

حل مسئله تعیین اندازه واگن‌های باری در حالت پویا و چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲

زهرا مفاخری^۱، علی حسین‌زاده کاشان^{۲*} مجید شیخ‌محمدی^۲

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۹۳/۴/۳۰ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۴/۱/۲۹ - تاریخ تصویب ۹۴/۴/۴)

چکیده

هدف این پژوهش ارائه روشی اثربخش برای حل مسئله تعیین اندازه واگن‌های باری در شبکه راه‌آهن است. مدل ریاضی مسئله به صورت چندپریودی، پویا و چندهدفه است که در آن ناهمگونی در واگن‌های باری مد نظر قرار گرفته است. همچنین، تقاضای انواع مختلف واگن باری و زمان سیر به صورت قطعی است. تخصیص واگن‌های خالی برای افزایش بهره‌برداری از واگن‌های موجود در شبکه به منظور کاهش حجم زیادی از هزینه‌های تملک ناوگان و نگهداری مورد توجه بوده است. از ویژگی‌های مسئله اعمال محدودیت‌های ظرفیت خط و ظرفیت وسیله نقلیه و محدودیت در تشکیل قطارهای باری است. همچنین، مدل متغیرهایی نظیر نوع و تعداد واگن‌های مستقر در هر ایستگاه، نوع و میزان تقاضاهای بی‌پاسخ و نوع و تعداد واگن‌های پر و خالی در حال سیر را تعیین می‌کند. برای اولین بار در این پژوهش برای حل مسائل تعیین ناوگان ریلی در حالت چندهدفه، از روش‌هایی مبتنی بر الگوریتم‌های حل مسائل چندهدفه استفاده و مجموعه جواب‌های بهینه پارتو محاسبه می‌شود. در نتیجه، دو روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲ و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه طراحی و اجرا شدند. همچنین، اطلاعات مسائل مورد بررسی مطابق با اطلاعات سیستم حمل‌ونقل ریلی باری جمهوری اسلامی ایران است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه، الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲، بهینه‌سازی اندازه ناوگان، چندهدفه.

مقدمه

به کاهش کیفیت سرویس‌دهی به تقاضای مشتریان و در نتیجه کاهش تقاضا منجر می‌شود، در حالی که خرید یا اجاره ناوگان بزرگ به هزینه‌های بسیار زیاد تملک، عملیات و نگهداری منجر می‌شود. مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند. گروه اول به دنبال تخصیص بهینه ناوگان موجود به منظور رسیدن به اهداف مختلف تمرکز دارد و گروه دوم، تعیین تعداد بهینه ناوگان برای دستیابی به اهداف مورد نظر را بررسی می‌کند. مدل ریاضی مورد مطالعه که به تازگی در پژوهش مفاخری [۱] ارائه شده است، نسبت به مدل‌های مطرح دیگر در زمینه ناوگان باری ریلی، مطابقت بیشتری با شرایط دنیای واقعی دارد. از این رو، هدف پژوهش پیش رو ارائه روشی کارا برای حل آن است. مسئله مورد بررسی جزء مسائل پیچیده است

با توجه به اهمیت و نقش مهم شبکه حمل‌ونقل ریلی در جابه‌جایی کالا و مسافر و همچنین داشتن خصوصیتی از جمله قابلیت حجم سرمایه‌گذاری بالا در تجهیزات و نیروی انسانی، مطالعات و تحقیقات گوناگونی در زمینه مدیریت بهره‌وری آن انجام گرفته است. ظرفیت و کارایی یک سیستم حمل‌ونقل به طور مستقیم با تعداد ناوگان موجود در آن ارتباط دارد. در سیستم حمل‌ونقل ریلی به منظور دستیابی به ظرفیت مورد نیاز برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان همواره در ناوگان ریلی سرمایه‌گذاری می‌شود و به دلیل ارزش بالای آن، ناوگان ریلی یکی از منابع و سرمایه‌های بزرگ در صنعت راه‌آهن به شمار می‌رود که بهینه‌سازی در بهره‌برداری آن توجه صنعت و جوامع دانشگاهی را به خود جلب کرده است. خریداری ناوگان کم

که برای حل آن روشی دو مرحله‌ای را با استفاده از رویکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه دادند [۶]. یقینی و خندق‌آبادی در سال ۲۰۱۳ یک روش حل ابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید است، برای مسئله تعیین اندازه واگن‌های باری ارائه کردند. مدل مورد مطالعه چندپریودی و پویا است که در آن زمان سفر و تقاضا قطعی و ناوگان همگون در نظر گرفته شده است [۷]. در سال ۱۳۹۳ مسیحی و مفاخری مدل مورد بررسی یقینی و خندق‌آبادی در پژوهش قبل را در حالت چندهدفه بررسی کردند. آن‌ها در پژوهش خود مسئله را با استفاده از روش وزنی به تک‌هدفه تبدیل و آن را بررسی کردند و سه روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی و ترکیب این دو روش را طراحی و مقایسه کردند [۸].

بر اساس مطالعات، مشاهده می‌شود مسئله تعیین ناوگان در زمینه ریلی فقط در پژوهش مسیحی و مفاخری [۸] به صورت چندهدفه مطرح شده است که در حین حل، مسئله با استفاده از روش وزنی به تک‌هدفه تبدیل شده و بررسی شده است. همچنین، مطالعات نشان داد الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی در این گونه مسائل عملکرد خوبی دارند؛ بنابراین، در این پژوهش از نسخه‌های حل مسائل چندهدفه این دو روش یعنی MOSA و NSGA-II استفاده شده است. شایان ذکر است برای نخستین بار در این پژوهش، الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای یافتن جواب‌های مجموعه پارتو به کار گرفته شده است. فقط تحقیق پیشین از روش وزن‌دهی به اهداف (البته برای مسئله حمل‌ونقل شرایط محدودتر) بهره برده است. همچنین، مدل مورد بررسی با اعمال سه محدودیت ظرفیت خط و ظرفیت وسیله نقلیه و محدودیت در تشکیل قطارهای باری نسبت به مدل‌های پیشین تطبیق بیشتری با شرایط واقعی صنعت ریلی کشور دارد. نخستین بار مسئله حمل‌ونقل در صنعت ریلی به صورت چندهدفه و با استفاده از داده‌های دنیای واقعی حل شده است.

در ادامه، توضیحاتی درباره مسئله تعیین اندازه بهینه ناوگان، فرضیات اساسی و مدل ریاضی مسئله و روش‌های طراحی شده ارائه می‌شود. پس از تشریح نحوه تنظیم پارامترها، پارامترهای ورودی یک مثال عددی در ابعاد

و در ابعاد واقعی روش‌های دقیق قادر به حل آن نیستند؛ بنابراین، به منظور حل مدل چندهدفه و پویای ارائه شده و یافتن جواب‌های پارتو^۱، به الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیاز است.

در این پژوهش، برای مسئله مورد بررسی دو روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب^۲ و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه^۳ طراحی می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد، مقایسه‌ای بین دو روش پیشنهادی صورت می‌گیرد. بدین منظور، مسئله سیستم حمل‌ونقل ریلی باری جمهوری اسلامی ایران در پنج سایز مختلف حل و بررسی می‌شود.

منظور از ناوگان^۴ واگن، لکوموتیو، کامیون، اتومبیل، کانتینر و وسایل حمل مواد و قطعات است. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی درباره مسئله تعیین اندازه ناوگان انجام گرفته است. در زمینه حمل‌ونقل ریلی نیز مطالعات گوناگونی صورت گرفته است.

بوژان و ترنکوئیست در سال ۱۹۹۱، یک مدل احتمالی و چند پریودی جهت تعیین اندازه ناوگان، با هدف بیشینه‌کردن درآمد مورد انتظار برای حمل بار و کاهش هزینه‌های حرکت واگن‌های پر و خالی مطرح کردند. تقاضا و زمان سیر بر اساس تابع توزیع احتمال تعریف و مسئله با استفاده از مدل جریان شبکه حل شد [۲]. بچویچ در سال ۲۰۰۲ مسئله تعیین تعداد بهینه واگن‌ها را با هدف کمینه‌کردن هزینه کل به منظور تأمین تقاضای مشتریان مطالعه کرد [۳]. در سال ۲۰۰۳ کخل و همکاران مسئله اندازه واگن‌های باری و سیاست تغییر موقعیت وسایل نقلیه را از طریق بیشینه‌کردن میانگین سود و با استفاده از روش ترکیب شبیه‌سازی با رویکرد الگوریتم ژنتیک حل کردند. در سال ۲۰۰۳ لیست و همکاران از طریق مدل‌های بهینه‌سازی غیرقطعی، رویکردی جدید برای حل مسئله تعیین اندازه ناوگان ارائه کردند [۴]. در سال ۲۰۰۹، سیارشاد و قصیری برای تعیین تعداد واگن‌های باری و سیاست توزیع واگن‌های خالی به منظور پاسخگویی به تقاضای مشتریان مدلی ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید آن را حل کردند. در این مدل فرض شده است تقاضا و زمان سیر قطعی هستند [۵]. سیارشاد و توکلی مقدم در سال ۲۰۱۰ مدلی احتمالی را مطرح کردند

مسئله به صورت دینامیک در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی تقاضای مشتریان در هر دوره زمانی متفاوت است و الگوی از پیش تعیین شده‌ای برای آن وجود ندارد. تقاضای مشتریان بر حسب تعداد واگن تعریف می‌شود. واگن‌های باری موجود در سیستم حمل‌ونقل ناهمگون فرض شده‌اند. میزان تقاضا و زمان سیر بین هر زوج مبدأ- مقصد قطعی در نظر گرفته شده است. دوره برنامه‌ریزی به دوره‌های زمانی گسسته تقسیم می‌شود که هر دوره زمانی برابر با یک روز است. تعداد انواع مختلف ناوگان موجود در سیستم تا پایان دوره برنامه‌ریزی ثابت است و امکان اجاره و خرید وجود ندارد. هر ایستگاه در شبکه حمل‌ونقل ممکن است مبدأ برخی تقاضاها و مقصد تقاضاهای دیگری باشد. تقاضای مشتریان زودتر از موعد مقرر به مقصد نمی‌رسد و در صورتی که تقاضای مشتری دیرتر از زمان تعیین شده به مقصد برسد، به‌ازای هر روز دیرکرد واگن یک تأخیر ثبت می‌شود و تقاضاهای بی‌پاسخ هر روز در سیستم از بین نمی‌روند، بلکه به تقاضاهای روز بعد منتقل می‌شوند. ظرفیت وسایل نقلیه باری (قطار) در شبکه ریلی، مشخص و محدود است. انواع مختلف واگن باری با رعایت شرایط ایمنی در یک قطار قرار می‌گیرد. ظرفیت خطوط ریلی به منظور ارسال قطارهای باری در هر دوره زمانی محدود است.

مدل ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی مورد مطالعه برای مسئله مورد نظر ارائه می‌شود. دوره برنامه‌ریزی T به دوره‌های زمانی گسسته تقسیم می‌شود و هر دوره زمانی t برابر با یک روز در نظر گرفته می‌شود ($T, \dots, 1, 0 = t$). اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مدل عبارت‌اند از:

کوچک و نتایج حاصل از حل آن نمایش داده می‌شود. سپس به منظور ارزیابی عملکرد، مقایسه‌ای بین این دو روش صورت می‌گیرد. بر این اساس، مسئله حمل‌ونقل باری راه‌آهن ایران با داده‌هایی که از راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران جمع‌آوری شده است در پنج سایز مختلف حل و نتایج به بحث گذاشته می‌شود. در بخش نهایی پس از نتیجه‌گیری، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

بیان مسئله: تعیین اندازه ناوگان

مسئله تعیین اندازه ناوگان عبارت است از تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه یک سیستم حمل‌ونقل و همچنین تعیین جریان جابه‌جایی وسایل نقلیه به صورت پر و خالی، به منظور خدمت به مشتریان به طوری که اهداف سیستم بهینه شوند. وسایل نقلیه مورد استفاده می‌توانند همگون یا غیرهمگون باشند که در صورت غیرهمگون بودن، به سازگاری بین محموله و وسیله نقلیه نیاز است. زمان سیر بین دو ایستگاه در شبکه در حالت رفت و برگشت به مسیر شبکه بستگی دارد که معمولاً در شبکه ریلی به علت یکسان بودن مسیر زمان رفت و برگشت یکسان است. در مدل استاتیک مسئله تعیین اندازه ناوگان، تمام اجزای تصمیم‌گیری در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مشخص هستند و بعد از برنامه‌ریزی تا پایان اجرای آن بدون تغییر می‌مانند. در مدل دینامیک مسئله تعیین اندازه ناوگان، اجزای مسئله در طول دوره برنامه‌ریزی متناسب با زمان تغییر می‌کنند.

فرضیات مسئله

فرضیات اساسی در نظر گرفته شده در مدل ریاضی مورد مطالعه به شرح زیر است:

اندیس‌ها و پارامترها	مجموعه ایستگاه‌های شبکه
N	تعداد حالت‌های مختلف ظرفیت وسیله نقلیه (قطار)
NT	اندیس نوع واگن
k	درآمد حاصل از جابه‌جایی یک واگن نوع k حامل بار از مبدأ i به مقصد j
R_{ijk}	هزینه جابه‌جایی یک واگن نوع k حامل بار از مبدأ i به مقصد j
LC_{ijk}	هزینه جابه‌جایی یک واگن خالی نوع k از مبدأ i به مقصد j
EC_{ijk}	هزینه تملک یک واگن نوع k
Q_k	

	<p>HC_{ik} هزینه نگهداری یک واگن نوع k در ایستگاه i</p> <p>$d_{ijk}(t)$ میزان تقاضای مرتبط با واگن نوع k که باید در دوره t از مبدأ i به مقصد j برسد (برحسب واگن)</p> <p>CD_n ظرفیت وسیله نقلیه (قطار) که n حالت می‌توان برای آن تعریف کرد ($n \in NT$)</p> <p>$CSD_{ij}(t)$ حداکثر تعداد قطاری که در دوره زمانی t می‌توان بین مبدأ i و مقصد j ارسال کرد</p> <p>$MCSD$ حداقل مجموع واگن‌های پر و خالی که به حد نصاب برای تشکیل قطار نمی‌رسند و با اضافه کردن تعدادی واگن خالی به آن‌ها و تشکیل قطار، نسبت به حالتی که ارسال نشوند هزینه کمتری دارند</p> <p>$\alpha_{ijk}(\tau, t) = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره } \tau \text{ مجموعه‌ای از واگن‌های پر از مبدأ } i \text{ ارسال شود و در دوره } \tau \leq t \text{ به مقصد } j \text{ برسد،} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$</p> <p>$\beta_{ijk}(\tau, t) = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره } \tau \text{ مجموعه‌ای از واگن‌های خالی از مبدأ } i \text{ ارسال شود و در دوره } \tau \leq t \text{ به مقصد } j \text{ برسد،} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$</p>
متغیرها	<p>$x_{ijk}(t)$ تعداد واگن‌های حامل بار نوع k که در دوره t از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می‌شود</p> <p>$y_{ijk}(t)$ تعداد واگن‌های خالی نوع k که در دوره t از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می‌شود</p> <p>$V_{ik}(t)$ تعداد واگن‌های موجود از نوع k در ایستگاه $i \in N$ در پایان دوره زمانی t</p> <p>$W_{ik}(t)$ تعداد واگن‌های مستقر از نوع k در ایستگاه $i \in N$ در طول دوره زمانی t</p> <p>$U_{ijk}(t)$ تقاضاهای بی‌پاسخ مرتبط با واگن نوع k که باید از مبدأ i ارسال می‌شدند و در دوره t به مقصد j می‌رسیدند</p> <p>$N_{nij}(t)$ تعداد قطارهای ارسالی نوع $n \in NT$ در دوره t بین مبدأ i و j</p> <p>$M_{ij}(t)$ تعداد واگن‌های آماده ارسال در دوره t بین مبدأ i و j</p>

مدل ریاضی مورد بررسی بدین شرح است:

$$\max \varphi = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t R_{ijk} \times x_{ijk}(t) - \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t \{LC_{ijk} \times x_{ijk}(t) + EC_{ijk} \times y_{ijk}(t)\} \quad (1)$$

$$- \sum_i \sum_k Q_k \times V_{ik}(0) - \sum_i \sum_k \sum_t \{HC_{ik} \times W_{ik}(t)\}$$

$$\min \vartheta = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t U_{ijk}(t) \quad (2)$$

$$U_{ijk}(t) = U_{ijk}(t-1) + d_{ijk}(t) - \sum_{\tau \leq t} x_{ijk}(\tau) \times \alpha_{ijk}(\tau, t) \quad \forall i, j, t, k \quad (3)$$

$$V_{ik}(t) = V_{ik}(t-1) + \sum_j \sum_{\tau < t} \{x_{jik}(\tau) \times \alpha_{jik}(\tau, t) + y_{jik}(\tau) \times \beta_{jik}(\tau, t)\} \quad (4)$$

$$- \sum_j \{x_{ijk}(t) + y_{ijk}(t)\} \quad \forall i, t, k$$

$$W_{ik}(t) = V_{ik}(t-1) - \sum_j \{x_{ijk}(t) + y_{jik}(t)\} \quad \forall i, t, k \quad (5)$$

$$\sum_j \{x_{ijk}(t) + y_{ijk}(t)\} \leq V_{ik}(t-1) \quad \forall i, t, k \quad (6)$$

$$x_{ijk}(t) + y_{ijk}(t) = \sum_n N_{nij}(t) \times CD_n \quad \forall i, j, t, k, n \quad (7)$$

$$\sum_i V_{ik}(0) = \sum_j V_{ik}(T) \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_n N_{nij}(t) \leq CSD_{ij}(t) \quad \forall i, j, t, n \quad (9)$$

$$\text{if } M_{ij}(t) \geq MCSD, \sum_n N_{nij}(t) < CSD_{ij}(t) \Rightarrow y_{ijk}(t) = y_{ijk}(t) + \min(CD_n) - M_{ij}(t) \quad (10)$$

$$\forall i, t, k$$

$$N_{nij}(t), x_{ijk}(t), y_{ijk}(t), U_{ijk}(t), V_{ik}(t), W_{ik}(t) \geq 0, \text{ integer} \quad \forall i, j, t, k \quad (11)$$

استفاده از قوانین انتخاب طبیعی برای توسعه سیستم‌های مصنوعی نسبت به سیستم‌هایی که در آن‌ها از استدلال استفاده می‌شود، علاقه‌مند بود. الگوریتم ژنتیک روشی است که با تقلید از بقای نسل در طبیعت جاندار کار می‌کند و روشی برای جست‌وجوی تصادفی در نظر گرفته می‌شود، زیرا از نمونه‌برداری تصادفی در فضای جواب استفاده می‌کند. سپس دب و سرینیواس در سال ۱۹۹۴، این الگوریتم را با عنوان الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب، برای حل مسائل چندهدفه توسعه دادند. در نهایت در سال ۲۰۰۲، دب [۹] نسخه جدید آن را با عنوان الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲ ارائه کرد که روشی بسیار کارا و سریع است. الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲ جمعیتی از کروموزوم‌ها را برای شروع انتخاب می‌کند که هر کدام جوابی از فضای مسئله هستند و از طریق عملگر انتخاب والد تعدادی از کروموزوم‌ها را انتخاب و پس از اجرای عملگرهای ترکیب و جهش روی والدین فرزندان جدیدی تولید می‌کند. در نهایت، براساس دو معیار رتبه نامغلوبی و فاصله ازدحام، جمعیت فعلی برای تکرار بعدی از بین فرزندان و والدین انتخاب می‌شود و الگوریتم تا رسیدن به شرط خاتمه تکرار می‌شود. در ادامه، اجزای الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲ تشریح می‌شود که برای حل مسئله مورد بررسی پیشنهاد شده است.

نمایش کروموزوم^۵

هر کروموزوم در الگوریتم طراحی شده به صورت ماتریسی با ابعاد $K \times N$ نمایش داده می‌شود که در آن N بیانگر تعداد ایستگاه‌ها و K بیانگر انواع واگن‌های باری است. محتوای هر ژن برابر است با پارامتر $Vki(0)$ که نشان‌دهنده تعداد واگن‌های موجود یا موجودی واگن خالی از نوع $k \in K$ در ایستگاه $i \in N$ در ابتدای دوره برنامه‌ریزی است. با توجه به اینکه تعداد واگن‌ها از هر نوع تا پایان دوره برنامه‌ریزی تغییر نمی‌کنند، مجموع موجودی واگن خالی از هر نوع در

تابع هدف ۱ عبارت است از بیشینه‌کردن سود که برابر است با اختلاف بین درآمد حاصل از جابه‌جایی واگن‌های باردار و هزینه‌های عملیاتی، تملک واگن‌ها، نگهداری واگن‌های خالی در ایستگاه‌ها. تابع هدف ۲ عبارت است از کمینه‌کردن تعداد تأخیرها در پاسخگویی به تقاضای مشتریان. محدودیت ۳ میزان تقاضای بی‌پاسخ در هر دوره زمانی (روز) بین هر زوج مبدأ-مقصد را نشان می‌دهد. محدودیت ۴ نشان‌دهنده واگن خالی موجود در پایان هر دوره زمانی در هر ایستگاه است. محدودیت ۵ بیانگر تعداد واگن‌های خالی‌ای است که در هر دوره زمانی در هر ایستگاه نگهداری می‌شود. محدودیت ۶ تضمین می‌کند مجموع تعداد واگن‌های پر و خالی که در هر دوره زمانی از یک ایستگاه ارسال می‌شود، بیش از موجودی واگن‌های خالی در انتهای دوره زمانی قبل در همان ایستگاه نباشد. محدودیت ۷ بیانگر ظرفیت قطار است و تضمین می‌کند در هر دوره زمانی بین هر دو ایستگاه مجموع واگن‌های پر و خالی‌ای که باید ارسال شود، قطارهایی شامل تعداد مشخصی واگن برای مثال ۲۰ تا ۲۵ باشد. محدودیت ۸ تضمین می‌کند تعداد واگن‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی ثابت باشد. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی تعداد قطارهای ارسالی بین هر زوج مبدأ-مقصد بیش از ظرفیت خط نشود. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند اگر تعداد واگن‌های آماده ارسال به حد نصاب برای تشکیل قطار نرسند و تعدادشان برابر یا بیشتر از $MCSD$ باشد و همچنین ظرفیت برای ارسال قطار جدید باقی مانده باشد، تعدادی واگن خالی به آن اضافه می‌شود تا مجموع برابر $Min(CDn)$ شود. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری غیرمنفی و عدد صحیح باشد.

الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲

در سال ۱۹۷۰، هلند برای نخستین بار ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در دانشگاه میشیگان مطرح کرد. وی به

ابتدای دوره برنامه‌ریزی، کل تعداد ناوگان را مشخص می‌کند. شکل ۱ نمونه کروموزوم پیشنهادی را با چهار

ایستگاه و سه نوع واگن نشان می‌دهد.

$V_{11}(0)$	$V_{12}(0)$	$V_{13}(0)$	$V_{14}(0)$		۷۶۱	۲۲۸	۶۳۷	۱۶۷
$V_{21}(0)$	$V_{22}(0)$	$V_{23}(0)$	$V_{24}(0)$		۳۴۰	۱۱۴	۸۵	۱۰۷

شکل ۱. نمایش یک جواب پیشنهادی با چهار ایستگاه و دو نوع واگن

جمعیت اولیه

در این پژوهش، از رویه‌ای تصادفی به منظور تولید جمعیت اولیه استفاده می‌شود. در تولید هر کروموزوم به ایستگاه‌هایی که مبدأ جریان واگن پر نیستند مقدار صفر تعلق می‌گیرد و برای دیگر ایستگاه‌ها که مبدأ تقاضاها هستند، کران بالا و پایین در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، زمان حل به مقدار شایان توجهی کاهش می‌یابد. کران پایین حداقل تعداد واگنی است که می‌توان برای ایستگاه در نظر گرفت؛ یعنی صفر. همچنین، برای کران بالا مقداری در نظر گرفته می‌شود که به تمام تقاضاها پاسخ دهد. در این پژوهش، با توجه به جدول تقاضا، کران بالا برای هر ژن برابر با ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ است. پس از تعیین مقدار هر ژن، تخصیص واگن‌ها صورت می‌گیرد تا متغیرهای دیگر از جمله جریان واگن پر و خالی و تقاضاهای به تأخیر افتاده مشخص و سپس مقادیر توابع هدف محاسبه شود.

مقصدها در دوره‌های زمانی مختلف مشخص می‌شود. نحوه تخصیص به این صورت است که هر نوع واگن ابتدا از دوره زمانی اول شروع می‌شود و برای تمام ایستگاه‌ها، موجودی واگن خالی در آن ایستگاه با مجموع تقاضاهایی که باید از آن ایستگاه اعزام شوند، مقایسه می‌شود. در این روش دو حالت پیش می‌آید:

حالت اول: اگر موجودی واگن خالی بیش از مجموع تقاضا باشد، به همه تقاضاها پاسخ داده می‌شود و اگر واگن خالی باقی ماند آن‌ها نیز برحسب اولویت، بر اساس میزان کمبود واگن در ایستگاه مقصد، تخصیص می‌یابند. پس از تأمین تمام کمبودها، اگر باز هم واگن خالی باقی ماند، ایستگاه‌های مقصد دارای مازاد واگن براساس هزینه ارسال واگن خالی مرتب می‌شوند. البته برای ایستگاه مقصدی که همان ایستگاه مبدأ در دوره زمانی قبل است، هزینه نگهداری واگن خالی در نظر گرفته می‌شود. سپس هزینه‌ها نرمال می‌شوند و واگن‌های خالی به صورت نسبی به آن‌ها تخصیص می‌یابند. پس از مشخص شدن جریان‌های خروجی واگن پر و خالی از هر نوع واگن، بررسی می‌شود که مجموع این جریان‌ها قطارهایی با ۲۰ تا ۲۵ واگن تشکیل دهند و تعداد این قطارها بیش از ظرفیت خط (برای مثال ۵) نشود. براین اساس، اگر تقاضاها زیاد باشند (یعنی محدودیت ظرفیت خط نقص شود) مقدار اضافی واگن‌ها ارسال نمی‌شود که در صورت ارسال نکردن، اولویت با جریان واگن خالی است. اگر تعداد قطارهای تشکیل شده کمتر از ظرفیت خط باشد و تعدادی واگن پر به علت نرسیدن به حد نصاب به منظور تشکیل قطار (یعنی ۲۰) باقی مانده باشند، طبق شرایط راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران در تشکیل قطار عمل می‌شود؛ یعنی اگر تعداد واگن‌های پر باقیمانده بزرگ‌تر یا مساوی $MCSD$ باشد، تعدادی واگن خالی برای تشکیل قطاری با ۲۰ واگن به آن اضافه می‌شود.

شکل ۳ مراحل تخصیص واگن‌های باری در طول دوره برنامه‌ریزی به منظور یافتن مقادیر توابع هدف را نشان می‌دهد. در شروع الگوریتم یک جدول تقاضا بین زوج مبدأ- مقصدها وجود دارد که لازم است هر تقاضا در زمان تعیین شده به مقصد برسد. اگر تقاضا دیرتر از زمان تعیین شده به مقصد برسد، تأخیر در نظر گرفته می‌شود. در این روش، به منظور تخصیص برای هر نوع واگن سه جدول وجود دارد. جدول ۱ مربوط به جابه‌جایی واگن‌های پر، جدول ۲ مربوط به جابه‌جایی واگن‌های خالی و جدول ۳ مربوط به تقاضاهایی است که با تأخیر مواجه شده‌اند. هر نوع جدول به تعداد دوره‌های زمانی، تکرار می‌شود. ابعاد جدول برابر با تعداد ایستگاه‌هاست. با استفاده از این سه جدول نحوه جابه‌جایی هر نوع واگن بین زوج مبدأ-

ژن از والد دوم به فرزند اول و همان ژن از والد اول به فرزند دوم منتقل می‌شود.

عملگر جهش^۷

اپراتور جهش با مقدار احتمالی ثابت و کوچک P_m ، روی دو کروموزوم حاصل از مرحله ترکیب اعمال می‌شود. در این روش برای هر ژن از هر کروموزوم، یک عدد تصادفی تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی کوچک‌تر یا برابر با P_m بود، مقدار ژن تغییر می‌کند، در غیر این صورت مقدار ژن ثابت باقی می‌ماند. برای محاسبه احتمال جهش از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود:

$$P_m = \frac{1}{\alpha \times (\text{number of genes})}, \quad 1/5 \leq \alpha \leq 2 \quad (12)$$

در این پژوهش از عملگر جهش خزش استفاده می‌شود. به این ترتیب، یک مقدار عدد صحیح در بازه $[-100, +100]$ به مقدار ژن اضافه می‌شود. اگر مقدار ژن منفی شود یا از کران پایین کمتر شود، مقدار ژن برابر با کران پایین در نظر گرفته می‌شود و اگر مقدار ژن از کران بالا بیشتر شود، دوباره اپراتور جهش اجرا می‌شود.

اپراتور جایگزینی^۸

در این مرحله از اپراتور ممتاز استفاده می‌شود که در آن بهترین‌ها به‌عنوان جمعیت ثانویه انتخاب می‌شوند. ابتدا مجموعه جواب‌ها- که شامل جواب‌های فعلی و تولیدشده است- برحسب رتبه نامغلوب از کوچک به بزرگ مرتب می‌شود و سپس هر گروه از مجموعه- که رتبه یکسان دارند- برحسب فاصله ازدحام از بیشترین به کمترین مرتب می‌شود. در نهایت، به تعداد جمعیت اولیه از ابتدای مجموعه، مجموعه جواب ثانویه برای جایگزینی انتخاب می‌شود.

رتبه‌بندی نامغلوبی

ارزیابی از دید توابع هدف مسئله صورت می‌گیرد و رتبه نامغلوبی هر جواب یا به عبارتی هر کروموزوم محاسبه می‌شود. بهترین رتبه برابر صفر است و به کروموزوم‌هایی تعلق می‌گیرد که هیچ کروموزوم دیگری از مجموعه مورد بررسی بر آن‌ها غلبه نکند و به کروموزومی که از کل مجموعه فقط یک کروموزوم دیگر بر آن غلبه کند رتبه یک

حالت دوم: در صورتی که موجودی واگن خالی کمتر از مجموع تقاضا باشد، فقط واگن پر ارسال می‌شود. اگر مجموع واگن‌های پر بیش از ظرفیت خط قطار تشکیل شوند، مقدار اضافی آن ارسال نمی‌شود و به تقاضای روز بعد اضافه می‌شود.

پس از تعیین وضعیت کمان‌های خروجی از ایستگاه‌ها، در دوره زمانی اول، باید جدول تقاضا به‌روز شود، زیرا تقاضاهای بی‌پاسخ در این دوره به کمان مشابه در دوره زمانی بعد منتقل می‌شوند. در مرحله بعد، ایستگاه‌ها در دوره زمانی دوم مطرح می‌شود و رویه ذکر شده در بالا برای آن ایستگاه‌ها اجرا می‌شود و به همین ترتیب تا آخرین دوره زمانی (T) ادامه می‌یابد.

عملگر انتخاب والد

برای شروع فرایندهای تولید نسل اولین اپراتور، انتخاب والد دو کروموزوم از جمعیت را با عنوان کروموزوم‌های والد انتخاب می‌کند و آن‌ها را برای تولید کروموزوم‌های جدید وارد مرحله تولید نسل و اعمال اپراتورهای ترکیب و جهش می‌کند. عملگر انتخاب رابط بین دو نسل است و بعضی از اعضای نسل کنونی را به نسل آینده منتقل می‌کند. معیار در انتخاب اعضا ارزش تطابق آن‌هاست، اما روند انتخاب حالتی تصادفی دارد. در این پژوهش، برترین کروموزوم‌ها براساس رتبه نامغلوبی و معیار ازدحام جمعیت، به‌عنوان والد انتخاب می‌شوند.

اپراتور ترکیب^۶

مهم‌ترین اپراتور الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲، اپراتور ترکیب است. جفت‌هایی که در قسمت انتخاب، والد در نظر گرفته شدند، در این قسمت ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید به‌وجود می‌آورند. اپراتور ترکیب براساس مقدار احتمالی P_c روی دو والد صورت می‌گیرد. احتمال ترکیب (P_c) معمولاً عددی در بازه $[0, 0.5]$ است. در این پژوهش، از اپراتور ترکیب یکنواخت استفاده می‌شود. برای هر ژن، یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌شود. اگر عدد تصادفی کوچک‌تر یا برابر با 0.5 شود، آن ژن از والد اول به فرزند اول و همان ژن از والد دوم به فرزند دوم منتقل می‌شود، در غیر این صورت آن

گرفته شده است. این روش برخلاف روش‌های جست‌وجوی معمولی، در هر تکرار علاوه بر حرکت به سوی جواب بهتر، جواب‌های بهتر را نیز با احتمال غیرصفری قبول می‌کند. در فرایند بازپخت فلزات، در صورتی که مواد جامد مذاب بسیار آهسته تبرید شود، در حالت جامد اتم‌های آن‌ها به صورت منظم در شبکه بلوری قرار می‌گیرند و ماده جامد حاصل حداقل سطح انرژی را خواهد داشت. به این روش تبرید آهسته بازپخت می‌گویند. در شرایط تعادلی (تبرید تدریجی) برای هر دمای داده شده، احتمال اینکه ذرات ماده سطح انرژی خاصی داشته باشد، طبق تابع توزیع بولتزمن محاسبه می‌شود.

$$p_i \{E = E'\} = \frac{1}{Z(t)} \text{Exp}\left(-\frac{ER}{kT}\right) \quad (14)$$

این احتمال در ابتدا بزرگ است و ضمن اجرای روش متناسب با پارامتر مثبتی به نام دما کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، این روش از نظر تئوری با غلبه بر بهینگی محلی، قادر به یافتن جواب بهینه مطلق نیز است [۱۰]. T دمای سیستم است که درجه تصادفی بودن حرکت به سوی جواب را تعیین می‌کند و مطابق با برنامه‌ای معین با پیشرفت روش حل کاسته می‌شود. در دمای بالا، تقریباً تمام جواب‌های تولیدشده صرف نظر از مقدار توابع هدف پذیرفته می‌شوند. با پیشرفت الگوریتم، جواب‌های نامناسب شانس کمتری برای پذیرفته شدن دارند.

الگوریتم MOSA را اولین بار آلونگو و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۹ به منظور حل مسائل چندهدفه ارائه دادند. ایده اصلی در روش MOSA تولید جواب در همسایگی جواب فعلی و محاسبه مؤثر تغییر در مقادیر توابع هدف، $\sum \Delta f_i$ است. در نهایت، اگر جواب جدید بر جواب فعلی غلبه کند یا بر آن غلبه نکند، جواب جدید ضمن جایگزینی به عنوان جواب فعلی لیست جواب‌های پارتو به روز می‌شود. در صورتی که جواب فعلی بر جواب جدید غلبه کند، علاوه بر به روز کردن لیست جواب‌های پارتو جواب جدید با احتمال $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$ پذیرفته می‌شود. در ادامه، به توضیح کامل پارامترها و اجزای الگوریتم پرداخته می‌شود.

نمایش جواب

جواب‌های الگوریتم تبرید شبیه‌سازی به صورت ماتریسی با

تعلق می‌گیرد. به این ترتیب، برای همه جواب‌ها رتبه نامغلوبی محاسبه می‌شود.

فاصله ازدحام^۹

پس از محاسبه رتبه هر جواب، جواب‌های رتبه یکسان در یک گروه قرار می‌گیرند. سپس برای هر گروه به طور جداگانه مراحل زیر انجام می‌گیرد:

۱. فاصله ازدحام اعضای گروه F_i برابر صفر قرار می‌گیرد:

$$CD(i,j) = 0$$

۲. برای هر یک از توابع هدف مراحل زیر انجام می‌گیرد:

- اعضای جمعیت بر حسب تابع هدف m مرتب می‌شوند.

- به هر یک از اعضای مرزی مجموعه مرتب شده F_i بر حسب هر یک از توابع هدف، مقدار بی‌نهایت داده می‌شود.

$$CD(i,1) = \infty, \quad CD(i,n) = \infty$$

- برای دیگر اعضای مجموعه مرتب شده F_i ، یعنی k با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه انجام می‌گیرد:

$$CD(i,j) = CD(i,j) + \frac{f_m(k+1) - f_m(k-1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (13)$$

شایان ذکر است هر قدر معیار فاصله ازدحام کروموزوم بیشتر باشد، مطلوب‌تر است.

الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه

متروپولیس و همکاران در سال ۱۹۵۳ برای اولین بار الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده را پیشنهاد دادند و کرک پاتریک و همکاران برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ آن را جهت بهینه‌سازی مطرح کردند. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده یکی از الگوریتم‌های فوق ابتکاری کارا مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی در فضای جواب و پذیرش جواب‌های احتمالی و نامرغوب (به منظور فرار از دام بهینه محلی و دستیابی به جواب بهتر) است و برای حل مسائل پیچیده ترکیبی^{۱۰} به کار می‌رود. تبرید شبیه‌سازی شده از فرایند فیزیکی خنک‌سازی مواد مذاب به حالت جامد الهام

تعداد تکرار در هر دما، تابع کاهش دما و دمای نهایی. برای رسیدن به حالت تعادل باید یک تعداد تکرار انجام بگیرد. تعداد تکرارها به سائز مسئله و اندازه همسایه‌ها بستگی دارد. برای کاهش درجه حرارت سه روش استاتیک،^{۱۲} پویا^{۱۳} و انطباقی^{۱۴} وجود دارد. در روش استاتیک درجه حرارت به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد.

$$T_i = T_0 - i\beta \quad (15)$$

روش پویا شامل دو نوع هندسی^{۱۵} و لگاریتمی^{۱۶} است که به ترتیب در زیر آورده می‌شوند:

$$T_{i+1} = \alpha T_i, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (16)$$

$$T_i = \frac{T_0}{\log(i+10)} \quad (17)$$

در روش انطباقی، میزان کاهش درجه حرارت به برخی اطلاعات بستگی دارد که در حین جست‌وجو به‌دست می‌آید. در این پژوهش از روش هندسی استفاده شده است.

نحوه ارزیابی عملکرد و مقایسه

عملکرد الگوریتم ارائه‌شده با عملکرد یک الگوریتم چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید (MOSA) مقایسه و ارزیابی می‌شود. جهت مقایسه و ارزیابی از معیارهای فاصله^{۱۷} کیفیت^{۱۸} و تنوع^{۱۹} استفاده شده است. فرض کنید $P_{NSGA-II}$ و P_{MOSA} به‌ترتیب مجموع جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم‌های MOSA و NSGA-II باشد. در این حالت معیار تنوع (D) هر روش برابر است با تعداد اعضای مجموعه جواب‌های پارتوی مربوطه که به‌صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$D_{NSGA-II} = |P_{NSGA-II}|, D_{MOSA} = |P_{MOSA}|$$

همچنین، از مجموع جواب‌های پارتوی هر دو روش یک مجموعه جواب پارتوی کلی P_{Total} به‌دست می‌آید. معیار کیفیت (Q) هر روش از طریق روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$Q_{MOSA} = \frac{|P_{MOSA} \cap P_{Total}|}{|P_{Total}|} \quad (18)$$

$$Q_{NSGA-II} = \frac{|P_{NSGA-II} \cap P_{Total}|}{|P_{Total}|} \quad (19)$$

به‌منظور محاسبه شاخص فاصله بین دو روش در فضای جواب نیاز است میزان فضایی که نقاط پارتوی هر روش در فضای اهداف می‌پوشانند محاسبه شود. بدین‌منظور، از رابطه ۲۰ برای محاسبه معیار فاصله استفاده می‌شود:

ابعاد $K \times N$ نمایش داده می‌شود که در آن N بیانگر تعداد ایستگاه‌ها و K بیانگر انواع واگن‌های باری است. نمایش جواب‌ها در این الگوریتم مانند بخش نمایش کروموزوم‌هاست.

جواب اولیه

در الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲، مجموعه‌ای از جواب‌ها به‌عنوان جمعیت اولیه انتخاب می‌شود، درحالی‌که در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی فقط به یک جواب اولیه نیاز است؛ بنابراین، در این روش برای به‌دست‌آوردن جواب اولیه و تخصیص واگن‌ها و درنهایت محاسبه تابع هدف مانند بخش «جمعیت اولیه» برای ایجاد یک کروموزوم عمل می‌شود.

ساختار همسایگی^{۱۱}

هنگامی که جواب اولیه s وجود دارد، باید جواب همسایه s' مشخص شود. به‌منظور ایجاد جواب همسایه بدین‌صورت عمل می‌شود: ابتدا یکی از انواع واگن و سپس یکی از دوره‌های زمانی و درنهایت یکی از ایستگاه‌های شبکه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود که به ترتیب k و t و i نام دارد. سپس بررسی می‌شود که ایستگاه i در دوره t قادر به سرویس‌دهی تقاضاهای مربوط به واگن نوع k بوده است یا خیر. در این روش دو حالت پیش می‌آید:

حالت اول: در دوره t ایستگاه i دچار x تا کمبود واگن نوع k شده است که به تعداد واگن‌های نوع k در ایستگاه i مقداری تصادفی از بازه $[1, x]$ اضافه می‌شود.

حالت دوم: در دوره t ایستگاه i تا x مازاد واگن نوع k دارد و تمام تقاضاهای نوع k تأمین شده‌اند. در این حالت، از تعداد واگن‌های نوع k در ایستگاه i مقداری تصادفی از بازه $[1, x]$ کم می‌شود. حال جواب همسایه جدید به‌دست می‌آید که عملیات تخصیص برای آن انجام می‌گیرد و توابع هدف آن محاسبه می‌شود.

زمان‌بندی کاهش دما

فرایند کاهش دما، دمای T_i در هر مرحله i از الگوریتم را مشخص می‌کند. پارامترهایی که در تعریف زمان‌بندی کاهش دما در نظر گرفته می‌شوند، عبارت‌اند از دمای اولیه،

مسئله‌ای شامل هفت ایستگاه و دوره برنامه‌ریزی ده روز و چهار نوع واگن باری استفاده می‌شود. برای هر پارامتر چند مقدار در نظر گرفته می‌شود. حالت‌های مختلف از ترکیب مقادیر مختلف پارامترها آزمایش می‌شوند و براساس توضیحات بخش قبل مقایسه صورت می‌گیرد. معیار توقف در هر اجرا ۶۰۰۰ مرتبه محاسبه توابع هدف است. جدول ۱ و ۲ مقادیر مورد بررسی برای هر پارامتر و مقدار تأیید شده برای آن را نشان می‌دهد.

$$\text{Gap-index} = \frac{\{HV(\text{MOSA}) - HV(\text{NSGA-II})\}}{HV(\text{IRS})} \quad (20)$$

اگر مقدار شاخص فاصله مثبت شود؛ یعنی الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری دارد و اگر منفی شود؛ یعنی الگوریتم MOSA عملکرد بهتری دارد (برای اطلاع از نحوه محاسبه رابطه ۲۰ و تعاریف مرتبط با آن به مرجع [۱۲] مراجعه کنید).

نتایج محاسباتی

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی از

جدول ۱. بازه تغییرات و مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-II

پارامتر	دامنه تغییرات	مقادیر مورد بررسی
اندازه جمعیت	تعداد زن * [۲، ۴]	۱۴ - ۲۰ - ۲۴ - ۲۸
احتمال عملگر ترکیب	[۰/۵، ۰/۸]	۰/۵ - ۰/۶ - ۰/۷ - ۰/۸
آلفا (عملگر جهشی)	[۱/۵، ۲]	۱/۵ - ۱/۶ - ۱/۷ - ۱/۸

جدول ۲. بازه تغییرات و مقادیر پارامترهای الگوریتم MOSA

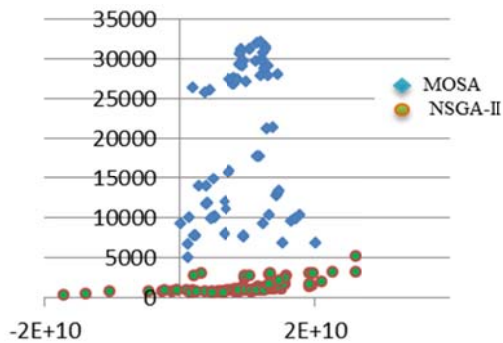
پارامتر	دامنه تغییرات	مقادیر مورد بررسی
دمای اولیه	[۴۰۰، ۱۰۰۰]	۷۰۰ - ۸۰۰ - ۹۰۰ - ۱۰۰۰
دمای نهایی	[۵، ۳۰]	۵ - ۱۰ - ۲۰ - ۳۰
نرخ سرد شدن	[۰/۸، ۰/۹۹]	۰/۸۵ - ۰/۹ - ۰/۹۵ - ۰/۹۹
تعداد تکرار در دمای ثابت	[۱۰، ۲۵]	۱۰ - ۱۵ - ۲۰ - ۲۵

بررسی مطابق با سیستم حمل و نقل ریلی باری جمهوری اسلامی ایران است. برای هر سایز از مسئله الگوریتم‌ها ده مرتبه اجرا می‌شوند و معیار توقف در هر دو الگوریتم ۶۰۰۰ مرتبه محاسبه توابع هدف است. در ادامه، جدول‌های ۳ تا ۷ میانگین نتایج اجرای دو الگوریتم را نشان می‌دهند.

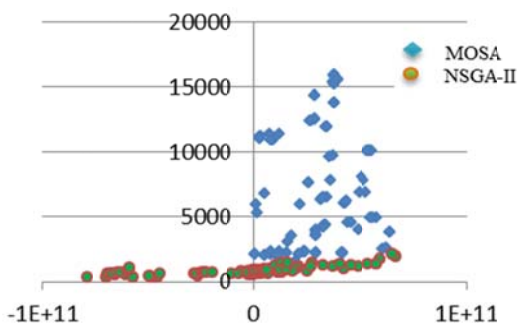
جدول ۳. عملکرد الگوریتم‌ها در مسئله با چهار ایستگاه

الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	D	Q	Gap-index (%)
NSGA-II	۱۷۶/۱۸	۶/۶	۱	۷۱/۳
MOSA	۱۲۷/۶۸	۴/۶	۰	

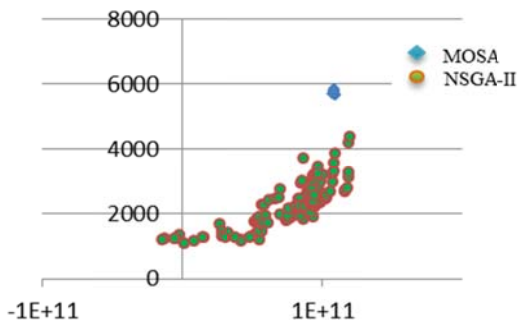
در ادامه، به منظور ارزیابی کارایی روش ارائه شده، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-۲ و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه صورت می‌گیرد. برای این منظور، از مسائل با ابعاد مختلف استفاده می‌شود که در تمام آن‌ها دوره برنامه‌ریزی برابر با ۱۰ روز است. همچنین، چهار نوع پرکاربرد واگن‌های باری که ۹۰ درصد بارها در شبکه را جابه‌جا می‌کنند مد نظر قرار می‌گیرد. $MCS D=16$ است و ظرفیت قطارها ۲۰ تا ۲۵ واگن باری است و در هر دوره زمانی بین هر زوج مبدأ-مقصد می‌توان حداکثر پنج قطار باری را ارسال کرد. شایان ذکر است اطلاعات مسائل مورد



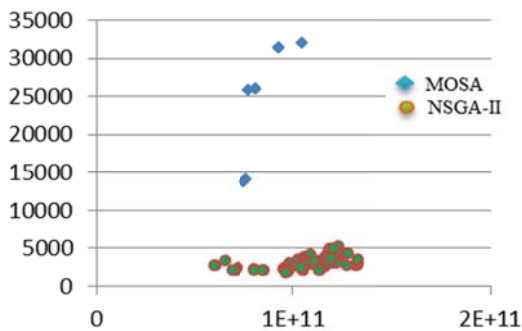
شکل ۳. مقایسه الگوریتم‌ها برای مسئله با هشت ایستگاه



شکل ۴. مقایسه الگوریتم‌ها برای مسئله با دوازده ایستگاه



شکل ۵. مقایسه الگوریتم‌ها برای مسئله با شانزده ایستگاه



شکل ۶. جواب‌های حاصل از دو الگوریتم برای مسئله با بیست ایستگاه

جدول ۴. عملکرد الگوریتم‌ها در مسئله با هشت ایستگاه

الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	D	Q	Gap-index (%)
NSGA-II	۴۴۱/۲	۱۱۹	۱	۱۴/۳
MOSA	۳۵۷/۳۸	۸	۰	

جدول ۵. عملکرد الگوریتم‌ها در مسئله با ۱۲ ایستگاه

الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	D	Q	Gap-index (%)
NSGA-II	۵۴۶/۸۱	۱۳۹	۱	۲۲/۳
MOSA	۸۷۷/۶	۸/۹	۰	

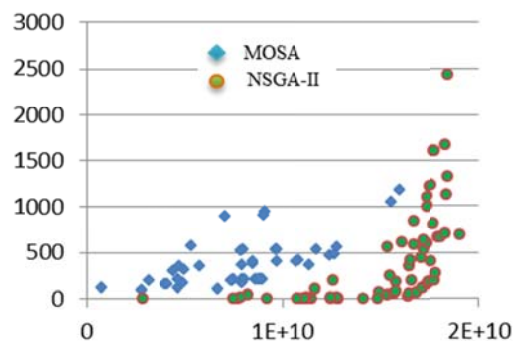
جدول ۶. عملکرد الگوریتم‌ها در مسئله با شانزده ایستگاه

الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	D	Q	Gap-index (%)
NSGA-II	۱۴۳۲/۶۴	۱۴۹	۱	۲۲/۶
MOSA	۱۶۴۲/۲۱	۱۹	۰	

جدول ۷. عملکرد الگوریتم‌ها در مسئله با بیست ایستگاه

الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	D	Q	Gap-index (%)
NSGA-II	۲۴۶۳/۷۵	۱۰۹	۱	۱۶/۸۷
MOSA	۱۷۲۹/۸۶	۱۶	۰	

نتایج بیانگر عملکرد بسیار خوب الگوریتم مبتنی بر الگوریتم NSGA-II است. در ادامه، شکل‌های ۲ تا ۶ فضای جواب حاصل از ده مرتبه اجرای هر دو الگوریتم را نشان می‌دهند. شکل ۲ نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-II در سائز کوچک در زمان در نظر گرفته شده است و به جواب‌هایی با تأخیر صفر دست یافته است، اما در سائزهای بزرگ‌تر به زمان اجرای بیشتری نیاز است.



شکل ۲. مقایسه الگوریتم‌ها برای مسئله با چهار ایستگاه

نتیجه گیری

هدف مسئله مورد مطالعه تعیین تعداد بهینه ناوگان است، به طوری که سود بیشینه و تعداد تأخیرات کمینه شود. در مدل های دیگر برای هر تأخیر مقدار جریمه در نظر گرفته می شود، در صورتی که در شرایط واقعی برای تأخیر در تقاضای بار جریمه تعلق نمی گیرد. از مزیت های مدل ریاضی ارائه شده به کارگیری سه محدودیت ظرفیت خط و ظرفیت وسیله نقلیه و تشکیل قطار با ارسال واگن خالی است. در مدل های دیگر به علت نبود این محدودیت ها، جریان ممکن است هر مقداری از ناوگان باشد، در حالی که هر مقداری از واگن ها در روز بین هر زوج مبدأ- مقصد قابل ارسال نیست. این محدودیت ها جریان واگن ها را همان طور که در شرایط واقعی وجود دارد کنترل می کند. به تخصیص واگن های خالی به منظور افزایش بهره برداری از واگن های موجود در شبکه و در نتیجه کاهش حجم زیادی از هزینه های تملک ناوگان و نگهداری توجه شده است. همچنین، مدل اطلاعاتی مانند تعداد و نوع واگن های مستقر در هر ایستگاه و تعداد و نوع تقاضای بی پاسخ و تعداد و نوع واگن های پر و خالی در حال سیر را تعیین می کند.

در نهایت، مسئله مورد بررسی جزء مسائل NP-Hard است و در سبزه های واقعی از طریق نرم افزارهای دقیق قابل حل نیست؛ بنابراین، برای حل مدل ریاضی مورد مطالعه به الگوریتم های فرا ابتکاری نیاز است. همچنین، به دلیل اهمیت فراوان مسئله تعیین اندازه ناوگان، در تصمیم گیری های راهبردی سیستم های حمل و نقل به خصوص شبکه راه آهن به روش هایی کارا نیاز است تا در

زمان مناسب جواب های پارتوی مناسبی در اختیار تصمیم گیرندگان سیستم های حمل و نقل ریلی قرار دهد. در این پژوهش، پس از بررسی های لازم روی مسئله مورد نظر، دو روش حل مبتنی بر الگوریتم NSGA-II و MOSA طراحی و اجرا شد. الگوریتم NSGA-II مبتنی بر جمعیتی از جواب ها است و در فضای جواب مسئله، جست و جوی سراسری خیلی خوبی انجام می دهد. الگوریتم MOSA مبتنی بر یک جواب است و الگوریتم جست و جوی محلی پیشرفته محسوب می شود. به منظور مقایسه دو الگوریتم از پنج سبزه مختلف مسئله کمک گرفته شد. شایان ذکر است اطلاعات مسائل مورد بررسی مطابق با سیستم حمل و نقل ریلی باری راه آهن جمهوری اسلامی ایران است. نتایج بیانگر کارایی بسیار خوب الگوریتم NSGA-II برای رسیدن به جواب های بهینه پارتو است.

در پژوهش های آتی می توان روش های حل کاراتری را با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری دیگر برای این مسئله ارائه کرد. همچنین، می توان از روش های تصمیم گیری چندمعیاره به منظور حل مدل طراحی شده استفاده کرد. به منظور بهبود و تطبیق بیشتر مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش با سیستم حمل و نقل واقعی، می توان محدودیت ها و فرضیات دیگری را به آن افزود. از جمله در نظر گرفتن اهداف دیگر و در نظر گرفتن پنجره زمانی برای پاسخگویی به تقاضای مشتری و همچنین سازگاری بین محموله و وسیله نقلیه. همچنین، اغلب تحقیقات در زمینه حمل و نقل ریلی در مورد واگن های باری صورت گرفته است و مسئله حمل و نقل مسافر و ناوگان لکوموتیو کمتر بررسی شده است.

مراجع

1. Mafakheri, Z. (1392). "Development model to determine the optimal number of freight cars in iran rail transportation network." MA thesis management and efficiency, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modarres University.
2. Beaujon, G. J. and Turnquist, M. A. (1991). "A model for fleet sizing and vehicle allocation." *Transportation Science*, Vol. 25, No. 1, PP. 19-45.
3. Bojovic, N. (2002). "A general system theory approach to rail freight car fleet sizing." *European Journal of Operational Research*, Vol. 136, No. 1, PP. 136-172.
4. List, G. F., Wood, B., Nozick, L. K., Turnquist, M.A., Jones, D.A., Kjeldgaard, E.A. and Lawton, C. R.

- (2003). "Robust optimization for fleet planning under uncertainty." *Research Transportation*, Part E, Vol. 39, No. 3, PP. 209-227.
5. Sayarshad, H. R. and Ghoseiri, K. (2009). "A simulated annealing approach for multi-periodic rail-car fleet sizing problem." *Computers and Operations Research*, Vol. 36, No. 6, PP. 1789-1799.
 6. Sayarshad, H. R. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010). "Solving a multi periodic stochastic model of the rail-car fleet sizing by two-stage optimization formulation." *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 34, No. 5, PP. 1164-1174.
 7. Yaghini, M. and Khandaghabadi, Z. (2013). "A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, PP. 4127-4138.
 8. Mafakheri, Z. and Masihi, E. (1393). " Modeling and solving the rail-car fleet sizing problem with multi-objective and heterogeny in the fleet." *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 2550.
 9. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2002). "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
 10. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, 220, PP. 671-680.
 11. Ulungu, E.L., Teghem, J., Fortemps, P.H. and Tuytens, D. (1999). "MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems." *J. Multi-Crit. Decis. Anal.*, 8: 221-236. doi: 10.1002/(SICI)1099-1360.
 12. Husseinzadeh Kashan, A., Karimi, B. and Jolai, F. (2010). "An effective hybrid multi-objective genetic algorithm for bi-criteria scheduling on a single batch processing machine with non-identical job sizes." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 10.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Pareto Solutions
2. Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA- II)
3. Multi Objective Simulated Algorithm (MOSA)
4. Fleet
5. Chromosome
6. Crossover
7. Mutation
8. Non-dominated Sort
9. Crowding Distance
10. Combinatorial
11. Neighborhood structure
12. Static
13. Dynamic
14. Adaptive
15. Geometric
16. Logarithmic
17. Gap-Index
18. Quality
19. Diversity