نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۳۷ تا ۵۰
Vol. 4, No. 3, Autumn 2019, pp. 37-50

DOI: 10.30479/jmre.2019.10060.1224

تجزیه و تحلیل عملیات استخراج معدن خاک نسوز آباده به کمک شبیه‌سازی سیستم ترابری

صابر علمداری[۱]، محمدحسین بصیری[۲*]، مجید عطایی پور[۳]

۱- دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استادیار مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵)

چکیده

عملیات تولیدی اصلی در اکثر معادن شامل حفاری، آتشباری، بارگیری و باربری است، بنابراین بهینه‌سازی هر بخش باعث افزایش سود و کاهش هزینه‌های معدنکاری می‌شود. حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌های معدنکاری مربوط به ماشین‌آلات است و از این بین ماشین‌آلات بارگیری و باربری سهم عمده‌ای از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهند، در نتیجه به کارگیری صحیح ناوگان ترابری اهمیت ویژه‌ای دارد تا با افزایش بهره‌وری، هزینه‌های سیستم تولیدی نیز کاهش یابد. در این تحقیق با استفاده از روش شبیه‌سازی و بهره‌گیری از نرم‌افزار Arena، عملکرد سیستم فعلی تولید معدن خاک نسوز آباده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری ماشین‌آلات بارگیری موجود در معدن پایین است و با توجه به کمبود تعداد کامیون‌ها، این امر سبب افزایش هزینه‌های تولید شده است. در صورت به کارگیری ماشین‌آلات با ظرفیت‌های بالا در عملیات استخراج، ضمن افزایش تولید، هزینه‌های تولید به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین با اعمال روش تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها در مدل، مشخص شد در صورتی که از ماشین‌آلات بارگیری و باربری متناسب استفاده شود، ضمن افزایش ۴ تا ۸ درصدی تولید با تعداد معین کامیون، هزینه‌های تولید نیز ۵ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

عملیات تولید معادن، ناوگان ترابری، شبیه‌سازی، تخصیص انعطاف‌پذیر، معدن خاک نسوز آباده.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: mhbasiri@yahoo.com

۱- مقدمه

چرخه اصلی تولید در معادن روباز شامل عملیات حفاری، آتشباری، بارگیری و باربری است. هدف دو فعالیت اول خرد کردن سنگ و رساندن آن به ابعاد خاص و دو مرحله بعد، انتقال و جابه‌جایی مواد خرد شده است. هزینه‌های بارگیری و باربری بیش از نیمی از هزینه‌های عملیاتی در معادن روباز را به خود اختصاص می‌دهند، بنابراین انتخاب صحیح ناوگان ترابری اهمیت ویژه‌ای دارد.

برای شناخت و بهبود عملکرد و تصمیم‌گیری در مورد سیستم‌ها، برای حل مسایل و مشکلات و در نهایت کمک به مسوولان، روش‌های متفاوتی به وجود آمده است که به کارگیری آن‌ها به نوع سیستم و مشکل مربوطه بستگی دارد. تجزیه و تحلیل‌های ریاضی، مشاهده عینی و تجربی و فنون مختلف پژوهش عملیاتی را می‌توان نمونه‌هایی از این روش‌ها دانست. یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که برای شناخت وضع موجود و بهبود عملکرد سیستم‌ها به ویژه سیستم‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی است[۱].

تکنیک شبیه‌سازی به عنوان ابزاری برای دست‌یابی به جواب مسایل پیچیده سیستمی طراحی شده است. شبیه‌سازی، جایگزین کردن مدل کامپیوتری به جای سیستم واقعی یا سیستم پیشنهادی برای برآورد عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف است[۲].

شبیه‌سازی در عملیات معدنکاری می‌تواند برای مطالعه سیستم‌ها و مسایل مختلف از جمله تجهیزات ناوگان، فرآیند ماشین‌آلات بارگیری و باربری و برنامه‌ریزی معادن با هدف بهینه‌سازی، بهبود و طراحی سیستم‌های موجود و آینده استفاده شود[۱].

بر اساس تحقیق استارگل[۱]، شبیه‌سازی کامپیوتری یک عملیات معدنکاری برای اولین بار توسط ریست[۲] گزارش شده است که در آن مدلی برای تعیین تعداد بهینه واگن‌ها به منظور کاهش زمان انتظار در صف بارگیری و تخلیه، در یک معدن زیرزمینی توسعه یافته است[۳]. از آن زمان به بعد، کاربرد شبیه‌سازی در عملیات مختلف معادن روباز و زیرزمینی در مطالعات متعددی مشاهده شده است.

کینگ‌ژیا[۳] شبیه‌سازی تجهیزات حفاری و عملیات شاول در معادن روباز را مورد مطالعه قرار داد[۴].

در سال ۱۹۹۹ عطایی‌پور و بافی[۴] یک مدل شبیه‌سازی آماری را برای تحلیل اجرای عملیات سیستم کامیون- شاول، در نرم‌افزار ARENA توسعه دادند[۵]. در سال ۲۰۰۰، کولانجا[۵] و همکاران به مطالعه تاثیر یک سیستم سنگ‌شکن جدید درون پیت بر روی تولید سیستم شاول- کامیون یک معدن روباز به کمک شبیه‌سازی و استفاده از زبان برنامه‌نویسی GPSS/H و نرم‌افزار PROOF برای پویانمایی مدل، پرداختند[۶]. جِربرگ[۶] و همکاران از شبیه‌سازی برای مطالعه فرآیند برنامه‌ریزی و زمان‌بندی آماده‌سازی پانل‌های یک معدن زیرزمینی، در مرحله پیش امکان‌سنجی استفاده کردند[۷].

در سال ۲۰۱۲ عسکری‌نسب و همکاران مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح را برای تعیین تعداد بهینه شاول- کامیون مورد نیاز برای رسیدن به اهداف برنامه‌ریزی ارایه کردند و نرم‌افزار شبیه‌سازی ARENA برای تجزیه و تحلیل سیستم مورد استفاده قرار گرفته است[۸].

سالاما[۷] و همکاران به بررسی کاربرد شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای انتخاب تجهیزات باربری زیرزمینی پرداختند و به کمک یک مطالعه موردی، دو دستگاه مختلف باربری با هدف بهبود تولید را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند[۹].

دیندارلو و همکاران از چارچوب شبیه‌سازی برای انتخاب تجهیزات معدنکاری سیستم شاول- کامیون استفاده کردند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی مدل تصادفی از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده شده است[۱۰].

داماکور[۸] و همکاران به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ARENA به تحلیل مصرف سوخت سیستم کامیون- شاول پرداختند. در این سیستم یک شاول و چهار کامیون مدل شده و مقدار تولید و میزان مصرف سوخت شاول و کامیون در مدل شبیه‌سازی با حالت واقعی مقایسه شده است[۱۱].

بافی و زنگ[۹] یک مدل شبیه‌سازی کامیون-شاول ارایه دادند. این مدل قابلیت ارزیابی ترافیک و استراتژی‌های تخصیص کامیون و همچنین تخمین تعداد بهینه کامیون‌ها را دارد[۱۲].

در این پژوهش با شبیه‌سازی سیستم تولید معدن خاک نسوز آباده، عملکرد سیستم فعلی ترابری معدن مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از مدلسازی سیستم موجود در معدن، سناریوهای مختلف برای بهینه‌سازی ناوگان ترابری با توجه به اهداف مورد نظر پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر به کارگیری روش تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها بر عملکرد سیستم ترابری معدن مورد ارزیابی واقع شده است. مراحل انجام تحقیق بر اساس مراحل انجام فرآیند شبیه‌سازی انجام گرفته است.

به طور کلی یک فرآیند کامل شبیه‌سازی شامل تعریف مساله (شناسایی سیستم و تعیین هدف)، جمع‌آوری اطلاعات، مدلسازی، درستی‌سنجی و اعتبارسنجی مدل، اجرای مدل، آنالیز نتایج، مستندسازی، نصب و به کارگیری مدل است[۲].

۲- معدن خاک نسوز آباده

معدن خاک نسوز استقلال آباده در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شرق شهر آباده و در بخش شمال استان فارس واقع است. این منطقه در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه و طول جغرافیایی۵۲ درجه و ۴۲ دقیقه واقع شده و از چهار طرف با رشته کوه‌های زاگرس احاطه شده است[۱۳](شکل ۱).

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی معدن خاک نسوز آباده

واحدهای سنگی که در این منطقه گسترش دارند، شامل رسوبات تخریبی، ولکانیک‌ها و کربنات‌ها و سنگ غالب در منطقه، از جنس شیل هیدرومیکای پروفیلیتی کائولن‌دار است. ماده معدنی در برخی از قسمت‌ها با هماتیت و لیمونیت و در قسمت‌هایی با مواد آلی کربن‌دار مخلوط شده است. ماده معدنی از نظر زمین‌شناسی، از نوع سنگ‌های رسوبی نرم و رس‌دار به شمار می‌آید. بر اساس تخمین ذخیره انجام شده، در حال حاضر بیش از ۳۰۰ میلیون تن ماده معدنی در این معدن وجود دارد[۱۳]. با توجه به زمین‌شناسی و کیفیت ماده معدنی سیکل آتشباری در عملیات استخراج معدن حذف شده است.

فرآیند تولید معدن خاک نسوز استقلال آباده متشکل از دو بخش سنتی و مکانیزه است، در بخش سنتی کارگران معدن به وسیله پرفراتور، به استخراج و سنگ جوری ماده معدنی می‌پردازند و در سیستم مکانیزه با توجه به کیفیت مواد استخراجی از بولدوزر یا بیل مکانیکی برای کندن استفاده می‌شود. مواد کنده شده با لودر یا بیل مکانیکی بارگیری و سپس مواد معدنی و باطله به وسیله کامیون‌ها به انباشتگاه-های مربوطه حمل می‌شوند.

ماشین‌آلات استخراج مکانیزه در معدن شامل بولدوزر، لودر، بیل مکانیکی و کامیون است. در زمان مطالعه سیستم، عملیات استخراج مکانیزه با ۳ دستگاه دامپتراک ۳۵ تنی، یک دستگاه بیل مکانیکی، یک دستگاه لودر و یک دستگاه بولدوزر که در مالکیت معدن است، انجام می‌گیرد. همچنین در مجموع تعداد ۲ دستگاه لودر، ۲ دستگاه بیل مکانیکی، ۲ دستگاه بولدوزر و ۲۴ دستگاه کامیون ۲۰ و ۲۵ تنی، عملیات استخراج توسط شرکت‌های پیمانکاری را در معدن انجام می‌دهند.

هدف از این مطالعه، تعیین عملکرد سیستم فعلی معدن، تعیین ناوگان بهینه ترابری برای دستیابی به تولید حداکثر با حداقل هزینه‌ها، بالا بردن بهره‌وری بارکننده‌ها و بررسی میزان تاثیر به کارگیری روش تخصیص انعطاف‌پذیر کامیون‌ها در معدن است.

۳- مدلسازی سیستم تولید معدن

برای شبیه‌سازی سیستم تولیدی معدن، ابتدا مطالعات اولیه بر روی سیستم مورد نظر انجام شده و پس از جمع‌آوری اطلاعات لازم و طراحی مدل مفهومی سیستم، مدلسازی و تحلیل داده‌های ورودی انجام گرفته و سپس شبیه‌سازی مدل مربوط در نرم‌افزار Arena پیاده شده است. پس از صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شده است.

۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز

یکی از مراحل اساسی یک فعالیت، شبیه‌سازی جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سیستم است. نتایج حاصل از اجرای مدل‌های شبیه‌سازی به طور کلی به داده‌های ورودی آن مدل بستگی دارد. به طوری که وارد کردن داده‌های غیردقیق و نادرست به مدل، خروجی‌های غلط و نادرستی را در پی خواهد داشت. از جمله مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز در شبیه‌سازی زمان انجام فعالیت‌ها است. بنابراین با زمان‌سنجی از سیستم موجود و همچنین محاسبه آن‌ها در سیستم پیشنهادی، زمان انجام فعالیت‌های مختلف شامل زمان‌های بارگیری، زمان‌های حرکت کامیون در مسیرهای مختلف (با بار و بدون بار)، زمان‌های تخلیه کامیون‌ها و نظایر آن به دقت تعیین شده است.

از جمله اطلاعات مورد نیاز دیگر برای مدلسازی معدن خاک نسوز، وزن مخصوص مواد حمل شده برای تعیین ظرفیت مناسب کامیون‌های مورد نیاز است. وزن مخصوص مربوط به مواد معدنی و باطله در حال بارگیری به ترتیب ۱٫۸ و ۲ تن بر مترمکعب است. در سیستم مورد مطالعه، زمان مفید کاری در طول شبانه‌روز ۴۵۰ دقیقه محاسبه شد.

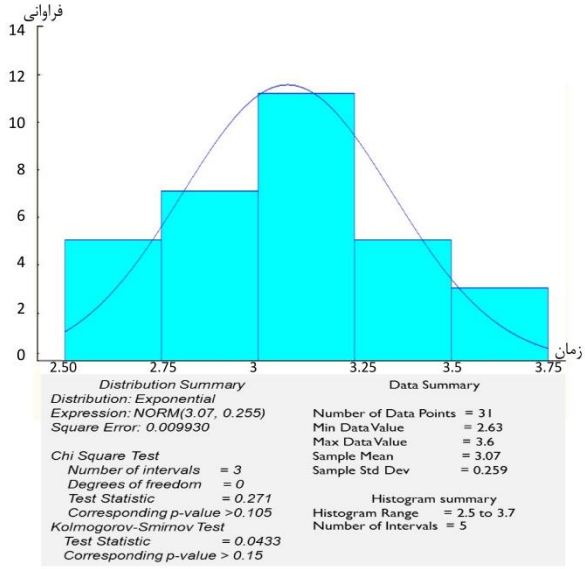
برای برازش و انتخاب توزیع مناسب در این پژوهش، از نرم‌افزار Arena's Input Analyzer استفاده شده است. منحنی برازش شده برای داده‌های زمانی بارگیری لودر ES5، در شکل ۲ نشان داده شده است.

بهترین توزیع احتمال مربوط به بارگیری کامیون ۳۵ تنی در موقعیت ES5، با تعداد ۳۱ داده اندازه‌گیری شده، با کمترین مربع خطا به صورت NORM(3.07, 0.255) بر حسب دقیقه محاسبه شده است. در توزیع به دست آمده مقادیر ۳٫۰۷ و ۰٫۲۵۵ به ترتیب نشان‌دهنده میانگین و واریانس توزیع است. با بررسی دو آزمون مربع کای و K-S، و از آنجا که مقدار P-value بزرگ‌تر از سطح آلفا (۰٫۰۵) است، در نتیجه توزیع نرمال برازش شده قابل رد کردن نیست و صحیح است.

به عنوان نمونه، زمان‌سنجی‌های مربوط به کامیون ۳۵ تنی از بارکننده ES5، مطابق جدول ۱ است. فعالیت‌های زمانی سایر تجهیزات سیستم ترابری معدن نیز اندازه‌گیری و محاسبه شده و بعد از تعیین بهترین توزیع آن‌ها، در مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲- مدلسازی با Arena

Arena نرم‌افزاری کامل برای انجام مطالعات شبیه‌سازی است که ویژگی‌ها و اصول جدیدی در مدلسازی و پویانمایی ارایه می‌کند. این نرم‌افزار توسط شرکت Rockwell و بر



شکل ۲: منحنی برازش شده بر داده‌های زمانی بارگیری لودر ES5

جدول ۱: اطلاعات زمانی و توزیع آن‌ها برای کامیون ۳۵ تنی

نوع متغیر	توزیع زمانی
زمان حرکت از بارکننده ES5 تا تقاطع B	NORM(۰٫۲۶۶, ۲٫۰۳)
زمان حرکت از تقاطع A تا تقاطع B با بار	NORM(۲٫۰۲, ۰٫۱۵۱)
زمان حرکت از تقاطع A تا تقاطع B بدون بار	۱٫۶۴+۰٫۵۲۱* BETA(۱٫۲۸, ۱٫۶۶)
زمان حرکت از تقاطع A تا دامپ باطله	NORM(۴٫۸۲, ۰٫۱۶۱)
زمان حرکت از تقاطع B تا دامپ ماده معدنی	۳٫۲۴+۱٫۰۲* BETA(۲٫۰۸, ۲٫۳۸)
زمان حرکت از تقاطع B تا بارکننده ES5	NORM(۱٫۹, ۰٫۱۵۲)
زمان حرکت از تقاطع B تا تقاطع A با بار	NORM(۱٫۸۹, ۰٫۲۱۸)
زمان حرکت از تقاطع B تا تقاطع A بدون بار	NORM(۱٫۵۶, ۰٫۱۲۸)
زمان حرکت از دامپ باطله تا تقاطع A	NORM(۴٫۰۲, ۰٫۱۲۹)
زمان حرکت از دامپ ماده معدنی تا تقاطع B	NORM(۳٫۳۶, ۰٫۱۹)
زمان بارگیری بارکننده ES5	۲٫۵۳+۱٫۱۷* BETA(۱٫۶۵, ۱٫۸۱)
زمان تخلیه	NORM(۱٫۰۳, ۰٫۱۳۷)

اساس SIMAN/Cinema ساخته شده است.

با فرض اینکه تولید ماده معدنی در تمام دوره‌ها یکسان و متوسط تولید مورد نیاز باشد، مدلسازی سیستم مورد مطالعه برای یک دوره یک ماهه (۲۵ روز کاری) انجام شده است.

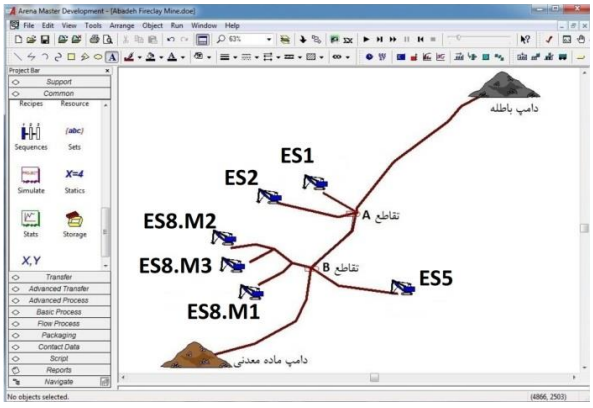
جانمایی شماتیک سیستم تولید معدن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، سیستم دارای شش محل بارگیری و دو محل تخلیه است.

در جدول ۲، اطلاعات تکمیلی در مورد نوع مواد بارگیری، تجهیزات و ماشین‌آلات بارگیری و باربری برای هر یک از محل‌های بارگیری معدن آورده شده است.

برای اعتبارسنجی مدل در این پژوهش از روش سه مرحله‌ای اریه شده توسط نایلور و فینگر[۱۰]، استفاده شده است[۱۴]:

جدول ۲: اطلاعات ماشین‌آلات مربوط به سیستم فعلی معدن

محل بارگیری	ماده استخراجی	ماشین بارگیری	ظرفیت بارکننده (مترمکعب)	ظرفیت کامیون (تن)
ES1	ماده معدنی	بیل مکانیکی	۱٫۸	۲۵
ES2	باطله	لودر	۴٫۵	۲۵
ES5	ماده معدنی	لودر	۴٫۵	۳۵
ES8.M1	ماده معدنی	بیل مکانیکی	۱٫۸	۲۰
ES8.M2	باطله	بیل مکانیکی	۱٫۸	۲۰
ES8.M3	باطله	لودر	۴٫۵	۲۵



شکل ۳: جانمایی سیستم در محیط ARENA

مرحله ۱- توسعه مدل با اعتبار ظاهری بالا[۱۱]

هدف از مرحله اول ایجاد مدلی است که بیش‌ترین اعتبار ظاهری را داشته باشد، به طوری که از نگاه افراد حاضر در سیستم مدل منطقی به نظر برسد. در این بخش نیز از تحلیل حساسیت برای کنترل اعتبار ظاهری مدل استفاده شد، بدین صورت که با تغییر آهنگ ورود نهادهای سیستم، تاثیر آن بر روی وضعیت صف ها و میزان تولید بررسی شد.

مرحله ۲- بررسی تجربی فرضیات مدل

در این مرحله دو دسته اصلی از فرضیات مدل شامل فرضیات مربوط به ساختار مدل و فرضیات مربوط به اطلاعات مدل با همکاری کارشناسان معدن، به صورت تجربی و شهودی مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان مثال با توجه به شرایط معدن و مشخصات جاده‌ها، کلیه مسیرهای باربری به صورت دوطرفه فرض شده و امکان سبقت گرفتن برای کامیون‌ها وجود دارد.

مرحله ۳- بررسی خروجی‌های شبیه‌سازی

موثرترین بررسی برای اعتبارسنجی مدل، آزمون این نکته است که خروجی‌های شبیه‌سازی باید تا حد امکان تفاوت معنی‌داری با خروجی‌های واقعی فرآیند نداشته باشد. برای این کار از روش آزمون فرضیه استفاده شده است. در این پژوهش، میزان تولید ماهانه ماده معدنی و باطله به عنوان معیاری برای مقایسه با سیستم واقعی و اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌سازی انتخاب شده است. نتایج خروجی‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن زمان گرم‌شدن[۱۲] سیستم و متوسط تکرارهای شبیه‌سازی است که در تمام سناریوها اعمال شده است.

متوسط تولید ماهانه معدن با ماشین‌آلات فعال، در دوره مطالعه سیستم در جدول ۳، آورده شده است.

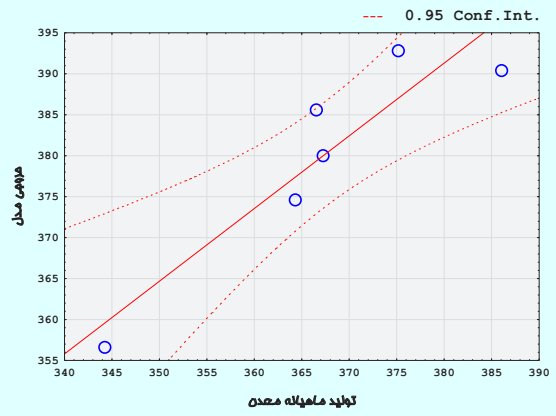
جدول ۳: اطلاعات تولید مکانیزه معدن (تن)

نوع مواد استخراجی	متوسط تولید معدن	خروجی مدل
ماده معدنی	۱۸۵۰۰۰	۱۸۰۴۰۰
باطله	۱۹۵۰۰۰	۱۸۶۸۶۰

همچنین نتایج خروجی مدل شبیه‌سازی با تولید شش ماهه گذشته معدن در شکل ۴ مقایسه شده است.

طبق نتایج فوق، مشاهده می‌شود که اختلاف معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین خروجی‌های مدل شبیه‌سازی معدن و خروجی‌های سیستم واقعی در دوره مطالعه سیستم وجود ندارد، بنابراین مدل شبیه‌سازی حاصل، معتبر است.

بنابراین می‌توان مدل را تحت شرایط مختلف اجرا و نتایج به دست آمده را مشاهده و بررسی کرد.



شکل ۴: بررسی عملکرد مدل شبیه‌سازی با تولید ماهیانه معدن

۴- تحلیل عملکرد سیستم تولید

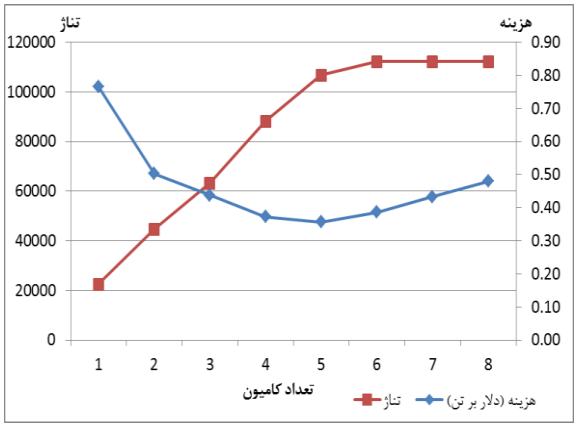
با مدلسازی سیستم ترابری فعلی معدن، میزان تولید و هزینه‌های واحد تولید مشخص شد. پس از اعتبارسنجی مدل، سناریوهای مختلف برای انتخاب بهینه ناوگان با هدف افزایش تولید و حداقل نمودن هزینه‌های تولید بر اساس شرایط فنی و اقتصادی معدن، بررسی شده است.

۴-۱- تحلیل سیستم ترابری فعلی معدن

با مدلسازی تخصیص ثابت از وضعیت فعلی معدن، بهره‌وری ماشین‌آلات بارگیری، میزان تولید ماهیانه، هزینه‌های تولید و امکان افزایش تولید با ماشین‌آلات فعلی مورد بررسی قرار گرفته است. با تهیه نمودار مقایسه‌ای مربوط به تعداد کامیون، میزان تولید و هزینه واحد تولید، بر حسب تناژ تولیدی در یک ماه، سیستم ترابری از لحاظ اقتصادی و تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

به عنوان نمونه در شکل ۵ عملکرد سیستم مربوط به بارکننده ES5 نشان داده شده است. با افزایش تعداد کامیون در هر مرحله، میزان تولید نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تولید بعد از رسیدن به حداکثر مقدار، در عمل حالت نزولی پیدا می‌کند، زیرا افزایش ترافیک در معدن باعث کاهش بازدهی تجهیزات می‌شود ولی در نمودار حاصل از شبیه‌سازی این بخش قابل مشاهده نیست و ادامه نمودار بدون تغییر و ثابت مشاهده می‌شود. همچنین نمودار هزینه در این شکل با افزایش تعداد کامیون‌ها، حالت نزولی پیدا می‌کند تا در نهایت بعد از تعداد معینی کامیون، به صورت صعودی پیش می‌رود. بنابراین تعداد کامیونی به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود که با داشتن حداقل هزینه، میزان حداکثر تولید را داشته باشد.

با توجه به شکل ۵، با ۵ دستگاه کامیون، بارکننده ES5 میزان ۱۰۶۶۸۰ تن در ماه بارگیری می‌کند و حداقل هزینه تولید ۰٫۳۶ دلار بر تن خواهد شد. این هزینه شامل هزینه‌های عملیاتی ماشین‌آلات ترابری مورد استفاده در هر محل بارگیری است. این رویه برای تمام بارکننده‌های معدن انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵: نمودار مقایسه‌ای مربوط به بارکننده ES5

با اجرای مدل ساخته شده مطابق با وضعیت موجود در معدن، درصد به کارگیری بارکننده‌های ES1، ES2، ES5، ES8.M1، ES8.M2 و ES8.M3 به ترتیب معادل ۶۸، ۵۸، ۵۹، ۷۰، ۵۷ و ۴۲ درصد، میزان تولید ماهیانه کل سیستم ۳۶۷۲۶۰ تن و هزینه تولید ۰٫۵۶ دلار بر تن به دست می‌آید. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از معدن هزینه‌های هر ساعت فعالیت لودر ۳۵٫۱۰ دلار، بیل مکانیکی ۳۱٫۶۳ دلار، بلدوزر ۳۳٫۵۳ دلار و کامیون ۳۵ تنی ۲۹٫۹۰ دلار می‌باشد، همچنین هزینه حمل مواد توسط شرکت‌های پیمانکاری حدود ۰٫۳ دلار بر تن متغیر است.

از طرفی با بررسی امکان افزایش تولید با ماشین‌آلات فعلی مشخص شد که با افزایش تعداد ۵ کامیون ۳۵ تنی، ۲۹ کامیون ۲۵ تنی و ۱۸ کامیون ۲۰ تنی در وضعیت فعلی، تولید ماهیانه به ۶۲۶۷۰۰ تن و هزینه تولید به ۰٫۴۱ خواهد رسید، که از این مقدار ۲۷۳۳۸۵ تن ماده معدنی و ۳۵۳۳۱۵

تن باطله استخراج خواهد شد.

نتایج به دست آمده حاصل از سناریوی اول(وضعیت فعلی) سیستم ترابری معدن در جدول ۴ خلاصه شده است.

با توجه به کمبود تعداد کامیون‌ها در سیستم و زیاد بودن زمان انتظار بارکننده‌ها برای بهبود بهره‌وری باید تعداد کامیون‌ها افزایش یابد. برای استفاده از تمام ظرفیت بارکننده‌ها و به کارگیری کامیون‌های یکسان برای هر بارکننده، نیاز به ۵۲ کامیون با ظرفیت‌های موجود در معدن است. از آنجا که اکثر کامیون‌های موجود در سیستم ترابری معدن دارای ظرفیت‌های ۲۰ و ۲۵ تنی‌اند با توجه به پایین بودن عملکرد این کامیون‌ها در معدن با افزایش تعداد آن‌ها، ضمن افزایش ترافیک جاده‌های معدن، هزینه‌های تولید نیز افزایش و بهره‌وری سیستم کاهش خواهد یافت.

با توجه به عملکرد مناسب کامیون‌های ۳۵ تن، با فرض جایگزینی این کامیون‌ها به جای سایر کامیون‌های موجود در معدن، عملکرد سیستم در سناریو دوم مورد بررسی قرار گرفته است و تعداد بهینه کامیون‌ها تعیین شده است. همچنین در سناریو سوم بارکننده‌های مناسبی برای بارگیری کامیون‌های ۳۵ تنی با توجه به شرایط معدن به کار گرفته شده و نتایج آن بررسی شده است. در سناریو چهارم به تحلیل عملکرد سیستم در صورت استفاده از ماشین‌آلات بارگیری و باربری با ظرفیت بالاتر پرداخته شده است.

روش تخصیص انعطاف‌پذیر برای بیشینه کردن تولید سیستم به هدف‌هایی مانند بیشینه کردن بهره‌وری بارکننده‌ها و یا کمینه‌کردن زمان انتظار کامیون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش انعطاف‌پذیر به کار گرفته شده در این مدل بر اساس کمینه‌کردن زمان انتظار کامیون‌ها در صف بارکننده‌ها و افزایش به کارگیری بارکننده در سیستم ترابری است.

۴-۲- تحلیل سناریوی دوم

در سناریوی دوم با جایگزینی کامیون ۳۵ تنی به جای سایر کامیون‌ها، اطلاعات زمانی بارگیری، زمان رفت و برگشت برای استفاده در مدل یا با زمان‌سنجی فعالیت‌ها در معدن و یا با استفاده از سیکل زمانی بارکننده‌ها، منحنی‌های عملکرد ماشین‌آلات و وضعیت معدن محاسبه شده است[۱۶،۱۵].

میزان تغییرات تولید و هزینه تولید به ازای تعداد کامیون در حالت تخصیص ثابت و انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس بررسی‌های انجام شده و نتایج هر بارکننده، تعداد کامیون‌هایی که برای کل سیستم تخصیص ثابت مورد نیاز است، ۳۲ دستگاه است. تولید نهایی سیستم با این تعداد کامیون به ۵۷۷۷۱۰ تن در ماه می‌رسد. هزینه نهایی کل سیستم ترابری ۰٫۴۲ دلار بر تن است (جدول۶).

در سیستم گسیل انعطاف‌پذیر برای سناریوی دوم، طبق شکل ۶، مشاهده می‌شود که در بازه ۲۸ تا ۲۹ کامیون، سیستم ترابری حداقل هزینه را دارد. در این حالت می‌توان تعداد بهینه کامیون را ۲۹ در نظر گرفت زیرا با داشتن حداقل هزینه حداکثر مقدار تولید را نیز دارد. میزان تولید سیستم با این تعداد کامیون ۵۸۴۰۱۰ تن در ماه خواهد بود و هزینه نهایی سیستم ۰٫۴۳ دلار بر تن خواهد بود.

با بررسی سیستم در دو حالت تخصیص ثابت و انعطاف‌پذیر مشاهده می‌شود که در حالت انعطاف‌پذیر تعداد کامیون‌ها ۳ دستگاه کاهش می‌یابد، تناژ تولیدی حدود ۱ درصد افزایش و هزینه تولید تنها ۰٫۰۱ دلار بر تن افزایش می‌یابد که می‌توان علت آن را بارکننده‌های بیل مکانیکی با ظرفیت کم عنوان کرد که سبب افزایش زمان بارگیری شده است.

با فرض استفاده از بیل‌های مکانیکی با ظرفیت بالاتر با همان کیفیت بیل‌های مکانیکی معدن سیستم تولیدی معدن

جدول ۴: نتایج سناریوی اول

بارکننده	در شرایط فعلی			در حالت بهینه		
	تعداد کامیون	تولید	هزینه	تعداد کامیون	تولید	هزینه
ES1	۴	۴۸۹۰۰	۰٫۵۰	۶	۶۹۲۲۵	۰٫۳۹
ES2	۵	۷۷۱۵۰	۰٫۸۴	۱۰	۱۳۱۸۹۵	۰٫۴۳
ES5	۳	۶۳۱۸۰	۰٫۴۴	۵	۱۰۶۶۸۰	۰٫۳۶
ES8.M1	۵	۶۸۳۲۰	۰٫۳۸	۸	۹۷۴۸۰	۰٫۳۶
WS8.M2	۵	۴۹۰۶۰	۰٫۵۰	۱۰	۸۱۳۲۰	۰٫۳۷
WES8.M3	۵	۶۰۶۵۰	۰٫۶۴	۱۳	۱۴۰۱۰۰	۰٫۵۰
کل‌سیستم	۲۷	۳۶۷۲۶۰	۰٫۵۶	۵۲	۶۲۶۷۰۰	۰٫۴۱

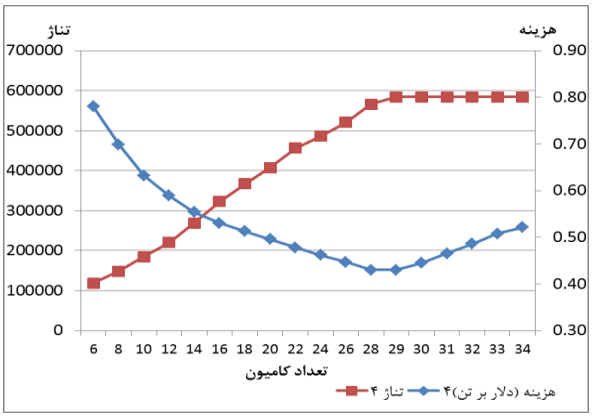
در سناریوی بعد بررسی شده است.

۴-۳- تحلیل سناریوی سوم

با فرض جایگزین کردن بارکننده‌های مناسب عملکرد سیستم تولید مورد بررسی قرار گرفته است. در این سناریو از بیل مکانیکی ۳٫۵ مترمکعبی به جای بیل مکانیکی‌های فعلی استفاده شده است. به دلیل موجود نبودن بیل مکانیکی جایگزین در معدن، اطلاعات اقتصادی آن از پروژه‌های مشابه و منابع معتبر جمع‌آوری و طبق شرایط معدن تعدیل شد (جدول ۵) [۱۷, ۱۸].

بعد از تحلیل نتایج حاصل از اجرای مدل در این سناریو، تعداد بهینه کامیون‌ها در حالت تخصیص ثابت و انعطاف‌پذیر به ترتیب ۳۷ و ۳۲ دستگاه محاسبه شد. میزان تولید و هزینه‌های تولید در این روش‌ها نیز به ترتیب ۶۶۵۸۱۰ تن و ۰٫۴۲ دلار بر تن و ۶۹۲۸۵۰ تن و ۰٫۳۹ دلار بر تن خواهد بود (جدول ۶ و شکل ۷).

با بررسی سیستم در دو حالت تخصیص ثابت و انعطاف‌پذیر در سناریوی سوم، مشاهده می‌شود که در حالت انعطاف‌پذیر تعداد کامیون‌ها ۵ دستگاه کاهش می‌یابد، تناژ تولید ۴٫۱ درصد افزایش و هزینه تولید ۰٫۰۳ دلار کاهش می‌یابد.



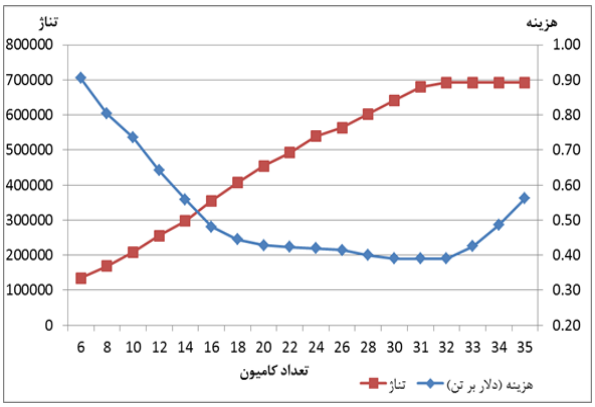
شکل ۶: نمودار مقایسه‌ای سیستم گسیل انعطاف‌پذیر سناریو دوم

جدول ۵: هزینه‌های مربوط به ماشین‌آلات پیشنهادی سناریو سوم و چهارم[۱۷, ۱۸]

نوع تجهیزات	عملیاتی (دلار بر ساعت)					هزینه سرمایه‌ای (دلار بر ساعت)	مجموع هزینه‌ها (دلار بر ساعت)
	لاستیک	سوخت	روغن و گریس	قطعات / تعمیرات	نیروی انسانی		
بیل مکانیکی (۳٫۵ مترمکعبی)	۰	۳٫۴۲	۸٫۸۵	۲۳٫۶	۴٫۹۰	۲۲٫۸۳	۶۳٫۶
کامیون ۱۰۰ تنی	۱۳٫۲۵	۴٫۲۳	۷٫۳۵	۱۲٫۷۰	۴٫۹۰	۴۲٫۶۷	۸۵٫۱۰
لودر (۱۲ مترمکعبی)	۱۲٫۲۴	۴٫۶۸	۹٫۵۵	۱۶٫۸۰	۶٫۸۶	۶۸٫۵۷	۱۱۸٫۷۰
بیل مکانیکی (۱۱مترمکعبی)	۰	۴٫۶۸	۱۱٫۶۵	۳۳٫۴۲	۶٫۸۶	۸۲٫۲۹	۱۳۸٫۹۰

جدول ۶: نتایج مربوط به تخصیص ثابت در سناریوهای دوم، سوم و چهارم

بارکننده	سناریو دوم			سناریو سوم			سناریو چهارم		
	تعداد بهینه کامیون	تناژ تولید (تن)	هزینه (دلار برتن)	تعداد بهینه کامیون	تناژ تولید (تن)	هزینه (دلار برتن)	تعداد بهینه کامیون	تناژ تولید (تن)	هزینه (دلار برتن)
ES1	۵	۷۹۰۵۰	۰٫۴۲	۶	۱۱۴۵۱۰	۰٫۴۱	۳	۲۱۴۵۱۰	۰٫۳۶
ES2	۵	۱۰۰۵۹۰	۰٫۴۲	۵	۱۰۰۵۹۰	۰٫۴۲	۴	۲۷۱۷۰۰	۰٫۳۸
ES5	۵	۱۰۶۶۸۰	۰٫۳۶	۵	۱۰۶۶۸۰	۰٫۳۶	۴	۲۶۴۲۹۰	۰٫۳۵
ES8.M1	۴	۸۲۲۶۰	۰٫۴۱	۵	۹۶۳۰۰	۰٫۳۹	–	–	–
WS8.M2	۶	۸۰۹۴۰	۰٫۴۵	۹	۱۱۹۵۵۰	۰٫۴۸	–	–	–
WES8.M3	۷	۱۲۸۱۹۰	۰٫۴۵	۷	۱۲۸۱۹۰	۰٫۴۵	۶	۲۷۶۵۴۵	۰٫۴۹
کل سیستم	۳۲	۵۷۷۷۱۰	۰٫۴۲	۳۷	۶۶۵۸۱۰	۰٫۴۲	۱۷	۱۰۲۷۰۴۵	۰٫۳۹



شکل ۷: نمودار مقایسه‌ای سیستم گسیل انعطاف‌پذیر سناریو سوم

۴-۴- تحلیل سناریوی چهارم

در سناریوی چهارم با فرض استفاده از ماشین‌آلات با ظرفیت بالا، عملکرد سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است. در این سناریو تاثیر استفاده از کامیون‌های ۱۰۰ تنی به همراه بارکننده‌های مناسب (بیل مکانیکی ۱۱ مترمکعبی و لودر ۱۲ مترمکعبی) بر میزان تولید و هزینه‌های ترابری بررسی شده است. از آنجا که امکان استفاده از چندین بارکننده با ظرفیت‌های بالا در معدن وجود ندارد و به علت نزدیکی چند ایستگاه بارگیری به هم می‌توان تعداد ایستگاه‌های بارگیری را کمتر کرد، بنابراین در این سناریو دو محل بارگیری ماده معدنی و دو محل بارگیری باطله برای بارگیری مواد در نظر گرفته شده است که بارگیری با دو دستگاه بیل مکانیکی در ایستگاه‌های بارگیری ES1 و ES5 و دو دستگاه لودر در موقعیت‌های ES2 و ES8.M3 انجام خواهد شد.

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته و نتایج هر بارکننده، تعداد کامیون‌هایی که برای کل سیستم تخصیص ثابت مورد نیاز است، ۱۷ دستگاه خواهد بود. میزان تولید سیستم ترابری با این تعداد کامیون به ۱۰۲۷۰۴۵ تن در ماه می‌رسد. هزینه کل سیستم ترابری معدن ۰٫۳۹ دلار بر تن خواهد شد (جدول ۶).

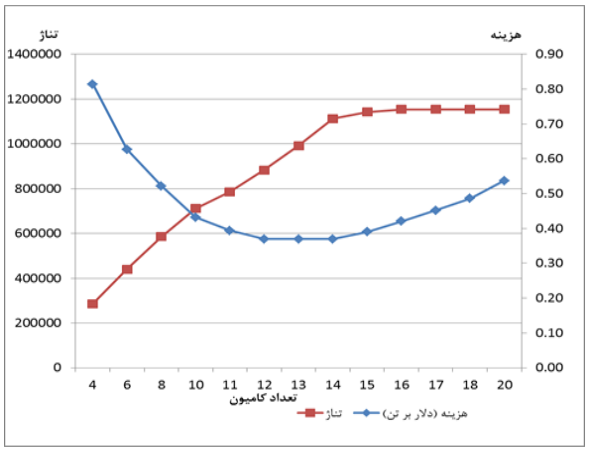
در این سناریو با به کارگیری گسیل انعطاف‌پذیر، طبق شکل ۸، تعداد بهینه کامیون‌ها ۱۴ دستگاه است که در این صورت میزان تولید ۱۱۱۲۳۱۰ تن و هزینه‌های ترابری ۰٫۳۷ دلار بر تن خواهد بود.

۴-۵- مقایسه سناریوهای دوم و سوم

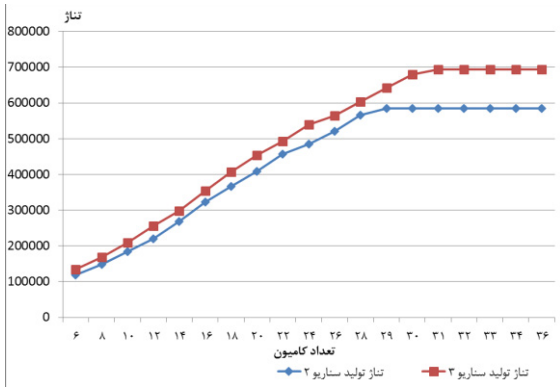
سناریوهای دوم و سوم به دلیل اینکه دارای کامیون‌های مشابه با بارکننده‌های متفاوت‌اند ، در حالت گسیل انعطاف‌پذیر مورد مقایسه قرار گرفته است. تاثیر ماشین‌آلات بارگیری بر عملکرد سیستم ترابری با توجه به یکسان بودن کامیون‌ها بر اساس میزان تولید و هزینه‌های تولید به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به نمودارهای فوق، استفاده از بارکننده‌های متناسب با کامیون‌ها، موجب افزایش تولید و کاهش هزینه‌های تولید با تعداد کامیون‌های معین می‌شود، بنابراین به کارگیری آن‌ها ارجحیت داده می‌شود.

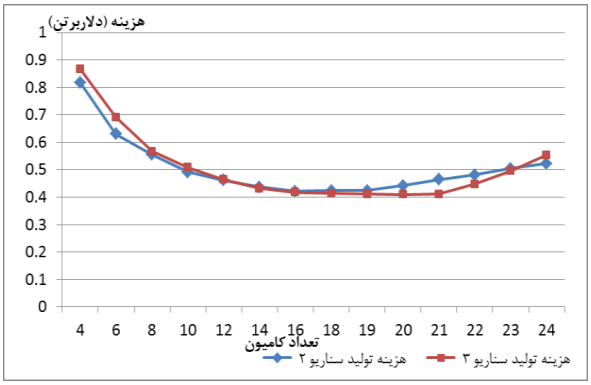
تعداد بهینه کامیون‌ها برای هر بارکننده به منظور انجام عملیات تولیدی معدن برای سناریوهای دوم، سوم و چهارم در حالت تخصیص ثابت، در جدول ۶ آورده شده است. در این جدول تاثیر نوع بارکننده و تعداد کامیون بر میزان تولید و هزینه‌های تولیدی قابل بررسی و مقایسه است.



شکل ۸: نمودار مقایسه‌ای گسیل انعطاف‌پذیر سناریو چهارم



شکل ۹: تناژ تولید حالت گسیل‌انعطاف‌پذیر سناریو دوم و سوم



شکل ۱۰: هزینه تولید حالت گسیل‌انعطاف‌پذیر سناریو دوم و سوم

خلاصه نتایج حاصل از اجرای چهار سناریوی مورد بررسی در این پژوهش برای مقایسه عملکرد سیستم ترابری معدن خاک نسوز آباده، در دو حالت تخصیص ثابت و انعطاف‌پذیر در جدول ۷ ارایه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده بهینه از تجهیزات و کاهش هزینه‌های تولید در پروژه‌های معدنی برای افزایش سود، امری ضروری است. برای مطالعه، تحلیل و بهبود عملکرد سیستم‌ها با توجه به ویژگی‌های خاص شبیه‌سازی نسبت به سایر روش‌ها، شبیه‌سازی کاربرد گسترده‌ای داشته و برای تحلیل و طرح‌ریزی عملیات معادن و یا بهبود شرایط فعلی آن‌ها، مورد توجه قرار گرفته است.

با شبیه‌سازی سیستم تولید فعلی معدن خاک نسوز آباده مشخص شد که به دلیل کم بودن تعداد کامیون‌های موجود در معدن، بهره‌وری ماشین‌آلات فعلی بارگیری پایین است و از تمام پتانسیل آن‌ها استفاده نمی‌شود که باعث بالا رفتن هزینه‌های تولید شده است. بر اساس مدل شبیه‌سازی، تعداد ۵۲ کامیون برای باربری مواد با ماشین‌آلات بارگیری فعلی به منظور حداکثر کردن بازدهی ماشین آلات بارگیری مورد نیاز است که در آن صورت میزان تولید به ۶۲۶۷۰۰ تن افزایش و هزینه‌های ترابری به ۰٫۴۱ دلار بر تن کاهش می‌یابد. به عبارتی در صورت تخصیص تعداد بهینه کامیون‌ها به هر بارکننده، تولید معدن ۷۰ درصد افزایش و هزینه‌های تولید ۲۷ درصدی کاهش خواهد یافت.

به کارگیری کامیون مناسب (از نظر ظرفیت، توان و سازگاری با ماشین‌آلات بارگیری) برای حمل مواد می‌تواند ضمن افزایش بهره‌وری سیستم، هزینه‌های تولیدی معدن را نیز کاهش دهد. با توجه به عملکرد بهتر کامیون‌های ۳۵ تنی نسبت به سایر کامیون‌های موجود در معدن، در صورت استفاده از این مدل کامیون، در حالت تخصیص ثابت با ۳۲ کامیون میزان تولید به ۵۷۷۷۱۰ تن و هزینه تولیدی به ۰٫۴۲ دلار بر تن خواهد رسید.

طبق نتایج سناریو سوم، استفاده از بارکننده‌های متناسب با کامیون ۳۵ تنی، موجب تولید ماهیانه ۶۶۵۸۱۰ تن با هزینه ۰٫۴۲ دلار بر تن در حالت تخصیص ثابت، خواهد شد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری بارکننده متناسب با کامیون موجب افزایش بهره‌وری کامیون‌ها، افزایش میزان تولید سیستم و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

از آنجا که با افزایش تعداد کامیون‌ها، ضمن افزایش ترافیک جاده‌ای، ایمنی و راندمان تولید کاهش می‌یابد، استفاده از کامیون‌های با ظرفیت بالاتر تولید را به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد در صورتی که هزینه‌های تولید نیز کاهش خواهد یافت.

به کارگیری روش گسیل انعطاف‌پذیر نسبت به تخصیص ثابت، ضمن کاهش تعداد کامیون‌ها، باعث افزایش تولید

جدول ۷: مقایسه عملکرد سیستم ترابری در حالت بهینه سناریوهای مختلف

سناریو	نوع سیستم	تعداد بارکننده	ظرفیت کامیون (تن)	تعداد بهینه کامیون	تولید کل (تن)	هزینه (دلاربرتن)
۱	تخصص ثابت	۶	۲۰، ۲۵ و ۳۵	۵۲	۶۲۶۷۰۰	۰٫۴۱
۲	تخصص ثابت	۶	۳۵	۳۲	۵۷۷۷۱۰	۰٫۴۲
	تخصیص انعطاف‌پذیر	۶	۳۵	۲۹	۵۸۴۰۱۰	۰٫۴۳
۳	تخصص ثابت	۶	۳۵	۳۷	۶۶۵۸۱۰	۰٫۴۲
	تخصیص انعطاف‌پذیر	۶	۳۵	۳۲	۶۹۲۸۵۰	۰٫۳۹
۴	تخصص ثابت	۴	۱۰۰	۱۷	۱۰۲۷۰۴۵	۰٫۳۹
	تخصیص انعطاف‌پذیر	۴	۱۰۰	۱۴	۱۱۱۲۳۱۰	۰٫۳۷

در هر سناریو تا حدود ۱۰ درصد می‌شود و در صورتی که ماشین‌آلات بارگیری و باربری متناسب نباشند (مانند سناریو دوم) هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد اما در صورت استفاده از ماشین‌آلات بارگیری و باربری متناسب (مانند سناریو سوم و چهارم)، هزینه‌های تولید نسبت به حالت تخصیص ثابت کاهش خواهد یافت.

۶- مراجع

[۱] علمداری، ص.؛ ۱۳۹۲؛ "**بهینه‌سازی عملکرد سیستم تولید معدن خاک نسوز آباده بر اساس شبیه‌سازی**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

[2] Banks, J. (2009). *"Discrete Event System Simulation"*. 4th Edition, Pearson Education India.

[3] Sturgul, J. (1999). *"Discrete mine system simulation in the United States"*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 13(2): 37-41.

[4] Qing-xia, Y. (1982). "*Computer simulation of drill-rig/ shovel operations in open-pit mines*". In Proceedings of the 14th Conference on Winter Simulation, V. 2, San Diego, USA, 468-471.

[5] Ataeepour, M., and Baafi, E. (1999). *"Arena simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes"*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 13(3): 125-129.

[6] Kolonja, B., Vasiljevic, N., and Stanic, R. (2000). *"Computer simulation of the open pit transportation systems"*. Mine Planning and Equipment Selection, AA Balkema, Rotterdam, 613-618.

[7] Greberg, J., and Sundqvist F. (2011). *"Simulation as a tool for mine planning"*. In Proceedings of Second International Future Mining, Melbourne, Australia, 273-278.

[8] Askari-Nasab, H., Torkamani, E., Badiozamani, M. M., and Tabesh, M. (2012). *"Alignment of short-term and operational plans using discrete event simulation"*. In SME Annual Meeting, 19-22.

[9] Salama, A., Greberg, J., and Schunnesson, H. (2014). *"The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection"*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 5(3): 256-271.

[10] Dindarloo, S. R., Osanloo, M., and Frimpong, S. (2015). *"A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines"*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(3): 209-219.

[11] Dumakor, N., Temeng, V., and Bansah, K. (2017). *"Optimising Shovel-Truck Fuel Consumption using Stochastic Simulation"*. Ghana Mining Journal, 17(2): 39-49.

[12] Baafi, E. Y., and Zeng, W. (2019). *"A Discrete-Event Simulation for a Truck-Shovel System"*. In Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018, Springer, Cham, 265-276.

[۱۳] شرکت مهندسین مشاور کان‌کاو؛ ۱۳۹۱؛ "**تخمین و ارزیابی ذخیره معدن خاک نسوز استقلال آباده**".

[14] Naylor, T. H., and Finger, J. M. (1967). *"Verification of computer simulation models"*. Management Science, 14(2): B-92-101.

[15] Caterpillar Inc., (2013). *"Caterpillar performance handbook"*. 43 ed.

[16] KOMATSU Inc., (2012). *"Komatsu Specifications & Application Handbook"*.

[۱۷] پایگاه داده‌های علوم زمین کشور؛ ۱۳۸۴؛ "**بانک اطلاعات اقتصادی استخراج روباز**".

[18] Western Mining Engineering Institute, (2007). Mine and Mill Equipment Costs: An Estimator's Guide, Aventurine. USA.

[1] Sturgul
[2] Rist
[3] Qing xia
[4] Baafi
[5] Kolonja
[6] Greberg
[7] Salama
[8] Dumakor
[9] Zeng
[10] Naylor and Finger
[11] High face validity
[12] Warm-up period

Imam Khomeini International University
Vol. 4, No. 3, Autumn 2019, pp. 9-11

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI:10.30479/jmre.2019.10060.1224

Analysis of Production Operations in Abadeh Fireclay Mine by Simulating the Haulage System

Alamdari S.[1], Basiri M.H.[2*], Ataeepour M.[3]

1- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Sa.alamdari@yahoo.com
2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
mhbasiri@modares.ac.ir
3- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
map60@aut.ac.ir

(Received: 04 Feb. 2019, Accepted: 26 Jun. 2019)

Abstract: The main production operations in most mines are drilling, blasting, loading, and hauling. Therefore, the optimization of each part causes an increase in profits and a decrease in mining costs. About 50 to 60 percent of mining costs are related to machinery, and the major share of them belong to loading and hauling machine. So, the correct utilization of the haulage fleet is very important step to increase productivity and to reduce production costs of the systems. In this study, by using simulation method and utilization of Arena software, the operation of the current production system of Abadeh Fireclay mine have been studied. Results showed that the productivity of loading machines in mine is low and due to the shortage of trucks the unit production costs of haulage system be increased. By using the high-capacity machines in mining operations, mine production will be increased and also production costs will be reduced significantly. Moreover, when flexible dispatching approach is used with proportionate loading and hauling machines, production will incr ease by 4 to 8 percent with a given number of trucks and also production costs will decrease by 5 to 7 percent.

Keywords: Mines production operation, Haulage fleet, Simulation, Flexible allocation, Abadeh Fireclay mine.

INTRODUCTION

In open pit mines, loading and hauling costs devote more than half of the overall operational costs. Therefore, selection and optimization of the haulage system are important task.

Various methods and techniques are developed and applied to identify, improve and make a decision about systems performance to solve problems, however depending on the type of systems and problems. Simulation is one of the most admired operations research tools to understand and improve the systems performance due to its ability to deal with complex models, flexibility, power, and ease of use [1]. Simulation technique has been used to identify and improve mining operations in various studies [2-10].

In this paper, the current performance of mine production has been studied by simulating haulage system of Abadeh Fireclay mine. After modelling the existing system in the mine, various scenarios have been proposed and studied for optimization of the haulage system according to the desired objectives. Also, the effect of the trucks flexible dispatching approach on the performance of the haulage system has been evaluated.

METHODS

Simulation is the imitation of the real world processes or systems over time. The stages of this research are based on the simulation process. Simulation activity usually consists of a number of stages as follows: 1-definition of purpose, 2- data acquisition, 3 model construction, 4- model verification, 5- model validation, 6- model experimentation, 7- analysis of results, 8-documentation, and 9- implementation [11].

By modeling the mine haulage system by ARENA software, the productivity of loading machinery, monthly production and production unit costs have been investigated. After validating the model, various scenarios for optimizing the fleet with the aim of increasing production and minimizing production costs, based on the technical and economic conditions of the mine, have been analyzed.

In the proposed scenarios, the application of flexible dispatching approach has been evaluated on the haulage system performance.

RESULTS AND CONCLUSIONS

Simulation is a powerful tool to study, analyse and improve the systems performance. In this paper, we used ARENA simulation software to analyse and improve the performance of haulage system at an open-pit fireclay mine.

Summary results of the various scenarios show in Table 1 to compare the performance of the haulage system of Abadeh fireclay.

Table 1. Results of various scenarios

Scenarios	Type of system	Loader number	Trucks capacity (tons)	Optimum number of trucks	Production (tons)	Production costs ($/tons)
1	current system	6	20 – 25 – 35	27	367260	0.56
	optimum system	6	20 – 25 – 35	52	626700	0.41
2	non-dispatching	6	35	32	577710	0.42
	dispatching	6	35	29	584010	0.43
3	non-dispatching	6	35	37	665810	0.42
	dispatching	6	35	32	692850	0.39
4	non-dispatching	4	100	17	1027045	0.39
	dispatching	4	100	14	1112310	0.37

The simulation of the current system shows that, if the optimal number of trucks allocate to each loader, mine production will increase by 70% and production costs will decrease by 27%.

Application of appropriate truck and loader in haulage system will increase mine production and also will decrease production costs significantly.

Moreover, when flexible dispatching approach is used with proportionate loading and hauling machines, production will be increased by 4 to 8 percent with a given number of trucks and also production costs will be decreased by 5 to 7 percent.

REFERENCES

[1] Alamdari, S. (2014*). "Optimization based on simulation of the production system in Abadeh fireclay mine"*. M.Sc. thesis, Tarbiat Modares University, Iran.

[2] Qing-xia, Y. (1982). *"Computer simulation of drill-rig/shovel operations in open-pit mines".* In Proceedings of the 14th

Conference on Winter Simulation, V. 2, San Diego, USA, 468-471.

[3] Ataeepour, M., and Baafi, E. (1999). *"Arena simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes"*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 13(3): 125-129.

[4] Kolonja, B., Vasiljevic, N., and Stanic, R. (2000). *"Computer simulation of the open pit transportation systems"*. Mine Planning and Equipment Selection, AA Balkema, Rotterdam, 613-618.

[5] Greberg, J. and Sundqvist F. (2011). *"Simulation as a tool for mine planning"*. In Proceedings of Second International Future Mining, Melbourne, Australia, 273-278.

[6] Askari-Nasab, H., Torkamani, E., Badiozamani, M. M., and Tabesh, M. (2012). *"Alignment of short-term and operational plans using discrete event simulation"*. In SME Annual Meeting, 19-22.

[7] Salama, A., Greberg, J., and Schunnesson, H. (2014). *"The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection"*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 5(3): 256-271.

[8] Dindarloo, S. R., Osanloo, M., and Frimpong, S. (2015). *"A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines"*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(3): 209-219.

[9] Dumakor, N., Temeng, V., and Bansah, K. (2017). *"Optimising Shovel-Truck Fuel Consumption using Stochastic Simulation"*. Ghana Mining Journal, 17(2): 39-49.

[10] Baafi, E. Y., and Zeng, W. (2019). *"A Discrete-Event Simulation for a Truck-Shovel System"*. In Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018, Springer, Cham, 265-276.

[11] Banks, J. (2009). *"Discrete Event System Simulation"*. 4th Edition, Pearson Education India.