Archive of SID

چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال هشتم، شماره ۳۱، پاییز ۱۳۹۷
شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص ۱۳۹ – ۱۱۵

مدل طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی تحت شرایط عدم‌قطعیت (موردمطالعه: حمل‌ونقل سیمان در کشور ایران)

مینو فرازمند*، 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. ازاین‌رو در این پژوهش با توجه به عدم قطعیت موجود در تقاضاها و هزینه های حمل‌ونقل، یک مدل ریاضی استوار برای طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی بار با استفاده از دو روش حمل‌ونقل ریل و جاده در سطح ملّی ارائه شده است. در مدل احتمالی مبتنی بر سناریوی ارائه‌شده، دو هدف موردتوجه قرار گرفته است؛ هدف نخست بر حداقل‌کردن هزینه‌ها و هدف دوم از دیدگاه کاهش ریسک تصمیم‌گیری بر حداقل‌کردن حداکثر تأسف 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؛ حداقل‌کردن حداکثر تأسف 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).
E-mail: pishvaee@iust.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

امروزه با توجه به تنوع محصولات و افزایش قدرت انتخاب مشتریان، کسب‌وکارها برای ماندن در فضای رقابتی موجود به‌دنبال 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 مورداستفاده در شبکه‌های توزیع کالاها که درصد بالایی از هزینه‌های لجستیکی را دربرمی‌گیرد (۳۰ تا ۶۰ درصد) [۲۳و۲۱]، می‌تواند بر کاهش هزینه‌های کل سیستم و افزایش رضایتمندی مشتریان تأثیر زیادی بگذارد [۹]. سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای که امروزه سهم قابل‌توجهی 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 ریلی‌ضمن اینکه بهترین گزینه برای حمل بارهای حجیم و در فواصل طولانی شناخته شده است، به‌دلیل 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_2 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؛ به‌طوری‌که 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 استانداردی 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

www.SID.ir

Archive of SID

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

با توجه به نکات گفته‌شده، هدف اصلی این پژوهش ارائه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو برای طراحی شبکه حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل 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 صورت‌گرفته در این حوزه، کاربرد مدل‌سازی استوار را در طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی بررسی کرده‌اند، در این پژوهش از رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای برخورد با منابع ایجادکننده عدم‌قطعیت، شامل تقاضاهای حمل بار و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل‌ونقل ترکیبی، استفاده شده است؛ بنابراین نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

ـ در این مطالعه علاوه بر مکان‌یابی مراکز استقرار هاب‌های چندوجهی در مورد تخصیص جریان بار به دو روش مستقیم جاده‌ای و حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده تصمیم‌گیری می‌شود؛

ـ تقاضاهای مشتریان و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده شامل هزینه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی و هزینه عملیات تعویض روش حمل‌ونقل با توجه به ماهیت استراتژیک و بلندمدت طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی دارای عدم‌قطعیت است؛

ـ از مدل ارائه‌شده در این پژوهش در یک مطالعه موردی واقعی در کشور ایران استفاده شده است؛

ـ با توجه به دسترسی به داده‌های تاریخی تقاضای حمل بار مطالعه‌شده در کشور از برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است؛

ـ علاوه بر حداقل‌کردن امید ریاضی هزینه‌های ناشی از سناریوهای مختلف، در این پژوهش هدف دوم بر حداقل‌کردن حداکثر تأسف نسبی تمرکز کرده است که یکی از روش‌های برنامه‌ریزی استوار بدبینانه محسوب می‌شود.

ـ تعیین سطوح مختلف ظرفیت برای احداث پایانه‌های چندوجهی باعث می‌شود، با توجه به هزینه‌های قابل‌توجه استقرار تسهیلات چندوجهی در نقاط بالقوه، در صورت انتخاب‌شدن نقطه

www.SID.ir

Archive of SID

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 موردمطالعه 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 درنظرگرفتن 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 موردبررسی قرار گرفت [۳].

در مدل ارائه‌شده توسط ایشفق 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 عدم‌قطعیتی در پارامترهای ورودی مسئله، در نظر گرفته نشده است؛ در حالی که عدم‌قطعیت یکی از ویژگی‌های ذاتی تصمیم‌گیری در دنیای واقعی است که امروزه در حوزه‌های کاربردی بسیاری موردتوجه 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 درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در تقاضاهای حمل‌ونقل پرداخته شده و با توسعه

www.SID.ir

Archive of SID

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 عدم‌قطعیت در تقاضاها و هزینه‌های حمل‌ونقل، احتمال بروز اختلال در شبکه و به‌دنبال آن عدم‌قطعیت در ظرفیت پاسخگویی تسهیلات موردمطالعه 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 حمل‌ونقل ترکیبی در چند دوره زمانی موردبررسی قرار گرفته است و در تابع هدف حداقل‌کردن امید ریاضی هزینه‌های شبکه ناشی از سناریوهای مختلف بررسی شده است [۱۱].

بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل ترکیبی با تمرکز بر یک تابع هدف مدل خود را توسعه داده‌اند. از این تعداد نیز درصد قابل‌توجهی به حداقل‌کردن هزینه‌های اقتصادی و عملیاتی فرآیند حمل‌ونقل پرداخته‌اند. در پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷) هدف حداقل‌کردن هزینه‌های ساخت پایانه‌های چندوجهی و هزینه‌های حمل‌ونقل کالاها از مبدأ تا مقصد نهایی است و امکان حمل مستقیم کالاها از مبدأ تا مقصد وجود ندارد ؛درحالی‌که در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۸) علاوه بر امکان حمل کالاها توسط سیستم حمل‌ونقل ترکیبی، حمل‌ونقل مستقیم توسط جاده‌ای نیز بررسی شده است. این دو پژوهش به طراحی شبکه حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل پرداخته شده است [۱۳]. در پژوهش موسترت و همکاران (۲۰۱۷) توابع هدف مدل، حداقل‌سازی هزینه‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای حمل‌ونقل کالاها در شبکه هستند. مقدار اثرات مخرب زیست‌محیطی براساس میزان کربن‌دی اکسید منتشرشده از وسایل حمل‌ونقل محاسبه می‌شود. میزان کربن‌دی‌اکسید نیز برحسب مسافت پیموده شده محاسبه می‌شود. در این پژوهش، تصمیمات مدل مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی، میزان بار حمل‌شده توسط سیستم حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده، حمل‌ونقل ترکیبی رودخانه و جاده و همچنین شبکه حمل‌ونقل مستقیم جاده‌ای هستند [۲۰].

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

www.SID.ir

Archive of SID

عدم‌قطعیت در پارامترهای مسئله با تابع هدف دوم سنجیده شده است. درنهایت اینکه بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، امکان حمل مستقیم بار توسط حمل‌ونقل جاده‌ای را در کنار حمل‌ونقل ترکیبی نادیده گرفته‌اند؛ درحالی‌که در این مطالعه، مدل ارائه‌شده با توجه به دو تابع هدف ۱. حداقل‌کردن هزینه‌های اقتصادی طراحی شبکه و ۲. استواری مدل که به‌نوعی میزان ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده را نیز موردسنجش 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		
	دریا/ آبراه	هوا	ریل	جاده		سلسله‌مراتبی	R	چندگانه	یگانه		وسایل نقلیه	پایانه‌ها	مسیرها	حداقل کردن تاخیرها	محدودیت‌های تحویل به موقع	زمان‌ها	هزینه‌ها	تقاضاها	حداکثر کردن استواری شبکه	حداکثر کردن پاسخ‌دهی شبکه	حداقل کردن هزینه‌ها
مارتین موسترت و همکاران، ۲۰۱۷ [۲۰]	x		x	x				x		x	x										x
رافی ایشفق و همکاران، ۲۰۱۱ [۱۵]			x	x				x							x						x
رویی وانگ و همکاران، ۲۰۱۸ [۲۷]			x	x					x					x	x	x	x	x		x	x
محمدقانه ازابادی و همکاران، ۲۰۱۶ [۱۳]			x	x	x			x													x
فاطمه فتوحی و همکاران، ۲۰۱۷ [۱۰]			x	x					x			x	x		x			x	x		x
فاطمه فتوحی و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۱]			x	x					x			x	x		x			x			x
کانه سورنسن و همکاران، ۲۰۱۲ [۲۵]			x	x				x		x		x									x
لو هو و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۴]				x				x			x	x	x		x						x
چنگ چانگ لین و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۹]				x					x			x			x						x
سیبل الومر و همکاران، ۲۰۱۸ [۲]				x				x	x	x		x	x								x
ایسابل کورعایها و همکاران، ۲۰۱۸ [۷]				x				x				x						x			x
شو فنگ جی و همکاران، ۲۰۱۷ [۱۶]	x		x	x				x				x								x	x
آدیل بیکاسوک و همکاران، ۲۰۱۶ [۵]	x							x		x										x	x
الیف زینپ سرپر و همکاران، ۲۰۱۶ [۲۲]				x					x		x	x									x
شاهین گلارزه و همکاران، ۲۰۱۵ [۱۲]				x				x													x
قیان دان و همکاران، ۲۰۱۸ [۸]	x		x	x				x		x		x		x							x
این مقاله			x	x				x		x		x					x	x	x	x	x

www.SID.ir

Archive of SID

۳. روش‌شناسی پژوهش

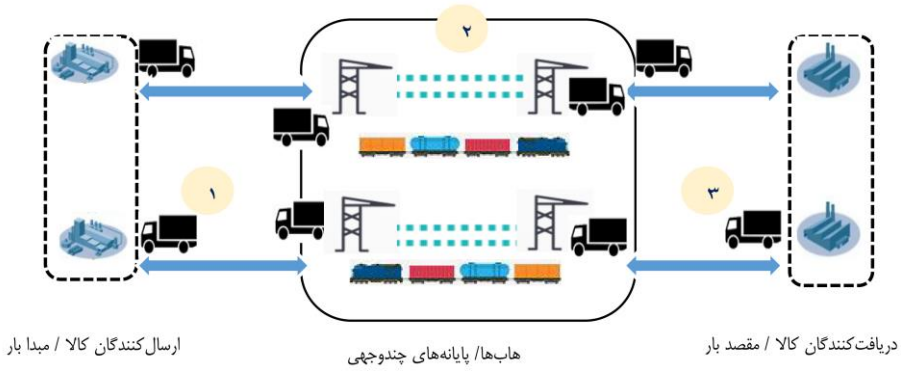
امروزه حمل‌ونقل ترکیبی کالاها با استفاده از روش‌های حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای یکی از روش‌های مناسب حمل کالا محسوب می‌شود؛ زیرا استفاده از این سیستم حمل‌ونقل امکان بهره‌مندی از مزایای روش‌های حمل‌ونقل تشکیل‌دهنده این سیستم را فراهم می‌کند. حمل‌ونقل ریلی برای حمل کالاهای حجیم در مسافت‌های طولانی مناسب است و حمل‌ونقل جاده‌ای برای حمل کالاها در فواصل کوتاه توصیه می‌شود. مسئله موردبررسی در این مطالعه، طراحی شبکه برای حمل‌ونقل ترکیبی سیمان در کشور ایران است که در حال حاضر بخش قابل‌توجهی از آن توسط شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای حمل می‌شود و هدف این پژوهش، ارائه یک راه‌حل جامع برای انتقال حجم سیمان حمل‌شده توسط جاده به بخش حمل‌ونقل 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 تبدیل‌شدن به پایانه‌های چندوجهی را دارند. در مرحله دوم نیز سیمان حمل‌شده بین تعدادی از مبادی و مقاصد کشور، به شبکه تخصیص می‌یابد.

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

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

www.SID.ir

Archive of SID



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 مبناقراردادن 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 به‌صورت قطعی مشخص کرد. با توجه به دلایل ذکرشده، هدف اصلی این پژوهش طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در پارامترهای تقاضا و هزینه‌های مختلف یک زنجیره حمل‌ونقل ترکیبی است.

www.SID.ir

Archive of SID

مفروضات استفاده‌شده در مدل‌سازی مسئله به‌صورت زیر است:

ـ در سیستم حمل‌ونقل چندوجهی، عملیات جمع‌آوری بار از ارسال‌کنندگان کالا و تحویل کالاها به دریافت‌کنندگان آن‌ها از طریق سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود؛

ـ انتقال جریان بار بین هاب‌های چندوجهی از طریق سیستم حمل‌ونقل ریلی انجام می‌شود؛

ـ واحد حمل‌کننده کالا در هر دو روش حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای، کانتینر در نظر گرفته شده است؛

ـ جریان بار می‌تواند در مسیر خود از پایانه‌های چندوجهی متعددی عبور کند؛ درحالی‌که فقط در دو پایانه تعویض روش حمل‌ونقل انجام می‌شود؛

ـ ایستگاه‌های بالقوه برای تبدیل‌شدن به پایانه‌های چندوجهی از قبل مشخص است و تعداد پایانه‌هایی که باید مکان‌یابی شوند از قبل مشخص نشده است؛

ـ امکان حمل کالاها بین مبادی و مقاصد به دو شکل امکان‌پذیر است: ۱. ارسال مستقیم از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای و ۲. از طریق حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده؛

ـ تقاضاهای حمل، هزینه حمل هر تُن بار از طریق جاده و ریل و هزینه عملیات تعویض روش حمل‌ونقل در هر پایانه یا هاب‌های چندوجهی با عدم‌قطعیت همراه است و بر مبنای داده‌های تاریخی موجود سناریوهای گسسته‌ای تعریف شده و از برنامه‌ریزی احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شده است؛

ـ برای توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن سطوح ظرفیتی در نظر گرفته شده است که مدل با توجه به حجم جریان بار ورودی و خروجی از هاب‌ها بهترین گزینه را انتخاب می‌کند.

مدل‌سازی ریاضی. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد مکان‌یابی پایانه‌های چندوجهی از میان ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن و به‌دنبال آن تخصیص جریان بار به شبکه، مهم‌ترین تصمیم‌های طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده هستند؛ همچنین با توجه به عدم‌قطعیت در تقاضاهای مشتریان موردمطالعه که می‌تواند در نتیجه تغییرات هزینه‌های حمل‌ونقل در شبکه ایجاد شود، تعداد محدودی سناریوی ممکن تولید شده است؛ بنابراین با توجه به هزینه‌های ثابت و قابل‌توجه استقرار تسهیلات تعویض روش حمل‌ونقل در ایستگاه‌های راه‌آهن بالقوه، با درنظرگرفتن امکان انتخاب بین سطوح مختلف ظرفیت، شبکه حمل‌ونقل ترکیبی ریل و جاده طراحی می‌شود.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

i: مبادی ارسال‌کننده کالاها

m: مقاصد دریافت‌کننده کالاها

www.SID.ir

Archive of SID

j,k: پایانه‌های مبدأ و مقصد برای تعویض روش حمل‌ونقل

l: سطح ظرفیت پایانه‌های بالقوه

N: مجموعه نقاط شامل مبدأ ـ 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

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

متغیرهای تصمیم

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

www.SID.ir

Archive of SID

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

با توجه به نمادهای معرفی‌شده در بالا، مدل توسعه‌داده‌شده برای مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل چندوجهی در حالت قطعی به شکل زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} Min\ z = & \sum_{j\in H}\sum_{l} F_j^l Y_j^l + \sum_{i}\sum_{m} b_{im} d_{im} W_{im} \\ & + \sum_{i}\sum_{j}\sum_{k} (g_{ij}\alpha_{ij} + a_j) X_{jk}^{i} \\ & + \sum_{i}\sum_{j}\sum_{k} s_{jk} c_{jk} X_{jk}^{i} \\ & + \sum_{i}\sum_{k}\sum_{m} (p_{km}\beta_{km} + a_k) Q_{km}^{i} \end{aligned} \quad (۱)$$

$$D_{im} = W_{im} + \sum_{k} Q_{km}^{i}, \quad \forall i, m \in N \quad (۲)$$

$$\sum_{m} D_{im} = \sum_{m} W_{im} + \sum_{j}\sum_{k} X_{jk}^{i}, \quad \forall i \quad (۳)$$

$$\sum_{k} X_{jk}^{i} \le \sum_{l} Y_j^l \sum_{m} D_{im}, \quad \forall i, j \quad (۴)$$

$$\sum_{j} X_{jk}^{i} \le \sum_{l} Y_k^l \sum_{m} D_{im}, \quad \forall i, k \quad (۵)$$

$$\sum_{j} X_{jk}^{i} = \sum_{m} Q_{km}^{i}, \quad \forall i, k \quad (۶)$$

$$\sum_{k}\sum_{i} X_{jk}^{i} \le \sum_{l} Ca_j^l Y_j^l, \quad \forall j \quad (۷)$$

$$\sum_{i}\sum_{m} Q_{km}^{i} \le \sum_{l} Ca_k^l Y_k^l, \quad \forall k \quad (۸)$$

$$X_{jk}^{i} = 0, \quad \forall i \in N, \forall j, k \in H, if\ j = k \quad (۹)$$

$$\sum_{l} Y_j^l \le 1, \quad \forall j \in H \quad (۱۰)$$

$$X_{jk}^{i}, Q_{km}^{i} \ge 0\ , Y_j^l \in \{0.1\}, \quad \forall i, j, k, l \quad (۱۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

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 اختصاص‌داده‌شده 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 عدم‌قطعیت. عدم‌قطعیت در طراحی شبکه‌های لجستیکی در دو دسته طبقه‌بندی می‌شود: ۱. عدم‌قطعیت در پارامترهای معمول کسب‌وکار، مانند نوسان‌هایی که در تقاضاها یا تأمین تقاضاها اتفاق می‌افتد و ۲. عدم‌قطعیت به‌دلیل اختلال‌هایی که می‌تواند در شبکه رخ دهد. وقوع این اختلال‌ها احتمال کمی دارد ولی آثار قابل‌توجهی 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 عدم‌قطعیت انجام شده است، طبقه‌بندی عدم‌قطعیت 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.

عدم‌قطعیت در داده‌های ورودی مسئله نیز خود به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱. عدم‌قطعیت تصادفی که به‌دلیل ماهیت تصادفی پارامترهای مسئله است و معمولاً برای حل این نوع مسائل از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود و ۲. عدم‌قطعیت شناختی که از فقدان دانش در حوزه موردمطالعه ریشه می‌گیرد که دلیل این فقدان دانش و مبهم‌بودن ذاتی مسئله موردمطالعه یا عدم‌دسترسی 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 عدم‌قطعیت در این مطالعه موردی، عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت، در این مطالعه از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر

www.SID.ir

Archive of SID

سناریو استفاده شده است. همان‌طور 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 تعریف‌شده را شامل می‌شود؛ همچنین مجموعه S شامل سناریوهای تولیدشده با توجه به پارامترهای دارای عدم‌قطعیت تقاضا و هزینه حمل‌ونقل است. سه سناریوی خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه اعضای این مجموعه را تشکیل داده‌اند. در سناریوی خوش‌بینانه فرض بر این است که با افزایش هزینه حمل‌ونقل، با توجه به افزایش نیاز شهرهای مختلف کشور به سیمان، تقاضای حمل‌ونقل 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 عدم‌قطعیت موجود در تقاضاها و هزینه‌های حمل‌ونقل، در این مطالعه علاوه بر امید ریاضی هزینه‌های احداث پایانه‌های چندوجهی و هزینه‌های حمل‌ونقل 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]. همان‌طور 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 به‌دست‌آمده در مدل احتمالی مبتنی بر سناریو Z_{S1} را نشان می‌دهد.

$$R_S = Z_{S1} - Z_{S1}^{*} \qquad (۱۲)$$

در این مطالعه در تابع هدف دوم ارائه‌شده در مدل غیرقطعی که مطابق با معادله ۱۳، تعریف شده است، مدل به‌دنبال حداقل‌کردن حداکثر تأسف مطلق هر سناریو نسبت به مقدار بهینه مدل قطعی با داده‌های مربوط به همان سناریو است (تأسف نسبی). درواقع می‌توان چنین در نظر گرفت که این تابع هدف به‌دنبال حداقل‌کردن ریسک ناشی از شرایط عدم‌قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری خواهد بود.

$$R_S' = \frac{R_S}{Z_{S1}^{*}} \qquad (۱۳)$$

www.SID.ir

Archive of SID

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

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

$$Min\ Z_2 = Min \max_S R_S' \quad (۱۵)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_l Y_j^l \le 1, \quad \forall j \in H \quad (۲۴)$$

$$X_{sjk}^i, Q_{skm}^i \ge 0\ , Y_j^l \in \{0.1\}, \quad \forall i, j, k, l \quad (۲۵)$$

www.SID.ir

Archive of SID

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای نمایش صحت کارکرد مدل ارائه‌شده در این بخش با دریافت داده‌های مربوط به حجم سیمان حمل‌شده در کشور در سال ۱۳۹۶، طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی سیمان در کشور ایران به‌عنوان مطالعه موردی موردبررسی قرار گرفته است. در حال حاضر حجم قابل‌توجهی از سیمان حمل‌شده در انواع و کیفیت‌های مختلف در کشور از طریق سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای جابه‌جا می‌شود که در این مطالعه صرف‌نظر از انواع مختلف سیمان، حجم سیمان جابه‌جاشده میان ۹ شهر به‌عنوان 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 به‌عنوان نقاط کاندید برای توسعه و استقرار تجهیزات حمل‌ونقل ترکیبی انتخاب شده‌اند. شهرهایی که مبادی و مقاصد بار را تشکیل می‌دهند، در شکل ۲ و ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن که به‌عنوان نقاط بالقوه برای تبدیل‌شدن به هاب‌های چندوجهی انتخاب شده‌اند، در شکل ۳، مشخص شده است. مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX کدنویسی شده و توسط همین نرم‌افزار حل شده است. تمامی آزمایش‌های موردنیاز روی یک رایانه پنج‌هسته‌ای با ۴ گیگابایت حافظه (رم) اجرا شده‌اند.

شکل ۲. مراکز تولید و مصرف سیمان

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۳. ایستگاه‌های بالقوه برای احداث

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

جدول ۲. نتایج مدل‌های قطعی و احتمالی مبتنی بر سناریو

سناریوها	احتمال وقوع	هزینه‌های عملیاتی (ده میلیون تومان)	
		مدل قطعی	مدل احتمالی مبتنی بر سناریو
۱	۰/۵	۱۲۷ /۹۵۸	۱۷۴ /۰۰۷
۲	۰/۴	۲۱۹ /۱۰۸	
۳	۰/۱	۱۲۹ /۱۷۷	
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

www.SID.ir

Archive of SID

سه سناریو در مدل قطعی به میزان ۹۴/۶۷ میلیون تومان بیشتر است. با توجه به عدم‌قطعیت در داده‌های تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل این تفاوت ارزش اطلاعات کامل در این مطالعه موردی را به‌خوبی نشان می‌دهد. اضافه‌کردن تسهیلات در مسائل طراحی شبکه‌های لجستیکی با صرف هزینه و زمان قابل‌توجهی همراه است. در این مطالعه طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی سیمان در کشور به‌عنوان یک تصمیم استراتژیک، نیازمند صرف هزینه زیادی برای توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی و تبدیل‌شدن آن‌ها به پایانه‌های چندوجهی خواهد بود؛ بنابراین تغییر مکان پایانه‌های چندوجهی در یک بازه زمانی کوتاه در عمل نشدنی است؛ درحالی‌که تغییر جریان تخصیص‌یافته به شبکه به‌عنوان یک تصمیم تاکتیکال و میان‌مدت از انعطاف بیشتری برخوردار است.

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مدل‌های قطعی و احتمالی توسعه داده‌شده تحت هر سناریو، ابتدا هر دو مدل قطعی و احتمالی توسط نرم‌افزار CPLEX 12.6 حل شده‌اند؛ سپس با توجه به اینکه جریان بار بین تسهیلات مختلف در شبکه (متغیرهای پیوسته در مدل) در طول زمان می‌توانند به‌روز شوند، نتایج حاصل از مدل قطعی و احتمالی برای هر سناریو موردبررسی قرار گرفت است. در این ارزیابی متغیرهای صفر و یک که به‌معنای توسعه یا عدم‌توسعه ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن برای تبدیل‌شدن به هاب‌های چندوجهی هستند، پس از طراحی ساختار شبکه در عمل قابل‌تغییر نیستند و از طرفی بدیهی است که مدل قطعی در هر سناریو تسهیلات مستقرشده در ایستگاه‌ها و ظرفیت آن‌ها را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که پاسخگوی تقاضاهای همان سناریو باشد. با توجه به نکات ذکرشده 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 طراحی‌شده در صورت وقوع هر یک از سناریوهای دوم و سوم در آینده هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل سیمان نسبت به مدل احتمالی بیشتر خواهد بود؛ بنابراین با توجه به نتایج گردآوری‌شده در جدول ۳، در مطالعه انجام‌شده با ابعادی کوچک نسبت به کل تعداد تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان سیمان و حجم سیمان حمل‌شده در کل کشور، استفاده از مدل احتمالی مبتنی بر سناریو موجب ۱۱۱۸۰۰۰۰ تومان صرفه‌جویی در هزینه‌های اولیه توسعه ایستگاه‌ها و هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل سیمان می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

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

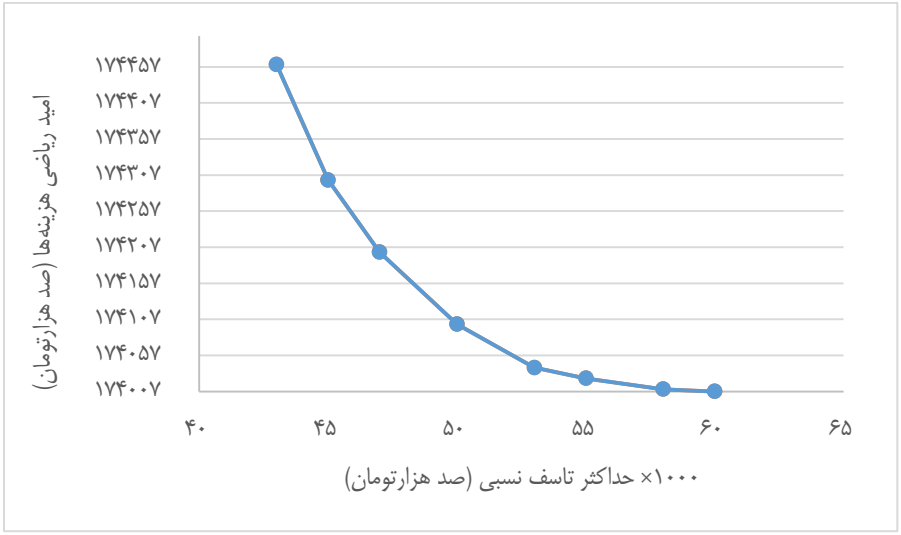
سناریوها	هزینه‌های عملیاتی (ده میلیون تومان)		ارزش ایجادشده توسط مدل احتمالی مبتنی بر سناریو (ده میلیون تومان)
	مدل قطعی (طراحی‌شده بر مبنای سناریوی اول)	مدل احتمالی مبتنی بر سناریو	
۲	۲۲۰ / ۲۳۵	۲۱۹ / ۳۱	۰/۹۲۵
۳	۱۳۱ / ۶۷۱	۱۳۰ / ۳۶	۱/۳۱۱
متوسط ارزش ایجادشده توسط مدل احتمالی مبتنی بر سناریو:			۱ / ۱۱۸

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 حداقل‌کردن امید ریاضی هزینه‌های عملیاتی طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی سیمان و هدف دوم حداقل‌کردن حداکثر تأسف سناریوهای تعریف‌شده در مدل احتمالی را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار متناظر این دو تابع هدف در ۸ نقطه به‌ترتیب از حالت حداقل حداکثر تأسف نسبی تا حداقل امید ریاضی هزینه‌های عملیاتی ارائه شده است. نمودار پارتو نشان می‌دهد که با توجه به عدم‌قطعیت 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 تأسف 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 تأسف نسبی همراه است، استواری مدل بیشتر می‌شود و در مقابل برای این استواری، تصمیم‌گیرنده متحمل هزینه بیشتری نیز خواهد شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. نمودار پارتوی رسم‌شده برای مدل دوهدفه

با توجه به نمودار رسم‌شده در شکل ۴ و عدم‌قطعیت 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 ۱۷۳۳۰۷۰۰۰۰۰ و ۱۷۴۴۵۷۰۰۰۰۰ خواهد بود.

هر چه ریسک پذیرفته‌شده افزایش یابد و تصمیم‌گیرنده برای تفاوت هزینه‌های تخمین زده‌شده 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 عدم‌قطعیتی که در ماهیت مسئله و تقاضای حمل سیمان 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 درنظرگرفتن 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

www.SID.ir

Archive of SID

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.

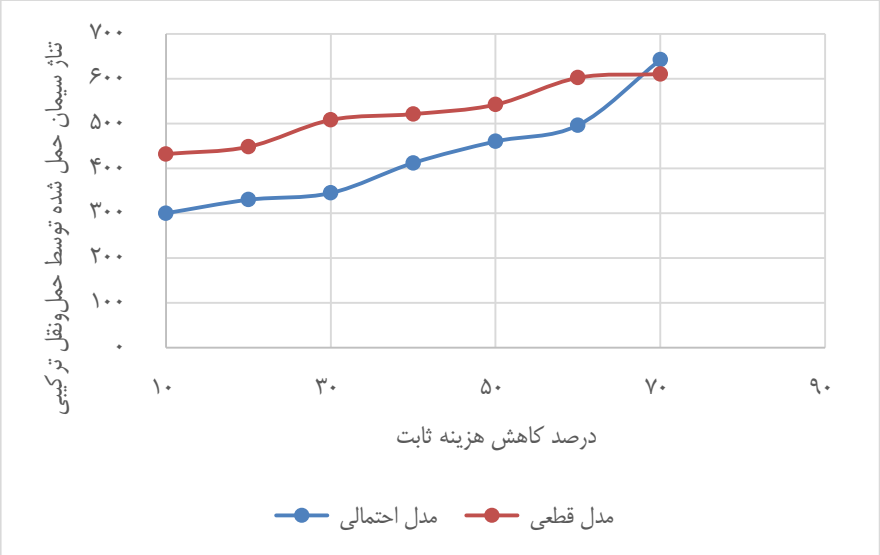
شکل ۵. ایستگاه‌های انتخاب‌شده در حل مدل با تابع هدف اول

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

www.SID.ir

Archive of SID

تحلیل حساسیت روی هزینه ثابت استقرار تجهیزات در ایستگاه‌های تشکیلاتی. تحلیل حساسیت روی این پارامتر و تأثیر آن بر میزان سیمان حمل‌شده توسط سیستم حمل‌ونقل 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 حمل‌شده توسط سیستم حمل‌ونقل ترکیبی شده است؛ البته شیب این افزایش در مدل احتمالی نسبت به مدل قطعی بیشتر است؛ بنابراین سرمایه اولیه موردنیاز برای توسعه ایستگاه‌ها از یک سو و اهمیت استواری مدل توسعه‌داده‌شده با توجه به عدم‌قطعیت در پارامترهای تقاضا و هزینه از سوی دیگر موجب می‌شود که پیش‌بینی دقیق ظرفیت ایستگاهی که به‌عنوان هاب چندوجهی انتخاب شده است، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و به‌دنبال آن افزایش حجم سیمان حمل‌شده در شبکه حمل‌ونقل بگذارد.



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

توصیه‌های مدیریتی. در حال حاضر توزیع و حمل‌ونقل حجم قابل‌توجهی 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 حمل‌ونقل جاده‌ای، رانندگان و شرکت‌های حمل‌ونقلی است که هر نوع افزایش در سهم حمل‌ونقل ریلی موجب کاهش سهم حمل‌ونقل ناوگان جاده‌ای و بدترشدن شرایط فعالیت فعالان این بخش شده و به‌طور خلاصه به ضرر آن‌ها قلمداد می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

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 آلایندگی، 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، به‌صورت ترکیبی ریل و جاده به وجود خواهد آمد. در این مطالعه با توجه به ماهیت بلندمدت و استراتژیک طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی و عدم‌قطعیت 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 بپردازد.

هزینه‌های بالای توسعه حمل‌ونقل ترکیبی از یک سو و استواری مدل برای حداقل‌کردن ریسک‌های ناشی از تصمیم‌گیری در شرایط عدم‌قطعیت 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. درنهایت توصیه می‌شود با توجه به اینکه در حال حاضر هزینه حمل هر تُن 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 عدم‌قطعیت 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 قابل‌توجهی که هزینه‌های ثابت احداث پایانه‌های چندوجهی در هزینه‌های کل طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی دارد، تعریف سطوح مختلف ظرفیت برای احداث پایانه‌ها در شرایط عدم‌قطعیت در تقاضاهای حمل بار، می‌تواند تا حد قابل‌توجهی 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، عدم‌قطعیت در داده‌های مسئله را پوشش دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

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:

ـ در این مطالعه طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی با توجه به خطوط ریلی موجود در کشور بررسی شد و به همین دلیل عدم‌اتصال کارخانه‌های تولیدکننده سیمان به شبکه ریلی تا حد قابل‌توجهی روی سهم حجم بار انتقال‌یافته به روش حمل‌ونقل ریلی تأثیر گذاشت؛ بنابراین بررسی توسعه خطوط ریلی در کنار پایانه‌های چندوجهی می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش سهم روش حمل‌ونقل ریلی داشته باشد؛

ـ با توجه به محدودیت‌هایی که در بودجه دردسترس برای توسعه شبکه حمل‌ونقل ترکیبی وجود دارد، درنظرگرفتن این محدودیت می‌تواند به واقعی‌ترشدن مدل کمک کند؛

ـ با توجه به‌احتمال وقوع اختلال در پایانه‌های چندوجهی و شبکه ریلی و عدم‌قطعیت در ظرفیت دردسترس آن‌ها بررسی عدم‌قطعیت در ظرفیت دردسترس تسهیلات شبکه حمل‌ونقل، تأثیر قابل‌توجهی بر تصمیم‌های بلندمدت و میان‌مدت برنامه‌ریزی حمل بار در شبکه حمل‌ونقل می‌گذارد.

ـ 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 ارائه‌شده در این حوزه برای مسائلی با ابعاد واقعی خواهد بود.

www.SID.ir

Archive of SID

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–max regret and min–max relative regret robust optimization. *Computers & operations research, 35(6),* 2093-2102.

5. Baykasoğlu, 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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., Mortezavi, 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. Sörensen, 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.

www.SID.ir