

ارائه یک مدل تعیین اندازه بهینه ناوگان در سیستم توزیع چندوجهی خودرو تحت عدم قطعیت

رامین نظری نیا^۱، علی حسین زاده کاشان^{۲*}

۱. گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه

با توجه به نقش روزافزون حمل‌ونقل در جوامع امروز، وجود یک ناوگان کارآمد به عامل مهمی در بهبود عملکرد سیستم‌های توزیع تبدیل شده است. به گونه‌ای که مدیریت صحیح ناوگان می‌تواند به طور مستقیم بر هزینه‌ها، زمان حمل‌ونقل، قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری، ایمنی و محیط‌زیست تأثیر بگذارد. از این رو، تعیین اندازه بهینه ناوگان در سازمان‌هایی که وابستگی زیادی به حمل‌ونقل دارند، ضرورتی اساسی برای کنترل و کاهش هزینه‌ها به شمار می‌رود. به همین منظور پژوهش حاضر به ارائه یک مدل تعیین اندازه بهینه ناوگان در سیستم توزیع چندوجهی خودرو پرداخته که در آن عدم قطعیت موجود در تقاضا و زمان سیر نیز در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی مسئله با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری و براساس محدودیت‌ها و شرایط دنیای واقعی طراحی شده است. همچنین در مدل ارائه شده علاوه بر امکان خرید تریلر و واگن خودروبر، امکان انعقاد قراردادهای اجاره کوتاه‌مدت و بلندمدت نیز بررسی شده است. افزون بر این، استفاده از داده‌های واقعی در فرآیند مدل‌سازی در کنار تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم مسئله، بر اعتبار نتایج پژوهش افزوده است. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار گمز و حل‌کننده سیپلکس حل شده و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی در شرکت مورد مطالعه نشان از استفاده حداکثری از بودجه خرید برای تهیه ناوگان ملکی دارد. همچنین مشخص شد که پیاده‌سازی مدل ارائه شده می‌تواند مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه را نسبت به روند کنونی حدود ۲۱/۳۴ درصد کاهش دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۹/۱۴

بازنگری ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

پذیرش ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی،

برنامه‌ریزی تصادفی،

تعیین اندازه ناوگان،

حمل‌ونقل،

توزیع خودرو.

۱. مقدمه

در جوامع امروزی، نیاز به برخورداری از ناوگانی کارآمد در حوزه حمل‌ونقل، به طور فزاینده‌ای اهمیت یافته است. مسئله تعیین اندازه ناوگان به عنوان یکی از مباحث کلیدی و راهبردی در مدیریت حمل‌ونقل و لجستیک، همواره مورد توجه پژوهشگران و تصمیم‌گیران قرار داشته و از دیرباز به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه مطرح بوده است. این مسئله شامل فرآیند تصمیم‌گیری درخصوص تعداد و نوع وسایل نقلیه‌ای است که باید در ناوگان حضور داشته باشند

تا نیازهای حمل‌ونقل سازمان‌ها به شکل بهینه پاسخ داده شود [۱]. به عبارت دیگر، مسئله تعیین اندازه ناوگان به معنای تطبیق عرضه وسایل نقلیه با تقاضای حمل‌ونقل از طریق تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه است. به گونه‌ای که هزینه‌های مرتبط با ناوگان کاهش یافته و نیازهای حمل‌ونقل به طور کامل برآورده شود [۲]. علاوه بر این، مدیریت بهینه ناوگان می‌تواند نقش چشمگیری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف سوخت ایفا کند، که این امر به طور قابل توجهی در دستیابی به اهداف پایداری زیست‌محیطی مؤثر خواهد بود. توجه به این جنبه از

* نویسنده مسئول: علی حسین زاده کاشان

تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۹۸؛ پست الکترونیکی: a.kashan@modares.ac.ir

واقع‌بینانه کل هزینه‌ها در افق برنامه‌ریزی مورد بررسی جهت انطباق بیشتر با شرایط موجود در دنیای واقعی امری ضروری است. به‌همین منظور، پژوهش حاضر به دنبال تعیین اندازه ناوگان با هدف حداقل نمودن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت ارائه‌دهنده خدمات حمل‌ونقل در سیستم توزیع خودرو با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان سیر است. بنابراین سؤالاتی که این پژوهش درصدد یافتن پاسخ آن‌ها است، به شرح زیر است:

- مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری ناوگان شرکت‌ها در حالت بهینه چقدر است؟
 - درصد حمل سفارش‌ها توسط ناوگان جاده‌ای و ریلی در حالت بهینه چقدر است؟
 - اندازه بهینه ناوگان ملکی، تحت قرارداد اجاره بلندمدت و کوتاه‌مدت شرکت در شیوه حمل جاده‌ای چقدر است؟
 - اندازه بهینه ناوگان ملکی، تحت قرارداد بلندمدت و کوتاه‌مدت شرکت در شیوه حمل ریلی چقدر است؟
- برای پاسخ به این پرسش‌ها و در راستای دستیابی به هدف اصلی تحقیق که کاهش مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت ارائه‌دهنده خدمات حمل‌ونقل است، یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین اندازه بهینه ناوگان ابتدا در حالت قطعی بودن تمام پارامترها و سپس با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت در تقاضا و زمان سیر در قالب برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط^۱ فرموله شده و سپس مورد حل قرار گرفته است.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق

با بررسی و مطالعه منابع مرتبط در این حوزه، در ادامه چکیده‌ای از پژوهش‌های پیشین که با موضوع تحقیق حاضر ارتباط دارند، ارائه می‌شود. این مطالب بر پایه مقالات علمی منتشر شده در نشریات معتبر گردآوری شده‌اند. هدف اصلی از این مرور، ترسیم تصویری کلی از مطالعات انجام‌شده در این زمینه و مشخص نمودن جایگاه تحقیق حاضر در میان پژوهش‌های پیشین است. به این صورت که در ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور مورد بررسی قرار گرفته و سپس به مطالعات خارجی پرداخته شده است.

«مسیحی» و «مفاخری» [۸] به مدل‌سازی و حل مسئله تعیین اندازه بهینه واگن‌های باری در سیستم حمل‌ونقل ریلی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه پرداختند. مدل بهینه‌سازی ارائه‌شده، یک مدل قطعی و پویا با دو تابع هدف بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی تعداد تاخیرات بود. به علاوه برای حل مدل پیشنهادی، از روش‌های فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده و ترکیب این دو الگوریتم استفاده شد. همچنین در مدل پیشنهادی، ناوگان واگن‌های باری به صورت ناهمگن در نظر گرفته شده و تقاضای مشتریان به همراه زمان حرکت واگن‌ها به طور قطعی لحاظ شد.

«فرازمند» و «پیشوایی» [۹] به طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی

مدیریت ناوگان می‌تواند موجب کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از صنعت حمل‌ونقل شود [۳]. از طرفی، مدیریت ناوگان وسایل نقلیه یکی از موضوعات اساسی در حوزه‌های لجستیک و حمل‌ونقل است که با گذشت زمان و با پیچیده‌تر شدن نیازهای صنعت، اهمیت بیشتری پیدا کرده است، به گونه‌ای که رقابت شدید بین ارائه‌دهندگان خدمات حمل‌ونقل منجر به افزایش تقاضا برای خدمت‌دهی مناسب به مشتریان و کاهش هزینه‌ها در حمل‌ونقل می‌شود. اخیراً نیز تغییرات آب‌وهوا و سایر نگرانی‌های زیست‌محیطی به محرک‌های مهمی برای حمل‌ونقل کارآمدتر تبدیل شده‌اند [۴].

افزون‌براین در مسائل سرمایه‌گذاری و تصمیم‌گیری‌های اقتصادی در سیستم‌های لجستیکی و حمل‌ونقل، مفهوم ارزش زمانی پول و تنزیل جریان‌های نقدی به عنوان یک اصل بنیادی در ارزیابی هزینه‌ها و منافع آتی مورد توجه قرار می‌گیرد [۵]. در کنار این موضوع، در ادبیات مدیریت ناوگان سن وسایل نقلیه به عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر هزینه‌های نگهداری و قابلیت اطمینان سیستم شناخته می‌شود، به طوری که با افزایش عمر عملیاتی ناوگان، هزینه‌های تعمیر و نگهداری افزایش و عملکرد عملیاتی کاهش خواهد یافت [۶].

از سمت دیگر کاهش در هزینه‌ها یکی از دلایل اصلی مطرح‌شده برای برون‌سپاری در فرآیندهای لجستیکی است. علاوه بر این، تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که در شرایط کنونی، استفاده از راهکارهای ترکیبی ساخت و خرید ناوگان می‌تواند نتایج قابل‌قبولی در کاهش میزان هزینه‌ها به همراه داشته باشد [۷]. از این رو، تعیین اندازه ناوگان به منظور تأمین تقاضای حمل‌ونقل از اهمیت بالایی در سازمان‌ها برخوردار است. این مسئله به عنوان یکی از ارکان اساسی مدیریت لجستیک و حمل‌ونقل، نقشی کلیدی در افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کند.

شرکت‌هایی که خدمات حمل‌ونقل ارائه می‌دهند، به منظور ارسال و توزیع سفارش‌های وارده به نقاط تقاضا، نیازمند ناوگانی متشکل از انواع مختلف وسایل نقلیه هستند. این پژوهش به تعیین اندازه بهینه ناوگان در دو شیوه حمل جاده‌ای و ریلی در شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات حمل‌ونقل می‌پردازد. بنابراین تعداد تریلرها و واگن‌های خودروبر ملکی و تحت قرارداد اجاره در ناوگان این شرکت‌ها می‌بایست به گونه‌ای تعیین شوند که کل هزینه‌های موردانتظار عملیاتی ناوگان حداقل گردد. همچنین بنابر وجود استانداردهایی در خصوص سن وسایل نقلیه موجود در ناوگان حمل‌ونقل، در نظر گرفتن سن وسایل نقلیه و مشخص نمودن بخشی از ناوگان حمل‌ونقل که می‌بایست مستهلک و از ناوگان فعال خارج شوند موضوعی مهم و حائز اهمیت می‌باشد. همچنین از آنجایی که برخی هزینه‌ها (مانند: هزینه تعمیرات اساسی واگن‌های خودروبر) برای مدتی طولانی‌تر از افق برنامه‌ریزی مورد بررسی پرداخت خواهند شد، لازم است با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول با توجه به نرخ تورم سهم آن افق زمانی مورد بررسی از کل هزینه‌ای که پرداخت شده است را محاسبه نمود. این امر جهت محاسبه

ناشی از تأخیر بود. برای حل این مدل، از یک رویکرد فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شد. همچنین نتایج حاصل نشان داد که این روش ترکیبی با مدیریت بهینه واگن‌های خالی و کاهش هزینه‌های عملیاتی، موجب ایجاد دقت و کارایی قابل توجهی در حل مسائل پیچیده و در ابعاد بزرگ شد.

«کلسترهالفن» و همکاران [۱۵] مدلی ترکیبی جهت تعیین اندازه ناوگان واگن‌های ریلی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند. این مدل در قالب یک فرآیند دو مرحله‌ای عمل می‌کرد؛ به این صورت که در مرحله اول، ساختار ناوگان و تعداد انواع مختلف واگن‌ها با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بهینه‌سازی می‌شود. به علاوه در مرحله دوم، با استفاده از نظریه موجودی، اندازه بهینه ناوگان و میزان ذخیره اطمینان با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های ناشی از تقاضا و زمان سفر تعیین گشت. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که بهینه‌سازی ساختار ناوگان و کاهش تنوع واگن‌ها، موجب کاهش قابل توجه هزینه‌ها و ارتقای مدیریت ناوگان می‌شود.

«میلنکوویچ» و همکاران [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی اندازه و تخصیص ناوگان واگن‌های باری ریلی به صورت پویا و تصادفی توسعه دادند. در مدل پیشنهادی، از کنترل پیش‌بین مدل و ترکیب روش ARIMA-Kalman برای پیش‌بینی تعداد واگن‌های موجود در هر ایستگاه و بهینه‌سازی فرآیند تخصیص استفاده شد. همچنین مدل پیشنهادی با لحاظ نمودن ناوگان به صورت ناهمگن و در نظر گرفتن تقاضای تصادفی، هزینه‌های کلی سیستم را کاهش و عملکرد بهتری در مدیریت تخصیص منابع ارائه داد.

«لی» و همکاران [۱۷] مدلی نوآورانه مبتنی بر بهینه‌سازی استوار دو مرحله‌ای برای حل مسئله تعیین اندازه و مسیریابی ناوگان تسهیلات متحرک تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. مدل پیشنهادی به دنبال تعیین بهینه اندازه ناوگان، تخصیص تقاضا و مسیرهای حرکت با استفاده از مجموعه عدم قطعیت چندوجهی بود. به علاوه برای حل مدل، از روش صفحه برش بهبود یافته بهره گرفته شد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌ها و مدیریت عدم قطعیت عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی دارد.

«هو» و همکاران [۱۸] به طراحی هم‌زمان اندازه ناوگان، مکان‌یابی هاب‌ها و تعیین ظرفیت آن‌ها در شبکه‌های لجستیکی شخص ثالث تحت محدودیت‌های ناشی از ازدحام جاده‌ای پرداختند. مدل پیشنهادی یک مدل تک‌هدفه، قطعی و ایستا با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های عملیاتی، حمل‌ونقل، خرید ناوگان، احداث هاب‌ها و هزینه‌های مربوط به ازدحام طراحی شد. به علاوه برای حل مدل پیشنهادی، از یک الگوریتم ریاضی-ابتکاری دوسطحی که ترکیبی از جستجوی مقطع طلایی و روش آنترپوی متقاطع می‌باشد، استفاده شد. همچنین مفاهیمی همچون محدودیت ازدحام جاده‌ای، تخصیص چندگانه و تحلیل حدی به منظور مدل‌سازی دقیق تر رفتار سیستم در شرایط واقعی به کار گرفته شد. و در نهایت در بخش نتایج و تحلیل عددی مشاهده شد که در شرایط ازدحام شدید، افزایش بی‌رویه اندازه

ریلی-جاده‌ای برای حمل سیمان در ایران پرداختند. مدل ریاضی ارائه شده، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه و با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداقل‌سازی حداکثر تاسف نسبی بود. مدل ارائه شده به صورت قطعی و سپس به صورت غیرقطعی و مبتنی بر سناریو مدل‌سازی شد. به علاوه رویکردی ایستا برای تحلیل استراتژیک شبکه در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح اتخاذ و با استفاده از سیپلکس حل شد.

اگر بخواهیم تاریخچه و مسئله تعیین اندازه ناوگان را بررسی کنیم، می‌توان نخستین پژوهش علمی در این حوزه را به تحقیق «دانتزیگ» و «فولکرسون» [۱۰] در سال ۱۹۵۴م. نسبت داد، اما به دلیل اهمیت به روز بودن منابع علمی، شناسایی شکاف‌های پژوهشی جدید و همچنین انطباق با شرایط و نیازهای روز دنیا، در ادامه، تمرکز این مطالعه صرفاً بر بررسی پژوهش‌هایی خواهد بود که طی ۱۵ سال اخیر در این زمینه انجام شده‌اند.

«سپارشاد» و همکاران [۱۱] یک مدل ریاضی سه‌هدفه برای برنامه‌ریزی ناوگان واگن‌های ریلی ارائه دادند. مدل ارائه شده به طور همزمان سه هدف کلیدی کمینه‌سازی هزینه‌های خدمات، بیشینه‌سازی سود و کاهش اندازه ناوگان را دنبال کرده است. به علاوه برای حل مدل پیشنهادی، از روش محدودیت‌های الاستیک برای ساخت مجموعه پارتو استفاده و وزن اهداف از طریق روش آنترپوی محاسبه شد. همچنین مدل پیشنهادی با ارائه مجموعه‌ای از راهکارهای بهینه، موجب کاهش هزینه‌ها و ارتقای بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل ریلی گردید.

«سپارشاد» و «توکل‌مقدم» [۱۲] یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه، غیرقطعی و پویا برای تعیین اندازه ناوگان و تخصیص واگن‌های باری در سیستم حمل‌ونقل ریلی ارائه دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها به صورت برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با هدف بیشینه‌سازی سود خالص از عملیات حمل‌ونقل در شرایط عدم قطعیت تقاضا طراحی شد. به علاوه برای حل مدل ارائه شده از ترکیب تکنیک‌های برنامه‌ریزی تصادفی و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده استفاده شد. همچنین نتایج عددی حاصل از به کارگیری مدل پیشنهادی، کارایی مدل ارائه شده را در بهینه‌سازی ناوگان و کاهش هزینه‌های عملیاتی تأیید کرد.

«لوکستون» و همکاران [۱۳] به بررسی مسئله ترکیب ناوگان تصادفی با هدف تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه از هر نوع به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های انتظاری شامل هزینه‌های ثابت، متغیر و اجاره بود. مدل ارائه شده از برنامه‌ریزی تصادفی بهره گرفت و با استفاده از ترکیب روش‌های برنامه‌ریزی پویا و جستجوی مقطع طلایی، عملکرد قابل توجهی در حل مسائل با مقیاس بزرگ نشان داد. این مدل به صورت مؤثر توانست تأثیر عدم قطعیت تقاضا را مدیریت کند و ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و کاهش هزینه‌های عملیاتی در مدیریت ناوگان فراهم آورد.

«یقینی» و «خندق‌آبادی» [۱۴] مدلی پویا و چند دوره‌ای برای تعیین اندازه ناوگان واگن‌های ریلی توسعه دادند که هدف آن بیشینه‌سازی سود با لحاظ نمودن هزینه‌های مختلف و جریمه‌های

هزینه محرومیت تقاضا را کاهش داده و تاب‌آوری عملیات امدادسانی را بهبود دهد.

«بربر» و همکاران [۲۴] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای تعیین اندازه ناوگان، تخصیص جریان و زمان‌بندی حمل‌ونقل بار ریلی در مقیاس ملی ارائه کردند. نتایج حاصل از اجرای مدل روی شبکه ریلی سوئد نشان داد که مدل قادر است با رعایت محدودیت ظرفیت شبکه و ناوگان، برنامه حمل‌ونقل چرخه‌ای و واقع‌بینانه‌ای برای جابه‌جایی بار تولید کند.

«تنگ» و همکاران [۲۵] یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی برای تعیین همزمان فرکانس خدمات حمل‌ونقل عمومی و اندازه ناوگان وسایل نقلیه خودران اشتراکی در شبکه‌های چندوجهی شهری ارائه کردند. نتایج حل مدل با استفاده از رویکرد ترکیبی الگوریتم فراابتکاری PSO و برنامه‌ریزی غیرخطی در شبکه حمل‌ونقل شیکاگو نشان داد که مدل می‌تواند با بازطراحی خدمات و تخصیص بهینه ناوگان، تقاضای پوشش داده‌شده را تا ۳۳/۳ درصد افزایش دهد.

خلاصه‌ای از مقالات مرور شده در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول به‌منظور نمایش ساختارمند اطلاعات اصلی مطالعات مرتبط و تسهیل مقایسه میان آن‌ها تهیه شده است. در پژوهش‌های انجام شده با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته، برخی ابعاد کلیدی این حوزه هنوز به‌طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. بررسی محدودیت‌ها و کاستی‌های پژوهش‌های پیشین می‌تواند زمینه مناسبی برای شناسایی فرصت‌های تحقیقاتی جدید فراهم کند. برخی از شکاف‌های تحقیقاتی این حوزه عبارت‌اند از:

- هیچ‌یک از مطالعات تاکنون به تعیین اندازه ناوگان به‌ویژه در سیستم حمل‌ونقل چندوجهی خودرو نپرداخته بودند.
- هیچ‌یک از مطالعات مرور شده، امکان اجاره کردن تریلر و واگن خودرو در دو حالت کوتاه‌مدت و بلندمدت در نظر نگرفته‌اند.
- در هیچ‌یک از مطالعات مرور شده، سن ناوگان اولیه، اثر تورم و اثر ارزش زمانی پول در مدل‌سازی مسئله تعیین اندازه ناوگان مورد بررسی قرار نگرفته است.

این موارد نشان‌دهنده محدودیت‌های پژوهش‌های پیشین و فرصت‌های تحقیقاتی جدید برای گسترش دانش در این زمینه است. از این‌رو این پژوهش خلأهای تحقیقاتی بیان‌شده را نیز پوشش خواهد داد.

۳. تشریح مسأله

تعیین اندازه ناوگان یکی از وظایف اساسی در تمامی سطوح تصمیم‌گیری است که مالکان و مدیران ناوگان در تمامی شیوه‌های حمل‌ونقل با آن روبه‌رو هستند. این تصمیم‌گیری‌ها نقش حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کنند. از این‌رو تعیین اندازه بهینه ناوگان در صنعت خودروسازی، جهت حمل و توزیع خودروهای تولید شده به نقاط تقاضا با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های وارده بر سیستم، امری اجتناب‌ناپذیر و حائز اهمیت است.

ناوگان و ظرفیت هاب‌ها به کاهش کارایی سیستم منجر خواهد شد. «محتشم» و همکاران [۱۹] به تحلیل و ارائه استراتژی‌هایی برای بهینه‌سازی اندازه ناوگان کامیون‌ها در معادن روباز پرداختند. مدل‌های پیشنهادی بر پایه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط طراحی شد که با هدف کمینه‌سازی انحراف ضریب تناسب و ارتقای بهره‌وری، همراه با دو رویکرد متفاوت برای تخصیص کامیون‌ها به لودرها توسعه یافت. همچنین کارایی این مدل‌ها در یک مطالعه موردی در معدن مس سونگون مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نتایج حاصله نشان داد که استفاده از این مدل‌ها منجر به کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

«مانگوئینو» و «رونکونی» [۲۰] به بررسی مسأله تعیین اندازه و ترکیب ناوگان همراه با مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و تابع هزینه پلکانی پرداختند. مدل ریاضی پیشنهادی، یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه، قطعی و ایستا با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل بود. به‌علاوه برای حل مدل پیشنهادی دو الگوریتم ابتکاری درج ترتیبی معرفی شد. همچنین آزمایش‌های عددی نشان داد که روش‌های ابتکاری پیشنهادی عملکرد مناسبی در مقایسه با روش‌های موجود دارند و می‌توانند در حل مسائل واقعی کارآمد باشند.

«تئوس» [۲۱] مدلی برای بهینه‌سازی ترکیب ناوگان در خدمات جایگزینی خودرو تحت شرایط عدم قطعیت ارائه داد. این مدل با به‌کارگیری برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، تصمیمات تاکتیکی پیشینی مانند تعیین ظرفیت ناوگان را با تخصیص عملیاتی خودروها تلفیق نمود. هدف مدل پیشنهادی کاهش هزینه‌های عملیاتی و تضمین انجام تعهدات قراردادی با تأمین‌کنندگان خدمات بود. به‌علاوه، برای مدیریت عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضا و هزینه‌ها، از روش تقریب میانگین نمونه‌ای بهره گرفته شد. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، راهکارهایی کاربردی و بهینه جهت یاری در برنامه‌ریزی ظرفیت و مذاکره با تأمین‌کنندگان ارائه شد.

«کارمنش» و همکاران [۲۲] مدل بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای براساس سناریو ارائه دادند که هدف آن تعیین اندازه بهینه ناوگان واگن‌های ریلی و تخصیص واگن‌های خالی و بارگیری شده در دوره‌های زمانی مختلف با هدف بهینه‌سازی سود بود. از ویژگی‌های برجسته مدل ارائه شده می‌توان به امکان اجاره دادن واگن به سایر شرکت‌ها، اجاره کردن واگن از دیگر شرکت‌ها و همچنین در نظر گرفتن زمان توقف در ایستگاه‌ها به‌عنوان بخشی از فرآیند تخصیص اشاره کرد. همچنین مدل پیشنهادی برای یک مطالعه موردی واقعی در شبکه ریلی ایران بررسی و با بهره‌گیری از روش L-shaped حل شد.

«ابرهارت» و همکاران [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله تعیین اندازه و ترکیب ناوگان همراه با مسیریابی وسایل نقلیه در توزیع آخرین مایل امدادسانی پس از بحران ارائه کردند. نتایج مطالعه موردی در آلمان نشان داد که استفاده همزمان از ناوگان نا همگن شامل کامیون و پهپاد می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و

جدول (۱). خلاصه نزدیک‌ترین مقاله‌های مرتبط با مسأله مورد بررسی در این مقاله

پژوهندگان	سال	ایستاد	پویا	تک هدفه	چند هدفه	شیوه حمل و نقل			ناوگان اولیه	سن ناوگان اولیه	تورم	اثر زمانی پول	استهلاک	اجاره کردن ناوگان		قطعی	غیر قطعی				هزینه نگهداری ناوگان
						جاده‌ای	ریلی	هوایی						بلند مدت	کوتاه مدت		زمان‌ها	هزینه‌ها	درآمدها		
مسیحی و مفاخری	۲۰۱۵		✓		✓		✓								✓					✓	
فرازمند و پیشواپی	۲۰۱۸	✓			✓	✓	✓							✓			✓		✓		
سیارشاد و همکاران	۲۰۱۰		✓		✓		✓							✓		✓					
سیارشاد و توکلی مقدم	۲۰۱۰		✓	✓			✓							✓			✓			✓	
لوکستون و همکاران	۲۰۱۲		✓	✓			✓							✓				✓			
یقینی و خندق آبادی	۲۰۱۳		✓	✓			✓							✓		✓					
کلوسترهالفن و همکاران	۲۰۱۴		✓	✓			✓										✓	✓			
میلنکوویچ و همکاران	۲۰۱۵		✓	✓			✓										✓	✓			
لی و همکاران	۲۰۱۶		✓	✓		✓											✓				
هو و همکاران	۲۰۱۸	✓		✓		✓								✓							
محتشم و همکاران	۲۰۲۱	✓		✓		✓								✓							
مانگوئینو و رونکونی	۲۰۲۲	✓		✓		✓								✓		✓					
تئوس	۲۰۲۳		✓	✓		✓								✓			✓				
کارمنش و همکاران	۲۰۲۴		✓	✓		✓		✓							✓			✓		✓	
ابرهارت و همکاران	۲۰۲۵		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓						
بریر و همکاران	۲۰۲۶		✓	✓		✓		✓							✓						
نگ و همکاران	۲۰۲۶		✓	✓		✓	✓								✓						
پژوهش حاضر	۲۰۲۶		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

توزیع خودرو مسئله‌ای ناگزیر و بسیار مهم کرده است. حمل و توزیع خودروها در شیوه حمل هوایی معمولاً به دلیل هزینه بسیار بالا، محدودیت ظرفیت و ابعاد در حمل هوایی و عدم دسترسی کامل به نقاط تقاضا و در شیوه حمل ریلی به دلیل عدم دسترسی کامل به نقاط تقاضا و کاربرد محدود به صادرات و واردات (نه توزیع داخلی) معمولاً

اما به دلیل شرایط جوی نامناسب (برف، یخبندان، طوفان، سیلاب و ...)، عملیات‌های عمرانی و مسدود شدن مسیرها، محدودیت‌های زیست‌محیطی و آلودگی هوا، محدودیت‌های ترافیکی (تعطیلات رسمی و مذهبی) و... در بازه‌های زمانی خاص، استفاده از حمل و نقل چندوجهی را در سیستم‌های حمل و توزیع به‌ویژه سیستم حمل و

چشم‌پوشی قرار گرفته است.

- هیچ محدودیتی در تهیه ناوگان و دسترسی به لوکوموتیو وجود ندارد.

۳-۲. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل

به‌صورت کلی، مدل‌سازی برپایه ورودی‌ها و خروجی‌های مدل ریاضی، با توجه به ویژگی‌های مسأله مورد مطالعه انجام می‌گیرد. در این بخش مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل ریاضی پیشنهادی در حالت قطعی شرح داده خواهد شد.

مجموعه‌ها

I	مجموعه انواع وسایل نقلیه i ، تریلر خودروبر: $i = 1$
J	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی $(j \in J)$
N	مجموعه سن ناوگان اولیه فعال $(n \in N)$
K	مجموعه استان‌ها $(k \in K)$
K'	مجموعه استان‌ها با دارا بودن قابلیت حمل ریلی (علاوه بر قابلیت حمل جاده‌ای) به آن‌ها $(K' \subseteq K), (k' \in K')$

پارامترها

b	بودجه شرکت جهت خرید ناوگان.
θ	نرخ تورم در طول افق برنامه‌ریزی.
T	افق برنامه‌ریزی.
β	حداقل درصد از حمل تقاضا در افق برنامه‌ریزی به‌وسیله ناوگان ریلی.
β'	حداکثر درصد از حمل تقاضا در افق برنامه‌ریزی به‌وسیله ناوگان ریلی.
μ	هزینه ثابت هر تریلر خودروبر در افق برنامه‌ریزی.
λ	هزینه توزیع مویرگی خودروهای حمل‌شده توسط هر واگن خودروبر در ایستگاه راه‌آهن استان مقصد تا نقاط تقاضا در آن استان.
Ψ	هزینه تعمیرات اساسی هر واگن خودروبر.
ψ	تعداد سال موردنیاز جهت انجام تعمیرات اساسی برای هر واگن.
M	یک عدد بسیار بزرگ.
v_i	قیمت خرید هر وسیله نقلیه نوع i .
o_i	هزینه اجاره بلندمدت هر وسیله نقلیه نوع i .
c_i	ظرفیت وسیله نقلیه نوع i .
r_k	ظرفیت محوطه مانوری ایستگاه راه‌آهن استان k برحسب تعداد واگن خودروبر.
σ_i	عمر اسقاط وسیله نقلیه نوع i .
ϑ_i	ارزش اسقاط هر وسیله نقلیه نوع i .
γ_j	هزینه تعمیرات ویژه هر واگن خودروبر در دوره j .
η_k	هزینه متغیر هر تریلر خودروبر مختص به استان k .
φ_k	هزینه جابه‌جایی هر واگن خودروبر باردار از مبدأ ارسال تا استان k .
φ'_k	هزینه جابه‌جایی هر واگن خودروبر خالی از استان k تا مبدأ ارسال.
h_{ij}	هزینه اجاره کوتاه‌مدت هر وسیله نقلیه نوع i در دوره j .

مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. همچنین حمل و توزیع خودروها در شیوه حمل جاده‌ای و ریلی به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا، دسترسی تقریباً کامل به نقاط تقاضا، هزینه مقرون‌به‌صرفه، سرعت انتقال مناسب و قابل‌استفاده بودن برای حمل و توزیع خودروها در حجم انبوه بسیار مناسب و رایج است. در این پژوهش فرآیند حمل و توزیع خودروها به‌صورت چندوجهی و در دو شیوه حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱ نیز مشخص شده است، برای ارسال خودروها از سایت تولیدی خودرو به نقاط تقاضا از دو شیوه حمل جاده‌ای و ریلی استفاده شده است. در مسیر رفت از سایت تولید خودرو به نقاط تقاضا، تریلر/واگن خودروبر به‌صورت باردار و مسیر برگشت را بدون بار طی می‌کنند. همچنین در شیوه حمل‌ونقل ریلی از تریلرهای خودروبر جهت توزیع مویرگی (حمل خودروهای واگن خودروبر از ایستگاه راه‌آهن به نقاط مصرف) استفاده می‌شود. همچنین می‌بایست یادآور شد که فرآیند حمل و توزیع خودروها از سایت تولیدی به هر یک از نقاط تقاضا ممکن است تنها به‌صورت جاده‌ای و یا استفاده هم‌زمان از حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی باشد. در مدل‌سازی مسئله به‌منظور در اختیار گرفتن ناوگان حمل از سه روش رایج خرید، قراردادهای اجاره کوتاه‌مدت و بلندمدت ناوگان جهت تهیه ناوگان حمل موردنیاز بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی انجام شده از محدودیت‌هایی که ممکن است در برخی از دوره‌های برنامه‌ریزی در بازار جهت تهیه ناوگان از طریق قراردادهای اجاره وجود نداشته باشد؛ به‌منظور جلوگیری از افزایش ابعاد مسئله و پیچیدگی غیرضروری صرف‌نظر شده است.

مدل ارائه شده با توجه به محدودیت‌های مطرح‌شده و با هدف حداقل کردن مجموع کل هزینه‌های شرکت ارائه‌دهنده خدمات حمل، تعداد ناوگان از هر دسته را تعیین خواهد کرد. شایان ذکر است که مدل‌سازی این پژوهش با توجه به شرایط و مفروضات مطالعه موردی و کشور ایران انجام شده است. علاوه بر این، تمامی داده‌های به‌کاررفته در این مطالعه مبتنی بر داده‌های واقعی بوده که این امر به اعتبار و کاربرپذیری نتایج تحقیق افزوده است.

۳-۱. مفروضات مسأله

- افق برنامه‌ریزی یک ساله است.
- دوره‌های برنامه‌ریزی ماهانه هستند.
- واحد شمارش تقاضا تعداد خودرویی که می‌بایست در هر دوره به مقاصد موردنظر حمل شوند، است.
- ارسال محصولات به تمامی مقاصد تنها از یک مبدأ صورت می‌پذیرد.
- در حمل ریلی، هر قطار صرفاً بار مربوط به استان مقصد را حمل می‌نماید.
- ناوگان وسایل نقلیه همگن در نظر گرفته شده‌اند.
- تمامی تقاضای استان‌های مقصد در هر دوره برنامه‌ریزی می‌بایست به‌طور کامل ارضا شوند.
- خرابی‌های غیرمترقبه وسایل نقلیه در افق برنامه‌ریزی، مورد

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_i \sum_k \left((v_i - \vartheta_i) \frac{(1 + \theta)^T - 1}{(1 + \theta)^{\sigma_i} - 1} \right) X_{ik} \\ & + \sum_i \sum_k o_i Y_{ik} + \mu \left(\left(\sum_k X_{1k} \right) + \left(\sum_{n \leq \sigma_1} w_{1n} \right) \right) \\ & + \Psi \frac{\theta(1 + \theta)^\Psi}{(1 + \theta)^\Psi - 1} \left(\left(\sum_k X_{2k} \right) + \left(\sum_{n \leq \sigma_2} w_{2n} \right) \right) \quad (1) \\ & + \sum_i \sum_j h_{ij} G'_{ij} + \sum_j \sum_k \eta_k \left[\frac{Q_{1jk}}{c_1 t_{1jk}} \right] \\ & + \sum_j \sum_k \gamma_j \left[\frac{Q_{2jk}}{c_2 t_{2jk}} \right] \\ & + \sum_j \sum_k (\varphi_k + \varphi'_k) t_{2jk} \left[\frac{Q_{2jk}}{c_2 t_{2jk}} \right] \\ & + \lambda \left(\sum_j \sum_k t_{2jk} \left[\frac{Q_{2jk}}{c_2 t_{2jk}} \right] \right) + \sum_i \sum_j f_{ij} L'_{ij} \end{aligned}$$

رابطه (۱) که مبین تابع هدف مدل است به دنبال حداقل کردن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری جهت حمل محصولات به منظور ارضای تمامی تقاضای استان‌های مقصد در افق برنامه‌ریزی است. عبارت اول تابع هدف، سهم افق برنامه‌ریزی مورد بررسی از هزینه خرید وسایل نقلیه (با محاسبه مقداری که آن وسیله نقلیه در افق برنامه‌ریزی مورد بررسی مستهلک خواهد شد) است. عبارت دوم و سوم تابع هدف به ترتیب به محاسبه هزینه‌های مربوط به اجاره بلندمدت ناوگان و هزینه ثابتی که به ازای هر تریلر خودروبر (فارغ از این که مورد استفاده قرار خواهد گرفت یا خیر) می‌بایست پرداخت شود در افق برنامه‌ریزی است.

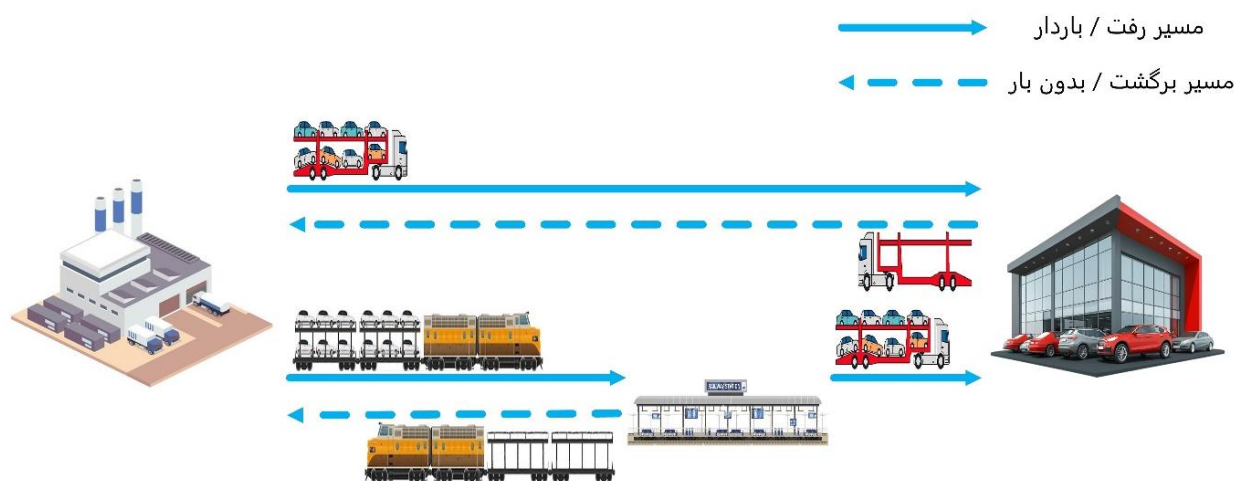
f_{ij} هزینه نگهداری هر وسیله نقلیه نوع i در دوره j در پارکینگ/خطوط کور.
 d_{jk} تقاضا برحسب تعداد خودرو در دوره j برای حمل از مبدأ ارسال به استان k .
 U_{ik} الزام تخصیص حداقل تعداد وسیله نقلیه نوع i از ناوگان اولیه فعال آن وسیله نقلیه به استان k .
 t_{ijk} تعداد دفعات امکان‌پذیر جابه‌جایی وسیله نقلیه نوع i در دوره برنامه‌ریزی j از مبدأ ارسال به استان k .
 w_{in} تعداد وسیله نقلیه نوع i با سن n موجود در ناوگان اولیه فعال شرکت.

متغیرهای تصمیم

X_{ik} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت خرید برای پاسخ به تقاضای استان k .
 Y_{ik} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره بلندمدت برای پاسخ به تقاضای استان k .
 E_{ik} تعداد وسیله نقلیه نوع i از ناوگان اولیه فعال شرکت جهت تخصیص به استان k .
 G_{ijk} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره کوتاه‌مدت در دوره j برای پاسخ به تقاضای استان k .
 L_{ijk} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت نگهداری در پارکینگ/خطوط کور در دوره j مربوط به استان k .
 G'_{ij} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره کوتاه‌مدت برای ارضای تقاضا شرکت دوره j .
 L'_{ij} تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت نگهداری ناوگان مازاد شرکت در پارکینگ/خطوط کور در دوره j .
 Q_{ijk} مقدار تقاضا جهت حمل برحسب تعداد خودرو توسط وسیله نقلیه نوع i در دوره j به استان k .

۳-۳. مدل ریاضی قطعی

مدل بهینه‌سازی مسأله تعیین اندازه ناوگان در حالت قطعی بودن تمامی پارامترها در رابطه‌های (۱) تا (۱۷) شرح داده خواهد شد.



شکل (۱). حمل و نقل چندوجهی (جاده‌ای و ریلی) در سیستم حمل و توزیع خودرو

رابطه (۱۱) حداکثر مقدار ناوگانی را که می توان به ازای هر استان تحت قرارداد کوتاه مدت اجاره نمود، مشخص می کند.

$$G'_{ij} \geq \sum_k (G_{ijk} - L_{ijk}) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (12)$$

$$L'_{ij} \geq \sum_k (L_{ijk} - G_{ijk}) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

رابطه های (۱۲) و (۱۳) تعداد وسیله نقلیه نوع i مورد نیاز جهت اجاره کوتاه مدت از سایر شرکت ها و تعداد وسیله نقلیه نوع i مازاد جهت نگهداری در پارکینگ/خطوط کور را تعیین می کند.

$$Q_{2jk} = 0 \quad \forall j \in J, k \in K, k = k' \quad (14)$$

رابطه (۱۴) تضمین می کند که ناوگان ریلی را می توان تنها برای استان هایی که حمل ریلی به آن ها صورت می پذیرد، تهیه نمود.

$$X_{ik}, Y_{ik}, E_{ik} \geq 0, integer \quad \forall i \in I, k \in K \quad (15)$$

$$G_{ijk}, L_{ijk}, G'_{ij}, L'_{ij}, Q_{ijk} \geq 0, integer \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (16)$$

و در انتها، از آنجایی که متغیرهای تصمیم برحسب تعداد تریلر خودرو، تعداد واگن خودرو و تعداد خودرویی که در هر شیوه حمل و نقل جابه جا می شود است، رابطه های (۱۵) و (۱۶) تضمین می کنند تمامی متغیرهای تصمیم مثبت و عدد صحیح باشند. مدل ریاضی ارائه شده به دلیل وجود تابع جز صحیح بالا و عملگر ماکسیم دارای حالت غیرخطی است. در ادامه، فرآیند خطی سازی این تابع و عملگر شرح داده خواهد شد تا بتوان بیان داشت که مدل قطعی پیشنهادی، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط است.

• خطی سازی رابطه های ریاضی دارای ساختار غیرخطی

رابطه های (۱) و (۹) و (۱۱) به علت وجود تابع جز صحیح بالا در آن ها غیرخطی است. تابع جز صحیح بالا یک تابع ریاضی است که یک عدد حقیقی را به عنوان ورودی می گیرد و کوچک ترین عدد صحیحی که بزرگ تر یا مساوی آن است را به عنوان خروجی برمی گرداند. تابع جز صحیح بالا را می توان با جایگزین کردن یک متغیر عدد صحیح جدید به نام g_{ijk} همراه با افزودن محدودیت های جدید که در رابطه های (۱۷) تا (۱۹) نوشته شده است، به صورت یک معادله ریاضی خطی نوشت.

$$\frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} \leq g_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (17)$$

$$g_{ijk} \leq \frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} + 0.999 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (18)$$

$$g_{ijk} \geq 0, integer \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (19)$$

از آنجایی که تابع هدف مدل، مینیم سازی است و چون g_{ijk} به صورت یک متغیر عدد صحیح تعریف شده و تابع جز صحیح بالا ارائه شده در رابطه های (۱) و (۹) و (۱۱) نیز دارای ضریب مثبت است، بنابراین مدل به دنبال یافتن کوچک ترین عدد صحیح برای هر حاصل این تابع جز صحیح بالا است. به همین دلیل رابطه (۱۸) در مدل سازی مسئله، یک محدودیت زائد خواهد بود. همچنین برای خطی سازی عملگر ماکسیم از ترفندهایی که «صغری» و همکاران [۲۶] به آن ها اشاره نمودند، استفاده خواهد شد. بنابراین عملگر ماکسیم موجود در رابطه (۱۱) را می توان با افزودن یک متغیر عدد صحیح جدید به نام

عبارت چهارم و پنجم و ششم تابع هدف نیز به ترتیب بیانگر هزینه مربوط به تعمیرات اساسی که به ازای هر واگن خودرو (فارغ از این که مورد استفاده قرار خواهد گرفت یا خیر) می بایست پرداخت شود، هزینه مربوط به اجاره کوتاه مدت وسایل نقلیه و هزینه متغیر مربوط به هر تریلر خودرو به ازای هر بار رفت و برگشت از مبدأ ارسال به استان k است. عبارت هفتم و هشتم تابع هدف بیانگر هزینه مربوط به تعمیرات ویژه که می بایست به ازای هر واگن خودرو پرداخت شود و هزینه مربوط به جابه جایی واگن های خودرو در حالت های باردار (مسیر رفت) و خالی (مسیر برگشت) به ازای هر بار رفت و برگشت از مبدأ ارسال به استان k است. و در نهایت عبارت نهم و دهم به ترتیب بیانگر هزینه مربوط به توزیع موی رگی خودروها در هر استان از ایستگاه راه آهن به نمایندگی های مربوطه و هزینه ناشی از نگهداری وسایل نقلیه مازاد نیاز در هر دوره برنامه ریزی است.

$$\sum_i \sum_k v_i X_{ik} \leq b \quad (2)$$

رابطه (۲) بیانگر بودجه شرکت جهت خرید ناوگان است.

$$\beta \left(\sum_k d_{jk} \right) \leq \sum_k Q_{2jk} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_k Q_{2jk} \leq \beta' \left(\sum_k d_{jk} \right) \quad \forall j \in J \quad (4)$$

رابطه های (۳) و (۴) نشان دهنده حداقل و حداکثر درصد از تقاضای کل که می توان به صورت ریلی حمل نمود، هستند.

$$X_{2k} + Y_{2k} + E_{2k} + G_{2k} \leq r_k \quad \forall j \in J, k \in K \quad (5)$$

رابطه (۵) تضمین می کند که مجموع ناوگان ریلی ارسالی به استان k برحسب تعداد واگن خودرو باید از ظرفیت محوطه مانوری ایستگاه راه آهن استان k کمتر باشد.

$$E_{ik} \leq \sum_{n \leq \sigma_i} w_{in} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

$$U_{ik} \leq E_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_k E_{ik} = \sum_{n \leq \sigma_i} w_{in} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

رابطه های (۶) تا (۸) به منظور تخصیص ناوگان اولیه فعال شرکت به هر استان، جهت حمل تقاضای آن استان است؛ به گونه ای که تعداد وسیله نقلیه جهت تخصیص به هر استان می بایست بیشتر از حداقل مقدار مشخص شده از ناوگان اولیه فعال جهت تخصیص به هر استان باشد.

$$\left\lceil \frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} \right\rceil = X_{ik} + Y_{ik} + E_{ik} + G_{ijk} - L_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_i Q_{ijk} = d_{jk} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (10)$$

رابطه های (۹) و (۱۰) حجم تقاضای حمل شده توسط ناوگان جاده ای و ریلی به هر استان را در هر دوره برنامه ریزی تعیین می کنند.

$$G_{ijk} \leq \max \left(\left\lceil \frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} \right\rceil - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik}, 0 \right) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (11)$$

(۳۱) $x \geq 0, y(\omega) \geq 0$
 برنامه‌ریزی معادل قطعی مسأله یاد شده، در رابطه‌های (۳۲) تا (۳۸) بیان شده است.

$$\text{Min } z = c^T x + \theta(x) \quad (32)$$

$$\text{s.t. } Ax = b \quad (33)$$

$$x \geq 0 \quad (34)$$

که خواهیم داشت:

$$\theta(x) = E_{\xi} Q(x, \xi(\omega)) \quad (35)$$

$$Q(x, \xi(\omega)) = \min_y q(\omega)^T y(\omega) \quad (36)$$

$$\text{s.t. } W(\omega)y(\omega) = h(\omega) - T(\omega)x \quad (37)$$

$$x, y \geq 0 \quad (38)$$

عبارت W ، ماتریس بازگشت نامیده می‌شود که فرض می‌کنیم در اینجا ثابت است. در صورت مشخص و ثابت بودن ماتریس بازگشت، این نوع برنامه‌ریزی را برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با بازگشت ثابت می‌نامیم. کلیه نمادهای مورد استفاده در ساختار کلی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با بازگشت، در جدول ۲ تشریح داده شده است. به‌طور کلی، همه محدودیت‌ها می‌توانند از نوع کوچک‌تر مساوی، مساوی یا بزرگ‌تر مساوی و تابع هدف بسته به ماهیت مسئله به‌صورت حداکثرسازی یا حداقل‌سازی واقع شود.

جدول (۲). نمادهای مورد استفاده در ساختار کلی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با بازگشت و نیز مدل قطعی معادل آن

نماد	تعریف
x	متغیر تصمیم مرحله اول
ξ	مقدار پارامترهای غیرقطعی
ω	سناریو
$\theta(x)$	تابع بازگشت
$y(\omega)$	متغیر تصمیم مرحله دوم
c	ضریب تابع هدف متغیر مرحله اول با ماهیت قطعی
$W(\omega)$	ضریب تکنولوژی متغیر مرحله دوم با ماهیت غیرقطعی
A	ضریب تکنولوژی متغیر مرحله اول
b	مقدار سمت راست با ماهیت قطعی
$h(\omega)$	مقدار سمت راست با ماهیت غیرقطعی
$q(\omega)$	ضریب تابع هدف متغیر مرحله دوم با ماهیت غیرقطعی
$T(\omega)$	ضریب تکنولوژی متغیر مرحله اول با ماهیت غیرقطعی

• مدل ریاضی تصادفی دو مرحله‌ای:

در مدل تصادفی این تحقیق، از آنجایی که تقاضا و زمان سیر با عدم قطعیت همراه بوده و سناریو محور نیز است، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای مبتنی بر سناریو استفاده شده است. به‌طوری‌که در مرحله اول (قبل از مشخص شدن تقاضا و زمان سیر) اندازه بهینه ناوگان ملکی و تحت قرارداد اجاره بلندمدت تعیین می‌شود و در مرحله دوم با توجه به وقوع پارامترهای تصادفی (تقاضا و زمان سیر)، اندازه بهینه ناوگان تحت قرارداد اجاره کوتاه‌مدت، ناوگان مازاد جهت نگهداری در

g'_{ijk} مطابق رابطه (۲۰)، مجموعه‌ای از متغیرهای باینری جدید و ایجاد محدودیت‌های تکمیلی جدید در رابطه‌های (۲۷-۲۱) به یک معادله ریاضی با ساختار خطی تبدیل نمود.

$$g'_{ijk} = \max(g_{ijk} - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik}, 0) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (20)$$

$$g'_{ijk} \geq g_{ijk} - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (21)$$

$$g'_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (22)$$

$$g'_{ijk} \leq g_{ijk} - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik} + (My'_{ijk}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (23)$$

$$g'_{ijk} \leq My'_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (24)$$

$$y'_{ijk} + y''_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (25)$$

$$g'_{ijk} \geq 0, \text{integer} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (26)$$

$$y'_{ijk}, y''_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (27)$$

از آنجایی که g'_{ijk} خود یک متغیر عدد صحیح است، به‌همین دلیل رابطه (۲۲) در مدل‌سازی زائد خواهد بود. از طرفی با توجه به این‌که استفاده از یک مدل تصادفی برای مدل‌سازی این نوع مسأله بسیار کارآمد است، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده خواهد شد.

۳-۴. برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

در ساختار برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، متغیرهای تصمیم در یک مسئله بهینه‌سازی تحت شرایط عدم قطعیت به دو دسته متغیرهای تصمیم مرحله اول (x) و مرحله دوم تقسیم می‌شوند. متغیرهای تصمیم مرحله اول، شامل تصمیماتی است که قبل از مشخص شدن مقادیر واقعی پارامترهای تصادفی تعیین می‌شوند. در لحظه تصمیم‌گیری و حل مدل، این تصمیمات درحالی اتخاذ می‌شوند که اطلاعات دقیقی از وقوع مقادیر آینده پارامترهای تصادفی ξ در دست نیست. در گام دوم، پس از مشخص شدن مقادیر واقعی پارامترهای عدم قطعیت ξ ، نوبت به اتخاذ تصمیمات مرحله دوم می‌رسد؛ تصمیماتی که معمولاً به‌صورت اقدامات اصلاحی یا تصمیمات بازگشتی (y) در پاسخ به وضعیت تحقق‌یافته اتخاذ می‌شوند. به علت ماهیت تصادفی پارامترها، هزینه‌های مرتبط با مرحله دوم نیز به‌صورت یک متغیر تصادفی ظاهر می‌گردند. از این‌رو هدف در این نوع مدل‌سازی، انتخاب بهینه متغیرهای تصمیم در مرحله اول به‌گونه‌ای است که مجموع هزینه‌های مستقیم مرحله اول به‌همراه هزینه‌های موردانتظار مرحله دوم به حداقل ممکن برسد. درواقع، تصمیمات اولیه با درنظر گرفتن تأثیرات آتی آن‌ها بر نتایج حاصل از مرحله دوم اتخاذ می‌شوند. این تأثیرات از طریق تابع مقدار یا تابع بازگشت سنجیده می‌شوند که بیانگر متوسط مقدار هزینه‌های ناشی از تصمیمات مرحله دوم است. ساختار کلی برنامه‌ریزی خطی تصادفی با بازگشت به‌صورت رابطه‌های (۲۸-۳۱) فرموله می‌شود [۲۷]:

$$\min c^T x + E_{\xi} [\min q(\omega)^T y(\omega)] \quad (28)$$

$$\text{s.t. } Ax = b \quad (29)$$

$$T(\omega)x + W(\omega)y(\omega) = h(\omega) \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_s p_s \left(\left(\sum_i \sum_j h_{ij} G_{ij}^s \right) + \left(\sum_j \sum_k \eta_k g_{1jk}^s \right) \right. \\
& \quad + \left(\sum_j \sum_k \gamma_j g_{2jk}^s \right) \\
& \quad + \left(\sum_j \sum_k (\varphi_k \right. \\
& \quad \left. + \varphi'_k) t_{2jk}^s g_{2jk}^s \right) \\
& \quad \left. + \left(\lambda \left(\sum_k \sum_j t_{2jk}^s g_{2jk}^s \right) \right) \right) \\
& \quad + \left(\sum_i \sum_j f_{ij} L_{ij}^s \right)
\end{aligned}$$

$$\sum_i \sum_k v_i X_{ik} \leq b \quad (40)$$

$$\beta \left(\sum_k d_{jk}^s \right) \leq \sum_k Q_{2jk}^s \quad \forall j \in J, s \in S \quad (41)$$

$$\sum_k Q_{2jk}^s \leq \beta' \left(\sum_k d_{jk}^s \right) \quad \forall j \in J, s \in S \quad (42)$$

$$X_{2k} + Y_{2k} + E_{2k} + G_{2jk}^s \leq r_k \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (43)$$

$$E_{ik} \leq \sum_{n \leq \sigma_i} w_{in} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (44)$$

$$U_{ik} \leq E_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (45)$$

$$\sum_k E_{ik} = \sum_{n \leq \sigma_i} w_{in} \quad \forall i \in I \quad (46)$$

$$g_{ijk}^s = X_{ik} + Y_{ik} + E_{ik} + G_{ijk}^s - L_{ijk}^s \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (47)$$

$$\sum_i Q_{ijk}^s = d_{jk}^s \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (48)$$

$$G_{ijk}^s \leq g_{ijk}^s \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (49)$$

$$G_{ij}^s \geq \sum_k (G_{ijk}^s - L_{ijk}^s) \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (50)$$

$$L_{ij}^s \geq \sum_k (L_{ijk}^s - G_{ijk}^s) \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (51)$$

$$Q_{2jk}^s = 0 \quad \forall j \in J, k \in K, k = k', s \in S \quad (52)$$

$$\frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} \leq g_{ijk}^s \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (53)$$

$$g_{ijk} \leq \frac{Q_{ijk}}{c_i t_{ijk}} + 0.999 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (54)$$

$$g_{ij}^s \geq g_{ijk}^s - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (55)$$

$$g_{ij}^s \leq g_{ijk}^s - X_{ik} - Y_{ik} - E_{ik} + (M y_{ijk}^{1s}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (56)$$

$$g_{ij}^s \leq M y_{ijk}^{2s} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (57)$$

پارکینگ/خطوط کور، ناوگان اولیه فعال تخصیص داده شده به هر استان و مقدار تقاضای حمل شده توسط ناوگان مختص به هر شیوه حمل و نقل در هر دوره مشخص خواهد شد. با توجه به این توضیحات، متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول (مستقل از سناریو) حوزه‌های این موضوع به شرح زیر است:

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت خرید برای پاسخ به تقاضای استان k . X_{ik}

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره بلندمدت برای پاسخ به تقاضای استان k . Y_{ik}

تعداد وسیله نقلیه نوع i از ناوگان اولیه فعال شرکت جهت تخصیص به استان k . E_{ik}

در این مدل، احتمال وقوع هر یک از سناریوها با نماد p_s نمایش داده شده است. همچنین، تمامی متغیرهای مرتبط با مرحله دوم دارای اندیس سناریو هستند. در ادامه، خواهیم داشت:

S مجموعه سناریوها ($s \in S$).

p_s احتمال وقوع سناریو s .

متغیرهای تصمیم مربوط به مرحله دوم نیز به شرح زیر معرفی می‌گردند:

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره کوتاه‌مدت در دوره j برای پاسخ به تقاضای استان k در صورت وقوع سناریو s . G_{ijk}^s

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت نگهداری در پارکینگ/خطوط کور در دوره j مربوط به استان k در صورت وقوع سناریو s . L_{ijk}^s

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت اجاره کوتاه‌مدت برای ارضای تمامی تقاضا شرکت دوره j در صورت وقوع سناریو s . G_{ij}^s

تعداد وسیله نقلیه نوع i جهت نگهداری ناوگان مازاد شرکت در پارکینگ/خطوط کور در دوره j در صورت وقوع سناریو s . L_{ij}^s

مقدار تقاضا جهت حمل برحسب تعداد خودرو توسط وسیله نقلیه نوع i در دوره j به استان k در صورت وقوع سناریو s . Q_{ijk}^s

مدل ریاضی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای مسأله تعیین اندازه ناوگان به صورت رابطه‌های (۳۹) تا (۶۲) فرموله خواهد شد.

$$\begin{aligned}
\min z = & \sum_i \sum_k \left((v_i - \vartheta_i) \frac{(1 + \theta)^T - 1}{(1 + \theta)^{\sigma_i} - 1} \right) X_{ik} \\
& + \sum_i \sum_k o_i Y_{ik} \\
& + \mu \left(\left(\sum_k X_{1k} \right) \right. \\
& \left. + \left(\sum_{n \leq \sigma_1} w_{1n} \right) \right) \\
& + \Psi \frac{\theta(1 + \theta)^\Psi}{(1 + \theta)^\Psi - 1} \left(\left(\sum_k X_{2k} \right) + \left(\sum_{n \leq \sigma_2} w_{2n} \right) \right)
\end{aligned} \quad (39)$$

$$y_{ijk}^{1s}, y_{ijk}^{2s} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (62)$$

با توجه به ساختار کلی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای که بیان شد، می‌توان بخش مرتبط با مرحله اول از تابع هدف این مسأله را به صورت رابطه (۶۳) بیان کرد.

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_k \left((v_i - \vartheta_i) \frac{(1 + \theta)^T - 1}{(1 + \theta)^{\sigma_i} - 1} \right) X_{ik} \\ & + \sum_i \sum_k o_i Y_{ik} + \mu \left(\left(\sum_k X_{1k} \right) + \left(\sum_{n \leq \sigma_1} w_{1n} \right) \right) \\ & + \Psi \frac{\theta(1 + \theta)^\Psi}{(1 + \theta)^\Psi - 1} \left(\left(\sum_k X_{2k} \right) + \left(\sum_{n \leq \sigma_2} w_{2n} \right) \right) \end{aligned} \quad (E3)$$

رابطه (۶۳) معادل با $c^T x$ در رابطه (۲۸) است. سایر اجزای تابع هدف نیز به صورت امید ریاضی تأثیرات ناشی از متغیرهای تصمیم مرحله دوم (به ازای هر سناریو) بر تابع هدف تعریف می‌شوند که در رابطه (۶۴) بیان شده است.

$$\begin{aligned}
& + \sum_s p_s \left(\left(\sum_i \sum_j h_{ij} G_{ij}^{\prime s} \right) \right. \\
& \quad + \left(\sum_j \sum_k \eta_k \left[\frac{Q_{1jk}^s}{c_1 t_{1jk}^s} \right] \right) \\
& \quad + \left(\sum_j \sum_k \gamma_j \left[\frac{Q_{2jk}^s}{c_2 t_{2jk}^s} \right] \right) \\
& \quad + \left(\sum_j \sum_k (\varphi_k \right. \\
& \quad \quad \left. + \varphi'_k) t_{ijk}^s \left[\frac{Q_{ijk}^s}{c_i t_{ijk}^s} \right] \right) \\
& \quad + \left(\lambda \left(\sum_k \sum_j t_{ijk}^s \left[\frac{Q_{ijk}^s}{c_i t_{ijk}^s} \right] \right) \right) \\
& \quad \left. + \left(\sum_i \sum_j f_{ij} L_{ij}^{\prime s} \right) \right)
\end{aligned} \tag{94}$$

بخشی از تابع هدف مدل پیشنهادی که در رابطه (۶۴) آمده، معادل با $E\zeta\left[\min_y q(\omega)^T y(\omega)\right]$ در رابطه (۲۸) است. همان گونه که مشخص است، بخشی از تابع هدف وابسته به اثرگذاری متغیرهای تصمیم مرحله دوم است؛ از این رو مدل ارائه شده یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای با بازگشت نامیده می شود. همچنین رابطه های



شکل (۲). استان‌های معمول در حمل ریلی خودرو توسط شرکت
سایبا لجستیک

پیچیده را با دقت بالا و در کمترین زمان ممکن تحلیل و بررسی کنند. از ویژگی‌های بارز نرم‌افزار گمز می‌توان به ساختار مدولار، انعطاف‌پذیری بالا، توانایی ادغام با سایر نرم‌افزارها و زبان‌های برنامه‌نویسی اشاره کرد. نرم‌افزار گمز در مقایسه با دیگر نرم‌افزارهای مشابه، با تمرکز بر حل مسائل با مقیاس بزرگ و پشتیبانی گسترده از مجموعه متنوعی از الگوریتم‌های حل، جایگاهی منحصر به فرد دارد. ضرورت استفاده از این نرم‌افزار در صنایع و تحقیقات علمی به دلیل قابلیت بهینه‌سازی فرآیندها، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در تصمیم‌گیری‌ها است که آن را به ابزاری حیاتی برای پژوهشگرها و مهندس‌ها تبدیل کرده است.

۴-۱. نتایج حاصل از حل مدل ریاضی قطعی

نتایج حاصل از حل مدل قطعی تعیین اندازه ناوگان شامل تعیین تعداد ناوگان بهینه تریلرها و واگن‌های خودروبر ملکی، اولیه، تحت قرارداد اجاره بلندمدت و کوتاه‌مدت محاسبه شده است. خلاصه نتایج مدل قطعی در جدول ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول (۴). تعداد بهینه ناوگان استیجاری براساس مدل قطعی

تعداد وسیله نقلیه جهت نگهداری در پارکینگ/خطوط کور به‌ازای مجموع استان‌ها		تعداد وسیله نقلیه تحت قرارداد اجاره کوتاه‌مدت به‌ازای مجموع استان‌ها	
تریلر	واگن	تریلر	واگن
خودروبر	خودروبر	خودروبر	خودروبر
فروردین	۰	۵۴	۰
اردیبهشت	۹۸	۳۳۲	۰
خرداد	۸۴	۳۰۵	۰
تیر	۴۰	۲۳۵	۰
مرداد	۳۴	۲۱۰	۰
شهریور	۳۵	۲۰۴	۰
مهر	۶۴	۲۹۴	۰
آبان	۱۴۶	۴۱۹	۰
آذر	۱۸۴	۵۴۹	۰
دی	۱۳	۱۴۲	۰
بهمن	۰	۱۳۷	۰
اسفند	۱۳۵	۴۲۰	۰

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، تعداد بهینه تریلر خودروبر تحت قرارداد اجاره کوتاه‌مدت به‌ترتیب در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور، مهر، آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند برابر ۰، ۹۸، ۸۴، ۴۰، ۳۴، ۳۵، ۶۴، ۱۴۶، ۱۸۴، ۱۳، ۰ و ۱۳۵ و تعداد بهینه واگن خودروبر تحت قرارداد اجاره کوتاه‌مدت در این ماه‌ها به‌ترتیب برابر ۰، ۳۳۲، ۳۰۵، ۲۳۵، ۲۱۰، ۲۰۴، ۲۹۴، ۴۱۹، ۵۴۹، ۱۴۲، ۱۳۷ و ۴۲۰ دستگاه است. تعداد بهینه تریلر و واگن

در شکل ۲ استان‌هایی که به‌طور غالب، حمل محصولات گروه خودروسازی سایپا به‌وسیله ناوگان ریلی شرکت سایپا لجستیک به آن‌ها صورت می‌پذیرد، نشان داده شده است.

در این پژوهش، مسئله مورد بررسی در شرکت مطالعه‌شده با افق برنامه‌ریزی سالانه در نظر گرفته شده است. افزون‌بر این، عمر اسقاط وسایل نقلیه براساس تعداد سال‌های بهره‌برداری از هر وسیله نقلیه تا زمان اسقاط آن تعریف شده است. نرخ تورم نیز براساس گزارش‌های رسمی منتشرشده توسط مرکز آمار ایران لحاظ گردیده و به‌منظور انطباق بیشتر با شرایط واقعی بخش حمل‌ونقل، از نظرات خبره‌های حوزه مربوطه نیز جهت اعتبارسنجی و تطبیق کیفی استفاده شده است.

همچنین در این مسئله، براساس نظر کارشناس‌ها و خبره‌های میزان تقاضا می‌تواند ۱۰ درصد کاهش یا افزایش یابد و یا بدون تغییر باقی بماند. علاوه‌براین زمان سیر نیز تنها برای تریلر خودروبر می‌تواند حداکثر تا دو واحد در هر دوره کاهش یا افزایش یابد؛ بدین‌معنا که زمان سیر هر تریلر خودروبر از مبدأ به هر مقصدی می‌تواند یک یا دو واحد کاهش یا افزایش یابد و یا بدون تغییر بماند.

اما زمان سیر واگن‌های خودروبر قطعی در نظر گرفته شده است؛ زیرا پس از صدور برنامه شرکت راه‌آهن متعهد می‌شود که با تخصیص لوکوموتیو به واگن‌ها در زمان معینی بار موردنظر را از مبدأ به مقصد برساند. با توجه به این‌که مقدار تقاضا و زمان سیر می‌تواند به‌ترتیب سه و پنج حالت بگیرند، بنابراین در مجموع ۱۵ سناریو وجود خواهد داشت. در این برنامه‌ریزی احتمال وقوع سناریوها یکسان است، بنابراین احتمال وقوع هر سناریو مطابق رابطه (۶۵) قابل محاسبه خواهد بود.

$$p(s) = \frac{1}{15} \quad s = 1, 2, 3, \dots, 15 \quad (65)$$

۴. نتایج عددی

همان‌طور که بیان شد، مدل بهینه‌سازی مسأله تعیین اندازه ناوگان متشکل از تریلر و واگن خودروبر ابتدا به‌صورت یک مدل ریاضی قطعی و سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان سیر در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح طراحی شده است. در گام بعدی بایستی مدل حل و نتایج حاصل گردد. به‌همین جهت پس از تعیین مجموعه‌ها و پارامترها، به‌منظور حل مدل از نرم‌افزار گمز^۱ نسخه ۲۴.۱.۳ و کامپیوتر با سیستم عامل ۶۴ بیتی ویندوز، پردازنده 9th Gen Intel® Core™ i5 Quad-Core، حافظه دسترسی تصادفی 8GB DDR4 و واحد پردازش گرافیکی NVIDIA GeForce GTX 1650 استفاده شده است. نرم‌افزار گمز به‌عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته و قدرتمند در حوزه مهندسی و مدل‌سازی شناخته می‌شود. این نرم‌افزار با فراهم آوردن محیطی نظام‌مند برای حل مسائل پیچیده ریاضی از جمله برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و... به محقق‌ها و مهندس‌ها این امکان را می‌دهد تا مدل‌های

ریال است.

جدول (۶). تعداد وسایل نقلیه و درصد حمل در دو شیوه حمل جاده‌ای و ریلی براساس مدل تصادفی

تریلر	واگن	خودروبر	خودروبر
تعداد ناوگان اولیه فعال	۳۰	۱۳۰	
تعداد وسیله نقلیه ملکی	۲۷	۱	
تعداد وسیله نقلیه تحت قرارداد اجاره بلندمدت	۱۱۱	۱۲۰	
مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری (برحسب ریال)	۶,۵۸۵,۹۷۶,۷۰۹,۶۲۰		

مطابق جدول ۶ بر اساس مدل تصادفی علاوه بر تعداد ۴۵ تریلر خودروبر و ۱۳۰ واگن خودروبر اولیه، تعداد بهینه تریلر و واگن خودروبر ملکی به ترتیب ۲۷ و ۱ دستگاه و تعداد بهینه تعداد تریلر و واگن خودروبر تحت قرارداد اجاره بلندمدت به ترتیب ۱۱۱ و ۱۲۰ دستگاه است. به علاوه، مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه با پیاده‌سازی مدل تصادفی برابر ۶,۵۸۵,۹۷۶,۷۰۹,۶۲۰ ریال است. همچنین باید دقت شود از آنجا که مدل تصادفی تمامی ۱۵ سناریو را محتمل در نظر می‌گیرد و با توجه به این که تمامی سناریوها احتمال وقوع یکسانی دارند؛ بنابراین مدل تصادفی تعداد تریلر خودروبر تحت قرارداد اجاره بلندمدت کمتر و درعین حال تعداد واگن خودروبر بیشتری را در مقایسه با مدل قطعی پیشنهاد می‌کند. از طرفی می‌توان دریافت که خرید ناوگان در صورت وقوع هر سناریو همواره به نفع سیستم بوده و به دلیل تحمیل هزینه کمتری نسبت به ناوگان تحت قرارداد اجاره بلندمدت یا کوتاه‌مدت، همواره پیشنهاد می‌شود.

علاوه بر این، سهم هر یک ناوگان‌های جاده‌ای و ریلی در حمل خودرو به نقاط تقاضا در هر یک از شیوه‌های حمل بیان شده است. مطابق جدول ۷ کمترین و بیشترین میزان حمل در شیوه حمل و نقل جاده‌ای به ترتیب مربوط به سناریو یک و پنج است. همچنین کمترین و بیشترین میزان حمل در شیوه حمل و نقل ریلی نیز به ترتیب مربوط به سناریو پنج و یک است. به علاوه از جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل هزینه کمتر در شیوه حمل و نقل ریلی، همواره استفاده از آن با درصد بالایی پیشنهاد می‌شود. اما با این حال به دلیل محدودیت‌های نام برده شده که در شیوه حمل و نقل ریلی وجود دارد، درصد استفاده از این شیوه حمل محدود خواهد بود و عملیات حمل و توزیع خودروها بیشتر در شیوه حمل و نقل جاده‌ای انجام خواهد شد.

۳-۴. ارزش جواب تصادفی^۱

معمولاً پس از ساخت مدل تصادفی سناریو محور از شاخصی به نام ارزش جواب تصادفی برای تحلیل ارزش ساخت مدل تصادفی استفاده می‌شود. برای محاسبه این شاخص ابتدا می‌بایست مدل را به صورت قطعی حل و جواب‌های حاصل از حل آن را برای متغیرهای مرحله اول

خودروبر که در هر دوره در پارکینگ/خطوط کور تنها در ماه فروردین تنها برای تریلر خودروبر به برابر ۵۴ دستگاه و در بقیه ماه‌ها برای تریلر و واگن خودروبر برابر صفر دستگاه است.

همچنین تعداد ناوگان ملکی، تعداد وسیله نقلیه تحت قرارداد اجاره بلندمدت، سهم ناوگان جاده‌ای/ریلی در حمل خودرو و مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری براساس مدل قطعی در جدول ۵ آمده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، شرکت مورد مطالعه با هدف به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری علاوه بر تعداد ۴۵ تریلر خودروبر و ۱۳۰ واگن خودروبر می‌بایست ناوگانی شامل ۲۷ دستگاه تریلر خودروبر و ۱ دستگاه واگن خودروبر خریداری و به ترتیب تعداد ۱۲۴ و ۱۰۶ دستگاه تریلر و واگن خودروبر تحت قرارداد بلندمدت اجاره نماید. علاوه بر این، براساس خروجی مدل قطعی پیشنهادی، میزان حمل تقاضا در افق برنامه‌ریزی توسط ناوگان جاده‌ای برابر ۷۰/۰۳ درصد و میزان حمل تقاضا در افق برنامه‌ریزی توسط ناوگان ریلی برابر ۲۹/۹۷ درصد است.

جدول (۵). تعداد وسایل نقلیه و درصد حمل در دو شیوه حمل جاده‌ای و ریلی براساس مدل قطعی

تریلر	واگن	خودروبر	خودروبر
تعداد ناوگان اولیه فعال	۳۰	۱۳۰	
تعداد وسیله نقلیه ملکی	۲۷	۱	
تعداد وسیله نقلیه تحت قرارداد اجاره بلندمدت	۱۲۴	۱۰۶	
سهم ناوگان جاده‌ای/ریلی در حمل خودرو	۷۰/۰۳ %	۲۹/۹۷ %	
مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری (برحسب ریال)	۶,۴۴۴,۱۶۰,۵۶۱,۰۱۰		

همچنین مطابق جدول ۵ مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه با پیاده‌سازی مدل شرح داده شده برابر ۶,۴۴۴,۱۶۰,۵۶۱,۰۱۰ ریال خواهد بود.

۴-۲. نتایج حاصل از حل مدل ریاضی تصادفی دومرحله‌ای

در مدل تصادفی تعیین اندازه ناوگان، تعداد بهینه تعداد تریلر و واگن خودروبر تحت قرارداد اجاره کوتاه‌مدت و مازاد نیاز جهت نگهداری در پارکینگ/خطوط کور در هر دوره وابسته به سناریو است. همچنین بنابر جدول ۶ براساس مدل تصادفی علاوه بر تعداد ۴۵ تریلر خودروبر و ۱۳۰ واگن خودروبر اولیه، تعداد بهینه تریلر و واگن خودروبر ملکی به ترتیب ۲۷ و ۱ دستگاه و تعداد بهینه تعداد تریلر و واگن خودروبر تحت قرارداد اجاره بلندمدت به ترتیب ۱۱۱ و ۱۲۰ دستگاه است. علاوه بر این، میزان حمل تقاضا در افق برنامه‌ریزی براساس مدل تصادفی توسط ناوگان جاده‌ای و ریلی وابسته به سناریو است. به علاوه، مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه با پیاده‌سازی مدل تصادفی برابر ۶,۵۸۵,۹۷۶,۷۰۹,۶۲۰

اجاره، عملیاتی و نگهداری به میزان ۲۱/۳۴ درصد نسبت به وضعیت فعلی شرکت مورد مطالعه کاهش پیدا خواهد کرد؛ از این رو، نتیجه می شود به کارگیری مدل پیشنهادی نقش مؤثری در کاهش مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت خواهد داشت.

جدول (۸). مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری

شرکت مورد مطالعه قبل و بعد از پیاده سازی مدل پیشنهادی	
مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت با روند حاضر (برحسب ریال)	۸,۳۷۲,۸۶۵,۲۰۸,۲۸۰
میزان کاهش در مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت پس از اعمال مدل پیشنهادی (برحسب ریال)	۱,۷۸۶,۸۸۸,۴۹۸,۶۶۰
میزان کاهش مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت پس از اعمال مدل پیشنهادی برحسب درصد	۲۱/۳۴ %

۴-۵. مقایسه با توزیع تنها در یک شیوه حمل

مدل ارائه شده در این پژوهش به تعیین اندازه ناوگانی متشکل از تریلر و واگن خودرو در دو شیوه حمل جاده ای و ریلی را می پردازد. اینک به بررسی میزان کاهش در مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری در حمل و نقل چندوجهی نسبت به حمل و نقل تنها در یک شیوه حمل و نقل پرداخته خواهد شد. در حال حاضر به دلیل بالا بودن زمان سیر در حمل ریلی، ظرفیت محدود در ایستگاه های بارگیری و تخلیه و کمبود لوکوموتیو و عدم وجود خطوط ریلی در تمامی شهرهای کشور، امکان حمل و توزیع خودروها به تمامی شهرها به وسیله حمل ریلی امکان پذیر نمی باشد. این در حالی است که امکان استفاده از ناوگان جاده ای به منظور حمل و توزیع تمام تقاضا به تمامی شهرهای کشور وجود دارد؛ بنابراین به مقایسه مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری در حمل و نقل چندوجهی نسبت به حمل و نقل تنها در شیوه حمل جاده ای پرداخته خواهد شد.

جدول (۹). مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری

شرکت مورد مطالعه در حالت حمل تنها به شیوه جاده ای	
مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت تنها در شیوه حمل جاده ای (برحسب ریال)	۹,۲۵۳,۲۸۶,۳۲۹,۵۱۰
میزان کاهش در مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت در شیوه حمل چندوجهی نسبت به شیوه حمل جاده ای (برحسب ریال)	۲,۶۶۷,۳۰۹,۶۱۹,۸۹۰
میزان کاهش در مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری در شیوه حمل چندوجهی نسبت به شیوه حمل جاده ای برحسب درصد	۲۸/۸۳ %

در مدل تصادفی دو مرحله ای فیکس کرد. سپس می بایست مقدار تابع هدف به دست آمده را از مقدار تابع هدف مدل تصادفی کم کرد که میزان این اختلاف، ارزش جواب تصادفی گفته می شود که در رابطه (۶۶) محاسبه شده است.

$$\begin{aligned} VSS &= 6,602,830,180,740 \\ &- 6,585,976,709,620 \\ &= 16,853,471,120 \end{aligned} \quad (66)$$

همان گونه که مشاهده می شود، این عدد مثبت است که نشان از عملکرد مناسب مدل تصادفی می دهد؛ در واقع، این عدد بیان می کند در صورت استفاده از مدل تصادفی نسبت به حالتی که از مدل قطعی استفاده شود، مقدار ۱۶,۸۵۳,۴۷۱,۱۲۰ ریال هزینه کمتری به شرکت مورد مطالعه تحمیل خواهد شد.

جدول (۷). سهم ناوگان جاده ای/ریلی در حمل خودرو براساس مدل تصادفی

سهم ناوگان جاده ای حمل	سهم ناوگان ریلی در حمل	خودرو	سناریو
۷۰/۱۳	۲۹/۸۷	خودرو	۱
۷۰/۱۹	۲۹/۸۱	خودرو	۲
۷۰/۳۰	۲۹/۷۰	خودرو	۳
۷۰/۳۲	۲۹/۶۸	خودرو	۴
۷۰/۸۲	۲۹/۱۸	خودرو	۵
۷۰/۱۹	۲۹/۸۱	خودرو	۶
۷۰/۲۶	۲۹/۷۴	خودرو	۷
۷۰/۲۳	۲۹/۷۷	خودرو	۸
۷۰/۵۷	۲۹/۴۳	خودرو	۹
۷۰/۷۳	۲۹/۲۷	خودرو	۱۰
۷۰/۲۵	۲۹/۷۵	خودرو	۱۱
۷۰/۲۷	۲۹/۷۳	خودرو	۱۲
۷۰/۲۲	۲۹/۷۸	خودرو	۱۳
۷۰/۷۵	۲۹/۲۵	خودرو	۱۴
۷۰/۶۳	۲۹/۳۷	خودرو	۱۵

۴-۴. مقایسه با روند موجود

به منظور تحلیل کمی نتایج و ارزیابی مدل ارائه شده و بررسی پتانسیل آن در کاهش هزینه ها و بهبود بهره وری اقتصادی، به مقایسه مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت پس از اعمال مدل پیشنهادی با روند فعلی این شرکت پرداخته خواهد شد.

همان طور که در جدول ۸ آمده است، مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت با روند حاضر برابر ۸,۳۷۲,۸۶۵,۲۰۸,۲۸۰ ریال است. حال با یک مقایسه ساده می توان دریافت که میزان کاهش در مجموع هزینه های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه پس از اعمال مدل پیشنهادی در مقایسه با روند فعلی برابر ۱,۷۸۶,۸۸۸,۴۹۸,۶۶۰ ریال خواهد بود. به عبارت دیگر با پیاده سازی مدل پیشنهادی مجموع هزینه های خرید،

افزایش ۱۰ درصدی، کاهش ۱۰ درصدی و کاهش ۲۰ درصدی در مقدار بودجه به ترتیب برابر ۶,۵۲۷,۹۲۴,۲۲۶,۰۹۰، ۶,۵۵۷,۹۶۴,۲۴۴,۸۸۰ و ۶,۵۹۸,۲۸۹,۴۶۷,۷۴۰ و ۶,۶۷۳,۹۹۰,۵۲۰,۵۲۰ خواهد شد؛ بنابراین، نتیجه خواهد شد که افزایش مقدار بودجه موجب کاهش مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری خواهد شد؛ به عبارت دیگر، مدل ارائه‌شده استفاده حداکثری از بودجه خرید جهت تهیه ناوگان ملکی را پیشنهاد می‌کند. همچنین اثر مقدار بودجه‌های متفاوت بر تعداد ناوگان ملکی در شکل ۴ نشان داده شده است.

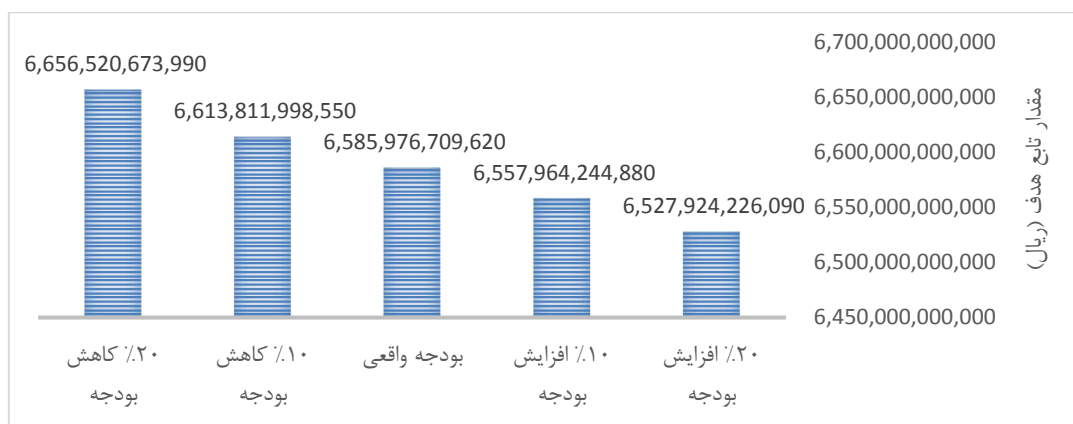
همان‌طور که از شکل ۴ پیداست، مشاهده می‌شود که به ازای مجموع استان‌ها با افزایش ۲۰ درصدی، افزایش ۱۰ درصدی، کاهش ۱۰ درصدی و کاهش ۲۰ درصدی مجموع تعداد تریلر خودروبر ملکی به ترتیب برابر ۳۳، ۳۰، ۲۵ و ۲۲ دستگاه و مجموع تعداد واگن خودروبر ملکی در همه حالت‌ها برابر صفر دستگاه خواهد بود. به‌طور کلی با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که با افزایش مقدار بودجه در شرکت مورد مطالعه، تعداد ناوگان ملکی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. از سوی دیگر، با توجه به این که سیستم در راستای بهینه‌سازی هزینه‌ها و تحت محدودیت بودجه، تمایل به تخصیص حداکثر بودجه ممکن به خرید ناوگان دارد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ناوگان ملکی منجر به کاهش مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه خواهد شد.

مطابق جدول ۹، مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری در حالتی که عملیات حمل‌ونقل تنها به شیوه جاده‌ای انجام شود برابر ۹,۲۵۳,۲۸۶,۳۲۹,۵۱۰ ریال است. با انجام مقایسه‌ای می‌توان دریافت که انجام عملیات حمل‌ونقل چندوجهی موجب کاهش ۲,۶۶۷,۳۰۹,۶۱۹,۸۹۰ ریالی در مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری نسبت به حالتی که تنها از شیوه حمل‌ونقل جاده‌ای استفاده شود خواهد شد؛ در واقع، استفاده از شیوه حمل‌ونقل چندوجهی موجب کاهش ۲۸/۸۳ درصدی در مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت مورد مطالعه نسبت به حالتی که تنها از شیوه حمل‌ونقل جاده‌ای استفاده شود خواهد شد.

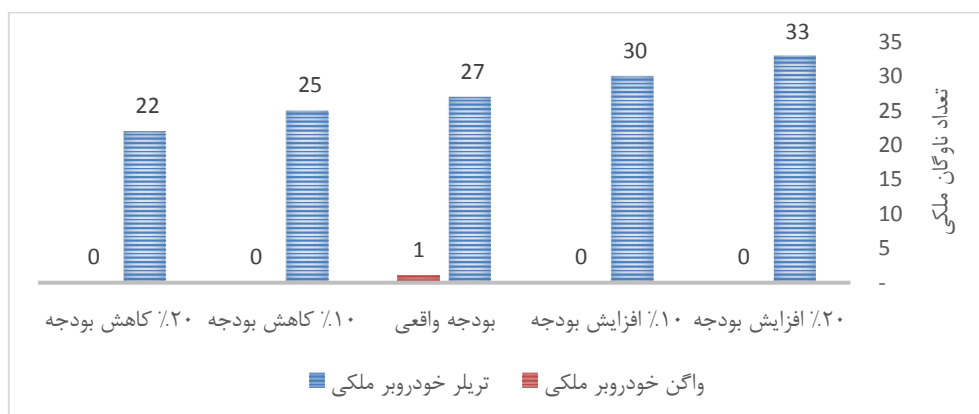
۵. تحلیل حساسیت

برای ارزیابی اعتبار مدل پیشنهادی، از تحلیل حساسیت استفاده شده است. در این تحلیل، اثر مقدار بودجه اختصاص یافته جهت خرید ناوگان بررسی خواهد شد. برای این پارامتر، پنج مقدار در نظر گرفته شده است: کاهش ۲۰ درصدی، کاهش ۱۰ درصدی، مقدار واقعی، افزایش ۱۰ درصدی و افزایش ۲۰ درصدی در مقدار بودجه. تأثیر این مقادیر بر مقدار تابع هدف (مجموع هزینه‌ها) تحلیل شده و نتایج این تحلیل در شکل ۳ ارائه شده است.

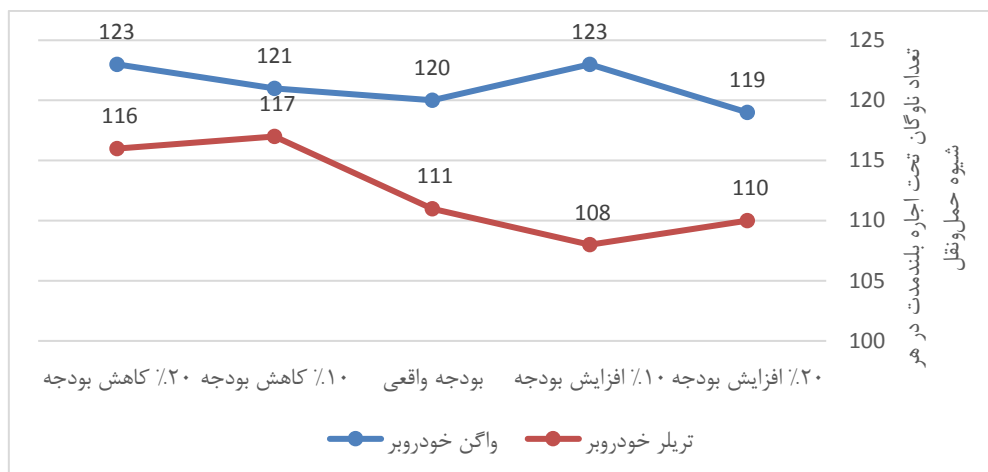
همان‌طور که از شکل ۳ پیداست، مشاهده می‌شود که مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری با افزایش ۲۰ درصدی،



شکل (۳). مقدار تابع هدف در مقدارهای متفاوت بودجه



شکل (۴). تعداد ناوگان ملکی در مقدارهای متفاوت بودجه



شکل (۵). تعداد ناوگان تحت قرارداد اجاره بلندمدت در مقادیرهای متفاوت بودجه

مورد مطالعه نسبت به روند فعلی این شرکت شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش مقدار بودجه شرکت تعداد ناوگان بیشتری را خریداری خواهد نمود که در نتیجه آن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری نیز کاهش خواهد یافت. به علاوه نتیجه شد که مدل ارائه شده استفاده حداکثری از بودجه خرید جهت تهیه ناوگان ملکی را پیشنهاد می‌کند؛ زیرا که این عمل موجب کاهش مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری خواهد شد.

برای مطالعات بعدی می‌توان هزینه‌های مربوط به اجاره بلندمدت و کوتاه مدت ناوگان را به صورت پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفت. همین‌طور در مطالعات آینده می‌توان به موضوع تخصیص واگن‌ها و برنامه‌ریزی لوکوموتیوها نیز پرداخت. همچنین در مدل ارائه شده کمبود مجاز در نظر گرفته نشده است؛ از این‌رو، می‌توان این مسأله را با مجاز بودن امکان مواجهه با کمبود نیز مدل‌سازی نمود. افزون بر این در پژوهش حاضر ناوگان وسایل نقلیه همگن در نظر گرفته شده است؛ بدین‌منظور می‌توان در پژوهش‌های آتی ناوگان وسایل نقلیه را ناهمگن در نظر گرفت و مورد بررسی قرار داد. به علاوه، می‌توان مسأله مربوطه را با اهداف دیگری از قبیل حداکثرسازی سود شرکت ارائه‌دهنده خدمات حمل‌ونقل و... مدل‌سازی و حل نمود.

مراجع

- [1] Redmer, A. (2015). Strategic vehicle fleet management-the composition problem. LogForum. 2015; 11 (1): 119-26. ISSN 1895-2038. DOI 10.17270. J. LOG, 11.
- [2] Redmer, A. (2022). Strategic vehicle fleet management-a joint solution of make-or-buy, composition and replacement problems. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 28(2), 327-349.
- [3] Redmer, A. (2016). Strategic vehicle fleet management-the replacement problem. LogForum, 12(1).
- [4] Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing.

علاوه بر این، از آنجایی که با افزایش مقدار بودجه خرید ناوگان، شرکت مورد مطالعه ناوگان بیشتری را خریداری خواهد نمود؛ بنابراین نیازمند ناوگان استیجاری کمتری خواهد بود. به همین جهت اثر مقدار بودجه‌های متفاوت بر تعداد ناوگان تحت قرارداد اجاره بلندمدت در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۵ پیداست، مشاهده می‌شود که به ازای مجموع استان‌ها با افزایش ۲۰ درصدی، افزایش ۱۰ درصدی، کاهش ۱۰ درصدی و کاهش ۲۰ درصدی مجموع تعداد تریلر خودروبر تحت قرارداد اجاره بلندمدت به ترتیب برابر ۱۱۹، ۱۲۳، ۱۲۱ و ۱۲۳ دستگاه و مجموع تعداد واگن خودروبر تحت قرارداد اجاره بلندمدت به ترتیب برابر ۱۱۰، ۱۰۸، ۱۱۷ و ۱۱۶ دستگاه خواهد بود؛ بنابراین، به‌طور کلی می‌توان بیان داشت که با افزایش مقدار بودجه خرید ناوگان، تعداد ناوگان اجاره‌ای تحت قرارداد بلندمدت کاهش خواهد یافت. شرکت مورد مطالعه در هریک از این حالت‌ها مابقی ناوگان مورد نیاز خود را نیز از طریق قرارداد اجاره کوتاه مدت در اختیار خواهد گرفت.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مسئله تعیین اندازه ناوگان که به معنای تطبیق عرضه وسایل نقلیه با تقاضای حمل‌ونقل از طریق تعیین تعداد بهینه وسایل نقلیه است، امروزه جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های حمل‌ونقل و مدیریت لجستیک پیدا کرده است؛ از این‌رو، پژوهش حاضر به ارائه یک مدل تعیین اندازه بهینه ناوگان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان سیر پرداخته است. هدف مدل پیشنهادی حداقل کردن مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری با در نظر گرفتن محدودیت‌های دنیای واقعی است. در مدل پیشنهادی علاوه بر خرید ناوگانی متشکل از تریلر و واگن خودروبر، امکان عقد قرارداد اجاره ناوگان در دو حالت بلندمدت و کوتاه مدت به همراه ناوگان اولیه فعال، سن ناوگان اولیه و اثر تورم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از حل مدل ارائه شده نشان داد که پیاده‌سازی مدل پیشنهادی می‌تواند موجب کاهش ۲۱/۳۴ درصدی در مجموع هزینه‌های خرید، اجاره، عملیاتی و نگهداری شرکت

- and Transportation Review, 82, 162-198.
- [17] Lei, C., Lin, W. H., & Miao, L. (2016). A two-stage robust optimization approach for the mobile facility fleet sizing and routing problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 67, 75-89.
- [18] Hu, L., Zhu, J. X., Wang, Y., & Lee, L. H. (2018). Joint design of fleet size, hub locations, and hub capacities for third-party logistics networks with road congestion constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 568-588.
- [19] Mohtasham, M., Mirzaei-Nasirabad, H., Askari-Nasab, H., & Alizadeh, B. (2021). Truck fleet size selection in open-pit mines based on the match factor using a MINLP model. *Mining Technology*, 130(3), 159-175.
- [20] Manguino, J. L., & Ronconi, D. P. (2022). Step cost functions in a fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Annals of Operations Research*, 1-26.
- [21] Theuws, L. (2023). Determining optimal fleet composition under uncertainty (Doctoral dissertation, Tilburg University).
- [22] Karmanesh, Y., Bagheri, M., Hasany, R. M., & Pishvae, M. S. (2024). Two-stage stochastic programming approach for fleet sizing and allocating rail wagon under uncertain demand. *Computers & Industrial Engineering*, 188, 109878.
- [23] Eberhardt, K., Diehlmann, F., Lüttenberg, M., Kaiser, F. K., & Schultmann, F. (2025). A combined fleet size and mix vehicle routing model for last-mile distribution in disaster relief. *Progress in Disaster Science*, 26, 100411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100411>.
- [24] Breyer, N., Lidén, T., Tadaros, M., & Yu, L. (2026). A computational framework for dimensioning a railway freight transportation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 38, 100585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2026.100585>.
- [25] Ng, M., Mahmassani, H., Tong, D., Verbas, O., & Cokyasar, T. (2026). Joint Optimization of Multimodal Transit Frequency and Shared Autonomous Vehicle Fleet Size with Hybrid Metaheuristic and Nonlinear Programming. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19401>.
- [26] Asghari, M., Fathollahi-Fard, A. M., Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J., & Dulebenets, M. A. (2022). Transformation and linearization techniques in optimization: A state-of-the-art survey. *Mathematics*, 10(2), 283.
- [27] Birge, J. R. and François Louveaux (2006) Introduction to stochastic programming, Second Edition, Analysis.
- Computers & Operations Research*, 37(12), 2041-2061.
- [5] Brealey, R. A., Myers, S. C., Allen, F., & Edmans, A. (2025). *Principles of corporate finance* (99th ed.). McGraw Hill.
- [6] Chaowasakoo, P., Seppälä, H., & Koivo, H. (2018). Age-based maintenance for a fleet of haul trucks. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24(4), 511-528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/JQME-03-2017-0016>.
- [7] Stojanović, Đ., Nikoličić, S., & Miličić, M. (2011). Transport fleet sizing by using make and buy decision-making. *Economic Annals*, 56(190), 77-102.
- [۸] مسیحی، الیپس، & مفاخری. (۲۰۱۵). مدلسازی و حل مسئله تعیین تعداد واگن های باری با در نظر گرفتن اهداف چندگانه و ناوگان ریلی ناهمگون توسط الگوریتم های فراابتکاری. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۶(۴)، ۶۸۵-۷۰۲.
- [۹] فرازمند، مینو، پیشوایی، & میر سامان. (۲۰۱۸). مدل طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی تحت شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: حمل و نقل سیمان در کشور ایران). چشم انداز مدیریت صنعتی، ۸(۳)، ۱۱۵-۱۳۹.
- [10] G. B. Dantzig & D. R. Fulkerson, 1954. "Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule," *Naval Research Logistics Quarterly*, John Wiley & Sons, vol. 1(3), pages 217-222, September.
- [11] Sayarshad, H. R., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Forghani, N. (2010). Solving multi-objective optimization formulation for fleet planning in a railway industry. *Annals of Operations Research*, 181, 185-197.
- [12] Sayarshad, H. R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010). Solving a multi periodic stochastic model of the rail-car fleet sizing by two-stage optimization formulation. *Applied Mathematical Modelling*, 34(5), 1164-1174.
- [13] Loxton, R., Lin, Q., & Teo, K. L. (2012). A stochastic fleet composition problem. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3177-3184.
- [14] Yaghini, M., & Khandaghabadi, Z. (2013). A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4127-4138.
- [15] Klosterhalfen, S. T., Kallrath, J., & Fischer, G. (2014). Rail car fleet design: Optimization of structure and size. *International Journal of Production Economics*, 157, 112-119.
- [16] Milenković, M. S., Bojović, N. J., Švadlenka, L., & Melichar, V. (2015). A stochastic model predictive control to heterogeneous rail freight car fleet sizing problem. *Transportation Research Part E: Logistics*



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2026.32029.2221>

Presentation of an Optimal Fleet Sizing Model in a Multimodal Automotive Distribution System under Uncertainty

Ramin Nazarinia¹, Ali Husseinzadeh Kashan^{*2}

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and System Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and System Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2025/12/05

Revised 2026/03/16

Accepted 2026/03/20

Keywords:

Optimization,
Stochastic Programming,
Fleet Sizing,
Transportation,
Automotive Distribution.

ABSTRACT

Given the increasing role of transportation in modern societies, an efficient transportation fleet has become a critical factor in enhancing the performance of distribution systems. Effective fleet management directly impacts costs, transit times, reliability, flexibility, safety, and the environment. Consequently, optimal fleet sizing in organizations that heavily depend on transportation is essential for cost control and reduction. This study proposes a model for optimal fleet sizing in a multi-modal automotive distribution system, considering uncertainties in demand and travel time. The problem is formulated with the objective of minimizing total costs, including purchasing, hiring, operating, and maintenance expenses, and is developed under real-world constraints and conditions. The model considers not only the purchase of trailers and car carriers but also the possibility of entering into short-term and long-term hire agreements. Results for the studied company indicate that the maximum purchase budget is used to provide owned fleets. Moreover, implementing the proposed model could reduce the company's total purchasing, hiring, operating, and maintenance costs by approximately 21.34% compared to current practices.

* Corresponding author. A. Husseinzadeh Kashan
Tel.: 021-82884398; E-mail address a.kashan@modares.ac.ir