

حل مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان واگن‌های باری با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی

مسعود یقینی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
زهرآ خندق‌آبادی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: yaghini@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۷

چکیده

هدف از این مقاله ارایه یک روش حل کارا برای بهینه‌سازی مسئله تعیین اندازه ناوگان واگن‌های باری در راه آهن است. مدل حل شده یک مسئله چند پویا بوده و تقاضای واگن و زمان سیر به صورت قطعی در نظر گرفته شده است. استفاده از واگن‌های خالی در مدل مورد توجه واقع شده است که این امر منجر به کاهش حجم زیادی از تعداد ناوگان و هزینه‌ها می‌شود. همچنین مدل، اطلاعاتی نظیر تقاضاهای پاسخ داده نشده، تعداد واگن‌های مستقر در هر ایستگاه و تعداد واگن‌های پر و خالی در حال سیر را تعیین می‌کند. رویکرد ارایه شده برای حل این مسئله، ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده است. برای تعیین مقادیر بهینه ناوگان در ابتدای دوره برنامه‌ریزی و در هر ایستگاه از الگوریتم ژنتیک و برای تخصیص واگن‌ها به تقاضاها در طول دوره برنامه‌ریزی از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، استفاده گردیده است. همچنین برای ارزیابی عملکرد روش حل ارایه شده، مقایسه‌ای بین جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های قطعی حاصل از نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX انجام شده است. نتایج به دست آمده، بر کیفیت خوب جواب‌ها و صرفه‌جویی مناسب در زمان حل، تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی: حمل و نقل ریلی، بهینه‌سازی اندازه ناوگان، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

۱- مقدمه

تملک و هزینه‌های عملیاتی می‌شود. جابه‌جایی وسایل حمل و نقلی بین ایستگاه‌ها سبب عدم توازن شده و نیاز به تخصیص بهینه وسایل حمل و نقلی در شبکه ایجاد می‌شود. بنابراین اندازه ناوگان حمل و نقلی موجود، برای خدمت‌دهی در هر زمان و مکان، وابسته به استراتژی تخصیص ناوگان است. در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری در حمل و نقل ریلی افزایش یافته است، در نتیجه ارایه رویکردی مناسب به منظور مدیریت ناوگان حمل و نقل ریلی، اهمیت بسیاری در پاسخگویی به نیازهای مشتریان و شرکت‌های حمل و نقلی دارد. مطالعات در این زمینه در دو گروه اصلی دنبال شده‌اند. گروه اول بر روی

ظرفیت و کارایی یک سیستم حمل و نقل ریلی به طور مستقیم با تعداد ناوگان موجود آن سیستم در ارتباط است. 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 راه آهن به‌شمار می‌رود که بهینه‌سازی در بهره‌برداری آن توجه صنعت و جوامع دانشگاهی را نیز به خود جلب کرده است. ناوگان کم، منجر به هزینه‌های جریمه زیاد ناشی از کیفیت پایین خدمت‌دهی به تقاضای مشتریان می‌شود، در حالی که خرید یا اجاره ناوگان زیاد، منجر به هزینه‌های بسیار زیاد

۲- مروری بر مطالعات انجام شده

واژه ناوگان^۳ می‌تواند مصادیق مختلفی نظیر واگن، لکوموتیو، کامیون، اتومبیل، کانترینر و وسایل حمل مواد و قطعات داشته باشد. در سال‌های اخیر کارهای متعددی پیرامون مسئله تعیین اندازه ناوگان با در نظر گرفتن مصادیق مختلف آن ارایه شده است.

مطالعات مختلفی پیرامون تعیین تعداد بهینه واگن و لکوموتیو مورد نیاز، صورت گرفته است. در سال ۱۹۷۶ فلورین و همکاران [Florian (et al.), 1976] مدلی برای تعیین اندازه لکوموتیو با هدف کمینه کردن هزینه‌های نگهداری، با فرض اینکه لکوموتیوها از چند نوع و زمان سفر ثابت باشد، ارایه کردند. در سال ۱۹۷۷ گرت باخ و گورویچ [Gertsbach and Gurevich, 1977] مسئله تعیین اندازه لکوموتیو با هدف کمینه کردن اندازه ناوگان با فرض اینکه ناوگان مشابه و زمان سفر ثابت باشد را مطرح کردند. کاربردی از شبیه‌سازی در تعیین اندازه ناوگان لکوموتیو برای انجام عملیات قطارهای باری توسط گادوین و همکاران [Godwin, Gopalan, and Narendran, 2008] در سال ۲۰۰۸ ارایه شده است. سیستم ریلی تحت مطالعه، برنامه زمان‌بندی از پیش تعیین شده نداشته است.

در سال ۱۹۹۱ بوژان و ترنکوئیست [Beaujon and Turnquist, 1991] مدل تعیین اندازه ناوگان را که یک مدل احتمالی چند پرودی بود، با هدف بیشینه کردن سود مورد انتظار برای حمل بار و کاهش هزینه‌های حرکت واگن‌های پر و خالی پیشنهاد کردند. در این مدل تقاضا و زمان سیر به صورت تابع توزیع احتمالی تعریف و با استفاده از مدل جریان شبکه، این مسئله حل شد.

در سال ۱۹۹۷ شرالی و تونچیلک [Sherali and Tuncbilek, 1997] و همچنین در سال ۲۰۰۰ شرالی و ماگیور [Sherali and Maguire, 2000] مدلی برای تعیین اندازه ناوگان با هدف حمل اتومبیل از کارخانه‌های اتومبیل‌سازی به شهرهای متقاضی را توسط قطارهای باری ارایه کردند.

بجویچ [Bojovic, 2002] در سال ۲۰۰۲ مسئله تعیین تعداد بهینه واگن‌ها به منظور تأمین تقاضای مشتریان را به‌نحوی که هزینه کل کمینه شود، مورد مطالعه قرار داد. کخل و همکاران [Köchel, Kunze and Nielander, 2003] در سال ۲۰۰۳ تعیین اندازه ناوگان و سیاست تغییر موقعیت وسایل نقلیه را از

تخصیص ناوگان موجود، به مقاصد مختلف تمرکز دارد. در این گروه، تعداد ناوگان مشخص است و دربردارنده جریان‌های خالی مورد نیاز است. گروه دوم روی تعیین تعداد بهینه ناوگان تمرکز یافته است. برای سال‌های متمادی پژوهشگران این موضوع را به‌صورت تعیین تعداد بهینه ناوگان به منظور تأمین تقاضای مشتریان به‌نحوی که هزینه کل کمینه شود، در نظر می‌گرفتند. اخیراً محققان به ضرورت در نظر گرفتن تخصیص واگن‌های خالی پی برده‌اند که هدف، کمینه کردن هزینه خرید ناوگان و هزینه‌های عملیاتی است [Bojovic, 2002].

در این مقاله یک روش حل کارآ برای بهینه‌سازی مسئله تعیین اندازه ناوگان واگن‌های باری در راه آهن ارایه شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله تعیین اندازه ناوگان و ابعاد شبکه‌های واقعی در حمل و نقل ریلی، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری^۱ اجتناب‌ناپذیر است، چرا که با بزرگ شدن ابعاد مسئله مانند تعداد ایستگاه‌ها یا تعداد دوره‌های زمانی، روش‌های دقیق^۲ از کارایی لازم برای حل این مسایل برخوردار نیستند. با توجه به ساختار مسئله تعیین اندازه ناوگان، الگوریتم ترکیبی ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده انتخاب گردید. در الگوریتم پیشنهادی، تعیین اندازه ناوگان در ایستگاه‌های مبادی بار به وسیله الگوریتم ژنتیک و تخصیص واگن‌ها به تقاضاها در طول دوره برنامه‌ریزی به وسیله الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده انجام می‌شود. نتایج محاسباتی روی مثال‌های نمونه‌ای با ابعاد متفاوت کاربردی بودن، رویکرد پیشنهادی را به اثبات می‌رساند.

در ادامه، این مقاله به‌صورت زیر ساختاردهی شده است: در بخش دوم تاریخچه مختصری از مطالعات صورت گرفته پیرامون مسئله تعیین اندازه ناوگان بیان می‌شود. در بخش سوم به بیان توضیحاتی پیرامون مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان، فرضیات اساسی آن و مدل ریاضی آن پرداخته می‌شود. در بخش چهارم روش حل پیشنهادی این مسئله، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پنجم ابتدا نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم حل تشریح می‌شود، سپس پارامترهای ورودی و نتایج حاصل از حل یک مثال عددی با ابعاد کوچک مطرح می‌گردد و فرآیند حل از ابتدا تا انتها نمایش داده می‌شود، همچنین برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از حل هفت مسئله نمونه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش ششم نیز شامل نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده و بهبود در انطباق مدل‌ها با سیستم‌های حمل و نقل واقعی است.

ترنکوئیست و جردن [Turnquist and Jordan, 1986] یک مدل احتمالی برای تعیین اندازه کانتینرهای مورد استفاده در کارخانه برای حمل قطعات با فرض زمان سیر احتمالی ارایه کردند. ایمای و ریورا [Imai and Rivera, 2001] در سال ۲۰۰۱ کاربردی از تکنیک‌های شبیه‌سازی برای تعیین ترکیب کانتینرهای یخچال‌دار ارایه کردند. در سال ۲۰۰۹ دنگ و سانگ [Dong and Song, 2009] به بررسی مسئله تعیین تعداد کانتینر مورد نیاز و توزیع کانتینرهای خالی از طریق سیستم کشتیرانی، به نحوی که هزینه کل کمینه شود، پرداختند و با استفاده از شبیه‌سازی مسئله را بهینه کردند.

مطالعاتی نیز پیرامون ناوگان مورد نیاز برای حمل و نقل مواد و قطعات صورت گرفته است. لی و همکاران [Lei, Armstrong and Gu, 1993] در سال ۱۹۹۳ با در نظر گرفتن برنامه زمان‌بندی چرخشی، مسئله تعیین اندازه ناوگان را مورد مطالعه قرار دادند. هدف آنها کمینه کردن تعداد ناوگان مورد نیاز به منظور انجام عملیات در یک چرخه تولید است. مالمبورگ و شن [Malmborg and Shen, 1994] در سال ۱۹۹۴ یک روش تحلیلی به منظور پیش‌بینی عملکرد در الزامات نگهداری جریان برای ناوگانی از AGV ها که یک جانمایی حلقه‌ای را خدمت می‌دهند، ارایه کردند. در سال ۲۰۰۱ ویس و همکاران [Vis, Koster and Savelsbergh, 2005] یک مدل جدید و یک الگوریتم حل برای تعیین تعداد AGV مورد نیاز در یک ترمینال کانتینری اتوماتیک ارایه کردند.

۳- مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان

۳-۱- بیان مسئله

مسئله تعیین اندازه ناوگان عبارت است از: تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه یک سیستم حمل و نقلی و همچنین تعیین جریان جابه‌جایی وسایل نقلیه به صورت پر و خالی برای ارایه خدمت به مشتریان. با توجه به اینکه تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در طول دوره تصمیم‌گیری ثابت در نظر گرفته می‌شود، می‌توان براساس استراتژی شرکت حمل و نقلی، از وسایل نقلیه اجاره‌ای نیز استفاده کرد. وسایل نقلیه مورد استفاده می‌توانند به صورت همگون یا غیرهمگون باشند که در صورت غیرهمگون بودن، سازگاری بین محموله و وسیله نقلیه را نیز باید در نظر گرفت.

طریق پیشینه کردن میانگین سود و با استفاده از روش ترکیب شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک، بهینه کردند. لیست و همکاران [List (et al.), 2003] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی غیر قطعی، یک رویکرد حل جدید برای مسئله تعیین اندازه ناوگان ارایه کردند. در سال ۲۰۰۶ دیانا و همکاران [Diana, Dessouky and Xia, 2006] مسئله تعیین تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای فراهم آوردن خدمات حمل و نقلی پاسخگو با کیفیت از پیش تعیین شده برای مشتریان بر حسب زمان‌های انتظار در توقفگاه‌ها و حداکثر انحراف مجاز را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۹ سیارشاد و قصیری [Sayarshad and Ghoseiri, 2009] مدلی برای تعیین تعداد واگن‌های باری و سیاست توزیع آنها برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان ارایه و با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده مسئله را حل کردند. در این مدل تقاضا و زمان سیر قطعی در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۰ سیارشاد و توکلی‌مقدم [Sayarshad and Tavakkoli-Moghaddam, 2010] یک مدل احتمالی ارایه کردند که برای حل آن یک روشی دو مرحله‌ای با استفاده از تبرید شبیه‌سازی شده پیشنهاد دادند.

در حمل و نقل جاده‌ای نیز مطالعات مختلفی صورت گرفته است. بال و همکاران [Ball (et al.), 2007] در سال ۱۹۸۳ به بررسی مسئله تعیین اندازه ناوگان کامیون با در نظر گرفتن حمل‌کننده مشترک پرداختند. دو و هال [Du and Hall, 1997] در سال ۱۹۹۷ تعیین اندازه ناوگان و تخصیص وسایل نقلیه خالی را برای ساختار حمل و نقل یک-به-چند مورد توجه قرار دادند. ترمینال‌ها براساس توازن بین جریان ورودی و خروجی به دو نوع مازاد و کمبود طبقه‌بندی شده‌اند. در سال ۲۰۰۸ سانگ و اِزل [Song and Earl, 2008] یک مدل ریاضی برای تعیین اندازه ناوگان و سیاست جابه‌جایی وسایل نقلیه خالی در یک سیستم خدمت‌دهی دارای دو دپو ارایه کردند. در سال ۲۰۱۰ لی و تائو [Li and Tao, 2010] مسئله تعیین اندازه ناوگان بهینه و سیاست جابه‌جایی برای یک شرکت اجاره‌دهنده اتومبیل که به دو شهر خدمت می‌دهد را مورد مطالعه قرار دادند و یک مدل پویای دو مرحله‌ای که در مرحله اول اندازه ناوگان و در مرحله دوم سیاست جابه‌جایی تعیین می‌شود، را توسعه دادند.

در مطالعات انجام شده، حمل و نقل کانتینری به دو صورت زمینی و دریایی مورد توجه واقع شده است. در سال ۱۹۸۶

سیر بین هر زوج مبدأ- مقصد قطعی در نظر گرفته شده است. تقاضای مشتریان نمی تواند زودتر از موعد تعیین شده به مقصد برسد و در صورتی که تقاضای مشتری دیرتر از موعد مقرر به مقصد برسد به ازای هر روز تأخیر، متحمل جریمه می شود. اگر بعضی از تقاضاها در یک روز پاسخ داده نشوند، این تقاضاها در سیستم از بین نمی روند، بلکه به تقاضای روز بعد اضافه می گردند. همچنین تعداد وسایل نقلیه موجود در سیستم تا پایان دوره برنامه ریزی ثابت در نظر گرفته می شود و امکان اجاره ناوگان وجود ندارد. تقاضای کلیه مشتریان می بایست تا پایان دوره برنامه ریزی تأمین شده باشد. هر ایستگاه در شبکه ریلی می تواند مبدأ برخی تقاضاها و مقصد تقاضاهای دیگری باشد.

۳-۳- مدل سازی ریاضی

در این بخش مدل سازی ریاضی مسئله مورد نظر با فرضیات بیان شده در بالا، ارایه می گردد. ساختار اولیه این مدل ریاضی ابتدا توسط بوژان و ترنکوئیست [Beaujon and Turnquist, 1991] ارایه شده است. با توجه به اینکه اغلب ایستگاه های راه آهن ایران هم مبدأ و هم مقصد تقاضاهای مختلف هستند در این مدل نیز این فرض لحاظ شده است. همچنین به منظور بهره برداری بهتر از واگن های موجود در راه آهن، در صورت وجود واگن خالی مازاد در یک ایستگاه، با در نظر گرفتن میزان تقاضا در دوره های زمانی آتی در ایستگاه های مختلف بخشی از این واگن های خالی به سایر ایستگاه های شبکه که با کمبود واگن مواجه هستند اعزام می شود. با توجه به این موارد و فرضیات در نظر گرفته شده که در بخش قبل توضیح داده شده است، مدل زیر برای حل مسئله تعیین اندازه ناوگان مورد استفاده قرار گرفته است.

مجموعه ایستگاه های شبکه با N نمایش داده می شود. همچنین دوره برنامه ریزی به دوره های زمانی گسسته تقسیم می شود و هر دوره زمانی برابر با یک روز در نظر گرفته شده است که با T مشخص می شود $t = 0, 1, \dots, T_e$.

پارامترهای استفاده شده شامل R_{ij} درآمد حاصل از جابه جایی واگن باردار از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ؛ LC_{ij} هزینه جابه جایی یک واگن باردار از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ؛ EC_{ij} هزینه جابه جایی یک واگن خالی از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ؛ Q هزینه تملک یا اجاره یک

زمان سیر بین دو ایستگاه در شبکه در حالت رفت و برگشت بستگی به مسیر شبکه دارد.

در مسئله ایستای تعیین اندازه ناوگان، تمامی اجزای تصمیم گیری در ابتدای دوره برنامه ریزی مشخص بوده و پس از برنامه ریزی نیز تا پایان اجرای آن ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. در حالت پویای مسئله تعیین اندازه ناوگان، اجزای مسئله در طول دوره برنامه ریزی و متناسب با زمان تغییر می یابند. هدف این مقاله ارایه یک روش حل کارا برای مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان است. هدف در مسئله تعیین اندازه ناوگان، مشخص کردن تعداد بهینه ناوگان است، به نحوی که هزینه کل کمینه یا سود بیشینه شود. تعیین تعداد بهینه ناوگان برای یک سیستم حمل و نقلی، به برقراری تعادل بین هزینه تملک و اجاره ناوگان و هزینه های عملیاتی و هزینه جریمه مرتبط با تأمین نکردن برخی از تقاضاها در اثر عدم استفاده از تعداد کافی از ناوگان نیاز دارد.

شکل ۱ روابط بین عناصر مرکزی مسئله تعیین اندازه ناوگان را مشخص می کند. پنج ورودی اصلی مسئله تعیین اندازه ناوگان عبارتند از: ۱) تقاضای واگن مبدأ- مقصد که باید پاسخ داده شود، ۲) شبکه ریلی که عملیات بر روی آن اجرا می شود، ۳) درآمد، ۴) هزینه مرتبط با سرمایه گذاری های مختلف و تصمیمات عملیاتی و ۵) دوره برنامه ریزی. شکل تأکید می کند که توازن، بین محمولات برگردانده شده، محمولات حمل شده، جابه جایی های حامل بار یا خالی در شبکه، موجودی واگن باری در هر دوره زمانی در هر ایستگاه مبدأ یا مقصد از شبکه ریلی و تعیین اندازه ناوگان به منظور بهینه سازی ترکیب یک چند تابع هدف (به طور مثال کیفیت خدمت دهی و هزینه) صورت می گیرد.

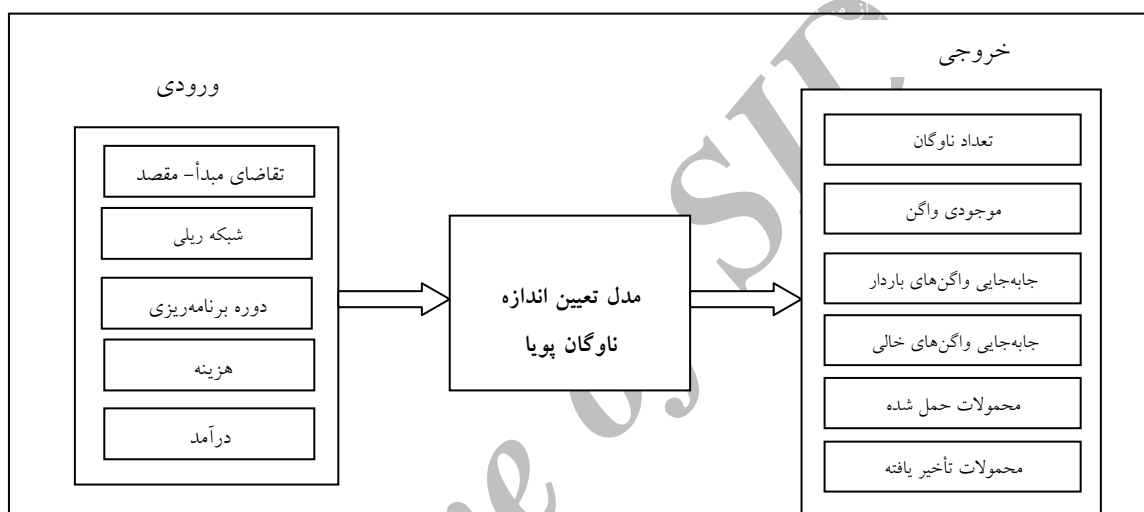
۳-۲- فرضیات مسئله

فرضیات اساسی و پایه ای استفاده شده در مدل تعیین اندازه ناوگان به این شرح است: دوره برنامه ریزی به دوره های زمانی گسسته تقسیم می شود و هر دوره زمانی برابر با یک روز است. حالت پویای مسئله در نظر گرفته می شود، به این صورت که تقاضای مشتریان در هر دوره زمانی متفاوت است و مقدار از پیش تعیین شده ای وجود ندارد. تقاضای مشتری بر حسب تعداد واگن تعریف می شود به علاوه وسایل نقلیه موجود در سیستم حمل و نقلی همگون در نظر گرفته شده اند. میزان تقاضا و زمان

حل مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان واگن های باری...

دوره τ مجموعه ای از واگن های خالی از مبدأ i ارسال شود و در دوره $\tau \leq t$ به مقصد j برسد، در غیر این صورت صفر می شود. متغیرهای تصمیم گیری مدل عبارتند از: $\chi_{ij}(t)$ تعداد واگن های باردار که در دوره t از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می گردد؛ $\psi_{ij}(t)$ تعداد واگن های خالی که در دوره t از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ ارسال می شود؛ $v_i(t)$ تعداد واگن های موجود در ایستگاه $i \in N$ در پایان دوره t ؛ $w_i(t)$ تعداد واگن های مستقر در ایستگاه $i \in N$ در طول دوره t ؛ و $\sigma_{ij}(t)$ تقاضاهای پاسخ داده نشده که باید از مبدأ $i \in N$ ارسال و در دوره t به مقصد $j \in N$ می رسیند.

واگن، در یک دوره زمانی؛ HC_i هزینه نگهداری یک واگن در یک دوره زمانی در ایستگاه $i \in N$ ؛ P_{ij} هزینه جریمه ناشی از عدم برآورده کردن تقاضا از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ در یک دوره زمانی؛ tt_{ij} زمان سیر از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ (و برعکس) بر حسب روز؛ $D_{ij}(t)$ میزان تقاضایی که باید در دوره t از مبدأ $i \in N$ به مقصد $j \in N$ برسد (بر حسب واگن)؛ $\alpha_{ij}(\tau, t)$ مقدار این پارامتر یک می شود اگر در دوره τ مجموعه ای از واگن های پر از مبدأ i ارسال شود و در دوره $\tau \leq t$ به مقصد j برسد، در غیر این صورت صفر می شود؛ و $\beta_{ij}(\tau, t)$ مقدار این پارامتر یک می شود اگر در



شکل ۱. روابط اجزای مسئله تعیین اندازه ناوگان

تابع هدف و محدودیت ها:

$$\max \varphi = \sum_i \sum_j \sum_t R_{ij} \times \chi_{ij}(t) - \sum_i \sum_j \sum_t \{LC_{ij} \times \chi_{ij}(t) + EC_{ij} \times \psi_{ij}(t)\} \quad (1)$$

$$- \sum_i Q \times v_i(0) - \sum_i \sum_t \{HC_i \times w_i(t)\} - \sum_i \sum_j \sum_t P_{ij} \times \sigma_{ij}(t)$$

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ij}(t-1) + D_{ij}(t) - \sum_{\tau \leq t} \chi_{ij}(\tau) \times \alpha_{ij}(\tau, t) \quad \forall i, j, t \quad (2)$$

$$v_i(t) = v_i(t-1) + \sum_j \sum_{\tau < t} \{\chi_{ji}(\tau) \times \alpha_{ji}(\tau, t) + \psi_{ji}(\tau) \times \beta_{ji}(\tau, t)\} - \sum_j \{\chi_{ij}(t) + \psi_{ij}(t)\} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$w_i(t) = v_i(t-1) - \sum_j \{\chi_{ij}(t) + \psi_{ji}(t)\} \quad \forall i, t \quad (4)$$

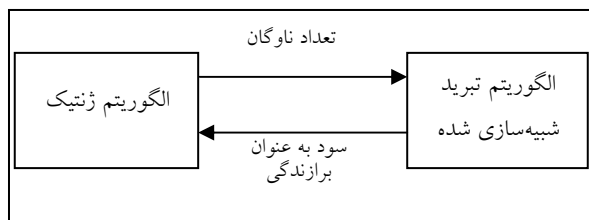
$$\sum_j \{\chi_{ij}(t) + \psi_{ij}(t)\} \leq v_i(t-1) \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$\sum_i v_i(0) = \sum_j v_i(T_e) \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}(T_e) = 0 \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$\chi_{ij}(t), \psi_{ij}(t), \sigma_{ij}(t), v_i(t), w_i(t) \geq 0, \text{integer} \quad \forall i, j, t \quad (8)$$

تبرید شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در واقع برای هر جواب (کروموزوم) از الگوریتم ژنتیک، یک بار الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده اجرا می‌شود و مقدار تابع برازندگی هر جواب (کروموزوم) به دست می‌آید. مجدداً الگوریتم ژنتیک یک نسل دیگر از جواب‌ها را تولید می‌کند و سپس برای هر یک از جواب‌ها (کروموزوم‌ها) الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده اجرا می‌شود و به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک برقرار شود. در ادامه به تشریح الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده پرداخته می‌شود.



شکل ۲. رابطه بین الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

۴-۱- الگوریتم ژنتیک

ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط هلند در دهه ۱۹۷۰ میلادی در دانشگاه میشیگان [Holland, 1975] مطرح شد. این الگوریتم با مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که هر کدام نشان دهنده یک جواب برای مسئله مفروض‌اند، تحت عنوان جمعیت اولیه شروع به کار می‌کند و سپس با یک ساز و کار انتخابی خاص که برای انتخاب والدین در نظر گرفته می‌شود، آنها را تحت عملگرهای باز ترکیب و جهش قرار داده و از آنها فرزندان جدیدی تولید و جایگزین والدین می‌کند. این الگوریتم آنگاه تکرار می‌شود تا شرط خاتمه الگوریتم برقرار شود. شرط خاتمه می‌تواند تولید نسل‌ها به میزان از پیش تعیین شده یا عدم بهبود جمعیت‌های جدید حاصل شده، باشد. در ادامه به تشریح اجزای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای تعیین اندازه ناوگان پرداخته می‌شود.

۴-۱-۱- نمایش جواب‌ها

در الگوریتم پیشنهادی برای نمایش تعداد ناوگان سیستم حمل و نقلی از رشته‌های عدد صحیح به طول N استفاده شده است. هر ژن در رشته یا کروموزوم فوق یک عدد صحیح است که مقدار ژن برابر است با پارامتر $V_i(0)$ که نشان‌دهنده تعداد واگن‌های

تابع هدف (۱) عبارت است از: بیشینه کردن سود که برابر با اختلاف بین درآمد حاصل از جابه‌جایی واگن‌های باردار و هزینه‌ها است. هزینه‌ها شامل جابه‌جایی واگن‌ها به صورت پر و خالی، تملک واگن‌ها، نگهداری واگن‌های خالی در ایستگاه و جریمه ناشی از تأخیر در پاسخگویی به تقاضای مشتریان می‌شود. محدودیت (۲) نشان‌دهنده میزان تقاضای پاسخ داده نشده در هر دوره زمانی (روز) بین هر زوج مبدأ- مقصد است. موجودی واگن خالی در انتهای هر دوره زمانی در هر ایستگاه در محدودیت (۳) و تعداد واگن‌های خالی که در هر دوره زمانی در هر ایستگاه نگهداری می‌شود، در محدودیت (۴) نشان داده شده است. محدودیت (۵) 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 (۶) نشان‌دهنده شرط تعادل در شبکه بوده و تضمین می‌کند تعداد واگن‌ها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی برابر با تعداد واگن‌ها در انتهای دوره برنامه‌ریزی باشد. محدودیت (۷) نیز تصریح می‌کند که در پایان دوره برنامه‌ریزی هیچ تقاضای پاسخ داده نشده‌ای نخواهیم داشت. محدودیت (۸) نشان می‌دهد متغیرهای تصمیم‌گیری مقادیر غیر منفی و عدد صحیح هستند.

۴- الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله پویای

تعیین اندازه ناوگان

الگوریتم پیشنهادی براساس متدولوژی DIMMA طراحی و پیاده‌سازی شده است [Yaghini and Akhavan, 2010]. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز ذکر شد الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم ترکیبی است که از دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده تشکیل یافته است. روش‌های ترکیبی در سایر مقالات ارایه شده است. به عنوان مثال در [Yaghini, Lessan, and Mazinan, 2010] از یک روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچگان استفاده شده است.

در روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد ناوگان مورد نیاز در سیستم حمل و نقلی تعیین می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده تعداد ناوگان تعیین شده توسط الگوریتم ژنتیک، در شبکه تخصیص یافته و تقاضاها را پاسخ می‌دهد. شکل ۲ رابطه بین الگوریتم ژنتیک و الگوریتم

انتخاب چرخ رولت^۷ برای انتخاب کروموزوم‌های والد بهره گرفته شده است. در انتخاب چرخ رولت، با مشخص شدن نسبت برانزندی رشته‌ها، رشته‌ها با برانزندی بهتر سهم بیشتری می‌یابند و قطاع بزرگ‌تری از چرخ رولت نصیب آنها می‌شود.

۴-۱-۴- عملگر باز ترکیب

یکی از مهم‌ترین عملگرهایی که در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، عملگر باز ترکیب^۸ است. عملگر باز ترکیب براساس مقدار احتمالی P_c روی دو والد صورت می‌گیرد. در عمل باز ترکیب مقدار ژن‌ها یا از والد پدر منتقل می‌شود و یا از والد مادر، بنابراین مقدار ژن تغییر نمی‌کند.

در این مقاله از عملگر باز ترکیب یکنواخت^۹ استفاده می‌شود، روش باز ترکیب یکنواخت، روی هر ژن به صورت مستقل عمل می‌کند. در این روش برای هر ژن، یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌گردد. اگر عدد تصادفی کوچکتر یا برابر با $0/5$ بود آن ژن از والد اول به فرزند اول و همان ژن از والد دوم به فرزند دوم منتقل می‌گردد، در غیر این صورت آن ژن از والد دوم به فرزند اول منتقل می‌شود و همان ژن از والد اول به فرزند دوم انتقال می‌یابد. این روش در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۴-۱-۵- عملگر جهش

عملگر جهش^{۱۰} تحت مقدار احتمالی ثابت و کوچک P_m ، روی دو کروموزوم حاصل از مرحله باز ترکیب اعمال می‌گردد. 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 خواهد ماند. برای محاسبه احتمال جهش از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$P_m = \frac{1}{\alpha \times \text{Number of Gen}} \quad 1.5 \leq \alpha \leq 2 \quad (4)$$

در این مقاله از عملگر جهش خزش^{۱۱} استفاده می‌شود. در این روش یک مقدار عدد صحیح براساس یک توزیع یکنواخت در بازه $[+100, -100]$ به مقدار ژن اضافه می‌شود. در صورتی که مقدار ژن به عدد منفی تبدیل شود یا از کران پایین کمتر شود، مقدار ژن برابر با کران پایین ژن در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که مقدار ژن از کران بالا بیشتر شود، مجدداً عملگر جهش اجرا می‌گردد.

موجود در ایستگاه $i \in N$ در ابتدای دوره برنامه‌ریزی است. به عبارت دیگر محتوای هر ژن، موجودی واگن خالی، در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تعداد واگن‌ها تا پایان دوره برنامه‌ریزی تغییر نمی‌کند و ثابت است، بنابراین مجموع موجودی واگن خالی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی، کل تعداد ناوگان را مشخص می‌کند. شکل ۳ یک نمونه کروموزوم پیشنهادی را با چهار ایستگاه نشان می‌دهد.

$V_1(0)$	$V_2(0)$	$V_3(0)$	$V_4(0)$
۱۳۰	۴۲۸	۲۳۷	۱۷۵

شکل ۳. نمایش کروموزوم در نظر گرفته شده

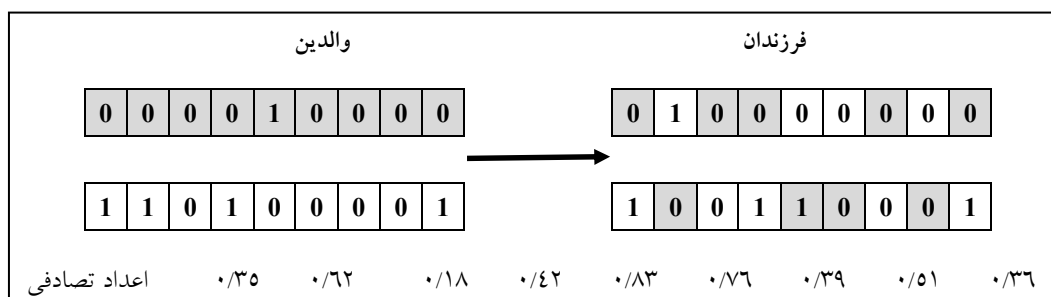
۴-۱-۲- تشکیل جمعیت اولیه

در این مقاله برای تولید جمعیت اولیه حالتی را در نظر می‌گیریم که خدمت‌دهی به تقاضاها با هیچگونه تأخیری مواجه نشود. برای این منظور باید حداکثر تعداد واگن‌های مورد نیاز را به دست آوریم، به نحوی که هر زمان تقاضایی وجود داشت، بتوان بلافاصله آن را برآورده کرد. برای محاسبه حداکثر تعداد واگن‌ها فرض می‌کنیم کلیه تقاضاها در زمان مقرر به مقصد می‌رسند و با تأخیر مواجه نمی‌شوند. سپس میزان کمبود یا مازاد واگن در گره‌های شبکه محاسبه می‌شود. حداکثر تعداد واگن برابر با مجموع کمبود واگن، در گره‌های شبکه است.

بنابراین هنگام تولید جواب اولیه، مجموع محتوای ژن‌های هر کروموزوم باید کوچکتر یا مساوی با حداکثر تعداد واگن‌ها باشد. به علاوه محتوای هر ژن نباید از یک حد خاص کوچکتر در نظر گرفته شود. کران پایین هر ژن برابر است با مجموع تقاضای واگن پُر که باید در ابتدای دوره برنامه‌ریزی از آن ایستگاه اعزام شود. قابل ذکر است که استفاده از این روش، زمان حل مسئله را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد، بنابراین برای کاهش زمان حل مسئله، به جای در نظر گرفتن کران بالا برای کروموزوم می‌توان برای هر ژن کران بالا در نظر گرفت.

۴-۱-۳- روش انتخاب

به منظور شروع فرآیندهای تولید نسل در الگوریتم ژنتیک، اولین عملگر، انتخاب والد است که به انتخاب دو کروموزوم از جمعیت، تحت عنوان کروموزوم‌های والد^۶ می‌پردازد و آنها را برای تولید کروموزوم‌های جدید وارد مرحله تولید نسل و اعمال عملگرهای باز ترکیب و جهش می‌کند. در این مقاله از مکانیزم



شکل ۴. عملگر باز ترکیب یکنواخت

۴-۱-۶- جایگزینی

جواب‌های با مقدار تابع هدف بدتر را نیز با احتمال غیر صفری قبول می‌کند. در شرایط تعادلی (تبرید تدریجی) برای هر دمای داده شده، احتمال این که ذرات ماده دارای سطح انرژی خاصی باشند، طبق تابع توزیع بولتزمن محاسبه می‌شود.

$$p_r \{E = E'\} = \frac{1}{Z(t)} \text{Exp}\left(-\frac{ER}{kT}\right) \quad (10)$$

این احتمال در ابتدا بزرگ است و ضمن اجرای روش متناسب با پارامتر مثبتی به نام دما کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه روش تبرید شبیه‌سازی شده از نظر تئوری با غلبه بر بهینگی محلی قادر به یافتن جواب بهینه سراسری نیز خواهد بود. در ادامه به تشریح اجزای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای تخصیص ناوگان به تقاضاها می‌پردازیم.

۴-۲-۱- نمایش جواب

برای نمایش جواب‌های الگوریتم سه نوع ماتریس خواهیم داشت. ماتریس اول نشان‌دهنده جابه‌جایی واگن‌های پُر، ماتریس دوم نشان‌دهنده جابه‌جایی واگن‌های خالی و ماتریس سوم نشان‌دهنده تقاضاهایی که با تأخیر مواجه شده‌اند، است. هر سه نوع ماتریس به تعداد دوره‌های زمانی تکرار می‌شوند. ابعاد ماتریس‌ها نیز برابر با تعداد ایستگاه‌های شبکه است. با استفاده از ماتریس‌های فوق نحوه جابه‌جایی واگن‌ها بین زوج‌های مبدأ-مقصد در دوره‌های زمانی مختلف مشخص می‌گردد.

۴-۲-۲- تعیین جواب اولیه

در شروع الگوریتم یک ماتریس تقاضا بین زوج مبدأ-مقصد‌ها داریم که لازم است هر تقاضا در زمان معین شده توسط مشتری به مقصد برسد. در صورتی که تقاضا دیرتر از زمان تعیین شده به مقصد برسد، در تابع هدف جریمه تأخیر در نظر گرفته می‌شود.

دو رویکرد کلی در عملگر جایگزینی^{۱۱} وجود دارد، رویکرد اول براساس طول عمر^{۱۳} جواب‌ها، عمل می‌کند و رویکرد دوم براساس برازندگی^{۱۴} جواب‌ها، انتخاب می‌کند. در این مقاله از روش نخبه‌گرایی که براساس برازندگی جواب‌ها عمل می‌کند استفاده می‌شود. در این روش نسل قبل و فرزندان تولید شده در یک ظرف قرار می‌گیرند، سپس از بین آنها k درصد جواب بهتر نگهداری می‌شود و بقیه جواب‌ها با استفاده از روش تصادفی انتخاب می‌شوند. قابل ذکر است که تعداد جمعیت در هر نسل ثابت باقی می‌ماند.

۴-۱-۷- شرط خاتمه الگوریتم

در این مقاله دو شرط برای خاتمه الگوریتم^{۱۵} در نظر گرفته شده است که اگر یکی از این دو شرط برقرار شود، الگوریتم پایان می‌پذیرد. شرط اول عدم بهبود جواب در تعدادی تکرار متوالی است و شرط دوم تعداد نسل‌های تولید شده است.

۴-۲- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

ایده استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نخستین بار توسط کرک پاتریک در سال ۱۹۸۶ میلادی [Kirkpatrick, Gelatt and Vecchi, 1983] مطرح شد. این الگوریتم به عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری کارآ که مبتنی بر جستجوی همسایگی در فضای جواب و پذیرش جواب‌های احتمالی و نامرغوب (برای فرار از دام بهینه محلی و دست‌یابی به جواب بهتر) است، برای حل مسایل پیچیده ترکیبی^{۱۶} به‌کار می‌رود. تبرید شبیه‌سازی شده از فرآیند فیزیکی خنک‌سازی مواد مذاب به حالت جامد الهام گرفته شده است. این روش برخلاف روش‌های جستجوی حریمانه، در هر تکرار علاوه بر حرکت به سوی جواب بهتر،

روی آن کمان از موجودی واگن خالی در ایستگاه مبدأ و نیز از تقاضای بروز شده کمان بیشتر نشود. در صورت نقض شرط اول، آن همسایگی حذف شده و همسایگی دیگری انتخاب می‌شود و در صورت نقض شرط دوم، مقدار جریان روی کمان برابر با مقدار تقاضای بروز شده در نظر گرفته می‌شود. قابل ذکر است در صورتی که مقصد کمان انتخاب شده، آخرین دوره زمانی باشد همه تقاضای آن کمان پوشش داده می‌شود.

در صورتی که مقدار جریان کاهش یافت، مازاد آن به موجودی واگن در ایستگاه مبدأ اضافه شده و این مقدار جریان به کمان‌های حامل واگن پُر که بخشی از تقاضای آنها برآورده نشده است، تخصیص می‌یابد. اگر باز هم واگن خالی باقی ماند به کمان‌های حامل واگن خالی تخصیص داده می‌شود. سپس تقاضای کمان‌های مشابه در دوره بعد بهنگام‌سازی شده و از دوره زمانی بعد، مقدار جریان روی کمان‌ها تنظیم می‌گردد. در صورتی که مقدار جریان افزایش یافت، باید مقدار اضافه شده از سایر کمان‌های خروجی از ایستگاه مبدأ تأمین شدند.

حالت دوم: اگر کمان واگن خالی انتخاب شد، مقدار آن با عددی در بازه $[+0.3Y, -0.3Y]$ جمع می‌شود به نحوی که از موجودی واگن در ایستگاه مبدأ بیشتر نشود. در صورتی که مورد فوق نقض گردید، آن همسایگی حذف شده و همسایگی دیگری انتخاب می‌شود و سپس مشابه قبل عمل می‌شود.

۴-۲-۴- زمان‌بندی کاهش دما

دمای سیستم با T نشان داده می‌شود که درجه تصادفی بودن حرکت به سوی جواب را تعیین می‌کند و مطابق با یک برنامه معین با پیشرفت روش حل کاسته می‌شود. در واقع دمای سیستم مشخص کننده زیرفضای جواب مسئله است که در هر تکرار مورد قبول قرار می‌گیرد. در دمای بالا اکثر جواب‌های تولید شده صرف‌نظر از مقدار تابع هدف پذیرفته می‌شوند. با پیشرفت الگوریتم و کاهش دما، جواب‌های نامناسب شانس کمتری برای پذیرفته شدن دارند. در واقع در هر دما احتمال پذیرفتن جواب با مقدار تابع هدف بیشتر بستگی به اندازه افزایش Δf دارد.

فرآیند کاهش دما، دمای T_i در هر مرحله i از الگوریتم را مشخص می‌نماید. این فرآیند تأثیر بسیار زیادی در موفقیت الگوریتم دارد. پارامترهایی که در تعریف زمان‌بندی کاهش دما

به علاوه باید مجموع تقاضاها تا پایان دوره برنامه‌ریزی پاسخ داده شوند. در این مقاله برای تعیین جواب اولیه و تخصیص جریان به هر کمان ابتدا از دوره زمانی اول شروع می‌کنیم و در این دوره زمانی به ترتیب از اولین ایستگاه ($i=1$) تا آخرین ایستگاه ($i=n$) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای هر ایستگاه، 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: در صورتی که موجودی واگن خالی بیشتر از مجموع تقاضا باشد، کلیه تقاضاها پاسخ داده می‌شوند و در صورت باقی ماندن واگن خالی، آنها نیز با توجه به میزان کمبود یا مازاد واگن در مقصد کمان اعزام می‌شوند. قابل ذکر است که ایستگاه‌های مقصدی که دارای کمبود هستند در اولویت قرار می‌گیرند.

حالت دوم: در صورتی که موجودی واگن خالی کمتر از مجموع تقاضا باشد، فقط واگن پر ارسال می‌شود. در این حالت، مقصد کمان‌های خروجی در نظر گرفته می‌شود، اگر مقصد کمانی آخرین دوره زمانی است، همه تقاضای آن برآورده می‌گردد و سپس در صورت باقی ماندن واگن خالی نسبت به سایر کمان‌های تقاضا تخصیص می‌یابد. در حالتی که مقصد همه کمان‌های خروجی آخرین دوره زمانی باشد، واگن‌ها به نسبت تقاضای هر کمان بین آنها تقسیم می‌شود.

پس از تعیین وضعیت کمان‌های خروجی از ایستگاه‌ها در دوره زمانی اول باید ماتریس تقاضا بهنگام‌سازی شود چرا که تقاضاهای پاسخ داده نشده در این دوره به کمان مشابه در دوره زمانی بعد منتقل می‌شوند. در مرحله بعد به سراغ ایستگاه‌ها در دوره زمانی دوم می‌رویم و رویه‌ای را که در بالا ذکر شد، برای آن ایستگاه‌ها اجرا می‌کنیم و به همین ترتیب تا آخرین دوره زمانی (T_e) پیش می‌رویم.

۴-۲-۳- ساختار همسایگی

هنگامی که جواب اولیه S در اختیار باشد، باید جواب همسایه S' مشخص گردد. به منظور ایجاد جواب همسایه، یکی از کمان‌های شبکه اعم از کمان جابه‌جایی واگن پُر یا واگن خالی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس مقدار جریان روی آن تغییر داده می‌شود. در این روش دو حالت پیش می‌آید.

حالت اول: اگر کمان واگن، پر انتخاب شود مقدار آن با عددی در بازه $[+0.3X, -0.3X]$ جمع می‌شود به نحوی که جریان واگن

پیشنهادی مسائلی که برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شده در ارزیابی عملکرد الگوریتم مورد استفاده قرار نگرفته است [Yaghini and Akhavan, 2010, Talbi, 2009].

با اجرای روش ذکر شده، پارامترهای به دست آمده برای الگوریتم ژنتیک عبارتند از: اندازه جمعیت = $4 \times$ تعداد ایستگاه، حداکثر تعداد نسل تولید شده = 800، تعداد تکرار عدم بهبود جواب = 500، تعداد جواب‌های خبره = $0.1 \times$ اندازه جمعیت، احتمال عملگر باز ترکیب = 0.7 ، و پارامتر آلفا برای عملگر جهش = $1/6$ ؛ و پارامترهای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده عبارتند از: دمای اولیه = 500، دمای نهایی = 30، نرخ سرد شدن = 0.9 ، تعداد تکرار در دمای ثابت = 10، و تعداد تکرار عدم بهبود جواب: 30.

شکل 5 نحوه تغییرات درصد خطا را در طول فرآیند تنظیم پارامترها در یک مسئله نمونه‌ای که دارای 10 ایستگاه و 10 دوره زمانی است، نمایش می‌دهد.

2-5- حل یک مثال عددی

در این بخش به منظور روشن‌تر کردن نحوه مدل‌سازی و راه حل ارایه شده، یک مثال عددی با ابعاد کوچک به شرح زیر تعریف و در ادامه نحوه حل آن بیان می‌شود.

این مسئله شامل 4 ایستگاه و 4 دوره زمانی است، به عبارت دیگر شبکه دارای 20 گره است. هر گره می‌تواند هم به عنوان مبدأ و هم به عنوان مقصد در نظر گرفته شود، بنابراین 12 زوج مبدأ-مقصد در هر دوره زمانی موجود است که در کل دوره برنامه‌ریزی 48 زوج مبدأ-مقصد خواهیم داشت.

هر زوج مبدأ-مقصد دارای یک مقدار تقاضا است که زمان تحویل تقاضا به مقصد نیز از قبل توسط مشتری تعیین شده است. زمان سیر بین ایستگاه‌های مختلف متفاوت است و با توجه به مسافت بین ایستگاه‌ها تعیین می‌گردد. مقادیر درآمد و هزینه‌های مختلف نیز براساس اطلاعات راه آهن جمهوری اسلامی ایران در نظر گرفته شده است [شدتی و همکاران، 1386]. جداول 1 تا 4 پارامترهای مسئله ذکر شده را نشان می‌دهند. هزینه جریمه ناشی از تأخیر در خدمت‌دهی به تقاضاها برابر با 6000 ریال در نظر گرفته شده است.

در نظر گرفته می‌شوند، عبارتند از: دمای اولیه، تعداد تکرار در هر دما، تابع کاهش دما و دمای نهایی. همچنان که قبلاً ذکر شد، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای فرار از بهینه محلی از یک تابع احتمالی برای پذیرش جواب‌های همسایه‌ای که بهبود نیافته‌اند، استفاده می‌کند. این تابع به صورت زیر است:

$$P(\Delta E, T) = e^{\frac{-\Delta E}{T}} \quad (11)$$

بنابراین احتمال پذیرش جواب‌هایی که بهبود نیافته‌اند وابسته به درجه حرارت T و تغییر تابع هدف ΔE است. در این مقاله برای کاهش درجه حرارت از روش پویای هندسی¹⁷ استفاده می‌شود که در زیر آورده شده است.

$$T_{i+1} = \alpha T_i \quad 0 < \alpha < 1 \quad (12)$$

4-2-5- شرط خاتمه الگوریتم

در این مقاله دو شرط برای خاتمه الگوریتم در نظر گرفته شده است که اگر یکی از این دو شرط برقرار شود الگوریتم پایان می‌پذیرد. شرط اول، عدم بهبود جواب در تعدادی تکرار متوالی و شرط دوم رسیدن به دمای نهایی است.

5- تحلیل نتایج

5-1- تنظیم پارامترها

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی برای کلیه پارامترها یک محدوده تغییر در نظر گرفته شده است و سپس مقادیر کلیه پارامترها برابر با مقدار میانگین محدوده تعیین شده قرار داده می‌شود. مقدار هر پارامتر در محدوده تعیین شده تا رسیدن به بهترین جواب (جواب مناسب) تغییر داده می‌شود و در نهایت مقادیر کلیه پارامترهای الگوریتم پیشنهادی تنظیم می‌گردد.

با توجه به اینکه تاکنون، مسئله مورد نظر با استفاده از روش فراابتکاری ترکیبی حل نشده است، برای تعیین محدوده تغییرات هر پارامتر از مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری مشابه استفاده شده است. برای جلوگیری از بیش برآزش پارامترهای الگوریتم

این مسئله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتایج به‌دست آمده، در اشکال ۶ و ۷ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، موجودی واگن در ابتدای شبکه با موجودی واگن در انتهای شبکه برابر است که نشان‌دهنده تعادل در شبکه است، بنابراین تعداد ناوگان بهینه برابر است با حاصل جمع موجودی ناوگان در ایستگاه‌های مختلف در ابتدا یا انتهای دوره برنامه‌ریزی که در این مثال برابر با ۶۹۷ واگن است. به عبارت دیگر با این تعداد واگن، تقاضایی معادل با ۳/۱ برابر تعداد ناوگان، پاسخ داده شده است. مجموع تعداد واگن‌هایی که دچار تأخیر شده‌اند برابر با ۸۳ است و تمامی تقاضاها تا پایان دوره برنامه‌ریزی پاسخ داده شده‌اند.

۵-۳- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارایه شده، هفت مسئله با ابعاد مختلف شبیه‌سازی شده است. پارامترهای مورد استفاده در تولید مسائل شبیه‌سازی شده از اطلاعات واقعی راه آهن جمهوری اسلامی ایران گرفته شده‌اند. اطلاعات مرتبط با مسایل تولید شده در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مقایسه جواب‌های به دست آمده از حل مسایل نمونه‌ای با ابعاد مختلف با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ترکیبی پیشنهادی با جواب‌های بهینه به‌دست آمده از نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX نسخه ۱۱ در جدول ۶ نشان داده شده است.

در جدول ۶ در قسمت تابع هدف، ستون CPLEX، جواب بهینه به‌دست آمده از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌ساز CPLEX را نشان می‌دهد. همچنین ستون GA & SA جواب به‌دست آمده از حل مدل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرم‌افزار بهینه‌ساز پس از ۲۴ ساعت اجرای مسئله هفتم نتوانست به جواب شدنی دست یابد، بنابراین جواب بهینه این مسئله در دسترس نیست. درصد انحراف از جواب بهینه برای جواب‌های تولید شده به‌طور متوسط در هر مسئله به‌صورت جدول ۷ به دست آمده است.

شایان ذکر است که الگوریتم پیشنهادی تحت نرم‌افزار MATLAB (R2008a) برنامه‌نویسی و پیاده و روی سیستمی با پردازشگر ۱/۸۱ GHz و حافظه ۱ GB اجرا شده است. باتوجه به نتایج تولید شده و همچنین درصد انحراف ۳/۹ درصد در کل مسائل نمونه‌ای می‌توان گفت که روش پیشنهادی نتایج قابل قبولی ارایه می‌کند.

جدول ۱. تقاضای مشتریان (بر حسب تعداد واگن)

دوره زمانی (بر حسب روز)				مقصد	مبدأ
t ₄	t ₃	t ₂	t ₁		
۱۴	۷۵	۳۲	۱۰	S ₂	S ₁
۲۲	۸۲	۵۶	۹	S ₃	
۲۸	۶۰	۲۰	۱۶	S ₄	
۷۹	۴۵	۱۵	۱۰	S ₁	S ₂
۳۱	۷۵	۹۷	۲۲	S ₃	
۴۹	۸۰	۹۲	۱۰	S ₄	
۹۴	۵	۶۴	۴۵	S ₁	S ₃
۸۷	۶۰	۷۶	۲	S ₂	
۶۱	۵۲	۳۰	۵۱	S ₄	
۶۷	۴۵	۲۲	۸۸	S ₁	S ₄
۱۳	۶۴	۱۶	۱۰	S ₂	
۵۵	۷۴	۴۱	۱۱	S ₃	

جدول ۲. هزینه حمل واگن خالی (ریال)

S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	
۴۰۰۴۶۴	۳۵۴۳۲۰	۷۴۸۱۹۲	-	S ₁
۹۳۲۷۶۸	۴۳۱۷۷۶	-	۷۴۸۱۹۲	S ₂
۴۶۹۶۸۰	-	۴۳۱۷۷۶	۳۵۴۳۲۰	S ₃
-	۴۶۹۶۸۰	۹۳۲۷۶۸	۴۰۰۴۶۴	S ₄

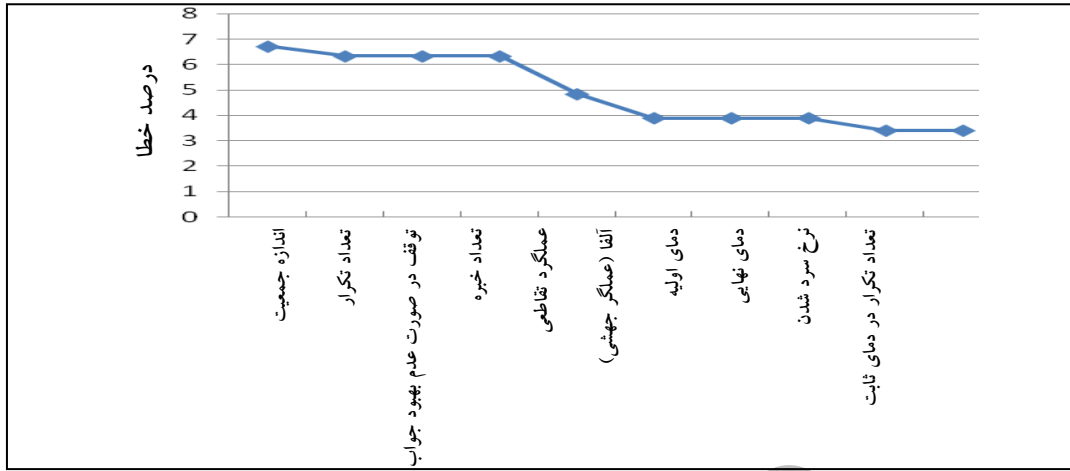
جدول ۳. هزینه حمل واگن باردار (ریال)

S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	
۱۲۰۱۳۹۲	۱۰۶۲۹۶۰	۲۲۴۴۵۷۶	-	S ₁
۲۷۹۸۳۰۴	۱۲۹۵۳۲۸	-	۲۲۴۴۵۷۶	S ₂
۱۴۰۹۰۴۰	-	۱۲۹۵۳۲۸	۱۰۶۲۹۶۰	S ₃
-	۱۴۰۹۰۴۰	۲۷۹۸۳۰۴	۱۲۰۱۳۹۲	S ₄

جدول ۴. درآمد حاصل از جابه‌جایی واگن باردار (ریال)

S ₃	S ₂	S ₁		
۲۰۰۲۳۲۰	۱۷۷۱۶۰۰	۳۷۴۰۹۶۰	-	S ₁
۴۶۶۳۸۴۰	۲۱۵۸۸۸۰	-	۳۷۴۰۹۶۰	S ₂
۲۳۴۸۴۰۰	-	۲۱۵۸۸۸۰	۱۷۷۱۶۰۰	S ₃
-	۲۳۴۸۴۰۰	۴۶۶۳۸۴۰	۲۰۰۲۳۲۰	S ₄

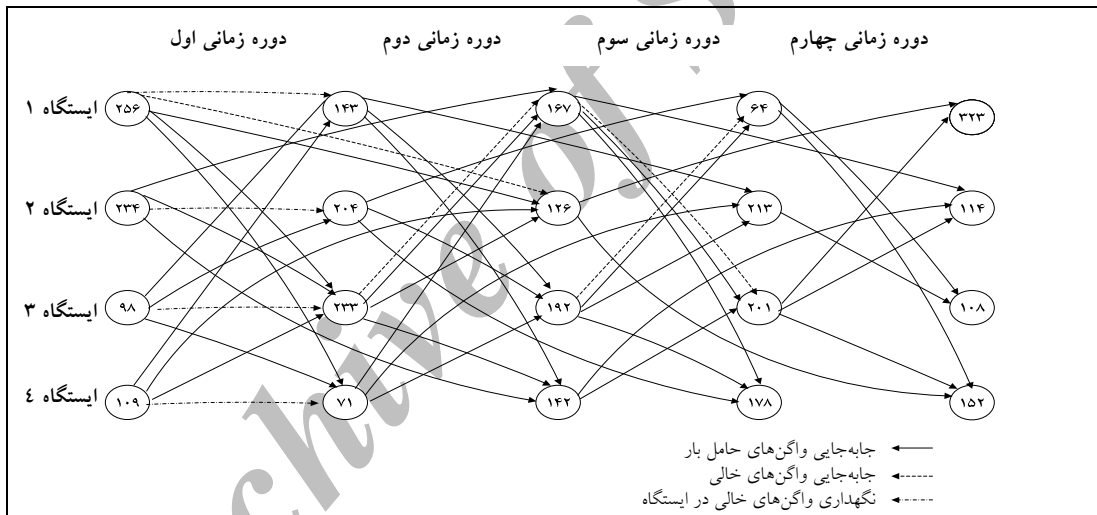
یقینی و خندق آبادی



شکل ۵. نحوه تغییرات درصد خطا

$V_1(0)$	$V_2(0)$	$V_3(0)$	$V_4(0)$
۲۵۶	۲۳۴	۹۸	۱۰۹

شکل ۶. جواب حاصل از الگوریتم ژنتیک



شکل ۷. جواب حاصل از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

جدول ۵. اطلاعات مرتبط با مسائل تولید شده

شماره مسئله	تعداد ایستگاه	تعداد دوره زمانی	تعداد متغیر تصمیم‌گیری	تعداد محدودیت
۱	۴	۴	۱۶۸	۹۸
۲	۷	۷	۹۴۵	۴۴۳
۳	۱۰	۱۰	۲۸۲۰	۱۲۰۲
۴	۲۰	۲۰	۲۳۲۴۰	۸۸۰۲
۵	۲۵	۲۵	۴۵۶۷۵	۱۶۸۱۷۷
۶	۳۰	۳۰	۷۹۲۶۰	۲۸۸۰۲
۷	۵۰	۵۰	۶۷۵۷۳۰۱	۱۳۰۰۰۰

حل مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان واگن‌های باری...

جدول ۶. مقایسه جواب‌های به دست آمده از حل مسائل نمونه‌ای با ابعاد مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، با جواب‌های بهینه به دست آمده از نرم‌افزار بهینه‌ساز

تابع هدف ($10^6 \times$)		تعداد واگن		زمان حل (ثانیه)		تعداد دوره زمانی	تعداد ایستگاه	شماره مسئله
CPLEX	GA & SA	CPLEX	GA & SA	CPLEX	GA & SA			
۰.۶۹۲	۰.۶۳۹	۰.۶۹۷	۰.۷۰۰	۴	۰.۱۱۷	۴	۴	۱
۱۲۲۲۳	۰.۱۱۳۷۱۸	۰.۲۰۴۳	۰.۲۱۱۵	۷	۰.۳۸۳	۷	۷	۲
۴۰۹۲۵	۰.۳۹۵۳۳	۵۰۱۱	۰.۵۰۴۱	۱۲	۰.۴۳۲۰	۱۰	۱۰	۳
۴۲۶۵۷۶	۰.۴۲۲۲۸۲	۰.۲۱۰۳۳	۲۱۱۰۴	۱۲۳۲	۰.۶۱۲۰	۲۰	۲۰	۴
۰.۸۲۹۷۰۲	۰.۸۰۲۱۳۶	۳۱۱۷۳	۳۱۹۴۴	۳۵۷۶	۰.۷۲۰۰	۲۵	۲۵	۵
۰.۱۴۶۷۵۲۱	۰.۱۴۲۵۱۶۹	۰.۴۴۷۵۱	۴۵۰۰۵	۱۲۱۳۷	۰.۲۵۹۳۰	۳۰	۳۰	۶
N/A	۶۶۹۹۷۳۲	N/A	۱۳۱۴۹۳	N/A	۰.۴۳۲۰۰	۵۰	۵۰	۷

جدول ۷. میانگین درصد خطا از جواب بهینه

شماره مسئله	تعداد ایستگاه	تعداد دوره زمانی	درصد خطا
۱	۴	۴	٪ ۷.۶
۲	۷	۷	٪ ۶.۸
۳	۱۰	۱۰	٪ ۳.۴
۴	۲۰	۲۰	٪ ۱.۰
۵	۲۵	۲۵	٪ ۲.۳
۶	۳۰	۳۰	٪ ۲.۸
۷	۵۰	۵۰	N/A
میانگین درصد خطا			٪ ۳.۹

۶- نتیجه‌گیری

مسئله تعیین اندازه ناوگان با هدف بیشینه کردن سود، طبق برنامه از پیش تعیین شده، تعداد ناوگان بهینه برای یک سیستم حمل و نقلی را مشخص می‌کند همچنین با تخصیص واگن‌ها به ایستگاه‌ها تلاش می‌کند. تقاضای مشتریان را در زمان مقرر پاسخ گوید. در این مقاله پس از بررسی‌های صورت گرفته بر روی مسئله تعیین اندازه ناوگان، یک روش حل ترکیبی برای این مسئله ارائه شده است. یکی از مزیت‌های مدل استفاده شده این است که تا حد امکان سعی می‌کند نیاز شبکه را از طریق واگن‌های خالی موجود در شبکه تأمین کند که این امر سبب کاهش حجم وسیعی از هزینه‌ها می‌شود. به علاوه مدل تضمین می‌کند که تا پایان دوره برنامه‌ریزی هیچگونه تقاضای پاسخ داده نشده‌ای

وجود نداشته باشد. با حل این مدل ریاضی می‌توان تعداد ناوگان در ایستگاه‌های مبدأ و مقصد و تعداد تقاضاهای تأمین نشده را طوری تعیین کرد که تعادل در شبکه حمل و نقلی برقرار گردد. الگوریتم ترکیبی ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده به‌عنوان روش حل برای مسئله پویای تعیین اندازه ناوگان ارائه شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارائه شده، مقایسه‌ای بین جواب‌های به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های حاصل از نرم‌افزار بهینه‌ساز CPLEX صورت گرفته است. نتایج مقایسه جواب‌ها از لحاظ زمان حل و کیفیت جواب حاصله، بر کیفیت خوب جواب‌ها تأکید دارند و کارایی الگوریتم را به اثبات می‌رسانند.

- 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.
- Diana, M., Dessouky, M. M. and Xia, N. (2006) "A model for fleet sizing of demand responsive transportation services with time windows", *Transportation Research, Part B*, Vol. 40, No. 8, pp. 651-666.
- Dong, J. X. and Song, D. P. (2009) "Effectiveness of an empty container repositioning policy with flexible destination ports", *IFSPA*, Vol. 45, No. 6, pp. 860-877.
- Du, Y. and Hall, R. (1997) "Fleet sizing and empty equipment redistribution for center-terminal transportation networks", *Management Science*, Vol. 43, No. 2, pp. 145-157.
- 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 Review*, Vol. 44, No. 3, pp. 440-454.
- Holland, John H. (1975) "Adaptation in natural and artificial system", Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press.
- Imai, A. and Rivera, F. (2001) "Strategic fleet size planning for maritime refrigerated containers", *Maritime Policy and Management*, Vol. 28, No. 4, pp. 361-374.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220, pp. 671-680.
- Köchel, 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.

در پایان لازم به ذکر است که می توان محدودیت ها و فرضیات دیگری به مدل ریاضی حل شده در این مقاله برای پژوهش های آتی اضافه کرد. از جمله این موارد می توان به وجود تنوع در ناوگان مورد استفاده و همچنین سازگاری بین محموله و وسیله نقلیه، در نظر گرفتن مسئله تعیین اندازه ناوگان با اهداف گوناگون، افزودن پنجره زمانی برای تأمین تقاضای مشتری و در نظر گرفتن حالت های مختلف مطلوبیت مشتری در پنجره زمانی و در نظر گرفتن ظرفیت وسیله نقلیه اشاره کرد. همچنین در اغلب تحقیقات صورت گرفته، حمل و نقل بار مورد توجه واقع شده و به حمل و نقل مسافر کمتر پرداخته شده است. به علاوه بیشتر تحقیقات انجام شده پیرامون ناوگان واگن بوده است و به بررسی مسئله با در نظر گرفتن لکوموتیو کمتر پرداخته شده است.

۷- پی نوشت ها

1. Metaheuristic
2. Exact Method
3. Fleet
4. Genetic Algorithm
5. Simulated Annealing
6. Parents
7. Roulette Wheel Selection
8. Crossover
9. Uniform
10. Mutation
11. Creep Mutation
12. Replacement
13. Age-based Selection
14. Fitness-based Selection
15. Termination
16. Combinatorial
17. Geometric

۸- مراجع

- شدتی، هادی، ریواسی، احمد، حسینی، رسول، مؤمنی، رضا و شاجری، غلامرضا (۱۳۸۶) "نگاهی به روابط بین راه آهن ج.ا.ا و شرکت های حمل و نقل ریلی"، ویرایش اول، ایران: طاهر.
- 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.

- 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.
- Talbi, E. G. (2009) "Metaheuristics: From design to implementation", John Wiley & Sons.
- Turnquist, M. A. and Jordan, W. C. (1986) "Fleet sizing under production cycles and uncertain travel times", *Transportation Science*, Vol. 20, No. 4, pp. 227-236.
- Vis, F.A., Koster, B.M. and Savelsbergh, W. P. (2005) "Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal", *Transportation Science*, Vol. 39, pp. 249-260.
- Yaghini, M. and Akhavan, M. R. (2010) "DIMMA: A design and implementation methodology for metaheuristic algorithms - A perspective from software development", *International Journal of Applied Metaheuristic Computing* (to appear).
- Yaghini, M., Lessan, J. and Gholami Mazinan, H. (2010) "An efficient hybrid metaheuristic for capacitated p-median problem", *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 11-15.
- Lei, L., Armstrong, R. and Gu, S. (1993) "Minimizing the fleet size with dependent time-window and single-track constraints", *Operations Research Letters*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-98.
- Li, Z. and Tao, F. (2010) "On determining optimal fleet size and vehicle transfer policy for a car rental company", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 341-350.
- 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", *Transportation Research, Part E*, Vol. 39, No. 3, pp. 209-227.
- Malmberg, C. J. and Shen, Y. C. (1994) "Heuristic dispatching models for multi-vehicle materials handling systems", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 18, No. 3, pp. 124-133.
- 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 Marguire, L. W. (2000) "Determining rail fleet sizes for shipping automobiles", *Interfaces*, Vol 30, No. 6, pp. 80-90.