(مقاله پژوهشی)

ارائه یک مدل ریاضی یکپارچه برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون‌ها در معادن روباز

رامین صائبی‌نیا[1]، امین اله موسوی*[1]، احمدرضا صیادی[1]

۱- گروه استخراج، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: آبان ۱۳۹۹، پذیرش: دی ۱۴۰۰)

چکیده

عملیات باربری تشکیل‌دهنده سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های عملیاتی استخراج در یک معدن روباز است؛ بنابراین، بهینه‌سازی زمان‌بندی کار کامیون‌ها، به‌عنوان اصلی‌ترین ماشین باربری، امری ضروری و تأثیرگذار در بهره‌وری عملیات استخراج است. بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات باربری به‌طور سنتی، در قالب دو مسئله بهینه‌سازی تخصیص و سپس گسیل کامیون‌ها تعریف می‌شود و تاکنون مدل‌ها و روش‌های مختلفی مبتنی بر تکنیک‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی چندمرحله‌ای، برای بهینه‌سازی این دو مسئله ارائه شده است. لیکن با توجه به گسترش روزافزون سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات، ارتقا سیستم‌های محاسباتی و ضرورت تصمیم سازی برخط، وجود یک مدل ریاضی تک‌مرحله‌ای برای حل هم‌زمان این دو مسئله در یک سیستم یکپارچه و پویا، ضروری است. در این تحقیق، یک مدل ریاضی کارگاه گردش کاری، به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی مسائل زمان‌بندی و بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون‌های معادن روباز توسعه داده‌شده است. این مدل برای یک مطالعه موردی کوچک‌مقیاس پیاده‌سازی شده است و نتایج آن موردبحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل ریاضی یک ابزار کارا برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل پویای کامیون‌ها است که می‌تواند منجر به افزایش توان تولیدی معدن شود.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی ریاضی، برنامه‌ریزی خطی، CPLEX، کارگاه گردش کاری، باربری معادن روباز

* عهده‌دار مکاتبات: a_mousavi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

بیشتر معادن روبازی که در حال بهره‌برداری هستند، از سیستم کامیون - شاول استفاده می‌کنند. بارکننده‌ها (شاول‌ها) و بارشونده‌ها (کامیون‌ها) عناصر اصلی در بارگیری و باربری مواد معدنی می‌باشند. به دلیل اهمیت زیاد مسئله استخراج مواد و حمل آن‌ها به محل‌های تعیین‌شده، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است که به بررسی چگونگی تخصیص کامیون‌ها به بارکننده‌ها و توالی اعزام آن‌ها در طول یک شیفت می‌پردازد. یک عملیات باربری که "سیکل باربری" نیز نامیده می‌شود شامل چهار زیر-عملیات بارگیری، باربری، تخلیه و برگشت به محل بارگیری است. تخصیص به معنی اختصاص دادن کامیون به بارکننده است که در معادن روباز به‌طور عمده به دو بخش تخصیص ثابت و تخصیص پویا تقسیم می‌شوند. تخصیص کامیون تحت استراتژی تخصیص ثابت بدین معنی است که هر کامیون در ابتدای شیفت به یک شاول ثابت و یک نقطه تخلیه مشخص اختصاص داده می‌شود و در طول کل شیفت شاول تخصیصی تغییر نمی‌یابد. در این حالت کامیون‌ها فقط در بعضی موارد (به‌طور مثال در صورت خرابی) مجدداً تخصیص خواهند یافت. این استراتژی در عمل بسیار ناکارآمد است و سبب افزایش زمان بی‌کاری و پایین آمدن راندمان کاری ماشین‌آلات می‌شود [۱]. با توجه به کم بودن هزینه اجرایی، این روش برای به‌کارگیری در معادن کوچک بسیار مناسب است [۲]. در تخصیص پویای کامیون‌ها یکی از کامیون‌های در دسترس، در ابتدای شیفت به یک شاول اختصاص می‌یابد؛ اما این کامیون‌ها به‌جای حالت تخصیص ثابت (سرویس‌دهی به یک شاول یا قرار گرفتن در یک مسیر در طول شیفت)، بعد از این‌که از یک شاول بارگیری شدند، از سوی سیستم اعزام، ممکن است تخصیص جدیدی دریافت کنند [۳]. اعزام (گسیل) به معنی تعیین ترتیب توالی سیکل‌های باربری کامیون‌ها است. به‌عبارت‌دیگر اعزام مشخص‌کننده این است که هرکدام از کامیون‌ها به چه ترتیبی از بارکننده‌ها بارگیری شوند. برای مثال کامیون شماره ۱ در سیکل اول خود با شاول شماره ۱، سیکل دومش با شاول شماره ۴ و سیکل سومش با شاول شماره ۲ بارگیری می‌شود. مسئله اعزام شامل سه نوع اعزام دستی، اعزام نیمه اتوماتیک و اعزام تمام اتوماتیک است. اعزام دستی ساده‌ترین حالت تخصیص کامیون‌ها به شاول‌ها در طول شیفت است که بر پایه نیاز تولیدی، موقعیت مکانی شاول، دسترسی ناوگان حمل و سایر پارامترها توسط اپراتور انجام می‌گیرد. قانونی که برای اعزام در این حالت غالب است، اعزام ثابت (قفل شده) است که تا وقتی که یک شاول آسیب نبیند یا از کار نیفتد، اعزام کامیون‌ها اصلاح نخواهد شد و تغییری نخواهد یافت [۴]. بدین معنی که در ابتدای کار کامیون‌ها به شاول‌ها اختصاص داده می‌شوند و این کامیون‌ها طبق برنامه ثابتی که دارند در مسیر تعیین شده کار می‌کنند. اعزام نیمه اتوماتیک کامیون، یک حالت حد میانی اعزام است که شامل یک کامپیوتر برای کمک به اپراتور با استفاده از نشان دادن اطلاعاتی روی مانیتور و یا پیشنهاد تخصیص کامیونی است که ازنظر هدف تولید به‌صرفه باشد. در سیستم‌های نیمه اتوماتیک کامپیوتر نمی‌تواند به‌طور مستقیم به عملکرد کامیون‌ها پاسخ دهد، این بدین معنی است که مداخله انسان در آن ضروری است [۴]. این روش قابلیت بیشتری نسبت به تخصیص ثابت دارد و هزینه‌های اجرایی آن در مقایسه با سودآوری‌اش بسیار کم است؛ این روش قابل‌استفاده برای معادن متوسط تا بزرگ است [۲]. در سیستم‌های اعزام تمام اتوماتیک به مداخله بشر نیاز نیست. رایانه تخصیص می‌تواند با استفاده از یک نمایشگر اطلاعات را از راننده کامیون بگیرد و یا به آن بفرستد و کامیون در نقطه بهینه مشغول کار باشد [۴]. استفاده از این روش هزینه‌های قابل‌توجهی دارد و تکنولوژی پیشرفته‌ای را می‌طلبد؛ بنابراین این روش برای استفاده در معادن بزرگ تا بسیار بزرگ مقرون‌به‌صرفه است [۲].

زمان‌بندی عملیات باربری در حقیقت تلاشی است برای به دست آوردن زمان‌های آغاز و پایان هرکدام از زیر-عملیات باربری برای کامیون‌هایی که در یک معدن مشغول به کار هستند. زمان‌بندی عملیات یک مرحله بالاتر از تخصیص بوده و علاوه بر تخصیص کامیون‌ها به بارکننده‌ها، زمان دقیق شروع و پایان هر عملیات (بارگیری، باربری، تخلیه و برگشت) از هر کامیون و بارکننده را نشان می‌دهد [۵].

در این تحقیق یک مدل ریاضی تک‌مرحله‌ای (یکپارچه) با استفاده از تئوری‌های زمان‌بندی کار، از نوع کار کارگاهی، برای ناوگان باربری معادن روباز ارائه شده است. یک مثال موردی با داده‌های زمان‌های بارگیری، باربری، تخلیه، تناژ کامیون‌ها و شاول‌ها و مسیرهای رفت‌وبرگشت که از یک معدن واقعی گرفته‌شده‌اند، در نرم‌افزار IBM ILOG

CPLEX 12.6 ارائه و حل شده است. سپس زمان‌های بی‌کاری و انتظار شاول‌ها و کامیون‌ها، بهره‌وری شاول‌ها و کامیون‌ها، زمان‌بندی عملیات باربری و بارگیری ناوگان، به‌صورت نمودار مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است.

۱-۱- مروری بر پیشینه تحقیق

به‌طورکلی تحقیقاتی که تاکنون در خصوص تخصیص و گسیل ناوگان باربری انجام شده‌اند بر اساس نوع مدل‌سازی، در سه دسته مدل‌های شبیه‌سازی، مدل‌سازی ریاضی چندمرحله‌ای و مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دسته‌بندی می‌شوند.

۱-۲- مدل‌های شبیه‌سازی ناوگان باربری

شبیه‌سازی، روش مطالعه و تحلیل رفتار یک دنیای واقعی به‌صورت یک سیستم مدل شده در یک برنامه کامپیوتری است. در یک شبیه‌سازی، یک یا چند متغیر، تغییر کرده و تغییرات در متغیرهای دیگر و کل سیستم مشاهده و ارزیابی می‌شود. شبیه‌سازی، کاربران را قادر به پیش‌بینی رفتار سیستم در دنیای واقعی می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، رفتار ناوگان حمل‌ونقل را می‌توان با استفاده از مدل شبیه‌سازی‌شده بررسی نمود. سپس کاربران می‌توانند پارامترهایی مانند سرعت، تعداد و نوع ماشین‌آلات را تغییر دهند و اثر آن بر توابع هدفی همچون زمان بی‌کاری ناوگان را ارزیابی کنند.

در خصوص شبیه‌سازی عملیات باربری در معادن روباز، تحقیقات بسیاری انجام شده است. در مطالعه‌ی دیگری توسط داوری و ستاروند شبیه‌سازی سیستم ترابری معدن مس سونگون با یک برنامه شبیه‌سازی[1] انجام شد و تخصیص کامیون به روش پویا (دیسپچینگ) و ثابت (غیر دیسپچینگ) در این معدن باهم مقایسه شده است. در معدن سه لودر و نه کامیون مشغول به کار بودند که در تخصیص ثابت و با فرض سه لودر، تعداد کامیون‌های بهینه موردنیاز ۱۸ عدد به دست آمد که با اجرای نتایج افزایش سود ۹۱ درصد با افزایش ۱۰۰ درصدی تعداد کامیون‌ها پیش‌بینی شد. درروش تخصیص پویا تعداد کامیون‌های بهینه ۱۷ عدد به دست آمد که اجرای آن منجر به افزایش سود ۹۳ درصد با افزایش ۸۸ درصدی تعداد کامیون‌ها می‌شود. در این شبیه‌سازی علاوه بر به دست آمدن تعداد بهینه کامیون با تعداد بارکننده‌های ثابت، برتری تخصیص پویای کامیون‌ها نسبت به تخصیص غیر پویای آن‌ها در یک مسئله یکسان نشان داده شد؛ یعنی در یک مسئله برای کامیون‌های یک معدن روباز (بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت کارخانه)، در حالت پویا تعداد کامیون کمتر و سود بیشتری نسبت به حالت تخصیص ثابت به دست می‌آید [۶]. بصیری سیستم حمل‌ونقل معدن خاک نسوز آباده که بالغبر ۳۰۰ میلیون تن ماده معدنی دارد را برای دوره ۱ ماهه با تناژ ۱۸۵ هزار تن ماده معدنی و نسبت باطله برداری ۱٫۱، با بهره‌گیری از نرم‌افزار آرنا[2] شبیه‌سازی کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در صورت افزایش تعداد کامیون از ۲۷ به ۵۲ کامیون، افزایش ۷۰ درصدی تولید و کاهش ۲۷ درصدی هزینه‌های تولید، از ۰٫۵۶ دلار بر تن به ۰٫۴۱ دلار بر تن، قابل‌دستیابی می‌باشد [۷]. اورئی و اسی، روند تولید کامیون-شاول را در معدن مس سونگون و با به‌کارگیری مؤلفه‌های فازی برای هر شاول شبیه‌سازی کردند [۸]. چتین پایان‌نامه خود را باهدف مطالعه رویکرد شبیه‌سازی سیستم باربری کامیون - شاول معادن روباز با استفاده از کامپیوتر انجام داده است. هدف اصلی این مطالعه، مقایسه سیاست‌های تخصیص کامیون و جست‌وجو برای یک قانون مناسب برای معادن روباز است. برای این منظور، یک تخصیص کامیون تصادفی و یک برنامه شبیه‌سازی تولید برای معادن روباز (اندازه متوسط) شامل جبهه‌کارهای متعدد و یک دمپ تخلیه با استفاده از نرم‌افزار GPSS/H توسعه داده شده است. برنامه حاصل تمام عملیات سیکل کامیون به همراه توزیع نرمال برای تمام متغیرهای مدل را در نظر می‌گیرد [۹]. هاشمی و ستاروند با استفاده از مدل شبیه‌سازی، سیستم‌های متفاوت مدیریتی تجهیزات معدنکاری روباز، شامل راه‌حل‌های عدم تخصیص[3]، تخصیص و حالت ترکیبی را برای معدن مس سونگون موردمطالعه قرار گرفته‌اند. مدل توسعه‌یافته توانایی در نظر گرفتن ویژگی‌های دقیق هردو تجهیزات بارگیری و باربری را دارد. سپس، یک مدل شبیه‌سازی تخصیص با تابع هدف حداقل‌سازی زمان انتظار کامیون توسعه داده شد که نتایج نشان‌دهنده بهبود ۷٫۸ درصدی با یک سیستم تخصیص پویا در مقایسه با سیستم تخصیص ثابت است [۱۰].

۱-۳- مدل‌های ریاضی

برای مدل‌سازی ریاضی مسئله‌های تخصیص و گسیل کامیون‌های روباز به‌طورمعمول از یکی از روش‌های

مدل‌سازی پایه شامل روش کوتاه‌ترین مسیر، رویکرد برنامه‌ریزی خطی، رویکرد برنامه‌ریزی غیرخطی، رویکرد برنامه‌ریزی هدف، رویکرد حمل‌ونقل یا رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. برای حل برخی از مسائل حمل‌ونقل از مدل‌های ریاضی چندمرحله‌ای استفاده می‌شود، بدین‌صورت که در این نوع مسائل بخشی از مسئله (تعیین مسیر کامیون‌ها) به یکی از روش‌های ذکرشده انجام می‌شود و سپس خروجی به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی بخش بعدی مسئله (تعیین توالی کامیون‌ها) استفاده می‌شود. افراپلی و عسکری نسب در مقاله موردی خود مراحلی را که می‌توانند در یک مدل چندمرحله‌ای به‌عنوان مراحل اصلی عنوان گردند به ترتیب مدل کوتاه‌ترین مسیر، بهینه‌سازی تخصیص کامیون شاول و بهینه‌سازی تخصیص زمان واقعی کامیون‌ها تعریف کرده‌اند [۳]. در مقاله‌ای دیگر توسط لیجون ژانگ مدل‌های چندمرحله‌ای بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح جهت مسئله اعزام کامیون - شاول ارائه شده است.

تا و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای تخصیص کامیون‌های یک ناوگان به شاول‌های متفاوت بر مبنای احتمال زمان بیکاری شاول‌ها توسعه دادند. در این مدل شاول به‌عنوان سیستم منبع محدود برای سرور انتخاب شده است. هدف این مدل حداقل کردن تعداد کل کامیون‌ها است [۱۲]. پترسون یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای زمان‌بندی فعالیت‌های حمل‌ونقل در معادن روباز و باهدف کاهش مصرف انرژی کامیون-شاول و تأمین نیاز تولیدی معدن توسعه داد. ازآنجاکه مدل NP-hard است، ایشان یک الگوریتم ابتکاری سازنده[۴] و همچنین روش الگوریتم جستجوی ممنوعه[۵] را برای حل سریع مدل در معادن بزرگ‌مقیاس توسعه داد [۱۳]. وایت و اولسون، مدل‌هایی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی و پویا برای مسئله زمان‌بندی اعزام کامیون‌ها ارائه دادند. آن‌ها مسئله را به سه زیر مسئله تقسیم کرده‌اند. گام اول نزدیک‌ترین راه را از بین همه نقاط در معدن انتخاب می‌کند که درواقع نزدیک‌ترین مسیر است. گام بعدی یک برنامه‌ریزی خطی است که برای تعیین جریان مواد در طول مسیر استفاده می‌شود. درنهایت گام سوم، برنامه‌ریزی پویای توالی عملیات کامیون‌ها را در یک مسیر بهینه بین شاول‌ها و دمپ‌ها بهینه می‌کند. این سیستم حمل‌ونقل به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری عملیات باربری را افزایش می‌دهد [۱۴]. سومیس و همکاران [۱۵] و [۱۶] یک مسئله شبکه برنامه‌ریزی غیرخطی را برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین تمام نقاط بارگیری و تخلیه حل کردند. لی یک مدل ریاضی باهدف حداقل‌سازی کار کل حمل‌ونقل ارائه کرده است. کار حمل‌ونقل به‌صورت حاصل‌ضرب فاصله‌ای که مواد حمل شده‌اند در میزان مواد حمل شده تعریف می‌شود. این روش یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای تخصیص تعداد بهینه کامیون‌ها پیاده‌سازی می‌کند و همچنین نیازهای عملیات اختلاط را در نظر می‌گیرد [۱۷]. چانگ و همکاران مقاله‌ای ارائه دادند که برنامه‌ریزی کامیون‌ها در طول یک شیفت را با استفاده از یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط با تابع هدف حداکثر کردن سود حمل‌ونقل انجام می‌دهد. سپس یک روش ابتکاری برای حل مدل پیاده‌سازی کردند. آن‌ها همچنین مسئله حمل‌ونقل را در اولویت قرار دادند. این مدل نسبت باطله‌برداری را در نظر نمی‌گیرد. همچنین از توزیع تصادفی عیار در حالت طبیعی صرف‌نظر می‌کند [۱۸].

۱-۴- شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نوع دیگری از روش حل مسائل باربری در معادن است که ترکیبی از روش‌های ذکرشده (بهینه‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی) است. این روش حل ادغامی به دلیل بالا بردن سرعت و دقت حل مسائل تابه‌حال نتایج مطلوبی دربر داشته و موردتوجه متخصصین واقع شده است.

فازی فادین یک تحقیق با استفاده از رویکرد الگوریتم رو به بالا[۶] به‌عنوان یک راه‌حل جدید برای حل مسئله تخصیص کامیون برای معادن روباز انجام داد. رویکرد ارائه‌شده با استفاده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در حل مسئله تخصیص کامیون با استفاده از شرایط داده واقعی توسعه‌یافته است. نتایج باهدف پاسخ به این سؤال بودند که کامیون باید چه زمانی و به کجا برود که بتواند تولید را به حداکثر برساند و هزینه‌های قابل‌توجهی را برای صنعت معدنکاری کاهش دهد [۱۹]. سلیمانی و بندورف مطالعه‌ای برای یک معدن زغال‌سنگ (لیگنیت) که با استفاده از ماشین بیل چرخشی به‌صورت پیوسته روباره برداری می‌شد انجام داده‌اند. کنترل سیستم تخصیص بر اساس توالی استخراج و طبقه‌بندی زمین‌شناسی روی سایت حفاری و در دسترس بودن فضای دمپ باطله موجود، محاسبه می‌شود. در این معدن، هشت ماشین بیل چرخشی در سایت

معدن و هفت پخش‌کننده در دمپ وجود دارند که باعث پیچیدگی مسئله می‌شوند. برای بهینه‌سازی سیستم تخصیص باهدف حداقل کردن زمان انتظار ناشی از در دسترس‌پذیر نبودن فضای تخلیه، یک رویکرد بهینه‌سازی چندمرحله‌ای بر مبنای شبیه‌سازی ارائه شده است. این رویکرد شامل اجرای متناوب یک مدل بهینه‌سازی قطعی و یک مدل شبیه‌سازی تصادفی است که این ترکیب (شبیه‌سازی و الگوریتم‌ها) برای حل یک مسئله حمل‌ونقل و یک مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انجام شده است [۲۰]. سان و دزورالت یک رویکرد بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی برای سیستم کامیون - شاول در معادن روباز برای حداکثر کردن ارزش پیش‌بینی درآمد ارائه دادند. برای این کار از یک معدن روباز بزرگ در شمال آمریکا به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. برای توزیع احتمال فاکتورهای غیرقابل‌کنترل از داده‌های تجربی تولید معدن استفاده شده است. سپس روش سطح پاسخ برای توضیح واریانس درآمد تحت تأثیر فاکتورهای کنترل‌شده و غیرقابل‌کنترل انجام شده است و در پایان نتیجه واریانس به‌دست‌آمده به‌عنوان محدودیت‌های مدل ریاضی برای بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار OptQuest انجام شده است [۲۱].

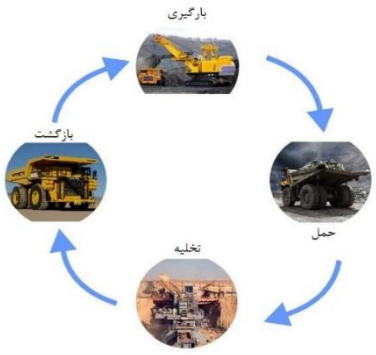
۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه یک مدل ریاضی کارگاه گردش کاری برای زمان‌بندی عملیات باربری معادن روباز ارائه شده است. در بسیاری از صنایع تولیدی یا مونتاژی، هر کار می‌بایست مسیر مشخصی از عملیات را طی کند که این عملیات در بسیاری از اوقات برای تمامی کارها ترتیب یکسانی دارند، به عبارتی کارها مسیر یکسانی را طی می‌کنند. در چنین سیستم‌هایی، ماشین‌ها سلسله‌وار پس از یکدیگر قرار می‌گیرند و سیستم به‌عنوان کارگاه گردش کاری (کارگاه جریانی) شناخته می‌شود. با توجه به پیشینه تحقیق، مدل‌های ریاضی ارائه شده عمدتاً چندمرحله‌ای هستند و این باعث دوری از جواب بهینه درمجموع مراحل می‌شود (جواب در هر مرحله بهینه است ولی درمجموع ممکن است بهینه نباشد)؛ بنابراین در تحقیق حاضر بهبود مدل‌های پیشین از طریق یکپارچه کردن مدل محقق شده است.

این مدل قادر است هر دو مسئله تخصیص و اعزام پویا را به‌صورت یکپارچه مدل کند و خروجی آن مشخص کننده زمان دقیق هر یک از زیر-عملیات‌های باربری باشد؛ بنابراین حل این مدل علاوه بر تخصیص کامیون به شاول‌ها، توالی اعزام پویای آن‌ها و زمان‌بندی عملیات بارگیری شاول‌ها را به دست می‌دهد.

در این قسمت با استفاده از تئوری‌های زمان‌بندی کار موجود در حوزه مهندسی صنایع، یک مدل ریاضی تک‌مرحله‌ای برای زمان‌بندی عملیات باربری معادن روباز با کامیون‌های همگن ارائه شده است.

در این مدل منظور از "کار" یک سیکل عملیاتی کامیون است که در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. درواقع هر کار متشکل از چهار عملیات است. در هر کاری که انجام می‌شود، شاول یک عملیات و کامیون سه عملیات انجام می‌دهد به‌طوری‌که کامیون در طول همه زیر - عملیات‌ها مشغول است، ولی شاول تنها در عملیات بارگیری مشغول به کار است و بعد از اتمام بارگیری یک کامیون، می‌تواند کامیون دیگری را بارگیری کند.



شکل ۱- مجموعه عملیات هر کار

ازآنجایی‌که در این مدل همه‌ی کارها از عملیات یکسان تشکیل شده‌اند (بارگیری، باربری، تخلیه و برگشت)، این مدل یک مسئله‌ی کارگاه گردش کاری از نوع منعطف[۷] است که در این نوع مسائل، تخصیص m کامیون به یک شاول صورت می‌گیرد. عملیات به‌صورت غیر منقطع بوده و سیستم همگن در نظر گرفته شده است. سیستم همگن بدین معنی است که ظرفیت همه کامیون‌هایی که در ناوگان باربری به کار گرفته می‌شوند یکسان است. شکل ۲ عملیات شاول و کامیون‌ها، نحوه بارگیری کامیون‌ها و حمل مواد به دمپ تخلیه و برگشت به سمت شاول را نشان می‌دهد. همچنین تابع هدف این مدل شامل کمینه‌سازی زمان اتمام کل عملیات بارگیری و باربری در یک شیفت کاری است. شایان‌ذکر است که محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید (مانند تناژ استخراجی) می‌باید رعایت شود. پارامترهای ورودی،

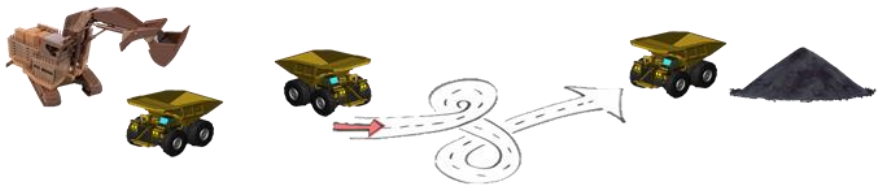
محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم مدل در ادامه توضیح داده شده‌اند.

پارامترهای ورودی

۱. s: مجموعه توالی کارها
۲. c: مجموعه توالی کامیون‌ها
۳. J: مجموعه کارها
٤. O: مجموعه عملیات
٥. T: مجموعه کامیون‌ها
٦. cap_t : ظرفیت کامیون t ام
۷. $blocksize_j$: حجم بلوک (کار) j ام
۸. d_{tjo} : زمان انجام عملیات o ام از کار j ام که توسط کامیون t ام انجام می‌شود.

متغیرهای تصمیم

۱. گر کامیون t ام در توالی c ام از عملیات o ام از توالی s ام کار j ام را انجام دهد یک و در غیر این صورت صفر است.
۲. ST_{tco} : زمان شروع به کار عملیات o ام که توسط کامیون t ام در توالی c ام آن انجام می‌شود.
۳. SJ_{jso} : زمان شروع به کار عملیات o ام از توالی s ام بلوک j ام.
٤. CT: زمان تکمیل کل کارها



شکل ۲- عملیات ناوگان استخراجی

تابع هدف

$$Minimize: Max\left(ST_{tco} + \sum_{s=1}^{s}\left(d_{tjo} * X_{tcjso}\right)\right) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, o \in O \qquad (۱)$$

محدودیت‌ها

$$ST_{tco+1} \geq ST_{tco} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s}\left(d_{tjo} * X_{tcjso}\right) \qquad \forall t \in T, c \in c, o \in O-1 \qquad (۲)$$

$$ST_{tc+11} \geq ST_{tc4} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s}\left(d_{tj4} * X_{tcjs4}\right) \qquad \forall t \in T, c \in c-1 \qquad (۳)$$

$$SJ_{js+11} \geq SJ_{js1} + \left(d_{tj1} * X_{tcjs1}\right) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, s \in s-1 \qquad (۴)$$

$$1 - \left(\frac{mincap_t}{blocksize_j}\right)/2 \leq \sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c}\sum_{s=1}^{s} X_{tcjs1} * \left(\frac{cap_t}{blocksize_j}\right) \leq 1 + \left(\frac{mincap_t}{blocksize_j}\right)/2 \qquad \forall j \in J \qquad (۵)$$

$$ST_{tco} - SJ_{jso} \geq \left(1 - X_{tcjso}\right) * (-M) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, s \in s, o \in O \qquad (۶)$$

$$SJ_{jso} - ST_{tco} \geq \left(1 - X_{tcjso}\right) * (-M) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, s \in s, o \in O \qquad (۷)$$

$$ST_{tc2} = ST_{tc1} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s}\left(d_{tj1} * X_{tcjs1}\right) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J \qquad (۸)$$

$$ST_{tc4} = ST_{tc3} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s}\left(d_{tj3} * X_{tcjs3}\right) \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J' \qquad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s} X_{tcjso} \leq 1 \qquad \forall t \in T, c \in c, o \in O \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c} X_{tcjso} \le 1 \qquad \forall j \in J, s \in s, o \in O-1 \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c} \left(X_{tcjso} + X_{tcjso'}\right) \ne 1 \qquad \forall j \in J, s \in s, o, o' \in O-1, o \ne o' \qquad (۱۲)$$

$$X_{tcjso} + X_{tcjso'} \ne 1 \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, s \in s, o, o' \in O-1, o \ne o \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \left(X_{tcjs1} + X_{tcjs4}\right) \ne 1 \qquad \forall t \in T, c \in c, s \in s \qquad (۱۴)$$

$$X_{tcjs4} + X_{tc+1j's'1} \ne 2 \qquad \forall t \in T, c \in c-1, j, j' \in J, s, s' \in s, j \ne j' \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s} X_{tcjs1} \ge \sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{s} X_{tc+1js1} \qquad \forall t \in T, c \in c-1 \qquad (۱۶)$$

$$ST_{tc1} \le ST_{tc+11} + \left(1 - X_{tc+1js1}\right) * (M) \qquad \forall t \in T, c \in c-1, j \in J, s \in s \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c} X_{tcjs1} \ge \sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c} X_{tcjs+11} \qquad \forall j \in J, s \in s-1 \qquad (۱۸)$$

$$SJ_{js1} \le SJ_{js+11} + \left(1 - X_{tcjs+11}\right) * (M) \qquad \forall j \in J, s \in s, o \in O \qquad (۱۹)$$

$$ST_{tco} \ge 0 \qquad \forall t \in T, c \in c, j \in J, s \in s-1 \qquad (۲۰)$$

$$SJ_{jso} \ge 0 \qquad \forall t \in T, c \in c, o \in O \qquad (۲۱)$$

۲) بر اساس این محدودیت، عملیات در هر سیکل به ترتیب انجام می‌شوند.

۳) کامیون فقط بعد از اتمام سیکل خود می‌تواند به سراغ سیکل بعدی برود.

۴) شاول فقط بعد از اتمام سیکل خود می‌تواند به سراغ سیکل بعدی برود.

۵) نشان‌دهنده حجمی از هر بلوک است که بایستی استخراج شود.

۶) و ۷) رابطه بین زمان شروع توالی‌های کامیون‌ها و شاول‌ها را برقرار می‌کند (باعث می‌شود متغیرهای تصمیم زمان شروع توالی‌ها یکسان باشند).

۸) زمان انتظار بین عملیات بارگیری و حمل را حذف می‌کند.

۹) زمان انتظار بین عملیات تخلیه و برگشت را حذف می‌کند.

۱۰) هر توالی از هر کامیون فقط یک‌بار قابل انجام است.

۱۱) هر توالی از هر بلوک فقط یک‌بار قابل انجام است.

۱۲) وقتی عملیات اول یک توالی از شاولی برای انجام شدن انتخاب می‌شود، به‌تبع آن عملیات دوم و سوم نیز بایستی انجام بگیرند.

۱۳) وقتی عملیات اول یک توالی از کامیونی برای انجام شدن انتخاب می‌شود، به‌تبع آن عملیات دوم و سوم نیز بایستی انجام بگیرند.

۱۴) با اعمال این محدودیت در صورت انجام عملیات اول توالی یکم از یک کامیون، عملیات چهارم آن توالی نیز می‌بایست انجام گیرد.

۱۵) این محدودیت باعث می‌شود کامیون به‌غیراز توالی اول، بارگیری خود را از شاولی شروع کند که در توالی قبلی‌اش به‌پای آن شاول رفته است.

۱۶) و ۱۷) بر اساس این محدودیت‌ها توالی کامیون‌ها به ترتیب صورت می‌گیرد. بدین‌صورت که شروع توالی c ام قبل از شروع توالی c+1 ام در هر کامیون است.

۱۸) و ۱۹) بر اساس این محدودیت‌ها توالی شاول‌ها به ترتیب صورت می‌گیرد. بدین‌صورت که شروع توالی s ام قبل از شروع توالی s+1 ام در هر شاول است.

۲۰) و ۲۱) متغیرهای تصمیم زمان شروع کامیون‌ها و زمان شروع شاول‌ها همواره اعدادی مثبت هستند.

۳- نتایج و بحث

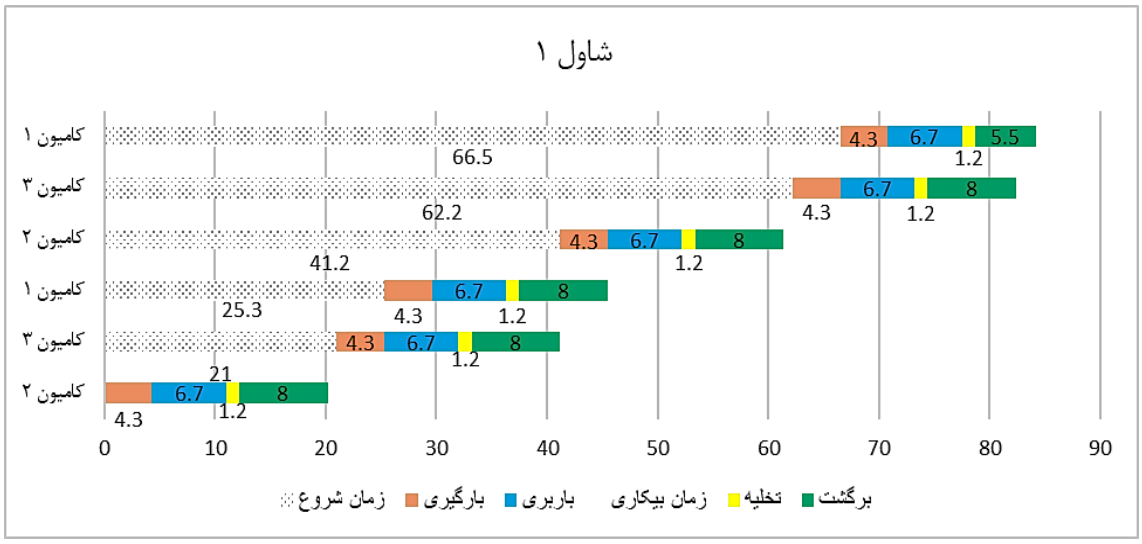
در این بخش به‌منظور عملکرد مدل در یک مسئله واقعی، مسئله‌ای با استفاده از داده‌های یک معدن واقعی طرح شده است. این مسئله شامل ۳ دستگاه کامیون ۱۰۰ تنی، ۲ دستگاه شاول و یک نقطه تخلیه است که بایستی کامیون‌ها مواد را از پای هر بارکننده به سمت دمپ تخلیه جابجا کنند. برای این منظور، ۴ سیکل برای کامیون‌ها و ۶ سیکل برای شاول نیاز است که کار انجام شود. جدول ۱ اطلاعات تکمیلی را در اختیار قرار می‌دهد. این داده‌ها مربوط به معدن مس سونگون هستند که از مقاله آزادی استخراج شده‌اند [۲۲]. این مسئله با یک رایانه شخصی با پردازشگر چهار هسته‌ای ۱٫۸ گیگاهرتزی و حافظه ۴ گیگابایت در زمان ۳۷ ثانیه حل شد. در مرحله بعد مدل ریاضی در محیط IBM ILOG CPLEX پیاده‌سازی شد و با پارامترهای ورودی موجود در جدول ۱ حل شد. جدول ۲ اطلاعات کلی حاصل از حل مدل از قبیل تعداد محدودیت‌ها و متغیرها، تابع هدف و زمان‌های آغاز و پایان کامیون‌ها و شاول را برحسب دقیقه نشان می‌دهد. شکل ۳ و شکل ۴ نمودارهای گانتی هستند که زمان‌های آغاز و پایان هریک از عملیات کامیون‌ها را برحسب دقیقه نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها می‌توان سیکل کامیون‌ها، زمان‌های آغاز به کار، مدت‌زمان انجام سیکل و درمجموع زمان‌بندی ناوگان را مشاهده کرد. تابع هدف بهینه این مسئله که با مدل ارائه‌شده حل شده است، ۸۴٫۲ دقیقه است. تابع هدف، کوتاه‌ترین زمان برای استخراج مقدار ماده معدنی موردنظر با تجهیزاتی که در اختیار است را نشان می‌دهد. پس از به دست آوردن زمان‌بندی عملیات کامیون‌ها و شاول‌ها، زمان‌های بی‌کاری شاول نیز محاسبه شده است. این زمان‌ها نشان‌دهنده حد فاصله اتمام یک سیکل بارگیری شاول و شروع سیکل بعدی است که در شکل ۵ مشخص شده‌اند. در این مسئله شاول‌ها از مجموع ۱۳۶ دقیقه‌ای که کار می‌کند، ۸۵ دقیقه زمان انتظار دارند؛ بنابراین شاول‌های ۱ و ۲ به ترتیب دارای کارایی ۳۶ و ۳۹ درصد و به‌طور میانگین ۳۸ درصدی هستند. شکل ۶ زمان‌های کار و انتظار کامیون‌ها را نشان می‌دهد که درمجموع ۲۵۰ دقیقه‌ای که کامیون‌ها کار می‌کنند، مجموع زمان انتظار کامیون‌ها ۶٫۱ دقیقه است. با توجه به در دست داشتن زمان‌های انتظار و کار کامیون‌ها، کارایی کامیون‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۹۵، ۹۸ و ۱۰۰ درصد و به‌طور میانگین ۹۷٫۵ درصد به دست می‌آیند. نکته قابل‌ذکر دیگر این است که مدل ارائه‌شده در این مقاله از نوع NP-hard است. بدین معنا که با افزایش سایز مسئله زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. به این خاطر و برای ارزیابی صحت مدل در این مقاله یک مثال کوچک‌مقیاس از معدن مس سونگون حل شد. حل مدل با استفاده از روش‌های حل قطعی (مانند الگوریتم شاخه و کران در نرم‌افزار CPLEX) دست‌یافتنی نیست؛ بنابراین تحقیقات آتی بر روی توسعه الگوریتم‌های حل سریع مدل ارائه‌شده متمرکز خواهد شد و سپس می‌توان جنبه‌های کاربردی این مدل را در معادن واقعی و در مقایسه با روش‌های رایج موردبحث قرار داد. لیکن ارائه هر نوع الگوریتم ابتکاری و یا فرا ابتکاری نیازمند وجود یک مدل درست از عملیات باربری است که در این مقاله ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات اولیه مسئله

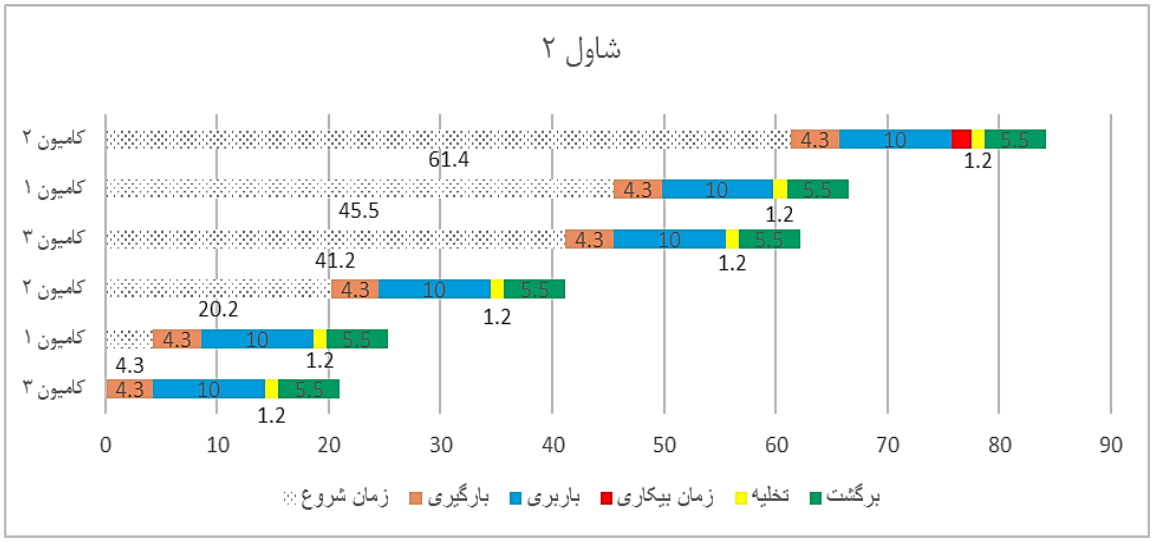
زمان بارگیری شاول (دقیقه)	۴٫۳
زمان رفت کامیون از شاول ۱ به دمپ (دقیقه)	۶٫۷
زمان رفت کامیون از شاول ۲ به دمپ (دقیقه)	۱۰
زمان برگشت کامیون از دمپ به شاول ۱ (دقیقه)	۵٫۵
زمان برگشت کامیون از دمپ به شاول ۲ (دقیقه)	۸
زمان تخلیه کامیون‌ها (دقیقه)	۱٫۲
تعداد کامیون‌ها	۳
ظرفیت هر بلوک (تن)	۶۰۰
ظرفیت هر کامیون (تن)	۱۰۰

جدول ۲- اطلاعات خروجی مربوط به حل مدل

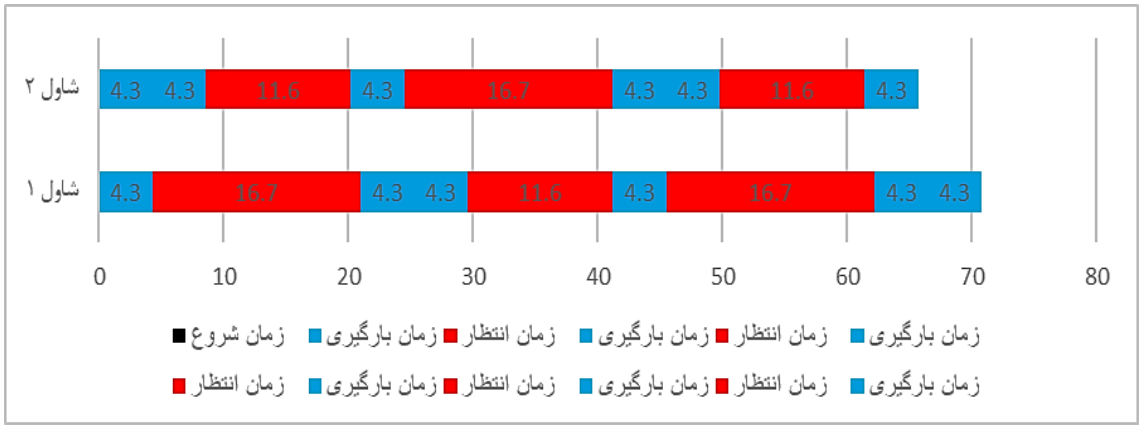
تعداد محدودیت‌ها	۳۴۵۲
تعداد متغیرهای باینری	۲۲۳۲
تعداد متغیرهای غیر باینری	۹۸
تابع هدف	۸۴٫۲
زمان آغاز کامیون ۱	۴٫۳
زمان آغاز کامیون ۲	۰
زمان آغاز کامیون ۳	۰
زمان پایان کامیون ۱	۸۴٫۲
زمان پایان کامیون ۲	۸۴٫۲
زمان پایان کامیون ۳	۸۲٫۴
زمان آغاز کار شاول ۱	۰
زمان آغاز کار شاول ۲	۰
زمان پایان کار شاول ۱	۷۰٫۸
زمان پایان کار شاول ۲	۶۵٫۷



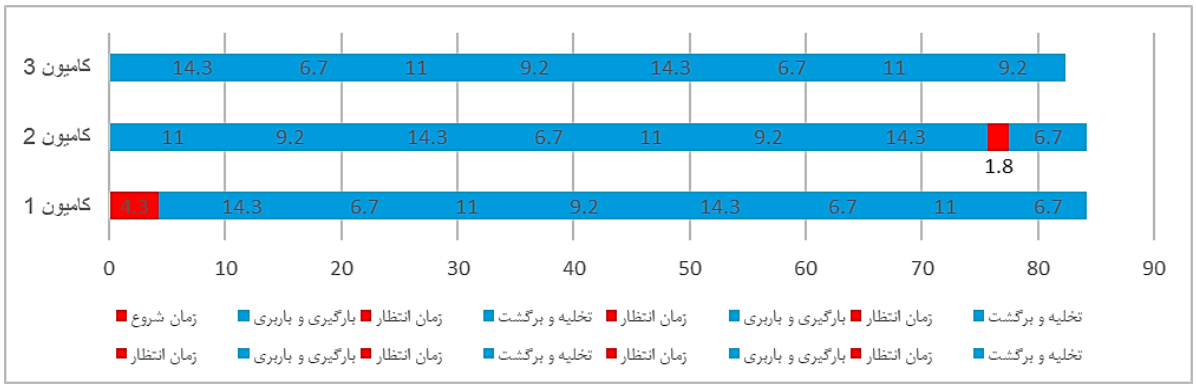
شکل ۳- زمان‌بندی عملیات کامیون‌ها و شاول ۱



شکل ۴- زمان‌بندی عملیات کامیون‌ها و شاول ۲



شکل ۵- زمان‌های انتظار شاول‌ها



شکل ۶- زمان انتظار کامیون‌ها

۴- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، عملیات باربری در معادن روباز، به‌عنوان یکی از مسائل اساسی بهینه‌سازی عملیات موردتوجه قرار گرفته است. مسئله تخصیص کامیون‌ها به شاول و همچنین تعیین ترتیب اعزام کامیون‌ها به شاول‌ها (گسیل) به‌عنوان مسائل سنتی حوزه زمان‌بندی عملیات باربری معادن روباز مطرح هستند. در این تحقیق مسائل تخصیص و گسیل کامیون‌ها به‌صورت یک مسئله کارگاه گردش کاری تعریف شد و بر این اساس یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی هم‌زمان و پویای این دو مسئله ارائه شد. خروجی این مدل، زمان‌بندی دقیق کار کامیون‌ها و شاول‌ها تحت محدودیت برنامه‌ریزی تولید از پیش تعیین شده است. مدل ارائه‌شده در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX پیاده‌سازی شد و برای یک مطالعه موردی کوچک‌مقیاس حل شد. نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده به‌خوبی قابلیت در نظر گرفتن توابع هدف مختلف را دارد و در صورت رسیدن به جواب بهینه می‌تواند زمان انجام عملیات را کاهش دهد و درنهایت توان تولیدی معدن را بالا ببرد. با توجه به بالا رفتن زمان حل این مدل با استفاده از روش‌های حل دقیق و نیاز به حل سریع این مدل برای کاربرد در معادن واقعی، تحقیقات آتی درزمینه توسعه الگوریتم‌های حل سریع پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] M. Koryagin and A. Voronov. (2017). Improving the organization of the shovel-Truck systems in open-pit coal mines. Transp. Probl., vol. 12, no.2, pp. 113–122.

[2] Sattarvand, J (2015). “Using operation research models for optimizing truck-shovel haulage operation.” First jurnal of mining engineering: (in Persian).

[3] A. Moradi Afrapoli, H. Askari-Nasab. (2017). Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. Int. J. Mining, Reclam. Environ., vol. 0930, no. June, pp. 1–19.

[4] Y. Lizotte and E. Bonates. (1987). Truck and shovel dispatching rules assessment using simulation. Min. Sci. Technol, vol. 5, no. 1, pp. 45–58.

[5] M. L. Pinedo (2017). “Scheduling: Theory, algorithms, and systems.” Amir Kabir university, Ebook: (in Persian).

[6] Davari, S. and Sattarvand, J (2013). “Simulation of Sungun copper mine haulage system with GPSS/H programming.” Forth jurnal of mining engineering: (in Persian).

[7] Basiri, M. H. and Alamdari, S (2015). “ Simulation of transportation system in Abadeh fireclay mine (by using ARENA software).” Thrid conference of Iran open pit mines: (in Persian).

[8] K. Oraee and B. Asi. (2004). Fuzzy model for truck allocation in surface mines. Proc. 13th Internat. Sympos. Mine Planning Equipment Selection (MPES). pp. 585–591.

[9] N. ÇETIN. (2004). Open-pit truck/shovel haulage system simulation. PhD thesis, University of Middle East Technical University, the Department of Mining Engineering.

[10] A. S. Hashemi and J. Sattarvand, (2015). Simulation Based Investigation of Different Fleet Management Paradigms in Open Pit Mines-A Case Study of Sungun Copper Mine. Arch. Min. Sci.

[11]L. Zh0ang and X. Xia. (2015). An Integer Programming Approach for Truck-Shovel Dispatching Problem in Open-Pit Mines. Energy Procedia, vol. 75, pp. 1779–1784.

[12] C. H. Ta, A. Ingolfsson, and J. Doucette. (2013). A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities. Eur. J. Oper. Res., vol. 231, no.3, pp. 770–778.

[13] S. R. Patterson, E. Kozan, and P. Hyland. (2017). Energy efficient scheduling of open-pit coal mine trucks. Eur. J. Oper. Res., vol.262, no. 2, pp.759–770.

[14] J. W. White and J. P. Olson. (1986). Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives.

Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States), vol. 38, no. 11.

[15] J. Elbrond and F. Soumis. (1987). Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment.

[16] F. Soumis, J. Ethier, and J. Elbrond. (1989). Evaluation of the new truck dispatching in the mount wright mine. Appl. Comput. Oper. Res. Miner. Ind., pp. 674–682.

[17] Z. Li. (1989). A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. Min. Sci. Technol., 10: 337-340.

[18] Y. Chang, H. Ren, and S. Wang. (2015). Modelling and optimizing an open-pit truck scheduling problem. Discret. Dyn. Nat. Soc.

[19] A. Y. Faiz Fadin. (2017). Simulation–Optimization Truck Dispatch Problem Using Look – Ahead Algorithm in Open Pit Mines. Int. J. GEOMATE, vol. 13, no. 36, pp. 80–86.

[20] M. Soleymani and J. Benndorf. (2018). Simulation-based Optimization Approach for Material Dispatching in Continuous Mining System. Innov. Appl. OR.

[21] Y. Son and S. Dessureault. (2013). Simulation-based robust optimization for complex truck-shovel systems in surface coal mines. Proc. Winter Simul. Conf. pp. 3522–3532.

[22] Azadi, N. Monjezi, M. and Ataeipour, M (2014). “Improvement performance of haulage system of Sungun copper mine using simulation technic.” Engineering modelling journal: (in Persian)

[1] GPSS/H
[2] Arena
[3] non-dispatching
[4] Innovative constructive algorithm
[5] Tabu search
[6] Look Ahead Algorithm
[7] Flexible Flow Shop Problem