

بهبود کارائی ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی

نوشین آزادی^۱، مسعود منجزی^{۲*} و مجید عطایی‌پور^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: شبیه سازی، ناوگان، حمل و نقل، Arena.</p>	<p>انتخاب ناوگان حمل و نقل در معادن روباز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب نامناسب ناوگان می‌تواند به دو شکل بر اقتصاد پروژه تاثیر گذار باشد: محقق نشدن اهداف تولید و افزایش هزینه‌ها به دلیل افزایش زمان بارگیری و باربری. معمولا طراحی ناوگان به روش‌های تخصیص ثابت یا گسیل انعطاف پذیر با هدف بیشینه کردن تولید و کمینه کردن هزینه‌ها انجام می‌گیرد. از جمله روش‌های موجود انتخاب ناوگان، تکنیک شبیه‌سازی به طراحان این اجازه را می‌دهد تا در یک محیط مجازی پیاده سازی واقعی سیستم، کارایی آن را از لحاظ فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار دهند. در این تحقیق ابتدا با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Arena با ورژن ۱۳/۹، سیستم فعلی حمل و نقل معدن مس سونگون شبیه‌سازی گردید. سپس با تعریف سیستم‌های جدید نسبت به اصلاح سیستم موجود معدن اقدام گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، از میان سناریوهای پیشنهادی، ترکیب کامیون ۱۰۰ تنی و لودر ۶/۱ مترمکعبی، بیل مکانیکی ۴/۶ مترمکعبی و شاول ۷ مترمکعبی با تولید هفتگی ۵۵۰۰۰ تن و هزینه ۰/۸۳ دلار بر مترمکعب به عنوان بهترین گزینه بدست آمد.</p>

۱- مقدمه

روش‌های تصمیم‌گیری، تحقیق در عملیات و هوش مصنوعی جهت بهینه‌سازی انواع ماشین‌آلات معدنی استفاده کرده‌اند [۲-۹].

اولین شبیه‌سازی‌های انجام شده در معادن به صورت دستی، اواخر دهه ۱۹۵۰ در شمال سوئد بر روی معدن زیرزمینی آهن به نام کایرونا^۲ انجام گرفت [۷]. همچنین در سال ۱۹۶۱ ریسست^۳ اولین شبیه‌سازی کامپیوتری از عملیات معدنی را انجام داد. وی با استفاده از شبیه‌سازی در یک معدن زیرزمینی مولیبدن، تعداد بهینه واگن‌ها را برای کاهش زمان انتظار در صف بارگیری و تخلیه، تعیین

از آنجایی که حمل و نقل مواد استخراجی حدود ۵۰ درصد هزینه‌ها در معادن روباز را شامل می‌شود، مطالعه در مورد روش‌هایی که این هزینه‌ها را به حداقل رسانده، و در مقابل، میزان تولید را افزایش دهد، ضروری می‌نماید [۱].

از جمله روش‌های انتخاب ناوگان می‌توان به، روش‌های تصمیم‌گیری، روش‌های تحقیق در عملیات، شبیه‌سازی و روش‌های هوش مصنوعی اشاره نمود. محققین مختلفی از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: monjezi@modares.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

² Kiruna

³ Rist

مطالعه نتایج احتمالی سیستم‌هایی که برای آینده پیشنهاد می‌شوند، باعث شده است تا نسبت به سایر روش‌ها از جذابیت بیش‌تری برخوردار شود [۱۸].

برای انجام یک شبیه‌سازی، پس از تعریف مسئله به جمع‌آوری داده‌های لازم از جمله زمان انجام فعالیت‌ها در سیستم مورد مطالعه پرداخته می‌شود. در مرحله بعد نمودار هیستوگرام داده‌های زمانی رسم شده و یک منحنی توزیع مناسب به آن برازش داده می‌شود. این منحنی باید کمترین خطا در برازش را داشته باشد. توزیع انتخاب شده به عنوان ورودی مدل محسوب می‌شود. سپس به ساختن مدل پرداخته و از درست بودن آن اطمینان حاصل می‌شود. در نهایت باید نتیجه حاصل از اجرای مدل با واقعیت مطابقت داشته باشد، که در این حالت مدل معتبر می‌باشد [۱۹].

با تغییر پارامترهای مدل ساخته شده از سیستم واقعی از جمله تعداد و نوع کامیون و بارکننده‌ها، بهترین حالت برای معدن انتخاب می‌شود. این تغییر پارامترها در قالب گسیل انعطاف‌پذیر و یا تخصیص ثابت کامیون‌ها نسبت به بارکننده‌ها انجام می‌گیرد تا بهترین ترکیب بارکننده و باربر با هدف حداقل هزینه و حداکثر تولید انتخاب شود.

در این تحقیق از نرم‌افزار Arena با ورژن ۱۳/۹ جهت ساختن مدل استفاده شده است. این نرم‌افزار با قابلیت پویانمایی امکان بررسی دقیق شرایط موجود در سیستم را می‌دهد. یکی از مزیت‌های مدل‌سازی و اجرای سیستم در Arena، امکان استفاده از طرح شماتیک کوچک شده سیستم واقعی می‌باشد. [۲۰].

معدن مس سونگون جهت مطالعه در این تحقیق انتخاب شده است. این معدن در استان آذربایجان شرقی قرار دارد و بخش بزرگی از مس کشور را تأمین می‌نماید. با توجه به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و پراکندگی بسیار زیاد عیار و پورفیری بودن آن، سیستم حمل و نقل این معدن متفاوت از بقیه بوده و نیازمند ابزار دقیقی جهت مطالعه می‌باشد. در مقایسه با سایر روشها، شبیه‌سازی با صرف حداقل زمان و هزینه، بهترین جواب را حاصل می‌نماید.

نمود [۱۰]. در سال ۱۹۷۰، ویلک^۱ از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلو، جهت بررسی ترافیک ناوگان انتقال مواد، توسط واگن، در یک معدن زیرزمینی زغال استفاده کرد [۷]. وی همچنین در سال ۱۹۸۲، برنامه کامپیوتری، جهت کمینه کردن هزینه‌های کامیون‌ها در حمل و نقل مواد طراحی نمود [۲]. هربار و همکارانش در سال ۱۹۷۹، با استفاده از شبیه‌سازی، به انتخاب نوع، ظرفیت جام، قدرت کشش و تجهیزات باربر مناسب برای دراگ‌لاین در یک معدن روباز پرداختند [۱۱]. در سال ۱۹۹۸، عطایی-پور و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار Arena، عملکرد سیستم حمل و نقل شاول-کامیون در دو حالت تخصیص ثابت و گسیل انعطاف‌پذیر را با هم مقایسه نمودند [۱۲]. دانشمندان مختلفی تا سال ۲۰۰۰ از شبیه‌سازی جهت بهینه کردن حمل و نقل معادن بهره جستند [۳ و ۱۱ و ۱۳]. از سال ۲۰۰۰ به بعد با توجه به وارد شدن کامپیوتر به حیطه کاری معدنی، شبیه‌سازی‌ها به صورت پیشرفته‌تر انجام شد. از آن‌جمله دمیری و همکارانش در سال ۱۳۸۳، از نرم‌افزار Arena جهت شبیه‌سازی سیستم حمل و نقل معدن چغارت استفاده کردند [۱۴]. عطایی‌پور و همکارانش در سال ۲۰۰۵، بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل معدن آهن چغارت را با استفاده از نرم‌افزار Arena انجام دادند [۱۵]. آمل^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۲، از شبیه‌سازی جهت گسیل انعطاف‌پذیر کامیون‌ها در سیستم حمل و نقل یک معدن روباز استفاده نمودند. بدین ترتیب شبیه‌سازی در معدن به روشی مطلوب جهت انتخاب بهینه ناوگان شناخته شد [۵ و ۶ و ۹ و ۱۶ و ۱۷].

از بین روش‌های تصمیم‌گیری، تحقیق در عملیات، شبیه‌سازی و هوش مصنوعی، شبیه‌سازی به عنوان تکنیکی نسبتاً جدید و کارآمد، در حل مسائل سیستمی به شمار می‌آید. شبیه‌سازی به دلیل دارا بودن یک سری ویژگی‌های خاص از جمله، مطالعه سیستم موجود بدون ایجاد مزاحمت و یا مخدوش شدن سیستم، همچنین

¹ Wilke

² Amel

۲- سیستم حمل و نقل معدن مس سونگون

سیستم حمل و نقل معدن سونگون در دو بخش در حال فعالیت است. یک بخش آن مربوط به شرکت آهن آجین، و بخش دیگر مربوط به شرکت مبین می‌باشد. شرکت آهن آجین بارگیری و حمل حدود ۴۵ درصد از کل تولید معدن را بر عهده دارد. مطالعات این تحقیق بر روی بخش فعال سیستم حمل و نقل مربوط به شرکت آهن آجین انجام گرفته است. در معدن مس سونگون به دلیل وجود دایکهای متعدد که در بین مواد معدنی نفوذ کرده است، امکان استفاده از ماشین‌آلات با توان تولید بالا از قبیل شاول کمتر است. زیرا، به دلیل انعطاف‌پذیری کم این ماشین‌آلات به هنگام مواجهه با مواد باطله‌ای که در داخل مواد معدنی نفوذ کرده است، تولید به اندازه مناسب نمی‌باشد. همچنین عرض کم پله‌ها در برخی نقاط معدن سونگون، مانع از استفاده شاول در تمام بخش‌ها می‌گردد. به همین دلیل در این معدن از ماشین‌آلات بارگیری با توان کم ولی با انعطاف بالا نسبت به شاول استفاده می‌شود. این ماشین‌آلات بیشتر لودر و بیل‌های مکانیکی می‌باشند. به دلیل تولید کم این ماشین‌آلات می‌بایست تعداد ایستگاه‌های بارگیری را برای بالا بردن تولید افزایش داد. افزایش تعداد ایستگاه‌های بارگیری، منجر به افزایش تعداد کامیون‌ها می‌شود. با این امر میزان ترافیک در ایستگاه‌های بارگیری، تخلیه و جاده‌های معدنی افزایش می‌یابد. از طرفی کامیون‌های معدنی حجم بزرگی از سرمایه‌گذاری یک معدن را به خود اختصاص می‌دهند و افزایش بیش از حد کامیون‌ها باعث پایین آمدن سوددهی می‌شود؛ بنابراین ضروری می‌نماید که در زمینه استفاده از کامیون‌ها و تجهیزات بارکننده تصمیم‌گیری مناسبی صورت گیرد. یعنی با استفاده حداکثر از تجهیزات، تعداد کامیون مناسب انتخاب شود تا بتوان با توجیه اقتصادی به حداکثر تولید رسید.

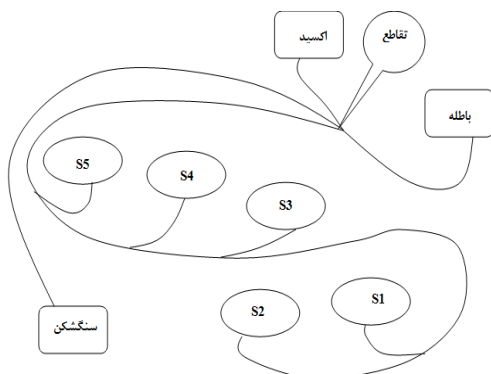
هدف از این مقاله، ابتدا بررسی نحوه عملکرد سیستم حمل و نقل فعلی معدن و سپس تعیین ناوگان بهینه کامیون، به منظور دستیابی به حداکثر تولید با حداقل هزینه می‌باشد.

۳- جانمایی شماتیک سیستم حمل و نقل

معدن مس سونگون

جانمایی شماتیک سیستم فوق در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، سیستم دارای پنج محل بارگیری (سه بیل مکانیکی و دو لودر) و سه محل تخلیه (دامپ اکسید مس، باطله و سنگ‌شکن) می‌باشد. در جانمایی رسم شده محل قرارگیری بیل بارکننده اکسید S1 (A)، بیل بارکننده باطله S2 (B)، بیل بارکننده ماده معدنی S3 (C) با ظرفیت صندوقه ۴/۶ مترمکعب Newholland و لودرهای بارکننده ماده معدنی به ترتیب S4 (D) و S5 (E) با ظرفیت صندوقه ۶/۱ مترمکعب Komatsu، نامیده شده است. کامیون‌های موجود در سیستم از دو نوع ۳۰ تنی مدل Komatsu 325 و ۱۰۰ تنی مدل Komatsu 785 می‌باشند.

از نکات مهمی که در شبیه‌سازی یک سیستم بایستی مورد نظر قرار گیرد، ظرفیت سرویس‌دهی منابع می‌باشد. در مورد لودر و بیل‌های موجود در این سیستم ظرفیت محدود می‌باشد؛ یعنی در هر زمان یک کامیون را بارگیری می‌کنند. ظرفیت سرویس‌دهی سنگ‌شکن دو و دامپ‌های موجود بی‌نهایت می‌باشد. به عبارت دیگر در هر لحظه دو کامیون به طور هم‌زمان می‌توانند در سنگ‌شکن تخلیه کنند و در دامپ‌ها محدودیتی از نظر هم‌زمانی تخلیه کامیون‌ها وجود ندارد.



شکل ۱- جانمایی شماتیک سیستم حمل و نقل معدن مس سونگون

۴- جمع‌آوری داده‌ها

یکی از مراحل اساسی یک فعالیت شبیه‌سازی جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سیستم می‌باشد. از جمله مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز در شبیه‌سازی زمان انجام فعالیت‌ها است. بایستی با زمان‌سنجی از سیستم موجود و یا محاسبه آن در سیستم پیشنهادی، زمان انجام فعالیت‌های مختلف را به دقت تعیین نمود.

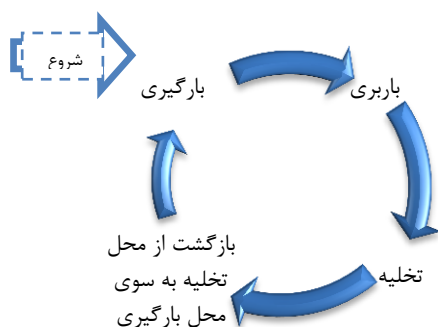
به منظور شبیه‌سازی سیستم حمل و نقل معدن، از زمان‌های سفر کامیون در بخش‌های مختلف مسیر در رفت و برگشت (با بار و بدون بار)، زمان‌های بارگیری لودرها، زمان‌های تخلیه کامیون‌ها در سنگ‌شکن و دامپ-های باطله و اکسید، همچنین زمان جای‌گیری و سیکل حرکتی لودرها در طول شیفت به مدت یک هفته زمان-سنجی انجام گرفت.

بعد از انجام زمان‌سنجی، نمودار هیستوگرام داده‌های جمع‌آوری شده رسم و منحنی‌های توزیع مختلفی بر آن برازش می‌شوند. پس از برازش تمامی منحنی‌ها، منحنی که دارای کمترین خطا باشد، به عنوان توزیع مناسب انتخاب می‌گردد. ساعات کاری در هر شیفت، زمان مفید کاری یک شیفت و تعداد شیفت‌های کاری در شبانه روز نیز جزء اطلاعات ضروری مورد استفاده می‌باشد. با احتساب تأخیرهای صورت گرفته و زمان‌سنجی انجام شده از سیستم مورد مطالعه، ۹۹۰ دقیقه، زمان مفید کاری در طول شبانه روز است. اطلاعات دیگری که برای انجام یک شبیه‌سازی مورد نیاز است، وزن مخصوص مواد حمل شده جهت تعیین ظرفیت مناسب کامیون‌ها می‌باشد. در این تحقیق وزن مخصوص مربوط به مواد معدنی ۲/۵ تن بر متر مکعب، باطله ۲/۳ تن بر متر مکعب و اکسید مس ۲/۵ تن بر متر مکعب می‌باشد. توزیع مناسب بر زمان‌سنجی-های انجام شده در معدن مس سونگون به شرح جدول ۱ می‌باشد. در مرحله بعد، برای انتخاب بهترین ناوگان در دو حالت تخصیص ثابت و گسیل انعطاف‌پذیر، می‌توان با تغییر تعداد، نوع و ظرفیت ماشین‌آلات عملکرد هر یک را با استفاده از روش شبیه‌سازی ارزیابی نمود.

۵- مدلسازی سیستم حمل و نقل

همان‌طور که بیان شد، برای ساختن مدل از نرم‌افزار شبیه‌سازی Arena با ورژن ۱۳/۹ استفاده می‌شود. برای ایجاد یک مدل شبیه‌سازی در Arena، ابتدا یک طرح شماتیک از مسئله ایجاد می‌شود که در بخش مربوطه شرح داده شد. سپس منطق مسئله با انتخاب ساختارهای مناسب به نام ماژول به منظور نشان دادن اجزا سیستم واقعی و عملیات مربوط به آن‌ها تعریف می‌شود. با قرار دادن این اجزا در طرح شماتیک و وارد کردن داده‌های مدل با ساختارهای خاص موجود، مدل مورد نظر ساخته می‌شود [۲۰].

فرایندی که کامیون‌ها در سیستم مورد مطالعه در معدن مس سونگون پشت سر می‌گذارند به صورت شکل ۳، می‌باشد. کامیون‌ها از سیستم خارج نمی‌شوند، بلکه در چرخه سیستم در حال گردش هستند.



شکل ۲- توالی فرایندها در یک چرخه بارگیری و باربری

۵-۱- فرضیات به کار رفته در مدل

مدل ساخته شده بر اساس فرضیات زیر می‌باشد:

در هر لحظه فقط یک کامیون می‌تواند توسط یک بارکننده بارگیری شود. یعنی زمانی که یک بارکننده در حال پر کردن صندوق کامیون می‌باشد و کامیون دیگری به محل بارگیری می‌رسد، باید در صف منتظر بماند تا بارگیری کامیون قبلی به اتمام رسیده و بارکننده آزاد شود.

جدول ۱- خلاصه زمان سنجی انجام شده در معدن مس سونگون

نوع متغیر	نوع توزیع و پارامترهای آن
زمان بارگیری لودر S1	^a NORM(5.93,0.506)
زمان حرکت از لودر S1 تا تقاطع	^b 2+GAMM(0.185,1.41)
زمان حرکت از تقاطع تا دامپ اکسید	^c TRIA(22.3,24.2,25)
زمان برگشت از دامپ اکسید تا تقاطع	^d 12+4*BETA(1.13,0.797)
زمان برگشت از تقاطع تا لودر S1	TRIA(1.08,1.55,1.6)
زمان بارگیری لودر S2	^e 2.27+ERL(0.147,4)
زمان حرکت از لودر S2 تا تقاطع	NORM(3.08,0.14)
زمان حرکت از تقاطع تا دامپ باطله	14.1+3.85*BETA(0.597,0.584)
زمان برگشت از دامپ باطله تا تقاطع	6+ERLA(0.467,2)
زمان برگشت از تقاطع تا لودر S2	1.28+7.59*BETA(0.564,0.77)
زمان بارگیری لودر S3	1.28+3.44*BETA(10.4,18.5)
زمان حرکت از لودر S3 تا تقاطع	0.86+ERLA(0.149,5)
زمان حرکت از تقاطع تا سنگ شکن	9+GAMM(1.34,5.17)
زمان برگشت از سنگ شکن تا تقاطع	3+ERLA(0.632,7)
زمان برگشت از تقاطع تا لودر S3	0.47+1.27*BETA(4,7.45)
زمان بارگیری لودر S4	1.76+0.45*BETA(0.754,1.03)
زمان حرکت از لودر S4 تا تقاطع	TRIA(0.59,1.04,1.24)
زمان برگشت از تقاطع تا لودر S4	^f 0.62+LOGN(0.188,0.12)
زمان بارگیری لودر S5	NORM(1.76,0.195)
زمان حرکت از لودر S5 تا تقاطع	0.85+LOGN(0.53,0.248)
زمان برگشت از تقاطع تا لودر S5	0.57+0.58*BETA(1.5,1.36)
زمان تخلیه در دامپ اکسید	0.72+0.28*BETA(1.53,1.22)
زمان تخلیه در دامپ باطله	NORM(0.619,0.0991)
زمان تخلیه در سنگ شکن	^g 0.4+WEIB(0.271,2.69)

a:توزیع نرمال(انحراف معیار، میانگین)؛ b:توزیع گاما(آلفا، بتا)؛ c:توزیع مثلثی(حداکثر مقدار،مد،حداقل مقدار)؛ d:توزیع بتا(آلفا، بتا)؛ e:توزیع ارلنگ (K,حداکثر میانگین)؛ f: توزیع لاگ نرمال(لاگ انحراف معیار، لاگ میانگین)؛ g:توزیع ویبول(آلفا، بتا)

۵-۲- مدلسازی حالت تخصیص ثابت سیستم حمل

و نقل

از آنجایی که کامیون‌ها در دو حالت گسیل انعطاف-پذیر و تخصیص ثابت به بارکننده‌ها نسبت داده می-شوند؛ لازم است مدل ساخته شده متناسب با هر یک از حالت‌ها تغییر کند. مدل اولیه متناسب با حالت تخصیص ثابت می‌باشد.

در عمل تخصیص ثابت، کامیون‌ها به بارکننده خاص اختصاص داده می‌شوند و بعد از اتمام چرخه باربری، دوباره به همان بارکننده قبلی بر می‌گردند. امکان تغییر مسیر و در اختیار گرفتن بارکننده دیگری جهت بارگیری برای کامیون وجود ندارد.

- در محل تخلیه باطله و اکسید، محدودیتی از لحاظ تعداد کامیون وجود ندارد. ولی در محل سنگ‌شکن در هر لحظه فقط دو کامیون اجازه تخلیه بار دارند و بقیه کامیون‌ها باید در صف منتظر باشند تا تخلیه کامیون‌های قبل تمام شده و سنگ شکن آزاد شود.
- جاده‌های معدن طوری طراحی شده‌اند که دو کامیون می‌توانند از کنار یکدیگر عبور کنند. یعنی امکان سبقت گرفتن برای کامیون‌ها وجود دارد و جاده از لحاظ تعداد کامیون محدودیتی ندارد.

۳-۵- مدلسازی حالت گسیل انعطاف‌پذیر سیستم

حمل و نقل

در مدل گسیل انعطاف‌پذیر، جانمایی سیستم و پارامترهای بکار رفته مشابه حالت تخصیص ثابت می‌باشد. با این تفاوت که بر خلاف سیستم تخصیص ثابت که هر کامیون فقط به یک شاول خاص ارجاع داده می‌شود، در این حالت، هر کامیون به شاولی ارجاع داده می‌شود که در صف آن شاول، حداقل زمان انتظار را داشته باشد.

عموماً اگر سیستم میزان کامیون بیش از حد داشته باشد، کامیون‌ها در حالت انتظار برای بارکننده به سر می‌برند تا آن آزاد شود. در این صورت زمان انتظار سیستم مثبت^۱ می‌باشد؛ و برعکس، زمانی که بارکننده منتظر کامیون است، تعداد کامیون کمتر از حد اندازه بوده، و زمان انتظار منفی^۲ می‌باشد [۲۱].

روش گسیل‌سازی به کار گرفته شده در این مدل بر اساس کمینه کردن زمان انتظار کامیون‌ها در صف بارکننده‌ها استوار است. چون با کاهش زمان از دست رفته در صف، بهره‌وری کامیون‌ها افزایش می‌یابد. در این روش زمان رسیدن یک کامیون به محل تقاطع، با پیش بینی زمان انتظار کامیون در صف هر کدام از بارکننده‌ها، باعث می‌شود که کامیون به سمت محل بارگیری ارسال شود که کمترین زمان انتظار را در صف آن خواهد داشت. زمان انتظار هر کامیون در صف، برابر اختلاف زمان رسیدن کامیون به پای بارکننده و زمان شروع بارگیری آن کامیون می‌باشد.

نقطه گسیل کامیون‌ها در این تحقیق تقاطع می‌باشد.

زمان حرکت و تخلیه کامیون‌ها و زمان بارگیری لودرها مطابق زمان‌سنجی انجام شده می‌باشد.

۵-۳-۱- خط‌مشی گسیل انعطاف‌پذیر سیستم

حمل و نقل

قبل از نوشتن این خط‌مشی بایستی یک سری متغیرهایی را جهت استفاده در روابط تعریف نموده و یک سری فرض‌هایی را در نظر گرفت. این فرض‌ها و متغیرها به شرح زیر می‌باشند:

فرض می‌شود که تعداد بارکننده‌های فعال در معدن N دستگاه و :

$ECT(I)$ ^۳: زمان به کارگیری پیش بینی شده i

امین بارکننده توسط کامیون

$ACT(I)$ ^۴: زمان به کارگیری تخصیص داده شده i

امین بارکننده توسط کامیون

$ERT(I)$ ^۵: زمان رهاسازی (آزاد شدن) پیش بینی

شده i امین بارکننده توسط کامیون

$LT(I)$ ^۶: زمان بارگیری کامیون توسط i امین

بارکننده

$DEL(I)$ ^۷: زمان انتظار کامیون در صف i امین

بارکننده

TNOW: نشان‌دهنده زمان سیستم در هر لحظه

(زمان فعلی یا انجام زمان محاسبات مربوطه)

$TT(I)$ ^۸: زمان حرکت از نقطه گسیل‌سازی تا i

امین بارکننده

I: اندیس توالی بارکننده‌ها از ۱ تا N

J: اندیس بارکننده که شرایط را برآورده می‌کند

(در شرایط صدق می‌کند)

$$ECT(I) = ACT(I) \quad (۱)$$

$$ERT(I) = ECT(I) + LT(I) \quad (۲)$$

$$DEL(I) = ERT(I) - \{TNOW + TT(I)\} \quad (۳)$$

$$DELAY(J) = \text{Min}\{DELAY(1), DELAY(2), \dots, DELAY(N)\} \quad (۴)$$

^۳ Expected Capture Time

^۴ Assign Capture Time

^۵ Expected Release Time

^۶ Loading Time

^۷ Delay

^۸ Travel Time

^۱ Over truck

^۲ Under truck

شرط حداقل، نسبت داده می‌شود. این رابطه به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود.

سپس ECT برای بارکننده (زمان به کارگیری مورد انتظار) J مطابق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

نهایتاً، ECT(J) به عنوان زمان به کار گرفتن J (یک بارکننده خاص) ثبت می‌شود.

زمان تأخیر محاسبه شده برای کامیون DELAY(I)، با توجه به شرایط، ممکن است یکی از حالات زیر باشد:

- وقتی که زمان تأخیر صفر می‌باشد، بدان معنی است که، کامیون در محل خود قرار گرفته، و آماده بارگیری در همان لحظه (بارکننده بارگیری کامیون قبلی را به پایان رسانده است) می‌باشد.
- زمان تأخیر مثبت به این معنی است، زمانی که کامیون به محل بارگیری می‌رسد، بارکننده هنوز در حال بارگیری کامیون قبلی می‌باشد و همچنین احتمال دارد کامیون دیگری در صف وجود داشته باشد یا نه، که در هر صورت کامیون جدید باید در صف باقی بماند.
- زمان انتظار منفی به این معنی است که، بارکننده مدتی قبل از رسیدن کامیون بیکار بوده است، که این نشان دهنده زمان انتظار بارکننده برای کامیون می‌باشد.

۴-۵- بررسی اعتبار نتایج مدل‌سازی

برای اعتبارسنجی می‌توان نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی را با شرایط واقعی معدن مقایسه نمود. براساس آمار بدست آمده تولید هفتگی سیستم حمل و نقل معدن در محدوده ۲۵۰۰۰۰ تا ۲۷۰۰۰۰ تن می‌باشد. برای این سیستم میانگین هزینه تولید به ازای یک تن برابر ۵/۲۳ دلار می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی سیستم فعلی در جدول ۲ آورده شده‌است. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن تولید هفتگی ۲۶۴۰۹۵

$$ECT(J) = \text{Max}\{ERT(J), TNOW + TT(J)\} \quad (5)$$

$$ACT(J) = ECT(J) \quad (6)$$

$$\text{ArrivingTime} = TNOW + TT(I) \quad (7)$$

$$ECT(J) = \text{Max}\{ERT(J), TNOW + TT(J)\} \quad (8)$$

جهت تعیین زمان انتظار بایستی تخصیص‌های زیر برای I از ۱ تا N (I= 1, 2, ..., N) انجام شود. باید توجه داشت که علامت "=" در عبارات زیر تساوی ریاضی نیست بلکه نشانه تخصیص در برنامه‌نویسی کامپیوتری است.

هرکدام از معادلات ۳، ۴ و ۵ معرف فرض‌های بکار رفته می‌باشند و برای همه بارکننده‌ها صدق می‌کنند. آخرین باری که یک کامیون به یک بارکننده ارجاع داده شد، عبارت‌ها مورد بازبینی قرار گرفته و آخرین زمان به کارگیری اختصاص یافته به آن (ACT)، به زمان به کارگیری پیش بینی شده آن لودر یا شاول (متغیر ECT) اختصاص می‌یابد.

زمان اتمام چرخه بارگیری را می‌توان با استفاده از زمان بارگیری شاول پیش بینی کرد؛ مطابق رابطه ۴، این کار انجام می‌شود.

زمان رسیدن یک کامیون جدید، که در زمان TNOW در نقطه گسیل بوده است، به محل بارگیری (لودر یا شاول) مطابق رابطه ۷ می‌باشد.

اگر واحد TT(I) را واحد زمان، برای رسیدن به محل بارگیری در نظر بگیریم، تفاوت بین زمان رهایی کامیون قبلی و زمان رسیدن کامیون جدید، بیان کننده زمان تأخیر خواهند بود، که منفی بودن آن نشان دهنده انتظار بارکننده برای کامیون بوده یا به عبارتی تأخیر کامیون می‌باشد. (رابطه ۴)

در نهایت، یک مقایسه نهایی برای تصمیم‌گیری در مورد بارکننده‌ای که کامیون ارسالی به آن با حداقل زمان تأخیر فرستاده شود، انجام می‌گیرد. ضریب I برای این شاول یا لودر، به متغیر J برای تعریف

کامیون‌های اختصاصی به لودرها است، میزان بهره‌وری لودرها کمتر می‌باشد. همچنین ظرفیت کامیونهای اختصاصی نیز در میزان بهره‌وری مؤثر است. با افزایش ظرفیت کامیون‌ها، بهره‌وری نیز افزایش می‌یابد.

تن برآورد شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتیجه شبیه‌سازی به شرایط فعلی معدن بسیار نزدیک بوده و می‌توان اعتبار مدل را تأیید نمود.

با توجه به اینکه در سیستم واقعی تعداد کامیونهای اختصاص داده شده به بیل‌های مکانیکی تقریباً دو برابر

جدول ۲- نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن در مدت یک هفته کاری

بارکننده	بهره‌وری از زمان برنامه		تعداد کامیون بارگیری شده	ظرفیت باربر(تن)	تولید(تن)
	ریزی شده %				
بیل مکانیکی	۹۳		۱۰۸۷	۹۵	۱۰۳۲۶۵
بیل مکانیکی	۵۴		۱۳۱۵	۳۰	۳۹۴۵۰
بیل مکانیکی	۷۶		۲۱۱۴	۳۰	۶۳۴۲۰
لودر	۲۴		۸۴۹	۳۰	۲۵۴۷۰
لودر	۲۷		۱۰۸۳	۳۰	۳۲۴۹۰
جمع	-		۶۴۴۸	۲۱۵	۲۶۴۰۹۵

که بارکننده‌های فعلی قابلیت سرویس دهی به ۴۶ کامیون را دارند. لازم به ذکر است، این تعداد کامیون در معدن موجود بوده و نیازی به خریداری مجدد نمی‌باشد.

۶- شبیه‌سازی برای انتخاب بهترین ناوگان حمل و نقل

در سناریو اول با افزایش تعداد کامیونهای سیستم، با همان ظرفیت و مشخصات کامیون‌های قبلی، مشخص شد

جدول ۳- هزینه بارکننده‌ها و بایرها

نوع تجهیزات	هزینه لاستیک (دلار بر متر مکعب)	هزینه زبرو بند(دلار بر متر مکعب)	هزینه روغن (دلار بر متر مکعب)	هزینه گازوئیل (دلار بر متر مکعب)	هزینه پرسنی (دلار بر متر مکعب)	هزینه تعمیرات (دلار بر متر مکعب)	نرخ اجاره (دلار بر متر مکعب)	حجم عملیاتی (متر مکعب در سال)	ساعات مفید کاری در یک سال	ساعات مفید کاری در یک هفته	مجموع هزینه (دلار بر ساعت در یک هفته)
کامیون ۱۰۰ تنی	۰/۱۲	-	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۱	۱/۰۳	۵۴۰۰۰۰	۶۰۲۲/۵	۱۱۵/۵	۱۵۸۵۰
کامیون ۳۰ تنی	۰/۰۱	-	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۹	۲۴۰۰۰۰	۶۰۲۲/۵	۱۱۵/۵	۶۰۴۹
لودر	۰/۰۷	-	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۴۷	۶۰۰۰۰۰	۶۰۲۲/۵	۱۱۵/۵	۹۰۸۴
بیل مکانیکی	-	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۴۱	۴۲۰۰۰۰	۶۰۲۲/۵	۱۱۵/۵	۵۷۳۱
شاوول	-	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۶۲	۱۲۰۰۰۰۰	۶۰۲۲/۵	۱۱۵/۵	۲۲۷۸۴

لودر، بیل مکانیکی و شاول در سیستم همراه با کامیون‌های ۳۰ تنی استفاده می‌شود. بدلیل اینکه ترکیب شاول و کامیون ۳۰ تنی عملاً در معدن مورد استفاده قرار می‌گیرد، امکان استفاده از آن ترکیب در قالب دو سناریو چهارم و پنجم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل می‌توان بیان کرد که استفاده از ترکیب کامیون ۳۰ تنی و شاول در ناوگان حمل و نقل، بدلیل نیاز به تعداد کامیون زیاد، ترافیک ایجاد شده باعث کاهش بهره‌وری در معدن می‌شود؛ لذا با تعریف سناریو ششم، حالت جایگزین برای استفاده هرچه بهتر از پتانسیل تجهیزات موجود بیان شد. در این سناریو نیز از لودر مدل KOMATSU 307، بیل مکانیکی مدل NEWHOLLAND W2770B و شاول موجود در معدن با مدل LIEBHERR 984 در سیستم همراه با کامیون‌های ۱۰۰ تنی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نمودارهای ۱ و ۲، قابل مشاهده است. همانگونه که در این نمودارها دیده می‌شود از نظر میزان تولید و هزینه سناریو ششم بهترین حالت می‌باشد، اما با در نظر گرفتن اصول مدیریتی و عملیاتی سناریو سوم به دلیل نداشتن بارکننده‌های گوناگون نسبت به سناریو ششم ترجیح داده می‌شود. جزئیات مربوط به تولید و هزینه سناریوهای مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

یعنی با کاهش هزینه به اندازه ۰/۳۳ دلار بر تن، تولید هفتگی به اندازه ۱۱۳۷۸۵ تن افزایش داشته است. مطابق جدول ۳ هزینه‌های مورد نظر از طریق بخش حسابداری شرکت آهن‌آجین در معدن گردآوری شده و با انجام محاسبات لازم با توجه به ساعات کاری و تناژ تولیدی مربوطه در یک هفته، جهت مقایسه و انتخاب سیستم مناسب به صورت هزینه کلی (مجموع تمام هزینه‌ها) بدست آمده است.

علاوه بر بررسی سیستم فعلی معدن در سناریوی اول، پنج سناریوی دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفت. این سناریوها با توجه به شرایط از جمله قدرت خرید ماشین آلات، سقف تولید ماهانه معدن، هزینه، پهنای پله‌های بخش مورد مطالعه، میزان پراکندگی ماده معدنی و شرایطی از این قبیل تعریف شده است.

از آنجایی که در سناریو اول با افزایش تعداد کامیون ترافیک جاده‌های معدن و زمان انتظار در صف افزایش می‌یابد؛ لذا در سناریو دوم از کامیون‌های ۱۰۰ تنی به جای کامیون‌های ۳۰ تنی استفاده می‌شود. با توجه به شرایط پله‌های موجود و وجود تعداد شاول کافی در معدن، امکان استفاده از ترکیب ناوگان شاول و کامیون ۱۰۰ تنی در قالب سناریو سوم بیان می‌شود. در سناریو چهارم از کامیون‌های ۳۰ تنی و شاول، در سناریو پنجم از

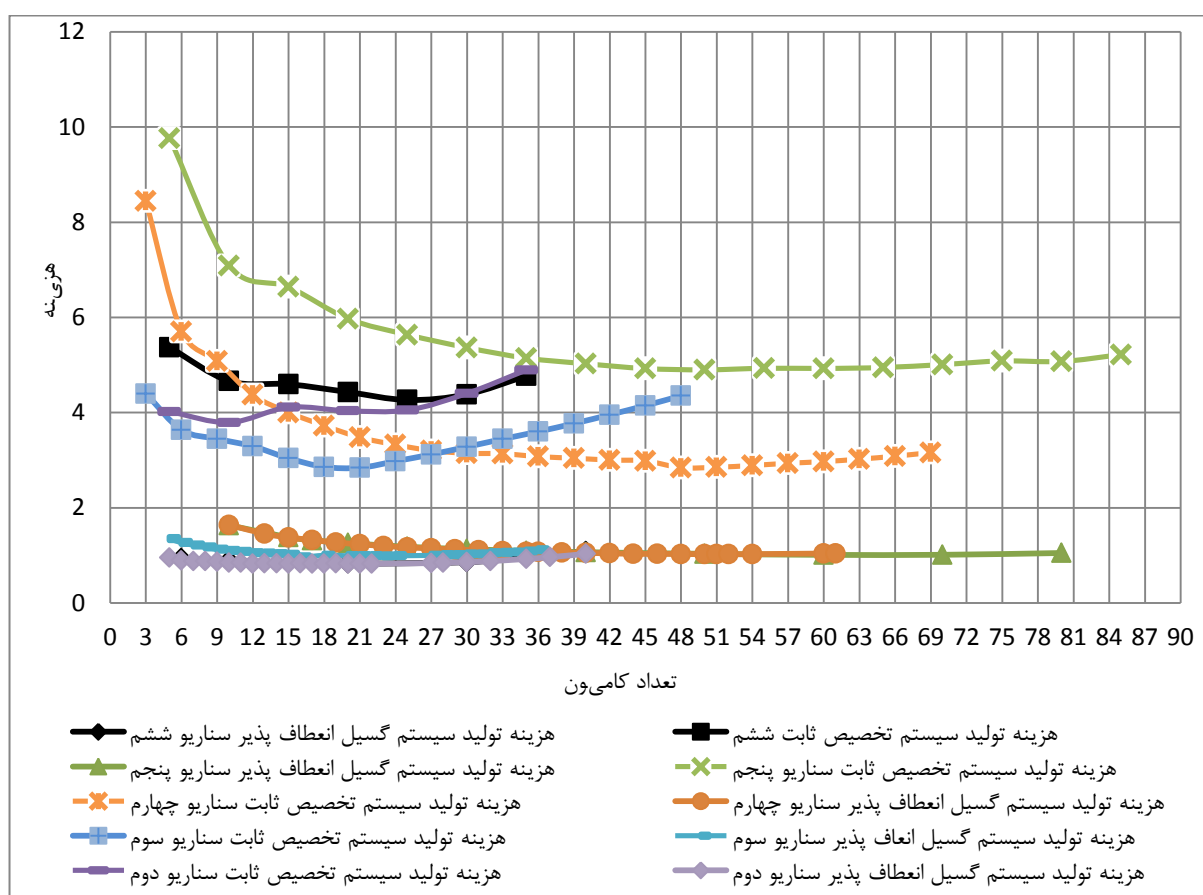
جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از سناریوهای مختلف

اطلاعات	تولید (تن در هفته)		هزینه (دلار در هفته)		تعداد کامیون	
	گسیل انعطاف‌پذیر	تخصیص ثابت	گسیل انعطاف‌پذیر	تخصیص ثابت	گسیل انعطاف‌پذیر	تخصیص ثابت
حالت فعلی معدن	-	۲۶۴۰۹۵	-	۵/۲۴	-	۲۹
سناریو اول	-	۳۷۷۸۸۰	-	۴/۹۰	-	۴۶
سناریو دوم	۳۹۱۴۰۰	۴۱۲۴۹۰	۰/۸۲	۳/۷۳	۱۸	۱۶
سناریو سوم	۴۸۰۰۰۰	۵۴۴۵۴۰	۱	۲/۷۱	۲۶	۲۵
سناریو چهارم	۳۸۷۳۰۰	۴۴۷۶۶۰	۱/۰۳	۲/۹	۵۴	۵۹
سناریو پنجم	۴۸۸۶۱۰	۵۴۱۴۷۰	۰/۱	۴/۶۴	۷۰	۷۱
سناریو ششم	۵۵۰۰۰۰	۶۱۵۷۹۰	۰/۸۳	۳/۸	۲۴	۲۶

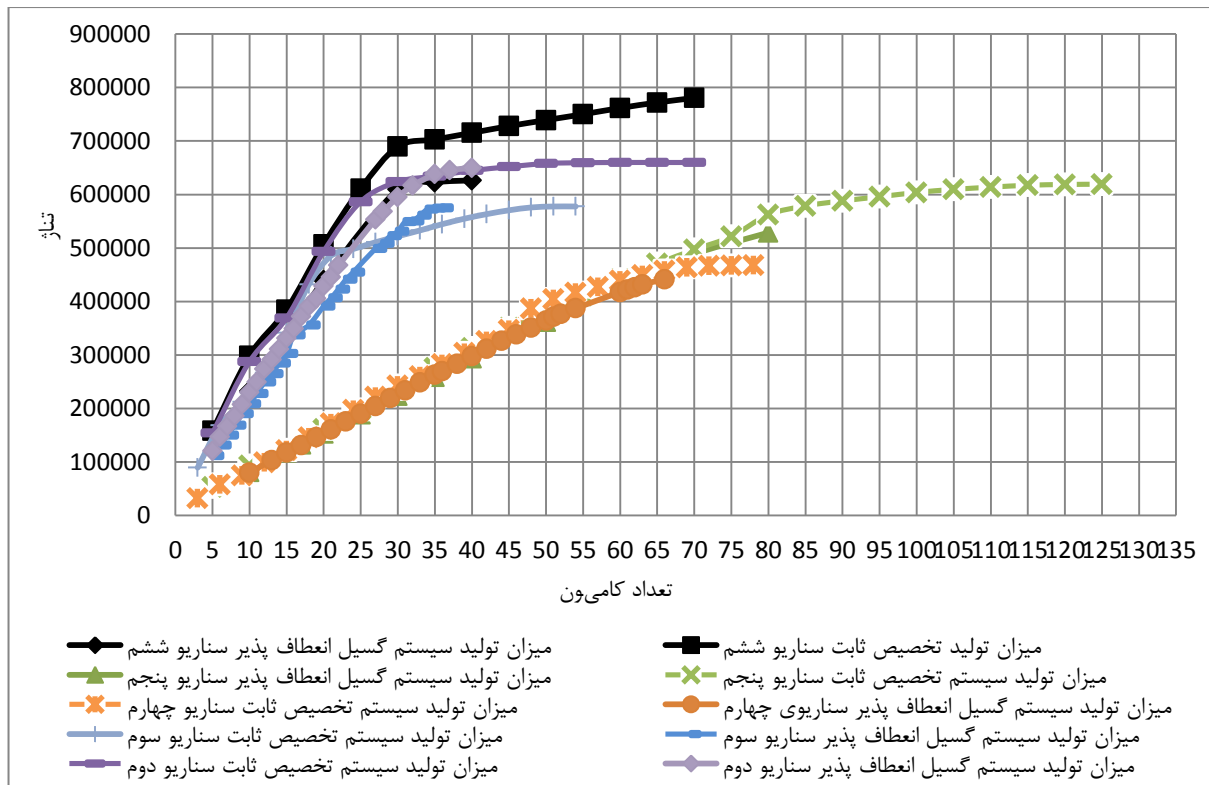
۷- نتیجه‌گیری

با مقایسه سناریوهای پیشنهادی برای بهبود عملکرد سیستم فعلی معدن، سناریو ششم با تولید هفتگی ۵۵۰۰۰۰ تن و هزینه ۰/۸۳ دلار بر تن در هفته از نوع گسیل انعطاف‌پذیر به عنوان بهترین سناریو انتخاب گردید. هرچند براساس اصل به‌کارگیری تجهیزات یکسان، سناریو سوم با قابلیت تأمین نیازهای تولیدی معدن و اندکی هزینه بیشتر نسبت به سناریو ششم ترجیح داده می‌شود.

بارکننده های فعال موجود در سیستم حمل و نقل معدن، پتانسیل سرویس دهی به ۴۶ دستگاه کامیون ۳۰ تنی را دارند. افزایش تعداد کامیون‌ها باعث افزایش تولید هفتگی از ۲۶۴۰۹۵ به ۳۷۷۸۸۰ تن و کاهش هزینه‌های تولید از ۵/۲۴ به ۴/۹ دلار بر تن در هفته می‌شود. با جایگزینی کامیون‌های ۱۰۰ تنی به جای کامیون‌های ۳۰ تنی، تولید تا ۳۹۱۴۰۰ تن در هفته افزایش می‌یابد.



نمودار ۱- مقایسه هزینه نهایی تولید سناریو دوم تا پنجم



نمودار ۲- مقایسه میزان تولید نهایی سناریو دوم تا پنجم

مراجع

- [1] Subtil, R.F., Silva, D.M., Alves, J.C. (2011). "A practical approach to truck dispatch for open pit mines". 35H the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry Symposium, Wollongong, NSW, 765-777
- [2] Clarke, M.P., Denby, B., Schofield, D. (1990). "Decision Making tools for surface mine equipment selection". Mining Science and Technology, Vol. 10, pp. 323-335.
- [3] Samanta, B., Sarkar, B., Mukherjee, S.K. (2002). "Selection of opencast mining equipment by a multi-criteria decision-making process". Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, pp.136-142 .
- [4] Başçetin, A. (2004). "An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine". Mining Technology, Vol.113, pp.192-199.
- [5] Aghajani Bazzazi, A., Osanloo, M., karimi, B. (2011). "Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods". Expert Systems with Applications, Vol.38, pp. 2550-2556 .
- [6] Aghajani Bazzazi, A., Osanloo, M., karimi, B. (2009). "Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach". Archive of Mining Science, Vol. 54, pp. 301-320.
- [7] George, N.Panagiotou. (1999). "Discrete mine system simulation in Europe". International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 13, pp. 43-46.
- [8] Chanda, K.E., Gardiner, S. (2010). "A computer study of truck cycle time prediction methods in open pit mining". Engineering, Construction and Architectural Management, Vol.17, pp. 446-460.
- [9] Yuri, G.M. (2005). "discrete event simulation of mine equipment systems combined with reliability assessment model". Master of Science thesis, Laurentian University.
- [10] Sturgul, J. R. (1999). "Mine Design examples using simulation". Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

- [11] Burtc, C., Caccetta, L., Hill, S., Wegama, P. (2012). "Models for mining equipment selection". Modelling and Simulation Society of Australia and Newzealand Inc., 1730-1736.
- [12] Ataee pour, M., Baafi, E.Y. (1998). "Application of ARENA simulation system to compare truck-shovel operation in dispatching and non-dispatching modes". Mine Planning and Equipment Selection, Singhal ed., Balkema, Rotterdam, pp.475-480.
- [13] Castilo, D., Cochran, J.K. (1987). "A micro computer approach for simulating truck haulage systems in open pit mining". Computer in Industry, Vol. 8, pp.37-47.
- [۱۴] دمیری، ع.ر.، عطایی‌پور، م.، صدری، ع.، (۱۳۸۴)، شبیه‌سازی حمل و نقل معدن چغارت با Arena. دومین کنفرانس معادن روباز ایران، ۲۰ و ۲۱ اردیبهشت.
- [15] Ataee pour, M., Damiri, A., Sadri, A. (2005). "Optimization of the Haulage system I Choghart Iron Ore Mine Using Arena". 20th World Mining Congress, Iran, Tehran, pp.225-230.
- [16] Bozorgebrahimi, E. (2004). "The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining". Ph.D thesis, the university of British Colombia.
- [17] Jaoua, A., Michel, G., Riopel, D. (2012). "specification of an intelligent simulation-based real time control architecture: application to truck control system". Computers in Industry, Vol. 63, pp. 882-894.
- [18] Banks, J., Carson, J.S. (1984). "Discrete-event System simulation". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [19] Koshnevis, B. (1994). "Discrete systems simulation". McGraw- Hill.
- [20] Kelton, W.David, Sadowski, Randall P., Sadowski, Deborah A. (1998), "Simulation with Arena: Systems modeling corporation". McGraw Hill, 523p.
- [21] Ataee pour, M., Baafi, E.Y. (1999). "Arena simulation model for truck- shovel operation in dispatching and non-dispatching". International Journa of Mining, Reclamation and Envirronment, Vol. 13, pp.125-129.