

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین

اندازه واگن های باری در صنعت حمل و نقل ریلی

زهرا مفاخری، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مجید شیخ محمدی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

علی حسین زاده کاشان، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

E-mail: msheikhm@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۸

دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۰۱

چکیده

مسئله تعیین اندازه ناوگان از مسائل مهم صنعت حمل و نقل و بسیار سخت و پیچیده است. در این پژوهش، یک مدل ریاضی برای مسئله پویای تعیین تعداد واگن های باری ریلی ارائه می شود که تا حد امکان شرایط و محدودیت های دنیای واقعی را در بر دارد. در مدل ارائه شده تقاضای واگن و زمان سیر به صورت قطعی در نظر گرفته شده اند. از آنجا که در دنیای واقعی بیش از یک هدف وجود دارد بنابراین در این پژوهش تابع هدف دیگری جهت افزایش بهره وری در نظر گرفته شده است، که تعداد تاخیرات در پاسخ گویی به تقاضاها را در طول دوره برنامه ریزی کاهش می دهد. مطابق با شرایط واقعی شبکه راه آهن، واگن های باری بصورت ناهمگون مد نظر قرار گرفته اند. همچنین در مدل ارائه شده برای اولین بار سه محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه، ارسال وسیله نقلیه و ظرفیت خط در نظر گرفته شده است. تخصیص واگن های خالی جهت افزایش بهره برداری از واگن های موجود در شبکه و در نتیجه آن کاهش حجم زیادی از هزینه های تملک ناوگان و نگهداری مورد توجه واقع شده است. در این مقاله پس از تعریف مسئله مدل ریاضی مربوطه ارائه می گردد. جهت یافتن جواب های پارتو یک روش مبتنی بر رویکرد الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه ارائه شده است. در نهایت، یک مثال عددی برگرفته از صنعت حمل و نقل ریلی جمهوری اسلامی ایران حل و به بحث گذاشته شده است.

واژه های کلیدی: اندازه ناوگان، بهینه سازی، شبیه سازی تبرید چند هدفه، حمل و نقل ریلی

۱. مقدمه

واگن‌های باری سه محدودیت جدید، محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه و محدودیت ظرفیت خط و محدودیت در تشکیل وسیله نقلیه با افزودن ناوگان خالی، که برای اولین بار در مسائل تعیین تعداد ناوگان مطرح می‌گردند، در نظر گرفته شده است. از آنجا که مسئله مورد بررسی جزء مسائل سخت و پیچیده است، بنابراین جهت حل مدل چند هدفه و پویای ارائه شده و یافتن جواب‌های پارتو^۱، یک روش حل با رویکرد الگوریتم تبرید شبیه‌سازی چند هدفه^۲ طراحی گردید. در نهایت یک مثال عددی که پارامترهای آن مطابق با راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران است، حل و بررسی شده است. در ادامه، این مقاله به صورت زیر ساختاردهی شده است:

در بخش دوم، خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در این زمینه بیان می‌شود. در بخش سوم، توضیحاتی پیرامون مسئله تعیین اندازه بهینه ناوگان، فرضیات در نظر گرفته شده و مدل ریاضی طراحی شده به طور کامل ارائه می‌گردد. در بخش چهارم، روش حل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم MOSA برای حل مدل ریاضی طراحی شده ارائه می‌شود. در بخش پنجم، پس از تشریح نحوه‌ی تنظیم پارامترها، پارامترهای ورودی یک مثال عددی در ابعاد کوچک و نتایج حاصل از حل آن نمایش داده می‌شود. در بخش ششم، پس از نتیجه‌گیری پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی و انطباق بیشتر مدل طراحی شده با سیستم حمل و نقل واقعی ارائه می‌گردد.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

منظور از واژه ناوگان^۳ می‌تواند واگن، لکوموتیو، کامیون، خودرو، کانتینر و وسایل حمل مواد و قطعات باشد. در سال‌های اخیر کارهای متعددی پیرامون مسئله تعیین اندازه ناوگان انجام شده است. در زمینه حمل و نقل ریلی نیز مطالعات گوناگونی صورت گرفته است.

در سال ۱۹۷۶ فلورین و همکاران مدلی برای تعیین تعداد لکوموتیو با هدف کمینه کردن هزینه‌های نگهداری ارائه کردند. آنها فرض کردند لکوموتیوها ناهمگون و زمان سفر ثابت است [Florian et al. 1976]. در سال ۱۹۷۷ گرت باخ و گوروچ مسئله تعیین تعداد لکوموتیو را با هدف کمینه کردن اندازه ناوگان مطرح کردند با فرض

شبکه حمل و نقل ریلی به عنوان یک سیستم حمل و نقل، نقش اساسی در جابجایی کالا و مسافر دارد. این نقش و دیگر خصوصیات آن، از جمله قابلیت حجم سرمایه‌گذاری بالا در تجهیزات و نیروی انسانی باعث شده است تا مطالعات و تحقیقات گوناگونی در ارتباط با مدیریت بهره‌وری آن انجام شود. ظرفیت و کارایی یک سیستم حمل و نقل به طور مستقیم با تعداد ناوگان موجود آن سیستم در ارتباط است [Mafakheri and Masih, 2015]. شرکت‌های حمل و نقل ریلی به منظور دستیابی به ظرفیت مورد نیاز برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان در ناوگان ریلی سرمایه‌گذاری می‌کنند و به دلیل قیمت بالای آن، ناوگان ریلی یکی از منابع بزرگ سرمایه‌ای در صنعت راه‌آهن به شمار می‌رود که بهینه‌سازی در بهره‌برداری آن توجه صنعت و جوامع دانشگاهی را نیز به خود جلب نموده است. خریداری ناوگان باری به تعداد بسیار کم منجر به کیفیت پائین خدمت رسانی به تقاضای مشتریان و در نتیجه، کاهش تقاضای شبکه می‌گردد، در حالی که خرید یا اجاره بسیار زیاد منجر به هزینه‌های مفرط تملک، عملیات و نگهداری می‌شود. مطالعات انجام گرفته در این زمینه به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول به دنبال تخصیص بهینه ناوگان موجود جهت رسیدن به اهداف مختلف است. دسته دوم تعیین تعداد بهینه ناوگان جهت دستیابی به اهداف مورد نظر را مورد بررسی قرار می‌دهد. دسته آخر هم به دنبال تعیین تعداد بهینه ناوگان و هم تخصیص بهینه آنهاست [Khandagh-Abadi, Yaghini, 2013]. پژوهشگران به اهمیت تخصیص ناوگان خالی جهت افزایش بهره‌برداری از ناوگان موجود و در نتیجه کاهش هزینه‌های خرید و هزینه‌های عملیاتی پی برده‌اند [Bojovic, 2002]. از آنجا که در اکثر مطالعات پیشین در زمینه حمل و نقل ریلی به مسائل تک هدفه پرداخته شده است و همچنین به دلیل پیچیدگی مسئله، واگن‌های باری همگون فرض شده‌اند [Yaghini, Khandaghabadi, 2013]. در مدل ارائه شده در این پژوهش جهت تطبیق با شرایط دنیای واقعی، علاوه بر در نظر گرفتن دو تابع هدف، افزایش سود و افزایش بهره‌وری سیستم، و ناهمگونی

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن های باری در صنعت ...

[Tavakkoli-Moghaddam, 2010]. یقینی و خندق آبادی در سال ۱۳۸۹ در ادامه کاربوجویچ مدل توسعه یافته ای را مورد مطالعه قرار دادند و برای حالت استاتیک و پویا یک روش حل ابتکاری از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده ارائه کردند.[Yaghini and Khandagh-abadi, 2011]. یقینی و خندق آبادی در سال ۲۰۱۳ یک روش حل ابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه سازی شده است، برای مسئله تعیین تعداد واگن های باری ارائه کردند. مدل مورد مطالعه چند پرودی و پویاست که در آن زمان سفر و تقاضا قطعی در نظر گرفته شده است [Yaghini and Khandaghabadi, 2013]. در سال ۱۳۹۴ مسیحی و مفاخری مدل مورد بررسی توسط یقینی و خندق آبادی در پژوهش قبل را در حالت چند هدفه مورد بحث قرار دادند، و در پژوهش خود مسئله را با استفاده از روش وزنی به تک هدفه تبدیل کردند و مورد بررسی قرار دادند و سه روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه سازی تبریدی و ترکیب این دو روش طراحی و مورد مقایسه و بحث قرار دادند، [Mafakheri, 2015]. در سال ۲۰۱۴ کلوسترهالفن و کالراس و فیچر، مدلی جهت تعیین ساختار و تعداد بهینه ناوگان باری ریلی مربوط به یک شرکت شیمیایی ارائه کردند. در مدل عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفر و همچنین جایگزینی واگن ها در نظر گرفته شده است [Klosterhalfen, Kallrath and Fischer, 2014].

در حمل و نقل جاده ای نیز مطالعات مختلفی انجام شده است. بال و همکاران در سال ۲۰۰۷ مسئله تعیین تعداد ناوگان کامیون با در نظر گرفتن حمل کننده مشترک را مورد بررسی قرار دادند [Ball et al. 2007]. در سال ۲۰۰۸ سانگ و ارل یک مدل ریاضی برای تعیین تعداد ناوگان باری و سیاست جابه جایی وسایل نقلیه خالی در یک سیستم سرویس دهی دارای دو دپو ارائه کردند با فرض اینکه ناوگان همگون باشد [Song and Earl, 2008].

اینکه ناوگان همگون و زمان سفر ثابت باشد [Gertsbach and Gurevich, 1977]. در سال ۲۰۰۸ گادوین و همکاران کاربردی از شبیه سازی جهت تعیین تعداد لکوموتیو مورد نیاز برای انجام عملیات قطارهای باری ارائه کردند که سیستم ریلی تحت مطالعه، برنامه زمان بندی از پیش تعیین شده ای نداشت، [Godwin, Gopalan and Narendran, 2008]. بوژان و ترنکوئیست در سال ۱۹۹۱، یک مدل احتمالی و چند پرودی جهت تعیین تعداد ناوگان، با هدف بیشینه کردن درآمد مورد انتظار برای حمل بار و کاهش هزینه های عملیاتی واگن های 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 [Beaujon and Turnquist, 1991]. در سال ۱۹۹۷، شرالی و تانکیلیک مدلی برای تعیین تعداد واگن های حمل خودرو با هدف حمل خودرو از کارخانه های خودروسازی به شهرهای متقاضی را توسط قطارهای باری ارائه کردند که در آن سه نوع واگن مورد بررسی قرار گرفت، [Sherali and Tuncbilek, 1997]. بوجویچ در سال ۲۰۰۲ مسئله تعیین اندازه واگن ها را با هدف کمینه کردن هزینه کل به منظور تامین تقاضای مشتریان، مورد مطالعه قرار داد. همچنین تخصیص واگن های خالی را جهت افزایش بهره برداری مطرح کرد [Bojovic, 2002]. در سال ۲۰۰۳ کخل و همکاران مسئله تعیین تعداد واگن های باری و سیاست تغییر موقعیت وسایل نقلیه را از طریق بیشینه کردن میانگین سود و با استفاده از روش ترکیب شبیه سازی با رویکرد الگوریتم ژنتیک، بهینه کردند [Kochel, Kunze and Nielander, 2003]. در سال ۲۰۰۳ لیست و همکاران از طریق مدل های بهینه سازی غیر قطعی، یک رویکرد حل جدید برای مسئله تعیین اندازه ناوگان ارائه کردند [List et al. 2003]. در سال ۲۰۰۹ سیارشاد و قصیری جهت تعیین تعداد واگن های باری و سیاست توزیع واگن های خالی جهت پاسخگویی به تقاضای مشتریان مدلی ارائه و با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید آن را حل کردند. در این مدل فرض شد تقاضا و زمان سیر قطعی است [Sayarshad and Ghoseiri, 2009]. سیارشاد و توکلی مقدم در سال ۲۰۱۰ یک مدل احتمالی ارائه کردند که برای حل آن یک روش دو مرحله ای با استفاده از رویکرد الگوریتم تبرید شبیه سازی شده ارائه شد [Sayarshad and

۳. مسئله پویا، چند پرودی و چند هدفه تعیین تعداد ناوگان

در این بخش پس از بیان مسئله مورد بررسی، فرضیات در نظر گرفته شده و در نهایت مدل ریاضی طراحی شده، بیان می‌گردد.

۱-۳ بیان مسئله

مسئله تعیین تعداد ناوگان عبارت است از: تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه یک سیستم حمل و نقل و همچنین تعیین جریان جابجایی وسایل نقلیه پر و خالی جهت خدمت‌دهی به مشتریان، به طوری که اهداف سیستم بهینه گردند. در اغلب مطالعات انجام شده بیشینه کردن سود یا کمینه کردن هزینه‌ها مد نظر قرار گرفته است در صورتیکه در شرایط واقعی، هر سیستمی اهداف مختلفی را مد نظر قرار می‌دهد. تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در طول دوره تصمیم‌گیری ثابت فرض می‌شود. وسایل نقلیه مورد استفاده به صورت همگون یا غیر همگون هستند که در صورت غیر همگون بودن، لازم است سازگاری بین محموله و وسیله نقلیه در نظر گرفته شود. زمان سیر بین دو ایستگاه در شبکه در حالت رفت و برگشت به مسیر شبکه بستگی دارد که در شبکه ریلی زمان رفت و برگشت معمولاً یکسان است. در مدل استاتیک مسئله تعیین تعداد ناوگان، تمامی اجزای تصمیم‌گیری در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مشخص بوده و پس از برنامه‌ریزی تا پایان اجرای آن بدون تغییر می‌مانند. در مدل پویا مسئله مورد بررسی، اجزای مسئله در طول دوره برنامه‌ریزی متناسب با زمان تغییر می‌کنند.

هدف این مقاله ارایه یک مدل برای مسئله تعیین تعداد ناوگان باری است که در آن سعی شده است تا حد امکان شرایط دنیای واقعی مدنظر قرار گیرد تا بتوان به جواب‌های دقیق‌تری برای مسئله مورد بررسی دست یافت. همچنین طراحی یک روش با رویکرد الگوریتم

تبرید شبیه‌سازی شده چند هدفه جهت حل مدل پیشنهادی به منظور یافتن جواب‌های بهینه پارتو است. تعیین تعداد بهینه ناوگان برای یک سیستم حمل و نقلی، به برقراری تعادل بین هزینه تملک یا اجاره ناوگان و هزینه‌های عملیاتی نیاز دارد.

۲-۳ فرضیات مسئله

فرضیات پایه‌ای استفاده شده در مدل چند هدفه پیشنهادی تعیین تعداد ناوگان به شرح زیر است:

دوره برنامه‌ریزی به دوره‌های زمانی گسسته تقسیم می‌شود و هر دوره زمانی برابر با یک روز است. حالت دینامیک مسئله در نظر گرفته می‌شود، به این صورت که تقاضای مشتریان در هر دوره زمانی متفاوت است و الگوی از پیش تعیین شده‌ای وجود ندارد. تقاضای مشتریان بر حسب تعداد واگن تعریف می‌شود به علاوه واگن‌های باری موجود در سیستم حمل و نقلی ناهمگون فرض شده‌اند. میزان تقاضا و زمان سیر بین هر زوج مبدا- مقصد قطعی در نظر گرفته شده است. تعداد انواع مختلف واگن‌های باری موجود در سیستم تا پایان دوره برنامه‌ریزی ثابت است و امکان اجاره و خرید ناوگان وجود ندارد. هر ایستگاه در شبکه حمل و نقل می‌تواند مبدا برخی تقاضاها و مقصد تقاضاهای دیگری باشد. تقاضای مشتریان نمی‌تواند زودتر از موعد مقرر به مقصد برسد و در صورتی که تقاضای مشتری دیرتر از زمان تعیین شده به مقصد برسد، به ازای هر روز دیرکرد هر واگن یک تاخیر در نظر گرفته می‌شود و تقاضاهای پاسخ داده نشده در هر روز در سیستم از بین نمی‌روند، بلکه به تقاضاهای روز بعد منتقل می‌گردند. ظرفیت وسایل نقلیه (قطار) باری در شبکه ریلی، مشخص و محدود است. واگن‌های باری مختلف با رعایت شرایط ایمنی می‌توانند در یک قطار قرار گیرند. ظرفیت خطوط ریلی جهت ارسال قطارهای باری در هر دوره زمانی محدود هستند.

۳-۳ مدل‌سازی ریاضی

در این بخش مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله مورد نظر ارایه می‌گردد. پس از مطالعات صورت گرفته در این زمینه و بررسی

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن های باری در صنعت ...

$MCS D$: حداقل مجموع واگن های پر و خالی که به حد نصاب جهت تشکیل قطار نمی رسند و اضافه کردن تعدادی واگن خالی به آنها و تشکیل قطار هزینه کمتری خواهند داشت نسبت به حالتی که ارسال نشوند. و اگر در دوره τ مجموعه ای از واگن های پر از مبدا i ارسال شود و در دوره $t \leq \tau$ به مقصد j برسد.

$\alpha_{ijk}(\tau, t)$: اگر در دوره τ مجموعه ای از واگن های پر از مبدا i ارسال شود و در دوره $t \leq \tau$ به مقصد j برسد پارامتر مربوطه برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد.

$\beta_{ijk}(\tau, t)$: اگر در دوره τ مجموعه ای از واگن های خالی از مبدا i ارسال شود و در دوره $t \leq \tau$ به مقصد j برسد پارامتر مربوطه برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد.

متغیرهای تصمیم گیری مدل عبارت اند از:

$x_{ijk}(t)$: تعداد واگن های حامل بار نوع k که در دوره t از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می گردد.

$y_{ijk}(t)$: تعداد واگن های خالی نوع k که در دوره t از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می گردد.

$V_{ik}(t)$: تعداد واگن های موجود از نوع k در ایستگاه $i \in N$ در پایان دوره زمانی t

$W_{ik}(t)$: تعداد واگن های مستقر از نوع k در ایستگاه $i \in N$ در طول دوره زمانی t

$U_{ijk}(t)$: تقاضاهای پاسخ داده نشده مرتبط با واگن نوع k که باید از مبدا $i \in N$ ارسال می شدند و در دوره t به مقصد $j \in N$ می رسیدند.

$N_{nij}(t)$: تعداد وسیله نقلیه که در دوره t از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می گردد که ظرفیت آنها برابر CD_n می باشد.

$M_{ij}(t)$: تعداد واگن هایی که در دوره t از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ باید ارسال می شدند و به حد نصاب برای تشکیل قطار نمی رسند. توابع هدف و محدودیت ها:

شرایط واقعی و نظر کارشناسان مرکز تحقیقات راه آهن جمهوری اسلامی ایران نتیجه شد اغلب ایستگاه های راه آهن ایران هم مبدا و هم مقصد تقاضاهای مختلف هستند که در مدل طراحی شده این فرض لحاظ گردید. همچنین با توجه به اهمیت بهره برداری ناوگان و کارایی سیستم، کمینه کردن تعداد تاخیرات در کنار بیشینه کردن سود مورد بررسی قرار گرفته شده است. با در نظر گرفتن این موارد و فرضیات در نظر گرفته شده در بخش قبل، مدل زیر برای مسئله تعیین تعداد واگن های باری طراحی شده است.

مجموعه ایستگاه های شبکه با N نمایش داده می شود. همچنین دوره برنامه ریزی T به دوره های زمانی گسسته تقسیم می گردد و هر دوره زمانی t برابر با یک روز در نظر گرفته می شود. $t = 0, 1, \dots, T$ پارامترهای استفاده شده به صورت زیر می باشند:

R_{ijk} : درآمد حاصل از جابه جایی یک واگن حامل بار نوع k از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$

LC_{ijk} : هزینه جابه جایی یک واگن حامل بار نوع k از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$

EC_{ijk} : هزینه جابه جایی یک واگن خالی نوع k از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$

Q_k : هزینه تملک یک واگن نوع k

HC_{ik} : هزینه نگهداری یک واگن نوع k در ایستگاه $i \in N$

tt_{ijk} : زمان سیر واگن نوع k از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ (بر حسب روز)

$D_{ijk}(t)$: میزان تقاضای مرتبط با واگن نوع k که باید در دوره t از مبدا $i \in N$ به مقصد $j \in N$ برسد (بر حسب واگن)

CD_n : ظرفیت وسیله نقلیه (قطار) که n حالت می توان برای آن تعریف کرد.

$CSD_{ij}(t)$: حداکثر تعداد قطاری که در دوره زمانی t می توان بین مبدا i و مقصد j ارسال کرد.

$$\max \varphi = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t R_{ijk} \times x_{ijk}(t) - \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t \{ LC_{ijk} \times x_{ijk}(t) + EC_{ijk} \times y_{ijk}(t) \} - \sum_i \sum_k Q_k \times V_{ik}(0) - \sum_i \sum_k \sum_t \{ HC_{ik} \times W_{ik}(t) \} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{if } M_{ij}(t) \geq MCSD, \sum_n N_{nij}(t) < CSD_{ij} \quad \forall i, j, t \quad (10)$$

$$y_{ijk}(t) = y_{ijk}(t) + \{\min(CD_n) - M_{ij}(t)\}$$

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

هر ایستگاه می‌باشد. محدودیت (۵) نشان دهنده تعداد واگن‌های خالی یی 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، بیشتر از موجودی واگن‌های خالی در انتهای دوره زمانی قبل در همان ایستگاه نباشد. محدودیت (۷) که بیانگر ظرفیت وسیله نقلیه (قطار) در سیستم است تضمین می‌کند در هر دوره زمانی بین هر دو ایستگاه مجموع واگن‌های پر و خالی یی که باید ارسال گردد،

تابع هدف (۱) عبارت است از بیشینه کردن سود که برابر است با اختلاف بین درآمد حاصل از جابجایی واگن‌های باردار و هزینه‌های جابجایی واگن‌ها به صورت پر و خالی، تملک واگن‌ها و نگهداری واگن‌های خالی در ایستگاه. تابع هدف (۲) عبارت است از کمینه کردن تعداد تاخیرها در سرویس دهی به تقاضای مشتریان. محدودیت (۳) نشان دهنده میزان تقاضای پاسخ داده نشده در هر دوره زمانی (روز) بین هر زوج مبدا- مقصد می‌باشد. محدودیت (۴) نشان دهنده موجودی واگن خالی در انتهای هر دوره زمانی در

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن های باری در صنعت ...

توزیع بولتزمن محاسبه می گردد. این احتمال در ابتدا بزرگ است و در طول اجرای الگوریتم، متناسب با دما کاهش می یابد. بنابراین از نظر تئوری این الگوریتم با غلبه بر بهینه محلی قادر به یافتن جواب بهینه سراسری نیز خواهد بود. پارامترهای الگوریتم عبارتند از: دمای اولیه، دمای نهایی، نرخ کاهش دما، تعداد تکرار در دمای ثابت، تعداد تکرار در صورت عدم بهبود جواب. در ادامه به تشریح اجزای الگوریتم پیشنهادی پرداخته می شود.

$$P_r \{E = E'\} = \frac{1}{Z(t)} \text{Exp}\left(-\frac{ER}{kT}\right) \quad (12)$$

۴-۱ نحوه نمایش جواب

در این روش هر جواب، به صورت ماتریسی با ابعاد $K \times N$ نمایش داده می شود که در آن N بیانگر تعداد ایستگاه ها و K بیانگر انواع واگن های باری است. محتوای هر درایه از ماتریس برابر است با پارامتر $V_{ki}(0)$ که نشان دهنده تعداد واگن های موجود از نوع $k \in K$ در ایستگاه $i \in N$ در ابتدای دوره برنامه ریزی است. با توجه به اینکه تعداد واگن ها از هر نوع تا پایان دوره برنامه ریزی تغییر نمی کنند و ثابت هستند، بنابراین مجموع موجودی واگن خالی از هر نوع در ابتدای دوره برنامه ریزی، کل تعداد ناوگان را مشخص می نماید. شکل (۲) یک نمونه جواب پیشنهادی را با چهار ایستگاه و سه نوع واگن نشان می دهد.

۴-۲ جواب اولیه

در این پژوهش از یک رویه تصادفی جهت تولید جواب اولیه استفاده شده است که در آن به ایستگاه هایی که مبدا جریان واگن پر نیستند مقدار صفر تعلق می گیرد و برای دیگر ایستگاه ها کران بالا و پایین محاسبه می گردد. در این حالت زمان حل به مقدار زیادی کاهش می یابد. کران پایین حداقل تعداد واگنی که می توان در نظر گرفت یعنی صفر می باشد و برای کران بالا مقداری در نظر رفته می شود که تمام تقاضاها پاسخ داده شوند. پس از تعیین جواب،

قطارهایی که شامل تعداد مشخصی واگن مثلا ۲۰-۲۵ واگن هستند را تشکیل بدهند. محدودیت (۸) تضمین می کند تعداد واگن ها در ابتدای دوره برنامه ریزی برابر باشد با تعداد واگن ها در انتهای دوره برنامه ریزی. محدودیت (۹) تضمین می کند که در هر دوره زمانی تعداد قطارهای ارسالی بین هر زوج مبدا و مقصد بیشتر از ظرفیت خط نشود. محدودیت (۱۰) بیانگر این مطلب است که اگر پس از تشکیل قطارها بین هر زوج مبدا - مقصد تعدادی واگن باقی بماند که برای تشکیل قطار به حد نصاب 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 می کنیم تا مجموع برابر $Min(CD_n)$ و ارسال شوند. محدودیت (۱۱) تضمین می کند مقادیر متغیرهای تصمیم گیری غیر منفی و عدد صحیح باشد.

۴. الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله پویا و چند

هدفه تعیین تعداد ناوگان

الگوریتم MOSA یک الگوریتم فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه سازی است که اولین بار توسط متروپولیس در سال ۱۹۵۳ پیشنهاد شد و جهت بهینه سازی اولین بار توسط کریک پاتریک و همکاران در سال ۱۹۸۳ [Kirkpatrick, Gelatt and Vecchi, 1983] مطرح گردید. الگوریتم تبرید شبیه سازی شده چند هدفه روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی است. تکنیک تبرید تدریجی شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و سپس کم کردن تدریجی این دماست تا جایی که انرژی ماده به حداقل برسد. همچنین الگوریتم تبرید شبیه سازی چند هدفه مبتنی بر جستجوی همسایگی در فضای جواب است و جواب های احتمالی و نامطلوب را جهت فرار از دام بهینه محلی و دستیابی به جواب های بهتر، می پذیرد. در شرایط تبرید تدریجی برای هر دمای داده شده، سطح انرژی ذرات ماده، و احتمال پذیرش جواب های بدتر طبق تابع

نقض شود، مقدار اضافی واگن‌ها ارسال نمی‌گردند که در ارسال نکردن، اولویت با جریان واگن خالی است و اگر تعداد قطارهای تشکیل شده کمتر از ظرفیت خط باشد و تعدادی واگن پر به علت نرسیدن به حد نصاب جهت تشکیل قطار یعنی ۲۰، باقی مانده باشند، در این حالت طبق شرایط راه آهن جمهوری اسلامی ایران در تشکیل قطار عمل می‌شود، یعنی اگر تعداد واگن‌های پر باقی مانده بزرگ‌تر یا مساوی $MCS D$ باشند، تعدادی واگن خالی که لازم است قطاری با ۲۰ واگن تشکیل شود به آن اضافه می‌گردد.

حالت دوم: در صورتیکه موجودی واگن خالی کمتر از مجموع تقاضا باشد، فقط واگن پر ارسال می‌گردد. اگر تعداد قطارهای حاصل از مجموع واگن‌های پر بیش از ظرفیت خط گردد، مقدار اضافی آن ارسال نمی‌شود و به تقاضای روز بعد اضافه می‌گردد. پس از تعیین وضعیت کمان‌های خروجی از ایستگاه‌ها، در دوره زمانی اول، لازم است جدول تقاضا به روز شود، چرا که تقاضاهای پاسخ داده نشده در این دوره، به کمان مشابه در دوره زمانی بعد منتقل می‌شوند. در مرحله بعد ایستگاه‌ها در دوره زمانی دوم در نظر گرفته می‌شود و رویه‌ای که در بالا ذکر شد، برای آن ایستگاه‌ها اجرا می‌شود، و به همین ترتیب تا آخرین دوره زمانی (T) بررسی انجام می‌گردد.

۴-۳ ساختار همسایگی

در این روش به منظور ایجاد جواب همسایه به این صورت عمل می‌شود. ابتدا یکی از انواع واگن و یکی از دوره‌های زمانی و در نهایت یکی از ایستگاه‌های شبکه به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد که به ترتیب با k و t و i نمایش داده می‌شوند. سپس بررسی می‌گردد آیا ایستگاه i در دوره t قادر به سرویس‌دهی تقاضاهای مربوط به واگن نوع k بوده است یا نه؟ دو حالت پیش می‌آید:

$V_{11}(0)$	$V_{12}(0)$	$V_{13}(0)$	$V_{14}(0)$
$V_{21}(0)$	$V_{22}(0)$	$V_{23}(0)$	$V_{24}(0)$
$V_{31}(0)$	$V_{32}(0)$	$V_{33}(0)$	$V_{34}(0)$



۷۶۱	۲۲۸	۴۳۷	۱۶۷
۳۵۰	۲۱۴	۸۵	۹۷
۷۵۲	۱۰۵	۸۲۱	۱۱۶

تخصیص واگن‌ها صورت می‌گیرد تا متغیرهای دیگر از جمله جریان واگن پر و خالی و تقاضاهای به تاخیر افتاده مشخص و سپس مقادیر توابع هدف محاسبه گردد.

شکل (۳) مراحل تخصیص واگن‌های باری در طول دوره برنامه‌ریزی جهت یافتن مقادیر توابع هدف را نشان می‌دهد. در شروع الگوریتم یک جدول تقاضا بین زوج مبدا- مقصدها وجود دارد که لازم است هر تقاضا در زمان تعیین شده به مقصد برسد، در صورتیکه تقاضا دیرتر از زمان تعیین شده به مقصد برسد، تأخیر در نظر گرفته می‌شود. در این روش جهت تخصیص برای هر نوع واگن سه جدول در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱) مربوط به جابجایی واگن‌های پر است، جدول (۲) مربوط به جابجایی واگن‌های خالی است و جدول (۳) مربوط به تقاضاهایی است که با تأخیر مواجه شده‌اند. هر نوع جدول به تعداد دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی، تکرار می‌شود. ابعاد جدول نیز برابر با تعداد ایستگاه‌های شبکه است. با استفاده از جداول فوق نحوه جابجایی هر نوع واگن بین زوج مبدا-مقصدها در دوره‌های زمانی مختلف، مشخص می‌گردد. نحوه تخصیص به این صورت است که برای هر نوع واگن ابتدا از دوره زمانی اول شروع می‌شود و در این دوره زمانی ابتدا ایستگاه ۱، سپس ایستگاه ۲، ایستگاه ۳، ... ایستگاه n بررسی می‌شوند. برای هر ایستگاه، موجودی واگن خالی در آن ایستگاه با مجموع تقاضاهایی که باید از آن ایستگاه اعزام شوند، مقایسه می‌گردد. در این روش دو حالت پیش می‌آید:

حالت اول: موجودی واگن خالی بیش از مجموع تقاضا باشد، همه تقاضاها را می‌توان پاسخ داد و اگر واگن خالی باقی ماند، آنها نیز بر حسب اولویت در میزان کمبود واگن در ایستگاه مقصد کمان‌ها تخصیص می‌یابند. پس از مشخص شدن جریان‌های خروجی واگن پر و خالی از هر نوع واگن، بررسی می‌شود که مجموع این جریان‌ها قطارهایی حاوی ۲۰-۲۵ واگن تشکیل دهند و تعداد این قطارها بیش از ظرفیت خط به طور مثال ۵ نگردد. بر این اساس اگر تقاضاها زیاد باشند، یعنی محدودیت ظرفیت خط

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن های باری در صنعت ...

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

جواب های بد پذیرفته شود. برای کاهش دما روش های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از روش پویای هندسی استفاده شده است:

$$T_{i+1} = \alpha T_i, \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (14)$$

۴-۵ اختتام الگوریتم

در این پژوهش علاوه بر شرط اختتام الگوریتم تبرید شبیه سازی چند هدفه یعنی رسیدن به دمای نهایی یک شرط دیگر، تعداد دفعاتی که توابع هدف محاسبه می گردند، برای اختتام در نظر گرفته شده است که اگر یکی از این دو شرط برقرار شود، الگوریتم پایان می یابد.

۵. تحلیل نتایج

در این بخش مدل طراحی شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل می شود. به منظور جلوگیری از بیش برآزش پارامترهای الگوریتم پیشنهادی، از مسئله ای متفاوت با مثال عددی مورد بررسی در این بخش، برای تنظیم پارامترها استفاده شده است. در نهایت نتایج به بحث گذاشته شده اند.

۵-۱ تنظیم پارامترها

جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی از مسئله ای شامل ۷ ایستگاه و دوره برنامه ریزی ۱۰ روز و ۴ نوع واگن باری، کمک گرفته شده است. برای هر پارامتر چند مقدار مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، الگوریتم برای هر حالت ۲۰ مرتبه اجرا گردید و معیار توقف برابر با ۶۰۰۰ مرتبه محاسبه توابع هدف در نظر گرفته شد. در این پژوهش از یک پارامتر شروع کرده و از بین حالت های مختلف، مقداری که بهترین جواب ها را بدست آورد، انتخاب گردید. سپس مقادیر پارامتر بعدی مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب تمام حالت های مختلف حاصل از ترکیب پارامترها مورد آزمایش قرار گرفت. جهت مقایسه حالت ها از سه معیار مقایسه

حالت اول: در دوره t ایستگاه i دچار x واحد کمبود واگن نوع k شده است و تعدادی از تقاضاهای نوع k تامین نشده اند. در این حالت به تعداد واگن های نوع k در ایستگاه i مقداری تصادفی از بازه $[1, x]$ اضافه می گردد.

حالت دوم: در دوره t ایستگاه i دچار x واحد مازاد واگن نوع k شده است و تمام تقاضاهای نوع k تامین شده اند. در این حالت از تعداد واگن های نوع k در ایستگاه i مقداری تصادفی از بازه $[1, x]$ کم می گردد.

۴-۴ زمانبندی کاهش دما

فرآیند کاهش دما در موفقیت الگوریتم MOSA تاثیر زیادی دارد و هر قدر روند کاهش آن کمتر باشد تعداد تکرارهای اجرای الگوریتم

بیشتر می شود. همانطور که قبلا ذکر شد، الگوریتم MOSA برای فرار از بهینه محلی از یک تابع احتمالی جهت پذیرش جواب های همسایه ای که مغلوب جواب فعلی الگوریتم شده اند، استفاده می کند. این تابع عبارت است از:

$$P(\nabla E, T) = e^{-\frac{\sum_i \nabla E(f_i)}{T}} \quad (13)$$

رابطه ۱۳ گویای این مسئله است که احتمال پذیرش جواب هایی که بر جواب فعلی مغلوب می شوند، یا به عبارتی دیگر جواب های بدتر، رابطه مستقیم با درجه حرارت T و مجموع تغییرات توابع هدف دارد. در صورتیکه دمای T خیلی زیاد در نظر گرفته شود، احتمال پذیرش این نوع جواب ها افزایش می یابد و تقریباً همه جواب ها پذیرفته می شوند و الگوریتم به یک الگوریتم احتمالی تبدیل می شود. در صورتیکه T خیلی پایین در نظر گرفته شود، فقط جواب هایی که بر جواب فعلی مغلوب نمی شوند، پذیرفته می شود و به یک الگوریتم هیوریستیک تبدیل می شود. در شروع الگوریتم دمای اولیه باید طوری انتخاب شود که نسبتی از

$$\text{Gap-index} = \frac{\{HV(A) - HV(B)\}}{HV(IRS)} \quad (17)$$

اگر مقدار شاخص فاصله مثبت شود یعنی الگوریتم با در نظر گرفتن پارامتر مورد بررسی با مقدار B عملکرد بهتری دارد و اگر منفی شود برعکس معنا می‌شود. جدول (۱) مقادیر مورد بررسی برای هر پارامتر و جدول (۲) مقدار تایید شده برای آن را نشان می‌دهد.

۲-۵ مثال عددی

مسئله مورد بررسی شامل ۴ ایستگاه و ۷ دوره زمانی است، که در این حالت شبکه دارای ۳۵ گره است. هر گره می‌تواند هم به عنوان مبدا و هم به عنوان مقصد در نظر گرفته شود. بنابراین در هر دوره زمانی ۱۲ زوج مبدا- مقصد موجود است که در کل دوره برنامه‌ریزی ۸۴ زوج مبدا- مقصد وجود خواهد داشت. ۴ نوع واگن پر کاربرد در شبکه راه‌آهن ایران عبارتند از: لبه بلند، لبه کوتاه، مسقف، مخزنی که این ۴ نوع مد نظر قرار گرفته شده‌اند. هر زوج مبدا- مقصد دارای یک مقدار تقاضا از هر نوع واگن است که زمان تحویل تقاضا به مقصد از قبل توسط مشتری تعیین شده است.

استفاده شد که عبارتند از: معیار فاصله و کیفیت و تنوع [Husseinzadeh Kashan, Karimi and Jolai, 2010]. فرض کنید در مورد یک پارامتر خاص P_a و P_b به ترتیب مجموع جواب‌های پارتو بدست آمده توسط حل الگوریتم با مقادیر A و B باشد. در این حالت معیار تنوع (D) هر مدل بر اساس هر مقدار برابر است با تعداد اعضای مجموعه جواب‌های پارتو مربوطه که بصورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$D_A = |P_A|, D_B = |P_B|$$

همچنین از مجموع جواب‌های پارتو هر دو مقدار یک مجموعه جواب پارتو کلی P_{Total} بدست می‌آید. معیار کیفیت (Q) مدل بر اساس هر مقدار از طریق روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$Q_A = \frac{|P_A \cap P_{Total}|}{|P_{Total}|} \quad (15)$$

$$Q_B = \frac{|P_B \cap P_{Total}|}{|P_{Total}|} \quad (16)$$

جهت محاسبه شاخص فاصله بین دو مقدار مورد بررسی در فضای جواب نیاز است میزان فضایی که نقاط پارتو هر مقدار با نقطه ایده آل (IRS) به دست آمده از اجرای الگوریتم‌ها، می‌سازند محاسبه شود. در نهایت از رابطه (۱۷) جهت محاسبه معیار فاصله استفاده می‌شود:

جدول ۱. بازه تغییرات پارامترهای الگوریتم MOSA

پارامتر	دمای اولیه	دمای نهایی	نرخ سرد شدن	تعداد تکرار در دمای ثابت	دفعات محاسبه توابع هدف
مقادیر مورد بررسی	[800,1000]	[5,30]	[0.85,0.99]	[10,25]	[4000,6000]

جدول ۲. مقادیر تایید شده برای پارامترهای الگوریتم MOSA

پارامتر	دمای اولیه	دمای نهایی	نرخ سرد شدن	تعداد تکرار در دمای ثابت	دفعات محاسبه توابع هدف
مقدار تایید شده	۸۰۰	۵	۰٫۹۵	۱۵	۶۰۰۰

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن های باری در صنعت ...

جدول ۳. هزینه حمل واگن پر (ریال)

S4	S3	S2	S1	
۳۸۵۵۲۱۵	۸۳۳۳۳۲۵	۱۱۴۴۷۸۰۰	-	S1
۱۳۶۳۶۳۵۰	۱۸۲۸۲۸۱۰	-	۱۱۴۴۷۸۰۰	S2
۴۷۳۰۶۳۵	-	۱۸۲۸۲۸۱۰	۸۳۳۳۳۲۵	S3
-	۴۷۳۰۶۳۵	۱۳۶۳۶۳۵۰	۳۸۵۵۲۱۵	S4

جدول ۴. هزینه حمل واگن خالی (ریال)

S4	S3	S2	S1	
۱۲۸۳۵۴۵	۲۷۷۴۴۷۵	۳۸۱۱۴۰۰	-	S1
۴۵۴۰۰۵۰	۶۰۸۷۰۳۰	-	۳۸۱۱۴۰۰	S2
۱۵۷۵۰۰۵	-	۶۰۸۷۰۳۰	۲۷۷۴۴۷۵	S3
-	۱۵۷۵۰۰۵	۴۵۴۰۰۵۰	۱۲۸۳۵۴۵	S4

جدول ۵. تقاضای مشتریان (بر حسب تعداد واگن)

دوره زمانی (بر حسب روز)							واگن لبه بلند	
T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	j	I
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱
۱۸۸	۱۵۶	۱۸۹	۱۶۵	۱۷۷	۱۷۸	۱۷۷	۳	۱
۱۲۶	۱۶۸	۱۷۲	۱۲۵	۱۵۱	۱۴۹	۱۴۹	۴	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۱۹	۱۳	۸	۱۴	۴	۷	۱۰	۲	۴
۳۹	۵۶	۳۹	۲۴	۲۲	۵۴	۳۹	۳	۳

جدول ۷. تقاضای مشتریان (بر حسب تعداد واگن)

دوره زمانی (بر حسب روز)							واگن مخزنی	
T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	J	I
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۳۴	۷	۲۴	۰	۱۰	۱۵	۰	۳	۲
۰	۰	۱۰	۹	۰	۱۰	۸	۴	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۲۴	۱۸	۱۸	۱۳	۲۷	۱۲	۱۱	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱

جدول ۶. تقاضای مشتریان (بر حسب تعداد واگن)

دوره زمانی (بر حسب روز)							واگن لبه کوتاه	
T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	j	i
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱
۰	۰	۹	۱۱	۰	۰	۰	۳	۱
۲۱	۹	۷	۵	۱۳	۷	۱۰	۴	۱
۱۹	۱۵	۳	۱۲	۸	۱۰	۹	۱	۱
۱۰	۱۳	۲۲	۲۴	۰	۱۲	۱۱	۳	۲
۰	۱۱	۷	۰	۱۹	۶	۱۰	۴	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۰	۲۰	۷	۱۴	۶	۵	۲۳	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱

جدول ۸. تقاضای مشتریان (بر حسب تعداد واگن)

دوره زمانی (بر حسب روز)							واگن مسقف	
T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	j	i
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۲۱	۲۰	۳۴	۲۱	۱۰	۱۲	۳۰	۳	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۲۴	۲۰	۱۰	۱۲	۱۹	۱۵	۶	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱

جدول ۹. درآمد حمل واگن پر (ریال)

S4	S3	S2	S1	
۶۴۱۷۴۹۶	۱۳۸۷۱۸۸۰	۱۹۰۵۶۳۲۰	-	S1
۲۲۶۹۹۴۴۰	۳۰۴۳۴۰۶۴	-	۱۹۰۵۶۳۲۰	S2
۷۸۷۴۷۴۴	-	۳۰۴۳۴۰۶۴	۱۳۸۷۱۸۸۰	S3
-	۷۸۷۴۷۴۴	۲۲۶۹۹۴۴۰	۶۴۱۷۴۹۶	S4

ایستگاه‌ها صفر است. جدول‌های (۳) تا (۹) پارامترهای مسئله ذکر شده را نشان می‌دهند.

۳-۵ نتایج حل مثال عددی

در این بخش پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی مطابق با بخش (۵-۱)، الگوریتم برای مثال عددی مذکور ۲۰ مرتبه به اجرا گذاشته شده است. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

شکل (۲) فضای جواب بدست آمده و منحنی رسم شده جبهه

جواب‌های پارتو بهینه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است،

مجموعه جواب‌های بهینه پارتو که در مسائل چند هدفه بدست

می‌آیند، جواب‌های بهینه ای هستند که در حالت کلی هیچ یک

بر دیگری برتری ندارند یعنی جوابی را در این مجموعه نمی‌توان

یافت که مقدار همه توابع هدف آن برتر از مقدار همه توابع هدف

جواب دیگر باشد.

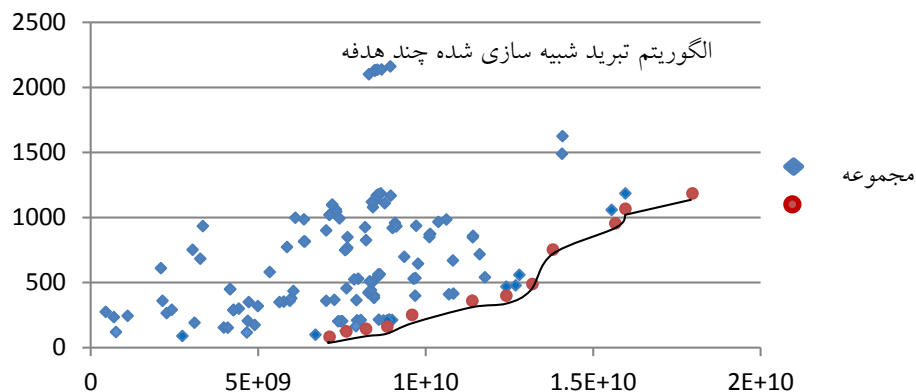
قطارهای باری باید جهت ارسال از ۲۰-۲۵ واگن تشکیل شوند، به طور متوسط $MCS D=16$ است، به این معنا که اگر بین ۱۶-۱۹ واگن پر برای ارسال آماده باشد، تعدادی واگن خالی به آنها اضافه می‌گردد تا قطار شامل ۲۰ واگن را تشکیل دهند و در صورت نقض نشدن محدودیت ظرفیت خط قطار، به سمت مقصد ارسال شود. روزانه حداکثر ۵ قطار باری می‌توان بین هر زوج مبدا-مقصد ارسال کرد. زمان سیر بین ایستگاه‌ها با توجه به مسافت بینشان تعیین می‌شود.

مقادیر درآمد و هزینه‌های مختلف و اطلاعاتی نظیر ظرفیت قطارهای باری و ظرفیت خطوط براساس اطلاعات راه آهن جمهوری اسلامی ایران جمع‌آوری شدند. لازم به ذکر است که هزینه‌های حمل واگن‌های پر و خالی برای همه انواع واگن یکسان است. در جداول تقاضا ایستگاه‌های مبدا آورده شده‌اند به عبارتی مقدار تقاضا از ایستگاه‌هایی که در ستون i نیامده‌اند به دیگر

جدول ۱۰. نتایج ۲۰ مرتبه اجرای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چند هدفه

جواب‌های بهینه پارتو					
تابع هدف اول: سود (ریال)	تابع هدف دوم: تعداد تاخیرات	واگن لبه بلند	واگن لبه کوتاه	واگن مسقف	واگن مخزنی
۱۷۹۶۳۵۸۴۰۳۵	۱۱۸۵	۵۵۸	۱۰۰	۷۱	۹۷
۱۵۹۶۳۵۸۴۰۳۵	۱۰۶۸	۵۶۸	۱۰۰	۷۳	۱۰۶
۱۵۶۶۱۷۹۳۲۸۱	۹۵۶	۵۳۴	۱۳۳	۵۵	۳۲۸
۱۳۷۹۷۱۶۸۴۳۶	۷۵۴	۵۳۱	۴۰۱	۴۸	۸۵
۱۳۱۸۶۰۴۷۹۱۲	۴۸۹	۵۳۱	۴۰۱	۶۰	۸۵
۱۲۴۰۸۰۴۶۱۱۰	۴۰۰	۸۹۸	۲۳۷	۱۱۸	۱۱۶
۱۱۳۹۲۳۶۱۰۴۱	۳۶۰	۵۷	۸۰	۶۶	۷۷
۹۵۹۵۴۷۳۳۷۲	۲۵۲	۳۳	۵۱	۶۷	۴۷
۸۸۵۳۱۱۹۱۲۹	۱۶۲	۷۵۳	۸۱۶	۴۸۲	۱۰۲
۸۲۱۶۸۶۰۳۱۰	۱۴۵	۹۰۸	۴۸۲	۴۰۶	۴۰۷
۷۶۲۹۴۰۹۴۸۷	۱۲۵	۸۸۶	۶۲۸	۱۱۸	۱۱۵
۷۱۳۰۷۱۶۵۲۹	۸۴	۱۱۳۵	۷۶۵	۳۰۷	۳۵۵
تعداد بهینه پارتو	میانگین تاخیرها (روز)	میانگین سود (ریال)	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین تعداد واگن باری	
۱۲	۴۱۸	۱۰۳۰۱۳۴۷۷۴۷	۱۵۱,۶۸	لبه بلند	مخزنی
				لبه کوتاه	مسقف
				۳۵۰	۱۵۶
				۶۱۶	۱۶۰

بکارگیری الگوریتم شبیه سازی تبرید چند هدفه جهت حل مدل توسعه یافته تعیین اندازه واگن‌های باری در صنعت ...



شکل ۲. مجموعه جواب‌های پارتو حاصل از حل مدل طراحی شده با الگوریتم MOSA

قطار با ارسال واگن خالی، برای اولین بار در مدل طراحی شده در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعات قبل با نبود این محدودیت‌ها، جریان هر مقداری از ناوگان می‌توانست باشد و محدودیتی وجود نداشت، در حالی که هر مقداری از واگن‌ها در روز بین هر زوج مبدا-مقصد قابل ارسال نیست. این محدودیت‌ها جریان واگن‌ها را همانطور که در شرایط واقعی وجود دارد، کنترل می‌کنند. بنابراین وقتی جریان‌ها مطابق با واقعیت باشد، جواب نهایی نیز قابل اطمینان خواهد بود. تخصیص واگن‌های خالی جهت افزایش بهره‌برداری از واگن‌های موجود در شبکه و در نتیجه آن کاهش حجم زیادی از هزینه‌های تملک ناوگان و نگهداری مورد توجه واقع شده است. همچنین مدل اطلاعاتی نظیر تعداد و نوع واگن‌های مستقر در هر ایستگاه و تعداد و نوع تقاضاهای پاسخ داده نشده و تعداد و نوع واگن‌های پر و خالی در حال سیر را تامین می‌کند.

در نهایت چون مسئله مورد بررسی جزء مسایل NP-Hard است، بنابراین برای حل مدل ریاضی ارائه شده از الگوریتم MOSA برای یافتن جواب‌های پارتو استفاده شد که گزینه‌هایی را در اختیار تصمیم‌گیرندگان در سیستم‌های حمل و نقل ریلی قرار می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی در هر جواب پارتو تعداد هر نوع واگن و سود حاصل و تعداد تاخیرات در سیستم حمل و نقل ریلی را مشخص می‌کند. همچنین در مدل تخصیص واگن‌های خالی جهت افزایش

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف در مسئله مورد مطالعه تعیین تعداد بهینه ناوگان است، به طوری که اهداف سیستم مانند هزینه کمینه گردد. هر قدر در مدل ریاضی مسئله مورد بررسی فرضیات و شرایط موجود در دنیای واقعی بیشتر مد نظر قرار گیرند، جواب‌های حاصل از حل آن دقیق‌تر و قابل اعتمادتر خواهد بود. از این رو، پس از مطالعات و بررسی‌های انجام شده در پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده‌اند و صحبت‌هایی که با کارشناسان راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران صورت گرفت، نتیجه‌گیری شد که برخلاف آنچه که در مطالعات قبل فرض می‌شد، جریمه‌ای بابت تاخیر در پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان پرداخت نمی‌گردد. همچنین جریان واگن‌ها هر تعدادی از ناوگان نمی‌تواند باشد و هرگاه در مبدا تعداد واگن‌های پر به حد نصاب رسیدند، برای ارسال آماده می‌گردند در غیراین صورت ارسال انجام نمی‌گیرد. طبق نظر کارشناسان، کاهش تعداد تاخیرات به عنوان هدف دوم از اهمیت بالایی برخوردار است. از مهم‌ترین ویژگی‌ها در حل مسئله جهت رسیدن به جواب‌های نزدیک‌تر به واقعیت میزان جریان واگن‌ها در شبکه است که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. پس از مطالعات و بررسی‌های لازم جهت انجام این پژوهش، برای کنترل و مدیریت جریان واگن‌ها در طول مدت زمان حل مسئله و جواب نهایی، سه محدودیت ظرفیت خط و ظرفیت وسیله نقلیه و تشکیل

-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.

-Florian, M., Bushell, G., Ferland, J., Guerin, G. and Nastansky, L. (1976) "The engine scheduling problem in a railway network", *INFOR Journal*, Vol. 14, pp. 121-138.

-Gertsbach, I. and Gurevich, Y. (1977) "Constructing an optimal fleet for a transportation schedule", *Transportation Science*, Vol. 11, No. 1, pp. 20-36.

-Godwin, T., Gopalan, R. and Narendran, T. T. (2008) "Tactical locomotive fleet sizing for freight train operations", *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation* 44, No. 3, pp. 440-454. *Review*, Vol. 10.

-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. 23, No. 6, pp. 911-922.

-Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. 220, pp. 671-680.

-Kochel, P., Kunze, S. and Nielander, U. (2003) "Optimal control of a distributed service system with moving resources: Application to the fleet sizing and allocation problem", *Int. J. Production Economics*, Vol. 81-82, pp. 443-459.

-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.

-Mafakheri, Z. and Masihi, E. (2015) "Modeling and problem solving determine the number of cars taking into account multiple objectives and heterogeneous fleet by metaheuristic", *Research Journal of Transportation Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp.1-18.

بهره وری از ناوگان و در نتیجه کاهش هزینه های تملک و نگهداری، مورد توجه قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی تحت نرم افزار MATLAB (R2012a) برنامه نویسی و اجرا گردید.

برای پژوهش‌های آتی می‌توان روش‌های حل کارآتری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر برای مدل ریاضی طراحی شده، ارائه کرد. همچنین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره جهت حل مدل طراحی شده توصیه می‌گردد. جهت بهبود و تطبیق بیشتر مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله با سیستم حمل و نقل واقعی، می‌توان محدودیت‌ها و فرضیات موجود دیگری را به آن افزود. از جمله در نظر گرفتن اهداف دیگر، و در نظر گرفتن پنجره زمانی برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری. اغلب تحقیقات در زمینه حمل و نقل ریلی پیرامون واگن‌های باری صورت گرفته است. به جای آن، می‌توان حمل و نقل مسافر و ناوگان لکوموتیو را نیز مورد بررسی قرار داد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Pareto Solutions
2. Multi Objective Simulated Annealing (MOSA)
3. Fleet
4. Gap-index
5. Quality
6. Diversity

۸. مراجع

-Ball, M. O., Golden, B. L., Assad, A. A. and Bodin, L. D. (2007) "Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option", *Decision Sciences*, Vol. 14, No. 1, pp. 103-120.

-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.

-Yaghini, M., Khandagh-Abadi, Z. (2011) " Problem solving dynamically determine the size of the fleet cars using a combination Algorithm ", Journal of Transportation, Vol. 8, No. 1.(In Persian)

-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.

-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.

-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.

-Sherali, H. D. and Tuncbilek, C. H. (1997) "Static and dynamic time-space strategic models and algorithms for multilevel rail-car fleet management", Management Science, Vol. 43, No. 2, pp. 235-250.

-Song, D. P. and Earl, C. F. (2008) "Optimal empty vehicle repositioning and fleet-sizing for two-depot service systems", European Journal of Operational Research, Vol. 185, No. 2, pp. 760-777.