



Optimization of multi-objective simulation of excavator-truck loading system for mining minerals

Tahereh Khajvandsany¹, HoseinAmoozad Khalili², RamezanRezaeyan³ and Kourosch Nemati⁴

1. Department of Industrial Engineering, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran ,Email: Khajvandsany@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Industrial Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran, Email: amoozad92@yahoo.com
3. Department of statistic and mathematics, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran, Email: R.rezaeyan@gmail.com
4. Department of Computer Engineering, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran, Email: Knms81@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 5 Dec 2024
Received in revised form
30 Dec 2024
Accepted 18 Feb 2025
Published online 18 Mar
2024

Keywords:

Simulation, Optimization,
Truck-Shovel system.

ABSTRACT

The shovel-truck loading system is one of the most important components of transportation in an open pit mine. To evaluate the performance of the excavator-truck system, the simulation modeling approach is combined with meta-heuristic methods and it has become a suitable approach to study and optimize the complex behavior of such a system. The purpose of this study is to identify the approximate optimal number of trucks and shovels in the equipment dispatch system in Sarchesmeh copper mine in Kerman province to increase monthly efficiency and reduce transportation costs. Two evolutionary multi-objective optimization algorithms, namely Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) and Fast Pareto Genetic Algorithm (FastPGA), have been programmed and integrated with the shovel-truck system simulation model developed in Arena software package to perform simulation, programming and integration. . The optimization process of the experimental results shows that there are near-optimal solutions that can reduce the average monthly transportation cost by 10% and increase the average monthly power by 11%.





Cite this article: Khajvandsany, T. & Others, (2024)., Optimization of multi-objective simulation of excavator-truck loading system for mining minerals. *Engineering Management and Soft Computing*, 10 (2). 182-203. DOI: <https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11807.1229>



© The Author(s)
DOI: <https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11807.1229>

Publisher: University of Qom

بهینه سازی شبیه سازی چند هدفه سیستم بارگذاری بیل مکانیکی- کامیون برای استخراج سنگ های معدنی

طاهره خواجهوندسانی^۱ , حسین عموزاد خلیلی^۲ , رمضان رضائیان^۳  و کوروش نعمتی^۴ 

۱. گروه مهندسی صنایع، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، Khajvandsany@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، amoozad92@yahoo.com

۳. گروه آمار و ریاضیات، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، R.rezaeyan@gmail.com

۴. گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، Knms81@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰</p> <p>کلیدواژه‌ها: شبیه سازی، بهینه سازی، سیستم کامیون-بیل</p>	<p>سیستم بارگذاری بیل-کامیون یکی از مهمترین اجزای حمل و نقل در یک معدن روباز است. برای ارزیابی عملکرد سیستم بیل-کامیون، رویکرد مدل‌سازی شبیه سازی با روش های فراابتکاری ترکیب شده است و یک رویکرد مناسب برای مطالعه و بهینه‌سازی رفتار پیچیده چنین سیستمی تبدیل شده است. هدف از این مطالعه شناسایی تعداد تقریبی بهینه کامیون و بیل در سیستم اعزام تجهیزات در معدن مس سرچشمه در استان کرمان برای افزایش بازده ماهانه و کاهش هزینه های حمل و نقل می باشد. دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی، به نام های الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک سریع پارتو (FastPGA)، برنامه‌ریزی شده‌اند و با مدل شبیه‌سازی سیستم بیل-کامیون توسعه یافته در بسته نرم‌افزاری Arena به منظور انجام شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی و ادغام شده‌اند. فرآیند بهینه سازی نتایج تجربی نشان می‌دهد که راه‌حل‌های تقریباً بهینه‌ای وجود دارد که می‌تواند میانگین هزینه حمل و نقل ماهانه را تا ۱۰ درصد کاهش دهد و متوسط توان ماهیانه را تا ۱۱ درصد افزایش دهد.</p>

استناد: خواجهوندسانی، طاهره و همکاران. (۱۴۰۳). «بهینه سازی شبیه سازی چند هدفه سیستم بارگذاری بیل مکانیکی- کامیون برای استخراج سنگ‌های

معدنی». *مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، دوره ۱۰ (۲)، صص: ۲۰۳-۱۸۲. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11807.1229>



(۱) مقدمه

در صنعت معدن کاری، بهینه‌سازی فرآیندهای بارگذاری و حمل و نقل سنگ‌های معدنی از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، مدیریت همزمان چندین هدف متضاد است که شامل کاهش زمان بارگذاری، افزایش بهره‌وری تجهیزات، کاهش هزینه‌های عملیاتی و به حداقل رساندن تأثیرات زیست‌محیطی می‌باشد (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). سال‌هاست که معدن به عنوان یکی از گران‌ترین و پیچیده‌ترین صنایع مطرح بوده است (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۱۸). در بین تمامی بخش‌های صنعت معدن، سیستم حمل و نقل نقشی کلیدی دارد که به دلیل سهم قابل توجه آن در هزینه‌های عملیاتی سیستم حمل و نقل است (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۲).

سیستم بارگذاری بیل مکانیکی و کامیون به‌عنوان یک زنجیره تأمین کلیدی در عملیات استخراج سنگ‌های معدنی، نیازمند طراحی و بهینه‌سازی دقیق است. با توجه به تنوع و پیچیدگی شرایط کار، از جمله نوع سنگ، ویژگی‌های زمین‌شناسی، و محدودیت‌های زمانی و منابع، بهینه‌سازی این سیستم به‌طور سنتی با چالش‌های زیادی مواجه است (کین و همکاران، ۲۰۲۴).

شبیه‌سازی چند هدفه به‌عنوان یک ابزار قدرتمند می‌تواند به تحلیل و بهینه‌سازی این سیستم کمک کند، اما نیاز به رویکردهای نوین و کارآمد برای حل مسائل پیچیده و چندبعدی دارد (دنکیز و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، این تحقیق به بررسی و بهینه‌سازی شبیه‌سازی چند هدفه سیستم بارگذاری بیل مکانیکی-کامیون می‌پردازد تا به‌واسطه آن، بهبود عملکرد و کارایی در استخراج سنگ‌های معدنی حاصل شود. هدف این تحقیق، شناسایی و مدل‌سازی متغیرهای کلیدی مؤثر بر عملکرد سیستم بارگذاری و حمل و نقل، و ارائه راهکارهای بهینه برای دستیابی به اهداف چندگانه است. این تحقیق می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان در صنعت معدن کاری کمک کند تا با استفاده از نتایج به‌دست آمده، تصمیمات بهتری در زمینه بهینه‌سازی عملیات استخراج اتخاذ کنند. زیرا، از طریق بهینه‌سازی سیستم بارگذاری، می‌توان زمان و منابع را به‌طور مؤثرتری مدیریت کرد. این امر منجر به افزایش بهره‌وری عملیات استخراج و کاهش زمان توقف تجهیزات می‌شود. بهینه‌سازی می‌تواند به شناسایی روش‌های کارآمدتر در استفاده از تجهیزات و منابع منجر شود. این کاهش در هزینه‌های عملیاتی و نگهداری به بهبود سودآوری پروژه‌های معدنی کمک می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی چند هدفه، می‌توان به بهینه‌سازی پارامترهای مختلفی مانند کیفیت مواد معدنی استخراج شده و کاهش ضایعات کمک کرد. این امر به افزایش ارزش اقتصادی محصولات معدنی منجر می‌شود. بنابراین، هدف از این تحقیق بهینه‌سازی شبیه‌سازی چند هدفه سیستم بارگذاری بیل مکانیکی-کامیون است تا به‌واسطه آن، بهبود عملکرد و کارایی در استخراج سنگ‌های معدنی حاصل شود. هدف این تحقیق، شناسایی و مدل‌سازی متغیرهای کلیدی مؤثر بر عملکرد سیستم بارگذاری و حمل و نقل، و ارائه راهکارهای بهینه برای دستیابی به اهداف چندگانه است. این تحقیق می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان در صنعت معدن کاری کمک کند تا با استفاده از نتایج به‌دست آمده، تصمیمات بهتری در زمینه بهینه‌سازی عملیات استخراج اتخاذ کنند.

هدف از این تحقیق، تحلیل عملکرد سیستم حمل و نقل در معدن مس سرچشمه واقع در استان کرمان و تعیین تعداد بهینه تجهیزات (کامیون و بیل) به منظور به حداکثر رساندن توان و به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل می‌باشد.

سیستم معدن شامل چندین پارامتر تصادفی است و برای مدل سازی تحلیلی بسیار پیچیده است. البته در مدل سازی ریاضی تمام جنبه های مسئله امکان پذیر نیست و بسیاری از مسائل مهم از جمله تنوع شغل، توجه به ظرفیت سنگ شکن، تعداد کامیون ها و بیل ها و محل دفن زباله در مدل های تحلیلی نادیده گرفته می شوند. همچنین، مدل های ریاضی فرض می کنند که اکثر پارامترها مانند زمان پردازش و حمل و نقل، نرخ خرابی و زمان تعمیر در یک سیستم حمل و نقل واقعی و قطعی هستند. با افزایش سطح پیچیدگی عملیات، شبیه سازی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سیستم در نظر گرفته می شود. بنابراین، یک مدل شبیه سازی گسسته پیشامد برای بررسی و تحلیل رفتار سیستم حمل و نقل در معدن مس سرچشمه با استفاده از نرم افزار شبیه سازی ARENA توسعه داده شده است. علاوه بر این، دو روش حل برای مسأله چند هدفه ارائه شده است. سپس، این روش ها با نتیجه بسته بهینه سازی OptQuest در نرم افزار Arena مقایسه می شوند. اولین روش چند هدفه، الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب (NSGA-II) است که توسط دب و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است و اخیراً کاربردهای فراوانی نیز در مطالعه زاده و همکاران (۲۰۲۴) نیز به آن اشاره شده است. همچنین، دومین الگوریتم ژنتیک پارتو سریع (FastPGA) است که توسط اسکندری و گایگر (۲۰۰۷) معرفی شده است. بنابراین، مهمترین نوآوری های تحقیق حاضر عبارت است از توسعه یک روش حل برای مدل چندهدفه در یک سیستم مکانیکی بیل-کامیون در معدن به منظور کنترل اندازه انباشته فرآورده های معدنی است. برای تحقق این نوآوری یک مدل شبیه سازی با در نظر گرفتن عوامل محیطی و شرایط واقعی کارگاه طبق ویژگی های زمین شناختی توسعه داده شده است.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲ مروری بر کارهای مرتبط ارائه شده است و بخش ۳ شرح مسأله در معدن مس سرچشمه و سیستم حمل و نقل را ارائه می کند. مدل شبیه سازی و روش های بهینه سازی توضیح داده شده اند. مدل در بخش ۴ نتایج چارچوب پیشنهادی و الگوریتم های بهینه سازی را ارائه می کند در نهایت، نتیجه گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی در بخش ۵ ارائه شده است.

۲) مرور ادبیات تحقیق

۲-۱) مطالعات شبیه سازی سیستم معدن

برای تحقیقاتی که به صورت تحلیلی یک سیستم حمل و نقل در معادن را مدل کرده اند، هیمبا (۱۹۸۰) سیستم اعزام خودکار را برای تعیین تخصیص بهینه کامیون طراحی کرده اند که بهره وری را به حداکثر می رساند. هادسون و بارکر (۱۹۸۵) سیستم اعزام کامیون را برای انجام تکالیف در یک فرآیند دو مرحله ای بهبود دادند. ابتدا هر بیل تعداد معینی کامیون را بارگیری می کند و سپس توزیع کامیون ها بر اساس زمان بارگیری بیل تنظیم شده است. وایت و اولسون (۱۹۹۲) مدل توسعه یافته ذکر شده توسط هادسون و بارکر (۱۹۸۵) را بهبود بخشیدند. برای این منظور، از برنامه ریزی پویا برای اختصاص کامیون ها به بیل ها استفاده کردند تا طول صف کامیون های منتظر و زمان بیکاری آنها را به حداقل برسانند. در تمامی این مطالعات از روش های ریاضی مانند تئوری صف استفاده شده است. تلاش های اندکی برای بهینه سازی بخشی از سیستم حمل و نقل انجام شده است. برای مثال، هوبند و همکاران (۲۰۰۶) الگوریتم های تکاملی را در یک مدل شبیه سازی برای افزایش درآمد کل در طول دوره عمر پروژه معدن به کار برده اند. فنگ و وو (۲۰۰۶) از الگوریتم ژنتیک و

تکنیک شبیه سازی CYCLONE برای یافتن برنامه توزیع بهینه استفاده کردند. فیورونی و همکاران (۲۰۰۸) از فرآیندهای شبیه سازی و بهینه سازی همزمان برای دستیابی به یک راه حل عملی و قابل اعتماد برای یک برنامه معدنی کوتاه مدت استفاده کرده اند. کینگ و همکاران (۲۰۰۸) الگوریتمی را برای بهبود بهره وری نیروی کار و راندمان برنامه ریزی تولید در سیستم کامیون/بیل پیشنهاد کرده اند. ارچلی و باشتین (۲۰۰۹) از نظریه شبکه صف بسته برای تخصیص کامیون ها به بیل استفاده کردند. سابتیل و همکاران (۲۰۱۱) الگوریتمی برای بهینه سازی سیستم حمل و نقل در معادن روباز پیشنهاد کرده اند. این الگوریتم یک روش چند مرحله‌ای با رویکرد چند معیاره است که از برنامه ریزی خطی، شبیه سازی گسسته پیشامد و اکتشافی خاص برای تخصیص استفاده می کند. منا و همکاران (۲۰۱۳) یک روش شبیه سازی-بهینه سازی را برای به حداکثر رساندن بهره وری کلی ناوگان با در نظر گرفتن جنبه های قابلیت اطمینان و نگهداری کامیون و بیل توسعه دادند. ابتدا یک مدل بهینه سازی یک معدن روباز واقعی ارائه کردند. سپس، از نرم افزار شبیه سازی Arena برای ارزیابی رفتار عملیات در سیستم واقعی استفاده کردند. واسکوئز (۲۰۱۴) بر روی بهینه سازی سیستم حمل و نقل تمرکز کرد. داده‌های اکتشاف حفاری از یک معدن واقع در ایالت آریزونا برای ساخت یک مدل بلوک و برای طراحی یک شبیه سازی روباز و مبتنی بر Arena برای تولید چرخه‌های عملیاتی که عملیات واقعی را نشان می دهند استفاده شده است. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه خود به تعیین مقدار بهینه تجهیزات جابه‌جایی در فرآیند استخراج سنگ سولفید با استفاده از رویکرد بهینه سازی مدل‌های شبیه سازی شبه‌مدل-محور پرداخته‌اند. در مرحله بهینه سازی، مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم پرازش شده که از راه شناسایی متغیرهای اثرگذار در سیستم با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تقریب زده شده است، حل می شود. شبه‌مدل تقریب زده شده به خوبی قادر است نتایج شبیه سازی را تخمین بزند، بنابراین می توان اعتبار آن را نتیجه گرفت. یافته‌های این رویکرد بهینه سازی مدل‌های شبیه سازی نتایج قابل قبولی را برای طراحی مجدد و کنترل فرایند استخراج به منظور افزایش بهره وری در اختیار مدیران مجتمع معدن مس سرچشمه قرار می دهد. نتایج به دست آمده از حل مدل پیشنهادی نشان می دهد که با استقرار ترکیب بهینه پیشنهادی می توان سطح میزان تولید در فرایند استخراج را حفظ کرد و علاوه بر آن ۸ درصد در هزینه‌های موجود کاهش ایجاد کرد. ناگشوارانیر و همکاران (۲۰۱۸)، یک چارچوب بهینه سازی سلسله مراتبی دو سطحی مبتنی بر شبیه سازی برای برنامه ریزی زمان در یک معدن زغال سنگ ارائه دادند. در سطح بالا، جریان مستقیم زغال سنگ از گودال به قطارها در نظر گرفته شده است و مسأله برنامه ریزی ماشین آلات در این مرحله حل شده است. در سطح پایین، با استفاده از OptQuest® یک مسأله بهینه سازی برای تعیین متغیرهای جابجایی مثل، قطارها، کامیون‌ها و نقاله‌ها حل شده است. براساس نتایج به دست آمده، زمان سفر و بارگذاری کامیون‌ها کاهش پیدا کرده است و نرخ استفاده از ماشین آلات بیشتر شده است. بوراک و کومرال (۲۰۱۹)، یک بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی برای سیستم کامیون-شاوول در معدن روباز ارائه دادند. هدف در این مطالعه، ماکزیمم سازی استفاده از سیستم کامیون-شاوول است. رویکرد ارائه شده قابلیت خوبی در افزایش بهره وری سیستم کامیون-شاوول دارد. براساس این رویکرد، جابجایی مواد در سیستم 6 K تن افزایش می یابد. یک نوع از بهینه سازی در حوزه معدن، روش سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه سازی است. عموماً این نوع از مسائل در دو سطح تقسیم می شوند. در سطح بالا، یک هدف اصلی و در سطح پایین تعداد متغیرهای اثرگذار برای دستیابی به هدف سطح بالا در نظر گرفته می شود. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)، یک

بهینه سازی دوفازی مبتنی بر شبیه سازی برای سیستم حمل و نقل در معدن روباز ارائه داده اند. بر طبق این مطالعه، در فاز اول یک مسأله فراابتکاری برای تعیین مقدار بهینه تولید با استفاده از OptQuest® حل شده است. در فاز دوم، مقدار بهینه تجهیزات جابجایی که مثل مقدار شاولها محاسبه شده است به طوری که با استقرار ترکیب بهینه منابع بتوان به هدف فاز اول دست یافت. نتایج نشان می دهد با استفاده از این روش ۲۱٪ در تولیدات افزایش ایجاد می شود. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۲) برای حل مسأله بهینه سازی چندهدفه استخراج یک نوع از سنگ های معدنی یک روش حل مسأله تکاملی ارائه دادند. آنها قابلیت بکارگیری الگوریتم پیشنهادی را در مواجهه با تعیین سطح استخراجات و مدت زمان جابجایی تجهیزات معدنی توانستند نشان دهند.

۲-۲) مطالعات بهینه سازی چندهدفه مدل های شبیه سازی

بهینه سازی چند هدفه یک حوزه تحقیقاتی جذاب در زمینه بهینه سازی به ویژه با استفاده از الگوریتم های تکاملی است (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، چند تلاش تحقیقاتی در زمینه بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر شبیه سازی در ادبیات وجود دارد. سایرفلد و همکاران (۲۰۱۰) روشی مبتنی بر یک الگوریتم تکاملی برای بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر شبیه سازی مسائل تولیدی پیشنهاد کردند. گروال و همکاران (۲۰۱۰) از بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی برای ارزیابی و مقایسه دو استراتژی پر کردن موجودی استفاده کردند. برای این منظور، یک مدل شبیه سازی گسسته پیشامد برای یک سناریوی زنجیره تامین توسعه داده شده است. لی و همکاران (۲۰۱۱) بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی را برای حل مسأله زمان بندی کارگاه جریان ترکیبی پیشنهاد کردند. مرکوریه و و ناپالکوا (۲۰۱۲)، روش بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی را در مدیریت زنجیره تامین ارائه کردند. آنها روش بهینه سازی دوفازی را بر اساس ترکیبی از برنامه ریزی سازشی، محاسبات تکاملی و روش های مبتنی بر سطح پاسخ توسعه دادند. سلیمی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از NSGA-II به عنوان روش بهینه سازی ادغام شده با شبیه سازی گسسته پیشامد برای مدل سازی فرآیندهای ساخت پل پیشنهاد کردند. سایرفلد و همکاران (۲۰۱۵) یک سیستم شبیه سازی-بهینه سازی چندهدفه تکاملی را برای برنامه ریزی پرسنل ارائه کردند. اخیراً نیز، جهانگیری و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود توانستند با استفاده از شبه مدل رگرسیون و بکارگیری بهینه سازی شبیه سازی مدت زمان انتظار بیماران مراجعه کننده به بخش اورژانس یک بیمارستان دولتی در ایران را در دوران پاندمی کاهش دهند. لیو و همکاران (۲۰۲۳) در این مطالعه یک مسأله زمان بندی کارگاه جریان ترکیبی را با در نظر گرفتن کارگران چند ماهه و عوامل خستگی مورد مطالعه قرار می دهد. یک سیستم شبیه سازی مبتنی بر عامل برای مقابله با عدم قطعیت ها در مدل خستگی کارگر ایجاد شده است. علاوه بر این، این مقاله یک چارچوب جدید بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی (SBO) را پیشنهاد می کند که از الگوریتم ژنتیک برای رسیدگی به مسأله زمان بندی فروشگاه جریان ترکیبی استفاده می کند. کین و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود یک مسأله برای برنامه ریزی کانتینرهای ورودی را در یک پایانه کانتینری خود کار را بررسی کرده اند. برای این منظور، یک مدل برنامه نویسی عدد صحیح را برای مشخص کردن مسئله و ارائه یک الگوریتم فراابتکاری برای حل آن پیشنهاد شده است. برای مقابله با عوامل تصادفی در فرآیند، یک مدل شبیه سازی در فرآیند ارزیابی برای برآورد تابع هدف تعبیه شده است. عزیز و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود با هدف داشتن شرایط عملیاتی بهینه

در سیستم توربین های گازی، یک مدل با استفاده از روش سطح پاسخ، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری چندهدفه و چهار روش مختلف تصمیم گیری پیشنهاد داده اند. پیرمارینی و روما (۲۰۲۴) در این مطالعه یک مدل جدید برای مطالعه اثربخشی استراتژی های انحراف آمبولانس، بر اساس رویکرد بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی معرفی کرده اند. برای این منظور، یک مسئله تخصیص بهینه منابع متشکل از یک مسئله بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی دوهدفه را فرموله و حل کرده اند که هدف آن به حداقل رساندن زمان بدون ارزش افزوده صرف شده توسط بیماران و هزینه کلی متحمل شده توسط شبکه است. همتی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از یک رویکرد شبه مدل محور و استفاده همزمان از طراحی آزمایش یک مدل رگرسیون برای میزان تولیدات جهت حصول بالانس خط تولید در مجتمع تولیدی پتروشیمی ارائه کردند. مدل پیشنهاد شده ضمن کنترل هزینه ها توانست در مقدار تولیدات بهبود ایجاد نماید.

با توجه به اهمیت بهینه سازی فرآیندهای استخراج سنگ های معدنی و تأثیر قابل توجه آن بر کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری، تحقیق در زمینه شبیه سازی چند هدفه سیستم مکانیکی بارگذاری بیل مکانیکی- کامیون به عنوان یک حوزه تحقیقاتی مهم و ضروری مطرح می شود. با این حال، در ادبیات موجود، شکاف های قابل توجهی در زمینه بهینه سازی این سیستم ها وجود دارد. اولاً، بسیاری از مطالعات پیشین به بررسی سیستم های بارگذاری به صورت تک هدفه پرداخته اند و به تأثیرات متقابل بین اهداف مختلف توجه کافی نکرده اند. این در حالی است که در عمل، تصمیم گیری در زمینه استخراج سنگ های معدنی معمولاً شامل تعادل بین چندین هدف متضاد است. ثانیاً، اکثر تحقیقات موجود به استفاده از مدل های شبیه سازی ساده و غیر قابل انعطاف محدود شده اند که نمی توانند به طور مؤثر پیچیدگی های واقعی عملیات استخراج را شبیه سازی کنند. این موضوع منجر به عدم دقت در پیش بینی عملکرد سیستم و بهینه سازی آن می شود. ثالثاً، در بسیاری از مطالعات، به تأثیر عوامل محیطی و شرایط واقعی کارگاه بر عملکرد سیستم بارگذاری توجه نشده است. این عوامل می توانند شامل تغییرات در نوع سنگ، شرایط جوی و ویژگی های زمین شناسی باشند که تأثیر زیادی بر کارایی سیستم دارند. در نهایت، نیاز به توسعه و پیاده سازی الگوریتم های بهینه سازی پیشرفته بر اساس الگوریتم های فرابتکاری برای بهبود فرآیند شبیه سازی و تصمیم گیری در این حوزه احساس می شود. این شکاف های تحقیقاتی نشان دهنده فرصت های بالقوه برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه سازی شبیه سازی چند هدفه سیستم بارگذاری بیل مکانیکی- کامیون برای استخراج سنگ های معدنی است.

۳) روش تحقیق

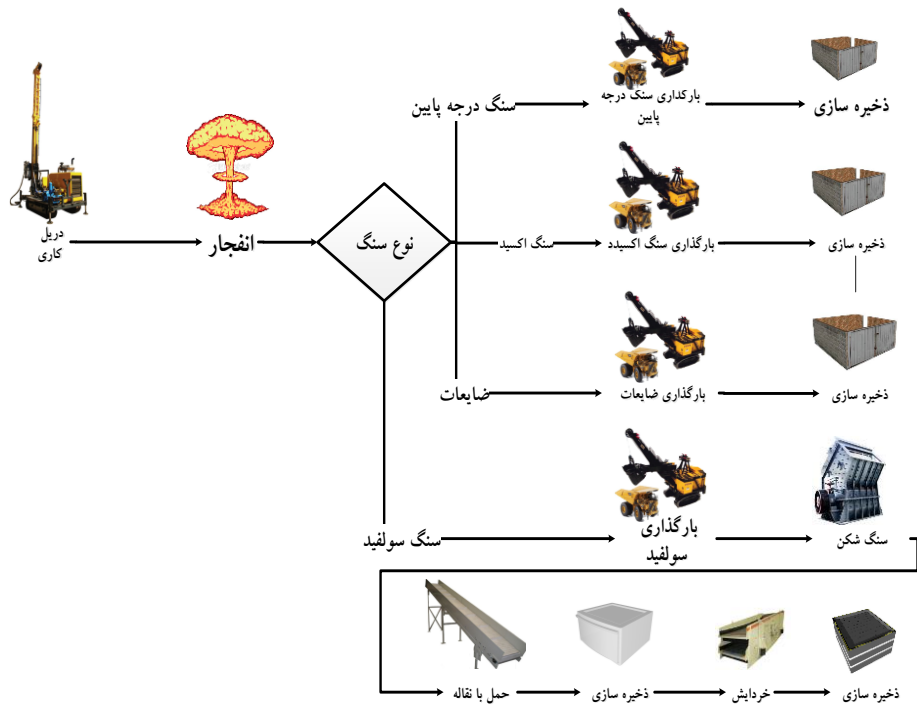
۳-۱) تشریح سیستم

مجتمع مس سرچشمه در استان کرمان در جنوب شرقی ایران واقع شده است. سرچشمه دارای یک معدن بزرگ روباز است که دومین معدن بزرگ مس جهان محسوب می شود. این معدن 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 آن حدود ۳۰۰۰ متر ارتفاع دارد. در این معدن، مطالعه زمین و حفر کانال های زیرزمینی بخش اولیه فرآیند استخراج سنگ را شامل می شود، که جمع آوری داده، تجزیه و تحلیل، بروزرسانی اطلاعات از حفاری تا استخراج مراحل اصلی آن محسوب

می شوند. نتایج حاصل از پردازش داده ها در اختیار بخش مهندسی به منظور توسعه 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 (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۰). در حالت کلی مواد استخراج شده در این معدن را در ۴ گروه طبقه بندی می کنیم، که عبارت اند از:

- ۱) سنگ معدن سولفید: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بیشتر از ۰.۷ درصد است.
 - ۲) سنگ معدن اکسید: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بین ۰.۲۵ درصد و ۰.۷ درصد است.
 - ۳) سنگ درجه پایین: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن بین ۰.۱۵ درصد و ۰.۲۵ درصد است.
 - ۴) ضایعات: سنگ معدن استخراجی است که درجه مس در آن کمتر از ۰.۱۵ درصد است.
- نسبت مقدار استخراج انواع مختلف سنگ ها در این معدن به ترتیب ۴۵ درصد، ۵ درصد، ۴۴ درصد و ۶ درصد است. بر اساس انواع مختلف سنگ معدن، یک استراتژی جابجایی و ذخیره سازی برای سنگ معدن استخراجی انتخاب می شود. اولین نوع ماده معدنی، سنگ معدن سولفید است که ابتدا پس از بارگیری به یک ایستگاه سنگ شکن منتقل می شود. در این معدن روباز یک ایستگاه سنگ شکن با ظرفیت ۶۰۰۰۰ تن در هر روز وجود دارد. پس از آن ماده به یک سیلو ذخیره سازی مس با ظرفیت ۱۵۰۰۰۰ تن انتقال می یابد که پس از گذراندن مرحله خردایش سنگ معدن مس نرم در این انبار ذخیره می گردد. سنگ های معدن اکسید، درجه پایین و ضایعات هر کدام به ایستگاه ذخیره سازی دامپینگ خود منتقل می شوند. مدل مفهومی سیستم جابجایی مواد و تجهیزات در معدن مس سرچشمه در شکل ۱ و همچنین هزینه عملیاتی بکارگیری هر ساعت کامیون و شاول نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. مدیریت برای ماکزیمم کردن میزان تولیدات و درآمد حاصل از معدن مفروضاتی را در نظر گرفته است که عبارت اند از:

- کلیه مسیرها در سیستم حمل و نقل به عنوان مسیر دو طرفه در نظر گرفته شده اند.
- هر بیل می تواند تنها به یک کامیون در یک زمان خدمت کند.
- نظم صف برای بیل و کامیون FIFO است.
- همه کامیون ها در محل بارگیری نزدیک محل بیل ها شروع به کار می کنند.
- سیستم حمل و نقل موجود در مجتمع مس سرچشمه غیر دیسپاچینگ می باشد به این معنی که هر کامیون تنها وظیفه حمل یک نوع سنگ معدنی را بر عهده دارد و امکان تغییر مسیر آن وجود ندارد.
- زمان نگهداری پیشگیرانه برای همه کامیون ها و بیل ها یکسان است.
- هیچ زمان بیکاری سیستم بین شیفت های کاری وجود ندارد.
- با توجه به اینکه تعداد مسیرهای بین تخلیه بارگیری و تخلیه بار متغیر است، میانگین فواصل به عنوان فاصله در نظر گرفته می شود.



شکل ۱. مدل مفهومی سیستم جابجایی مواد در مجتمع معدنی مس سرچشمه

جدول ۱. مشخصات ادوات لازم برای تجهیز کامیون به منظور جابجایی

نوع وسیله	U_i	L_i	تعداد موجود	هزینه ساعتی بکارگیری (\$)
کامیون ۱	۱۱	۹	۱۰	۴۵
کامیون ۲	۹	۷	۸	۶۹
کامیون ۳	۸	۱۱	۱۰	۶۷
کامیون ۴	۸	۱۱	۱۰	۱۱۸
شاول ۱	۹	۷	۶	۹۳
شاول ۲	۲	۱	۱	۱۲۶
شاول ۳	۲	۵	۴	۱۶۵
شاول ۴	۲	۵	۴	۲۲۵

جدول ۲. توزیع‌های آماری لازم برای توسعه مدل شبیه سازی

توزیع	داده
EXPO (2.5)	فاصله بین بارگذاری سنگ سولفید و ایستگاه خردکننده (کیلومتر)
UNIFORM(2.41,4)	فاصله بین بارگذاری سنگ اکسید و ایستگاه دامپینگ (کیلومتر)
EXPO(3.1)	فاصله بین بارگذاری سنگ درجه پایین و ایستگاه دامپینگ (کیلومتر)
UNIFORM(3.44,4.21)	فاصله بین بارگذاری ضایعات و ایستگاه دامپینگ (کیلومتر)
2.4+1.2*BETA(1.69,1.79)	زمان بارگذاری کامیون (دقیقه)
34+10*BETA(1.23,1.02)	سرعت کامیون خالی از محموله (کیلومتر/ساعت)
12+11*BETA(1.01,0.863)	سرعت کامیون حامل محموله (کیلومتر/ساعت)
125	زمان تعمیرات و نگهداری برای کامیون‌ها و بیل‌های مکانیکی (ساعت کاری)

۲-۳) مدل شبیه سازی

در این مقاله کاربرد رویکرد مدل سازی شبیه سازی با استفاده از نرم افزار Arena برای مدل سازی سیستم تجهیزات حمل و نقل در معدن مس سرچشمه که توسط اسکندری و همکاران ۲۰۱۳ تشریح شده در نظر گرفته شده است. جریان شبیه سازی شده فرآیندهای اکتشاف تا بهره برداری از فرآورده های معدنی شامل چندین مرحله کلیدی است که هر یک به نوبه خود نقش مهمی در موفقیت کلی پروژه های معدنی ایفا می کنند. این مراحل به شرح زیر هستند:

۱-۲-۳) مرحله اول: اکتشاف

این مرحله شامل مراحل ذیل می باشد:

- **تحقیقات زمین شناسی:** در این مرحله، اطلاعات زمین شناسی جمع آوری می شود تا مناطق مستعد برای اکتشاف شناسایی شوند. این شامل مطالعه نقشه های زمین شناسی، نمونه برداری و آنالیز مواد معدنی است.
- **حفر چاه های اکتشافی:** برای تعیین عمق و غنای مواد معدنی، چاه های اکتشافی حفر می شوند. این اطلاعات به ارزیابی ذخایر معدنی کمک می کند.

۲-۲-۳) مرحله دوم: ارزیابی

این مرحله شامل مراحل ذیل می باشد:

- **تحلیل داده ها:** داده های جمع آوری شده از مرحله اکتشاف تحلیل می شوند تا کیفیت و مقدار ذخایر معدنی مشخص شود.

۳-۲-۳) مرحله سوم: طراحی و برنامه ریزی

این مرحله شامل مراحل ذیل می باشد:

- **طراحی معدن:** طراحی معدن شامل تعیین روش های استخراج، طراحی سیستم های بارگذاری و حمل و نقل و برنامه ریزی برای مدیریت مواد زائد است.
- **برنامه ریزی زمان بندی:** زمان بندی دقیق برای مراحل مختلف استخراج و بهره برداری ایجاد می شود تا کارایی و بهره وری به حداکثر برسد.

۴-۲-۳) مرحله چهارم استخراج

این مرحله شامل مراحل ذیل می باشد:

- **استخراج مواد معدنی:** در این مرحله، مواد معدنی با استفاده از روش های مختلف استخراج (مانند استخراج سطحی یا زیرزمینی) به دست می آید.
- **بارگذاری و حمل و نقل:** مواد معدنی استخراج شده به محل فرآوری یا انبار منتقل می شوند. این مرحله شامل استفاده از تجهیزات مانند بیل مکانیکی و کامیون است.

این جریان شبیه‌سازی شده به مدیران و تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که فرآیندهای مختلف را به صورت یکپارچه مشاهده و تحلیل کنند و با شناسایی نقاط ضعف و فرصت‌ها، به بهینه‌سازی عملکرد پروژه‌های معدنی بپردازند. در مدل توسعه داده شده به ازای تمامی موارد هیچ اختلاف غیرقابل قبول بین نتایج در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود ندارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که مدل بدرستی ساخته شده است. برای اجرای مدل ابتدا نیاز است تا پارامترهای شبیه‌سازی مثل طول و تعداد دفعات تکرار را تعیین نماییم. برنامه کاری سیستم حمل و نقل در معدن مس سرچشمه ۲۴ روز در یک ماه است. بنابراین طول هر تکرار ۱ ماه در نظر گرفته شده است. تعداد تکرارها با در نظر گرفتن مقدار half width بهره‌برداری از کامیون‌ها به عنوان مقدار اصلی اندازه‌گیری عملکرد سیستم تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تعداد تکرارها ۱۰ باید در نظر گرفته شود. برای حصول پایداری در سیستم یک دوره warm-up در نظر گرفته می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهند که بعد از چهار روز دوره warm-up عملکرد سیستم وضعیت پایدار را نشان می‌دهد. توزیع‌های آماری که در جدول ۲ برای تعداد کامیون‌ها نشان داده شده است به وسیله Arena Input Analyzer تخمین زده شده است. توزیع‌ها با بیش‌ترین نیکویی برازش انتخاب شده‌اند. تنظیمات اشاره شده در مدل لحاظ شده و در کامپیوتر شخصی با مشخصات CPU intel core i3 و RAM 4GB اجرا شده است.

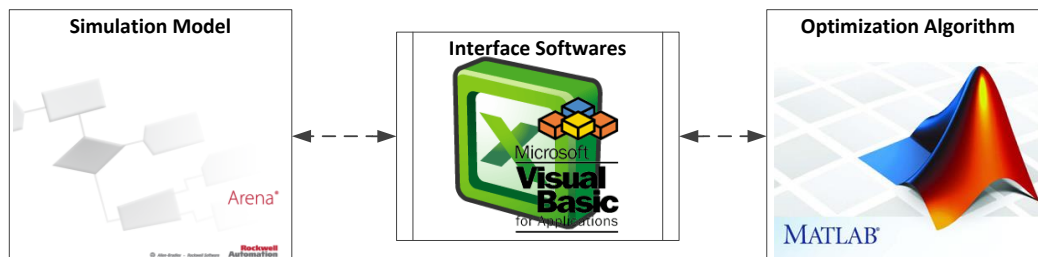
۳-۳) روش بهینه‌سازی فراابتکاری مدل‌های شبیه‌سازی پیشنهادی

برای حل مسئله تصادفی از دو الگوریتم چندهدفه معروف، NSGA-II و FastPGA استفاده شده است. این دو روش با مدل شبیه‌سازی ادغام شده‌اند تا بهترین مقدار متغیرهای تصمیم را پیدا کنند.

الگوریتم NSGA-II توسط دب و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. این روش نوعی الگوریتم فراابتکاری است که از روش‌های متنوعی برای جلوگیری از همگرایی محلی استفاده می‌کند. در این الگوریتم ابتدا مجموعه‌ای از راه‌حل‌های ممکن به نام جمعیت تولید می‌شود. جمعیت راه‌حل‌ها از طریق استفاده از دو نوع عملگر ژنتیکی تقاطع و جهش از نسلی به نسل دیگر تکامل می‌یابد. عملگرهای ژنتیکی برای تولید فرزندان جدید اعمال می‌شوند. سپس جمعیت جدید از بین افراد جمعیت فعلی و فرزندان جدید تولید شده انتخاب می‌شوند. رتبه‌بندی و فاصله جمعی دو معیار برای انتخاب بهترین نفرات در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم ابتدا راه‌حل‌های مختلف را در جبهه‌های غیر تحت سلطه رتبه‌بندی می‌کند و سپس تنها افرادی را که حداقل فاصله را بین یکدیگر دارند به منظور حفظ تنوع در جلو نگه می‌دارد. این روند تا زمان برآورده شدن معیارهای توقف ادامه دارد (ابوالقاسمیان و همکاران، ۲۰۲۴).

الگوریتم FastPGA توسط اسکندری و گایگر (۲۰۰۷) معرفی شده است. FastPGA از الگوریتم ژنتیک با استراتژی رتبه‌بندی راه‌حل جدید استفاده می‌کند. همچنین، یک عملگر تنظیم جدید در آن معرفی شده است تا به صورت پویا اندازه جمعیت الگوریتم ژنتیک را تا حداکثر اندازه جمعیت مشخص شده توسط کاربر تطبیق دهد. استراتژی رتبه‌بندی جدید مبتنی بر طبقه‌بندی راه‌حل‌های نامزد به دو دسته (رتبه) متفاوت بر اساس تسلط راه‌حل است. در مرحله اول، همه راه‌حل‌های غیر غالب به عنوان رتبه اول شناسایی می‌شوند. در مرحله دوم، همه راه‌حل‌های غالب به عنوان رتبه دوم شناسایی می‌شوند. برازش راه‌حل‌های غیر غالب در رتبه اول با مقایسه هر راه‌حل غیر غالب با سایر راه‌حل‌ها و تخصیص مقدار

برازش شده محاسبه می شود. این مقادیر با استفاده از رویکرد فاصله ازدحام محاسبه می شوند. ارزش تناسب هر راه حل غالب برابر است با مجموع مقادیر همه راه حل ها منهای مجموع مقادیر همه راه حل هایی که بر آن غالب است. بهینه سازی شبیه سازی معدن مس سرچشمه از دو ماژول نسبی ماژول بهینه سازی و ماژول شبیه سازی تشکیل شده است. از آنجایی که تعداد تجهیزات باید بهینه شود، تنظیم ورودی ها مانند پارامترهای اولیه و جمعیت در ماژول بهینه سازی انجام می شود. سپس ماژول بهینه سازی متغیر ورودی را با انتقال داده به ماژول شبیه سازی منتقل می کند. ماژول شبیه سازی پارامترهای اولیه و متغیرهای ورودی را اعمال کرده و شبیه سازی را اجرا می کند. نتایج شبیه سازی به ماژول بهینه سازی بازگردانده می شود. الگوریتم بهینه سازی جستجویی را برای یافتن راه حل های بهینه انجام می دهد و جمعیت جدیدی را بر اساس نتایج به دست آمده توسط ماژول شبیه سازی ایجاد می کند. این روند تا زمان برآورده شدن معیارهای توقف ادامه دارد. شکل ۲ چارچوب نرم افزار مورد استفاده در شبیه سازی-بهینه سازی نشان داده شده است. به منظور پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی، از نرم افزار متلب استفاده شده است. ماژول شبیه سازی برای ارزیابی راه حل های به دست آمده توسط ماژول بهینه سازی استفاده می شود. ARENA برای توسعه مدل شبیه سازی استفاده می شود. به منظور ادغام ماژول شبیه سازی و ماژول بهینه سازی، یک محیط یکپارچه مورد نیاز است. مایکروسافت اکسل و مایکروسافت ویژوال بیسیک به ترتیب به عنوان رابط نرم افزار بهینه سازی و نرم افزار شبیه سازی اعمال می شوند.



شکل ۲- ساختار نرم افزاری مدل بهینه سازی شبیه سازی

استفاده از روش بهینه سازی چندهدفه برای تجزیه و تحلیل سیستم بارگذاری بیل مکانیکی- کامیون به دلایل زیر اهمیت دارد:

- در سیستم بارگذاری، اهداف مختلفی مانند کاهش هزینه ها، افزایش تولید، بهبود کیفیت و کاهش زمان تأخیر وجود دارد. بهینه سازی چندهدفه این امکان را فراهم می کند که تمامی این اهداف به طور همزمان مورد توجه قرار گیرند.
- در بسیاری از موارد، اهداف مختلف ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند. به عنوان مثال، افزایش تولید ممکن است به افزایش هزینه ها منجر شود. روش های چندهدفه به تحلیل این تعارضات و یافتن تعادل مناسب کمک می کنند.
- با استفاده از بهینه سازی چندهدفه، مدیران می توانند گزینه های مختلف را با توجه به اهداف متعدد ارزیابی کنند. این امر به تصمیم گیری بهتر و انتخاب راه حل های بهینه تر کمک می کند.
- سیستم های بارگذاری معمولاً پیچیده و متغیر هستند. بهینه سازی چندهدفه به مدل سازی دقیق تر این پیچیدگی ها کمک کرده و نتایج بهتری را ارائه می دهد.

- با بهینه‌سازی همزمان چندین هدف، می‌توان به افزایش کارایی کلی سیستم بارگذاری دست یافت. این امر به بهبود عملکرد تجهیزات و کاهش زمان‌های غیرضروری منجر می‌شود.

(۴) یافته‌ها

در این بخش، نتایج محاسباتی FastPGA و NSGA-II ارائه شده است. برای هر دو روش FastPGA و NSGA-II، ارائه شده است. پیش از اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری پارامترهای تأثیرگذار آنها از طریق طراحی آزمایش تعیین شده اند. در این بخش از تحقیق به تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری با استفاده از طرح آزمایش L9 تاگوجی پرداخته شده است. برای استفاده از این روش، ابتدا برای پارامترهای الگوریتم ۳ سطح مختلف (کم با کد ۱، متوسط با کد ۲ و زیاد با کد ۳) تعریف می‌کنیم. سپس آزمایش‌های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می‌شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای این الگوریتم مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم‌های فراابتکاری

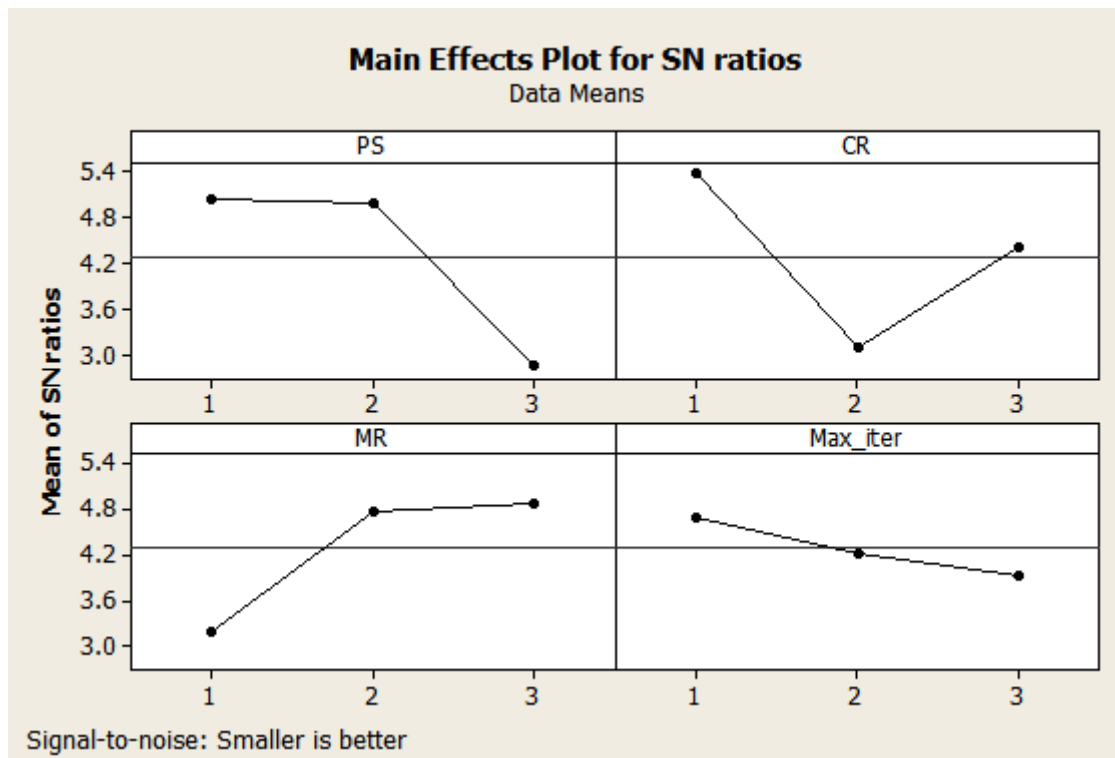
مقادیر هر سطح			پارامتر
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۵۰	۴۵	۴۰	اندازه جمعیت (PS)
۱	۰.۹	۰.۸	نرخ تقاطع (CR)
۰.۲	۰.۱۵	۰.۱۲	نرخ جهش (MR)
۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰	تعداد دفعات تکرار (MAX_ITER)

سپس با طرح L9 تاگوجی آزمایشات مختلف را ایجاد و برای هر کدام اجرا شده است. نتایج اجرا برای محاسبه شاخص MID در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول کلیه حالات ممکن به ازای سطوح مختلفی که برای فاکتورهای الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته شده است، نشان داده شده است. برای مثال در آزمایش اول، کلیه فاکتورهای به ازای کم‌ترین سطح خود در آزمایش حضور دارند. در آزمایش دوم، فاکتور PS با مقدار کم‌ترین سطح و سایر فاکتورها با مقدار سطح متوسط مربوط به خود حضور دارند. به همین ترتیب سایر حالت ممکن براساس قاعده جایگشت در آمار تکمیل می‌شود. با اجرای هر آزمایش و محاسبه مقدار شاخص MID سطح پاسخ مورد نظر با استفاده از این شاخص برآورد می‌شود.

جدول ۴. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوجی برای الگوریتم‌های فراابتکاری

شماره اجرا	پارامترهای الگوریتم				شاخص MID
	PS	CR	MR	Max_iter	
1	۱	۱	۱	۱	۰.۵۳۴
2	۱	۲	۲	۲	۰.۶۱۲
3	۱	۳	۳	۳	۰.۵۳۷
4	۲	۱	۲	۳	۰.۴۹۱
5	۲	۲	۳	۱	۰.۵۷۶
6	۲	۳	۱	۲	۰.۶۳۷
7	۳	۱	۳	۲	۰.۵۹۹
8	۳	۲	۱	۳	۰.۹۷۳
9	۳	۳	۲	۱	۰.۶۴۲

حال با ارائه این خروجی ها به نرم افزار MINITAB نمودار S/N به صورت شکل ۳ ارائه می شود. براساس مقدار محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز به ازای کلیه سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از فاکتورها، هر چه این مقدار برای سطح مورد نظر کم تر باشد، مقدار آن سطح برای آن فاکتور انتخاب می شود. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کم ترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS در زمانی اتفاق می افتد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد. بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم فراابتکاری در نظر می گیریم برابر با ۵۰ خواهد بود. همچنین، کم ترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای شاخص CR مربوط به سطح متوسط با کد ۲ این فاکتور است. بنابراین، فاکتور CR با مقدار ۰.۹ در الگوریتم حضور خواهد داشت. علاوه بر این، کم ترین مقدار برای فاکتور MR مربوط به زمانی است که این فاکتور در سطح پایین خود با کد ۱ قرار دارد، می باشد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۰.۱۲ حضور خواهد داشت. سرانجام، فاکتور Max_iter کم ترین مقدار نسبت به نویز را وقتی دارد که در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار داشته باشد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۱۲۰ حضور خواهد داشت.



شکل ۳- خروجی MINITAB برای روش تاگوجی در الگوریتم های فراابتکاری

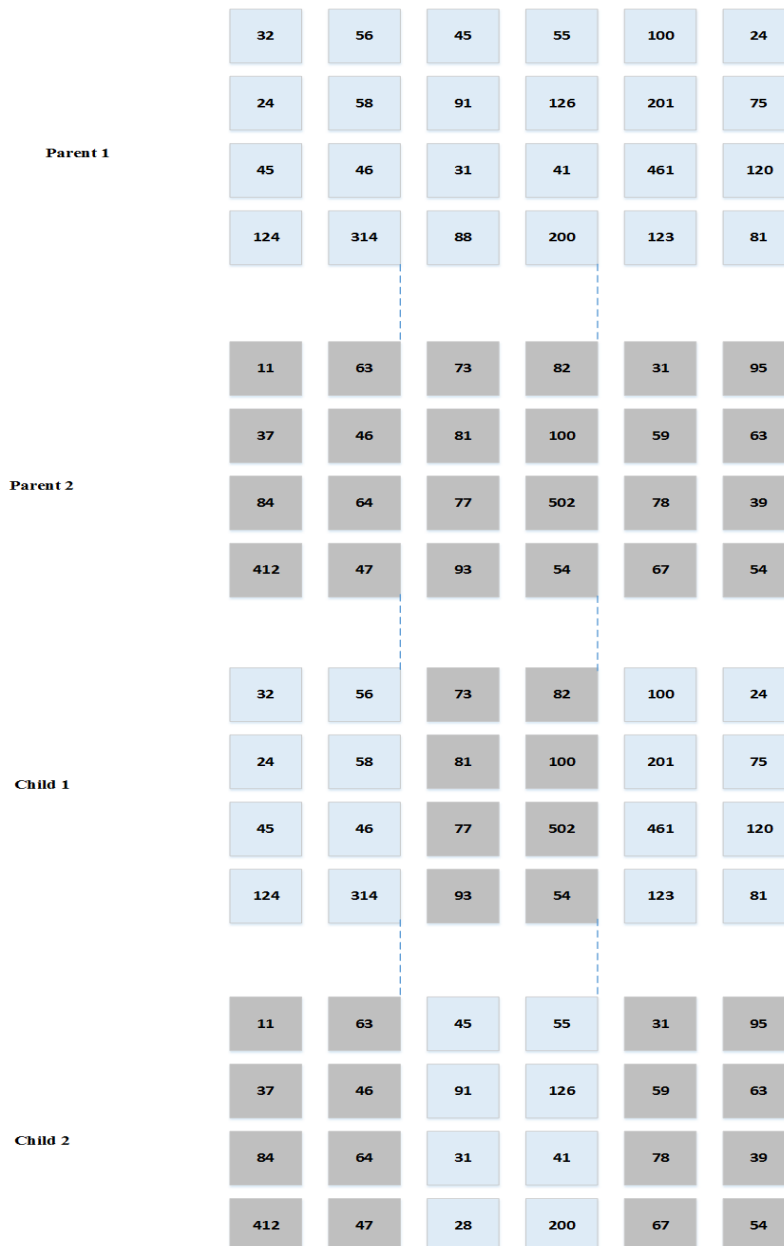
حال براساس خروجی ارائه شده در نمودار فوق بهترین مقدار هر پارامتر در جدول ۵ مشخص شده است و سایر مثال ها با این مقادیر پارامترهای الگوریتم، اجرا می شود. در این جدول مقدار بهینه پارامترها نیز ارائه شده است.

جدول ۵- مقدار بهینه متغیرها در الگوریتم های فراابتکاری

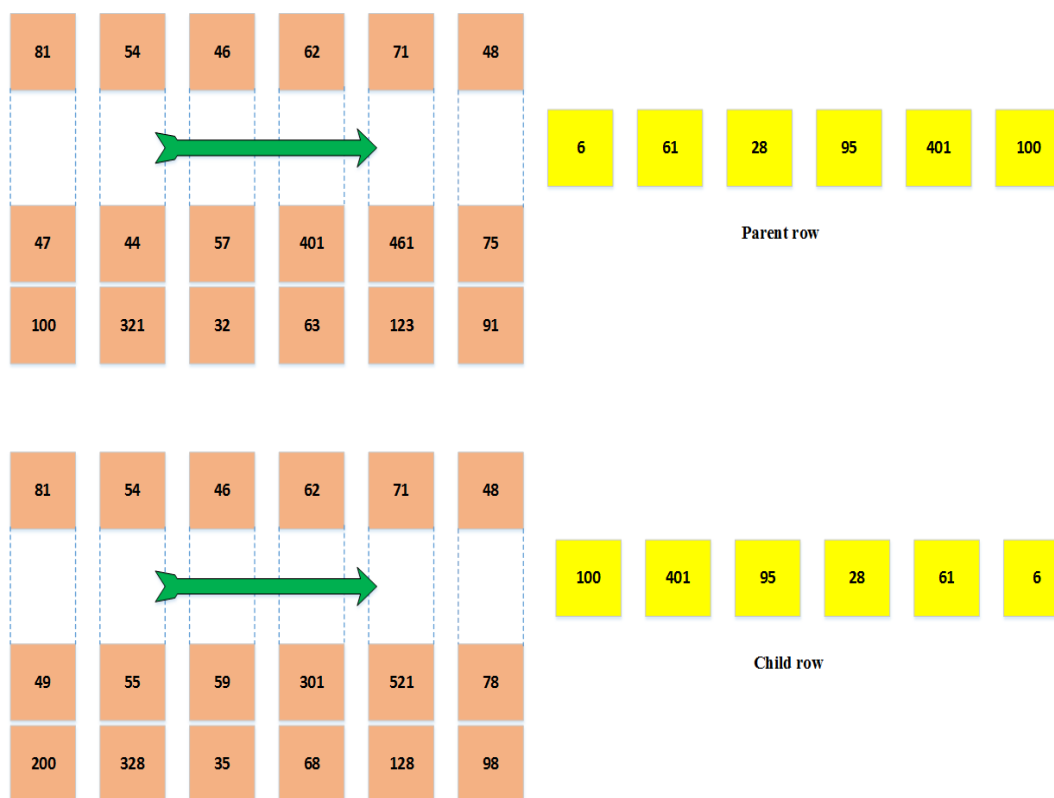
مقدار بهینه	پارامتر
۲۰۰	اندازه جمعیت (PS)
۰.۷	نرخ تقاطع (CR)

۰.۲	نرخ جهش (MR)
۲۰۰	تعداد دفعات تکرار (MAX_ITR)

علاوه بر این در شکل‌های ۴ و ۵ تنظیمات مربوط به تقاطع و جهش نشان داده شده است. در شکل ۴ تقاطع نقاط در الگوریتم‌های فراابتکاری نشان داده شده است. سازوکار این عملگر به این صورت است که دو نقطه به طور تصادفی در کروموزوم انتخاب می‌شوند و در رشته‌های هر کروموزوم جابه‌جا می‌شوند. در شکل ۵ نحوه جهش در الگوریتم فراابتکاری برای این تحقیق نشان داده شده است. این عملگر نشان می‌دهد که دو نقطه به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و هر رشته در این ردیف معکوس می‌شود.



شکل ۴- تنظیمات مربوط به عملگر تقاطع در الگوریتم‌های فراابتکاری



شکل ۵- تنظیمات مربوط به عملگر جهش در الگوریتم های فراابتکاری

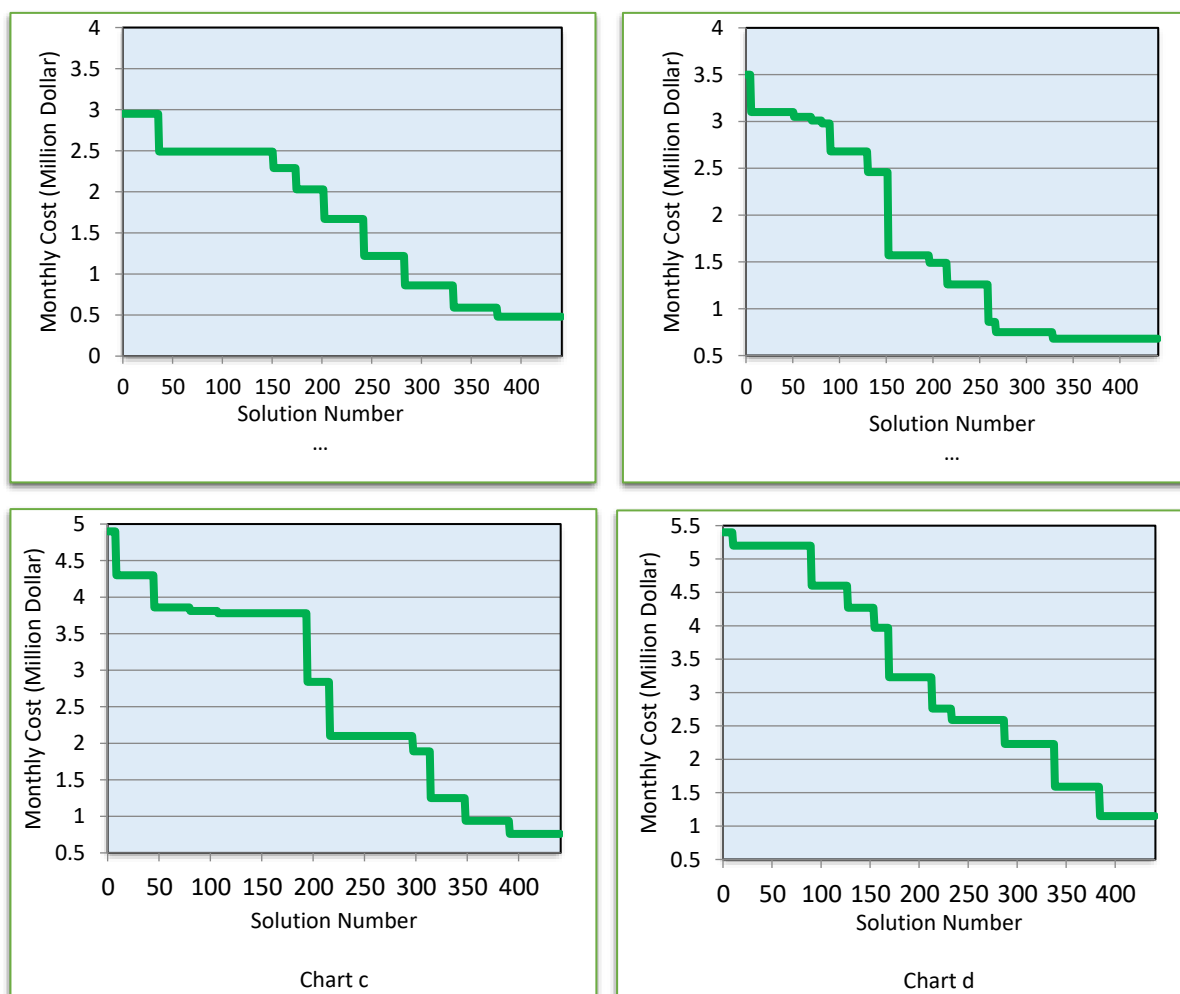
سرانجام، تمام پارامترها در جدول ۶ خلاصه شده است. به این ترتیب، تعداد راه حل های ارزیابی شده در هر اجرای دو الگوریتم برابر است.

جدول ۶- پارامترهای تنظیم شده الگوریتم های فراابتکاری

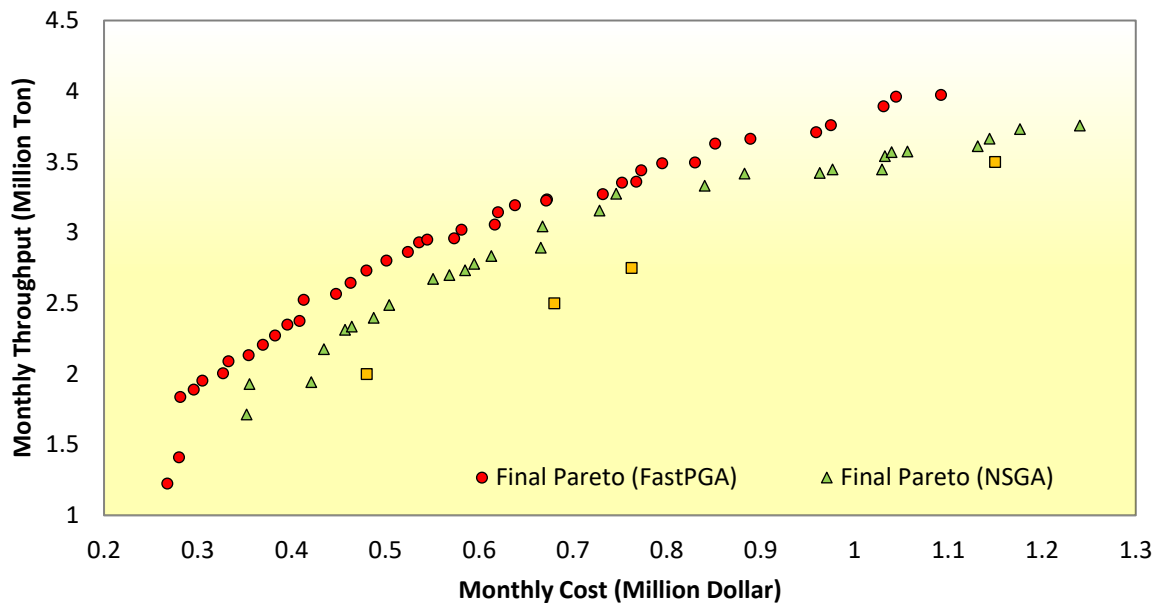
FastPGA	NSGA-II	پارامتر الگوریتم
-	۴۰	اندازه جمعیت
۴۰	-	اندازه جمعیت اولیه
۴۰	-	ماکزیمم اندازه جمعیت
۱۰	۴۰	تعداد راه حل های مورد ارزیابی در هر مرحله
۰.۱		نرخ تقاطع
۰.۱		نرخ جهش
Simulation binary crossover		نوع تقاطع
Polynomial mutation		نوع جهش
Binary tournament		حالت انتخاب

ما همچنین از بسته OptQuest موجود در نرم افزار Arena برای یافتن راه حل تقریباً بهینه استفاده کردیم. از آنجایی که OptQuest برای مسائل تک هدفه طراحی شده است، ما روش محدودیت را برای حل این مسئله چند هدفه در نظر گرفتیم. میانگین هزینه ماهانه به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می شود و میانگین توان عملیاتی ماهانه به عنوان محدودیت مسئله

بهینه سازی استفاده می شود. پارامتر خروجی ماهانه در سطوح مختلف تنظیم شده و برای هر سطح، بهینه ساز OptQuest اجرا می شود. تعداد راه حل های ارزیابی شده توسط بهینه ساز OptQuest برابر با الگوریتم های پیشنهادی است. شکل ۶ نتایج OptQuest را برای چهار سطح محدودیت توان، (a) دو میلیون تن، (b) دو و نیم میلیون تن، (c) سه میلیون تن و (d) سه و نیم میلیون تن در ماه نشان می دهد. شکل ۴ مقایسه منحنی های trade off (بده بستان) عملکرد به دست آمده از روش های پیشنهادی و راه حل های نزدیک به بهینه یافت شده توسط OptQuest را برای سطوح مختلف میانگین توان ماهانه نشان می دهد. مشاهده می شود که تفاوت قابل توجهی بین عملکرد FastPGA، NSGA-II و OptQuest برای این برنامه واقعی وجود دارد که طی آن هر ارزیابی راه حل از نظر محاسباتی گران است. میانگین زمان محاسباتی برای الگوریتم های پیشنهادی و OptQuest به ترتیب تقریباً ۲۵ ساعت و ۱۸ ساعت است. مجموعه راه حل های تقریباً بهینه یافت شده توسط OptQuest تحت سلطه راه حل های پارتو هستند که توسط هر دو الگوریتم پیشنهادی یافت شده است. همانطور که نشان داده شده است، FastPGA بهتر از NSGA-II عمل می کند و تمام راه حل های پارتو به دست آمده توسط NSGA-II در پایان جستجو تحت سلطه راه حل های پارتو FastPGA هستند.



شکل ۶- نتایج بهینه سازی به دست آمده از بسته OptQuest برای چهار سطح مختلف توان عملیاتی ماهانه



شکل ۷- مقایسه بین نتایج FastPGA، NSGA-II و OptQuest

با توجه به راه حل های نهایی، دریافتیم که در صورت اعمال نتایج بهینه، هزینه ماهانه تقریباً ۱۰ درصد کاهش می یابد و تولید ماهانه حدود ۱۱ درصد افزایش می یابد.

با توجه به اینکه در این تحقیق با دو هدف توان عملیاتی و هزینه ها سروکار داریم، در این بخش به حل مدل با استفاده از روش مجموع وزندار شده پرداخته شده است. ابتدا ضرایب وزنی (اهمیت) توابع هدف را تغییر می دهیم. برای این منظور، مطابق با جدول ۷، مقادیر مختلفی را برای اوزان w_1 و w_2 در نظر می گیریم. با توجه به نتایج بدست آمده در حالتی که وزن اختصاص یافته برای تابع هدف اول برابر با $w_1 = 0.4$ و وزن مربوط به تابع هدف دوم برابر با $w_2 = 0.6$ در نظر گرفته می شود کمترین مقدار تابع مجموع وزندار شده محاسبه می شود. علاوه بر این، در صورتی که اهمیت دو تابع با یکدیگر یکسان و برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شود بیشترین مقدار مجموع وزندار شده بدست می آید.

جدول ۷- اثر تغییرات اهمیت توابع هدف بر مقدار مجموع وزندار شده

ردیف	w_1	w_2	مقدار تابع هدف
۱	۰.۱	۰.۹	-۱۵۹.۹۶۰
۲	۰.۲	۰.۸	-۱۷۹.۶۹۱
۳	۰.۳	۰.۷	-۱۶۰.۱۴۱
۴	۰.۴	۰.۶	-۲۰۰.۵۶۹
۵	۰.۵	۰.۵	-۱۰۸.۵۷۰
۶	۰.۶	۰.۴	-۱۲۸.۱۵۲
۷	۰.۷	۰.۳	-۱۳۴.۹۵۴
۸	۰.۸	۰.۲	-۱۴۸.۳۶۹
۹	۰.۹	۰.۱	-۱۶۱.۲۴۷

۴-۱) تحلیل حساسیت

در این بخش، تأثیر تغییرات پارامترهای مدل بر مقدار بهینه توابع هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، تغییراتی در فاکتورهای کلیدی مانند تعداد بیل و کامیون ایجاد شده و تأثیر این تغییرات بر مقدار تابع هدف و توان عملیاتی ماهانه تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اگر مقدار متغیرها نسبت به وضعیت کنونی افزایش یابد، هزینه‌ها افزایش یافته و تولید نیز افزایش می‌یابد. با این حال، تولید در مقایسه با وضعیت بهینه که برابر با ۳۸۸ محاسبه شده، تغییر قابل توجهی نداشته و به ۳۹۹ رسیده است. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش متغیرها با توجه به افزایش هزینه‌ها و تغییر ناچیز در تولید، منطقی نیست. از سوی دیگر، اگر مقدار متغیرها کاهش یابد، هر چند هزینه‌ها کاهش می‌یابند، اما افت شدید در مقدار تولید مشاهده می‌شود. نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- تغییرات بر روی مقدار فاکتورها

مقدار تولید	مقدار هزینه	مقدار فاکتور		وضعیت
		بیل مکانیکی	کامیون	
۱۹۰	۶۵.۹۰۲	۱	۱	جاری
۳۹۹	۱۲۵.۶۵۸	۳	۳	افزایش یافته
۸۰	۳۲.۴۵۲	۰	۱	کاهش یافته
۷۵	۳۱.۲۵۹	۱	۰	

۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مقاله یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی یک سیستم حمل‌ونقل در معدن مس سرچشمه ایران را بررسی می‌کند. هدف اصلی این تحقیق تعیین تعداد بهینه تجهیزات سیستم حمل و نقل به منظور به حداکثر رساندن تولید ماهیانه مواد معدنی و به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد. برای این منظور، مفهوم بهینه‌سازی پارتو چند هدفه در روش‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده است. همچنین، شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار مفید برای بهینه‌سازی رفتار سیستم و مقابله با پارامترهای تصادفی در دنیای واقعی استفاده شده است. الگوریتم‌های FastPGA و NSGA-II برای حل مسأله پیچیده این تحقیق با مدل شبیه‌سازی متناسب سازی شده‌اند. در این رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، ابتدا با بهینه‌سازی الگوریتم، فرآیند یافتن بهترین راه‌حل برای مسئله انجام شده است و سپس عملکرد سیستم با خروجی مدل شبیه‌سازی ارزیابی می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که FastPGA راه‌حل‌های بهتری نسبت به NSGA-II ارائه می‌دهد و عملکرد سیستم فعلی بهبود می‌یابد. پیشنهادات مدیریتی برای تحقیق جاری به صورت ذیل مشخص می‌شوند. اولاً توجه مدیران به سرمایه‌گذاری در توسعه مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته و انعطاف‌پذیر که بتوانند پیچیدگی‌های واقعی عملیات استخراج را به خوبی شبیه‌سازی کنند. این مدل‌ها باید قادر به تحلیل چندین هدف همزمان حتماً باشند. همچنین، ایجاد یک سیستم مدیریت داده‌ها برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوط به عملیات استخراج و بارگذاری می‌تواند به بهبود دقت شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری کمک کند. این سیستم باید شامل اطلاعات مربوط به عملکرد تجهیزات، هزینه‌ها و زمان‌ها باشد. این پیشنهادات می‌توانند به مدیران کمک کنند تا فرآیندهای استخراج را بهینه‌سازی کرده و بهره‌وری را افزایش دهند. از

محدودیت های تحقیق جاری می توان به موارد زیر اشاره کرد. اولاً مدل های شبیه سازی چندهدفه ممکن است بسیار پیچیده باشند و نیاز به زمان و منابع زیادی برای توسعه و پیاده سازی داشته باشند. این پیچیدگی می تواند منجر به دشواری در تحلیل و تفسیر نتایج شود. علاوه بر این، استفاده از ابزارهای شبیه سازی و بهینه سازی ممکن است محدودیت هایی در قابلیت ها و عملکرد داشته باشند. این محدودیت ها می توانند بر دقت و کارایی مدل های توسعه یافته تأثیر بگذارند. استفاده از حالت دیسپچینگ در شبیه سازی سیستم بیل-کامیون-بهینه سازی و توسعه مدلی که به کل سیستم می پردازد می تواند موضوعاتی برای تحقیقات آینده باشد.

منابع

- Abolghasemian, M., & Darabi, H. (2018). Simulation based optimization of haulage system of an open-pit mine: Meta modeling approach. *Organizational resources management researchs*, 8(2), 1-17. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22286977.1397.8.2.2.6>
- Abolghasemian, M., Bigdeli, H., & Shamami, N. (2024). Locating Routing Problem (LRP) of distribution of priority support items to ground forces in war conditions. *Engineering Management and Soft Computing*, 10(1), 262-292. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11320.1206>
- Abolghasemian, M., Ghane Kanafi, A., & Daneshmandmehar, M. (2020). A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iranian journal of management studies*, 13(4), 705-732. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898>
- Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & 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>
- Ahmed, M. A., Al - Khamis, T. M. (2009). Simulation Optimization for an Emergency Department Healthcare Unit in Kuwait, *European Journal of Operational Research*, 198, 936-942. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.10.025>
- Al - Khamis, T. M., & Ahmed, M. A. (2005). Simulation – Based Optimization for Repairable Systems Using Practice Swarm Algorithm. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 857-861. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574332>
- Al – Rafie, A., Fouad, R., Li, M., Shurrah, M. (2014). Applying Simulation and DEA to Improve Performance of Emergency Department in Jordanian Hospital. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 4, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.010>
- Amouzgar, K. (2018). Meta model based Multi objective optimization with Finite – Element Application, Doctorial Dissertation, University of Skovde.
- Azizi, S., Shakibi, H., Shokri, A., Chitsaz, A., & Yari, M. (2023). Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Applied Energy*, 332, 120487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120487>
- Cabrera E., Taboda M., Iglesias M., Eplede F., Luque E. (2011). Optimization of Health Care Emergency Department by Agent – Based Simulation. *Procedia Computer Science*: 4, 1880-1899. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.204>
- Chinbat, U., & Takakuwa, S. (2008, December). Using operation process simulation for a six sigma project of mining and iron production factory. In *Simulation Conference, WSC 2008. Winter* (pp. 2431-2438). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736351>
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms* (Vol. 16). John Wiley & Sons.
- Dengiz B., Tansel Y., Onder B. (2015). A Meta Model Based Simulation Optimization Using Hybrid Simulation – Analytical Modeling to Increase the Productivity in Automotive Industry, *Mathematics and Computers in Simulation*. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.07.005>
- Dengiz, B. (2009). Redesign of PCB Production Line with Simulation and Taguchi Design. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2197 – 2204. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429646>
- Dengiz, B., & Akbay, K. S. (2000). Computer Simulation of a PCB Production Line: Meta – Modeling Approach. *International Journal Production Economy*. 63, 195 – 205. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00013-4)
- Dengiz, B., Bektas, T., Ultanir, A. E. (2006). Simulation Optimization Based DSS Application: A Diamond Tool Production Line in Industry, *Simulation Model Practice Theory*, 14(3), 296 – 312. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2005.07.001>
- Ercelebi, S. G., & Bascetin, A. (2009). Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109, 433-439.
- Eskandari, H. R., Darabi, H., Hosseinzadeh, S. A. H. (2013). Simulation and Optimization of Haulage System of an Open-Pit Mine. *Proceedings of the 13th Summer Computer Simulation Conference*, Article No 37, Toronto, Ontario, Canada.
- Eskandari, H., & Geiger, C. D. (2008). A fast Pareto genetic algorithm approach for solving expensive multiobjective optimization problems. *Journal of Heuristics*, 14(3), 203-241. <https://doi.org/10.1007/s10732-007-9037-z>
- Feng, C.-W., and H.-T. Wu. (2006). Integrating fmGA and CYCLONE to optimize the schedule of dispatching RMC trucks. *Automation in Construction* 15(2): 186-199. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.04.001>

- Govinda Raj, M., Vardhan, H., & Rao, Y. V. (2009). Production optimisation using simulation models in mines: a critical review. *International Journal of Operational Research*, 6(3), 330-359. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2009.026937>
- Grewal, C. S., Rogers, P., & Enns, S. T. (2010). Performance evaluation of inventory replenishment strategies in a capacitated supply chain under optimal parameter settings. *International Journal of Value Chain Management*, 4(3), 195-212. <https://doi.org/10.1504/IJVC.2010.033612>
- Hemmati, A., Kaveh, F., Abolghasemian, M., & Pourghader Chobar, A. (2024). Simulating the line balance to provide an improvement plan for optimal production and costing in petrochemical industries. *Engineering Management and Soft Computing*, 10(1). <https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11189.1198>
- Hurrion, R. (1997). An Example of Simulation Optimisation Using a Neural Network Metamodels: Finding the optimum number of Kanbans in a Manufacturing System, *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1105 – 1112. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600468>
- Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & 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), 1-19. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399>
- Karmellos, M., Mavrotas, G. (2019). Multi-objective optimization and comparison framework for the design of distributed energy systems, energy conversion and management, 180, 473-495. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.083>
- Kleijnen, J. P. C., & Gaury, E. G. A. (2001). Optimization versus robustness in simulation: a practical methodology, with a production-management case-study: Citeseer.
- Kleijnen, J. P. C., & Sargent, R. G. (2000). A Methodology for Fitting and Validating Metamodels in Simulation. *European Journal of Operational Research*, 120, 14 – 29. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00392-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00392-0)
- Lin, R. C., Sir, M. Y., & Pasupathy, K. S. (2013). Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services. *Omega*, 41(5), 881-892. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.11.003>
- Liu, Y., Shen, W., Zhang, C., & Sun, X. (2023). Agent-based simulation and optimization of hybrid flow shop considering multi-skilled workers and fatigue factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 80, 102478. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102478>
- Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., & 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), 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.017>
- Napalkova, L., & Merkuryeva, G. (2012). Multi-objective stochastic simulation-based optimisation applied to supply chain planning. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(1), 132-148. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.661190>
- Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043-1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- Piermarini, C., & Roma, M. (2023). A Simulation-Based Optimization approach for analyzing the ambulance diversion phenomenon in an Emergency-Department network. *arXiv preprint arXiv:2309.00643*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00643>
- Prez, S., Ortega, J., Gutierrez, A. (2019). A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources, computer and chemical engineering, 121, 158-173. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.003>
- Qin, H., Su, X., Li, G., Jin, X., & Yu, M. (2023). A simulation based meta-heuristic approach for the inbound container housekeeping problem in the automated container terminals. *Maritime Policy & Management*, 50(4), 515-537. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1934582>
- Qing, H., W. Cai, L. Fa, and W. Chang. (2008). Monitoring dispatch information system of trucks and shovels in an open pit based on GIS/GPS/GPRS. *Journal of China University of Mining and Technology* 18(2): 288-292. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60061-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60061-9)
- Russell, A., Taghipour, SH. (2019). Multi-objective optimization of scheduling problems in low-volume low variety production systems, *International journal of Production Economics*, 208, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.005>
- Syberfeldt, A., Andersson, M., Ng, A., Bengtsson, V. (2015). Multi-objective evolutionary simulation-optimization of personnel scheduling, *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 6(1), 41-52.
- Syberfeldt, A., Ng, A., John, R. I., & Moore, P. (2009). Multi-objective evolutionary simulation-optimisation of a real-world manufacturing problem, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 926-931. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.013>
- Vasquez Coronado, P. P. (2014). Optimization of the Haulage Cycle Model for Open Pit Mining Using a Discrete-Event Simulator and a Context-Based Alert System. Master Thesis from the Faculty of Mining, Geological, Geophysical and Engineering, University of Arizona.
- Willis, K. O., & Jones, D. F. (2008). Multi-objective simulation optimization through search heuristics and relational database analysis. *Decision Support Systems*, 46(1), 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2008.06.012>
- Y.T. Ic. (2012). An experimental design approach using TOPSIS method for the selection of computer-integrated manufacturing technologies, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 28, 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.09.005>
- Yalçınkaya, Ö., & Bayhan, G. M. (2009). Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology, *European journal of operational research*, 196(1), 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.010>

- Zadeh, A. H., Sharifi, J., & Yadegar, M. (2024). Path Planning For A Mobile Robot Using The Chessboard Method And Gray Wolf Optimization Algorithm In Static And Dynamic Environments. *Engineering Management and Soft Computing*, 10(1), 67-91. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11127.1189>
- Zeinali F., Mahootchi M., Sepehri M M. (2015). Resource Planning in the Emergency Department: A Simulation – Based Meta Modeling Approach, *Simulation Modeling Practice and Theory*, 53(2), 123-148. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.002>