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

دوره ۱۷، شماره ۵۷، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۳ تا ۲۵
Vol 17, No 57, 2022, pp 13-25

DOI: 10.22034/IJME.2022.528723.1863
DOR: 20.1001.1.17357616.1401.17.57.2.4

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

مقاله پژوهشی

کاربرد الگوریتم رقابت استعماری برای بهینه‌سازی نرخ تردد در سیستم ترابری معدن مس سونگون

سیدحسن سیداسماعیلی[۱]، مجید عطایی‌پور[۲*]

۱. کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Seyedesmaeili@aut.ac.ir
۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Map60@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱- پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

چکیده

بهینه‌سازی سیستم ترابری در عملیات استخراج معادن سطحی به دلیل بالا بودن هزینه‌های مربوط به بخش بارگیری و باربری که حدود ۶۰ درصد هزینه‌های عملیاتی را در بر می‌گیرد اهمیت ویژه‌ای دارد. تاکنون تحقیقات زیادی در این مورد انجام شده و محققان بسیاری روش‌های متعددی را برای این موضوع به کار برده‌اند. با پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، پیشرفت‌های زیادی در بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل معادن حاصل شده است و همچنان ادامه دارد. امروزه استفاده از روش‌های هوشمند در حل مسایل سخت و از جمله مسایل مهندسی معدن گسترش زیادی یافته و موفقیت‌هایی در حل این گونه مسایل به دست آمده است. الگوریتم رقابت استعماری یکی از این گونه الگوریتم‌هاست که به تازگی در حوزه مهندسی معدن کاربرد یافته است. در مقاله حاضر، کاربرد الگوریتم رقابت استعماری در حل مساله بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل معادن روباز معرفی و برای معدن مس سونگون پیاده‌سازی شده است. با به‌کارگیری این الگوریتم، مسیرهای مجاز برای عبور کامیون‌ها به عنوان ورودی‌های مساله تعریف شده است و در گام‌های متوالی بعدی بهبود می‌یابند یا به بهبود مساله کمک می‌کنند. پیاده‌سازی الگوریتم برای سیستم ترابری معدن مس سونگون منجر به افزایش تولید از حدود ۳۲ به ۳۷ هزار تن در شرایط یکسان شد. به علاوه برای اعتبارسنجی مدل ارایه‌شده، مساله مزبور با الگوریتم ژنتیک نیز حل و نتایج مقایسه شد. نتایج نشان داد مقدار تولید به دست آمده از ژنتیک حدود ۳۵ هزار تن بوده است.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، تخصیص و گسیل کامیون - شاول، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک، معادن روباز

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

از عوامل مهم در استخراج معادن روباز که بر هزینه تولید معدن تاثیر می‌گذارد، تخصیص و گسیل سیستم ترابری است. بهینه‌سازی سیستم ترابری در معدن طی دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول، تخصیص کامیون‌ها انجام می‌شود به طوری که کامیون‌ها از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و باطله به نقاط تخلیه یعنی سنگ‌شکن و یا انباشگاه‌های باطله تخصیص داده می‌شوند و بار حمل شده را تخلیه می‌کنند. در مرحله دوم، کامیون‌ها از نقاط تخلیه با رعایت سازگار بودن مسیرها به ایستگاه‌های بارگیری گسیل می‌شوند. البته در این مرحله ممکن است عوامل خارجی مانند دیسپچر، در گسیل دادن کامیون‌ها دخالت داشته باشد. تامین تولید پایدار از کانسنگ با حداکثر کارایی ممکن ماشین‌آلات، از محدودیت‌های مهم و اصلی در تخصیص بهینه کامیون‌ها در عمل است.

امروزه برای حل مساله تخصیص بهینه کامیون‌های معدنی از مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی استفاده می‌شود. در مدل تمنگ برای حل مساله تخصیص کامیون‌ها بر اساس برنامه‌ریزی آرمانی، ابتدا نرخ جریان بهینه از مواد معدنی یا باطله از هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری به هر یک از نقاط تخلیه مشخص می‌شود. سپس بر اساس برنامه گسیل ارایه شده، گسیل لحظه‌ای برای کمینه کردن زمان انتظار شاول‌ها و کامیون‌ها انجام می‌گیرد [۱]. لوزیت و همکاران در مدل خود، بیشینه کردن کاربری کامیون‌ها، کاربری شاول‌ها، فاکتور انطباق و نظایر آن را بررسی کرده‌اند [۲]. همچنین مدل وایت و السون یک مدل دیسپچینگ دوگامه است که در سال ۱۹۸۶ در معادن بزرگ دنیا مورد استفاده قرار گرفته است؛ این مدل در مرحله نخست با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و در مرحله بعدی با کمک برنامه‌ریزی پویا برای کمینه‌سازی هزینه‌ها، بیشینه‌سازی تولید و تامین نیاز کارخانه‌های فرآوری، کار تخصیص و گسیل را انجام می‌دهد [۳].

در حالت کلی، تخصیص و گسیل بهینه برای معادن بزرگ ضروری است که هدف از بهینه‌سازی سیستم بارگیری و باربری، توزیع مناسب کامیون‌ها بین شاول‌ها است به صورتی که کمترین زمان بیکاری بین کامیون و شاول انجام گیرد یا به صفر برسد. مساله تخصیص و گسیل کامیون- شاول از مسایل بهینه‌سازی پیچیده با ابعاد بزرگ و متغیرهای گسسته است که دستیابی به پاسخ بهینه با استفاده از روش‌های کلاسیک و سنتی امکان‌پذیر نیست [۳] و [۴]؛ بنابراین در این مقاله برای تخصیص و گسیل کامیون- شاول در معادن روباز از مدل توسعه‌یافته لی [۵] استفاده شده و به وسیله الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک که بر مبنای کمینه کردن هزینه‌ها مدل‌سازی شده است و مساله را با به حداقل رساندن زمان انتظار کامیون- شاول و کاهش تردد کامیون‌ها در معادن بهینه‌سازی کرده‌اند. انتخاب مدل توسعه‌یافته لی برای انجام مساله مورد نظر در میان مدل‌های دیگر به این دلیل است که این مدل، تمام پارامترها و شرایط حاکم بر معدن را دارا بوده و بیشترین تطابق را با معدن مورد مطالعه داشته است.

۲- مدل لی برای مساله تخصیص کامیون

از اهداف مهم در تخصیص کامیون، پشتیبانی از هدف نهایی تولید و بیشینه‌سازی سود ناشی از عملیات می‌باشد. برای تخصیص کامیون در معادن، اهداف متفاوتی را می‌توان تعریف نمود که این اهداف بسته به شکل، ترکیب فیزیکی معدن، شرایط عملیاتی و اهداف اقتصادی یا مدیریتی معدن متفاوت خواهند بود. در این مقاله، با توجه به اهداف مساله و شرایط حاکم بر معدن مس سونگون، مدل توسعه‌یافته لی[1] انتخاب شد.

عملیات بارگیری و باربری مواد معدنی و باطله با کامیون و شاول یک سیستم بهینه انتقال مواد در معادن روباز است. سرمایه‌گذاری در یک سیستم گسیل (دیسپچینگ) کامپیوتری، هزینه‌ها را با افزایش تولید جبران خواهد کرد. در هر معدن با توجه به بزرگی و کوچکی آن، کامیون‌ها و شاول‌هایی با ظرفیت‌های مختلفی وجود دارند که شاول‌ها از ایستگاه‌های بارگیری مواد معدنی و باطله با در نظر گرفتن توان تولید و عیار هر ایستگاه، کامیون‌ها را بارگیری کرده و کامیون‌ها بار حملی را در محل انباشتگاه‌ها (سنگ‌شکن یا دامپ باطله) تخلیه می‌کنند.

حمل و نقل با کامیون - شاول یک سیستم پیچیده ماشینی - ماهیت انسانی در معادن روباز است که این ماهیت پیچیده به دلایل زیر است [۱]:

- توپوگرافی ناهمگون معدن همراه با شبکه پیچیده از مسیر حمل‌ونقل بین ایستگاه‌های بارگیری و مقاصد تخلیه
- عدم پایداری وضعیت عملیاتی تجهیزات بارگیری و باربری از قبیل خرابی
- محدودیت ظرفیت سنگ‌شکن و هم‌چنین انباشتگاه‌های باطله
- تغییرات مکانی عیارهای ماده معدنی در محل یک شاول و همچنین تغییرات در عیار ماده معدنی شاولی به شاول

[1] Li model

دیگر

- محدودیت‌های فنی و اقتصادی طراحی کاواک که ملزم می‌کند به ازای یک تن ماده معدنی چه مقدار باطله باید برداشت شود.

اهداف کیفیتی و تولیدی مدیریت معدن نیز روی سیستم حمل‌ونقل تاثیر به‌سزایی دارد و بر پیچیدگی این سیستم می‌افزاید.

مساله اصلی در این پروژه، پیاده‌سازی سیستم حمل‌ونقل معدن روباز است. در معادن روباز درصد قابل توجهی از هزینه‌های استخراج را هزینه‌هایی مانند افزایش قیمت ماشین‌آلات، سرویس، نگهداری و مکانیزاسیون به خود اختصاص می‌دهد. مساله گسیل کامیون در معادن روباز عبارت از جواب به چند سوال است:

- کامیون بعد از ترک محل تخلیه باید به کجا برود؟
- چه میزان ماده معدنی و باطله از هرکدام از شاول‌ها به هر یک از مکان‌های تخلیه و از چه مسیری باید حمل شود تا تولید حداکثر شده و کیفیت ماده معدنی در حد تعیین‌شده حفظ شود؟
- هر یک از کامیون‌ها بعد از تخلیه در سنگ‌شکن یا انباشتگاه باطله برای حفظ اهداف تولید به کدام یک از شاول‌ها تخصیص داده شود؟ به‌گونه‌ای که نه شاولی برای بارگیری کامیون منتظر بماند و نه کامیونی در پای شاول منتظر بماند.
- چه تغییراتی هنگام خرابی تجهیزات بارگیری و باربری روی می‌دهد.

لی در سال ۱۹۹۰ مدلی برای بهینه‌سازی سیستم گسیل کامیون- شاول بیان ارایه کرد که بر اساس به حداقل رساندن کل کارهای انجام شده بود و فقط برای معادنی که از یک نوع کامیون در سامانه ترابری خود استفاده خواهند کرد می‌تواند به کارگرفته شود؛ بنابراین لازم است برای معادنی که بیش از یک نوع ظرفیت کامیون دارند تابع هدف به‌گونه‌ای باشد که برای کامیون‌هایی با ظرفیت‌های مختلف هم کاربرد داشته باشد [۴] و [۶]. بنابراین برای برطرف کردن و پوشش دادن کامیون‌های با بیش از یک نوع ظرفیت، مدل ارایه‌شده توسط لی به صورت رابطه ۱ توسعه یافته است [۴] و [۶].

$$w=\sum_{i=1}^{s_1}\sum_{j=1}^{m_1}\sum_{p=1}^{h}X_{ijp}(Z_{1p}+Z_{2p})\sum_{k=1}^{k_{ij}}D_{ij}^{(k)}+\sum_{i=1+s_1}^{s_1+s_2}\sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2}\sum_{p=1}^{h}X_{ijp}(Z_{1p}+Z_{3p})\sum_{k=1}^{k_{ij}}D_{ij}^{(k)}+\sum_{j=1}^{m_1+m_2}\sum_{i=1}^{s_1+s_2}\sum_{p=1}^{h}R_{jip}Z_{1p}\sum_{k=1}^{k_{ji}}D_{ji}^{(k)} \quad (۱)$$

متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل توسعه‌یافته لی به ترتیب، نرخ تردد کامیون نوع p از ایستگاه‌های بارگیری به مقاصد تخلیه (X_{ijp}) و نرخ گسیل از نقاط تخلیه به هر یک از جبهه‌کارها (R_{jip}) در واحد زمان است. همچنین برای مدل توسعه‌یافته لی محدودیت‌هایی اعمال شد که به شرح زیر است:

- محدودیت مربوط به میزان مواد برنامه‌ریزی‌شده برای تولید، به این معنا که در هر شیفت معمولا باید حداقل یک میزان باطله و ماده معدنی برنامه‌ریزی‌شده برای تولید حاصل شود.
- حداکثر تولید هر یک از ایستگاه‌های بارگیری، به این معنا که میزان موادی که از یک نقطه بارگیری به نقاط تخلیه فرستاده می‌شود باید از حداکثر تولید ایستگاه بارگیری کمتر باشد که این مطلب هم برای نقاط بارگیری ماده معدنی و هم برای نقاط بارگیری باطله باید صدق کند.
- برای این‌که استفاده از بار کننده‌ها توجیه اقتصادی داشته باشد باید در هر شیفت تولید حداقلی را داشته باشند. برای این منظور باید میزان مواد حمل شده از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری به هر یک از نقاط تخلیه از حداقل تولید آن بار کننده کمتر نباشد.
- محدودیت مربوط به ظرفیت پذیرش هر کدام از سنگ‌شکن‌ها و نقاط تخلیه
- محدودیت تعادل جریان ظرفیت باربری در هر نقطه مبدا و مقصد از شبکه باربری، به این معنا که تعداد کامیون‌هایی که وارد یک نقطه تخلیه یا یک نقطه بارگیری می‌شوند باید با تعداد کامیون‌های خروجی از آن برابر باشد.
- عیار موادی که وارد کارخانه می‌شود در نهایت باید در بازه تعریف‌شده برای کارخانه فرآوری باشد.
- محدودیت مربوط به کامیون‌های در دسترس، به این معنا که میزان مواد جابه‌جا شده نمی‌تواند از حداکثر ظرفیت کامیون‌ها تجاوز کند.
- محدودیت مثبت بودن تخصیص‌ها

۳- الگوریتم رقابت استعماری[1]

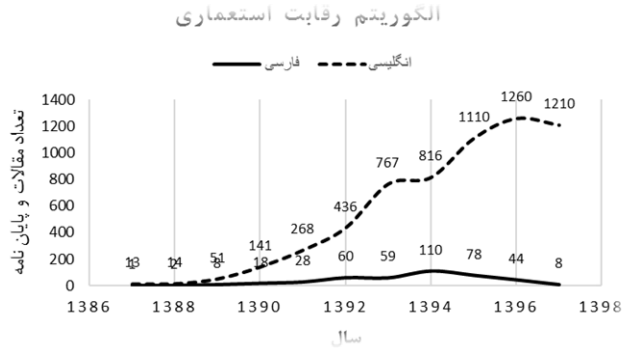
الگوریتم توسط آتش‌پز گرگری معرفی شد. الگوریتم رقابت استعماری از الگوی تاریخی رقابت در میان کشورهای استعماری الهام گرفته است. در واقع این الگوریتم، دریچه‌ای گشوده شده از دنیای ریاضیات و با چشم‌انداز کاملا انسانی

[1] Imperialist Competitive Algorithm

است. الگوریتم در ابتدا از چندین کشور در حالت اولیه شروع به کار می‌کند که این کشورها پاسخ‌های محتمل الگوریتم محسوب می‌شوند و به دو دسته کشورهای استعمارگر و کشورهای مستعمره تقسیم می‌شوند. الگوریتم با روندهای خاصی که در طبیعت خود نهفته است به آرامی به بهبود کشورها (جواب‌های مساله) می‌پردازد و در نهایت، جواب مناسب (کشور مطلوب) مساله بهینه‌سازی به دست خواهد آمد. در طبیعت این الگوریتم خواصی بنیادی نهفته است که پایه و اساس تعریف این الگوریتم به شمار می‌آید. سیاست جذب یا همگون‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب از ارکان مهم این الگوریتم است. این الگوریتم با الگوبرداری از روند تکاملی اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی کشورها و قالب‌بندی آن‌ها در مدل‌های ریاضی، عملگرهایی را به صورت الگوریتم ایجاد کرده است که جواب‌های مساله که همان کشورها است را در یک حلقه تکرار قرار می‌دهد و جواب‌ها را به تدریج بهبود داده می‌شود و در نهایت به جواب بهینه خواهد رسید [۷].

این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌ها از تعدادی جمعیت اولیه تصادفی تشکیل می‌شود که تعدادی از بهترین کشورها (که معادل نخبگان در الگوریتم ژنتیک است) به عنوان کشور استعمارگر و مابقی کشورها به عنوان کشورهای مستعمره در نظر گرفته می‌شود. استعمارگران با توجه به میزان قدرت خود، کشورها را به سمت خود جذب می‌کنند و رقابت بین کشورهای استعمارگر شکل می‌گیرد. هر امپراطوری که در این رقابت دوام نیاورد، از صحنه رقابت حذف خواهد شد و مستعمرات آن به زیر مجموعه امپراطور قوی‌تر درخواهد آمد و این امپراطوری در راس همه قرار خواهد گرفت. همین‌طور، کشورهای استعمارگر برای دوام و بقای خود، پیشرفت کشورهای مستعمره را نیز خواهان بودند که این امر با توسعه عمران و آبادانی در کشور مستعمره همراه بوده که موجب رضایت نسبی زیر مجموعه آن کشور را هم فراهم آورده است [۷].

در سال‌های اخیر به‌کارگیری الگوریتم رقابت استعماری در حل مسایل روند افزایشی داشته است و در مسایل زیادی مانند طراحی ساختار اسکلت [۸]، خوشه‌بندی داده‌ها [۹]، موتور القایی خطی [۱۰]، تعادل تنش [۱۱]، خوشه‌بندی و دسته‌بندی سنگ‌ها برای افزایش کارایی دستگاه‌های برش سنگ [۱۲]، پیش‌بینی انفجار [۱۳]، پیش‌بینی ارتعاش ناشی از انفجار [۱۴]، تعیین عیار حد بهینه معادن روباز با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی [۱۵]، مدل‌سازی و بهینه‌سازی عیارهای حد در معدن شماره ۱ گل گهر [۱۶]، تعیین محدوده نهایی معادن روباز [۱۷] و نظایر آن مورد استفاده قرارگرفته است. در مقالات و پایان‌نامه‌های زیادی از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است که در شکل ۱ به صورت نمودار سیر صعودی استفاده از الگوریتم به ویژه در کشورهای خارجی به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل ۱- نمودار استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در مقالات و پایان‌نامه‌ها [۱۷]

۴- حل مساله تخصیص و گسیل کامیون- شاول معدن مس سونگون

هدف از انجام پروژه، تخصیص و گسیل بهینه کامیون‌ها است که کامیون‌ها با ظرفیت‌های مختلف از کدام ایستگاه‌های بارگیری، بارگیری کنند و همچنین به هر ایستگاه چند کامیون و با چه نوع ظرفیتی در نظر گرفته شود؟ و فاصله زمانی کامیون‌ها از یکدیگر چقدر باید باشد؟ همچنین زمانی که کامیون بارگیری کرد به کدام محل تخلیه بار (سنگ‌شکن یا انباشتگاه باطله) تخصیص یابد تا بار خود را تخلیه کند؟ یا اینکه وقتی کامیون بار خود را تخلیه کرد به کدام یک از ایستگاه‌های بارگیری گسیل یابد تا به سوی آن ایستگاه‌ها حرکت کند؟

در این مقاله برای حل و اجرا مدل توسعه یافته لی در معادن از زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است که می‌تواند مدل تخصیص تعریف شده را حل و توزیع بهینه کامیون‌ها را انجام بدهد.

برای حل مدل با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، ابتدا باید کشورهای اولیه را ایجاد و مدلسازی کرد. برای مدل کردن کشورها باید همه مسیرهای ممکن ترابری ارزیابی شوند. معدن مورد مطالعه در این مقاله، معدن مس سونگون است که ۹ ایستگاه بارگیری و ۴ ایستگاه تخلیه دارد و از ۹ ایستگاه بارگیری، ۴ ایستگاه اول، مربوط به ماده معدنی و ۵ ایستگاه بعدی مربوط به ایستگاه برداشت باطله است. همچنین از ۴ ایستگاه تخلیه، ایستگاه تخلیه یک مربوط به سنگ‌شکن و ۳ نقطه تخلیه بعدی مربوط به انباشتگاه‌های باطله است. مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و باطله در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی در شیفت [۶]

شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴
تراز پله	۱۹۱۲/۵	۱۹۵۰	۱۹۶۲/۵	۲۱۰۰
نوع دستگاه بارگیری	لودر	لودر	لودر	لودر و بیل مکانیکی
مدل دستگاه بارگیری	KOM-600A	KOM-600A	NEWHOLLAND-270	KOM 600A, KOMPC-800
حد بالای تولید (ton/hr)	۶۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
حد پایین تولید (ton/hr)	۳۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۴۰۰
عیار ایستگاه‌های ماده معدنی (درصد)	۱/۴۲	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۳۹

جدول ۲- مشخصات عملیاتی ایستگاه‌های بارگیری باطله در شیفت [۶]

شماره ایستگاه بارگیری	۵	۶	۷	۸	۹
تراز پله	۱۹۳۷/۵	۲۲۳۷/۵	۲۲۶۲/۵	۲۲۸۷/۵	۲۳۱۲/۵
نوع دستگاه بارگیری	بیل مکانیکی	لودر	لودر	لودر	بیل مکانیکی و لودر
مدل دستگاه بارگیری	KOMPC-800	CAT-988B	CAT-988B	CAT-988B	KOMPC-1250, CAT-988B
حد بالای تولید (ton/hr)	۷۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۷۰۰
حد پایین تولید (ton/hr)	۵۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۱۰۰۰

زمان رفت و برگشت کامیون‌ها بین نقاط بارگیری و تخلیه از داده‌های عملیاتی‌اند که برای حل مدل نیاز است. در جدول‌های ۳ تا ۶ زمان‌های رفت و برگشت بین مسیرهای ممکن بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه، نقاط تخلیه و ایستگاه‌های بارگیری برای کامیون ۳۲ تنی و ۱۰۰ تنی نشان داده شده است [۶].

جدول ۳- متوسط زمان رفت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه (دقیقه) [۶]

نقاط بارگیری نقاط تخلیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۶/۸۲	۵/۲۳	۵/۶۲	۵/۷۸	–	–	–	–	–
انباشتگاه ۱۹۵۰	–	–	–	–	۳/۷۲	۱۷/۰۴	۱۸/۲۸	۲۱/۰۹	۲۳/۰۶
انباشتگاه ۲۲۵۰	–	–	–	–	۲۸/۰۶	۶/۸	۵/۶۲	۷/۸۳	۹/۷۱
انباشتگاه ۲۲۷۵	–	–	–	–	۳۳/۶	۱۶/۳۳	۹	۴/۰۴	۴/۹۶

جدول ۴- متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۳۲ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری (دقیقه) [۶]

نقاط بارگیری نقاط تخلیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۴/۴۴	۳/۴۱	۳/۶۷	۵/۷۸	۳/۹۵	۱۳/۲۳	۱۴/۳	۱۷/۳۱	۱۹/۲۶
انباشتگاه ۱۹۵۰	۳/۱۳	۲/۰۴	۳/۸۳	۹/۹۵	۲/۴۲	۱۷/۰۴	۱۸/۲۸	۲۱/۰۹	۲۳/۰۶
انباشتگاه ۲۲۵۰	۱۸/۸	۱۷/۷۶	۱۸/۰۲	۱۱/۸۲	۱۸/۳	۴/۴۳	۵/۶۲	۷/۸۳	۹/۷۱
انباشتگاه ۲۲۷۵	۲۲/۴۲	۲۱/۳۷	۲۱/۶۳	۱۲/۲۴	۲۱/۹۱	۱۰/۶۵	۵/۸۷	۴/۰۴	۴/۹۶

جدول ۵- متوسط زمان رفت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط بارگیری به نقاط تخلیه (دقیقه) [۶]

نقاط بارگیری نقاط تخلیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۷٫۸۶	۶٫۰۳	۶٫۴۸	۶٫۳۶	–	–	–	–	–
انباشتگاه ۱۹۵۰	–	–	–	–	۴٫۲۸	۱۸٫۷۴	۲۰٫۱۱	۲۳٫۲	۲۵٫۳۷
انباشتگاه ۲۲۵۰	–	–	–	–	۳۲٫۷	۷٫۸۴	۶٫۱۸	۸٫۶۱	۱۰٫۶۸
انباشتگاه ۲۲۷۵	–	–	–	–	۳۸٫۷۶	۱۸٫۸۴	۱۰٫۳۸	۴٫۴۴	۵٫۴۶

جدول ۶- متوسط زمان برگشت کامیون‌های ۱۰۰ تنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری (دقیقه) [۶]

نقاط بارگیری نقاط تخلیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ‌شکن	۴٫۸۷	۳٫۷۳	۴٫۰۱	۶٫۳۶	۴٫۳۳	۱۴٫۵۵	۱۵٫۷۳	۱۹٫۰۴	۲۱٫۱۸
انباشتگاه ۱۹۵۰	۳٫۴۳	۲٫۲۳	۳٫۲۴	۱۰٫۹۵	۲٫۶۵	۱۸٫۷۴	۲۰٫۱۱	۲۳٫۲۰	۲۵٫۳۷
انباشتگاه ۲۲۵۰	۲۰٫۵۹	۱۹٫۴۵	۱۹٫۷۳	۱۲٫۹۴	۲۰٫۰۴	۴٫۸۶	۶٫۱۸	۸٫۶۱	۱۰٫۶۸
انباشتگاه ۲۲۷۵	۲۴٫۵۶	۲۳٫۴۱	۲۳٫۶۹	۱۳٫۴۱	۲۴	۱۱٫۶۶	۶٫۴۳	۴٫۴۴	۵٫۴۶

کامیون‌ها در هر شیفت از ایستگاه‌های بارگیری، بارگیری می‌شوند و با توجه به بار حمل شده به سنگ‌شکن یا انباشتگاه‌های باطله تخصیص می‌یابند؛ اما کامیون‌هایی که از ایستگاه‌های مواد معدنی، بارگیری می‌کنند فقط می‌توانند به سنگ‌شکن تخصیص یابند و این مسیر برای حرکت آن‌ها مجاز خواهد بود یعنی؛ این کامیون‌ها نمی‌توانند در هیچ یک از مسیرهای منتهی به انباشتگاه‌های باطله تخصیص یابند. پس برای معدن مورد مطالعه، کامیون‌هایی که در ایستگاه‌های ۱ تا ۴ بارگیری می‌شوند فقط مجاز به حرکت در مسیر نقطه تخلیه ۱ (سنگ‌شکن) خواهند بود و کامیون‌هایی نیز که از ایستگاه‌های ۵ تا ۹ (ایستگاه‌های برداشت باطله) بارگیری می‌شوند فقط می‌توانند در مسیرهای منتهی به نقاط تخلیه ۲ تا ۴ (انباشتگاه‌های باطله) حرکت کنند؛ بنابراین باید نرخ تردد مسیرهای ممکن برای انواع کامیون‌ها محاسبه شود که منظور از نرخ تردد، تعداد کامیون‌هایی است که از هر ایستگاه بارگیری در طول یک شیفت، بارگیری می‌کنند و همچنین از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری گسیل می‌شوند. بنابراین در این معدن دو نوع کامیون با ظرفیت ۳۲ تنی و ۱۰۰ تنی که ساخت شرکت کوماتسو است، وجود دارد که مشخصات این کامیون‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است که هر دو نوع کامیون با ایستگاه‌های بارگیری سازگاری دارند، در این صورت برای مسیر رفت از هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی به سمت سنگ‌شکن باید دو نرخ تردد (۱ نرخ تردد برای کامیون ۳۲ تنی + ۱ نرخ تردد برای کامیون ۱۰۰ تنی) و از هر یک از ایستگاه‌های بارگیری باطله به سمت انباشتگاه‌های تخلیه، ۶ نرخ تردد (۳ نرخ تردد برای کامیون ۳۲ تنی + ۳ نرخ تردد برای کامیون ۱۰۰ تنی) باید مدلسازی شود (هر کامیونی که از ایستگاه بارگیری باطله حمل بار می‌کند سه مسیر برای تخلیه بار خواهد داشت که این مسیرها، مسیرهای منتهی به سه انباشتگاه باطله ۱۹۵۰، ۲۲۵۰ و ۲۲۷۵ است)؛ بنابراین در مجموع برای ایستگاه‌های بارگیری مواد معدنی، هشت نرخ تردد و برای ایستگاه‌های بارگیری باطله، ۳۰ نرخ تردد مدلسازی خواهد شد.

برای نرخ‌های تردد در مسیرهای برگشت از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری، با توجه به سازگار بودن هر یک از انواع کامیون‌ها با هر کدام از ایستگاه‌های بارگیری، کامیونی که بار خود را تخلیه می‌کند، مجاز است به هر یک از ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و باطله گسیل و حرکت کند، پس از هر یک از نقاط تخلیه به سمت ایستگاه‌های بارگیری، ۱۸ نرخ تردد (۹ نرخ برای کامیون ۳۲ تنی + ۹ نرخ برای کامیون ۱۰۰ تنی) و در مجموع کل نقاط تخلیه، ۷۲ نرخ تردد مدلسازی خواهد شد. پس کشور اولیه ایجادشده برای حل این مساله، به صورت آرایه یک‌بعدی تعریف می‌شود که شامل ۱۱۰ عضو خواهد شد و این عضوها، همان مسیرهای ممکن است که کامیون‌ها مجاز به حرکت در آن‌ها هستند. عضوهای اول آرایه، متناظر با نرخ‌های تردد در مسیر رفت است که این تعداد عضوهای اولیه آرایه، ۳۸ نرخ تردد است؛ و برای مسیرهای بازگشت، ۷۲ درایه بعدی متناظر با نرخ تردد مسیرهای بازگشت یعنی از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری است.

جدول ۷- مشخصات عملیاتی کامیون‌های فعال در هنگام اجرای مدل [۶]

نوع کامیون	میزان حمل ماده معدنی (تن)	میزان حمل باطله (تن)	تعداد کامیون‌های فعال	مدل	وزن خالی کامیون (تن)
۳۲ تنی	۲۶	۲۴	۲۵	HD-325 کوماتسو	۳۳
۱۰۰ تنی	۷۲	۶۵	۱۰	HD-785 کوماتسو	۷۲

متوسط زمان بارگیری، متوسط انتظار کامیون‌ها در هر یک از ایستگاه‌های بارگیری و زمان تخلیه در هر کدام از نقاط تخلیه از دیگر داده‌های مهم در حل مدل است. در جدول ۸ و ۹ میانگین این مقادیر برای انواع کامیون‌ها بیان‌شده است.

جدول ۸- متوسط زمان بارگیری و انتظار برای بارگیری در هر ایستگاه (دقیقه) [۶]

شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متوسط زمان بارگیری کامیون‌های ۳۲ تنی	۲	۲	۲٫۱۵	۱	۱٫۹	۲٫۱	۲٫۱	۲٫۱	۰٫۸۱
متوسط زمان بارگیری کامیون‌های ۱۰۰ تنی	۴٫۲۵	۴٫۲۵	۵٫۳۵	۲٫۱	۳٫۸۳	۵	۵	۵	۱٫۸
متوسط زمان انتظار کامیون در هر ایستگاه بارگیری	۰٫۳۵	۱٫۳	۰٫۷	-	۱	-	۱	-	-

جدول ۹- متوسط زمان تخلیه هر یک از انواع کامیون‌ها (دقیقه) [۶]

نوع کامیون نقاط تخلیه	۳۲ تنی	۱۰۰ تنی
سنگ‌شکن	۱٫۰۸	۱٫۳۳
انباشتگاه ۱۹۵۰	۰٫۸۵	۰٫۹۲
انباشتگاه ۲۲۵۰	۰٫۸۵	۰٫۹۲
انباشتگاه ۲۲۷۵	۰٫۸۵	۰٫۹۲

از دیگر داده‌های عملیاتی مورد نیاز برای حل مدل، فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از هرکدام از نقاط تخلیه است. فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه در جدول ۱۰ بیان شده است.

در معدن مس سونگون عیار مواد معدنی که به سنگ‌شکن ارسال می‌شود باید در محدوده ۰٫۶۸ تا ۰٫۷۸ درصد باشد. در این معدن، در شیفت اول به طور میانگین باید حداقل ۸۰۰۰ تن ماده معدنی و ۲۴۵۰۰ تن باطله استخراج شود. حداکثر ظرفیت سنگ‌شکن ۲۲۰۰ تن در ساعت و حداکثر پذیرش انباشتگاه‌های باطله در ساعت ۱۰۰۰۰۰ تن است [۶].

جدول ۱۰- فاصله هر یک از ایستگاه‌های بارگیری از نقاط تخلیه (متر) [۶]

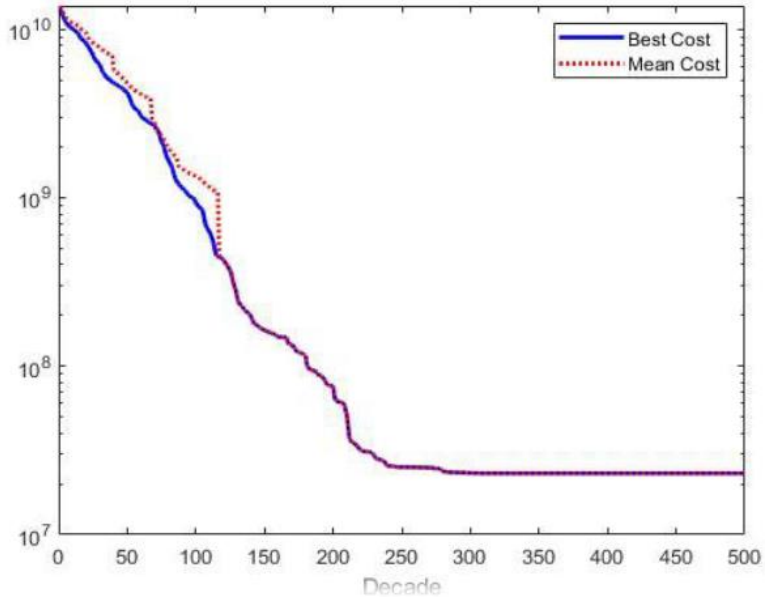
شماره ایستگاه بارگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
سنگ شکن	۱۷۰۴	۱۳۰۷	۱۴۰۵	۲۱۲۰	۱۵۱۴	۴۸۵۰	۵۲۴۴	۶۳۴۷	۷۰۶۱
انباشتگاه ۱۹۵۰	۱۲۰۰	۷۸۱	۱۰۸۱	۳۶۵۰	۹۲۹	۶۲۴۸	۶۷۰۲	۷۷۳۳	۸۴۵۷
انباشتگاه ۲۲۵۰	۷۲۰۸	۶۸۰۸	۶۹۰۶	۴۵۳۰	۷۰۱۵	۱۷۰۰	۲۰۶۰	۲۸۷۰	۳۵۶۰
انباشتگاه ۲۲۷۵	۸۵۹۵	۸۱۹۳	۸۲۹۱	۴۶۹۳	۸۴۰۰	۴۰۸۲	۲۲۵۰	۱۴۸۰	۱۸۲۰

۴-۱- حل مساله تخصیص و گسیل کامیون با الگوریتم رقابت استعماری

بعد از این که تابع هدف و محدودیت‌ها در نرم‌افزار متلب کدنویسی شد آن‌ها را به الگوریتم رقابت استعماری متصل کرده و اجرای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون با الگوریتم رقابت استعماری انجام خواهد گرفت؛ در این اجرا، ابتدا کشورهای اولیه ایجاد و مدلسازی شدند و امپریالیست‌ها و امپراطوری‌ها شکل گرفتند. در این پروژه، تعداد کل کشورها ۱۰۰ تا در نظر گرفته شده که از این ۱۰۰ کشور، ۵ کشور به عنوان امپریالیست انتخاب شده و ۹۵ کشور باقیمانده که از اختلاف کل کشورها از تعداد امپریالیست‌ها به دست می‌آید به عنوان مستعمره مشخص شدند. هر امپریالیست ۱۹ مستعمره را

به تصرف خود درآورد و جذب امپراطوری خود کرد. برای سیاست جذب الگوریتم به صورت تصادفی حالت‌های ۲۴ و ۹۴ از مستعمره‌ها و امپراطوری‌ها را انتخاب کرد که مستعمره‌ها به سمت امپریالیست‌ها حرکت کردند و با توجه به تابع هزینه که مدلسازی شده است بعضی کشورها وضعیتشان بهتر شده و در جایگاه جدید ماندگار شدند و بعضی دیگر از کشورها وضعیتشان بدتر از وضعیت قبلی شد؛ اما برای کشورهایی که موقعیتشان بدتر از موقعیت قبلی شده، مدلسازی طوری انجام گرفته است که در جایگاه جدید ماندگار نباشد و به جایگاه قبلی خود برگردند و وضعیت قبلی خود را حفظ کنند. همچنین مساله محدودیت‌های زیادی دارد و برای لحاظ کردن همه محدودیت‌ها، نیاز به تابع جریمه ضروری است. تابع جریمه به‌گونه‌ای لحاظ شده است که کشوری که به صورت تصادفی تولید شده، برای تک‌تک محدودیت‌ها بررسی خواهد شد که آیا محدودیت‌ها را نقض می‌کند؟ اگر محدودیت‌ها را نقض کند، تابع، جریمه خواهد شد.

بعد از تکمیل مدلسازی و ایجاد کشورها و امپراطوری‌ها اجراهای مختلفی انجام گرفت که این اجرا ۵۰۰ بار تکرار شد که در ابتدا مقدار تابع با جواب بهینه فاصله زیادی داشت اما بعد از چندین تکرار جواب بهینه حاصل شد و تا پایان اجرای الگوریتم مقدار تابع، ثابت ماند. مطابق شکل ۲ مقدار تابع هزینه به ۲۳ میلیون تن/ کیلومتر بر دقیقه کاهش یافت و این مقدار تا پایان بهینه‌سازی ثابت ماند. جدول‌های ۱ و ۲ نرخ تخصیص و نرخ گسیل کامیون‌ها را برحسب کامیون بر دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۲- تغییرات تابع هزینه در الگوریتم رقابت استعماری (تن/ کیلومتر بر دقیقه)

۴-۲- حل مساله تخصیص و گسیل کامیون با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از دسته روش‌های فراکاوشی و یک الگوریتم تصادفی است که به‌صورت هدف‌دار به جستجو می‌پردازد. اساسا عملگرهای ژنتیکی جستجوی کور انجام می‌دهند ولی مکانیزم انتخاب راه‌حل‌ها برای جمعیت جدید به‌گونه‌ای است که جستجوی ژنتیکی را به سوی ناحیه مطلوبی از فضای جستجو هدایت می‌کند [۱۸]، [۱۹] و [۲۰].

برای اجرای الگوریتم، ابتدا مدلسازی کروموزوم انجام شد که کروموزوم به صورت آرایه یک‌بعدی تعریف شد که شامل ۱۱۰ ژن است که این ژن‌ها همان مسیرهای ممکن‌اند که کامیون‌ها می‌توانند در آن حرکت کنند. بعد از این‌که کروموزوم ایجاد و مدلسازی شد تعداد اندازه جمعیت اولیه مشخص شده که در این مقاله ۱۰۰ عضو در نظر گرفته‌شده است. بعد از ایجاد جمعیت اولیه، تبادل ژنی انجام گرفت که ۰٫۳ لحاظ شده و بعد از تبادل ژنی، عملگر جهش اعمال‌شده و بازه تغییرات بین صفر و یک تعیین‌شده است.

در این الگوریتم نیز، برای رسیدن به جواب بهینه، الگوریتم ۵۰۰ بار تکرار شد که ابتدا، مقدار تابع با جواب بهینه فاصله زیادی داشت اما بعد از تکرارهای مداوم جواب بهینه حاصل شد. بعد از پایان بهینه‌سازی، مقدار تابع هزینه به ۲۶ میلیون تن/کیلومتر بر دقیقه کاهش یافت. همچنین نرخ‌های تردد بهینه مطابق جداول ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برای مسیر رفت (تخصیص) و مسیر بازگشت (گسیل) حاصل شد.

جدول ۱۱- نرخ تخصیص کامیون در مسیر رفت از ایستگاه‌های بارگیری به نقاط تخلیه

مبدا	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)		نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	
		ICA	GA	ICA	GA
ایستگاه بارگیری ۱	سنگ‌شکن	۰/۰۶۸۱	-	۰/۰۵۳۵	۰/۰۵۶۳
ایستگاه بارگیری ۲	سنگ‌شکن	۰/۰۷۶۸	۰/۰۷۶۸	۰/۰۶۰۱	۰/۰۶
ایستگاه بارگیری ۳	سنگ‌شکن	۰/۰۷۵۷	۰/۰۷۵۶	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۶
ایستگاه بارگیری ۴	سنگ‌شکن	۰/۰۷۹۱	۰/۰۷۳۴	۰/۰۶۶	۰/۰۶۲
ایستگاه بارگیری ۵	انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	۰/۱۲	-	۰/۱	-
	انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	-	۰/۱۲	-	۰/۱
	انباشتگاه باطله ۲۲۷۵	۰/۱۲	۰/۰۶۵	-	-
ایستگاه بارگیری ۶	انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	۰/۰۹	-	-	-
	انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	-	-	-	۰/۱۲
	انباشتگاه باطله ۲۲۷۵	۰/۱۲۵	۰/۰۳۵	۰/۰۹۵	
ایستگاه بارگیری ۷	انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	۰/۰۵	۰/۰۴۵	-	۰/۰۹۵
	انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	-	-	۰/۱۲	-
	انباشتگاه باطله ۲۲۷۵	۰/۱	۰/۰۸۵	-	-
ایستگاه بارگیری ۸	انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	۰/۰۲	-	-	۰/۰۲۶
	انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	-	-	۰/۰۳	۰/۰۹
	انباشتگاه باطله ۲۲۷۵	۰/۱۲۲	۰/۱۲	۰/۰۹	-
ایستگاه بارگیری ۹	انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	۰/۱۴	۰/۰۲۵	۰/۱۲۹	-
	انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	۰/۱۱۳	۰/۴	-	۰/۱۲
	انباشتگاه باطله ۲۲۷۵	۰/۰۸	-	۰/۱۲۹	۰/۱۵

جدول ۱۲- نرخ گسیل کامیون در مسیر برگشت از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری

مبدا	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)		نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	
		ICA	GA	ICA	GA
سنگ‌شکن	ایستگاه بارگیری ۱	۰/۰۶۸۱	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۲	-	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۰۱	۰/۰۳
	ایستگاه بارگیری ۳	۰/۰۷۵۷	-	۰/۰۵۹۳	-
	ایستگاه بارگیری ۴	-	-	۰/۰۶۶	۰/۰۱۶۶
	ایستگاه بارگیری ۵	-	۰/۰۹۲	-	-
	ایستگاه بارگیری ۶	۰/۱۱۵	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۷	۰/۰۳۹	-	۰/۱۰۳۵	۰/۰۶۵
	ایستگاه بارگیری ۸	-	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۹	-	۰/۱۱۵	-	۰/۱۲
انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	-	-	۰/۰۵۳۵	-
	ایستگاه بارگیری ۲	۰/۰۲۱۸	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۳	-	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۴	۰/۰۷۹۱	-	-	۰/۰۰۵

ادامه جدول ۱۲- نرخ گسیل کامیون در مسیر برگشت از نقاط تخلیه به ایستگاه‌های بارگیری

مبدا	مقصد	نرخ تردد کامیون‌های ۳۲ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)		نرخ تردد کامیون‌های ۱۰۰ تنی در مسیر (کامیون بر دقیقه)	
		ICA	GA	ICA	GA
انباشتگاه باطله ۱۹۵۰	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۱۲	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۶	-	-	۰/۰۹۵	-
	ایستگاه بارگیری ۷	۰/۱۱۱	-	۰/۰۱۶۵	-
	ایستگاه بارگیری ۸	۰/۰۹	-	۰/۰۶۴	۰/۱۱۶
	ایستگاه بارگیری ۹	-	۰/۰۷	-	-
انباشتگاه باطله ۲۲۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	-	-	-	۰/۰۵۳۶
	ایستگاه بارگیری ۲	-	۰/۰۵۸	۰/۰۵	۰/۰۳
	ایستگاه بارگیری ۳	-	۰/۰۷۵۶	-	۰/۰۵۶
	ایستگاه بارگیری ۴	-	۰/۰۳۸۹	-	۰/۰۴۰۴
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۰۶	۰/۰۶۰۵	۰/۱	۰/۱
	ایستگاه بارگیری ۶	-	۰/۰۳۵	-	۰/۱۲
	ایستگاه بارگیری ۷	-	۰/۱۳	-	-
	ایستگاه بارگیری ۸	-	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۹	۰/۰۵۳	۰/۱۲	-	۰/۰۳
انباشتگاه باطله ۲۷۵۰	ایستگاه بارگیری ۱	-	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۲	۰/۰۵۵	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۳	-	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۴	-	۰/۰۳۴۵	-	-
	ایستگاه بارگیری ۵	۰/۰۶	۰/۰۳۲۵	-	-
	ایستگاه بارگیری ۶	۰/۱	-	-	-
	ایستگاه بارگیری ۷	-	-	-	۰/۰۳
	ایستگاه بارگیری ۸	۰/۰۵۲	۰/۱۲	۰/۰۵۶	-
	ایستگاه بارگیری ۹	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۲۵۸	۰/۱۲

۵- صحت‌سنجی و مقایسه نتایج

در این بخش، برای صحت‌سنجی نتیجه به‌دست‌آمده از اجرای مدل با الگوریتم‌ها، نتایج با تولید واقعی معدن در شیفت مقایسه خواهد شد. از نکته‌های مهم برای مقایسه الگوریتم‌ها و به‌کارگیری مدل توسعه‌یافته لی، افزایش مقدار تولید است، یعنی مقدار تولیدی که به وسیله اجرای مدل حاصل‌شده، باید از مقدار تولید واقعی معدن بیشتر باشد. میزان تولید واقعی معدن مس سونگون در شیفت برای ماده معدنی حداقل ۸۰۰۰ و برای باطله ۲۴۵۰۰ تن است که در مجموع حدود ۳۲۵۰۰ هزار تن در هر شیفت استخراج می‌شود. این مقدار استخراج با استفاده از ۱۰ کامیون ۱۰۰ تنی و ۲۵ کامیون ۳۲ تنی انجام می‌گیرد.

نرخ‌های تردد جدول‌های بالا از نسبت مقدار تولید حاصل شده از حل مدل با الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک بر نوع ظرفیت کامیون در یک شیفت حاصل‌شده است. مقدار ماده معدنی استخراجی در ایستگاه ۱، ۲۱۹۳ تن در شیفت است که ۶۹۱ تن با کامیون ۳۲ تنی و ۱۵۰۲ تن با کامیون ۱۰۰ تنی به سنگ‌شکن انتقال داده می‌شود. بنابراین نرخ تردد ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی و باطله برای کامیون ۳۲ و ۱۰۰ تنی در یک شیفت ۶/۵ ساعت کاری از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$X_{ijp} = \frac{P}{p \times 60 \times 6.5} \qquad (۲)$$

که در آن:

P: مقدار تولید ایستگاه بارگیری مربوطه

p: ظرفیت نوع کامیون

با توجه به جدول ۷، ظرفیت حمل ماده معدنی کامیون ۳۲ تنی، ۲۶ تن و کامیون ۱۰۰ تنی، ۷۲ تن است، بنابراین نرخ تردد ایستگاه یک به صورت زیر به دست می‌آید.

$$X_{111} = \frac{691}{26 \times 60 \times 6.5} = 0.0681 \text{ Truck 32 ton/min}$$

$$X_{112} = \frac{1502}{72 \times 60 \times 6.5} = 0.0535 \text{ Truck 100 ton/min}$$

همچنین برای بررسی مقدار تولید حاصل از اجرای مدل با الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک با استفاده از نرخ‌های تردد جدول‌های ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود. در کنار محاسبه مقدار تولید معدن با استفاده از مدل، صحت‌سنجی مقدار تولید هر ایستگاه نیز بررسی خواهد شد. به عنوان مثال برای ایستگاه بارگیری چهار با توجه به جدول ۱۱ برای کامیون ۳۲ تنی، نرخ تردد ۰٫۰۷۹۱ کامیون بر دقیقه است یعنی زمان رفت از ایستگاه بارگیری ۴ تا سنگ‌شکن، ۴٫۷۴۶ است. کمترین و بیشترین ظرفیت تولید ایستگاه ۴ در شیفت ۶٫۵ ساعت کاری به ترتیب ۲۵۰۰ و ۶۵۰۰ تن در شیفت است که این مقدار باید با کامیون‌ها به سنگ‌شکن انتقال داده شود. برای صحت‌سنجی این پروسه که آیا کامیون‌ها جوابگوی حمل مقدار ماده تولید شده از هر ایستگاه در شیفت است از رابطه ۳ استفاده می‌شود:

$$ProductionStation_i = \sum N_{Truck(p)} \times Capacity_{Truck(p)} \quad (۳)$$

که در آن:

$N_{Truck(p)}$: تعداد سرویس‌های رفت کامیون از ایستگاه بارگیری به نقاط تخلیه

$Capacity_{Truck(p)}$: ظرفیت حمل کامیون

p: نوع ظرفیت کامیون (۳۲ یا ۱۰۰ تنی)

بنابراین، برای تعیین تعداد سرویس‌های رفت کامیون از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$N_{Truck(p)} = 60 \times R_a \times h_{shift} \quad (۴)$$

که در آن:

R_a نرخ تردد کامیون

h_{shift} ساعت کاری شیفت

بنابراین تعداد سرویس کامیون ۳۲ تنی برابر است با:

$$W_{Truck(32)} = 60 \times 0.0791 \times 6.5 = 31 \text{ Truck}$$

همچنین تعداد سرویس کامیون ۱۰۰ تنی برابر است با:

$$W_{Truck(100)} = 60 \times 0.066 \times 6.5 = 26 \text{ Truck}$$

پس برای ایستگاه بارگیری ۴، کامیون ۳۲ تنی باید ۳۱ بار در طول شیفت از این ایستگاه، تردد و بارگیری کند تا بار حمل شده را در سنگ‌شکن تخلیه کند و کامیون ۱۰۰ تنی نیز باید ۲۶ بار از این ایستگاه بارگیری و به طرف سنگ‌شکن برای تخلیه بار حرکت کند.

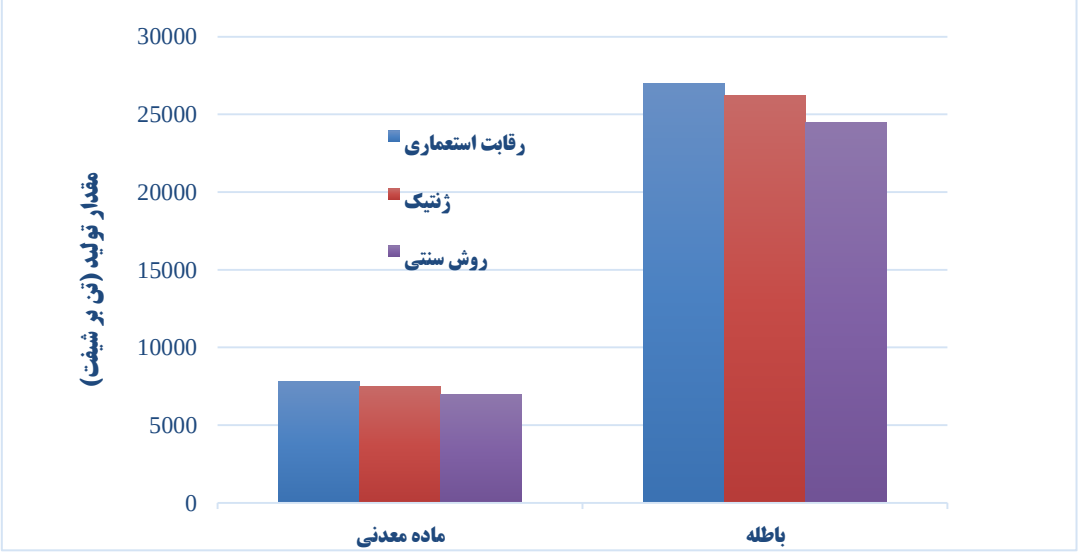
بنابراین، مقدار تولید حاصل شده از ایستگاه ۴ با توجه به رابطه ۳ برابر است با:

$$ProductionStation_1 = \sum (31 \times 26) + (26 \times 72) = 2680 \text{ ton}$$

پس صحت‌سنجی مقدار تولید حاصل شده از ایستگاه ۴ در محدوده مورد نظر است، بنابراین؛ با اجرای مدل، مقدار تولید حاصل‌شده در شیفت برای الگوریتم رقابت استعماری، حدود ۹۷۵۰ تن برای ماده معدنی و ۲۷۷۰۰ تن برای باطله به‌دست‌آمده است که در مجموع، ۳۷۴۵۰ تن مواد معدنی و باطله در شیفت از ایستگاه‌های بارگیری استخراج می‌شود و مقدار تولید حاصل شده ناشی از حل مدل با الگوریتم ژنتیک، از ۸۰۰۰ تن ماده معدنی در شیفت به ۸۸۰۰ تن در شیفت رسید، همچنین مقدار برداشت باطله نیز، از ۲۴۵۰۰ تن در شیفت به ۲۶۲۰۰ تن در شیفت افزایش یافته است که این نشان می‌دهد مقدار تولید حاصل‌شده از الگویتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک نسبت به تولید واقعی معدن به ترتیب ۱۵ و ۷ درصد افزایش‌یافته است. شکل ۳ مقدار تولیدهای به دست آمده از حل با دو روش متفاوت را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های توزیع بهینه تخصیص و گسیل کامیون- شاول موجب افزایش توان تولید ناوگان ماشین‌آلات معدنی خواهد شد. با استفاده از مدل‌های تخصیص و گسیل می‌توان با ناوگان کوچک‌تری از ماشین‌آلات نسبت به روش‌های سنتی به تولید بیشتری رسید که با استفاده از الگوریتم‌ها می‌توان توابع و مدل‌هایی را که به روش ریاضی و سنتی قابل‌حل نیستند یا پیچیده‌اند حل کرد. تابع توسعه‌یافته مدل لی، بیشترین تطابق را با شرایط حاکم معدن مس سونگون داشت، بنابراین این مدل، به عنوان مدل مورد استفاده برای بهینه‌سازی تخصیص و گسیل سیستم ترابری معدن مس سونگون انتخاب شد.



شکل ۳- مقایسه مقدار تولید ماده معدنی و باطله حاصل‌شده از حل مدل با الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک نسبت به روش سنتی (تولید واقعی معدن)

الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک باعث افزایش سرعت اجرا شدن برنامه و صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و نگهداری می‌شوند؛ بنابراین ابتدا برای اجرا، ورودی‌های مساله تعیین شدند که این ورودی‌ها در الگوریتم رقابت استعماری، کشور و برای الگوریتم ژنتیک، کروموزوم نامیده می‌شود که ورودی‌ها مسیرهای ممکن‌اند که کامیون‌ها در این مسیرها که بین ایستگاه‌های بارگیری و نقاط تخلیه، نقاط تخلیه و ایستگاه‌های بارگیری است، حرکت می‌کنند. مقدار تولید حاصل‌شده از این الگوریتم‌ها با تولید واقعی معدن ارزیابی شدند که باعث بهبود مساله و کاهش هزینه و افزایش مقدار تولید ماده معدنی و باطله در شیفت شده که این افزایش تولید با الگوریتم رقابت استعماری از ۳۲۵۰۰ به ۳۷۴۵۰ تن رسیده که برابر ۱۵ درصد افزایش تولید است. همچنین تولید حاصل از الگوریتم ژنتیک ۳۵۰۰۰ تن بوده است که نسبت به تولید واقعی معدن، ۸ درصد افزایش یافته است؛ بنابراین تولید ماده معدنی و باطله در الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک بیشتر بوده و این نشان می‌دهد که حل مدل با الگوریتم رقابت استعماری عملکرد بهتری داشته و میزان تولید حاصل‌شده نیز بیشتر بوده است.

۷- علایم

s_1	تعداد ایستگاه‌های بارگیری ماده معدنی
s_2	تعداد ایستگاه‌های بارگیری باطله
m_1	تعداد سنگ‌شکن‌ها
m_2	تعداد انباشتگاه‌های باطله
h	تعداد نوع ظرفیت کامیون
Z_{1p}	وزن خالی کامیون از نوع p
Z_{2p}	میزان ماده معدنی که کامیون نوع p می‌تواند حمل کند (ton)
Z_{3p}	میزان باطله که کامیون نوع p می‌تواند حمل کند (ton)
R_{jip}	نرخ کامیون از نوع p از نقطه تخلیه j به ایستگاه بارگیری i
X_{ijp}	نرخ کامیون از نوع p از نقطه ایستگاه بارگیری i به تخلیه j
$D_{ij}^{(k)}$	فاکتور طول قسمت kام مسیر از ایستگاه بارگیری i به نقطه تخلیه j
$D_{ji}^{(k)}$	فاکتور طول قسمت kام مسیر از ایستگاه بارگیری j به نقطه تخلیه i

منابع

1. Temeng, V. A. 1997. A computerized model truck dispatching in open pit mines. Ph.D Thesis. Michigan technological University.
2. Lizotte, Y. and Bonates, E. 1987. Truck and Shovel Dispatching Rules Assessment Using Simulation. Mining Science and Technology, Vol. 5, pp.45-58.
3. White, J. W. and Olson, J. P. 1986. Computer based dispatching in mines whit concurrent operating objective. Mining Engineering. pp. (1045-1054).
۴. سیداسماعیلی، سیدحسن، عطایی‌پور، مجید. ۱۳۹۹. "بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون- شاول در معدن روباز به کمک الگوریتم رقابت استعمار"، دومین کنفرانس

ملی مدلسازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، قزوین.

5. Li, Z. 1990. A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. Mining Science and Technology. Vol. 10. pp.337-340.

۶. امیدباد، مسلم. ۱۳۹۰. " بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون- شاول در معادن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۷. آتش‌پز گرگری، اسماعیل. ۱۳۸۷. "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران.

8. Kaveh, A.2010. "Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm", Computers & Structures, pp. 1220-1229.

9. Niknam, T. 2011. "An efficient hybrid algorithm based on modified imperialist competitive algorithm and K-means for data clustering", Engineering Applications of Artificial Intelligence, pp. 306-317.

10. Lucas, C. N.-G. Z. a. T. F. 2010."Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor", Energy Conversion and Management, pp. 1407-1411.

11. Rajabioun, R. A.-G. E. a. L. C. 2008. "Colonial Competitive Algorithm as a Tool for Nash Equilibrium Point Achievement", Lecture Notes in Computer Science, pp. 680-695.

12. Mikaeil, R. e. a. 2018. "Performance prediction of circular saw machine using imperialist competitive algorithm and fuzzy clustering technique", Neural Computing and Applications, pp. 283-292.

13. Hasanipanah, M. e. a. 2018. "International Journal of Environmental Science and Technology", Prediction of an environmental issue of mine blasting: an imperialistic competitive algorithm-based fuzzy system, pp. 551-560.

14. Behzadafshar, K. e. a. 2018. "Predicting the ground vibration induced by mine blasting using imperialist competitive algorithm", Engineering Computations, pp. 1774-1787.

۱۵. رفیعی، رامین. ۱۳۹۵. تعیین عیار حد بهینه معادن روباز با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن.

۱۶. محمدی، سجاد. ۱۳۹۲. مدلسازی و بهینه‌سازی عیارهای حد در معدن شماره ۱ گل گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۱۷. جوادزاده، سعید. ۱۳۹۷. تعیین محدوده نهایی معادن روباز با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

18. Mitchell, M. 1995. An Introduction to Genetic Algorithms, London, England.

19. Michalewicz, Z. 1995. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs Springer.

20. Sivanandam, S.N., Deepa, S.N. 2008.Introduction to Genetic Algorithms. Springr.