

## مدل طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی تحت شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: حمل‌ونقل سیمان در کشور ایران)

مینو فرازمنند\*، میر سامان پیشوایی\*\*

### چکیده

امروزه با جهانی‌شدن زنجیره‌های تأمین، استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل کارآمد برای توزیع کالاها می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش هزینه‌های لجستیکی و افزایش رضایت‌مندی مشتریان بگذارد. در این راستا مراکز لجستیک بار علاوه بر اینکه زیرساخت‌های موردنیاز برای انتقال جریان بار از جاده به شبکه ریلی را فراهم می‌کنند، نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های کل حمل‌ونقل با استفاده از اقتصاد در مقیاس و ایجاد ارزش‌افزوده برای کالاهای خام دارند. از این رو در این پژوهش با توجه به عدم قطعیت موجود در تقاضاها و هزینه‌های حمل‌ونقل، یک مدل ریاضی استوار برای طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی بار با استفاده از دو روش حمل‌ونقل ریل و جاده در سطح ملی ارائه شده است. در مدل احتمالی مبتنی بر سناریوی ارائه‌شده، دو هدف موردتوجه قرار گرفته است؛ هدف نخست بر حداقل کردن هزینه‌ها و هدف دوم از دیدگاه کاهش ریسک تصمیم‌گیری بر حداقل کردن حداکثر تأسّف سناریوهای محتمل در چارچوب برنامه‌ریزی استوار متمرکز است. در ادامه، برای نمایش اعتبار مدل ارائه شده و کارایی آن، حمل‌ونقل ترکیبی سیمان در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. خروجی‌ها نشان می‌دهد که توسعه تعدادی از ایستگاه‌های راه‌آهن در کشور و انتقال حجم قابل‌توجهی از سیمان حمل‌شده از جاده به شبکه ریلی، موجب کاهش قیمت این محصول استراتژیک می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی؛ مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی؛  
مدل‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو؛ حداقل کردن حداکثر تأسّف نسبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵.

\* دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

\*\* دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول).

## ۱. مقدمه

امروزه با توجه به تنوع محصولات و افزایش قدرت انتخاب مشتریان، کسب‌وکارها برای ماندن در فضای رقابتی موجود به دنبال بهبود مزیت‌های رقابتی سیستم خود هستند. در چنین شرایطی علاوه بر کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت خدمات و محصولات ارائه‌شده، شناسایی دقیق تقاضاهای مشتریان و پاسخگویی به آن‌ها در حداقل زمان ممکن به یکی مهم‌ترین دغدغه‌های کسب‌وکارها تبدیل شده است؛ بنابراین بهره‌مندی از یک سیستم توزیع کالای کارآمد می‌تواند در میزان موفقیت تولیدکنندگان نقش کلیدی داشته باشد. سیستم‌های حمل‌ونقل مورد استفاده در شبکه‌های توزیع کالاها که درصد بالایی از هزینه‌های لجستیکی را دربرمی‌گیرد (۳۰ تا ۶۰ درصد) [۲۱ و ۲۳]، می‌تواند بر کاهش هزینه‌های کل سیستم و افزایش رضایتمندی مشتریان تأثیر زیادی بگذارد [۹]. سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای که امروزه سهم قابل توجهی از حمل‌ونقل کالاها در بیشتر کشورهای جهان را به خود اختصاص داده است، ضمن حمل سریع کالاها و قابلیت دسترسی به مبادی و مقاصد نهایی بار و انعطاف‌پذیری بالا در انتخاب مسیرهای حمل کالا، برای حمل‌ونقل کالا در فواصل کوتاه (تا متوسط) مناسب است؛ درحالی‌که شبکه حمل‌ونقل ریلی ضمن اینکه بهترین گزینه برای حمل بارهای حجیم و در فواصل طولانی شناخته شده است، به دلیل محدودیت‌های زیرساختی امکان حمل درب‌به‌درب کالاها (از مبادی به مقاصد نهایی) را ندارد [۲۷].

گزارش‌های منتشرشده توسط «اتحادیه اروپا» در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که ۲۵ درصد آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های حمل‌ونقل از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای و در نتیجه حرکت وسایل نقلیه سنگین است و همین امر موجب تصویب قوانین متعددی در این کشورها شده که مهم‌ترین هدف آن‌ها کاهش حجم بار جابه‌جاشده توسط جاده‌ها و انتقال آن‌ها به روش‌های سازگار با محیط‌زیست است تا از گرم‌شدن کره زمین جلوگیری کنند و میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> ناشی از فعالیت‌های حمل‌ونقل را به حداقل ممکن برسانند [۲۰]. طبق این قانون یکی از اهداف اتحادیه اروپا انتقال ۳۰ درصد از کل حجم کالاهای حمل‌شده از طریق جاده به روش‌های سازگار با محیط‌زیست، از جمله حمل‌ونقل ریلی است.

در دهه اخیر برای بهره‌مندی از مزایای هر دو روش حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی، تمایل به استفاده از سیستم حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده افزایش یافته است؛ به طوری که در سال ۲۰۱۲، ۱۰ درصد حجم کالاهای جابه‌جاشده در آمریکا توسط این روش حمل‌ونقل انجام شده است و طبق برنامه‌ریزی‌های صورت‌گرفته این رقم تا سال ۲۰۴۰ باید به ۳۵ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. حمل‌ونقل ترکیبی یعنی حمل کالاها با استفاده از واحدهای استاندارد مانند کانتینر و از طریق دو یا چند روش حمل‌ونقل، به شرطی که هیچ‌گونه عملیاتی روی خود کالاها در طی فرآیند تعویض روش حمل‌ونقل در پایانه‌های چندوجهی صورت نگیرد [۲۰]. با توجه به محبوبیت

این روش حمل و نقل در چند سال اخیر و افزایش حجم تقاضای حمل بار از طریق حمل و نقل ترکیبی، تأمین زیرساخت‌های مورد نیاز برای حفظ کیفیت در ارائه خدماتی با قابلیت اطمینان بالا و تحویل به موقع کالاها، خود زمینه ایجاد چالش‌های جدیدی را فراهم کرده است. هاب‌های شبکه حمل و نقل ترکیبی به عنوان نقاطی که عملیات تعویض روش حمل و نقل در آنجا انجام می‌شود، یکی از مهم‌ترین اجزای یک شبکه حمل و نقل ترکیبی محسوب می‌شود که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد این هاب‌های چندوجهی (پایانه‌ها) مکان‌یابی صحیح آن‌ها است که یکی از تصمیم‌های اتخاذ شده در سطح استراتژیک برای شبکه حمل و نقل ترکیبی به‌شمار می‌رود [۲۴].

با توجه به نکات گفته شده، هدف اصلی این پژوهش ارائه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو برای طراحی شبکه حمل و نقل چندوجهی بار از طریق ریل و جاده است. در سطح اول مدل از میان نقاط بالقوه برای احداث پایانه‌های چندوجهی، نقاط بهینه برای استقرار تسهیلات مربوط به تعویض روش حمل و نقل کالا بین ریل و جاده، انتخاب می‌شود و در سطح دوم در مورد تخصیص جریان بار در شبکه تصمیم‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه تعداد کمی از مطالعات صورت گرفته در این حوزه، کاربرد مدل‌سازی استوار را در طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی بررسی کرده‌اند، در این پژوهش از رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای برخورد با منابع ایجادکننده عدم قطعیت، شامل تقاضاهای حمل بار و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل و نقل ترکیبی، استفاده شده است؛ بنابراین نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- در این مطالعه علاوه بر مکان‌یابی مراکز استقرار هاب‌های چندوجهی در مورد تخصیص جریان بار به دو روش مستقیم جاده‌ای و حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده تصمیم‌گیری می‌شود؛
- تقاضاهای مشتریان و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده شامل هزینه‌ی حمل و نقل جاده‌ای، ریلی و هزینه عملیات تعویض روش حمل و نقل با توجه به ماهیت استراتژیک و بلندمدت طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی دارای عدم قطعیت است؛
- از مدل ارائه شده در این پژوهش در یک مطالعه موردی واقعی در کشور ایران استفاده شده است؛
- با توجه به دسترسی به داده‌های تاریخی تقاضای حمل بار مطالعه شده در کشور از برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است؛
- علاوه بر حداقل کردن امید ریاضی هزینه‌های ناشی از سناریوهای مختلف، در این پژوهش هدف دوم بر حداقل کردن حداکثر تأسّف نسبی تمرکز کرده است که یکی از روش‌های برنامه‌ریزی استوار بدینانه محسوب می‌شود.
- تعیین سطوح مختلف ظرفیت برای احداث پایانه‌های چندوجهی باعث می‌شود، با توجه به هزینه‌های قابل توجه استقرار تسهیلات چندوجهی در نقاط بالقوه، در صورت انتخاب شدن نقطه

موردنظر به‌عنوان مکان بهینه، ظرفیت آن برای توسعه به‌اندازه موردنیاز با توجه به حجم تقاضاها انتخاب شود.

ادامه پژوهش حاضر بدین ترتیب سازمان یافته است. در بخش دوم مروری بر مبانی نظری موضوع صورت می‌گیرد. در بخش سوم به تعریف مسئله و بیان مفروضات، ارائه مدل قطعی و در ادامه مدل برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریوی طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده پرداخته می‌شود. در بخش چهارم نتایج مدل تحلیل و بررسی می‌شود. بخش پنجم به ارائه توصیه‌های مدیریتی و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص می‌یابد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدل‌سازی‌های انجام‌شده در حوزه سیستم‌های حمل‌ونقل ترکیبی را می‌توان در سه بخش مورد مطالعه قرار داد: استراتژیک؛ تاکتیکال و عملیاتی [۲۶]. تصمیم‌گیری برای مسائل بلندمدت و استراتژیک در این حوزه شامل مکان‌یابی تسهیلات و زیرساخت‌های شبکه و طراحی و توسعه شبکه حمل‌ونقل ترکیبی است، تصمیم‌گیری تاکتیکال و میان‌مدت به طراحی شبکه خدمات ارائه‌شده می‌پردازد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تخصیص مسیر به مبادی و مقاصد مشخص بار و تعیین فراوانی خدمات ارائه‌شده در هر مسیر است. در تصمیم‌گیری عملیاتی نیز زمان‌بندی خدمات، برنامه‌ریزی خدمه و تخصیص سایر منابع به فعالیت‌های یک زنجیره حمل‌ونقل ترکیبی مهم‌ترین مسائلی هستند که باید در مورد آن‌ها تصمیم‌گیری شود [۶]. نخستین بار مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی در یک شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده توسط آرنولد (۲۰۰۱) انجام شد که در این مطالعه ضمن تعیین مکان بهینه برای احداث پایانه‌های چندوجهی بدون در نظر گرفتن ظرفیت برای آن‌ها، در مورد روش حمل کالاها و تخصیص آن‌ها به شبکه تصمیم‌گیری شد. در این مطالعه امکان حمل کالاها از دو طریق مستقیم جاده‌ای و ترکیبی ریل و جاده مورد بررسی قرار گرفت [۳].

در مدل ارائه‌شده توسط ایشق و همکاران (۲۰۱۱) ضمن مکان‌یابی پایانه‌ها و تخصیص جریان بار به شبکه، برای حمل کالاها بین پایانه‌ها یک پنجره زمانی تعریف شد. در پژوهش‌های اشاره‌شده هیچ‌گونه عدم قطعیتی در پارامترهای ورودی مسئله، در نظر گرفته نشده است؛ در حالی که عدم قطعیت یکی از ویژگی‌های ذاتی تصمیم‌گیری در دنیای واقعی است که امروزه در حوزه‌های کاربردی بسیاری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در تصمیم‌های استراتژیک و بلندمدت در حوزه طراحی شبکه حمل‌ونقل مانند مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی در یک شبکه حمل‌ونقل ترکیبی پارامترهای ورودی مسئله از جمله تقاضاها و هزینه‌های حمل‌ونقل با عدم قطعیت همراه هستند [۱۵]. در پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷) به طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضاهای حمل‌ونقل پرداخته شده و با توسعه

یک مدل دوسطحی احتمالی مبتنی بر سناریو در مورد مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی و تخصیص جریان بار به شبکه تصمیم‌گیری شده است [۱۸]. در مدل ارائه‌شده توسط فتوحی و همکاران (۲۰۱۷) علاوه بر عدم قطعیت در تقاضاها و هزینه‌های حمل و نقل، احتمال بروز اختلال در شبکه و به دنبال آن عدم قطعیت در ظرفیت پاسخگویی تسهیلات مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش از رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است [۱۰]. این مطالعه در پژوهش فتوحی و همکاران (۲۰۱۸) توسعه داده شده و مسئله طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی در چند دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفته است و در تابع هدف حداقل کردن امید ریاضی هزینه‌های شبکه ناشی از سناریوهای مختلف بررسی شده است [۱۱].

بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه‌های حمل و نقل ترکیبی با تمرکز بر یک تابع هدف مدل خود را توسعه داده‌اند. از این تعداد نیز درصد قابل توجهی به حداقل کردن هزینه‌های اقتصادی و عملیاتی فرآیند حمل و نقل پرداخته‌اند. در پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷) هدف حداقل کردن هزینه‌های ساخت پایانه‌های چندوجهی و هزینه‌های حمل و نقل کالاها از مبدأ تا مقصد نهایی است و امکان حمل مستقیم کالاها از مبدأ تا مقصد وجود ندارد؛ در حالی که در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۸) علاوه بر امکان حمل کالاها توسط سیستم حمل و نقل ترکیبی، حمل و نقل مستقیم توسط جاده‌ای نیز بررسی شده است. این دو پژوهش به طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی با توپولوژی هاب و اسپوک پرداخته‌اند [۱۸، ۲۷].

در پژوهش قانه ایزابادی و همکاران (۲۰۱۶) با توسعه مدلی مبتنی بر مسیر، علاوه بر مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی، به تخصیص مسیر کالاها در شبکه با استفاده از سه روش حمل و نقل پرداخته شده است [۱۳]. در پژوهش موسترت و همکاران (۲۰۱۷) توابع هدف مدل، حداقل سازی هزینه‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای حمل و نقل کالاها در شبکه هستند. مقدار اثرات مخرب زیست‌محیطی بر اساس میزان کربن‌دی‌اکسید منتشرشده از وسایل حمل و نقل محاسبه می‌شود. میزان کربن‌دی‌اکسید نیز برحسب مسافت پیموده شده محاسبه می‌شود. در این پژوهش، تصمیمات مدل مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی، میزان بار حمل‌شده توسط سیستم حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده، حمل و نقل ترکیبی رودخانه و جاده و همچنین شبکه حمل و نقل مستقیم جاده‌ای هستند [۲۰].

با توجه به مهم‌ترین ویژگی‌های پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی که در جدول ۱، نشان داده شده است، در پژوهش‌های پیشین در این حوزه، به مدل‌سازی طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی با در نظر گرفتن چند سطح ظرفیت برای پایانه‌های ترکیبی توجه نشده است؛ در صورتی که با توجه به هزینه‌های قابل توجه احداث پایانه‌های چندوجهی، این امر می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برای طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی داشته باشد. نکته قابل توجه دیگر این است که در این مطالعه استواری مدل با توجه به

عدم قطعیت در پارامترهای مسئله با تابع هدف دوم سنجیده شده است. در نهایت اینکه بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، امکان حمل مستقیم بار توسط حمل‌ونقل جاده‌ای را در کنار حمل‌ونقل ترکیبی نادیده گرفته‌اند؛ در حالی که در این مطالعه، مدل ارائه‌شده با توجه به دو تابع هدف ۱. حداقل کردن هزینه‌های اقتصادی طراحی شبکه و ۲. استواری مدل که به‌نوعی میزان ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده را نیز مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌دهد، در مورد نحوه تخصیص جریان بار بین شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای و ترکیبی، تصمیم بهینه را اتخاذ می‌کند.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های مهم پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی و مکان‌یابی هاب

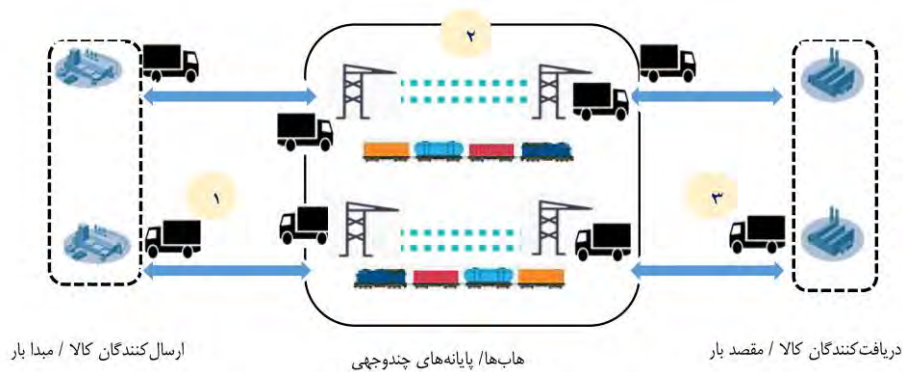
نویسندگان	مد حمل‌ونقل	چند محصولی	الگوی تخصیص	حمل‌ونقل مستقیم	ظرفیت محدود	ویژگی‌های زمان‌بندی در مدل	پارامترهای دارای عدم قطعیت	اجزای هدف
مارتین موسترت و همکاران، ۲۰۱۷ [۲۰]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	حداقل کردن هزینه‌ها	حداقل کردن هزینه‌ها
رافی اشفاق و همکاران، ۲۰۱۱ [۱۵]	x	x	x			محدودیت‌های تحول به برون	تقاضاها	حداقل کردن استواری شبکه
روبی وانگ و همکاران، ۲۰۱۸ [۲۷]	x	x	x			زمان‌بندی	هزینه‌ها	حداقل کردن هزینه‌ها
محدثفانه ازبادی و همکاران، ۲۰۱۶ [۱۳]	x	x	x			حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
فاطمه فتوحی و همکاران، ۲۰۱۷ [۱۰]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
فاطمه فتوحی و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۱]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
کانه سورسن و همکاران، ۲۰۱۲ [۲۵]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
لو هو و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۴]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
چنگ چانگ لین و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۹]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
سیل الومر و همکاران، ۲۰۱۸ [۲]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
ایسابل کورداچیا و همکاران، ۲۰۱۸ [۷]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
شو قنگ جی و همکاران، ۲۰۱۷ [۱۶]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
آدیل بیکاسوک و همکاران، ۲۰۱۶ [۵]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
الف زینب سربر و همکاران، ۲۰۱۶ [۲۲]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
شاهین گلاره و همکاران، ۲۰۱۵ [۱۲]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
قیان دان و همکاران، ۲۰۱۸ [۸]	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها
این مقاله	x	x	x	x	x	حداقل کردن تأخیرها	تقاضاها	حداقل کردن هزینه‌ها

### ۳. روش شناسی پژوهش

امروزه حمل و نقل ترکیبی کالاها با استفاده از روش‌های حمل و نقل ریلی و جاده‌ای یکی از روش‌های مناسب حمل کالا محسوب می‌شود؛ زیرا استفاده از این سیستم حمل و نقل امکان بهره‌مندی از مزایای روش‌های حمل و نقل تشکیل‌دهنده این سیستم را فراهم می‌کند. حمل و نقل ریلی برای حمل کالاهای حجیم در مسافت‌های طولانی مناسب است و حمل و نقل جاده‌ای برای حمل کالاها در فواصل کوتاه توصیه می‌شود. مسئله مورد بررسی در این مطالعه، طراحی شبکه برای حمل و نقل ترکیبی سیمان در کشور ایران است که در حال حاضر بخش قابل توجهی از آن توسط شبکه حمل و نقل جاده‌ای حمل می‌شود و هدف این پژوهش، ارائه یک راه‌حل جامع برای انتقال حجم سیمان حمل شده توسط جاده به بخش حمل و نقل ریلی است؛ بنابراین در این پژوهش هدف اصلی، توسعه یک مدل ریاضی است که در مرحله نخست به مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی از بین ایستگاه‌های تشکیلاتی شبکه ریلی کشور ایران پرداخته است که این ایستگاه‌های بالقوه، با توجه به تعداد خطوط آن‌ها و امکان توسعه آن‌ها در آینده، ظرفیت تبدیل شدن به پایانه‌های چندوجهی را دارند. در مرحله دوم نیز سیمان حمل شده بین تعدادی از مبادی و مقاصد کشور، به شبکه تخصیص می‌یابد.

با توجه به عدم دسترسی همه مراکز تولید و مصرف سیمان به شبکه ریلی، بهترین راهکار برای انتقال این حجم از بار به شبکه ریلی، بهره‌گیری از سیستم حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده است. در این پژوهش، هدف طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی از دید تصمیم‌گیران و مدیرانی است که علاوه بر اینکه به دنبال مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی بار برای ارائه خدمات انتقال بار بین روش‌های حمل و نقل ریلی و جاده‌ای هستند، باید در مورد نحوه تخصیص جریان بار سیمان بین مبادی و مقاصد مشخص شده نیز برنامه‌ریزی کنند تا در نهایت حمل کالاها علاوه بر روش حمل و نقل مستقیم از طریق جاده، با استفاده از حمل و نقل ترکیبی از طریق شبکه ریلی کشور امکان‌پذیر و اقتصادی باشد.

در این پژوهش، فرآیند حمل و نقل ترکیبی کالاها همان‌طور که در شکل ۱، نیز مشخص شده است از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود: ۱. خدمات جمع‌آوری کالاها از طریق حمل و نقل جاده‌ای در ابتدای زنجیره حمل و نقل؛ ۲. حمل و نقل کالا در حجم بالا و مسافت طولانی بین دو پایانه حمل و نقل ترکیبی؛ ۳. خدمات تحویل کالاها از طریق حمل و نقل جاده‌ای در انتهای زنجیره حمل و نقل.



شکل ۱. زنجیره حمل‌ونقل چندوجهی بار از طریق سیستم ریل و جاده

اجرای فرآیند حمل‌ونقل ترکیبی در هاب‌های چندوجهی یا پایانه‌های ترکیبی معمولاً به دو روش انجام می‌شود: در روش اول کالاها توسط روش حمل‌ونقل جاده‌ای به هاب‌های چندوجهی مبدأ انتقال می‌یابد و سپس کانتینرهای حامل کالاها یا تریلرها از کامیون‌ها یا تریلی‌های کِشنده تریلرها جدا می‌شود و پس از تشکیل قطار به سفر خود تا پایانه چندوجهی مقصد ادامه می‌دهند. در پایانه چندوجهی مقصد، کانتینرها از قطارها به کامیون منتقل شده و تا مقصد نهایی منتقل می‌شود. این روش حمل در کشورهای اروپایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حالت دوم کامیون‌ها و کِشنده‌های تریلر پس از ورود به پایانه مبدأ روی واگن‌های مخصوص حمل کامیون قرار می‌گیرند و به همراه راننده خود تا پایانه چندوجهی مقصد حمل می‌شوند. در پایانه مقصد کالاها باقی مسیر تا مقصد نهایی خود توسط همان کامیون‌ها و از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای طی می‌کنند [۲۷]. در این پژوهش با مبنای قراردادن روش اول، فرض شده است برای حمل سیمان، نخست از کانتینر استفاده می‌شود و دوم در هاب‌های چندوجهی فقط کانتینرها بین روش‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی جابه‌جا می‌شوند.

مسئله طراحی شبکه یکی از تصمیم‌هایی است که در سطح استراتژیک بررسی می‌شود که نتایج این تصمیم‌گیری در بلندمدت تأثیرگذار است و از طرفی اجرای آن نیز به زمان زیادی نیاز دارد [۱]؛ بنابراین مقادیر بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار در نتایج را نمی‌توان در مرحله تصمیم‌گیری به صورت قطعی مشخص کرد. با توجه به دلایل ذکر شده، هدف اصلی این پژوهش طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل‌ونقل ترکیبی است.



- مفروضات استفاده شده در مدل سازی مسئله به صورت زیر است:
- در سیستم حمل و نقل چندوجهی، عملیات جمع آوری بار از ارسال کنندگان کالا و تحویل کالاها به دریافت کنندگان آنها از طریق سیستم حمل و نقل جاده ای انجام می شود؛
  - انتقال جریان بار بین هاب های چندوجهی از طریق سیستم حمل و نقل ریلی انجام می شود؛
  - واحد حمل کننده کالا در هر دو روش حمل و نقل ریلی و جاده ای، کانتینر در نظر گرفته شده است؛
  - جریان بار می تواند در مسیر خود از پایانه های چندوجهی متعددی عبور کند؛ در حالی که فقط در دو پایانه تعویض روش حمل و نقل انجام می شود؛
  - ایستگاه های بالقوه برای تبدیل شدن به پایانه های چندوجهی از قبل مشخص است و تعداد پایانه هایی که باید مکان یابی شوند از قبل مشخص نشده است؛
  - امکان حمل کالاها بین مبادی و مقاصد به دو شکل امکان پذیر است: ۱. ارسال مستقیم از طریق حمل و نقل جاده ای و ۲. از طریق حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده؛
  - تقاضاهای حمل، هزینه حمل هر تن بار از طریق جاده و ریل و هزینه عملیات تعویض روش حمل و نقل در هر پایانه یا هاب های چندوجهی با عدم قطعیت همراه است و بر مبنای داده های تاریخی موجود سناریوهای گسسته ای تعریف شده و از برنامه ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است؛
  - برای توسعه ایستگاه های تشکیلاتی راه آهن سطوح ظرفیتی در نظر گرفته شده است که مدل با توجه به حجم جریان بار ورودی و خروجی از هاب ها بهترین گزینه را انتخاب می کند.

**مدل سازی ریاضی.** همان طور که پیش از این نیز بیان شد مکان یابی پایانه های چندوجهی از میان ایستگاه های تشکیلاتی راه آهن و به دنبال آن تخصیص جریان بار به شبکه، مهم ترین تصمیم های طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده هستند؛ همچنین با توجه به عدم قطعیت در تقاضاهای مشتریان مورد مطالعه که می تواند در نتیجه تغییرات هزینه های حمل و نقل در شبکه ایجاد شود، تعداد محدودی سناریوی ممکن تولید شده است؛ بنابراین با توجه به هزینه های ثابت و قابل توجه استقرار تسهیلات تعویض روش حمل و نقل در ایستگاه های راه آهن بالقوه، با در نظر گرفتن امکان انتخاب بین سطوح مختلف ظرفیت، شبکه حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده طراحی می شود.

#### اندیس ها و مجموعه ها

*i*: مبادی ارسال کننده کالاها

*m*: مقاصد دریافت کننده کالاها

$z, k$ : پایانه‌های مبدأ و مقصد برای تعویض روش حمل‌ونقل  
 $l$ : سطح ظرفیت پایانه‌های بالقوه  
 $N$ : مجموعه نقاط شامل مبدأ - مقصد تقاضاها  $(i, m) \in N$   
 $H$ : مجموعه نقاط بالقوه برای احداث پایانه  
 $L$ : مجموعه سطوح ظرفیت تعریف‌شده برای احداث پایانه در نقاط بالقوه  $(l \in L)$

### پارامترها

تقاضای بار بین دو نقطه مبدأ $i$ و مقصد $m$ (برحسب تن)	$D_{im}$
فاصله بین دو نقطه مبدأ $i$ و مقصد $m$ برای حمل‌ونقل مستقیم جاده‌ای (برحسب کیلومتر)	$d_{im}$
فاصله بین دو پایانه مبدأ $z$ و مقصد $k$ برای حمل‌ونقل ریلی (برحسب کیلومتر)	$S_{jk}$
فاصله مبادی بار (ارسال‌کنندگان کالا) تا پایانه مبدأ (برحسب کیلومتر)	$g_{ij}$
فاصله پایانه‌های مقصد تا مقاصد بار (دریافت‌کنندگان کالا) (برحسب کیلومتر)	$p_{km}$
هزینه احداث پایانه در نقطه $z$ با سطح ظرفیت $l$	$F_j^l$
هزینه حمل یک تن بار به‌اندازه یک کیلومتر با جاده از نقطه مبدأ $i$ به مقصد $m$	$b_{im}$
هزینه حمل یک تن بار به‌اندازه یک کیلومتر با راه‌آهن از پایانه مبدأ $z$ به پایانه مقصد $k$	$c_{jk}$
هزینه عملیات تعویض روش حمل‌ونقل برای هر تن بار در پایانه چندوجهی $z$	$a_j$
هزینه حمل یک تن بار به‌اندازه یک کیلومتر با جاده از نقطه مبدأ (ارسال‌کننده) $i$ به پایانه مبدأ $z$	$\alpha_{ij}$
هزینه حمل یک تن بار به‌اندازه یک کیلومتر با جاده از پایانه مقصد $k$ به مقصد نهایی کالا در نقطه $m$	$\beta_{km}$
ظرفیت پایانه چندوجهی $z$ در سطح $l$	$Ca_j^l$

### متغیرهای تصمیم

متغیر تصمیم صفر و یک برای احداث پایانه چندوجهی در نقطه $z$ با سطح ظرفیت $l$	$Y_j^l$
حجم بار جابه‌جاشده به‌صورت مستقیم از طریق جاده بین دو نقطه $i$ و $m$	$W_{im}$
حجم کالای حمل شده بین مبدأ $i$ و مقصد $m$ که در دو پایانه $z$ و $k$ تغییر روش می‌دهد	$X_{jk}^i$

حجم کالای حمل شده بین مبدأ  $i$  و مقصد  $m$  با پایانه مقصد  $k$   $Q_{km}^i$

با توجه به نمادهای معرفی شده در بالا، مدل توسعه داده شده برای مسئله طراحی شبکه حمل و نقل چندوجهی در حالت قطعی به شکل زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_{j \in H} \sum_l F_j^l Y_j^l + \sum_i \sum_m b_{im} d_{im} W_{im} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k (g_{ij} \alpha_{ij} + a_j) X_{jk}^i \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k s_{jk} c_{jk} X_{jk}^i \\ & + \sum_i \sum_k \sum_m (p_{km} \beta_{km} + a_k) Q_{km}^i \end{aligned} \quad (1)$$

$$D_{im} = W_{im} + \sum_k Q_{km}^i, \quad \forall i, m \in N \quad (2)$$

$$\sum_m D_{im} = \sum_m W_{im} + \sum_j \sum_k X_{jk}^i, \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_k X_{jk}^i \leq \sum_l Y_j^l \sum_m D_{im}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$\sum_j X_{jk}^i \leq \sum_l Y_k^l \sum_m D_{im}, \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$\sum_j X_{jk}^i = \sum_m Q_{km}^i, \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$\sum_k \sum_i X_{jk}^i \leq \sum_l C a_j^l Y_j^l, \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_m Q_{km}^i \leq \sum_l C a_k^l Y_k^l, \quad \forall k \quad (8)$$

$$X_{jk}^i = 0, \quad \forall i \in N, \forall j, k \in H, \text{ if } j = k \quad (9)$$

$$\sum_l Y_j^l \leq 1, \quad \forall j \in H \quad (10)$$

$$X_{jk}^i, Q_{km}^i \geq 0, Y_j^l \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, k, l \quad (11)$$

تابع هدف ۱، شامل هزینه‌های استقرار تجهیزات تعویض روش حمل‌ونقل در ایستگاه‌ها و هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل است. محدودیت‌های ۲ و ۳، نشان می‌دهد که تقاضای حمل بار توسط شرکت ارائه‌دهنده خدمات لجستیکی می‌تواند به یکی از روش‌های حمل مستقیم جاده‌ای یا حمل‌ونقل ترکیبی پاسخ داده شود. محدودیت‌های ۴ و ۵، تضمین می‌کند که بیش از نیاز مشتریان، جریان بار به شبکه اختصاص نیابد؛ حتی اگر ظرفیت داشته باشد. محدودیت ۶، برقرارکننده تعادل جریان بار در پایانه‌های چندوجهی است. محدودیت‌های ۷ و ۸، تضمین می‌کند که جریان اختصاص داده‌شده به شبکه متناسب با سطح ظرفیت اسمی انتخاب‌شده برای احداث پایانه‌های جدید صورت بگیرد. محدودیت ۹، تضمین می‌کند که برای حمل ترکیبی کالاها حتماً باید دو پایانه متفاوت در مسیر برای تعویض روش حمل‌ونقل انتخاب شود. محدودیت ۱۰، تضمین می‌کند که پایانه‌های جدید حداکثر با یک سطح ظرفیت احداث شوند. محدودیت ۱۱ نیز نوع متغیرهای مدل را که غیرمنفی و صفر و یک هستند، مشخص می‌کند.

**مدل‌سازی مسئله در حالت عدم قطعیت.** عدم قطعیت در طراحی شبکه‌های لجستیکی در دو دسته طبقه‌بندی می‌شود: ۱. عدم قطعیت در پارامترهای معمول کسب‌وکار، مانند نوسان‌هایی که در تقاضاها یا تأمین تقاضاها اتفاق می‌افتد و ۲. عدم قطعیت به دلیل اختلال‌هایی که می‌تواند در شبکه رخ دهد. وقوع این اختلال‌ها احتمال کمی دارد ولی آثار قابل توجهی بر عملکرد شبکه دارد. منابع ایجادکننده این اختلال‌ها می‌توانند حوادث طبیعی مانند سیل و زلزله یا منابع انسانی مانند جنگ و حمله تروریستی باشند. از دسته‌بندی‌های دیگری که در حوزه عدم قطعیت انجام شده است، طبقه‌بندی عدم قطعیت در دو بخش ۱. عدم قطعیت در داده‌های ورودی مسئله و ۲. انعطاف در محدودیت‌ها و اهداف تعریف شده در مسئله را می‌توان نام برد.

عدم قطعیت در داده‌های ورودی مسئله نیز خود به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱. عدم قطعیت تصادفی که به دلیل ماهیت تصادفی پارامترهای مسئله است و معمولاً برای حل این نوع مسائل از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود و ۲. عدم قطعیت شناختی که از فقدان دانش در حوزه مورد مطالعه ریشه می‌گیرد که دلیل این فقدان دانش و مبهم‌بودن ذاتی مسئله مورد مطالعه یا عدم دسترسی به داده‌های کافی برای تعیین مقدار پارامترهای مسئله در آینده است. در این نوع مسائل از رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی و فازی استفاده می‌شود.

منبع ایجادکننده عدم قطعیت در این مطالعه موردی، عدم قطعیت در داده‌های ورودی مسئله شامل تقاضاهای حمل سیمان بین کارخانه‌های تولیدکننده سیمان و مقاصد مختلف در کشور و هزینه‌های مختلف فرآیند حمل‌ونقل ترکیبی شامل هزینه حمل‌ونقل جاده‌ای، هزینه حمل‌ونقل ریلی و هزینه تعویض روش حمل‌ونقل در پایانه‌ها است؛ بنابراین با توجه به دسترسی به داده‌های تاریخی پارامترهای دارای عدم قطعیت، در این مطالعه از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر

سناریو استفاده شده است. همان طور که پیش از این نیز بیان شد، یک مدل دوسطحی استوار به این منظور توسعه داده شده است. در سطح نخست، تعداد و مکان بهینه استقرار پایانه‌های چندوجهی مشخص می‌شود و در سطح دوم جریان بهینه بار به شبکه تخصیص داده می‌شود؛ بنابراین تابع هدف اول در این مدل، امید ریاضی هزینه‌های مختلف عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه در سناریوهای تعریف شده را شامل می‌شود؛ همچنین مجموعه  $S$  شامل سناریوهای تولید شده با توجه به پارامترهای دارای عدم قطعیت تقاضا و هزینه حمل و نقل است. سه سناریوی خوش بینانه، محتمل و بدبینانه اعضای این مجموعه را تشکیل داده‌اند. در سناریوی خوش بینانه فرض بر این است که با افزایش هزینه حمل و نقل، با توجه به افزایش نیاز شهرهای مختلف کشور به سیمان، تقاضای حمل و نقل آن نیز در کشور افزایش می‌یابد. در سناریوی محتمل با افزایش این هزینه‌ها تقاضا ثابت می‌ماند و در سناریوی بدبینانه این تقاضا کاهش می‌یابد. با توجه به عدم قطعیت موجود در تقاضاها و هزینه‌های حمل و نقل، در این مطالعه علاوه بر امید ریاضی هزینه‌های احداث پایانه‌های چندوجهی و هزینه‌های حمل و نقل که شامل متغیرهای سطح اول و سطح دوم برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو است، در تابع هدف دوم از شاخص تأسف نسبی استفاده شده که توسط Kouvelis و همکاران (۲۰۱۳) ارائه شد است [۱۷]. استفاده از این شاخص به‌ویژه در مسائل استراتژیک طراحی شبکه که از برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح (MILP) برای مدل‌سازی مسئله استفاده می‌شود، موجب می‌شود که نقاط بهینه مسئله برای مکان‌یابی تسهیلات از استواری بالاتری برخوردار باشد [۴]. همان طور که در معادله ۱۲، نشان داده شده است، شاخص تأسف مطلق درحقیقت تفاوت مقدار تابع هدف مسئله قطعی در هر سناریو  $Z_{S1}^*$  و تابع هدف به دست آمده در مدل احتمالی مبتنی بر سناریو  $Z_{S1}$  را نشان می‌دهد.

$$R_S = Z_{S1} - Z_{S1}^* \quad (12)$$

در این مطالعه در تابع هدف دوم ارائه شده در مدل غیرقطعی که مطابق با معادله ۱۳، تعریف شده است، مدل به دنبال حداقل کردن حداکثر تأسف مطلق هر سناریو نسبت به مقدار بهینه مدل قطعی با داده‌های مربوط به همان سناریو است (تأسف نسبی). در واقع می‌توان چنین در نظر گرفت که این تابع هدف به دنبال حداقل کردن ریسک ناشی از شرایط عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری خواهد بود.

$$R'_S = \frac{R_S}{Z_{S1}^*} \quad (13)$$

در ادامه، مدل استوار توسعه‌داده‌شده برای مدل اسمی ارائه‌شده در قسمت قبیل ارائه شده است:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & \sum_j \sum_l F_j^l Y_j^l + \sum_i \sum_m \sum_s pa_s (\tilde{b}_{sim} d_{im} W_{sim} \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_s pa_s (\tilde{\alpha}_{sim} g_{ij} + \tilde{\alpha}_{sj}) X_{sjk}^i \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_k pa_s \tilde{c}_{sjk} s_{jk} X_{sjk}^i \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_m \sum_s pa_s (\tilde{\beta}_{skm} p_{km} + \tilde{\alpha}_{sk}) Q_{skm}^i
 \end{aligned} \tag{۱۴}$$

$$\text{Min } Z_2 = \text{Min } \max_S R'_S \tag{۱۵}$$

$$D_{sim} = W_{sim} + \sum_k Q_{skm}^i, \quad \forall i, m \in N, \forall s \in S \tag{۱۶}$$

$$\sum_m D_{sim} = \sum_m W_{sim} + \sum_j \sum_k X_{sjk}^i, \quad \forall i, m \in N, \forall s \in S \tag{۱۷}$$

$$\sum_k X_{sjk}^i \leq \sum_l Y_j^l \sum_m D_{sim}, \quad \forall i \in N, \forall j \in H, \forall s \in S \tag{۱۸}$$

$$\sum_j X_{sjk}^i \leq \sum_l Y_k^l \sum_m D_{sim}, \quad \forall i \in N, \forall k \in H, \forall s \in S \tag{۱۹}$$

$$\sum_j X_{sjk}^i = \sum_m Q_{skm}^i, \quad \forall i \in N, \forall k \in H, \forall s \in S \tag{۲۰}$$

$$\sum_k \sum_i X_{sjk}^i \leq \sum_l Ca_j^l Y_j^l, \quad \forall j, s \tag{۲۱}$$

$$\sum_k \sum_i X_{sjk}^i \leq \sum_l Ca_j^l Y_j^l, \quad \forall j, s \tag{۲۲}$$

$$X_{sjk}^i = 0, \quad \forall j = k \tag{۲۳}$$

$$\sum_l Y_j^l \leq 1, \quad \forall j \in H \tag{۲۴}$$

$$X_{sjk}^i, Q_{skm}^i \geq 0, Y_j^l \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, k, l \tag{۲۵}$$

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای نمایش صحت کارکرد مدل ارائه شده در این بخش با دریافت داده‌های مربوط به حجم سیمان حمل شده در کشور در سال ۱۳۹۶، طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی سیمان در کشور ایران به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. در حال حاضر حجم قابل توجهی از سیمان حمل شده در انواع و کیفیت‌های مختلف در کشور از طریق سیستم حمل و نقل جاده‌ای جابه‌جا می‌شود که در این مطالعه صرف‌نظر از انواع مختلف سیمان، حجم سیمان جابه‌جا شده میان ۹ شهر به عنوان مبدأ و کارخانه تولیدی سیمان، ۸ مصرف‌کننده و ۱۲ ایستگاه تشکیلاتی راه‌آهن در کشور با توجه به تعداد خطوط مانوری و امکان توسعه آن‌ها در آینده به عنوان نقاط کاندید برای توسعه و استقرار تجهیزات حمل و نقل ترکیبی انتخاب شده‌اند. شهرهایی که مبادی و مقاصد بار را تشکیل می‌دهند، در شکل ۲ و ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن که به عنوان نقاط بالقوه برای تبدیل شدن به هاب‌های چندوجهی انتخاب شده‌اند، در شکل ۳، مشخص شده است. مدل‌های ریاضی ارائه شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX کدنویسی شده و توسط همین نرم‌افزار حل شده است. تمامی آزمایش‌های مورد نیاز روی یک رایانه پنج‌هسته‌ای با ۴ گیگابایت حافظه (رم) اجرا شده‌اند.



شکل ۲. مراکز تولید و مصرف سیمان



شکل ۳. ایستگاه‌های بالقوه برای احداث

با توجه به عدم قطعیت در تقاضاها و هزینه‌ی حمل‌ونقل، در این پژوهش از برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است. سه سناریو بررسی شده در این مسئله در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج مدل‌های قطعی و احتمالی مبتنی بر سناریو

هزینه‌های عملیاتی (ده میلیون تومان)		احتمال وقوع	سناریوها
مدل احتمالی مبتنی بر سناریو	مدل قطعی		
	۱۲۷ / ۹۵۸	۰/۵	۱
۱۷۴ / ۰۰۷	۳۱۹ / ۱۰۸	۰/۴	۲
	۱۲۹ / ۱۷۷	۰/۱	۳
متوسط هزینه‌های عملیاتی در مدل قطعی برای سه سناریو			
۱۶۴ / ۵۴			

**تحلیل نتایج حل مدل غیرقطعی با تابع هدف اول.** سناریوی اول به‌عنوان محتمل‌ترین سناریو در نظر گرفته شده و داده‌های مورداستفاده در این سناریو به‌عنوان داده‌های اسمی در مدل قطعی بررسی شده است. با توجه به جدول ۲، پس از حل مدل توسعه داده‌شده با تابع هدف اول که شامل هزینه‌های ثابت توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی منتخب و هزینه‌های حمل‌ونقل سیمان است، مقدار بهینه تابع هدف در مدل احتمالی دوسطحی نسبت به متوسط هزینه‌های عملیاتی در



سه سناریو در مدل قطعی به میزان ۹۴/۶۷ میلیون تومان بیشتر است. با توجه به عدم قطعیت در داده‌های تقاضا و هزینه‌های حمل و نقل این تفاوت ارزش اطلاعات کامل در این مطالعه موردی را به خوبی نشان می‌دهد. اضافه کردن تسهیلات در مسائل طراحی شبکه‌های لجستیکی با صرف هزینه و زمان قابل توجهی همراه است. در این مطالعه طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی سیمان در کشور به عنوان یک تصمیم استراتژیک، نیازمند صرف هزینه زیادی برای توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی و تبدیل شدن آن‌ها به پایانه‌های چندوجهی خواهد بود؛ بنابراین تغییر مکان پایانه‌های چندوجهی در یک بازه زمانی کوتاه در عمل نشدنی است؛ در حالی که تغییر جریان تخصیص یافته به شبکه به عنوان یک تصمیم تاکتیکی و میان مدت از انعطاف بیشتری برخوردار است.

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مدل‌های قطعی و احتمالی توسعه داده شده تحت هر سناریو، ابتدا هر دو مدل قطعی و احتمالی توسط نرم افزار CPLEX 12.6 حل شده‌اند؛ سپس با توجه به اینکه جریان بار بین تسهیلات مختلف در شبکه (متغیرهای پیوسته در مدل) در طول زمان می‌تواند به روز شوند، نتایج حاصل از مدل قطعی و احتمالی برای هر سناریو مورد بررسی قرار گرفت است. در این ارزیابی متغیرهای صفر و یک که به معنای توسعه یا عدم توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی راه آهن برای تبدیل شدن به هاب‌های چندوجهی هستند، پس از طراحی ساختار شبکه در عمل قابل تغییر نیستند و از طرفی بدیهی است که مدل قطعی در هر سناریو تسهیلات مستقر شده در ایستگاه‌ها و ظرفیت آن‌ها را به گونه‌ای تعیین می‌کند که پاسخگوی تقاضاهای همان سناریو باشد. با توجه به نکات ذکر شده در این قسمت می‌توان عملکرد مدل‌های قطعی و احتمالی را همانند جدول ۳، ارزیابی کرد.

با فرض اینکه در این مطالعه از مدل احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده نشود و شبکه بر مبنای تقاضاهای سناریوی اول که محتمل‌ترین سناریو است طراحی شود، ۴ ایستگاه تشکیلاتی از میان ۱۲ ایستگاه بالقوه برای توسعه انتخاب می‌شود. در این شبکه طراحی شده در صورت وقوع هر یک از سناریوهای دوم و سوم در آینده هزینه‌های عملیاتی حمل و نقل سیمان نسبت به مدل احتمالی بیشتر خواهد بود؛ بنابراین با توجه به نتایج گردآوری شده در جدول ۳، در مطالعه انجام شده با ابعادی کوچک نسبت به کل تعداد تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان سیمان و حجم سیمان حمل شده در کل کشور، استفاده از مدل احتمالی مبتنی بر سناریو موجب ۱۱۱۸۰۰۰۰ تومان صرفه‌جویی در هزینه‌های اولیه توسعه ایستگاه‌ها و هزینه‌های عملیاتی حمل و نقل سیمان می‌شود.

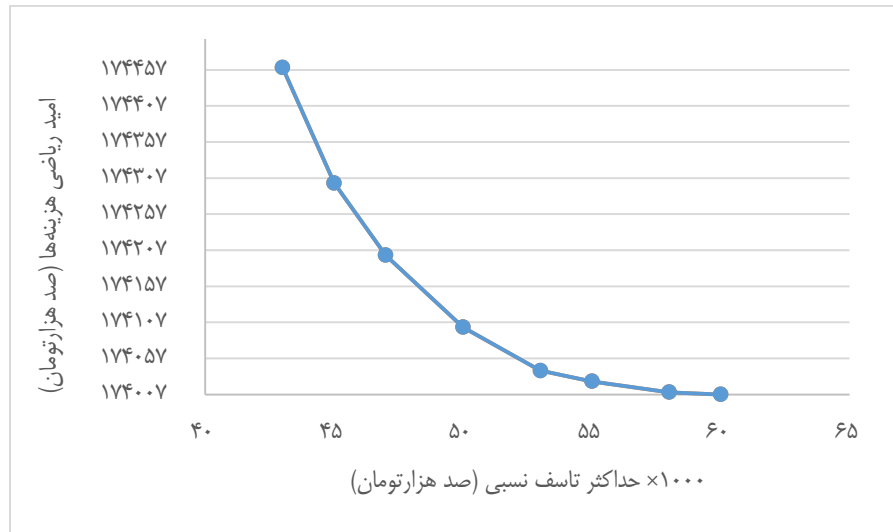
جدول ۳. نتایج حاصل از ارزش‌های ایجادشده توسط مدل احتمالی مبتنی بر سناریو

سناریوها	هزینه‌های عملیاتی (ده میلیون تومان)		ارزش ایجادشده توسط مدل احتمالی مبتنی بر سناریو (ده میلیون تومان)
	مدل قطعی (طراحی شده بر مبنای سناریوی اول)	مدل احتمالی مبتنی بر سناریو	
۲	۲۲۰ / ۲۳۵	۲۱۹ / ۳۱	۰/۹۲۵
۳	۱۳۱ / ۶۷۱	۱۳۰ / ۳۶	۱/۳۱۱
متوسط ارزش ایجادشده توسط مدل احتمالی مبتنی بر سناریو:			۱ / ۱۱۸

تحلیل نتایج حاصل از حل مدل غیرقطعی با دو تابع هدف. در این بخش، هدف ارائه نتایج حاصل از بررسی مدل دو هدفه در حالت احتمالی است. شکل ۴، نمودار رسم‌شده برای مرز پارتوی دو هدف توسعه‌داده‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد در مدل احتمالی هدف اول حداقل کردن امید ریاضی هزینه‌های عملیاتی طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی سیمان و هدف دوم حداقل کردن حداکثر تأسّف سناریوهای تعریف‌شده در مدل احتمالی را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار متناظر این دو تابع هدف در ۸ نقطه به ترتیب از حالت حداقل حداکثر تأسّف نسبی تا حداقل امید ریاضی هزینه‌های عملیاتی ارائه شده است. نمودار پارتو نشان می‌دهد که با توجه به عدم قطعیت در تقاضای سالیانه سیمان و هزینه‌های حمل‌ونقل آن در کشور، تمرکز بر متوسط هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل و سرمایه‌گذاری اولیه برای استقرار تجهیزات تعویض روش حمل‌ونقل در سناریوهای مختلف موجب افزایش تأسّف بدترین سناریو در مدل احتمالی می‌شود.

بدیهی است که منظور از بدترین سناریو در مدل احتمالی، حالتی است که میزان تابع هدف هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه در مدل احتمالی نسبت به بررسی جداگانه آن سناریو در مدل قطعی بیشترین مقدار است و با حرکت از سمت راست نمودار به سمت چپ که با کاهش حداکثر تأسّف نسبی همراه است، استواری مدل بیشتر می‌شود و در مقابل برای این استواری، تصمیم‌گیرنده متحمل هزینه بیشتری نیز خواهد شد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۴. نمودار پارتوی رسم‌شده برای مدل دوهدفه

با توجه به نمودار رسم‌شده در شکل ۴ و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری، هر چه تصمیم‌گیرنده در زمان تصمیم‌گیری ریسک بالاتری را بپذیرد، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای توسعه شبکه حمل‌ونقل ترکیبی، کمتر خواهد شد. منظور از ریسک، حداکثر تفاوت هزینه تخمین‌زده‌شده در مرحله برنامه‌ریزی با آنچه در واقعیت و آینده رخ می‌دهد (سناریو)، است. برای مثال، اگر تصمیم‌گیرنده بپذیرد که تفاوت هزینه تخمین‌زده‌شده و واقعیت کمتر از ۴۵۰۰۰۰۰ باشد، هزینه‌ای که برای سرمایه‌گذاری اختصاص می‌دهد، بین ۱۷۳۳۰۷۰۰۰۰ و ۱۷۴۴۵۷۰۰۰۰ خواهد بود.

هر چه ریسک پذیرفته‌شده افزایش یابد و تصمیم‌گیرنده برای تفاوت هزینه‌های تخمین‌زده‌شده و هزینه واقعی در آینده مقدار بیشتری را بپذیرد، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کاهش می‌یابد. در حالت کلی به‌ازای ۱۰۰ هزار تومان کاهش در متوسط هزینه‌ها، تصمیم‌گیرنده با توجه به شرایط عدم قطعیتی که در ماهیت مسئله و تقاضای حمل‌وسیمان در کشور وجود دارد، ریسکی به ارزش ۲۶ میلیون را می‌پذیرد.

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند تعداد نقاطی که از میان ایستگاه‌های تشکیلاتی انتخاب می‌شود (صرف‌نظر از ظرفیت انتخاب‌شده) تا با استقرار تسهیلات مربوطه به هاب‌های چندوجهی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی تبدیل شوند، در مدل احتمالی توسعه‌داده‌شده با در نظر گرفتن هر یک از اهداف به‌صورت جداگانه متفاوت است. در حالت اول از ۱۲ ایستگاه بالقوه، ۶ ایستگاه و در حالت دوم ۸ ایستگاه برای توسعه و تبدیل‌شدن به هاب‌های چندوجهی انتخاب‌شده است؛ بنابراین

می‌توان نتیجه گرفت که دلیل افزایش امید ریاضی هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه در حالت دوم تعداد بیشتر ایستگاه‌هایی است که باید برای افزایش استواری مدل توسعه یابند.

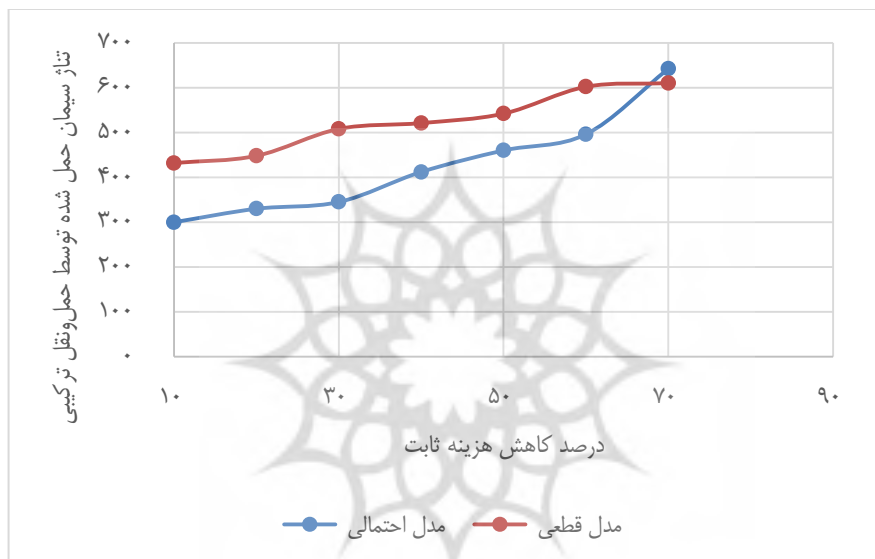


شکل ۵. ایستگاه‌های انتخاب‌شده در حل مدل با تابع هدف اول



شکل ۶. ایستگاه‌های انتخاب‌شده در حل مدل با تابع هدف دوم

**تحلیل حساسیت روی هزینه ثابت استقرار تجهیزات در ایستگاه‌های تشکیلاتی.** تحلیل حساسیت روی این پارامتر و تأثیر آن بر میزان سیمان حمل شده توسط سیستم حمل و نقل ترکیبی ریل و جاده در شکل ۷، نشان داده شده است. کاهش این هزینه سرمایه‌گذاری اولیه هم در مدل احتمالی و هم در مدل قطعی (با داده‌های اسمی) باعث افزایش حجم سیمان حمل شده توسط سیستم حمل و نقل ترکیبی شده است؛ البته شیب این افزایش در مدل احتمالی نسبت به مدل قطعی بیشتر است؛ بنابراین سرمایه اولیه مورد نیاز برای توسعه ایستگاه‌ها از یک سو و اهمیت استواری مدل توسعه داده شده با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و هزینه از سوی دیگر موجب می‌شود که پیش‌بینی دقیق ظرفیت ایستگاهی که به‌عنوان هاب چندوجهی انتخاب شده است، تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و به دنبال آن افزایش حجم سیمان حمل شده در شبکه حمل و نقل بگذارد.



شکل ۷. تأثیر کاهش هزینه ثابت توسعه ایستگاه‌ها روی تناژ سیمان حمل شده در شبکه

**توصیه‌های مدیریتی.** در حال حاضر توزیع و حمل و نقل حجم قابل توجهی از تقاضای سیمان در داخل کشور توسط کامیون‌ها و از طریق شبکه جاده‌ای کشور انجام می‌شود. دلیل این امر وجود برخی نگرش‌ها در میان فعالان حوزه حمل و نقل جاده‌ای، رانندگان و شرکت‌های حمل و نقلی است که هر نوع افزایش در سهم حمل و نقل ریلی موجب کاهش سهم حمل و نقل ناوگان جاده‌ای و بدتر شدن شرایط فعالیت فعالان این بخش شده و به‌طور خلاصه به ضرر آن‌ها قلمداد می‌شود.

این در حالی است که تجربه کشورهای دیگر نشان می‌دهد با ایجاد شرایطی نه‌تنها می‌توان به وضعیت اقتصادی فعالان این بخش و شاخص‌های اقتصادی حوزه حمل‌ونقل را بهبود داد؛ بلکه می‌توان آلاینده‌ها، مصرف سوخت و میزان تصادفات و سوانح رانندگی را نیز کاهش داد و شرایط بهتری از نظر ایمنی جاده‌ها داشت. این شرایط از طریق ایجاد هاب‌های لجستیکی ترکیبی و حمل بارها از جمله سیمان که از لحاظ حجم جابه‌جاشده توسط شبکه جاده‌ای کشور در سال ۱۳۹۶ رتبه اول را به خود اختصاص داده است، به صورت ترکیبی ریل و جاده به وجود خواهد آمد. در این مطالعه با توجه به ماهیت بلندمدت و استراتژیک طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی و عدم قطعیت موجود در پارامترهای تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل در بلندمدت، به مدل‌سازی استوار مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده پرداخته شده است؛ ضمن اینکه با توجه به امکان حمل مستقیم سیمان با جاده در کنار حمل‌ونقل ترکیبی، این امکان فراهم شده است که مدل با توجه به حجم سیمان جابه‌جاشده و فاصله موجود در شبکه، به تخصیص جریان بار با حداکثر صرفه اقتصادی پردازد.

هزینه‌های بالای توسعه حمل‌ونقل ترکیبی از یک سو و استواری مدل برای حداقل کردن ریسک‌های ناشی از تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت از سوی دیگر موجب می‌شود که برقراری تعادل بین این دو عامل، تأثیر زیادی بر سهم حمل‌ونقل ترکیبی از کل سیمان حمل‌شده در کشور بگذارد. در نهایت توصیه می‌شود با توجه به اینکه در حال حاضر هزینه حمل هر تن بار از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای با توجه به مسافت میان مبدأ تا مقصد سیمان محاسبه می‌شود، برای افزایش سهم حمل‌ونقل ریلی، هزینه‌های این روش حمل‌ونقل نیز با توجه به حجم بار جابه‌جاشده و مسافت مبادی و مقاصد بار متغیر باشد. این سیاست‌گذاری می‌تواند تأثیر بسزایی در بهره‌برداری از اقتصاد به مقیاس و حجم سیمان جابه‌جاشده توسط شبکه ریلی کشور بگذارد.

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش برای برخورد با عدم قطعیت در طراحی شبکه حمل‌ونقل، ترکیبی از روش مدل‌سازی احتمالی با رویکرد تولید سناریو استفاده شده است. همان‌طور که در فرآیند تحلیل حساسیت مدل نیز بیان شد، با توجه به تأثیر قابل توجهی که هزینه‌های ثابت احداث پایانه‌های چندوجهی در هزینه‌های کل طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی دارد، تعریف سطوح مختلف ظرفیت برای احداث پایانه‌ها در شرایط عدم قطعیت در تقاضاهای حمل بار، می‌تواند تا حد قابل توجهی از اختصاص منابع مالی بیش از حد موردنیاز به زیرساخت‌های شبکه جلوگیری کند. همچنین نتایج مدل غیرقطعی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند با افزایش اندکی در هزینه‌های کل طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی، عدم قطعیت در داده‌های مسئله را پوشش دهد.

بر اساس دستاوردهای این پژوهش پیشنهادهای بسیاری برای مدیران مربوطه و متخصصان این حوزه، با توجه به جنبه‌های مختلف این نوع مسئله می‌توان مطرح کرد که در اینجا مهم‌ترین موارد ذکر می‌شود:

- در این مطالعه طراحی شبکه حمل و نقل ترکیبی با توجه به خطوط ریلی موجود در کشور بررسی شد و به همین دلیل عدم اتصال کارخانه‌های تولیدکننده سیمان به شبکه ریلی تا حد قابل توجهی روی سهم حجم بار انتقال یافته به روش حمل و نقل ریلی تأثیر گذاشت؛ بنابراین بررسی توسعه خطوط ریلی در کنار پایانه‌های چندوجهی می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش سهم روش حمل و نقل ریلی داشته باشد؛

- با توجه به محدودیت‌هایی که در بودجه در دسترس برای توسعه شبکه حمل و نقل ترکیبی وجود دارد، در نظر گرفتن این محدودیت می‌تواند به واقعی تر شدن مدل کمک کند؛

- با توجه به احتمال وقوع اختلال در پایانه‌های چندوجهی و شبکه ریلی و عدم قطعیت در ظرفیت در دسترس آن‌ها بررسی عدم قطعیت در ظرفیت در دسترس تسهیلات شبکه حمل و نقل، تأثیر قابل توجهی بر تصمیم‌های بلندمدت و میان مدت برنامه‌ریزی حمل بار در شبکه حمل و نقل می‌گذارد.

- اگرچه در این پژوهش به تأثیری که ابعاد مسئله می‌تواند بر زمان حل مدل بگذارد، اشاره‌ای نشد، ارائه روش‌های حل دقیق یا تقریبی یکی از نیازهای اساسی مدل‌های ارائه شده در این حوزه برای مسائلی با ابعاد واقعی خواهد بود.

## منابع

1. Alem Tabriz, A., Roghanian, I., Hosseinzadeh, M. (2012). Design and optimization of reverse logistics network under uncertainty conditions using genetic algorithm. *Industrial Management Perspective*, (In Persian).
2. Alumur, S. A., Nickel, S., Rohrbeck, B., & Saldanha-da-Gama, F. (2018). Modeling congestion and service time in hub location problems. *Applied Mathematical Modelling*, 55, 13-32.
3. Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., & Marchand, H. (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation et extensions. *Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 45(3), 427-436.
4. Assavapokee, T., Realff, M. J., Ammons, J. C., & Hong, I. H. (2008). Scenario relaxation algorithm for finite scenario-based min<sup>o</sup> max regret and min<sup>o</sup> max relative regret robust optimization. *Computers & operations research*, 35(6), 2093-2102.
5. Baykaso lu, A., & Subulan, K. (2016). A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 207-247.
6. Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2008). Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects. *Transportation Planning and Technology*, 31(3), 277-302.
7. Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2018). A stochastic multi-period capacitated multiple allocation hub location problem: Formulation and inequalities. *Omega*, 74, 122-134.
8. Dai, Q., Yang, J., & Li, D. (2018). Modeling a Three-Mode Hybrid Port-Hinterland Freight Intermodal Distribution Network with Environmental Consideration: The Case of the Yangtze River Economic Belt in China. *Sustainability*, 10(9), 3081.
9. Fazayeli, S., Eydi, A., & Kamalabadi, I. N. (2018). Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 119, 233-246.
10. Fotuhi, F., & Huynh, N. (2017). Reliable intermodal freight network expansion with demand uncertainties and network disruptions. *Networks and Spatial Economics*, 17(2), 405-433.
11. Fotuhi, F., & Huynh, N. (2018). A reliable multi-period intermodal freight network expansion problem. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 138-150.
12. Gelareh, S., Monemi, R. N., & Nickel, S. (2015). Multi-period hub location problems in transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 67-94.
13. Ghane-Ezabadi, M., & Vergara, H. A. (2016). Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 53-69.
14. 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.



15. Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location° allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 213-230.
16. Ji, S. F., & Luo, R. J. (2017). A Hybrid Estimation of Distribution Algorithm for Multi-Objective Multi-Sourcing Intermodal Transportation Network Design Problem Considering Carbon Emissions. *Sustainability*, 9(7), 1133.
17. Kouvelis, P., & Yu, G. (2013). Robust discrete optimization and its applications (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
18. Li, S. X., Sun, S. F., Wang, Y. Q., Wu, Y. F., & Liu, L. P. (2017). A two-stage stochastic programming model for rail-truck intermodal network design with uncertain customer demand. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 20(3), 611-621.
19. Lin, C. C., & Lee, S. C. (2018). Hub network design problem with profit optimization for time-definite LTL freight transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114, 104-120.
20. Mostert, M., Caris, A., & Limbourg, S. (2017). Intermodal network design: a three-mode bi-objective model applied to the case of Belgium. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1-24.
21. Nikbakhsh, E., Zegordi, S.H. (2015). Covering Hub location Problem under Disruption Conditions. *Industrial Management Perspective*, 29-9 (In Persian).
22. Serper, E. Z., & Alumur, S. A. (2016). The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 51-65.
23. Seifbarghy, M., Mortezaei, S. (2018). Two-objective modeling of location allocation problem in a green supply chain considering the transportation and CO2 emissions. *Industrial Management Perspective*, 185-163 (In Persian).
24. Sirikijpanichkul, A., van Dam, K. H., Ferreira, L., & Lukszo, Z. (2007). Optimizing the location of intermodal freight hubs: an overview of agent based modelling approach. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 7(4), 71-81.
25. Sørensen, K., Vanovermeire, C., & Busschaert, S. (2012). Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem. *Computers & Operations Research*, 39(9), 2079-2090.
26. SteadieSeifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European journal of operational research*, 233(1), 1-15.
27. Wang, R., Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2018). Modeling and optimization of a road rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 423-436.