نشریه علمی مهندسی معدن ایران
Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

دوره ۱۷، شماره ۵۴، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۱۴ تا ۲۷
Vol 17, No 54, 2022, pp 14-27

DOI: 10.22034/ijme.2021.123293.1804
DOR: 20.1001.1.17357616.1401.17.54.3.9

انجمن مهندسی معدن ایران
Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

مقاله پژوهشی

تحلیل عملکرد ترابری معدن سرب و روی مهدی آباد با شبیه سازی گسسته

کیارش شاهین[۱]، رضا شکورشهابی[۲*]، سید مهرداد حیدری[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، mngkia@gmail.com
۲. استادیاردانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، shahabi@eng.ikiu.ac.ir
۳. دکتری مهندسی معدن شرکت پیشگامان صنعت سرب و روی مهدی آباد، mehrdad.heidari@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴

چکیده

مدیریت موثر ناوگان ترابری معادن تاثیر مهمی بر افزایش سوددهی و بهره وری تولید دارد و عدم تحقق اهداف برنامه ریزی شده تولید به علت افزایش تاخیرها و زمان انتظار ماشین‌ها، نظارت دائمی جهت بهبود عملکرد آنها را ضروری می نماید. در این تحقیق با بکارگیری تکنیک شبیه سازی پیشامد گسسته و نرم‌افزار Arena، مدل‌سازی وضعیت فعلی و تحلیل گلوگاه‌های عملیات بارگیری و حمل باطله استخراجی از معدن سرب و روی مهدی آباد انجام گرفت و بر مبنای نتایج شبیه سازی، رویکردهای مناسب بهبود عملکرد ناوگان پیشنهاد گردید. بدین منظور ابتدا با تحلیل عملیات تولید، حمل کننده‌ها به عنوان نهادها و بارکننده‌ها به عنوان منابع شبیه سازی در نظر گرفته شد و سه زیرسیستم پیت معدن، تعمیرگاه و دامپ‌های تخلیه تعریف گردید. سپس با تحلیل داده‌های زمان سنجی ، برآورد توابع توزیع مربوط به زمان فعالیت‌های بارگیری، تخلیه و پیمایش مسیرهای معدن و تأخیرات انجام گرفت. پس از اعتبارسنجی مدل و بر اساس نتایج شبیه‌سازی، معدن با افت بهره‌وری و بیکاری تعدادی از بارکننده‌ها مواجه می‌باشد که این موضوع با افزایش عمق معدن بیشتر خواهد شد به طوری که جهت جبران هر ۳۰۰ متر افزایش مسافت حمل، نیاز به اضافه شدن حداقل ۲ کامیون ۳۰ تنی است. در ادامه رفتار سیستم در صورت تغییر پارامترهای مدل شبیه سازی گردید و با تعریف دو دسته سناریو شامل حذف بارکننده‌های کم‌کارکرد و اضافه نمودن کامیون‌ها در قالب ۱۰۵ حالت مختلف، مدل اجرا و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج تحقیق، دو برابر شدن تعداد کامیون های ۳۰ تنی، موجب حداکثر سازی هر دو معیار سرویس دهی متوسط بارکننده‌ها و حمل کننده‌ها می شود. از طرفی، امکان حذف ۲ تا ۳ بارکننده بدون تغییر قابل توجه در عملکرد بارکننده‌های فعال باقیمانده وجود دارد.

کلمات کلیدی

مدیریت ناوگان ترابری معدن، سرب و روی مهدی آباد، شبیه سازی پیشامد گسسته، نرم افزار Arena.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

سیستم بارگیری و حمل در معادن سطحی به عنوان جزء اصلی زنجیره استخراج و باطله برداری ذخیره معدنی می باشد عملیات بارگیری و باربری پرهزینه ترین واحد عملیاتی در فعالیت های معدنی می باشد و ارتباط تنگاتنگی بین بهبود عملکرد ناوگان با افزایش سوددهی و بهره وری معدن وجود دارد. متداول ترین ناوگان بارگیری و حمل در عمده معادن سطحی متوسط و بزرگ، از نوع سیستم کامیون-شاول می‌باشد. این نوع ناوگان متشکل از چندین بارکننده اعم از شاول و لودر و چندین بارشونده از قبیل کامیون می‌باشد. مهمترین مزایای این سیستم شامل انعطاف پذیری، تحرک بالا و سرمایه گذاری زیربنایی کم می باشد. هر سیکل باربری شامل چهار زیرعملیات بارگیری، باربری، تخلیه و برگشت به محل بارگیری می باشد. کامیون‌ها به عنوان ماشین اصلی عملیات باربری در نظر گرفته می‌شوند. روشهای تخصیص کامیون‌ها در معادن سطحی به طور عمده به دو بخش تخصیص ثابت و تخصیص پویا تقسیم می‌شوند. درگذشته صرفه جویی در هزینه‌های حمل و نقل، عمدتا بر مبنای بهبود صرفه مقیاس و افزایش ظرفیت ماشین آلات از جمله افزایش ابعاد ناوگان صورت می‌گرفت. لیکن امروزه راهکارهای کاهش هزینه‌ها بر اساس برنامه ریزی مناسب حمل و نقل، ارتقای بهره وری ناوگان و نحوه تخصیص و گسیل مربوط می‌شود. تحقیقاتی که در خصوص ارتقای بهره وری ناوگان انجام گردیده‌اند را می‌توان در سه گروه مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی، شبیه‌سازی و ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دسته‌بندی نمود. تکنیک های بهینه‌سازی ریاضی عمدتا بر مبنای بکارگیری مدل‌های تحقیق در عملیات جهت کمینه‌سازی و یا حداکثرسازی توابع هدف تعریف شده با لحاظ کردن محدودیت های هر مدل بکار می رود لیکن شبیه سازی تقلیدی از یک سیستم بر اساس ویژگی های مورد نظر اجزای آن در طول زمان می باشد و یک روش ساده و کم‌هزینه برای مشاهده عملکرد سیستم‌ها در شرایط واقعی یا تغییر یافته محسوب می‌شود. اغلب اوقات مطالعه فیزیکی سیستم ها، بسیار مشکل و هزینه بر و یا حتی ناممکن می باشد در شبیه‌سازی عملکرد سیستم، با تغییر مقادیر یک یا چند پارامتر سیستم، تغییرات متغیرها یا خروجی های سیستم مشاهده می‌شود و کاربران را قادر به پیش بینی رفتار سیستم در دنیای واقعی می‌کند. اصولا کاربرد شبیه سازی، ساده‌تر از روش های تحلیلی است. از طرفی هزینه استفاده از شبیه سازی رو به کاهش است و شبیه سازی سیستم، امکان تحلیل‌های فراوانی را ایجاد می‌نماید. البته گاهی روش های تحلیلی دقیق به دلیل سادگی شبیه سازی نادیده گرفته می‌شوند لذا نباید شبیه سازی به طور کامل جایگزین روشهای تحلیلی گردد [۲].

شبیه سازی ناوگان حمل و نقل معدن می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی جهت آنالیز، نظارت و بهبود عملکرد سیستم مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به انجام فعالیت بارگیری و حمل در بازه‌های گسسته زمانی، در این تحقیق از شبیه سازی گسسته پیشامد[1] استفاده می‌گردد. در شبیه سازی پیشامد گسسته، با تعریف یک سیستم با هدف و مرزهای مشخص، مدلسازی فعالیت آن در قالب تعدادی از وقایع گسسته و متوالی با زمان‌های احتمالی تعریف می‌شود که در لحظه یا بازه‌ای از زمان روی می‌دهد و با اجرای مدل در بازه‌های زمانی مختلف، عملکرد سیستم و پاسخ آن به اقدامات مختلف شبیه سازی می شود. این تکنیک به صورت گسترده برای مدل‌های فرآیند محوری به کار می رود که در آن سیستم به صورت توالی از عملیاتها (ورود، تاخیر، استفاده از منابع، مجزا کردن، ترکیب کردن و ...) تجزیه و تحلیل می شود و در یک محیط مجازی با پیاده سازی واقعی سیستم، کارایی آن را از لحاظ فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از دیگر مزایای آن می‌توان به مطالعه سیستم موجود بدون ایجاد مزاحمت در عملکرد سیستم و نیز تحلیل نتایج تغییرات در سیستم و یا بکارگیری زیرسیستم های جدید اشاره نمود که موجب افزایش جذابیت آن می شود [۱-۵].

شبیه سازی گسسته پیشامد در عملیات معدنی و نرم افزار Arena در حوزه‌های مختلفی از قبیل انتخاب تجهیزات معدنکاری زیرزمینی [۶]، تاثیر عوامل مختلف بر انتقال مواد معدنی در معدنکاری زیرزمینی [۷] و بهینه سازی کاهش مصرف سوخت در بارگیری و انتقال مواد معدنی [۸] بکار گرفته شده است. با توجه به ماهیت فعالیت ترابری معدن در قالب پیشامدهای گسسته متوالی و تصادفی، مدلسازی فرآیند تولید و بررسی نتایج اعمال رویکردهای بهبود تولید، می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های تولید ایفا کند. تعدادی از تحقیقاتی که در سالهای اخیر انجام گردیده است در ذیل آورده شده است:

عطایی پور و بافی در سال ۱۹۹۹ سیستم تخصیص پویای معدن را با تکنیک گسسته پیشامد و نرم افزار ارنا تحلیل نمودند [۹]. ترکمنی و عسکری نسب در سال ۲۰۱۳ با مطالعه سیستم کامیون-شاول در یک معدن آهن، یک مدل شبیه سازی به روش پیشامد گسسته طراحی نموده‌اند که قابلیت

[1] Discrete Event Simulation

تحلیل و بهبود بهره‌وری کامیون و شاول، کاهش زمان انتظار کامیون و طول صف در هر مقصد و نیز میانگین زمان سیکل کامیون در طول شیفت را دارا می‌باشد [۳].

کابا و تمنگ در سال ۲۰۱۴ با شبیه سازی گسسته پیشامد عملکرد دو دستگاه اکسکاواتور در شرایط متغیر عملکردی برای مدت ۴ هفته ، تولید دستگاه‌ها را با ضریب اطمینان ۹۵٪ را با استفاده از نرم افزار Arena پیش بینی نمودند. بر اساس مقایسه نتایج شبیه سازی، متوسط تولید و می نیمم تولید پیش بینی شده نسبت به تولید واقعی اکسکاواتورها به ترتیب دارای ۲٫۳٪ و ۵٫۴ درصد انحراف را نشان می دهد [۱۰].

آزادی و همکاران در سال ۱۳۹۳ نتایج شبیه سازی ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون و انتخاب ظرفیت بهینه تجهیزات بارگیری و حمل را با نرم افزار Arena ارائه نمودند. شرایط واقعی معدن به همراه پنج سناریو دیگر تخصیص و گسیل انعطاف پذیر تعریف گردید و در نهایت ترکیب کامیون ۱۰۰ تنی با لودر ۶٫۱ مترمکعبی، بیل مکانیکی ۴٫۶ و شاول ۷ مترمکعبی به عنوان بهترین ترکیب و اندازه ماشین آلات ترابری پیشنهاد گردید [۵].

هاشمی و ستاروند در سال ۲۰۱۵ بر مبنای تلفیق تابع هدف کمینه‌سازی صف انتظار کامیون و شبیه سازی سیستم تراک- شاول معادن سطحی با نرم افزار Arena، بهبود عملکرد ۷٫۸ درصدی تخصیص انعطاف پذیر نسبت به ثابت را نتیجه گیری نموده است [۱۱].

کیو و همکاران در سال ۲۰۱۵ بهینه سازی سیستم یک سیستم بارگیری توسط شاول و سپس انتقال هیدرولیکی ماسه‌های نفتی را با تکنیک پیشامد گسسته شبیه سازی کردند. انتقال هیدرولیکی شامل ۱۴ بازوی ۶۰ متری لوله‌ها با زوایای مختلف و موقعیت های مختلف بارگیری و تخلیه توسط شاول می باشد. ظرفیت بهینه شاول ۷۰ تن و نصب یک مخزن هیپ[1] جهت حداکثرسازی بهره‌وری سیستم انتقال پیشنهاد گردید [۱۲].

فروغ و همکاران در سال ۲۰۱۹ با مدلسازی گسسته پیشامد فرآیند تونل سازی مکانیزه در تونل نوسود، عملکرد تی بی ام و و شاخص های کارآیی بر مبنای شرایط زمین، تنظیمات عملیاتی و فعالیت های تونل سازی را مورد بررسی قرار دادند و در مورد نرخ پیشروی[2] ماشین حفاری، انطباق خوبی بین نتایج شبیه سازی گسسته پیشامد با عملیات واقعی برقرار می‌باشد [۱۳].

علمداری و همکاران در سال ۱۳۹۸ عملیات استخراج معدن خاک نسوز آباده را با نرم افزار Arena تحلیل نموده است. بر این اساس، تخصیص انعطاف پذیر ناوگان حمل و نقل با افزایش ۴ تا ۸ درصدی تولید، موجب کاهش ۵ تا ۷درصدی هزینه‌های تولید می‌گردد [۱۴].

برای این تحقیق معدن سرب و روی مهدی آباد انتخاب گردید که در فاصله ۱۱۵ کیلومتری جنوب شهر یزد واقع شده است فعالیت های اکتشافی در محدوده این معدن از حدود ۵ دهه گذشته آغاز شده است و در حال حاضر عمده فعالیت معدن، عملیات باطله برداری است. طبق آخرین برآورد، ذخیره زمین شناسی سرب و روی معدن ۷۱۶ میلیون تن و ذخیره قابل استخراج معادل با ۱۵۴ میلیون تن می‌باشد. سیستم بارگیری و حمل در این معدن که در حال حاضر در مرحله باطله برداری معدن می باشد دارای ۱۱ دستگاه بارکننده شامل انواع لودر، بیل مکانیکی و شاول و نیز ۳۴ دستگاه کامیون با ظرفیت های ۳۰ و ۱۰۰ تنی می باشد. طبق طراحی صورت گرفته، پیت نهایی روباز معدن، با ابعادی به طول ۱۹۰۳ متر و عرض ۱۴۳۳ متر، تا عمق ۳۴۰ متر گسترش خواهد یافت. این سیستم بزرگ مقیاس محسوب شده و به دلیل پیچیدگی های خاص خود، نیازمند روشی جهت تحلیل عملکرد ناوگان حمل و نقل می باشد که بتواند ضمن تصویر نمودن وضعیت فعلی، نقاط قوت و ضعف آن را نیز به خوبی نمایان سازد. در این تحقیق تلاش گردید تا با پیاده سازی تکنیک پیشامد گسسته، مدل‌سازی عملیات بارگیری و حمل باطله استخراجی از معدن سرب وروی مهدی آباد انجام گیرد رفتار سیستم در صورت تغییر مسافت های حمل، تغییر تعداد نهادها (حمل کننده‌ها) و منابع (بارکننده‌ها) در قالب سناریوهای مختلف شبیه سازی تحلیل گردد و با تعریف دو دسته سناریو شامل حذف بارکننده‌های کم کارکرد و اضافه کردن کامیون به سیستم ترابری، مدل اجرا و نتایج مورد بررسی قرار گیرد.

تحلیل نتایج شبیه سازی مدل حمل و نقل در معدن سرب و روی مهدی آباد، ضمن آنالیز رفتار فعلی و شناسایی گلوگاه‌های سیستم، امکان تحلیل نتایج اعمال سناریوهای مختلف ارتقای عملکرد را با کمترین هزینه و در کوتاه ترین زمان ممکن فراهم می نماید.با توجه به ذخیره و ابعاد بزرگ پیت معدن، پیاده سازی شبیه سازی می تواند با صرف حداقل زمان و هزینه بهترین جواب را برای تعیین اندازه بهینه ناوگان در شرایط حاضر و نیز فازهای توسعه ای معدن داشته باشد.

[1] Surge hopper
[2] Advance Rate

۲- مبانی تئوریک تحقیق

مبنای اصلی بسیاری از تکنیک های شبیه سازی، بر مبنای دیدگاه سیستمی می‌باشد. سیستم به صورت مجموعه ای شامل تعدادی اجزا در نظر گرفته می شود که به صورت یکپارچه به دنبال هدف مشخص در حال فعالیت هستند و توسط یک مرز[1] از محیط پیرامون[2] خود متمایز شده است. در تعریف سیستم، از اثر اجزای محیط پیرامون آن و نیز اجزای نامرتبط با مساله صرفنظر می شود تا تحلیل سیستم با توجه به امکانات و ابزارها امکان پذیر شود [۱۵-۱۷]. در هر شبیه سازی، اجزایی انتخاب می شوند که بیشترین تأثیر را بر سیستم داشته باشد. لیکن ساده سازی نبایستی در حدی باشد که استفاده از مدل قابل قبول نباشد همچنین می‌توان در داخل سیستم مرزهای جدیدی ایجاد کرد تا سیستم های زیرمجموعه[3] تعریف شوند [۱۸]. اگرچه شبیه سازی روشی مناسب برای سیستم های پیچیده می باشد و گاهی تنها راه یافتن پاسخ است لیکن باید توجه نمود که شبیه‌سازی هیچگاه نمی‌تواند تطابق کامل با واقعیت داشته باشد [۱۷].

برای شبیه سازی، سه دسته تکنیک پویایی سیستم[4]، شبیه سازی با ناظر[5] و شبیه سازی گسسته پیشامد وجود دارد که در این میان تکنیک پیشامد گسسته، انطباق پذیری خوبی با سیستم بارگیری و حمل و نقل معادن دارد. در تکنیک پیشامد گسسته، فعالیت یک سیستم شامل تعدادی از وقایع متوالی و گسسته در نظر گرفته می شوند که در لحظه یا بازه ای از زمان رخ می‌دهند که برآیند این وقایع نمایانگر عملکرد کلی سیستم می باشد. نرم افزارهای مختلفی برای شبیه سازی پیشامد گسسته از جمله ED[6]، GPSS/H، Any Logic و Arena وجود دارند که در این تحقیق از نرم افزار Arena استفاده شده است [۱۹]. ویرایش های مختلف این نرم افزار با قابلیت های متعدد و انیمیشن دو و سه بعدی با زبان برنامه نویسی SIMAN تدوین و توسط شرکت Rockwell ارائه گردیده است و پروسه مدل سازی را با ماژول‌های متنوع خود تسهیل می کند و امکان مشاهده سیستم را در همه شرایط فراهم می‌کند. همچنین می‌توان با توسعه این شبیه سازی کامپیوتری، سیستم را از دیدگاه‌های مورد نظر مدل‌ساز تحت بررسی قرار می‌گیرد و آزمون عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف انجام می‌شود.همچنین با تکرار زیاد شبیه سازی، امکان تحلیل نتایج شاخص های عملکردی بر مبنای تحلیل مونت کارلو قابل اجرا می‌باشد. نهاد[7] مهمترین عنصر مورد توجه در شبیه سازی گسسته پیشامد می‌باشد که با گذر زمان در سیستم حرکت کرده و دچار تغییرات در ویژگی[8] های خود می شود. ویژگی‌ها می توانند به صورت ثابت یا متغیر به نهاد نسبت داده شود. متغیرهای حالت[9] شامل اطلاعاتی می باشند که گویای حالت سیستم در هر لحظه از زمان هستند. هر رخدادی که موجب تغییر در متغیر حالت سیستم شود، یک پیشامد[10] تلقی می شود. پیشامد بعد زمانی ندارد یعنی در یک لحظه رخ داده و حالت سیستم را تغییر می‌دهد. فرایند[11] نیز می‌تواند توسط خود نهاد انجام شود یا توسط منبع[12] برای نهاد انجام شود [۲۰].

تابع توزیع احتمال تصادفی[13]پرکاربردترین پارامتر مورد استفاده در شبیه سازی پیشامد گسسته می‌باشد که احتمال وقوع رخدادهای مختلف را بر اساس فراوانی پیشامدهای رخ داده در تست های قبلی را بیان می کند و بسته به شرایط داده‌ها، از توابع مختلفی پیروی می‌کند. از پرکاربردترین ترین توابع می‌توان به توزیع نرمال[14] و نمایی[15] اشاره نمود. بیشتر داده‌های ورودی نرم افزارهای شبیه سازی پیشامد گسسته، به صورت توابع توزیع آماری می باشند و در مواردی نیز از مقادیر ثابت استفاده می‌شود. با ابزار تحلیل ورودی‌ها در نرم افزار Arena، امکان تحلیل داده‌های ورودی و استخراج توابع توزیع پارامترهای احتمالی مدل انجام می‌شود. بدیهی است که هرچه تعداد داده‌های ورودی برای یک متغیر تصادفی بیشتر باشد، دقت توابع توزیع به دست آمده نیز بیشتر و کارآیی مدل بهتر خواهد بود [۱۸, ۱۹].

۳- شبیه سازی سیستم ترابری معدن مهدی آباد

چنان که قبلا بیان شد هدف اصلی این تحقیق، شبیه سازی وضعیت فعلی سیستم بارگیری و انتقال مواد باطله و مواد معدنی در معدن سرب و روی مهدی آباد و بهبود اندازه ناوگان متناسب با شرایط خاص معدن می باشد تا سناریوهای بهبود عملکرد سیستم بارگیری و حمل و نقل معدن که دارای قابلیت اجرایی می باشد تعریف و بررسی گردد. به منظور شبیه سازی

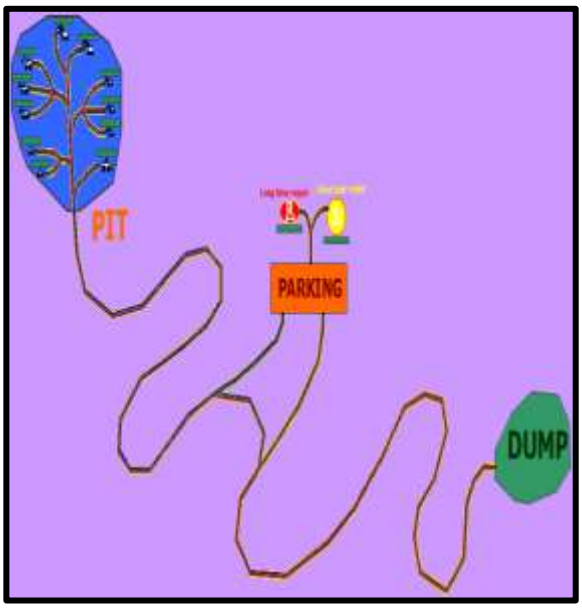
[1] Boundary
[2] Environment
[3] Sub-system
[4] System Dynamics
[5] Agent based Modeling
[6] Enterprise Dynamics

[7] Entity
[8] Attribute
[9] State variable
[10] Event
[11] Process
[12] Resource
[13] Random probability distribution function
[14] Normal
[15] Exponential

گسسته پیشامد سیستم و با توجه به این که فعلا عملیات باطله برداری معدن در حال انجام می‌باشد، ناوگان حمل و نقل معدن سرب و روی مهدی آباد در مجموع شامل ۳۴ دستگاه حمل کننده و ۱۱ دستگاه بارکننده مطابق جدول ۱ می‌باشد. سیستم کلی ترابری معدن شامل سه زیرسیستم پیت معدن، تعمیرگاه (به همراه پارکینگ) و دامپ های تخلیه در نظر گرفته می‌شود. مدل شماتیک زیرسیستم‌ها و نحوه ارتباط بین آنها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: ناوگان ترابری معدن سرب و روی مهدی آباد.

نوع ماشین‌آلات	مدل	ظرفیت (مترمکعب)	تعداد
کامیون	HD325	۱۸(۳۰ تنی)	۱۸
	HD785	۳۸٫۶ (۱۰۰ تنی)	۱۶
شاول	R9350	۱۸	۲
اکسکاواتور	PC800-7	۳٫۵	۲
	PC850-8	۴٫۵	۱
لودر	WA470-3	۱۱٫۵	۱
	WA600-3		۲
	WA800-3E0		۲
	WA800L-3		۱



شکل ۱: نمای شماتیک ارتباط زیرسیستم های مدل.

در زیرسیستم تعمیرگاه، واحد پارکینگ نیز برای زمان تعویض شیفت و واحد تعمیرگاه برای ازکارافتادگی و تعمیر کامیون‌ها در نظر گرفته شده است. حمل کننده‌ها به عنوان نهادها و بارکننده‌ها به عنوان منابع شبیه سازی در نظر گرفته می‌شوند. نهادها با پیمایش مسیرهای ارتباطی و نیز فعالیت های بارگیری در واحد پیت (توسط منابع) و تخلیه در واحد دمپ (توسط خود نهاد)، عملیات ترابری در معدن را انجام می دهند

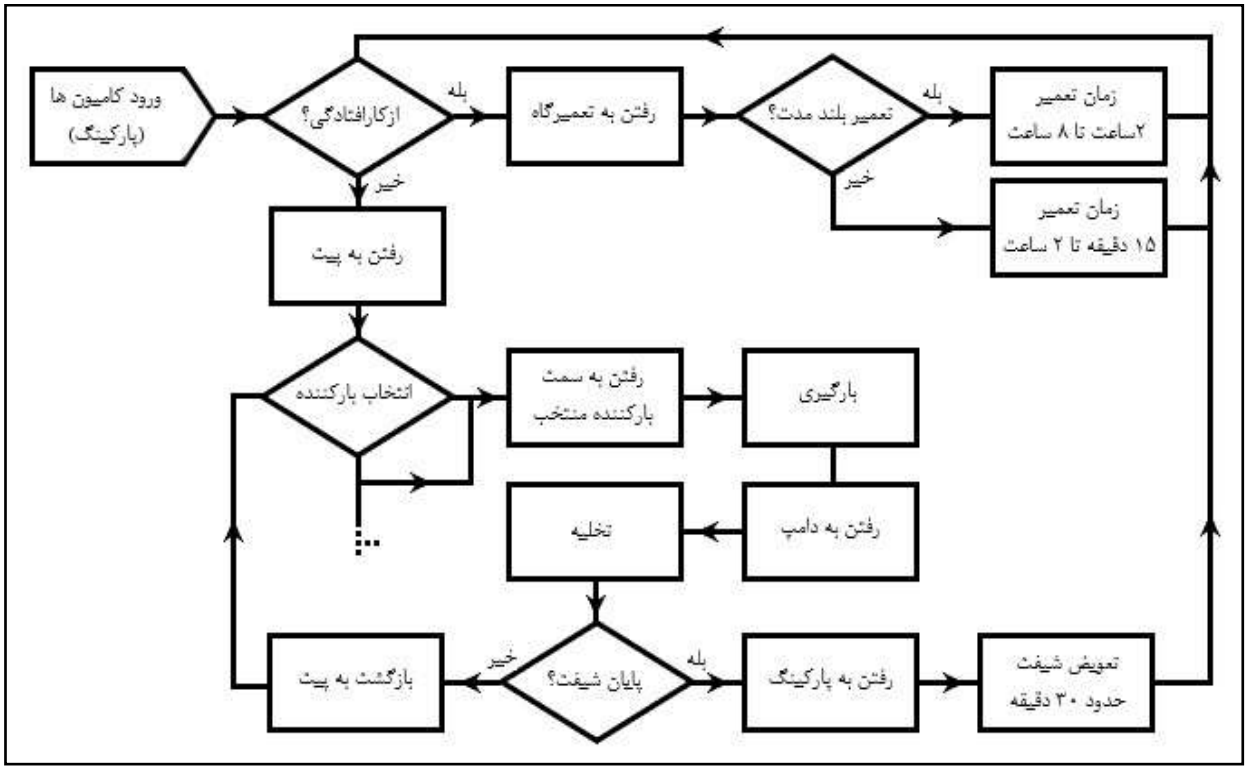
مدل مفهومی گسیل و تخصیص کامیون‌ها به عنوان نهادها توسط شاول‌ها به عنوان منابع و فرآیندهای مرتبط بر مبنای ملاحظات تخصیص پویا در شکل ۲ نشان داده شده است. لذا در پیت معدن هر نهاد به منبعی تخصیص داده می شود که در صف بارکننده، حداقل زمان انتظار وجود دارد. واحد پارکینگ نقطه شروع شبیه‌سازی می باشد که با ورود کامیون‌ها به عنوان نهادهای مدل از آن آغاز می‌شود. تشخیص ازکارافتادگی حمل کننده‌ها و نوع آن نیز در واحد پارکینگ رخ می دهد که در این صورت به تعمیرگاه و در غیر اینصورت به پیت استخراجی اعزام می شوند با توجه به تعداد بالای ماشین آلات و نقش تعمیر و نگهداری در ارتقای کارآیی سیستم ترابری، به عنوان یک زیرسیستم جداگانه لحاظ شده است که یکی از وجوه تفاوت این مطالعه نسبت به تحقیقات قبلی است. واحد دامپ صرفا برای تخلیه لحاظ گردیده است لذا هیچ منبعی در واحد دامپ پیش بینی نگردیده است و صف نیز تشکیل نمی شود، به عبارت دیگر، هر کامیون پس از رسیدن به این بخش و جای‌گیری در مکان مناسب، فعالیت تخلیه خود را انجام می دهد و بعد از اتمام فعالیت تخلیه در صورت نرسیدن به زمان اتمام شیفت به سمت پیت معدن حرکت کرده و فرایند ادامه می‌یابد و در صورت رسیدن به زمان اتمام شیفت، برای انجام فرایند تعویض شیفت به سمت پارکینگ حرکت می‌کند. ضمنا در صورت اتمام شیفت و وجود فرآیند نیمه تمامْ حمل، کامیون‌ها پس از تخلیه به پارکینگ مراجعه می کنند.

۱-۳- داده‌های ورودی مدل

برای ساخت مدل، داده‌های زیر مورد نیاز می باشند:

- ظرفیت ماشین آلات در قالب مقادیر قطعی.
- زمان های لازم برای انجام فعالیت بارگیری در پیت معدن، پیمایش مسیر و تخلیه در دمپ در قالب توابع توزیع احتمالی.
- درصد کامیون های از کارافتاده در هر شیفت و نوع از کارافتادگی برای نهادها.
- زمان متوسط تعمیر (MTTR[1]) و زمان متوسط خرابی (MTTF[2]) برای منابع (ناوگان بارکننده).

[1] Mean Time to Repair
[2] Mean Time to Failure



شکل ۲: مدل مفهومی جریان نهادها(کامیون) در بین زیرسیستم ها.

در ادامه مسیرهای معدن، برای ایجاد ارتباط بین واحدها و زیرسیستم‌ها تعریف گردید.

به منظور شبیه سازی سیستم حمل و نقل، زمان های پیمایش مسیر توسط نهادها (کامیون)و زمان های انجام عملیات بارگیری(توسط منابع) و نیز تخلیه کامیون‌ها به تفکیک نوع دستگاه جمع آوری گردید. مجموع داده‌های ریز عملکرد ماشین آلات معدن بالغ بر ۳۰۰۰ رکورد ثبت شده معدن در چند روز مشخص سال می باشد و حداقل تعداد داده اندازه گیری شده برای تخمین تابع توزیع هر زیر فعالیت، ۴۰ سری داده می باشد. پس از جمع آوری داده‌ها و رسم نمودار هیستوگرام آنها، بهترین توزیع احتمالی زمان هریک از زیرفعالیت‌ها بر مبنای کمترین خطا انتخاب می شود. برآورد توابع توزیع زمان زیر فعالیت‌های بارگیری، تخلیه و زمان‌های پیمایش مسیرهای معدن و تأخیرات آنها با ابزار Input Analyzer در نرم‌افزار Arena انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۲ بیان شده است.لازم به ذکر است که توزیع انتخاب شده به عنوان ورودی مدل شناخته می شود. علامت ضربدر در جدول ۲ به معنی عدم تناسب ظرفیت کامیون با بارکننده می‌باشد و در مدلسازی سیستم نیز، سرویس دهی کامیون توسط بارکننده مذکور انجام نمی‌گیرد و کامیون در صف بارکننده مذکور قرار نمی‌گیرد.

زمان های طی مسافت داخل پیت متناسب با موقعیت جبهه کار متفاوت می باشد. سرعت هر کامیون بر اساس زمان پیمایش تعیین می شود. این زمان پیمایش بر اساس تابع توزیع احتمال تصادفی به دست آمده از پایگاه داده برای هر مسیر توسط ماژول Route تعریف می شود. سایر مفروضات مدل به شرح ذیل می باشد:

- نوع تخصیص انعطاف پذیر فرض می شود. لذا در حالت وجود بیش از حد کامیون ، زمان انتظار سیستم مثبت و در حالت کمبود کامیون و انتظار بارکننده، زمان انتظار منفی خواهد بود.
- متوسط فاصله زمانی میان خروج دو کامیون متوالی از پارکینگ در ابتدای شیفت، ۲۰ ثانیه می باشد.
- مسیرهای عبور کامیون‌ها در معدن دوطرفه و بدون امکان سبقت لحاظ شده است.
- حداقل فاصله ایمنی کامیون‌ها در ابتدای مسیر ورودی ۵۰ متر و در طول مسیر ۱۵ متر تعیین گردیده است.
- سرعت کامیون پر در مسیرهای مدل، ۱۵٪ کمتر از کامیون های خالی در نظر گرفته شد.
- انتخاب بارکننده مناسب پس از رسیدن به واحد پیت، با بررسی همزمان شرایط زیر صورت می‌گیرد:
  - بارکننده با کوتاه ترین صف انتظار.
  - فعال بودن بارکننده (عدم ازکارافتادگی).

جدول ۲: توابع توزیع احتمالی هریک از متغیرهای مدل.

نوع فعالیت	توضیحات	تابع توزیع احتمالی زمان (ثانیه)	
		HD325	HD 785
زمان بارگیری توسط بارکننده‌ها	Shovel	×	54 + ERLA (36.3, 2)
	EX850	NORM(174, 24.7)	TRIA(203, 244, 618)
	EX800	NORM(174, 24.7)	219 + EXPO(104)
	LD800	36 + LOGN(60.7, 251)	NORM(167, 37.8)
	LD600/470	NORM(158, 55.4)	×
زمان های تاخیر و مانور	مانور کامیون برای جایگیری در مکان بارگیری	2.5 + ERLA(3.39, 5)	
	تعویض شیفت (دقیقه)	NORM(30, 5)	
زمان تخلیه در دامپ	توسط کامیون ها	24.5 + ERLA(11, 4)	
زمان های ثابت طی مسیر	از پارکینگ به پیت	55 + WEIB(321, 3.3)	
	از پیت به واحد دامپ	105 + WEIB(321, 3.3)	
	برگشت از دامپ به پیت	95 + WEIB(321, 3.3)	
	برگشت از دامپ به واحد پارکینگ	65 + WEIB(321, 3.3)	
	از پارکینگ به تعمیرگاه	TRIA(30, 40, 60)	
	از تعمیرگاه به پارکینگ	TRIA(27, 36, 54)	

۲-۳- اجرای مدل شبیه سازی

شبیه سازی فرآیند بارگیری، حمل و تخلیه معدن مهدی آباد در سه شیفت ۸ ساعته معادل ۲۴ ساعت انجام گرفت لیکن با توجه به وجود فرآیندهای نیمه تمام و اعمال زمان‌های توقف دستگاهها در قالب ورودی‌های مدل، هر شبیه سازی در ۲۵ ساعت (معادل ۱۵۰۰ دقیقه) اجرا گردید تا زمان کافی جهت انجام سرویس های نیمه تمام و سیکل های ناقص در مدل فراهم شود لیکن در ساعت آخر اجازه شروع سیکل جدید زیر فعالیت‌ها داده نشد. به منظور اطمینان از حصول نتایج پایدار، مدل به ازای تعداد تکرار مختلف اجرا گردید. بر مبنای مقادیر تغییرات پارامترهای خروجی، بعد از ۳۰ تکرار، عملکرد نهادهای مدل دارای کمترین تغییرات و پایداری مناسب می باشند لذا به عنوان حد توقف تکرار مدل لحاظ گردید جدول ۳ بیانگر مقادیر خروجی تعداد سرویس‌ها و تناژ عملکردی هریک از انواع کامیون‌ها در سه شیفت ۸ ساعته به ازای تکرارهای مختلف می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر خروجی عملکرد نهادها به ازای تکرارهای مختلف شبیه سازی.

تعداد تکرار شبیه‌سازی	KOM 785		KOM 325		متوسط عملکرد هر کامیون	
	تعدادسرویس	درصد تغییرات	تعداد سرویس	درصد تغییرات	تعداد سرویس	درصد تغییرات
۱	۶۹۴		۶۷۷		۴۰٫۳۲	
۳	۷۰۱	۱٪٫۰۱	۵۹۵	-۱۲٪٫۱۱	۳۸٫۱۲	-۵٪٫۴۷
۸	۷۸۳	۱۱٪٫۷۰	۶۶۶	۱۱٪٫۹۳	۴۲٫۶۲	۱۱٪٫۸۱
۱۲	۸۲۰	۴٪٫۷۳	۸۲۱	۲۳٪٫۲۷	۴۸٫۲۶	۱۳٪٫۲۵
۱۷	۷۶۱	-۷٪٫۲۰	۷۹۶	-۳٪٫۰۵	۴۵٫۷۹	-۵٪٫۱۲
۲۰	۹۰۳	۱۸٪٫۶۶	۷۷۸	-۲٪٫۲۶	۴۹٫۴۴	۷٪٫۹۶
۲۵	۸۱۳	-۹٪٫۹۷	۶۴۱	-۱۷٪٫۶۱	۴۲٫۷۶	-۱۳٪٫۵۰
۳۰	۸۴۰	۳٪٫۳۲	۵۵۲	-۱۳٪٫۸۸	۴۰٫۹۴	-۴٪٫۲۶

۳-۳- اعتبار سنجی مدل

اعتبارسنجی مدل به منظور ارزیابی تطابق نتایج شبیه سازی با داده‌های واقعی عملکردی انجام می‌گیرد تا صحت تحلیل‌های مربوطه مورد اطمینان قرار گیرد. بدین منظور تعداد سرویس و تناژ حمل شده توسط کامیون‌ها به عنوان نهادهای سیستم ترابری (شامل بارگیری، حمل و تخلیه) در یک شبانه روز شامل ۳ شیفت ۸ ساعته به عنوان شاخص اصلی اعتبارسنجی مدل لحاظ گردید و با داده‌های واقعی عملکرد سیستم ترابری مقایسه گردید. با توجه به تحلیل داده‌های عملکرد ماهانه ماشین آلات بارگیری و حمل، در جدول ۴ خروجی مدل مربوط به به ازای کل حمل کننده‌ها و بار کننده‌ها با عملکرد متوسط روزانه مقایسه گردیده است. بر این اساس متوسط خطای شبیه سازی با توجه به معیار تناژ بر مبنای شاخص عملکرد نهادها معادل ۶٫۸۶٪ و بر مبنای عملکرد منابع ۹٫۸۷٪ می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه خروجی مدل و داده‌های واقعی عملکرد نهادها و منابع.

نوع دستگاه و تعداد			عملکرد واقعی سیستم ترابری				خروجی مدل شبیه سازی			متوسط خطا (بر مبنای تناژ عملکرد)
			تعداد سرویس	تناژ عملکردی	متوسط سرویس هر دستگاه	متوسط تناژ روزانه هر دستگاه	تعداد سرویس	تناژ عملکردی	متوسط تناژروزانه هر دستگاه	
نهادها (کامیون)	HD325	۱۸	۸۷۸	۲۳۷۰۶	۴۸٫۷۸	۱۳۱۷	۸۴۰	۲۳۱۲۰	۱۲۸۴	۶٫۸۶٪
	HD785	۱۶	۵۴۵	۴۶۳۲۵	۳۴٫۰۶	۲۸۹۵	۵۵۲	۵۳۸۲۵	۳۳۶۴	
منابع (شاول)		۱۱	۱۴۲۳	۷۰۰۳۱	۱۲۹٫۴	۶۳۶۶	۱۳۹۲	۷۶۹۴۵	۶۹۹۵	۹٫۸۷٪

۴- تحلیل عملکرد فعلی ناوگان ترابری

تحلیل خروجی های مدل به ازای هریک از دستگاهها که مجموع آن در شکل ۳ آمده است، نشان می دهد که حمل کننده‌ها به جز موارد ازکارافتادگی به طور پیوسته در حال عملیات می باشند. لیکن بارکننده‌های با ظرفیت پایین تر دچار کم‌کاری می باشند در حالی که بارکننده‌های با ظرفیت بالاتر تعداد سرویس قابل قبولی را دارند. شاول‌ها که برای کامیون های ۱۰۰ تنی تخصیص یافته اند و نیز لودرهای ۸۰۰ که به طور مشترک برای هر دو مدل کامیون کاربرد دارد، با کارآیی مناسب در حال سرویس دهی می باشند و گاهی صف های کوتاه کامیون برای آنها ایجاد می‌شود.. همچنین با تغییر ترتیب امکان انتخاب بارکننده برای کامیون های ۳۰ تنی، همواره بارکننده‌های پایین تر کم کار می مانند. در مجموع می‌توان گفت که در شرایط فعلی، نسبت تعداد بارکننده‌های کامیون های ۳۰ تنی به تعداد کامیون‌ها زیاد می‌باشد و معدن با ازدیاد بارکننده و یا به نوعی کمبود حمل کننده به دلیل عدم تناسب تعداد کامیون‌ها با بارکننده‌ها مواجه می باشد. از طرفی طبق شکل ۴ بین ۱۵ تا ۲۲ مورد ازکارافتادگی نهادها در یک شبانه روز رخ می دهد که بیشتر آن‌ها از نوع کوتاه مدت می باشند. نکته مهم محدودیت سرویس دهی تعمیرگاه می باشد که موجب می شود تا در ورودی واحد تعمیرگاه صف ایجاد شود و با گذشت زمان تعداد نهادهای فعال و آماده سرویس دهی کمتر می شود. این موضوع با توجه به کاهش شیب منحنی عملکرد سرویس دهی کامیون‌ها و بارکننده‌ها در شیفت سوم کاری (ساعت شبیه سازی ۱۶ تا ۲۴) نسبت به شیفت اول قابل تفسیر می باشد. با توجه به ضرورت تسریع در مرحله باطله برداری و پله‌های مختلف کاری ایجاد شده، حذف بارکننده منطقی نمی باشد لذا پیشنهاد می شود ضمن توسعه واحد تعمیرگاه جهت ترخیص سریع تر نهادها و بازگشت به سرویس دهی، تعداد کامیون‌ها جهت کاهش زمان بیکاری بارکننده‌ها افزایش یابد تا با افزایش عمق معدن، و با طولانی شدن مسیرهای ترابری و افزایش زمان حمل بار کامیون ها، بهره وری بارکنندها دارای کاهش کمتری باشد.

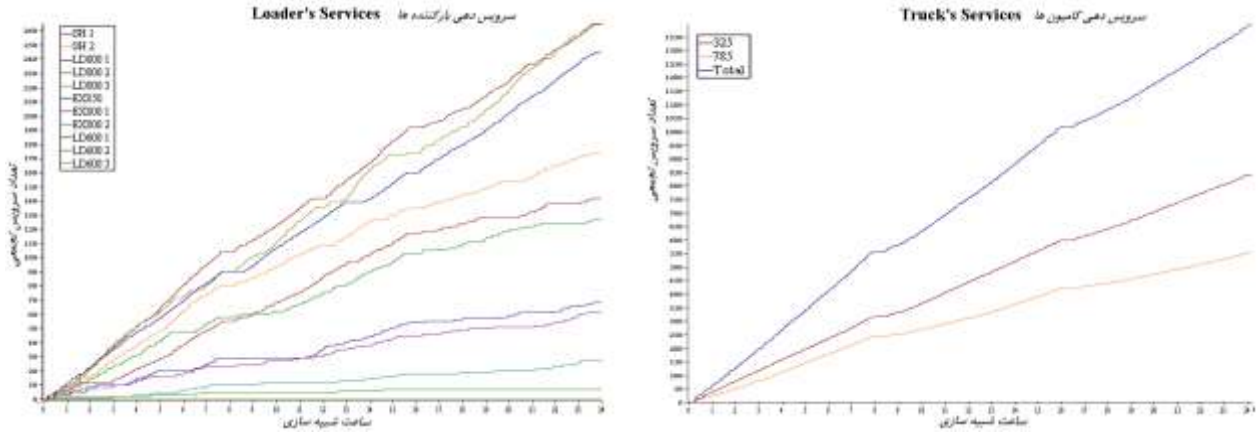
۵- تحلیل سناریوهای عملکرد سیستم ترابری

چنان که در بخش قبلی بیان گردید سیستم ترابری معدن در شرایط فعلی با کاهش بهره وری کارکننده‌ها به دلیل ازدیاد نسبی تعداد آنها و یا کم بودن نسبی تعداد کامیون مواجه می باشد و طبیعتا با افزایش عمق معدن و طولانی شدن مسیرهای ترابری و افزایش زمان سیکل بارگیری و حمل کامیون ها، این مشکل بیشتر خواهد شد. لذا ابتدا سناریوهای افزایش مسافت

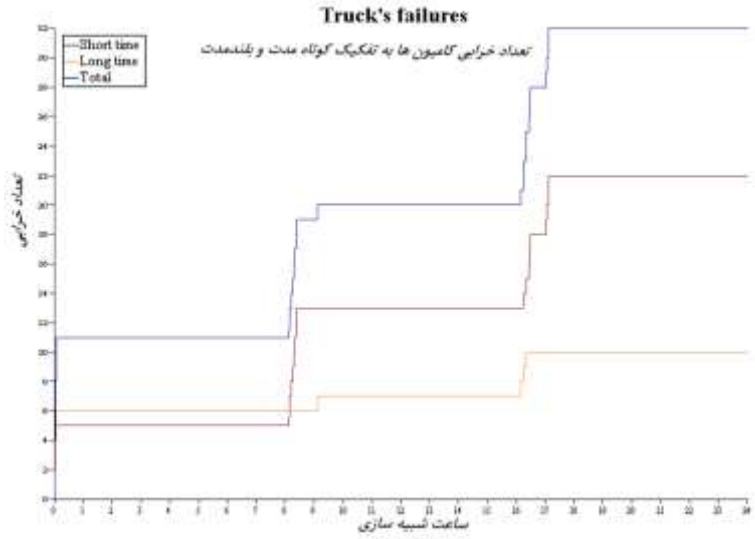
حمل در اثر افزایش عمق پیت درحال استخراج معدن و یا گسترش محدوده دامپ باطله و سناریوهای کاهش مسافت حمل به دلیل ایجاد رمپ های جدید و یا فعال شدن کارخانه فرآوری در فاصله کمتر در مدل شبیه سازی و اجرا گردید و نتایج آن بر مبنای دو شاخص تعداد سرویس و تناژ عملکردی هر حمل کننده طبق جدول ۵ مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس، افزایش مسافت تا ۱۰درصد تاثیر چندانی بر شاخص های عملکردی ناوگان بارگیری و حمل ندارد. با توجه به شرایط فعلی معدن جهت ارتقای بهره وری بارکننده‌های موجود معدن دو نوع استراتژی شامل کاهش تعداد بارکننده‌های فعال در معدن و یا افزایش تعداد حمل کننده‌ها را می‌توان پیشنهاد نمود. نتایج اجرای هریک از استراتژی فوق در قالب دو دسته سناریو و در ۲۴ ساعت اجرای مدل و ۳۰ بار تکرار و بر مبنای عملکرد کامیون‌ها و بارکننده‌ها مورد سنجش و مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۵: مدلسازی تاثیر تغییر مسافت بر عملکرد ناوگان.

تغییر مسافت	سرویس دهی روزانه انواع کامیون		متوسط تناژ عملکرد هر دستگاه	
	۳۲۵	۷۸۵	بارکننده	حمل کننده
۲۰٪	۶۱۹	۵۸۵	۶۷۳۷	۲۱۸۰
۱۵٪	۷۰۹	۵۷۱	۶۵۶۵	۲۱۲۴
۱۰٪	۷۴۱	۵۶۲	۶۸۳۳	۲۲۱۱
۵٪	۷۹۵	۵۲۵	۶۶۴۰	۲۱۴۸
پایه (صفر)	۸۴۰	۵۵۲	۶۹۹۵	۲۲۶۳
-۵٪	۷۱۲	۶۸۷	۷۸۷۵	۲۵۴۸
-۱۰٪	۷۷۱	۷۴۴	۸۵۲۹	۲۷۶۰
-۱۵٪	۹۹۳	۶۶۰	۸۳۳۸	۲۶۹۸
-۲۰٪	۹۴۷	۶۵۷	۸۱۸۷	۲۶۴۹



شکل ۳: خروجی مدل شبیه سازی در مورد تعداد تجمعی سرویس دهی به تفکیک انواع بارکننده و حمل کننده‌ها.



شکل ۴ شبیه سازی تعداد خرابی نهادها در طول شبانه روز به تفکیک خرابی کوتاه مدت و بلندمدت.

۵-۱- کاهش تعداد بارکننده‌ها

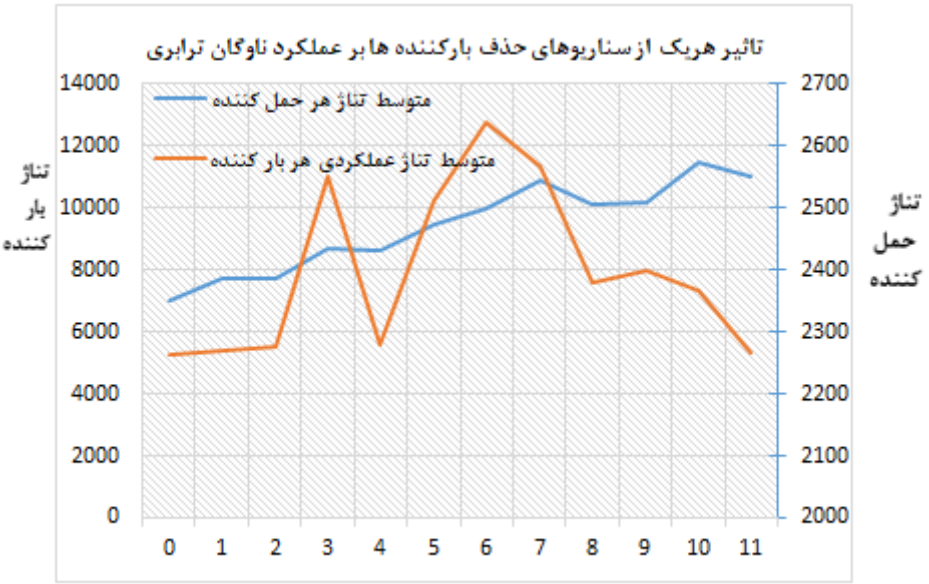
هدف این سناریو، رفع کم‌کاری بارکننده‌ها به کمک حذف تعدادی از آنها می باشد و از بعد اقتصادی، موجب کاهش هزینه‌های جاری ماشین آلات گردد. پیاده سازی این رویکرد، اگر چه سرمایه‌بر نمی باشد لیکن عدم استفاده از سرمایه گذاری صورت گرفته، موجب زیان‌دهی اقتصادی مجموعه می‌گردد و زمان بندی باطله برداری معدن را با تاخیر مواجه می‌کند. لذا در این رویکرد، توسعه معدنکاری مد نظر نمی باشد و هدف صرفا بهبود وضعیت فعلی می‌باشد. نتایج مدلسازی سناریوهای مربوط به این رویکرد نشانگر تاثیرات حذف تعدادی از بارکننده، عملکرد ناوگان می باشد. در این سناریوها تلاش می‌شود تا بارکننده‌هایی انتخاب شوند که حذف آن‌ها در کاهش تولید فعلی معدن، تاثیر کمتری داشته باشد و همچنین کامیون‌ها به شکل مطلوب تری بین بارکننده‌ها تقسیم شوند. لذا حذف بارکننده‌ها از دستگاه‌های با کارکرد کم تر شروع گردید. لازم به ذکر است که لودرهای مدل ۸۰۰ و شاول‌ها به دلیل توان سرویس دهی برای هر دو مدل کامیون حذف نمی شود. نتایج پیاده‌سازی ۱۱ سناریوی مختلف در ۲۴ ساعت کارکرد مدل بر مبنای متوسط تناژ متوسط عملکرد هر بارکننده و حمل کننده در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس،با لحاظ کردن نوع بارکننده‌ها، حذف یک یا دو دستگاه بارکننده تناژ عملکرد ناوگان دارای تغییرات کمی می باشد لیکن در سناریوی ۶ با حذف دو بارکننده Ld600 و EX800 کارکرد بارکننده‌های فعال باقیمانده به ظرفیت عملیاتی خود نزدیک می‌شود لذا به عنوان سناریوی برتر حذف بارکننده‌ها پیشنهاد می گردد.

۵-۲- افزایش تعداد حمل کننده‌ها

این رویکرد با هدف گسترش فعالیت معدن و افزایش تولید تنظیم گردیده است لذا ایجاد تعادل در عملیات بارگیری با افزودن حمل کننده‌های جدید به سیستم ترابری معدن انجام می گیرد. با توجه به فعال بودن دو نوع کامیون های ۳۰ و ۱۰۰ تنی، و متفاوت بودن تاثیر تغییر تعداد آنها بر عملکرد مدل، با تعریف ۵۲ سناریوی مختلف به سه بخش زیر تقسیم گردید:

- افزایش کامیون های ۳۰ تنی تا دو برابر تعداد فعلی (سناریوهای ۱ تا ۱۸).
- افزایش کامیون های ۱۰۰ نتی تا حدود دو برابر مقدار فعلی (سناریوهای ۱۹ تا ۳۲).
- افزایش کامیون‌ها به صورت ترکیبی از ۳۰ تنی و ۱۰۰ تنی (سناریوهای ۳۳ تا ۵۲).

پس از اجرای مدل، خروجی آن برای هر بخش مورد تحلیل قرار گرفت. مقادیر خروجی مدل شامل تعداد متوسط سرویس و تناژ هر حمل کننده نسبت به شرایط موجود در سه دسته حالت افزایش انفرادی هر نوع کامیون و نیز افزایش ترکیبی تعداد حمل کننده‌ها مطابق جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۵: مقایسه تغییرات متوسط تناژ عملکرد هر بارکننده و حمل کننده در هریک از سناریوهای کاهش تعداد بارکننده‌ها.

جدول ۶: مدلسازی تاثیرات هریک از سناریوهای کاهش بارکننده‌ها بر تناژ عملکرد ناوگان ترابری.

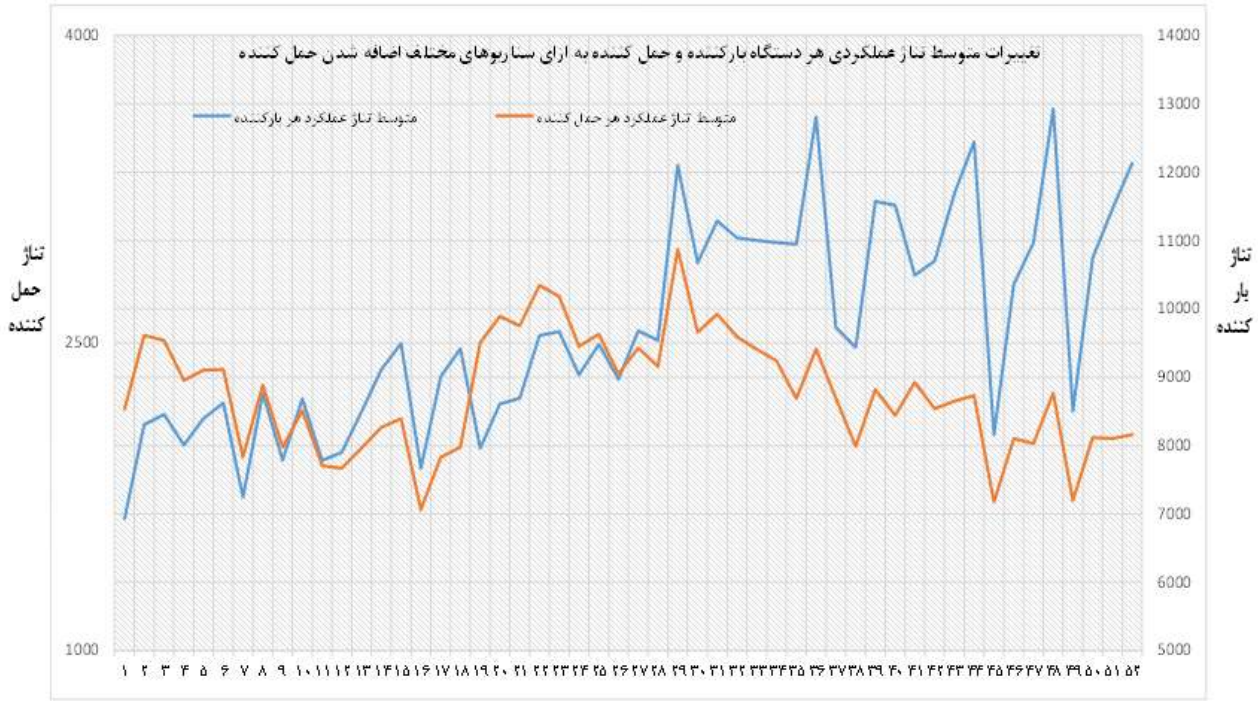
شماره سناریو	نوع بارکننده حذف شده در هر سناریو	تعداد بارکننده‌های فعال	تناژ تولید روزانه	متوسط تناژ عملکرد هر دستگاه	
				بارکننده	حمل کننده
صفر	هیچکدام	۱۱	۷۶۹۴۵	۶۹۹۵	۲۲۶۳
۱	LD600 3	۱۰	۷۷۱۲۰	۷۷۱۲	۲۲۶۸
۲	EX800 2	۱۰	۷۷۳۹۲	۷۷۳۹	۲۲۷۶
۳	EX850	۱۰	۸۶۶۷۸	۸۶۶۸	۲۵۴۹
۴	LD600 3, LD600 2	۹	۷۷۴۸۷	۸۶۱۰	۲۲۷۹
۵	EX800-1, EX800-2	۹	۸۵۳۹۲	۹۴۸۸	۲۵۱۲
۶	LD600 3, EX800 2	۹	۸۹۶۸۳	۹۹۶۵	۲۶۳۸
۷	LD600 3, LD600 2, LD600 1	۸	۸۷۲۸۹	۱۰۹۱۱	۲۵۶۷
۸	LD600 3, LD600 2, EX800 2	۸	۸۰۹۳۸	۱۰۱۱۷	۲۳۸۱
۹	LD600 3, EX800 2, EX800 1	۸	۸۱۶۰۵	۱۰۲۰۱	۲۴۰۰
۱۰	LD600 3, LD600 2, LD600 1, EX850	۷	۸۰۴۴۶	۱۱۴۹۲	۲۳۶۶
۱۱	LD600 3, EX800 2, EX800 1, EX850	۷	۷۷۰۶۲	۱۱۰۰۹	۲۲۶۷

جدول ۷: تغییرات تعداد متوسط تناژ عملکرد هر بارکننده و حمل کننده در هریک از سناریوهای افزایش حمل کننده‌ها.

شماره سناریو	تعداد دستگاه فعال		مجموع		متوسط تناژ عملکردی هر دستگاه حمل کننده
	KOM 325	KOM 785	تعداد سرویس	تناژ جابجا شده	
۱	۱۹	۱۶	۱۲۷۷	۷۶۲۵۷	۲۱۷۹
۲	۲۰	۱۶	۱۶۲۱	۹۱۳۷۱	۲۵۳۸
۳	۲۱	۱۶	۱۷۲۵	۹۳۰۰۲	۲۵۱۴
۴	۲۲	۱۶	۱۵۷۱	۸۸۰۹۵	۲۳۱۸
۵	۲۳	۱۶	۱۶۳۸	۹۲۳۸۱	۲۳۶۹
۶	۲۴	۱۶	۱۶۸۹	۹۴۸۷۴	۲۳۷۲
۷	۲۵	۱۶	۱۴۷۷	۷۹۷۰۵	۱۹۴۴
۸	۲۶	۱۶	۱۸۰۷	۹۶۴۲۳	۲۲۹۶
۹	۲۷	۱۶	۱۶۵۸	۸۵۶۵۷	۱۹۹۲
۱۰	۲۸	۱۶	۱۸۴۵	۹۵۵۶۷	۲۱۷۲
۱۱	۲۹	۱۶	۱۷۵۶	۸۵۶۱۱	۱۹۰۲
۱۲	۳۰	۱۶	۱۷۸۶	۸۶۹۲۶	۱۸۹۰
۱۳	۳۱	۱۶	۱۹۵۲	۹۳۴۶۶	۱۹۸۹
۱۴	۳۲	۱۶	۱۸۸۹	۱۰۰۲۷۵	۲۰۸۹
۱۵	۳۳	۱۶	۱۹۷۵	۱۰۴۴۴۸	۲۱۳۲
۲۷	۱۸	۲۵	۱۵۷۸	۱۰۶۴۸۱	۲۴۷۶
۲۸	۱۸	۲۶	۱۶۶۰	۱۰۴۹۵۵	۲۳۸۵
۲۹	۱۸	۲۷	۱۸۴۱	۱۳۳۱۰۴	۲۹۵۸
۳۰	۱۸	۲۸	۱۷۱۴	۱۱۷۴۴۵	۲۵۵۳
۳۱	۱۸	۲۹	۱۹۰۷	۱۲۴۱۶۴	۲۶۴۲
۳۲	۱۸	۳۰	۱۸۱۰	۱۲۱۴۶۴	۲۵۳۱
۳۳	۱۸	۳۱	۱۷۲۱	۱۲۱۰۲۹	۲۴۷۰
۳۴	۱۸	۳۲	۱۷۲۴	۱۲۰۶۹۵	۲۴۱۴
۳۵	۲۸	۲۶	۲۰۲۳	۱۲۰۴۱۴	۲۲۳۰
۳۶	۲۸	۲۹	۲۲۱۱	۱۴۰۸۹۱	۲۴۷۲
۳۷	۳۰	۱۸	۲۱۰۵	۱۰۷۰۱۸	۲۲۳۰
۳۸	۳۰	۲۲	۱۸۵۹	۱۰۳۸۲۲	۱۹۹۷
۳۹	۳۰	۲۶	۲۲۶۶	۱۲۷۳۳۵	۲۲۷۴
۴۰	۳۰	۲۹	۲۰۸۷	۱۲۶۶۹۲	۲۱۴۷
۴۱	۳۲	۱۸	۲۱۹۳	۱۱۵۴۳۴	۲۳۰۹

شماره سناریو	تعداد دستگاه فعال		مجموع		متوسط تناژ عملکردی هر دستگاه حمل کننده
	KOM 325	KOM 785	تعداد سرویس	تناژ جابجا شده	
۱۶	۳۴	۱۶	۱۷۲۱	۸۴۳۹۱	۱۶۸۸
۱۷	۳۵	۱۶	۲۰۷۴	۹۹۰۷۱	۱۹۴۳
۱۸	۳۶	۱۶	۲۱۴۲	۱۰۳۶۲۱	۱۹۹۳
۱۹	۱۸	۱۷	۱۴۸۷	۸۷۵۵۱	۲۵۰۱
۲۰	۱۸	۱۸	۱۶۰۴	۹۴۷۱۸	۲۶۳۱
۲۱	۱۸	۱۹	۱۵۰۷	۹۵۶۳۶	۲۵۸۵
۲۲	۱۸	۲۰	۱۶۰۰	۱۰۵۷۲۱	۲۷۸۲
۲۳	۱۸	۲۱	۱۶۸۱	۱۰۶۳۵۷	۲۷۲۷
۲۴	۱۸	۲۲	۱۶۲۲	۹۹۳۷۸	۲۴۸۴
۲۵	۱۸	۲۳	۱۶۱۹	۱۰۴۲۸۸	۲۵۴۴
۲۶	۱۸	۲۴	۱۵۵۰	۹۸۷۰۷	۲۳۵۰

شماره سناریو	تعداد دستگاه فعال		مجموع		متوسط تناژ عملکردی هر دستگاه حمل کننده
	KOM 325	KOM 785	تعداد سرویس	تناژ جابجا شده	
۴۲	۳۲	۲۲	۲۰۲۳	۱۱۷۷۲۶	۲۱۸۰
۴۳	۳۲	۲۶	۲۱۶۱	۱۲۸۶۰۲	۲۲۱۷
۴۴	۳۲	۲۹	۲۲۹۳	۱۳۶۸۹۶	۲۲۴۴
۴۵	۳۴	۱۸	۱۸۷۵	۸۹۷۰۶	۱۷۲۵
۴۶	۳۴	۲۲	۲۱۹۶	۱۱۳۹۶۱	۲۰۳۵
۴۷	۳۴	۲۶	۲۲۰۳	۱۲۰۶۴۱	۲۰۱۱
۴۸	۳۴	۲۹	۲۴۱۹	۱۴۲۱۸۳	۲۲۵۷
۴۹	۳۶	۱۸	۱۹۱۰	۹۳۵۵۸	۱۷۳۳
۵۰	۳۶	۲۲	۲۳۲۴	۱۱۸۲۴۹	۲۰۳۹
۵۱	۳۶	۲۶	۲۳۵۵	۱۲۶۱۵۵	۲۰۳۵
۵۲	۳۶	۲۹	۲۳۸۲	۱۳۳۴۴۸	۲۰۵۳



شکل ۶: مقایسه تغییرات متوسط تناژ عملکرد بارکننده و حمل کننده در هریک از سناریوهای افزایش حمل کننده‌ها.

در شکل ۶ نیز، مقایسه شاخص های تناز متوسط کارکرد هر دستگاه بارکننده و حمل کننده برای ۵۲ سناریوی تعریف شده انجام گرفته است. لازم به ذکر است که محور افقی معرف شماره سناریو و دو محور عمودی شکل نیز بیانگر مقدار متوسط تناژ عملکرد هر بارکننده و حمل کننده فعال سیستم می باشند. بر این اساس سناریوی شماره ۳۱ شامل ترکیب ۱۸ کامیون ۱۰۰ تنی و ۲۹ کامیون ۳۰ تنی به عنوان بهترین رویکرد افزایش تعداد حمل کننده‌ها بر مبنای معیار حداکثر سازی بهره وری ناوگان حمل پیشنهاد می‌گردد. حسب بررسی نتایج تفکیکی کارکرد دستگاه‌ها، افزودن کامیون های ۳۰ تنی

تاثیر بیشتری بر افزایش تعداد سرویس اکسکاواتورها و لودرهای مدل ۶۰۰ دارد لیکن تغییرات قابل توجهی در عملکرد شاول‌ها و لودرهای مدل ۸۰۰ ایجاد نمی شود. افزایش تعداد کامیون های ۱۰۰ تنی، عملا تعداد سرویس اکسکاواتورها و لودرهای مدل ۶۰۰ را افزایش می دهد که در وضعیت فعلی دارای کارکرد بالایی می باشند و موجب افزایش زمان انتظار کامیون‌ها جهت بارگیری از این بارکننده‌ها می شود. لازم به ذکر است که در وضعیت فعلی با افزایش تعداد حمل کننده‌ها، واحد تعمیرگاه پاسخگوی نیاز نخواهد بود لذا ارتقای ظرفیت واحد تعمیرگاه به عنوان یک راهکار کمکی افزایش تعداد حمل کننده‌های فعال جهت تعمیر و بازگشت سریع تر آنها به چرخه تولید پیشنهاد می‌گردد.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله تلاش گردید تا با پیاده سازی تکنیک پیشامد گسسته، عملیات بارگیری و حمل باطله استخراجی از معدن سرب وروی مهدی آباد مدل سازی شود. پس از اعتبارسنجی و تحلیل شرایط فعلی ناوگان حمل مشخص گردید که معدن با کاهش بهره وری بارکننده‌ها و بیکاری تعدادی از آن‌ها مواجه می‌باشد که با افزایش عمق معدن و طولانی شدن مسیرهای ترابری، این مشکل بیشتر خواهد شد. در ادامه، رفتار سیستم در صورت تغییر مسافت های حمل، تغییر تعداد نهادها (حمل کننده‌ها) و منابع (بارکننده‌ها) در قالب سناریوهای مختلف تحلیل گردید و نتایج اجرای دو دسته سناریو شامل حذف بارکننده‌های کم کارکرد و اضافه کردن کامیون به ناوگان، مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس نتایج، در شرایط فعلی، امکان حذف ۲ دستگاه بارکننده از سیستم بدون ایجاد تغییر محسوس در عملکرد بارکننده‌های باقیمانده مشروط به حذف بارکننده‌های کم کارکرد و با فرض امکان پذیری فنی و عدم لحاظ نمودن ملاحظات مربوط به تعداد جبهه کارهای فعال وجود دارد. همچنین در صورت مناسب بودن شرایط فعلی و عدم توسعه معدن، سناریو حذف بارکننده‌ها بدون نیاز به سرمایه گذاری جدید با انعطاف پذیری زیاد می تواند در بهبود عملکرد سیستم مناسب باشد. از بعد افزایش تعداد حمل کننده، سرمایه گذاری جهت افزایش تعداد کامیون های ۳۰ تنی پیشنهاد می‌گردد که موجب حداکثر سازی هر دو معیار تناژ متوسط بارکننده‌ها و حمل کننده‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که سناریوی پیشنهادی صرفا بر اساس بیشینه سازی کارکرد ناوگان حمل بوده است و تحلیل هزینه و سود جهت تصمیم گیری نهایی در خصوص توسعه اندازه ناوگان ضرورت دارد.

منابع

1. Baafi, E. and W. Zeng. A Discrete-Event Simulation for a Truck-Shovel System. in Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018. 2019. Springer.
2. Sturgul, J., Discrete simulation and animation for mining engineers. 2015: CRC Press.
3. Torkamani, E., Linkage of Truck-and-shovel Operations to Short-term Mine Plans Using Discrete Event Simulation. 2013.
4. Alarie, S. and M. Gamache, Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2002. 16(1): p. 59-76.

۵. آزادی, ن, عطائی پور,م و م. منجزی,م ", بهبود اندازه ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون با استفاده از روش شبیه‌سازی". مدل سازی در مهندسی, ۱۳۹۳. ۱۲(۳۹) ص ۱۱۰-۹۹.

6. Salama, A., J. Greberg, and H. Schunnesson, *The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection.* International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2014. 5(3): p. 256-271.
7. Skawina, B., et al., *The effects of orepass loss on loading, hauling, and dumping operations and production rates in a sublevel caving mine.* Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018. 118(4): p. 409-418.
8. Dumakor, N., V. Temeng, and K. Bansah, *Optimising Shovel-Truck Fuel Consumption using Stochastic Simulation.* Ghana Mining Journal, 2017. 17(2): p. 39-49.
9. Ataeepour, N. and E. Baafi, *ARENA simulation model for truck-shovel operation in despatching and non-despatching modes.* International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1999. 13(3): p. 125-129.
10. Kaba, F., V. Temeng, and P. Eshun. *Prediction of mining production using Arena simulation.* in *3rd UMa T Biennial international mining and mineral conference*. 2014.
11. Hashemi, A.S. and J. Sattarvand. *Application*

of ARENA simulation software for evaluation of open pit mining transportation systems–a case study. in *Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining-Aachen 2014*. 2015. Springer.

12. Que, S., K. Awuah-Offei, and S. Frimpong, *Optimising design parameters of continuous mining transport systems using discrete event simulation.* International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2016. 30(3): p. 217-230.
13. Frough, O., A. Khetwal, and J. Rostami, *Predicting TBM utilization factor using discrete event simulation models.* Tunnelling and Underground Space Technology, 2019. 87: p. 91-99.

۱۴. علمداری، ص.، م.ح. بصیری، و م. عطایی پور, تجزیه و تحلیل عملیات استخراج معدن خاک نسوز آباده به کمک شبیه سازی سیستم ترابری. نشریه مهندسی منابع معدنی، ۱۳۹۸. (۴) ۳. ص ۳۷-۵۰.

15. Choi, B.K. and D. Kang, *Modeling and simulation of discrete event systems*. 2013: John Wiley & Sons.
16. Sturgul, J., *Discrete mine system simulation in the United States.* International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1999. 13(2): p. 37-41.
17. Wainer, G.A. and P.J. Mosterman, *Discrete-event modeling and simulation: theory and applications*. 2016: CRC press.
18. Altiok, T. and B. Melamed, *Simulation and Analysis with Arena*. 2007, Burlington, MA: Academic Press.
19. Kelton, W.D., *Simulation with ARENA*. 2002: McGraw-hill.
20. Sadowski, R.P., W.D. Kelton, and R.P. Sadowski, *Simulation with ARENA*. 1998: McGraw-Hill.