهش حاضر برای مدیران معادن، علی‌الخصوص مجتمع معدنی مس سرچشمه، به این شرح پیشنهاد شده است:

- ۱- ایجاد یک راهبرد جامع برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، که شامل: اهداف واضح، معیارهای عملکرد، و زمان‌بندی‌های مشخص باشد.
 - ۲- سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، مانند نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرفته برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها.
 - ۳- ایجاد سیستم‌هایی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی از عملیات معدن به‌منظور بهبود دقت مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری.
 - ۴- راه‌اندازی سیستم‌های پایش و ارزیابی مستمر برای بررسی عملکرد و آثار برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده و انجام اصلاحات لازم.
 - ۵- استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی سناریوهای مختلف استخراج و برنامه‌ریزی، به‌منظور شناسایی بهترین گزینه‌ها و کاهش عدم قطعیت‌ها.
- سرانجام، پیشنهادهایی که از سوی نویسندگان برای مطالعات آتی مطرح شده است، عبارت‌اند از: مقایسه‌ی عملکرد روش مدل‌سازی و روش حل جایگزین برای مسئله با چارچوب پیشنهادی ارائه‌شده در نوشتار حاضر به‌منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین توسعه و ارائه‌ی چارچوبی به منظور ارزیابی سود حاصل در سیستم می‌توان اشاره کرد.

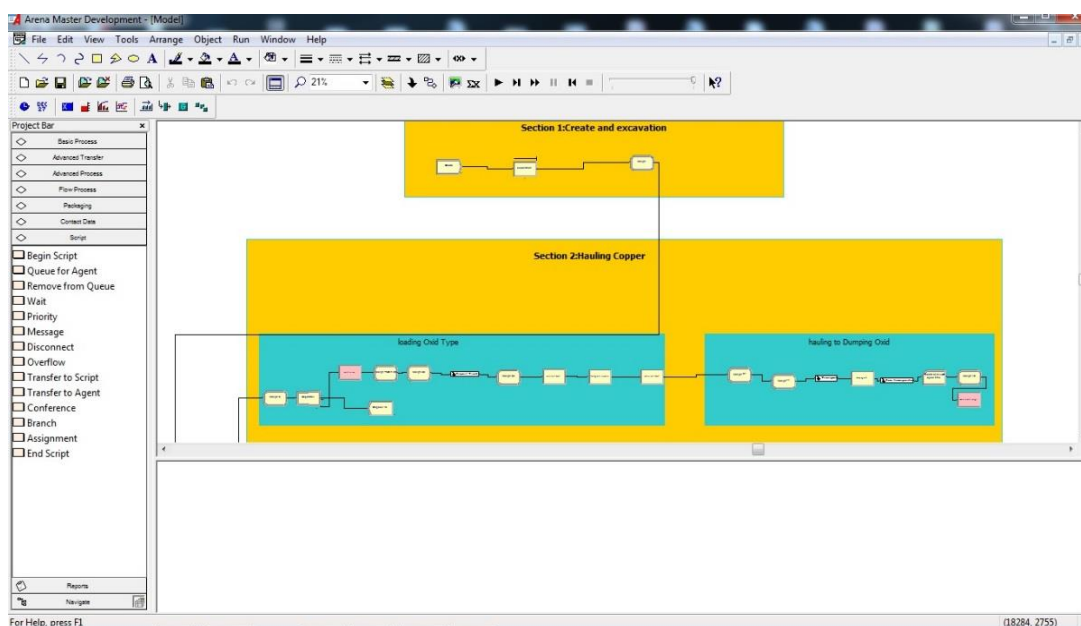
منابع – References

1. Abolghasemian, M., Kanai, A. G., and Daneshmandmehr, M. 2020. A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iranian journal of management studies*, 13(4), pp. 705-732. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898>
2. Nageshwaraniyer, S. S., Son, Y. J., and Dessureault, S. 2013. Simulation-based optimal planning for material handling networks in mining. *Simulation*, 89(3), pp. 330-345. <https://doi.org/10.1177/0037549712464278>
3. de Sousa Junior, W.T., Montevechi, J.A.B., de Carvalho Miranda, R. and Campos, A.T., 2019. Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 128, pp.526-540. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.073>

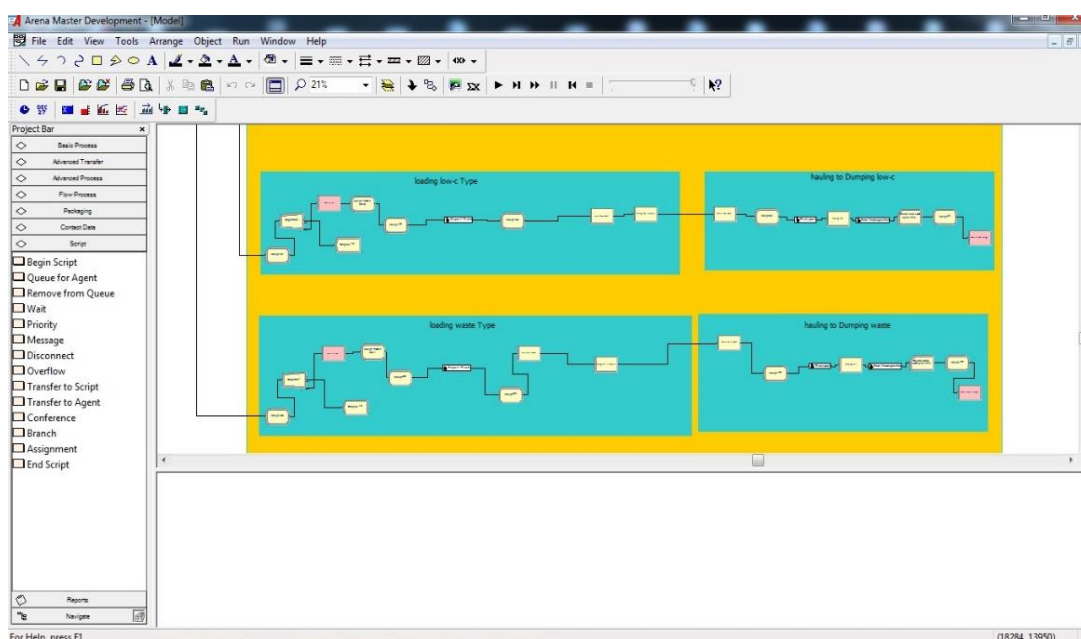
4. Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., and Daneshmand-Mehr, M. 2022. Simulation-Based Multiobjective Optimization of Open-Pit Mine Haulage System: A Modified-NBI Method and Meta Modeling Approach. *Complexity*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3540736>
5. Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., and Chobar, A. P. 2023. Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, 43(1), pp. 1-19. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399>
6. Chang, K.H., Chen, T.L., Yang, F.H. and Chang, T.Y., 2023. Simulation optimization for stochastic casualty collection point location and resource allocation problem in a mass casualty incident. *European Journal of Operational Research*, 309(3), pp.1237-1262. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.065>
7. Ghasemi, A., Farajzadeh, F., Heavey, C., Fowler, J. and Papadopoulos, C.T., 2024. Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. *Journal of Industrial Information Integration*, 39 p.100599. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100599>
8. Tekin, E., and Sabuncuoglu, I. 2004. Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications. *IIE transactions*, 36(11), pp. 1067-1081. <https://doi.org/10.1080/07408170490500654>
9. Teck, S., Dewil, R. and Vansteenwegen, P., 2024. A simulation-based genetic algorithm for a semi-automated warehouse scheduling problem with processing time variability. *Applied Soft Computing*, 160, pp.111713. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111713>
10. Jafferli, M., Venkateshwaran, J., and Son, Y. J. 2005. Performance comparison of search-based simulation optimisation algorithms for operations scheduling. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 1(1-2), pp. 58-71. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2005.007114>
11. Ozdemir, B. and Kumral, M., 2019. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 95, pp.36-48. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.006>
12. Zhang, L., and Xia, X. 2015. An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines. *Energy Procedia*, 75, pp. 1779-1784. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.469>
13. Chang, K.H. and Lin, C.P., 2023. An efficient simulation optimization method for the redundancy allocation problem with a chance constraint. *Journal of the Operational Research Society*, pp.1-15. <https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2272860>
14. Shishvan, M.S. and Benndorf, J., 2019. Simulation-based optimization approach for material dispatching in continuous mining systems. *European Journal of Operational Research*, 275(3), pp.1108-1125. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.015>
15. Koenigsberg, E. 1982. Twenty five years of cyclic queues and closed queue networks: A review. *Journal of the Operational Research Society*, 33(7), pp. 605-619. <https://doi.org/10.1057/jors.1982.136>
16. Miranda, R.D.C., Montevechi, J.A.B., Silva, A.F.D. and Marins, F.A.S., 2014. A new approach to reducing search space and increasing efficiency in simulation optimization problems via the fuzzy-DEA-BCC. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/450367>
17. Patel, M., and Desai, D. A. (2018). Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 35(8), 1519-1545. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2017-0081>
18. Chinbat, U. and Takakuwa, S., 2009, December. Using simulation analysis for mining project risk management. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, (pp. 2612-2623). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429647>
19. Sbarbaro, H.M.D., 2021. Simulation Of Haulage Systems Using A Flexible Simulation Environment. *IFAC-PapersOnLine*, 54(11), pp.133-138. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.063>
20. Alarie, S., and Gamache, M. 2002. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16(1), pp. 59-76. <https://doi.org/10.1076/ijsm.16.1.59.3408>
21. Sgurev, V., Vassilev, V., Dokev, N., Genova, K., Drangajov, S., Korsemov, C., and Atanassov, A. 1989. TRASY—an automated system for real-time control of the industrial truck haulage in open-pit mines. *European Journal of Operational Research*, 43(1), pp. 44-52. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90408-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90408-6)
22. Chanda, E. K. C., and Dagdelen, K. 1995. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 9(4), pp. 203-208. <https://doi.org/10.1080/09208119508964748>
23. Shih, J. S., and Frey, H. C. 1995. Coal blending optimization under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 83(3), pp. 452-465. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00243-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00243-6)
24. Runciman, N., Vagenas, N., and Corkal, T. 1997. Simulation of haulage truck loading techniques in an underground mine using WITNESS. *Simulation*,

- 68(5), pp. 291-299.
<https://doi.org/10.1177/003754979706800504>
25. Chinbat, U., and Takakuwa, S. 2008. Using operation process simulation for a six sigma project of mining and iron production factory. *Winter Simulation Conference*, pp. 2431-2438.
<https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736351>
26. Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., and Arata, A. 2013. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(1), pp. 113-119.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.017>
27. Taghizadeh, H., Bazrkar, A., & Abedzadeh, M. 2015. Optimization production planning using fuzzy goal programming techniques. *Modern Applied Science*, 9(9), pp. 68.
<http://dx.doi.org/mas.v9n9p68>
28. Saidabad, A. A., & Taghizadeh, H. 2015. Performance and improvement of production line function using computer simulation (case study: An iron foundry). *American Journal of Computational Mathematics*, 5(4), pp. 431.
<https://doi.org/10.4236/ajcm.2015.54038>

پیوست

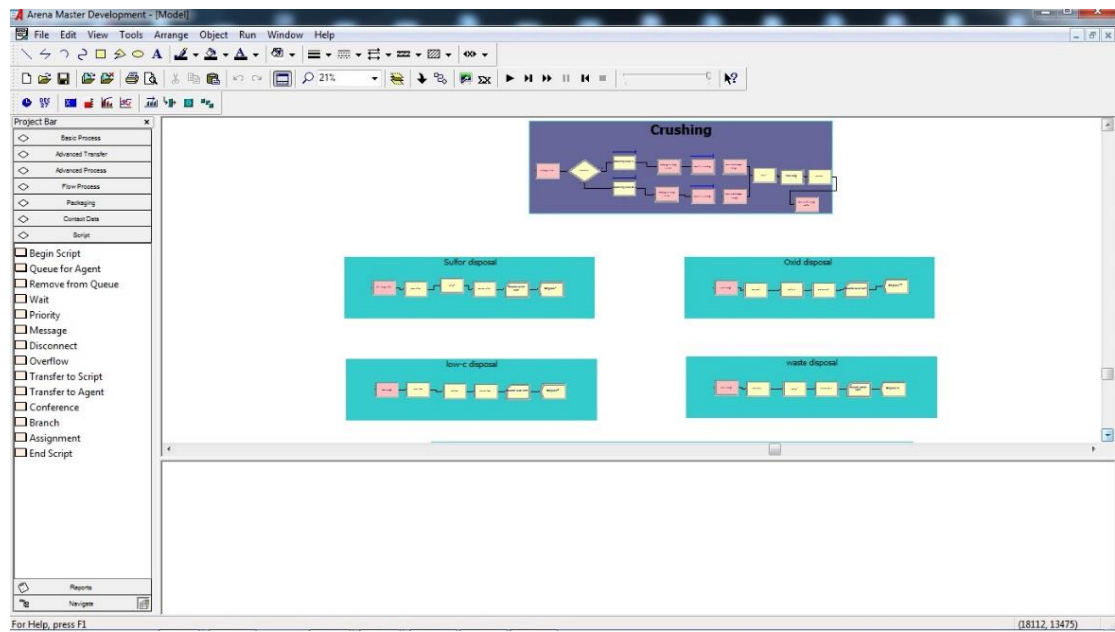


شکل ۱. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انواع سنگ های معدنی.

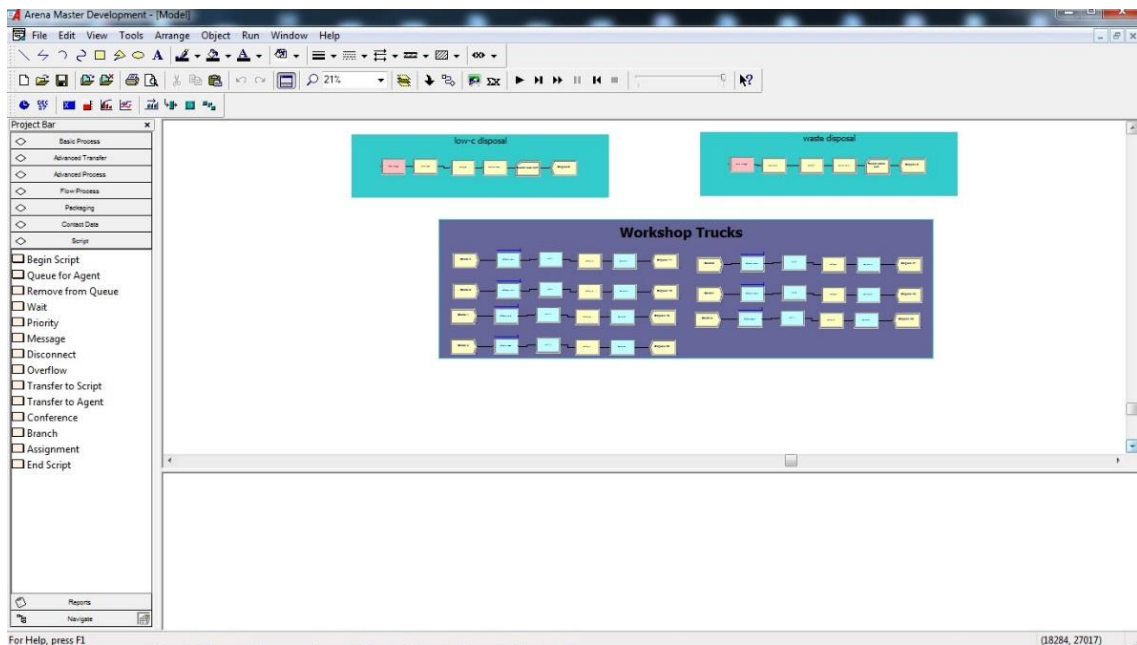


شکل ۲. ادامه محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انواع سنگ های معدنی.

مدل‌سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن روباز - میلاد ابوالقاسمیان و همکاران



شکل ۳. محیط نرم افزار برای تعریف مازول های بخش سنگ شکن (کراشر).



شکل ۴. محیط نرم افزار برای تعریف مازول های کارگاه کامیون ها و تجهیزات حمل و نقل.