



مقایسه ضریب تطبیق ناوگان حمل‌ونقل معدن مس سرچشمه با ناوگان حمل‌ونقل سایر معادن مورد بررسی

سامان قادری^۱، دکتر راحب باقرپور^۲، سعید میرزائی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، s.ghaderi@mi.iut.ac.ir

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، Bagherpour@cc.iut.ac.ir

۳- مشاور صنعتی، کارشناس ارشد مکانیک سنگ، امور معدن، مجتمع معدن مس سرچشمه، Mirzaei_s@nicico.com

چکیده

هدف صنعت معدن‌کاری، استخراج مواد معدنی جهت رفع نیاز مواد اولیه کارخانه‌ها برای پاسخگویی به نیازهای جامعه و خلق ثروت برای یک کشور است. استخراج معدن شامل حفاری، انفجار، بارگیری و باربری می‌شود. در مسئله هزینه‌های استخراج معدن، بیشترین هزینه مربوطه به بخش بارگیری و باربری معدن می‌شود که برای مدیریت ناوگان حائز اهمیت است. ضریب تطبیق یک شاخص برای نشان دادن بهره‌وری ناوگان شاول کامیون است. ناوگان شاول کامیون از نقطه نظر عملیاتی، نحوه تخصیص بهینه کامیون به شاول و ارتباط بین شاول و کامیون از نظر تعداد سیکل کاری شاول از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار ضریب تطبیق برای معدن مس سرچشمه که این معدن از نظر جغرافیایی در ۵۰ کیلومتری رفسنجان و ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان قرار دارد در دو شیفت کاری داده‌های مورد نظر جمع‌آوری شده است که با توجه به داده‌ها مقدار ضرب تطبیق برابر ۰.۴ و برای سایر معادنی که اطلاعات آن‌ها در دسترس بود مورد بررسی قرار گرفته‌اند در این پژوهش در بازه ۰.۹۸ تا ۱.۲ قرار گرفته بودند. معادن از نظر طول مسافت حمل‌ونقل با یکدیگر تفاوت داشته اما ضریب تطبیق آن‌ها نزدیک به یک بوده است. هرچه مقدار ضریب تطبیق به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده این بود که دستگاه‌های بارگیری زمان کمتری برای رسیدن کامیون سپری کرده‌اند و بهره‌وری ناوگان در سطح قابل قبولی قرار داشته است.

کلمات کلیدی: ضریب تطبیق، ناوگان ناهمگن، مدیریت ناوگان



Comparison of matching coefficient of Sarcheshme copper mine transport fleet with the transport fleet of other investigated mines

Saman Qaderi ¹, Dr. Raheb Bagherpour ², Saeed Mirzai ³

1- Master's student, Isfahan University of Technology, Faculty of Mining Engineering,
s.ghaderi@mi.iut.ac.ir

2- Professor, Isfahan University of Technology, Faculty of Mining Engineering,
Bagherpour@cc.iut.ac.ir

3- Industrial consultant, senior expert in rock mechanics, mining affairs, Sarcheshme copper mining complex, Mirzaei_s@nicico.com

Abstract

The goal of the mining industry is to extract minerals to meet the raw material needs of factories, thereby responding to societal demands and generating wealth for the country. Mining involves drilling, blasting, loading, and transportation. In terms of extraction costs, the largest portion is related to loading and transportation, which is crucial for fleet management. The matching coefficient is an indicator used to demonstrate the productivity of the shovel-truck system. From an operational perspective, the optimal allocation of trucks to shovels and the relationship between shovels and trucks in terms of the number of working cycles of the shovels is very important. The matching factor for the Sarcheshmeh copper mine, located 50 kilometers from Rafsanjan and 160 kilometers southwest of Kerman, was collected over two work shifts. Based on the data, the matching coefficient was found to be 0.4, while other mines examined had coefficients ranging from 0.98 to 1.2. Although the mines varied in terms of transportation distances, their matching coefficients were close to one. The closer the matching coefficient is to one, the less time loading equipment spends waiting for trucks, indicating that fleet productivity is at an acceptable level.

Keywords: matching factor, heterogeneous fleet, fleet management



۱- مقدمه

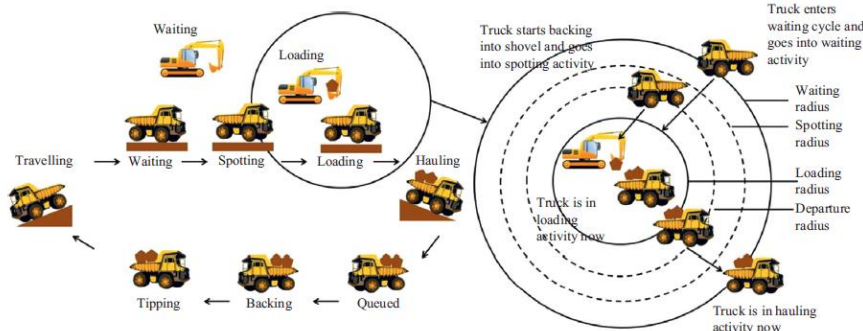
هدف اصلی یک فعالیت معدنی، تولید مواد معدنی برای مصرف جامعه است. در صورت موفقیت‌آمیز بودن فعالیت، تولید مواد معدنی با کمترین هزینه انجام می‌شود و مابقی سود صرف توسعه معادن و استخراج سنگ معدن می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در هر معدن، انتخاب ماشین‌آلات و سازگاری آن است. به‌طور کلی انتخاب ماشین‌آلات به‌منظور دستیابی به یک هدف خاص انجام می‌شود و ماشین‌آلات انتخاب‌شده باید به‌طور مناسب با محیط کار و سایر تجهیزات سازگار شود. انتخاب ماشین‌آلات بر اساس محدودیت‌هایی است که باید در هر معدن در نظر گرفته شود. عملیات واحد یک معدن روباز شامل حفاری، انفجار، بارگیری و حمل‌ونقل است. در این میان، بیشترین هزینه استخراج روباز به ترتیب مربوط به بارگیری و حمل‌ونقل است [۱]. حمل‌ونقل به یک پارامتر حیاتی تبدیل‌شده و بنابراین عامل مهم در بهینه‌سازی تولید مواد معدنی برای معادن روباز عمیق در عملیات استخراج، کامیون‌ها از شاول‌ها به سمت تخلیه یا سنگ‌شکن حرکت کرده و برمی‌گردند، تبدیل‌شده است. مشکل انتخاب تجهیزات برای معدن بسیار مهم است. صنعت معدن کاری نیاز به انتقال حجم بسیار زیادی از مواد در طول عمر چندساله معدن دارد. و علاوه بر این، تصمیم‌گیرندگان معدن در انتخاب ناوگان مناسب شاول و کامیون باید اطمینان حاصل کنند که نیازهای جابجایی مواد یا حداقل هزینه را برآورد می‌کند. بارگیری و باربری فعالیت‌های اصلی طرح حمل‌ونقل معدن هستند که بیش از ۵۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی را تشکیل می‌دهند [۲]. یک سیستم استخراج شاول کامیون، به‌طور کلی از شاول‌ها و کامیون‌های مرتبط تشکیل‌شده است. سنگ معدن و باطله توسط شاول‌ها در کامیون‌ها بارگیری می‌شود و کامیون‌ها بین محل‌های بارگیری و باطله یا سنگ‌شکن‌ها حمل می‌شوند [۳]. در معادن مهم‌ترین پارامتر انتخاب تعداد و اندازه تجهیزات حمل‌ونقل، ناوگان شاول کامیون و تخصیص کامیون‌ها به شاول‌ها است. عدم سازگاری تجهیزات بارگیر با باربر (شاول کامیون) منجر به کاهش بهره‌وری ناوگان حمل‌ونقل می‌شود. این بدان معناست که کامیون‌ها زمان بیشتری را در صف برای تخلیه داخل سنگ‌شکن یا کنار شاول‌ها برای بارگیری می‌گذارند بدون اینکه تولید موثری در شیف‌کاری خود داشته باشند. در نتیجه هزینه‌های عملیاتی افزایش پیدا می‌کند. وجود یک رابطه بین تجهیزات بارگیری و باربری کمک‌کننده به بهبود مدیریت ناوگان و بهبود عملکرد بهره‌وری و افزایش تولید ناوگان حمل‌ونقل است. بهره‌وری، درصدی از زمان در دسترس بودن ماشین که صرف کار مفید و تولید می‌شود. ضریب تطبیق به عنوان شاخص عملکرد بهره‌وری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب تطبیق، رسیدن کامیون به نرخ سرویس دهی بارگیر است. توانایی‌های ضریب تطبیق از جمله بهبود بهره‌وری ناوگان ناهمگن حمل‌ونقل، تعیین تعداد مناسب کامیون برای هر ماشین بارگیری. نتیجه این ضریب موجب به افزایش تولید مواد معدنی می‌باشد [۴، ۵، ۶، ۷]. ناوگان ناهمگن به ناوگانی گفته می‌شود که ظرفیت‌های مختلفی از تجهیزات بارگیری و باربری در ناوگان حمل‌ونقل قرار گرفته باشد. برای معدن مس سرچشمه ضریب تطبیق برای هر یک از دستگاه‌های بارگیری محاسبه شده است.

۲-۱ ناوگان شاول کامیون

نوعی سیستم حمل‌ونقل مواد است که به‌طور گسترده در معادن روباز در مقیاس جهانی استفاده می‌شود که عموماً از چندین کامیون حمل‌ونقل و تجهیزات بارگیری مانند شاول تشکیل‌شده است [۸]. در شکل ۱-۲ به‌خوبی عناصر اصلی عملیاتی برای یک چرخه کامیون شامل استقرارگیری، بارگیری، باربری، تخلیه، حمل خالی، صف و تاخیرهای عملیاتی را نشان داده است [۳]. مهم‌ترین سیستم، از نظر جابجایی کارآمد مواد، سیستم کامیون-شاول است. از نقطه نظر عملیاتی، نحوه تخصیص بهینه کامیون به شاول از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا مقادیر زیادی سنگ معدن و باطله باید از داخل پیت در مسیر نسبتاً طولانی و شیب دار به مقصد تحویل داده شود [۹]. از طرفی در سیستم حمل‌ونقل، شاول دارای برد کوتاه است و هدف اصلی آن بارگیری است. از سوی دیگر کامیون تقریباً محدودیتی در حمل‌ونقل ندارد اما توانایی بارگیری خودش را نیز ندارد. با چشم‌پوشی از ماشین‌هایی که اساساً برای مسافت‌های کوتاه هستند، کامیون به‌عنوان وسیله‌ای بسیار انعطاف‌پذیر برای جابجایی مواد معدنی در مسافت‌های طولانی در نظر گرفته می‌شود. سیستم حمل‌ونقل کامیون طراحی‌شده است تا عملیات خارج از محدوده شهری را پوشش دهد که عمدتاً از موتور دیزلی استفاده می‌کنند. نسبت به رقبای خود مزایای تحرک عالی با فشرده بودن کار آن‌ها. هزینه نیروی انسانی منجر به حرکت مداوم به سمت افزایش ظرفیت کامیون‌ها شده است. برای بهبود استقرار چنین کامیون‌هایی، کنترل رادبویی به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. حمل‌ونقل مواد توسط



شاول کامیون و نوار نقاله بخش عمده‌ای از حمل‌ونقل مواد معدنی معادن سطحی را بر عهده گرفته‌اند. که در این بین شاول کامیون بیشترین استفاده را دارد. شاول کامیون به دلیل انعطاف پذیری و صرفه جویی در مقیاس بزرگ، در ۹۵ درصد ناوگان معادن سطحی جهان نسبت به نوار نقاله به کار گرفته‌اند. حمل‌ونقل از طریق نوار نقاله لازمه دانه بندی مناسب مواد برای نوارنقاله و داشتن خوراک دهند که بتوان نوار نقاله را تغذیه کند که از این رو سیستم نوار نقاله همراه با سنگ شکن داخل پیت به کار برده می‌شود. حمل و نقل کامیون یک عملیات بسیار پر انرژی و لازمه داشتن نیروی کار زیاد به طوری برای هر کامیون ۳ اپراتور برای سه شیفت در شبانه روز است. همچنین با خطرات بهداشتی و ایمنی شغلی قابل توجهی همراه است و از طریق تولید گرد و غبار و صدا بر محیط زیست تأثیر می‌گذارد. از این رو در نظر گرفتن سیستم توزیع مناسب، تعداد مناسب ناوگان و انتخاب ظرفیت کامیون‌ها متناسب با حجم صندوقه شاول‌ها برای کاهش هزینه‌های این سیستم اهمیت و ضرورت این روش را بالا برده است [۱۱، ۱۲]. انتخاب و اندازه ضعیف تجهیزات می‌تواند منجر به هزینه‌های عملیاتی بالاتر و عملکرد اقتصادی پایین‌تر عملیات معدن شود. با این حال، انتخاب هوشمندانه و اندازه تجهیزات به روشی سازگار با یکدیگر و با شرایط محیطی و عملیاتی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی قابل توجهی شود؛ بنابراین، انتخاب تجهیزات و اندازه ناوگان بارگیری و به‌ویژه اندازه ناوگان حمل‌ونقل که مواد را جابجا می‌کند تأثیر عمده‌ای بر کارایی کل ناوگان و هزینه‌های عملیاتی دارد [۱۳]. سیستم کامیون و شاول به دلیل نرخ تولید بالا، انعطاف‌پذیری عالی، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه نسبتاً پایین و قابلیت نگهداری خوب، روش غالب بارگیری و جابجایی مواد در معادن روباز است [۹].



شکل ۱-۲ چرخه کاری شاول کامیون [۱۴]

۳-۱ پیشینه پژوهش

برت و کاتاكا در سال ۲۰۰۷ روش جدیدی را برای محاسبه ضریب تطبیق برای ناوگان ناهمگن ارائه می‌کنند که در آن برای نرخ ورود کامیون، میانگین زمان چرخه کامیون‌ها استفاده می‌کند و برای نرخ سرویس دهی لودرها مختلف از کم‌ترین مضرب مشترک زمان چرخه لودرها استفاده می‌کند. ناوگان ناهمگن لودر - کامیون متشکل از ۱۵ کامیون ۱۵۰ تنی و ۷ کامیون ۲۳۰ تنی با دو لودر با ظرفیت ۶۰ و ۳۸ تنی، مقدار ضریب تطبیق برابر ۰.۹۹۴ به دست می‌آید که نزدیک به ۱ است. در نتیجه این روش محاسبه ضریب تطبیق برای ناوگان ناهمگن دقت بیشتری دارد [۴]. چاووسکی و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای بهبود مدیریت ناوگان حمل‌ونقل با استفاده از ضریب تطبیق، یک مدل بر اساس روش‌های ابتکاری دیسپچینگ در ۳ ناوگان ناهمگن ارائه کرده است. با احتساب خرابی تجهیزات میانگین تولید از هر روش ابتکاری به تدریج ۲۵ درصد کاهش یافته است. برای ایجاد یک ناوگان ناهمگن در جهت افزایش تولید و کارایی بهتر ۱۸ سناریو اطراف ناوگان واقعی تعریف شد. نتایج این ۱۸ سناریو با عملیات واقعی و نسبت به یکی از روش‌های ابتکاری (MTCT) * مقایسه شد. با توجه به سناریوها و ضریب تطبیق ناوگان ناهمگن متشکل از ۲۲ کامیون کوچک و ۳۶ کامیون بزرگ، ۱۶ شاول کوچک، ۴ شاول بزرگ تولید را ۱۰ درصد بالاتر از تولید برنامه‌ریزی شده و کاهش هزینه عملیاتی کامیون‌ها ۶ درصد، به دست آورده است [۱۴]. ژانگ در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدل شبیه سازی رویداد گسسته تحت عنوان مدل (TSJSim) † برای

* Minimum truck cycle time

† Truck and shovel Jaamsim simulator



بهینه کردن عملیات حمل‌ونقل توسط شاول-کامیون استفاده کرده اند. همچنین این مدل شبیه سازی برای تخصیص کامیون‌ها از چهار مدل استفاده کرده است. TSJSim چهار ماژول تخصیص کامیون را ارائه می‌دهد: تخصیص کامیون ثابت (FTA)*، به حداقل رساندن نیاز تولید شاول (MSPR)†، به حداقل رساندن زمان انتظار کامیون (MTWT)‡ و به حداقل رساندن زمان نیم چرخه کامیون (MTSCT)§ از جمله الگوریتم ژنتیک (GA)** و ارسال منجمد. الگوریتم (FDA)††. از سناریوهای مختلف در مدل، برای دانستن بهتره تاثیرات، ضریب تطبیق، نقاط تصمیم‌گیری، استراتژی‌های تخصیص کامیون، بر عملکرد سیستم استفاده شده بود. نتیجه به دست آمده در وهله اول، استراتژی‌های تخصیص کامیون با اندازه مختلف ناوگان نتایج مشابهی داشتند اما با افزایش اندازه ناوگان تناژ تولید شده افزایش یافت و زمان صف با اندازه ناوگان رابطه مستقیم دارد. ضریب تطبیق برای هر ناوگان نزدیک به یک است [۱۵]. در سال ۲۰۱۸ دباغ و با قرپور رابطه ضریب تطبیق را توسعه دادند و با الگوریتم کلونی مورچه‌ها مقایسه کردند. در مطالعه برای ناوگان ناهمگن ضریب تطبیق محاسبه شد. به دلیل ناهمگن بودن ناوگان تخصیص کامیون‌ها به لودرها پیچیده است به همین خاطر از ضریب تطبیق دقیق استفاده شد. ضریب تطبیق دقیق برای هر دستگاه بارگیر جدا محاسبه می‌شود. در الگوریتم کلونی مورچه‌ها، زمان بیکاری ماشین‌ها را در نظر نمی‌گیرد. و این باعث می‌شود که الگوریتم کلونی مورچه‌های کم یا بیش از حد تعداد مناسب کامیون به لودرها ارسال کند. با مقایسه این دو می‌توان فهمید که ضریب تطبیق دقیق نرخ تولید را ۱۰.۶ درصد افزایش داده ولی الگوریتم کلونی مورچه‌ها نرخ تولید را ۱ درصد افزایش داده بنابر این ضریب تطبیق دقیق برای ناوگان ناهمگن بسیار مفید تر است [۱۶]. در سال ۲۰۱۹ دباغ و باقر پور برای بهینه سازی ناوگان حمل‌ونقل با الگوریتم رقابتی امپریالیستی، افزایش مواد معدنی در راستای ظرفیت سنگ شکن معدن. مشخصات ناوگان معدن ۲۳ کامیون ۳۵ تنی و ۴ کامیون ۵۰ تنی و ۸ دستگاه بارگیر را شامل می‌شود. در این مطالعه از ضریب تطبیق برای پیدا کردن احتمال بیکاری دستگاه‌های بارگیری با توجه به تعداد کامیون، ظرفیت و زمان چرخه کامیون‌های اختصاص داده شده به هر دستگاه بارگیری استفاده شده است. ضریب تطبیق برای هر دستگاه بارگیر به طور جداگانه محاسبه می‌شود. الگوریتم رقابتی امپریالیستی بهترین ناوگان را انتخاب می‌کند. در نتیجه زمان بیکاری دستگاه بارگیری به حداقل کاهش پیدا کرده و تولید را ۴.۴ درصد افزایش می‌دهد [۱۶]. اوزدمیر و کمرال در سال ۲۰۱۹ یک سیستم دیسپچینگ که شامل دو مرحله است را برای افزایش بهره‌وری ناوگان شاول کامیون ارائه کردند. مرحله اول با یک روش بهینه سازی بر پایه شبیه سازی که عدم قطعیت‌های معدن را نیز در نظر گرفته است. مرحله دوم کامیون‌ها با برنامه‌ریزی خطی به طور هم‌زمان به شاول‌ها اعزام می‌شوند. در این مرحله ضریب تطبیق به عنوان معیار سازگاری تجهیزات ناوگان حمل‌ونقل با یکدیگر به کار برده می‌شود. نتیجه، این مدل با افزایش ۹.۴٪ تولید نسبت به سیستم قبلی معدن عملکرد بهتری را ارائه کرده است [۱۷]. چنگ در سال ۲۰۱۹ با استفاده از فرمول برت برای ناوگان ناهمگن معدن زغال سنگ بلاو موجان به محاسبه ضریب تطبیق پرداخت. مقدار ضریب تطبیق برای این معدن با ناوگانی که از ۷ کامیون و ۴ بیل مکانیکی تشکیل شده بود برابر ۱.۰۹ بدست آمد که این مفهوم را می‌رساند که در این ناوگان کامیون‌ها در سایت بارگیری زمان انتظار برای بارگیری سپری می‌کنند [۱۸]. ایندراجیا و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای حل مشکل معدن کنانای که دارای سه پیت، کنانگا، داهلیا و آنگرگک از ضریب تطبیق و تئوری صف استفاده کرده‌اند. مشکل این معدن بهینه نبودن مدیریت ناوگان حمل‌ونقل، بالا بودن زمان دسترسی به دلیل عدم تطابق تعداد باربرها با لودرها و ظرفیت بیش از حد کامیون‌ها که موجب ایجاد صف شده بود. بدین ترتیب با تخمینی که از ضریب تطبیق و تحلیلی که بر اساس تئوری صف به دست آمد تعداد مناسب به این صورت تبدیل شد. ۲ کامیون از ناوگان آنگرگک به داهلیا و کنانگا داده شد. ناوگان آنگرگک با ۱ لودر و ۶ کامیون دارای ضریب تطبیق ۱.۰۱، ناوگان داهلیا با ۱ لودر و ۵ کامیون دارای ضریب تطبیق ۰.۹۸ و ناوگان کنانگا با ۱ لودر و ۵ کامیون با ضریب تطبیق ۱.۰۴. با استفاده از شبیه سازی معدن کنانایی به هدف برنامه ماهان مربوطه با قابلیت بالا دست می‌یابند [۲۰]. قاضیانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با مقایسه تخصیص ثابت کامیون‌ها و یک سیستم توزیع انعطاف‌پذیر

* Fixed Truck Assignment

† Minimising shovel production requirement

‡ Minimum truck wait time

§ Minimising Truck Semi-cycle Time

** Genetic Algorithm

†† Frozen Dispatching Algorithm

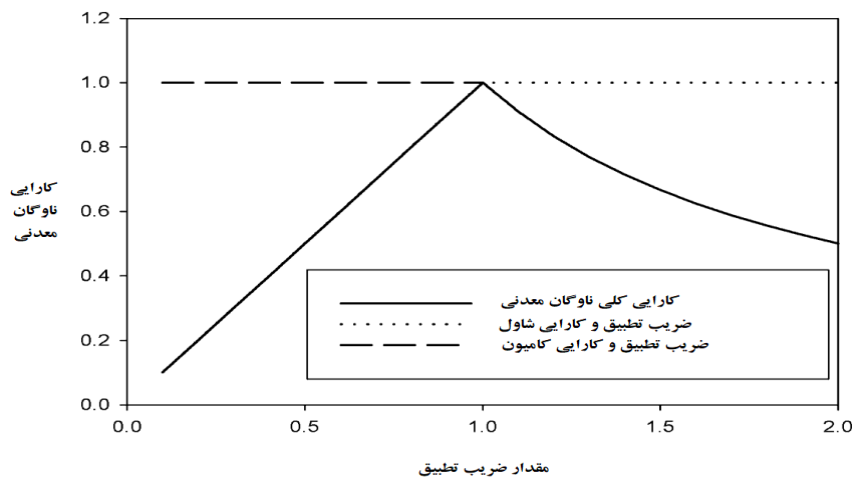


با ناوگان ناهمگن کامیون‌ها که متشکل از ده کامیون ۳۵ تنی، دو کامیون ۶۰ تنی، دو کامیون ۱۰۰ تنی و پانزده کامیون ۱۴۴ تنی. نتیجه گرفته‌اند که سیستم توزیع انعطاف‌پذیر منجر به افزایش ۲۰ درصد تولید، ۲۵ درصد بهره‌وری و کاهش ۲۰ درصد زمان انتظار کامیون‌ها می‌شود [۲۱].

۳- روش انجام پژوهش

مفهوم ضریب تطبیق معیاری از بهره‌وری ناوگان را فراهم و به بهبود مدیریت ناوگان نیز هم کمک می‌کند. این نسبت به این دلیل نامیده می‌شود که می‌توان از آن برای مطابقت با نرخ ورود کامیون به نرخ سرویس دهی شاول استفاده کرد. این نسبت با گنجاندن زمان بارگیری در هر دو زمان چرخه شاول و کامیون، خود را از ظرفیت‌های تجهیزات و از این نظر، بهره‌وری بالقوه حذف می‌کند. همچنین، این فرمول نسبت زمان رسیدن کامیون به نرخ سرویس دهی شاول را ثبت می‌کند. داگلاس در سال ۱۹۶۴ برای بهبود عملکرد شاول رابطه‌ای را ارائه داده، که با توجه به این رابطه تعداد مناسبی از کامیون‌ها را به شاول اختصاص داده است. در سال ۱۹۶۸ پیترسون و مورگان رابطه‌ی ساده تری نسبت به رابطه داگلاس را ارائه داده‌اند و اسم رابطه خود را ضریب تطبیق (MF)* نام گذاری کردند. ضریب تطبیق، نسبت رسیدن نرخ کامیون به نرخ سرویس دهی شاول گفته می‌شود. از ضریب تطبیق می‌توان برای ارائه بهره‌وری ناوگان شاول کامیون استفاده کرد. با ضریب تطبیق می‌توان رابطه‌ی بین تجهیزات با یکدیگر را یافت. بدین صورت که اگر ضریب تطبیق بیش از ۱ باشد، این مفهوم را می‌رساند که تعداد کامیون‌ها در ناوگان بیش از حد است و باید در صف بایستند. اگر ضریب تطبیق مطابق با ۱ باشد یعنی تعداد کامیون‌ها در سیستم مناسب است و زمان زیادی را در صف نمی‌گذرانند. در آخر اگر ضریب تطبیق کمتر از ۱ باشد کمبود کامیون در سیستم وجود دارد و شاول‌ها باید منتظر رسیدن کامیون باشند [۲۱ و ۵ و ۴]. شکل ۲ ارتباط بین ضریب تطبیق با کارایی ناوگان را به خوبی نشان می‌دهد. اگر ضریب تطبیق یک باشد هم کارایی کامیون‌ها و هم کارایی شاول‌ها مورد قبول است و ناوگان در بهترین حالت خود مشغول به کار است. زمانی که ضریب تطبیق بیشتر از یک باشد شاول‌ها بدون تلف شده مشغول کار هستند اما کامیون‌ها در سایت بارگیری زمان انتظار برای بارگیری سپری می‌کنند که با توجه به شیب نمودار کارایی کلی ناوگان را کاهش می‌دهد. اما اگر ضریب تطبیق کمتر از یک باشد کامیون‌ها بدون زمان انتظار در سایت بارگیری مشغول کار هستند اما شاول‌ها زمان تلف شده سپری می‌کنند برای رسیدن کامیون‌ها به سایت بارگیری که با توجه به شیب نمودار کارایی کلی ناوگان کاهش پیدا می‌کند اما شیب بیشتر که نشان دهنده اهمیت شاول‌ها نسبت به کامیون‌ها است و تاثیر ضریب تطبیق کمتر از ۱ بر روی کارایی ناوگان نسبت به زمانی که ضریب تطبیق بیشتر از یک باشد.

* Match factor



شکل ۲ ارتباط ضریب تطبیق با کارایی ناوگان حمل و نقل شاول کامیون [۲۱]

$$M_B = \frac{(\text{Loader productivity})}{(\text{truck productivity})} \quad (1)$$

داگلاس رابطه (۱) را منتشر کرد که تعداد مناسبی از کامیون‌ها، که تعادلی در خروجی شاول تعیین کرده باشد. زمان چرخه کامیون به عنوان مجموع زمان‌های حمل و نقل که شامل زمان حمل، تخلیه و بازگشت است [۴].

رابطه (۲) حالت ساده‌تری از رابطه داگلاس را بیان می‌کند که توسط مورگان پترسون ارائه شد به شرح زیر می‌باشد [۴].

$$MF = \frac{(\text{number of truck})(\text{loader cycle time})}{(\text{number of loaders})(\text{truck cycle time})} \quad (2)$$

رابطه مورگان پترسون برای ناوگان همگن و با فرض اینکه یک مورد شاول یا لودر در ناوگان وجود دارد ارائه شده است. برت و کاتاکا رابطه (۳) را برای ناوگان ناهمگن که هم شاول‌ها یا لودرها در آن ناهمگن باشند یعنی از یک نوع نباشند و هم کامیون‌ها ناهمگن باشند و برای در نظر گرفتن انواع کامیون در ناوگان از میانگین زمان چرخه کامیون‌ها در رابطه خود استفاده کرده است و این رابطه با توجه به نرخ ورود کامیون و نرخ سرویس دهی شاول و یا لودر ارائه شده است [۴].

$$MF = \frac{(\sum_{i \in X} n t_i) \times \sum_{j \in Y} \left[(\sum_{i \in X} n t_i) \times l c m (u l)_j \right]}{\left(\sum_{j \in Y} n s_j \frac{l c m (u l)_j}{u l_{i j}} \right) \times \sum_{i \in X} (n t_i t c_i)} \quad (3)$$

$l c m (u l)$ کمترین مضرب مشترک زمان بارگیری برای همه شاول‌های نوع j ، $u l_j$ مدت زمان سیکل شاول نوع j زمانی که مشغول بارگیری یک نوع کامیون است. $n s_j$ تعداد شاول‌های نوع j ، $l c m (u l)_j$ کمترین مضرب مشترک زمان بارگیری همه کامیون‌ها با شاول نوع j ، $l c m (u l)_j$ کمترین مضرب مشترک مدت زمان سیکل شاول نوع j زمانی که با کامیون نوع i کار می‌کند. در فرمول ضریب



تطبيق nt_i تعداد کامیون نوع i ، tl_i زمان مورد نیاز برای بارگیری کامیون i با شاول، tc_i مدت زمان سیکل کامیون i ، ns تعداد شاول‌ها.

از رابطه (۴) می‌توان ضریب تطبيق را برای هر یک از شاول‌ها با توجه به تعداد کامیونی که در اختیار دارد حساب کرد [۴].

$$MF = \frac{(\text{زمان سیکل شاولی}) \times (\text{تعداد کامیون ها})}{(\text{زمان سیکل کامیون}) \times (\text{تعداد شاولی})} \quad (۴)$$

$$MF = \frac{(\sum_{i \in X} nt_i) \times \sum_{i \in X} (nt_i tl_i)}{ns \sum_{i \in X} (nt_i tc_i)} \quad (۵)$$

رابطه (۵) زمانی استفاده می‌شود که در ناوگان یک نوع شاول‌ها از یک نوع اما کامیون‌ها از یک نوع نیستند و با ظرفیت‌های مختلفی در ناوگان حضور داشته باشند [۴].

۱-۳ معادن مورد مطالعه

معدن مورد مطالعه معدن مس سرچشمه رفسنجان است. این معدن از نظر جغرافیایی در ۵۰ کیلومتری رفسنجان و ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان قرار دارد. داده‌های لازم برای این پژوهش از ناوگان شاول کامیون معدن مس سرچشمه جمع‌آوری شده است. ناوگان حمل‌ونقل معدن دارای ۱۶ شاول و ۳۸ کامیون است. ناوگان شاول این معدن از دو نوع شاول که ۶ شاول مدل TZ از شماره ۱۱ تا ۱۶ با حجم صندوقه ۱۱ متر مکعب است و شاول‌های شماره ۱۵ و ۱۶ تازه به این ناوگان پیوسته‌اند. از شماره ۱ تا ۱۰ این ناوگان شاول‌های P&H را شامل می‌شود که قدمت ۴۰ ساله دارند. شاول‌های شماره ۱ تا ۸ این ناوگان دارای حجم صندوقه ۹ متر مکعب هستند و شاول‌های شماره ۹ و ۱۰ بزرگ‌ترین شاول‌های این معدن با حجم صندوقه ۱۵ متر مکعب هستند. از این تعداد شاول هر شیفت بین ۶ تا ۷ شیفت فعال هستند بسته به برنامه معدن تعداد شاول مورد استفاده در هر شیفت متغییر است ما بقی شاول‌ها یا به علت فرسودگی کنار گذاشته شده‌اند یا در اختیار تعمیرگاه قرار دارند. در هر شیفت ۶ تا ۷ شاول فعال است و به هر کدام از شاول‌ها ۵ تا ۶ کامیون تا پایان شیفت اختصاص می‌دهند. معدن زغال سنگ بلاک کانانیا واقع در اندونزی از سه پیت، آنگرگک، داهلیا، کنانگا تشکیل شده است. برای استخراج از سه پیت معدن کانانیا، از ناوگانی که متشکل از سه بیل مکانیکی و ۱۶ کامیون استفاده شده است. معدن زغال سنگ بلاوموجان واقع در مالزی دارای ۷ کامیون و ۴ شاول ناوگان خود را تشکیل شده بود. چاووسکی و همکاران با استفاده از داده‌های شرکت بانپو ناوگانی متشکل از ۲۲ کامیون کوچک و ۳۶ کامیون بزرگ، ۱۶ شاول کوچک، ۴ شاول بزرگ با اندازه ناوگان ۶۸ مورد بررسی قرار گرفته شد. برای محاسبه ضریب تطبيق نیاز به زمان چرخه کاری کامیون و شاول است که چرخه کاری کامیون شامل، بارگیری، زمان رفت با بار، زمان مانور، تخلیه، زمان برگشت بدون بار، زمان انتظار برای بارگیری، زمان مانور و بارگیری و سیکل شاول شامل مدت زمان بارگیری هر نوع کامیون که به شاول مورد نظر اختصاص پیدا کرده است. که با ایستادن در سایت بارگیری و داده‌های بخش دیسپچینگ داده‌های لازم برای محاسبه ضریب تطبيق بدست می‌آید. برای معدن مس سرچشمه این داده‌ها در دو شیفت جمع‌آوری شده است.



۴- مقدار ضریب تطبیق برای هر معدن

با استفاده از زمان‌های به دست آمده از ناوگان شاول کامیون به محاسبه ضریب تطبیق برای کل ناوگان معدن مس سرچشمه و هر یک از شاول‌های این معدن به طور جداگانه صورت گرفته است. برای محاسبه ضریب تطبیق از فرمول‌هایی که در فصل سوم گفته شده، استفاده شده است. ناوگان شاول کامیون معدن مس سرچشمه، به صورت ناوگان ناهمگن شناخته شده است. ناوگان ناهمگن بدین معنی است که ماشین‌آلات متفاوتی از نظر حجم یا ظرفیت وجود داشته باشد. در ناوگان حمل‌ونقل معدن مس سرچشمه ۳ نوع شاول با حجم صندوقه متفاوت و دو نوع کامیون با ظرفیت متفاوت وجود دارد؛ لذا این ناوگان، ناوگان ناهمگن نام گرفت. در این ناوگان میانگین زمان سیکل کامیون ۱۳۶ تنی ۲۴۴۸ (۴۰.۸ دقیقه) ثانیه و کامیون ۲۴۰ تنی ۲۴۹۰ (۴۱.۵ دقیقه) ثانیه برآورد شد. برای کامیون‌های ۱۳۶ تنی زمان بارگیری شاول یک ۲۱۹ ثانیه (۳.۶ دقیقه)، شاول نه و ده ۱۳۲ ثانیه (۲.۲ دقیقه) و برای شاول‌های یازده، پانزده و شانزده این عدد برابر ۱۹۲ ثانیه (۳.۲ دقیقه) است. مدت زمان بارگیری کامیون‌های ۲۴۰ تنی توسط شاول‌های نه و ده ۲۲۸ ثانیه (۳.۸ دقیقه) است. جدول ۱ با توجه به اعداد بالا و معادله (۳) مقدار ضریب تطبیق محاسبه شد که این فرمول برای ناوگان ناهمگن استفاده می‌شود.

جدول ۱ اطلاعات مربوط به محاسبه ضریب تطبیق کل ناوگان

شماره شاول	سیکل کامیون (دقیقه)		کمترین مضرب مشترک زمان بارگیری
	۱۳۶ تنی	۲۴۰ تنی	
۱۶	۴۰.۵	-	۱۵۴۱۷۶
۱۱	۴۰.۵	-	
۱۵	۳۰/۲	-	
۹	۴۱	۳۸	
۱۰	۵۰	۴۵	
۱	۴۳	-	
کل ناوگان	۴۰.۸	۴۱.۵	MF=۰/۴

کمترین مضرب مشترک بارگیری کامیون‌ها از شاول‌ها برای محاسبه ضریب تطبیق برابر ۱۵۴۱۷۶ ثانیه است که در جدول ۱ نشان داده است که با جایگذاری در فرمول (۳) ضریب تطبیق برابر ۰/۴ بدست می‌آید. مقدار ضریب تطبیق برای ناوگان معدن مس سرچشمه که اطلاعات ناوگان در جدول ۲ نشان داده. این مقدار بدین معنی است که شاول‌ها باید منتظر کامیون بمانند از این رو میانگین زمان انتظار ثبت شده برای شاول‌های مورد مطالعه ۴۰۴ ثانیه (حدوداً ۶.۷ دقیقه) می‌باشد. در صنعت معدنکاری ترجیح به این است که کامیون منتظر شاول برای بارگیری بماند.

جدول ۲ مقدار ضریب تطبیق ناوگان ناهمگن شاول کامیون معدن مس سرچشمه

اندازه ناوگان	شاول tz	شاول P&H	کامیون ۲۴۰ تنی	کامیون ۱۳۶ تنی	ضریب تطبیق
۳۸	۳	۳	۴	۳۴	۰/۴

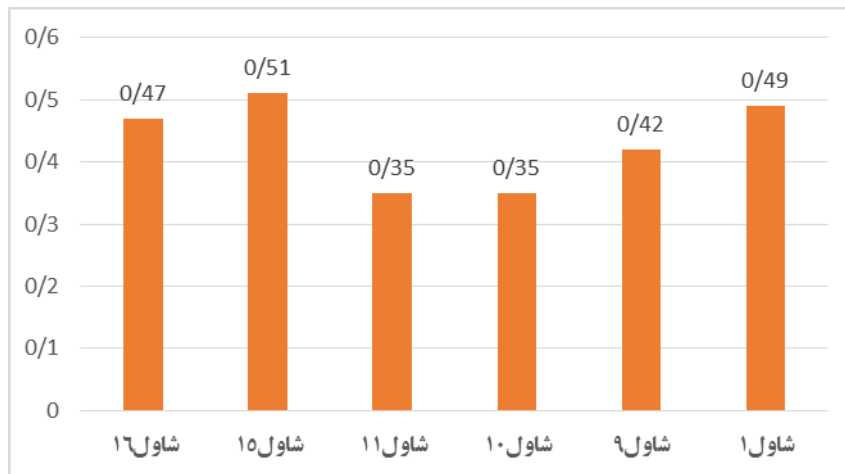


مقدار ضریب تطبیق با استفاده از معادله (۴) برای هر شاول جدا محاسبه شده است و برای شاول ۹ و ۱۰ از فرمول (۵) استفاده شده است زیرا کامیون‌های این دو شاول همگن نیستند. این تعداد کامیون برای هر شاول طبق شرایط معدن که در ابتدای هر شیفت به شاول‌ها اختصاص داده بود در نظر گرفته شد.

جدول ۳ ضریب تطبیق برای هریک از شاول‌های معدن مس سرچشمه

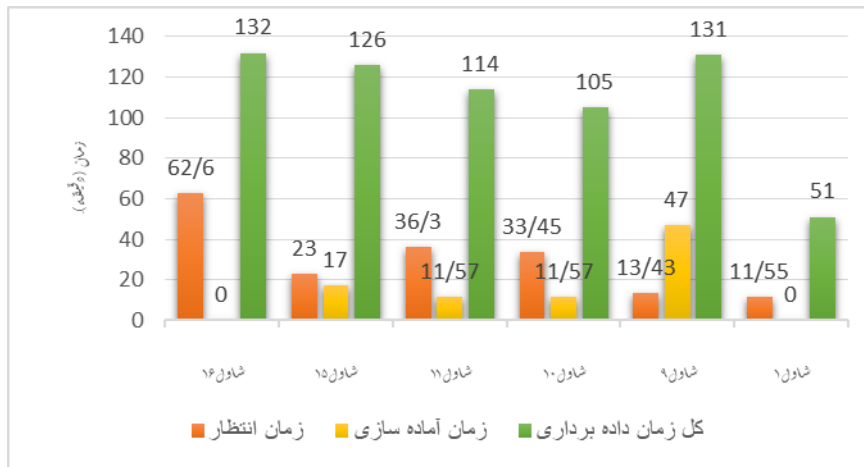
شماره شاول	سیکل کامیون (ثانیه)		ضریب تطبیق
	۲۴۰ تنی	۱۳۶ تنی	
۱۵	-	۱۶۸۳	۰/۵۱
۱۶	-	۲۲۲۸	۰/۴۷
۱۱	-	۲۴۳۶	۰/۳۵
۱۰	۲۳۶۰	۲۵۹۰	۰/۳۹
۹	۲۱۴۶	۲۱۷۳	۰/۴۲
۱	-	۲۱۹۹	۰/۴۹

شکل ۳ مقدار ضریب تطبیق هر یک از شاول‌های معدن سرچشمه را بر روی نمودار نشان داده است که کمترین مقدار ضریب تطبیق مربوط به شاول ۱۱ است. همانطور که شکل ۳ نشان داد ضریب تطبیق شاول‌ها کمتر از یک می‌باشند و این نشان دهنده این است که شاول‌ها زمان انتظار زیادی برای رسیدن کامیون‌ها سپری کرده‌اند.



شکل ۴ نمودار ضریب تطبیق شاول‌های مورد بررسی معدن مس سرچشمه

شکل ۴ نشان می‌دهد زمان انتظار هر یک از شاول‌ها در شیفت اول کاری خود نسبت به مدت زمان داده برداری بر روی نمودار آورده شده است. شاول‌ها نسبت به دیگر شاول‌ها بیشترین زمان انتظار را به خود اختصاص داده بود. زمان آماده سازی منظور زمانی است که شاول خود را برای بارگیری آماده کرده است مانند تنظیم کردن فاصله خود تا جبهه کار.



شکل ۵ نمودار زمان انتظار شاول‌ها در شیفت اول

چاووسکی و همکاران با استفاده از داده‌های شرکت بانپو و با استفاده از فرمول برت و کاتاکا ضریب تطبیق را برای ناوگانی با اندازه ۶۸ محاسبه کردند. این ناوگان از دو نوع کامیون و دو نوع شاول تشکیل شده بود. به طور میانگین زمان سیکل کامل کامیون‌های کوچک ۱۷.۲ دقیقه و سیکل کامل کامیون نوع دوم ۱۷.۲۴ دقیقه است. میانگین فعالیت کامیون‌های نوع یک و نوع دو (زمان انتظار، مانور، بارگیری، زمان سفر با بار، مدت زمان انتظار در سایت تخلیه، مانور، تخلیه، برگشت) در مقایسه با معدن مس سرچشمه زمان‌ها کمتری ثبت کرده‌اند. این ناوگان از نوع ناوگان ناهمگن مانند ناوگان معدن مس سرچشمه می‌باشد. زیرا انواع مختلف شاول و کامیون آن را تشکیل داده‌اند. با وجود تعداد بالای کامیون در ناوگان میانگین ایستادن در صف تخلیه برای کامیون‌های نوع یک ۱۲ ثانیه و برای کامیون نوع دو ۱۵.۶ ثانیه می‌باشد.

جدول ۳ اطلاعات مربوط به سیکل بارگیری و باربری معدن چاووسکی [۱۴]

نوع کامیون	زمان انتظار	مانور	بارگیری	زمان رفت	انتظار در صف سنگ‌شکن	مانور	تخلیه	زمان برگشت
نوع ۱	۱.۸	۰.۶۲	۱.۶	۵.۴	۰.۲	۰.۲۸۵	۰.۸	۴.۷
نوع ۲	۱.۸	۰.۴	۱.۹	۵.۵	۰.۲۶	۰.۴	۰.۶۸	۴.۵

در صورتی که در معدن سرچشمه زمان ایستادن در صف سنگ شکن ۳۱۷ ثانیه و میانگین زمان انتظار در سایت بارگیری ۱.۸ دقیقه که این زمان برای معدن مس سرچشمه ۴.۸ دقیقه ثبت شد. باتوجه به اعداد مقدار ضریب تطبیق برای این ناوگان ۱.۲۳۹ است. این بدین معناست که کامیون‌ها در این ناوگان باید منتظر شاول‌ها بمانند. به عبارت دیگر نرخ رسیدن کامیون به سایت بارگیری بیشتر از نرخ سرویس دهی لودرها است. چاووسکی در مقاله خود زمان انتظار کامیون‌ها را در سایت بارگیری برای شاول نوع یک ۲.۸ و برای شاول نوع دوم ۱.۷ دقیقه ثبت کرده است اما میانگین زمان انتظار کامیون در ناوگان معدن مس سرچشمه ۲۹۰ ثانیه (۴.۸ دقیقه) می‌باشد. در معدن مس سرچشمه با توجه به حجم صندوقه شاول‌ها و ظرفیت کامیون‌ها ضریب تطبیق برابر ۰/۴ است. با توجه به اینکه اندازه ناوگان معدن مس سرچشمه کمتر از ناوگان مورد بررسی چاووسکی است. در ناوگان سرچشمه یک سیکل کامیون ۱۳۶ تنی به طور متوسط ۴۰.۸ دقیقه و برای کامیون ۲۴۰ تنی این معدن ۴۱.۵ دقیقه زمان برده است. معدن زغال سنگ بلاموجان دارای ۷ کامیون و ۴ شاول با ظرفیت متفاوت ضریب تطبیق برابر با ۱.۰۹ به دست آورده است. اطلاعات مربوط به ناوگان معدن بلاموجان در مقایسه با



اندازه ناوگان معدن سرچشمه بسیار کوچک‌تر است. فاصله‌ای که کامیون‌ها برای جابه‌جایی واد طی میکنند ۱۲۲ متر است و میانگین زمان سیکل کامیون ۱۹۸ ثانیه ثبت شد که نسبت در معدن مس سرچشمه بسیار کمتر است. در معدن مس سرچشمه کمترین فاصله از شاول تا سنگ شکن مربوط به شاول ۱۵ که ۳۱۰۰ متر فاصله دارد. چنگ مانند چاووسکی از فرمول برت و کاتاكا استفاده کرده است. زمان سیکل هر نوع کامیون در این معدن به طور متوسط ۱۹۸ ثانیه است. پایین بدون زمان سیکل می‌تواند به این دلیل باشد که فاصله حمل تا محل تخلیه ۱۲۲ متر است اما در معدن مس سرچشمه کمترین فاصله شاول تا سنگ شکن ۲۶۰۰ متر و تا دامپ باطله ۴۲۰۰ متر می‌باشد. زمان سیکل بیل مکانیکی نوع یک ۲۴ ثانیه و بیل مکانیکی نوع دوم ۲۵ ثانیه است. زمان بارگیری کامیون‌ها توسط بیل مکانیکی ناوگان معدن بلاوموجان، کامیون نوع یک را در ۱۲۵ ثانیه و نوع دوم را ۱۲۰ ثانیه بارگیری کرده است. در معدن مس سرچشمه ظرفیت تجهیزات بارگیری و باربری بیش از معدن بلاوموجان است و زمان سیکل شاول‌های P&H و TZ به طور میانگین ۴۰ و ۳۷ ثانیه است. معدن زغال سنگ بلاک کانانیا واقع در اندونزی از سه پیت، آنگرگک، داهلیا، کنانگا تشکیل شده است. برای استخراج از سه پیت معدن کانانیا، از ناوگانی که متشکل از سه بیل مکانیکی و ۱۶ کامیون که در جدول ۴-۳۷ اشاره شده، استفاده می‌شد. ناوگان پیت آنگرگک، یک بیل مکانیکی و ۸ کامیون، ناوگان پیت داهلیا یک بیل مکانیکی و چهار کامیون و پیت کنانگا یک بیل مکانیکی و چهار کامیون را شامل می‌شده که اندازه ناوگان نسبت به معدن مس سرچشمه کمتر می‌باشد که ضریب تطبیق محاسبه شده برای هر کدام از پیت‌ها به ترتیب برابر، ۱.۳۴، ۰.۷۹، ۰.۸۳ می‌باشد. اگر ضریب تطبیق کمتر از یک باشد، بیل مکانیکی باید منتظر رسیدن کامیون‌ها باشد و اگر بیشتر از یک باشد کامیون باید منتظر بیل مکانیکی بماند. در این معدن کامیون‌های پیت آنگرگک برای بارگیری ۲ دقیقه زمان انتظار ثبت شده بود. پیت داهیل با توجه به اینکه ضریب تطبیق کمتر از یک است، ۲ دقیقه زمان انتظار برای بیل مکانیکی ثبت شده است. در پیت سوم که ضریب تطبیق کمتر از یک است زمان انتظار ثبت شده برای بیل مکانیکی برابر ۱.۹۶ می‌باشد. در معدن مس سرچشمه با وجود اینکه ضریب تطبیق کمتر از یک است علاوه بر شاول‌ها کامیون‌ها نیز در سایت بارگیری زمان انتظار سپری کرده‌اند. جدول ۶ ضریب تطبیق معدن مس سرچشمه در مقایسه با دیگر معادن ذکر شده نشان می‌دهد

نام معدن	مقدار ضریب تطبیق
اطلاعات چاووسکی	۱.۲۳۹
بلاوموجان	۱.۰۹
بلاک کانانیا پیت شماره ۱	۱.۰۱
بلاک کانانیا پیت شماره ۲	۰.۹۸
بلاک کانانیا پیت شماره ۳	۱.۰۴
مس سرچشمه	۰/۴

جدول ۶ ضریب تطبیق در معادن مورد مطالعه

۵- نتیجه گیری

ضریب تطبیق معدن مس سرچشمه نسبت به معادن مورد بررسی مقدار کمتری برابر ۰.۴ بوده و طبق مفهوم ضریب تطبیق شاول‌های این معدن زمان زیادی که برابر با ۴۰۴ ثانیه بوده است را صرف انتظار برای رسیدن کامیون‌ها سپری کرده‌اند. همچنین کامیون‌ها در سایت بارگیری زمان ۴.۸ دقیقه زمان انتظار برای بارگیری ثبت کرده‌اند. در معادن دیگر مانند چاووسکی زمان چرخه کامیون‌های خود تقریباً ۱۷ دقیقه ثبت کرده است که نسبت به معدن مس سرچشمه برای کامیون ۱۳۶ تنی برابر با ۴۱.۵ دقیقه برای کامیون ۲۴۰ تنی برابر ۴۰.۸ دقیقه ثبت شده زمان کمتری به خود اختصاص داده است که نتیجه این زمان کمتر داشتن ضریب تطبیق نزدیک به یک یک یا حتی بیشتر از یک می‌باشد لذا با توجه به اینکه ضریب تطبیق شاخص بهره‌وری شناخته می‌شود با توجه به مقدار ضریب تطبیق این



معدن نسبت به معادن گفته شده، بهره‌وری ناوگان حمل‌ونقل معدن مس سرچشمه از بهره‌وری پایینی برخوردار است. این نتیجه را می‌توان دریافت که معادنی که دارای اندازه ناوگان بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از معدن مس سرچشمه هستند، دارای ضریب تطبیق ۱ یا نزدیک به ۱ هستند و نقطه اشتراک این معادن پایین بودن زمان سیکل بارگیری و باربری نسبت به معدن مس سرچشمه می‌باشد.

تشکر

بدینوسیله از شرکت ملی مس ایران به عنوان حامی این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- [1]Howard, J., "Introductory mining engineering," *Book Introductory mining engineering*, Series Introductory mining engineering, ed., Editor ed.^eds., Academic Page, 2021, pp.
- [2]Hai, D.V., "Optimization of truck and shovel for haulage system in the cao son mine, Viet Nam using queuing theory," Prince of Songkla University, 2016.
- [3]Zeng, W., Baafi, E., and Walker, D., "A simulation model to study bunching effect of a truck-shovel system", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 33, pp. 102-117, 2019.
- [4]Burt, C.N., and Caccetta, L., "Match factor for heterogeneous truck and loader fleets", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 21, pp. 262-270, 2007.
- [5]Dabbagh, A., and Bagherpour, R., "Investigating the Applicability of Imperialist Competitive Algorithm in the Problem of Allocating Truck to the Open Pit Mine", *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 34, 2019.
- [6]Dabbagh, A., and Bagherpour, R., "Development of a match factor and comparison of its applicability with ant-colony algorithm in a heterogeneous transportation fleet in an open-pit mine", *Journal of Mining Science*, Vol. 55, pp. 45-56, 2019.
- [7]Indrajaya, F., Taruna, Y., Barus, J.P., Hutajulu, Y.Y., Fidayanti, N., and Adnyano, A.I.A., "Fleet Management Simulation Using Queuing Theory to Achieve Coal Production Targets", *International Journal*, Vol. 8, 2020.
- [8]Zhang, Y., Zhao, Z., Bi, L., Wang, L., and Gu, Q., "Determination of truck-shovel configuration of open-pit mine: a simulation method based on mathematical model", *Sustainability*, Vol. 14, pp. 12338, 2022
- [9]Dindarloo, S., Osanloo, M., and Frimpong, S., "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*, Vol. 115, pp. 209-219, 2015.
- [10]Walker, S.C., *Mine winding and transport*, Elsevier, 2012.
- [11]Nehring, M., Knights, P., Kizil, M., and Hay, E., "A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems", *International journal of mining science and technology*, Vol. 28, pp. 205-214, 2018.
- [12]Dzakpata, I., Knights, P., Kizil, M.S., Nehring, M., and Aminossadati, S.M., "Truck and shovel versus in-pit conveyor systems: a comparison of the valuable operating time", Vol., 2016.
- [13]Darling, P., *SME mining engineering handbook*, SME, 2011.
- [14]Chaowasakoo, P., Seppälä, H., Koivo, H., and Zhou, Q., "Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching", *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 27, pp. 229-236, 2017.
- [15]Zeng, W., "A simulation model for truck-shovel operation", Vol., 2018.



- [16]Dabbagh, A., and Bagherpour, R., “Investigating the Applicability of Imperialist Competitive Algorithm in the Problem of Allocating Truck to the Open Pit Mine”, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 34, 2019.
- [17]Ozdemir, B., and Kumral, M., “Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 95, pp. 36-48, 2019.
- [18]Cheng, J.E., “Match factor determination of excavator-truck combination in surface mining: Case study of merit pila coalfield, Sarawak”, *Geological Behavior*, Vol. 3, pp. 28-29, 2019.
- [19]Indrajaya, F., Taruna, Y., Barus, J.P., Hutajulu, Y.Y., Fidayanti, N., and Adnyano, A.I.A., “Fleet Management Simulation Using Queuing Theory to Achieve Coal Production Targets”, *International Journal*, Vol. 8, 2020.
- [20]Ghaziania, H.H., Monjezi, M., Mousavi, A., Dehghani, H., and Bakhtavar, E., “Design of loading and transportation fleet in open-pit mines using simulation approach and metaheuristic algorithms”, *Journal of Mining and Environment*, Vol. 12, pp. 1177-1188, 2021.
- [21]Burt, C.N., “An optimisation approach to materials handling in surface mines”, Vol., 2008.