مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۱-۳۴، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۸۹-۱۰۰

Original Article

مدل‌سازی و تحلیل حمل‌ونقل چندوجهی مشارکتی بین حاملان ریلی و جاده‌یی بر اساس نظریه‌ی بازی‌های همکارانه

حمید فرورش * **(استادیار)**
آرزو جعفری (کارشناس ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج

به دلایل اقتصادی و محیط‌زیستی، حمل‌ونقل چندوجهی موجه است. در این نوشتار، برای ایجاد همکاری بین حاملان ریل و جاده، بر پایه‌ی نظریه‌ی بازی‌های همکارانه، سازوکارهای همکاری و تقسیم عادلانه‌ی منافع ارائه شده است. در مدل‌های پیشنهادی، علاوه‌بر مسیریابی کالا، شبکه‌ی سرویس‌ها و مسئله‌ی بلاکینگ نیز توأماً در شبکه‌ی ادغامی درنظر گرفته می‌شود. به کمک بازی‌های همکارانه و ایده‌هایی از برنامه‌ریزی آرمانی، سازوکاری برای تنظیم روابط متقابل ریل و جاده از طریق تقسیم صرفه‌جویی‌های ائتلاف پیشنهاد می‌شود؛ به‌طوری‌که پذیرش تصمیم جمعی و مشارکت اعضا منجر به بهینگی ائتلاف شود. هم‌چنین، شرایط حل کارای مسئله‌ی تقسیم عواید برای مسائل بزرگ فراهم شده است. برای ارزیابی مدل‌ها، طیفی از مسائل آزمایشی تولید و حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که همکاری ریل و جاده صرفه‌جویی قابل‌توجهی به‌بار می‌آرود. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد با افزایش هزینه‌ی حمل جاده یا کاهش هزینه‌ی ریل، صرفه‌جویی هزینه و میل به همکاری افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: لجستیک مشارکتی، نظریه‌ی بازی‌های همکارانه، حمل‌ونقل چندوجهی، برنامه‌ریزی آرمانی.

farvaresh@uok.ir
jafary.ar@gmail.com

۱. مقدمه

در چرخه‌ی اقتصاد یک کشور، حمل‌ونقل عاملی است که بیشتر ارکان اقتصادی از ابتدای فرایند تولید تا رساندن کالا به بازارهای نهایی مصرف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر حمل‌ونقل را در ابعاد و تعاریف کلان آن در نظر بگیریم کمتر فعلی در اقتصاد جامعه بدون استفاده از این صنعت انجام می‌پذیرد. به‌همین دلیل داشتن صنعت حمل‌ونقل فعال و کارا شاید بیشترین تأثیر را در افزایش یا کاهش بهره‌وری از دیگر عوامل تولید و مصرف داشته باشد. امروزه به‌طور متوسط بین ۸ تا ۱۰ درصد قیمت تمام‌شده‌ی کالا و خدمات در ایران سهم حمل‌ونقل است. در حالی‌که در سایر کشورها سهم حمل‌ونقل حدود ۴ درصد است.[۱]

در دهه‌های اخیر با توسعه‌ی سریع تجارت الکترونیکی، جهانی‌شدن اقتصاد، و تولید به‌موقع تقاضا برای تحویل سریع کالاها افزایش یافته و حمل‌ونقل با کامیون در تأمین این‌گونه نیازها بر ریل تسلط یافته است. انعطاف نداشتن بخش ریلی به‌خصوص در ابتدا و انتهای فرایند حمل، هزینه‌ی بالای مربوط به راه‌اندازی راه‌آهن، و بالابودن کمینه‌ی بار موردنیاز برای سوددهی رقابت را برای ریل به‌عنوان حالتی از حمل‌ونقل برای حمل این‌گونه بارها سخت کرده است. به‌دنبال آن رفت‌وآمد کامیون‌ها به‌شدت افزایش یافته و اکنون به بخشی از مشکلات مربوط به تراکم روبه افزایش راه‌ها، آلودگی، و مصرف بی‌رویه‌ی منابع انرژی جهانی تبدیل شده است. در مقابل، هزینه‌های خارجی زیست‌محیطی و اجتماعی کمتری در مقایسه با حمل‌ونقل جاده‌یی دارد. ازآنجایی‌که امروزه مسئله‌ی کاهش آثار منفی صنایع از معضلات پیشِ روی جوامع است و تأکید فراوانی بر توسعه‌ی پایدار می‌شود، ایجاد سازوکارهایی برای انتقال حمل کالاها از جاده و کامیون به ریل و قطار بسیار با اهمیت است.[۲]

۱.۱. حمل‌ونقل چندوجهی

در سال‌های اخیر هم‌زمان با افزایش میزان حمل‌ونقل بار و تغییر نیازهای زنجیره‌ی تأمین، حمل‌ونقل چندوجهی برای جابه‌جایی کالا در سطح جهان روبه‌رشد بوده است. برخلاف سیستم‌های حمل‌ونقل سنتی که در آن شیوه‌های مختلف در حالت مستقل و مجزا عمل می‌کنند، هدف حمل‌ونقل چندوجهی یکپارچه‌سازی شیوه‌ها و خدمات مختلف حمل‌ونقل به‌منظور بهبود کارایی کل فرایند توزیع است. در حمل‌ونقل چندوجهی جابه‌جایی و انتقال از یک شیوه به شیوه‌ی دیگر در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۸، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۲۳.
DOI:10.24200/J65.2018.20056

پایانه‌های چندوجهی انجام می‌شود که می‌تواند یک بندر یا پایانه‌ی زمینی از جمله ایستگاه ریلی، فرودگاه و امثال آن باشد. ایده‌ی اصلی حمل‌ونقل چندوجهی ریل ـ جاده یکپارچه‌سازی عملیات حمل بار به‌منظور کارایی بیشتر در سفرهای با مسافت طولانی است. اگرچه حمل‌ونقل چندوجهی محدود به جابه‌جایی کانتینر و بین‌قاره‌یی نیست (مثلاً حمل‌ونقل بسته‌های پستی)، اما نقش کانتینر در آن کلیدی است.

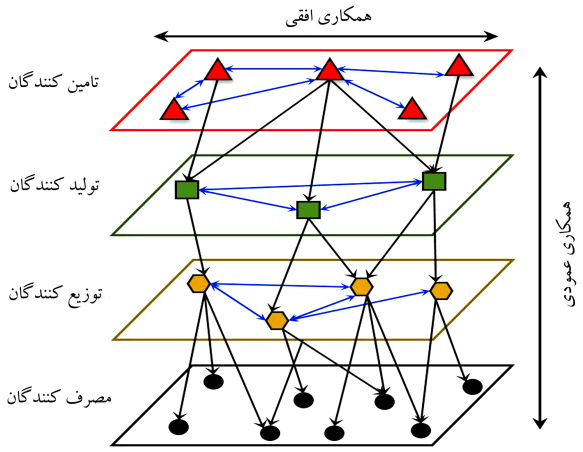
۲.۱. حمل‌ونقل چندوجهی ریل ـ جاده

حمل‌ونقل جاده‌یی اثرات منفی بر محیط زیست دارد. آلودگی زیست‌محیطی، تصادفات، تراکم زیاد، و فرسودگی زیرساخت‌های جاده‌یی ازجمله‌ی این اثرات هستند. از طرفی دیگر، کاهش رفت‌وآمد جاده‌یی موجب کاهش بسیاری از هزینه‌های خارجی این شیوه‌ی حمل‌ونقل می‌شود. برای دست‌یابی به این مهم و تقلیل آثار منفی حمل‌ونقل جاده‌یی شایسته است در جابه‌جایی کالاها استفاده از گزینه‌های دیگر و به‌خصوص شیوه‌ی ریلی ارزیابی شود. از این شیوه‌ها در مسافت‌های طولانی در ترکیب با جاده برای ابتدا و انتهای مسیر استفاده می‌شود. توجیه این کار استفاده از مزیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی شیوه‌ی ریلی و درنتیجه کاهش انتشار آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌ها و هم‌زمان استفاده از انعطاف‌پذیری و سرعت حمل‌ونقل جاده‌یی است.

در حمل‌ونقل چندوجهیِ ریل‌وجاده تقسیم‌کار بین آنها چنین است که شیوه‌ی جاده‌یی به مسافت‌های کوتاه و بخش‌های ابتدا و انتهای مسیر می‌پردازد؛ درحالی‌که ریل به مسافت‌های طولانی اختصاص می‌یابد. در حمل‌ونقل چندوجهی ریل‌وجاده لازم است برنامه‌های عملیاتی به‌طور دقیق همگام‌سازی شوند تا کالا در طول سفر کمتر دچار وقفه شود. برای بهره‌گیری کارا از شیوه‌ی چندوجهی، از واحد بار استاندارد نظیر کانتینر استفاده شود تا عملیات بارگیری، تخلیه، و جابه‌جایی تسهیل شود. اما از اصلی‌ترین مشکلات شیوه‌های چندوجهی می‌توان به افزایش پیچیدگی برنامه‌ریزی عملیات اشاره کرد؛ زیرا در این شیوه هرکدام از طرف‌های درگیر یک قسمت از زنجیره را کنترل و سازمان‌دهی می‌کنند.

۳.۱. لجستیک مشارکتی

مضمون این تعریف نسبتاً عام که «زنجیره‌ی تأمین شامل همه‌ی رویکردهایی است که به‌صورت کارا تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبار، و مراکز فروش را طوری یکپارچه می‌کند که کالاها در مقادیر و مکان و زمان درست به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌های سیستم و البته تأمین سطح خدمت مورد نیاز تولید و ارسال می‌شوند»[۳] این است که در واقع، این همکاری عمودی است که عملاً بین سطوح مختلف زنجیره‌ی تأمین رخ می‌دهد و متأثر از هماهنگ‌سازی و به اشتراک‌گذاری اطلاعات هزینه‌ها کاهش می‌یابد. در میان شیوه‌های اعمال همکاری عمودی می‌توان به کنترل موجودی فروشنده، سیاست‌های سفارش‌دهی، و شیوه‌های ارسال مواد اشاره کرد. در مقابل، همکاری افقی در لجستیک شامل همکاری بخش‌های یک سطح از زنجیره‌ی تأمین است. به عبارتی، زنجیره‌ی تأمین به‌صورت یک ساختار غیر سریالی در نظر گرفته می‌شود؛ پس دارای همکاری‌های افقی و عمودی است (شکل ۱). مزایای همکاری افقی عبارت‌اند از قیمت کمتر به دلیل ادغام مقادیر خرید، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی، ریسک تأمین کمتر.[۴]



شکل ۱. انواع همکاری‌ها در زنجیره‌ی تأمین.

۴.۱. تعریف کلی مسئله

در لجستیک مشارکتی، چندین شرکت حمل‌ونقل با به اشتراک گذاشتن ظرفیت وسایل نقلیه و تقاضاها و به‌منظور بهینه‌سازی عملیات حمل‌ونقل ائتلاف‌هایی را تشکیل می‌دهند. به‌دلیل نیاز به کاهش هزینه‌ها در بازار رقابتی حمل‌ونقل، نگرانی‌های رو به افزایش زیست‌محیطی، بهبود کارایی عملکرد از طریق به اشتراک‌گذاری منابع و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همکارانه تبدیل به یک مدل تجاری جدید در صنعت حمل‌ونقل شده است.[۵]

در بین شیوه‌های حمل‌ونقل کالا، افزایش نامتوازن و زیاد حمل‌ونقل جاده‌یی منجر به مشکلات جدی از قبیل شلوغی راه‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی، و مسائل ایمنی شده است. از سویی دیگر، حاملان ریلی با مشکلات سودآوری و هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری مواجه هستند. راه‌اندازی خدمات ریلی جدید پرهزینه است و یافتن میزان بار موردنیاز، به‌ویژه درحالی‌که خرده‌بار توسط فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شود، کار آسانی نیست.[۶]

علاوه‌بر تقویت مزایا و پوشش معایب هر دو شیوه، همکاری ریل و جاده به‌منظور ترکیب خدمات برای تکمیل جابه‌جایی‌های درب به درب[۱] و ایجاد یک نوع هم‌افزایی بین این دو شیوه‌ی حمل‌ونقل ضروری است. کالاها در مسیرهای حمل‌ونقل دور و عمدتاً بین پایانه‌ها توسط ریل و در مسیرهای بین پایانه و فرستنده یا پایانه و دریافت‌کننده توسط کامیون حمل می‌شوند.[۷] یکی از مشکلات اصلی حمل‌ونقل چندوجهی ایجاد یکپارچگی بین شیوه‌های درگیر است؛ به نحوی‌که صاحب کالا با یک قرارداد واحد مسئولیت حمل بار را واگذار کند. لجستیک مشارکتی سازوکارهایی برای اقناع شیوه‌های درگیر و ایجاد همکاری بین آنها ارائه می‌دهد که این مشکل را حل یا دست‌کم تسهیل می‌کند.

بنابراین، مسئله‌ی تحقیق جاری چنین است: فرض می‌شود یک شرکت حمل‌ونقل جاده‌یی دارای مجموعه‌یی قرارداد معین برای جابه‌جایی و نیز مجموعه‌ی معینی از ناوگان حمل‌ونقل است که در شبکه‌ی جاده‌یی عملیات حمل را انجام می‌دهند. از طرفی دیگر، فرض می‌شود یک حامل ریلی با مجموعه‌یی قرارداد معین بار برای جابه‌جایی و نیز ناوگان و زیرساخت معین ریلی وجود دارد. نحوه‌ی ایجاد همکاری، طراحی شبکه‌های سرویس، طراحی شبکه بلاکینگ ریلی، و نحوه‌ی تخصیص و مسیریابی بار برای ائتلاف حاصل دو شرکت بر پایه‌ی مفاهیم نظریه‌ی بازی‌های همکارانه و نیز شیوه‌ی تقسیم صرفه‌جویی حاصل از همکاری مؤلفه‌های اصلی

مسئله‌ی این تحقیق را تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه حمل‌ونقل کالا عمدتاً توسط شرکت‌های مستقل جاده‌یی و ریلی انجام می‌شود و همکاری صورت نمی‌گیرد، در این پژوهش، برای رفع این کمبود مسئله‌ی لجستیک مشارکتی بین شرکت‌های حمل‌ونقل جاده‌یی و ریلی از منظر برنامه‌ریزی ریاضی بررسی می‌شود؛ پس از مدل‌سازی، سازوکار مناسب برای تسهیم سود به‌دست‌آمده بر اساس مفاهیم نظریه‌ی بازی‌های همکارانه طراحی می‌شود.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

پیشرفت‌ها در علوم ارتباطات و فنّاوری اطلاعات، فرصت‌های بسیاری برای افزایش همکاری بین نهادهای زنجیره‌ی تأمین فراهم آورده است. این موضوع به‌نوبه خود، منجر به فهم این مسئله شده است که تأمین‌کنندگان، مصرف‌کنندگان، و حتی رقیبان می‌توانند در لجستیک همکاری کنند.[۸] همکاری عمودی[۲] موضوع طیف وسیعی از تحقیقات بوده است اما درباره‌ی همکاری افقی در لجستیک و حمل‌ونقل تحقیقات کمتری صورت گرفته است. کرویجسن و سالمن تأثیر این نوع همکاری برای یک ائتلاف از حاملان را بررسی کردند و با استفاده از یک مطالعه‌ی موردی نشان دادند با این روش در هزینه‌ها ۵ تا ۱۵ درصد و حتی بیشتر صرفه‌جویی می‌شود.[۹] کراجسکا و کپفار[۱۰] مدلی برای همکاری بین نهادهای مستقل حمل بار ارائه کردند. در این تحقیق عنوان شد که در محیط رقابتی، حمل‌کنندگان بار می‌توانند هزینه‌های خود را با به‌کار بردن روش‌های مختلف (با متولیت خودشان و برون‌سپاری) کاهش دهند. حاملان برای تأمین تقاضاها از ناوگان حمل‌ونقل خود استفاده می‌کنند یا با برون‌سپاری سفارش‌ها تأمین تقاضاها را به حاملان بار خارجی ارجاع می‌دهند. با همکاری حاملان در قالب ائتلاف برای ایجاد تعادل در تقاضاها مزیت‌های رقابتی اعضای ائتلاف افزایش می‌یابد.

تحقیقات پیشین در زمینه‌ی همکاری افقی حاملان به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شود. در دسته‌ی اول، تقاضاها بین حاملان همکار از طریق روش‌های مختلف تبادل می‌شوند. تخصیص مجدد تقاضاها باهدف به‌دست‌آوردن ترکیب بهتری از محموله‌ها و تناسب بیشتر با ناوگان موجود صورت می‌گیرد. با به اشتراک‌گذاری تقاضاها حاملان می‌توانند کارایی و سودآوری خود را با افزایش بهره‌وری ظرفیت و کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق برنامه‌ریزی بهتر حمل‌ونقل بهبود دهند. در مقابل به اشتراک‌گذاری تقاضا، در دسته‌ی دوم، حاملان می‌توانند از طریق به اشتراک‌گذاری وسایل نقلیه همکاری داشته باشند. ازآنجایی‌که خرید وسایل نقلیه نیازمند سرمایه‌گذاری زیادی است و بهره‌برداری کم از ظرفیت‌ها کارایی شرکت‌ها را کاهش می‌دهد، ارائه‌دهندگان خدمات لجستیکی ممکن است به این طریق همکاری کنند. در این روش، ممکن است سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده‌ی مربوط به وسایل نقلیه بین اعضا تقسیم شود و به‌دنبال آن بهره‌وری این وسایل بهبود یابد. تحقیق حاضر به بررسی تحقیقات انجام‌شده در شاخه‌ی به اشتراک‌گذاری تقاضاها می‌پردازد.

در تحقیقات پیشین از روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی مسائل این حوزه استفاده شده است که معمول‌ترین آن‌ها مسیریابی مشترک و سازوکارهای برپایه‌ی حراج[۳] است. کرویجسن و سالمن[۹] شبکه‌ی‌حمل‌ونقلی با چندین حامل و مشتری را در نظر گرفتند. تقاضاها نشان‌دهنده‌ی محموله‌هایی هستند که از یک مرکز توزیع به مکان مشتری جابه‌جا می‌شوند. هدف آنها، مقایسه‌ی هزینه‌های کلی حمل‌ونقل بین دو حالت عدم همکاری و همکاری حاملان است. برای حل مسئله‌ی مسیریابی حالت همکاری، تقاضاها ترکیب و یک مسئله‌ی مسیریابی ادغامی فرمول‌بندی می‌شود. این مسئله از طریق روش‌های فراابتکاری حل شده است. آنها نتیجه گرفته‌اند که مسیریابی مشترک منجر به کاهش ۷٫۳ درصدی ناوگان موردنیاز و درنتیجه کاهش میزان کلی هزینه‌ها می‌شود.

در تحقیقی دیگر توسط کرویجسن و همکاران،[۱۱] برای مشخص‌کردن ارزش ترکیبی همکاری افقی حاملان از طریق برنامه‌ریزی مشترک، چارچوبی مبتنی‌بر مسئله‌ی مسیریابی وسیله با پنجره‌ی زمانی تعریف شده است. در این تحقیق باهدف استفاده از مسیریابی وسایل نقلیه، مجموعه‌ی حاملان و اطلاعات مربوط به تقاضاها به یک شبکه‌ی توزیع تبدیل شده که در آن هرگره نشان‌دهنده‌ی مکان تحویل و یک گره در مرکز نشان‌دهنده‌ی مرکز توزیع است. این مسئله با رویکرد ابتکاری حل شده است. در تحقیقی دیگر که البته در آن لجستیک همکارانه به‌معنای مورد نظر این تحقیق وجود ندارد، اررا و همکاران[۱۲] یک مدل یکپارچه‌سازی برای مسیریابی کانتینرها و جابه‌جایی و موقعیت‌یابی مجدد کانتینرهای خالی در یک شبکه‌ی چندوجهی را بررسی کردند. مسئله به‌عنوان یک مدل جریان شبکه‌ی قطعی فرمول‌بندی شد. نتایج محاسباتی نشان داد که مدیریت یکپارچه‌ی کانتینر می‌تواند سبب کاهش هزینه‌های جابه‌جایی کانتینرهای خالی شود.

شکل دیگری از مسئله‌ی مسیریابی برای مدل‌سازی مسئله‌ی به اشتراک‌گذاری تقاضاها در همکاری حامل‌ها، مسئله‌ی بارگیری و تحویل با چندین انبار در مطالعه‌ی کارجسکا و همکاران تحت پنجره‌های زمانی است.[۱۳] برای حل مسئله‌ی به اشتراک‌گذاری تقاضاها با استفاده از یک مسئله‌ی بارگیری و تحویل به همراه پنجره‌های زمانی[۴] نویسندگان از ویژگی چند انبار[۵] برای تفسیر ادغام تقاضاها از حاملان مختلف استفاده کردند. مسئله شامل یافتن مجموعه‌ی مسیرهای بهینه و موجه در تمام قیود است که هزینه‌ی کل را کمینه کند. برای حل این مسئله‌ی NP-hard یک روش جست‌وجوی همسایگی استفاده شد. این روش با استفاده از مثال‌های آزمایشی و نیز داده‌های واقعی از حاملان بار در آلمان امتحان شد. نتایج آنها نشان داد که همکاری در ائتلاف می‌تواند صرفه‌جویی‌های زیادی در هزینه به بار آورد.

همچنین داهل و دریگز مسئله‌ی به اشتراک‌گذاری سفارش‌ها در شبکه‌ی همکارانه‌ی حاملان مستقل را فرمول‌بندی کردند. ازآنجایی‌که حاملان درنظرگرفته‌شده فقط سفارش‌های سریع را انجام می‌دهند، حاملان در محیطی پویا که در آن هیچ مجموعه‌ی ثابتی از تقاضاها وجود ندارد، عمل می‌کنند. هر حامل دارای مجموعه‌یی از سفارش‌ها با مبدأ، مقصد، میزان تقاضا و پنجره‌ی زمانی معین است. برای حل این مسئله یک روش حل ابتکاری به‌کار برده شده است. بر مبنای یک مطالعه‌ی شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های واقعی از پنجاه حامل پیشتاز در اروپا نشان داده شده که تا ۱۳ درصد کاهش هزینه امکان‌پذیر است.[۱۴] لیو و همکاران مسئله‌ی برنامه‌ریزی مسیریابی مشترک در همکاری حاملان را از دیدگاه دیگری بررسی کردند. به‌جای مدل‌سازی به‌صورت مسئله‌ی مرسوم مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، آن را به‌عنوان یک مسئله‌ی مسیریابی چند انباره با کمان‌های ظرفیت‌دار با کامیون با بارکامل فرمول‌بندی کردند. به دلیل اینکه مسئله‌ی برنامه‌ریزی مسیر مشترک در نظرگرفته‌شده متشکل از چندین حمل‌کننده با بارکامیون کامل است. مدل چند انباره برای تعیین مسیرهایی برای وسایل نقلیه‌ی متفاوت تعریف می‌شود تا تقاضاها تأمین و هزینه‌ی کل کمینه شود. برای حل این مسئله یک رویه‌ی ابتکاری دومرحله‌یی پیشنهاد شده است. در مرحله‌ی اول، مجموعه‌یی از چرخه‌ها برای پوشش کمان‌ها تولیدشده و در مرحله‌ی دوم مسیرهای وسایل نقلیه بر مبنای چرخه‌های به‌دست‌آمده در مرحله‌ی قبل ساخته می‌شوند. با استفاده از روش‌های جست‌وجوی محلی جواب اولیه بهبود

داده شد. لیو و همکاران عملکرد این روش ابتکاری را برای مسئله‌ی نمونه تحلیل کردند. نتایج نشان داد که رویه‌ی حل پایدار است و جواب‌هایی باکیفیت بالا در زمان‌های قابل‌قبول به دست می‌آید.[۱۵]

در مقابل تحقیقات قبلی که کل تقاضاها و شبکه‌ی حمل‌ونقل حامل را برای همکاری در نظر می‌گرفت، بایلی و همکاران[۱۶] به اشتراک‌گذاری تقاضاها برای مسیرهای برگشت شرکت‌های همراه را در نظر گرفتند. نویسندگان امکان کاهش برگشت‌های خالی یک حامل را با اضافه‌کردن تقاضاهای شرکت‌های همکار به جابه‌جایی‌های برگشتی بررسی کردند. ازآنجایی‌که جابجایی‌های برگشتی و خالی به انبار، سهم مهمی از هزینه را تشکیل می‌دهند، همکاری بار در قسمت برگشت می‌تواند به‌طور چشم‌گیری کارایی و سوددهی حامل را افزایش دهد. دو مدل بهینه‌سازی برای یافتن موقعیت‌هایی که در آن مسیریابی مجدد حمل‌ونقل‌های خالی برگشتی منجر به کاهش هزینه می‌شود، توسعه داده شد. در مدل اول که به‌عنوان برنامه‌ریزی عدد صحیح فرمول‌بندی شد، هر کامیون در مسیر برگشت حداکثر تقاضای یکی از همکاران را برآورده می‌کند و این بخش از مسئله به کمک روشی ابتکاری حل شد. مدل دوم به سبب انجام تقاضا از چندین حمل‌کننده توسط یک کامیون در مسیر برگشت پیچیده‌تر است. این مدل به‌عنوان یک مسئله‌ی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی و با استفاده از روش‌های ابتکاری حل شد. محاسبات انجام‌شده در این تحقیق نشان داد که این نوع همکاری ممکن است منجر به کاهش ۱۳ تا ۲۸ درصدی هزینه‌های برگشتی شود.

در مسئله‌ی اشتراک تقاضا بر پایه‌ی حراج هر حامل، ابتدا این مسئله که کدام تقاضا با به‌کار بردن روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند در حالت کارایی از نظر هزینه انجام شود، بررسی می‌شود. سپس تقاضاها با به‌کارگیری سازوکارهای حراج به اشتراک گذاشته می‌شوند. مثلاً سانگ و رگان[۱۷] یک سازوکار تخصیص تقاضا بر پایه‌ی مزایده برای حاملان با اندازه‌ی کوچک و متوسط ارائه دادند. زمانی‌که یک حمل‌کننده یک سفارش جدید دریافت می‌کند، ابتدا مجموعه‌یی از مسیرهای بهینه در نظر گرفته می‌شود تا مشخص شود که آیا تأمین این تقاضا از طرف حوزه‌ی حمل‌کننده به‌صرفه است یا خیر. اگر نه، شرکت یک قیمت رزرو برای تقاضا مشخص و سپس شرکای خود را برای ارائه‌ی پیشنهادها برای تأمین تقاضا آگاه می‌سازد. قیمت رزرو بیشینه‌ی ارزشی است که حمل‌کننده مایل است تا برای انجام تقاضا به یکی از شرکا پرداخت کند. دیگر حاملان نیز روش‌های بهینه‌سازی مشابهی را انجام می‌دهند. در پایان، حاملی که تقاضا را ارائه داده بود، پیشنهادها را با قیمت رزرو خود مقایسه و کمترین پیشنهاد را در صورت رضایت‌بخش بودن انتخاب می‌کند.

موضوع همکاری بین حاملان موضوع طیف متنوعی از تحقیقات را شامل می‌شود. به موازات افزایش مسائل و نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی رو به رشد بوده است. مطابق بررسی‌های صورت‌گرفته، تحقیقاتی یافت نشد که کاربردهای نظریه‌ی بازی‌های همکارانه در حمل‌ونقل چندوجهی را نشان دهد. در حالی‌که انتظار می‌رود ایده‌های محوری این نظریه بتواند در ایجاد سازوکارهایی برای یکپارچگی بیشتر و بهتر طرف‌های درگیر در این نوع حمل‌ونقل مفید باشد و در شفاف‌سازی شیوه‌ی تقسیم وظایف و تقسیم عواید همکاری مؤثر باشد. تحقیق جاری تلاشی است در زمینه‌ی شیوه‌ی به‌کارگیری مفاهیم بازی‌های همکارانه در حمل‌ونقل چندوجهی ریل و جاده. در همین راستا، مدلی ریاضی برای مسیریابی مشترک تقاضای ادغامی حاملان ریل و جاده و سپس یک سازوکار تقسیم سود با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی آرمانی ارائه شده است.

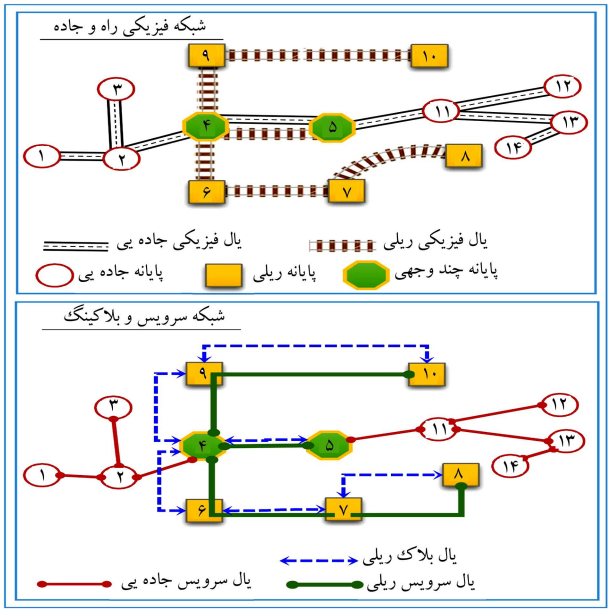
۳. مدل‌سازی ریاضی ائتلاف و تقسیم عواید

انگیزه‌ی اصلی در تشکیل ائتلاف حاملان کسب سود بیشتر یا کسب مزیت‌های رقابتی مناسب در فضای کسب‌وکار حمل‌ونقل است. به‌عبارت دیگر کسب مزایای مالی یا غیر مالی که به‌صورت انفرادی قابل حصول نیست. با فرض همکاری حاملان ریل و جاده و اتفاق‌نظر آن‌ها برای همکاری کامل لازم است تصمیمات و برنامه‌ریزی‌ها به‌صورت متحد صورت گیرند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی متمرکز که در آن تصمیمات هر دو حامل ریل و جاده به شکل متحد و متفق اتخاذ می‌شود، ارائه می‌گردد. به‌عبارت دیگر، فرض می‌شود که یک تصمیم‌گیر مجازی وجود دارد که تصمیمات هر دو حامل ریلی و جاده‌یی را به‌گونه‌یی تنظیم می‌کند که بیشترین منافع عاید ائتلاف این حاملان شود. بنابراین، در مدل متمرکز، کلیه‌ی تقاضاها و همه‌ی ناوگان و امکانات حمل‌ونقل مجازاً در هم ادغام می‌شود و گویی یک تصمیم‌گیر واحد به‌طور متمرکز تمام برنامه‌ریزی‌ها را انجام می‌دهد. به‌همین علت مدل نظیر ائتلاف غالباً مدل متمرکز نامیده می‌شود.

در شکل ۲ نمونه‌یی از شبکه‌ی مورد مطالعه ارائه شده است. فرض می‌شود در شیوه‌ی جاده بر روی همه یال‌ها در هر دو جهت سرویس ارائه شده است؛ اما در شیوه‌ی ریل تعداد سرویس‌ها و مسیر آن‌ها از قبل برنامه‌ریزی شده و در شکل مشخص‌شده‌اند. همچنین بلاک‌هایی که امکان استفاده از آن‌ها در صورت لزوم وجود دارد، رسم شده‌اند. حاملان می‌توانند تقاضاها را به‌صورت انفرادی جابه‌جا کنند یا با ادغام آن‌ها و مسیریابی همکارانه از صرفه‌جویی ناشی از مقیاس و احتمالاً کاهش هزینه‌ها بهره ببرند. ازآنجایی‌که محموله‌ها در شیوه‌ی ریل از طریق بلاک‌ها جابه‌جا می‌شوند کار تخصیص محموله به بلاک و بلاک به سرویس‌های موجود نیز باید در دستور کار قرار گیرد.

۱.۳. مدل ریاضی مسئله‌ی ائتلاف حاملان ریل و جاده

در ابتدا لازم است نمادها و علائم مورد استفاده در مدل معرفی شوند و سپس مدل ارائه شود.



شکل ۲. نمونه‌یی از شبکه چندوجهی ریل و جاده.

۳.۱.۱. مجموعه‌ها

N: مجموعه‌ی گره‌های شبکه‌ی ادغامی ریل و جاده شامل مجموعه‌ی پایانه‌های جاده‌یی N_1، مجموعه‌ی پایانه‌های ریلی N_2، و مجموعه‌ی پایانه‌های چندوجهی N_3. بدیهی است که $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$؛

A_1: مجموعه‌ی سرویس‌های ارائه‌شده در شیوه‌ی حمل‌ونقل جاده‌یی؛

A_2: مجموعه‌ی یال‌ها در شبکه‌ی فیزیکی شیوه‌ی حمل و نقل ریلی؛

S: مجموعه‌ی سرویس‌های ارائه‌شده در شیوه‌ی حمل و نقل ریلی؛

B: مجموعه‌ی بلاک‌های بالقوه؛

$B^+(i)$: مجموعه‌ی بردارهای بلاک‌های خارج شونده از پایانه i؛

$B^-(i)$: مجموعه‌ی بردارهای بلاک‌های واردشونده به پایانه i؛

$A^+(i)$: مجموعه‌ی بردارهای خارج‌شونده از پایانه i؛

$A^-(i)$: مجموعه‌ی بردارهای واردشونده به پایانه i؛

O: مجموعه‌ی مبادی محموله‌ها؛

D: مجموعه‌ی مقاصد محموله‌ها؛

K: مجموعه‌ی محموله‌ها به مبدأ o و مقصد d و حمل‌کننده r.

۲.۱.۳. پارامترها

c_a: هزینه‌ی جریان هر واحد کانتینر بر روی یال $a \in A$؛

hr_i: هزینه‌های رسیدگی به هرکانتینر در پایانه‌ی جاده‌یی $i \in N_1$؛

ha_i: هزینه‌های رسیدگی به هرکانتینر در پایانه‌ی ریلی $i \in N_2$؛

hm_i: هزینه‌های رسیدگی به هرکانتینر در پایانه‌ی چند وجهی $i \in N_3$؛

F_a^s: عبور قطار $s \in S$ بر یال $a \in A_2$، $F_a^s \in \{0, 1\}$؛

h_i: هزینه‌ی طبقه‌بندی هرکانتینر در پایانه $i \in N_2 \cup N_3$؛

c_b^f: هزینه‌ی ثابت شکل‌گیری هر بلاک $b \in B$؛

d^k: میزان محموله k (کانتینر)؛

u_a: ظرفیت هر یال $a \in A \cup B$؛

l_i: ظرفیت جابه‌جایی در پایانه $i \in N_2 \cup N_3$ (تعداد کانتینر)؛

b_i: بیشینه‌ی تعداد بلاک قابل ساخت در پایانه‌ی $i \in N_2 \cup N_3$؛

U_a^s: ظرفیت سرویس $s \in S$ بر روی یال $a \in A_2$.

۳.۱.۳. متغیرهای تصمیم

x_b^k: تعداد کانتینرهای محموله‌ی k که بر روی یال $b \in B$ جابه‌جا می‌شوند؛

y_a^k: تعداد کانتینرهای محموله‌ی k که بر روی یال $a \in A_1$ جابه‌جا می‌شوند؛

z_b: اگر بلاک $b \in B$ تشکیل شود ۱، و در غیر این‌صورت صفر؛

E_{ab}^s: اگر بلاک $b \in B$ به یال $a \in A_2$ از قطار $s \in S$ تخصیص یابد ۱، و در غیر این‌صورت صفر؛

X_b: تعداد واگن (کانتینر)های بلاک $b \in B$.

با توجه به این علائم، مدل ریاضی متمرکز که کلیه‌ی تصمیمات اعضای ائتلاف در آن تهیه می‌شود، به شرح زیر است:

$$\min \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_1}\sum_{a\in A_1^+(i)} hr_i y_a^k + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_2}\sum_{b\in B^+(i)} ha_i x_b^k + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_3} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big) + \sum_{k\in K}\sum_{a\in A_1} c_a y_a^k + \sum_{a\in A_2}\sum_{s\in S}\sum_{b\in B} c_a E_{ab}^s X_b + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_2\cup N_3}\sum_{b\in B^+(i)} h_i x_b^k + \sum_{b\in B} c_b^f z_b \quad (1)$$

$$\sum_{b\in B^+(i)} x_b^k + \sum_{a\in A_1^+(i)} y_a^k - \sum_{b\in B^-(i)} x_b^k - \sum_{a\in A_1^-(i)} y_a^k = \begin{cases} d^k & \forall k\in K,\ i\in O(k) \\ -d^k & \forall k\in K,\ i\in D(k) \\ 0 & \forall k\in K,\ i\in N\backslash\{O(k),D(k)\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{k\in K} y_a^k \le u_a, \quad \forall a\in A_1 \quad (3)$$

$$\sum_{k\in K} x_b^k \le u_b z_b, \quad \forall b\in B \quad (4)$$

$$\sum_{b\in B^+(i)} z_b \le b_i, \quad \forall i\in N_2\cup N_3 \quad (5)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{b\in B^-(i)} x_b^k \le l_i, \quad \forall i\in N_2\cup N_3 \quad (6)$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{a\in A_2^+(i)} E_{ab}^s - \sum_{s\in S}\sum_{a\in A_2^-(i)} E_{ab}^s = \begin{cases} 1 & i=O(b) \\ -1 & i=D(b) \\ 0 & i\in N\backslash\{O(b),D(b)\} \end{cases}, \forall b\in B, \forall i\in N_2\cup N_3 \quad (7)$$

$$\sum_{k\in K} x_b^k = X_b, \quad \forall b\in B \quad (8)$$

$$\sum_{b\in B} E_{ab}^s X_b \le U_a^s F_a^s, \quad \forall a\in A_2, \quad \forall s\in S \quad (9)$$

$$y_a^k \ge 0,\ \text{int}, \quad \forall k\in K, \quad \forall a\in A_1 \quad (10)$$

$$x_b^k \ge 0,\ \text{int}, \quad \forall k\in K, \quad \forall b\in B \quad (11)$$

$$z_b, E_{ab}^s \in \{0,1\}, \quad \forall b\in B, \quad \forall a\in A_2, \quad \forall s\in S \quad (12)$$

رابطه‌ی ۱ به‌عنوان تابع هدف به کمینه‌سازی هزینه‌ها اختصاص دارد که در آن عبارت اول هزینه‌ی جابه‌جایی کالا در پایانه‌ی جاده‌یی، عبارت دوم هزینه‌ی جابه‌جایی در پایانه‌ی ریلی، و عبارت سوم این هزینه را در پایانه‌های چندوجهی نشان می‌دهد. عبارت‌های چهارم و پنجم به محاسبه‌ی هزینه‌ی جریان کالا بر روی جاده (یال سرویس) و ریل (یال بلوک) اختصاص دارد. عبارت ششم هزینه‌ی طبقه‌بندی کالا در ایستگاه ریلی را نشان می‌دهد و عبارت پایانی هزینه‌ی ثابت تشکیل بلاک است. رابطه‌ی ۲ تعادل جریان را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۳ مربوط به محدودیت ظرفیت در سرویس‌های جاده‌یی است. رابطه‌ی ۴ نشان می‌دهد که تنها در صورت ایجاد بلوک، محموله می‌تواند در قالب آن جریان یابد و کل جریان یک بلوک باید محدود به ظرفیت بلوک باشد. محدودیت ۵ محدودکننده‌ی تعداد بلاک ساخته‌شده در هر گره و محدودیت ۶ تعداد کانتینر جابه‌جا شده در هر گره را محدود می‌کند. محدودیت ۷ نشان‌دهنده‌ی تعادل جریان بلاک‌ها در شبکه است. محدودیت ۸ تعداد کانتینر در یک بلاک، و محدودیت ۹ محدودیت ظرفیت قطارها بر روی هر یال فیزیکی ریل است. همچنین محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ متغیرهای تعداد کانتینر در شیوه‌های ریل و جاده که نامنفی و عدد صحیح هستند، و محدودیت ۱۲ ماهیت دودویی متغیرهای ایجاد و تخصیص بلاک‌ها به سرویس‌ها را نشان می‌دهند.

هم در بخش جاده‌یی و هم در بخش ریلی مدل‌های ریاضی زیادی برای برنامه‌ریزی بار به‌صورت غیر همکارانه ارائه شده‌اند.[۱۸و۱۹] آنچه در این تحقیق انجام می‌شود ادغام آن‌ها در قالب برنامه‌ریزی مشارکتی است.

۲.۳. سازوکار تخصیص هزینه‌های ائتلاف به اعضا

خروجی مدل متمرکز (بخش قبل) تکلیف اعضای ائتلاف را در قبال جابه‌جایی بارها، تصمیمات طراحی شبکه، و مسیریابی بار روشن می‌کند. این تصمیمات به نحوی است که اهداف ائتلاف را به بهترین شکل تأمین می‌کنند. اما اهداف اعضا لزوماً هم‌راستا با اهداف ائتلاف نیست و ممکن است در توزیع بارها و وظایف انتقال محموله‌ها ناهمگونی و بلکه بی‌عدالتی رخ دهد. مطابق رویه‌ی معمول بازی‌های همکارانه، تقسیم عایدی ائتلاف از اصلی‌ترین گام‌های مسئله است. این بخش به نحوه‌ی تقسیم کل عواید ائتلاف بین اعضای آن، در قبال اجرای تصمیمات متمرکز ائتلاف می‌پردازد.

برای هر حامل، ارزیابی جواب حاصل از مدل مرکزی، از طریق بررسی وظایف محوله و متناظراً کل هزینه‌های تحمیل‌شده به او مشخص می‌شود. با توجه به استقلال مالی هر حامل، طبیعی است که حامل‌های ریلی و جاده‌یی به‌طور خودخواهانه درپی کمینه‌سازی هزینه‌های خود باشند. بنابراین، ارائه‌ی سازوکاری برای اعمال تصمیمات طراحی شبکه و مسیریابی بار حاصل از مدل متمرکز، که غالباً در تضاد با مسیریابی‌های انفرادی است، ضروری است. این سازوکار تقسیم عواید باید بتواند حاملان ریلی و جاده‌یی را از نظر مالی توجیه و اقناع کند که پیروی از تصمیمات متمرکز ائتلاف به بهترین شکل اهداف آنها را برآورده می‌کند.

یکی از جواب‌های مقبول برای تقسیم عواید در بازی‌های همکارانه ارزش شپلی است. ایده‌ی محوری روش شپلی برای تقسیم عواید تخصیص عواید متناسب با سهم آورده‌ی هر بازی‌کن در ائتلاف است. ارزش شپلی برای هر بازی‌کن از طریق حل مدل متمرکز نسبت به کلیه‌ی ائتلاف‌های ممکن انجام می‌پذیرد. برای درک روابط حاکم بر روش شپلی و نحوه‌ی محاسبه‌ی ارزش شپلی می‌توان به مرجع[۱۸] مراجعه کرد. در اینجا ارزش شپلی حاملان جاده‌یی و ریلی به‌ترتیب با φ_1 و φ_2 نشان داده می‌شود. همچنین مجموعه‌ی محموله‌های حاملان جاده‌یی و ریلی به‌ترتیب با K_1 و K_2 نشان داده می‌شود. منظور از مجموعه‌ی محموله‌های K_1 و K_2 تقاضاهایی است که هرکدام از حاملان قبل از ائتلاف نزد صاحبان این محموله‌ها متعهد شده‌اند که آنها را تحویل مقصد دهند.

یادآوری می‌شود که مفهوم محوری تحقیق جاری، نظریه‌ی بازی‌های همکارانه است. در ادامه از ارزش شپلی به‌عنوان سهم عادلانه‌ی تقسیم هزینه‌های کل بین طرف‌های عضو ائتلاف استفاده می‌شود. با استفاده از پرداخت‌های جانبی و نیز ایده‌ی برنامه‌ریزی آرمانی سازوکاری ارائه می‌شود که سعی دارد سهم هزینه‌ی هر عضو حتی‌المقدور برابر مقدار ارزش شپلی شود. پس از معرفی نمادها، مدل ریاضی تخصیص هزینه‌های کل بین اعضا ارائه می‌شود.

۱.۲.۳. پارامتر

φ_r: مقدار شپلی حامل $r \in R$.

۲.۲.۳. متغیرهای تصمیم

d_r^+: انحراف مثبت از آرمان (مقدار شپلی) برای حامل $r \in R$؛

d_r^-: انحراف منفی از آرمان (مقدار شپلی) برای حامل $r \in R$؛

s_r: پرداختی جانبی حامل $r \in R$ بابت حمل هرکانتینر.

$$\min \sum_{r=1}^{2} d_r^+ + d_r^- \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{k\in K_1}\sum_{i\in N_1}\sum_{a\in A_1^+(i)} hr_i y_a^k + \sum_{k\in K_1}\sum_{i\in N_2} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big) + \sum_{k\in K_1}\sum_{a\in A_1} c_a y_a^k - \sum_{b\in B}\sum_{k\in K_2} s_1 y_a^k + \sum_{b\in B}\sum_{k\in K_1} s_2 x_b^k = \varphi_1 + d_1^+ - d_1^- \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{k\in K_2}\sum_{i\in N_2}\sum_{b\in B^+(i)} ha_i x_b^k + \sum_{k\in K_2}\sum_{i\in N_2} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big) + \sum_{a\in A_2}\sum_{s\in S}\sum_{b\in B} c_a E_{ab}^s X_b + \sum_{k\in K_2}\sum_{i\in N_2\cup N_2}\sum_{b\in B^+(i)} h_i x_b^k + \sum_{b\in B} c_b^f z_b - \sum_{b\in B}\sum_{k\in K_1} s_2 x_b^k + \sum_{b\in B}\sum_{k\in K_2} s_1 y_a^k = \varphi_2 + d_2^+ - d_2^- \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{b\in B^+(i)} x_b^k + \sum_{a\in A_1^+(i)} y_a^k - \sum_{b\in B^-(i)} x_b^k - \sum_{a\in A_1^-(i)} y_a^k = \begin{cases} d^k, & \forall k \in K_1,\ i \in O(k) \\ -d^k, & \forall k \in K_1,\ i \in D(k) \\ 0, & \forall k \in K_1,\ i \in N\backslash\{O(k), D(k)\} \end{cases} \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{b\in B^+(i)} x_b^k + \sum_{a\in A_1^+(i)} y_a^k - \sum_{b\in B^-(i)} x_b^k - \sum_{a\in A_1^-(i)} y_a^k = \begin{cases} d^k, & \forall k \in K_2,\ i \in O(k) \\ -d^k, & \forall k \in K_2,\ i \in D(k) \\ 0, & \forall k \in K_2,\ i \in N\backslash\{O(k),\ D(k)\} \end{cases} \qquad (۱۷)$$

$$d_r^+, d_r^-, s_r \geq 0, \quad \forall r \in R \qquad (۱۸)$$

و همه روابط ۳-۱۲

رابطه‌ی ۱۳ تابع هدف است که کمینه‌سازی انحرافات از مقادیر شپلی را برای همه اعضای ائتلاف جست‌وجو می‌کند. رابطه‌ی ۱۴ هزینه‌ها و پرداخت‌ها و دریافت‌های جانبی مربوط به حامل جاده‌یی را نشان می‌دهد. در این رابطه، عبارت اول هزینه‌ی رسیدگی و انتقال کالا در پایانه‌های جاده‌یی، عبارت دوم هزینه‌ی جابه‌جایی کالای متعلق به حامل جاده‌یی در پایانه‌های چندوجهی، و عبارت سوم هزینه‌ی جریان کالا در شیوه‌ی جاده است. چهارمین عبارت دریافت جانبی بابت حمل کالای متعلق به حمل‌کننده‌ی ریلی و عبارت پنجم پرداخت جانبی حامل جاده‌یی به ریلی در عوض جابه‌جایی کالای جاده‌یی توسط حامل ریلی است. مشابه رابطه‌ی ۱۴، رابطه‌ی ۱۵ هزینه‌ها و دریافت‌ها و پرداخت‌های جانبی مربوط به حامل ریلی را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۶ تعادل جریان کالاهای مربوط به حامل جاده و محدودیت ۱۷ تعادل جریان را در مورد حامل ریلی نشان می‌دهد. محدودیت ۱۸ متغیرهای پیوسته و نامنفی انحرافات مثبت و منفی و پرداختی‌ها را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود وجود جملات غیر خطی همچون $\sum_{b\in B}\sum_{k\in K_1} s_2 x_b^k$ و $\sum_{b\in B}\sum_{k\in K_2} s_1 y_a^k$ که در آن‌ها دو متغیر در هم ضرب شده‌اند، مدل را غیر خطی کرده است. در ادامه لم و قضایایی اثبات می‌شود که به خطی‌سازی و حل آسان‌تر مدل کمک می‌کنند.

۳.۳. تحلیل تخصیص‌های حاصل از مدل آرمانی

لم: جریان‌های بهینه‌ی مدل متمرکز، در مدل آرمانی شدنی هستند.

اثبات: مجموع محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ برابر با محدودیت ۲ در مدل متمرکز است. توجه شود که این محدودیت‌ها از نوع تساوی هستند. همچنین، حاصل جمع محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ به‌صورت زیر است:

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in N_1}\sum_{a\in A_1^+(i)} hr_i y_a^k + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_2}\sum_{b\in B^+(i)} ha_i x_b^k + \sum_{k\in K}\sum_{a\in A_1} c_a y_a^k + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_2} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big) + \sum_{a\in A_2}\sum_{s\in S}\sum_{b\in B} c_a E_{ab}^s X_b + \sum_{k\in K}\sum_{i\in N_2\cup N_2}\sum_{b\in B^+(i)} h_i x_b^k + \sum_{b\in B} c_b^f z_b = \big(\varphi_1 + d_1^+ - d_1^-\big) + \big(\varphi_2 + d_2^+ - d_2^-\big)$$

نظر به اینکه $Z_c = \varphi_1 + \varphi_2$، سمت چپ رابطه برابر با تابع هدف مدل متمرکز به‌علاوه‌ی متغیرهای انحراف در برنامه‌ریزی آرمانی است. در نتیجه با توجه به اشتراک سایر محدودیت‌ها جواب‌های حاصل از مدل متمرکز ۱-۱۲ در مدل مدل آرمانی شدنی هستند.■

برای سادگی و خلاصه‌سازی عبارات ریاضی، نمادهای ψ، ϕ، C_1 و C_2 را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$\psi = \sum_{k\in K_2} y_a^k, \qquad a \in A_1 \tag{۱۹}$$

$$\phi = \sum_{k\in K_1} x_b^k, \qquad b \in B \tag{۲۰}$$

$$C_1 = \sum_{k\in K_1}\sum_{i\in N_1}\sum_{a\in A_1^+(i)} hr_i y_a^k + \sum_{k\in K_1}\sum_{i\in N_2} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big) + \sum_{k\in K_1}\sum_{a\in A_1} c_a y_a^k \tag{۲۱}$$

$$C_2 = \sum_{k\in K_2}\Bigg(\sum_{i\in N_2}\sum_{b\in B^+(i)} ha_i x_b^k + \sum_{i\in N_2} hm_i\Big(\sum_{j\in B^+(i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in A_1^+(i)} y_{ij}^k\Big)\Bigg) + \sum_{a\in A_2}\sum_{s\in S}\sum_{b\in B} c_a E_{ab}^s X_b + \sum_{k\in K_2}\sum_{i\in N_2\cup N_2}\sum_{b\in B^+(i)} h_i x_b^k + \sum_{b\in B} c_b^f z_b \tag{۲۲}$$

توجه شود که عبارات ψ، ϕ، C_1 و C_2 به‌ازای مقادیر معین برای متغیرهای جریان، عملاً تبدیل به پارامترهای معینی در مدل می‌شوند. پس از قراردادن جریان‌های به‌دست‌آمده از مدل متمرکز و ساده و مرتب‌کردن عبارات حاصل، مدل آرمانی برای تخصیص عادلانه‌ی هزینه‌های ائتلاف به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\min \sum_{r=1}^{2} d_r^+ + d_r^- \tag{۲۳}$$

$$-\psi s_1 + \phi s_2 - d_1^+ + d_1^- = \varphi_1 - C_1 \tag{۲۴}$$

$$\psi s_1 + \phi s_2 - d_2^+ + d_2^- = \varphi_2 - C_2 \tag{۲۵}$$

$$d_r^+, d_r^-, s_r \geq 0, \qquad \forall r \in R \tag{۲۶}$$

قضیه: به ازای جریان‌های بهینه‌ی مدل متمرکز و درنتیجه معین‌بودن مقادیر عبارات ψ، ϕ، C_1 و C_2 در مدل آرمانی، وجود دارند $d_r^+ d_r^- s_r \geq 0$ به‌نحوی که $\sum_{r=1}^{2} d_r^+ + d_r^- = 0$.

اثبات: با داشتن جریان‌های کالای مدل متمرکز، جملات ψ، ϕ، C_1 و C_2 مقداری معین می‌گیرند و در مدل ۲۳-۲۶ به‌صورت پارامتر ظاهر می‌شوند. بر این اساس، مدل مذکور مدل اولیه‌ی یک برنامه خطی است. با توجه به مثبت‌بودن متغیرها و تابع هدف که کمینه‌سازی است و نیز ملاحظه‌ی این نکته که در بدترین حالت ائتلاف اعضا به‌صورت انفرادی فعالیت می‌کنند، مسئله‌ی اولیه دارای جواب بهینه‌ی محدود است. بر همین اساس، مطابق قضیه‌ی دوگان قوی، می‌توان نشان داد که مسئله‌ی دوگان نیز دارای جواب بهینه‌ی محدود با ارزش تابع هدف یکسان است.

با استفاده از روابط دوگان ثابت می‌شود مدل آرمانی به‌ازای جریان‌های بهینه‌ی مدل متمرکز دارای جواب با ارزش صفر است. با فرض π_1 و π_2 به‌عنوان متغیرهای دوگان، مدل مسئله‌ی دوگان به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\max\ (\varphi_1 - C_1)\pi_1 + (\varphi_2 - C_2)\pi_2 \tag{۲۷}$$

$$-\psi\pi_1 + \psi\pi_2 \leq 0 \tag{۲۸}$$

$$\phi\pi_1 - \phi\pi_2 \leq 0 \tag{۲۹}$$

$$-\pi_1 \leq 1 \tag{۳۰}$$

$$\pi_1 \leq 1 \tag{۳۱}$$

$$-\pi_2 \leq 1 \tag{۳۲}$$

$$\pi_2 \leq 1 \tag{۳۳}$$

با استفاده از محدودیت‌های ۲۸ و ۲۹ بدیهی است $\pi_1 = \pi_2$. علاوه‌براین، براساس محدودیت‌های ۳۲ و ۳۳ معلوم است که:

$$-1 \leq \pi_1 \leq 1, \qquad -1 \leq \pi_2 \leq 1$$

بر این اساس، مدل به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\max\left((\varphi_1 + \varphi_2) - (C_1 + C_2)\right)\pi_1 \tag{۳۴}$$

$$-1 \leq \pi_1 \leq 1 \tag{۳۵}$$

با توجه به این خاصیت ارزش شپلی که مقدار اجزای آن برابر با کل ارزش ائتلاف است، بدیهی است که $\varphi_1 + \varphi_2 = C_1 + C_2$؛ پس به‌ازای $\pi_1 \in [-1, 1]$ جواب بهینه‌با ارزش صفر به‌دست می‌آید و براساس قضیه‌ی دوگان قوی جواب بهینه‌ی مکمل جواب فعلی هم با ارزش بهینه‌ی صفر است و اثبات قضیه کامل می‌شود.■

نتیجه: جریان‌های بهینه‌ی مدل متمرکز، بخشی از جواب بهینه‌ی مدل آرمانی هستند. به‌علت یکسان‌بودن جریان‌ها این متغیرها در مدل آرمانی به‌صورت پارامتر قرار داده

می‌شوند که این منجر به خطی‌شدن مدل آرمانی می‌شود. حل مدل آرمانی ساده‌شده به کمک نرم‌افزارهای بهینه‌سازی موجود کاری سر راست است.

درکنار مفهوم ارزش شپلی، یکی دیگر از مفاهیم کلیدی در بازی‌های همکارانه و تقسیم عواید ائتلاف مفهوم هسته[۶] است. ایده‌ی محوری در طرح مفهوم هسته پایداری ائتلاف و جلوگیری از تجزیه‌ی ائتلاف به ائتلاف‌های کوچکتر است. با فرض اینکه N مجموعه‌ی ائتلاف کل، تابع v تابع مشخصه‌ی بازی و درنتیجه $v(S)$ ارزش ائتلاف S باشد. همچنین اگر x_i سهم بازی‌کن i در ائتلاف باشد، به لحاظ تحلیلی هسته چنین تعریف می‌شود:[۲۰]

$$C(Nv)=\left\{x\in R^N \;\middle|\; \sum_{i\in N} x_i=v(N), \sum_{i\in S} x_i\geq v(S)\;\; S\subset N\;\; S\neq\emptyset\right\}$$

گزاره: مقادیر به‌دست‌آمده در تقسیم هزینه‌های ائتلاف (مقادیر شپلی) در هسته قرار دارند.

با فرض اینکه Z_c، Z_1 و Z_2 به‌ترتیب تابع هدف ائتلاف (هزینه‌ی کل ائتلاف)، هزینه‌ی حامل جاده‌یی در حالت انفرادی و هزینه‌ی حامل ریلی در حالت انفرادی باشد، آنگاه با توجه به تعریف، ارزش شپلی و ساختار ائتلاف بازی همکارانه‌ی مورد نظر این تحقیق که از دو بازی‌کن تشکیل شده است، محاسبه‌ی ارزش شپلی به‌صورت زیر است:

$$\varphi_1=(Z_c-Z_2+Z_1)/2,\qquad \varphi_2=(Z_c-Z_1+Z_2)/2$$

بدیهی است $Z_c=\varphi_1+\varphi_2$. با این مقدمات و توجه به الزامات مفهوم هسته، بدیهی است که مقادیر شپلی در هسته قرار دارند.■

نتیجه: تخصیص حاصل از ارزش شپلی تخصیصی پایدار است.

۴. آزمایش‌های عددی و تحلیل حساسیت

در این بخش، برای ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل‌ها و روش‌های ارائه‌شده، تعدادی مسئله‌ی آزمایشی در ابعاد مختلف طراحی و حل شده است. مسائل آزمایشی شامل گستره‌ی مناسبی از مسائل کوچک تا بزرگ بر حسب تعداد گره‌های شبکه است (جدول ۱). مسائل آزمایشی در محیط مدل‌سازی GAMS مدل و به‌کمک حل‌کننده‌ی CPLEX ۱۲٫۶ با کمک رایانه‌یی با پردازنده‌ی Core i۳ ۲٫۵ GHz Intel، با حافظه‌ی رم ۴ گیگابایت و تحت سیستم عامل MS Windows ۷ اجرا شده است. البته مدل‌های مذکور در هر محیط مدل‌سازی جبری نظیر AMPL، Lingo، Pyomo و امثال آن و با کمک هر حل‌کننده‌ی مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح نظیر CPLEX، GUROBI، XPRESS، CBC و نظایر آن قابل حل است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مسائل طراحی‌شده.

اندازه‌ی شبکه	تعداد گره
کوچک	$n\leq ۱۰$
متوسط	$۱۱\leq n\leq ۳۶$
نسبتا بزرگ	$۳۷\leq n\leq ۷۶$

۱.۴. نتایج اجرای مدل روی مسائل آزمایشی

نتایج حاصل از حل این مسائل با استفاده از نرم‌افزار CPLEX به‌تفکیک دسته مسائل کوچک، متوسط، و نسبتاً بزرگ در جداول ۲-۴ آورده شده است. جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ به‌ترتیب نتایج نظیر مسائل کوچک، متوسط، و بزرگ را نشان می‌دهند. داده‌ها و پارامترهای این مسائل در ستون‌های اولیه‌ی جداول آورده شده است. ستون‌های دوم تا چهارم تعداد گره‌ها به تفکیک جاده، ریل، و چندوجهی را بیان می‌کند. تعداد تقاضاها به‌تفکیک حامل‌های جاده‌یی و ریلی در ستون بعد قرار دارد. تعداد سرویس‌های موجود که مسیر مشخصی دارند و از قبل برنامه‌ریزی‌شده‌اند در ستون ششم قرار داده شده‌اند. هر مسئله در دو حالت همکارانه و غیر همکارانه حل شده است. در حالتی‌که همکاری وجود ندارد و حاملان به‌صورت انفرادی عمل می‌کنند، هزینه‌ها در ستون‌های هزینه‌ی ریل و جاده آورده شده‌اند. با تشکیل ائتلاف و حمل همکارانه، جواب‌های حاصل از مدل متمرکز در ستون بعدی گنجانده شده‌اند. زمان حل مدل متمرکز نیز در ستون دهم آورده شده است. صرفه‌جویی حاصل از همکاری اعضای ائتلاف که تفاوت جمع هزینه‌ها در حالت انفرادی و در حالت متمرکز است، به‌عنوان معیاری از نتیجه‌ی همکاری با عنوان عایدی ائتلاف در ستون یازدهم آمده است. همچنین به‌منظور مقایسه‌ی آسان‌تر، این نتایج به‌صورت درصد نشان داده شده است. در دو ستون آخر نیز تخصیص این هزینه با استفاده از مفهوم ارزش شپلی آمده است.

میانگین صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل‌ونقل ناشی از همکاری در مسائل کوچک، متوسط، و نسبتاً بزرگ به‌ترتیب برابر ۵٫۹، ۶٫۷ و ۷٫۹ درصد است. بنابراین، همان‌طورکه در جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، به‌طورکلی تشکیل ائتلاف باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل شده است. به‌علاوه، به عنوان یک روند کلی، هرچه اندازه‌ی شبکه به‌لحاظ تعداد گره‌ها بزرگ‌تر می‌شود، فرصت‌های همکاری بیشتری خلق می‌شود و صرفه‌جویی‌های بیشتری حاصل می‌شود.

باتوجه به تنوع مسائل آزمایشی حل‌شده، می‌توان بیان کرد که به‌علت روابط حاکم بر جواب مسئله‌ی متمرکز و مسئله‌ی تخصیص منافع و در نتیجه لم‌ها و قضایای اثبات‌شده، حل مسئله‌ی تخصیص منافع ساده است؛ زیرا یک مدل برنامه‌ریزی خطی است. به‌طورکلی زمان حل بهینه‌ی مسائل آزمایشی نسبتاً کوتاه و ناچیز است. درواقع کل زمان گزارش‌شده، تقریباً همان زمانی است که صرف حل مسئله‌ی متمرکز می‌شود. توجه شود که مسئله‌ی متمرکز یک مسئله با متغیرهای عدد صحیح و پیوسته است که ترکیبی است از مسائل طراحی شبکه و مسیریابی جریان‌های کالا و در شکل عمومی یک مسئله‌ی NP-Hard. با این حال، مسئله‌ی همکاری حاملان ریلی و جاده‌یی در بسیاری از مسائل مقیاس دنیای واقعی قابل حل است. با این حال، برای مسائل مقیاس خیلی بزرگ، بسیار بعید است روش‌های حل دقیق جواب‌گو باشند و برای حل این دسته از مسائل باید از الگوریتم‌های ابتکاری و فرااِبتکاری استفاده کرد.

اکنون سؤال این است که در چه شرایطی و چه ویژگی‌های از حاملان ریلی و جاده‌یی ایجاد همکاری بیشترین صرفه‌جویی را در هزینه‌ها به بار می‌آورد. برای بررسی این مهم، در جدول ۵ همبستگی خطی بین میزان صرفه‌جویی و هرکدام از عوامل کلیدی مسئله نشان داده شده است. این ضرایب همبستگی خطی با توجه به همه‌ی ۶۳ مسئله‌ی آزمایشی محاسبه شده است. مطابق نتایج جدول ۵، به‌جز عوامل تعداد پایانه‌های اختصاصی بخش ریلی و هزینه‌ی انفرادی ریل، همه‌ی عوامل ضریب همبستگی معناداری با میزان صرفه‌جویی دارند. در این بین، دو عامل هزینه‌های انفرادی جاده و تعداد پایانه‌های جاده‌یی تأثیرگذارترین عامل در میزان صرفه‌جویی به بار آمده هستند.

جدول ۲. نتایج حاصل از حل مسائل با اندازه‌ی کوچک شبکه.

شماره‌ی مسئله	تعداد گره			تعداد تقاضا	تعداد سرویس	هزینه‌ی جاده	هزینه‌ی ریل	هزینه‌ی متمرکز	زمان حل (ثانیه)	عایدی ائتلاف	صرفه‌جویی (درصد)	تخصیص هزینه	
	جاده	ریلی	چندوجهی									به جاده	به ریل
۱	۲	۱	۳	۱۶	۴	۸۸۶۰	۵۸۴۵	۱۴۶۹۰	< ۱	۱۵	۰/۱	۸۸۵۲/۵	۵۸۳۷/۵
۲	۲	۱	۳	۸	۴	۴۵۰۰	۳۲۱۰	۷۶۲۰	< ۱	۹۰	۱/۱۸	۴۴۵۵	۳۱۶۵
۳	۲	۱	۴	۲۶	۴	۱۷۵۰۵	۷۵۶۰	۲۲۵۱۰	< ۱	۲۵۵۵	۱۱/۳۵	۱۶۲۲۷/۵	۶۲۸۲/۵
۴	۲	۱	۴	۱۳	۴	۷۶۷۰	۳۵۳۵	۱۰۰۷۰	< ۱	۱۱۳۵	۱۱/۲۷	۷۱۰۲/۵	۲۹۶۷/۵
۵	۲	۲	۳	۱۳	۴	۵۴۷۰	۳۵۳۵	۸۹۵۰	< ۱	۵۵	۰/۶۱	۵۴۴۲/۵	۳۵۰۷/۵
۶	۳	۲	۲	۱۰	۶	۶۵۶۰	۷۹۹۰	۱۳۶۰۰	< ۱	۹۵۰	۶/۹۹	۶۰۸۵	۷۵۱۵
۷	۳	۳	۲	۱۲	۶	۶۳۶۰	۹۰۱۵	۱۴۷۰۰	< ۱	۶۷۵	۴/۵۹	۶۰۲۲/۵	۸۶۷۷/۵
۸	۵	۳	۲	۱۵	۶	۸۱۹۵	۹۰۱۵	۱۶۲۴۵	< ۱	۹۶۵	۵/۹۴	۷۷۱۲/۵	۸۵۳۲/۵
۹	۵	۳	۲	۱۰	۶	۵۰۴۵	۸۳۴۰	۱۲۲۹۵	< ۱	۱۰۹۰	۸/۸۷	۴۵۰۰	۷۷۹۵
۱۰	۵	۳	۲	۱۷	۶	۱۱۵۰۵	۱۰۴۰۰	۱۹۹۲۵	< ۱	۱۹۸۰	۹/۹۴	۱۰۵۱۵	۹۴۱۰
۱۱	۵	۳	۲	۱۱	۶	۸۴۹۵	۶۶۵۰	۱۳۶۷۰	< ۱	۱۴۷۵	۱۰/۷۹	۷۷۵۷/۵	۵۹۱۲/۵

جدول ۳. نتایج حاصل از حل مسائل با اندازه‌ی متوسط شبکه.

شماره‌ی مسئله	تعداد گره			تعداد تقاضا	تعداد سرویس	هزینه‌ی جاده	هزینه‌ی ریل	هزینه‌ی متمرکز	زمان حل (ثانیه)	عایدی ائتلاف	صرفه‌جویی (درصد)	تخصیص هزینه	
	جاده	ریلی	چندوجهی									به جاده	به ریل
۱۲	۶	۲	۴	۱۹	۸	۱۲۰۳۰	۱۲۳۰۰	۲۲۴۷۵	< ۱	۱۸۵۵	۸/۲۵	۱۱۱۰۲/۵	۱۱۳۷۲/۵
۱۳	۶	۲	۴	۱۰	۸	۵۸۰۰	۵۲۰۰	۹۹۳۵	< ۱	۱۰۶۵	۱۰/۷۲	۵۲۶۷/۵	۴۶۶۷/۵
۱۴	۸	۲	۴	۱۹	۸	۱۳۳۹۰	۱۲۳۰۰	۲۴۴۳۰	< ۱	۱۲۶۰	۵/۱۶	۱۲۷۶۰	۱۱۶۷۰
۱۵	۸	۲	۴	۱۰	۸	۶۵۴۰	۵۲۰۰	۱۰۷۱۵	< ۱	۱۰۲۵	۹/۵۷	۶۰۲۷/۵	۴۶۸۷/۵
۱۶	۸	۲	۵	۲۰	۸	۱۳۹۳۰	۱۴۱۰۰	۲۶۳۵۵	< ۱	۱۶۷۵	۶/۳۶	۱۳۰۹۲/۵	۱۳۲۶۲/۵
۱۷	۸	۲	۵	۱۰	۸	۶۵۴۰	۵۶۵۰	۱۱۲۶۵	< ۱	۹۲۵	۸/۲۱	۶۰۷۷/۵	۵۱۸۷/۵
۱۸	۹	۲	۵	۲۰	۸	۱۴۴۵۰	۱۴۱۰۰	۲۶۸۷۵	< ۱	۱۶۷۵	۶/۲۳	۱۳۶۱۲/۵	۱۳۲۶۲/۵
۱۹	۹	۲	۵	۱۰	۸	۶۷۳۵	۶۵۵۰	۱۱۴۶۰	< ۱	۱۸۲۵	۱۵/۹۲	۵۸۲۲/۵	۵۶۳۷/۵
۲۰	۱۰	۲	۶	۲۲	۸	۱۴۴۵۰	۱۷۴۰۰	۳۰۳۲۵	< ۱	۱۵۲۵	۵/۰۳	۱۳۶۸۷/۵	۱۶۶۳۷/۵
۲۱	۱۰	۲	۶	۱۵	۸	۶۷۳۵	۸۱۵۰	۱۴۰۶۰	< ۱	۸۲۵	۵/۸۷	۶۳۲۲/۵	۷۷۳۷/۵
۲۲	۱۲	۲	۶	۲۵	۸	۱۸۹۰۵	۱۴۷۰۰	۳۱۷۲۰	< ۱	۱۸۸۵	۵/۹۴	۱۷۹۶۲/۵	۱۳۷۵۷/۵
۲۳	۱۲	۲	۶	۱۲	۸	۱۱۴۵۵	۷۱۵۰	۱۷۴۸۵	< ۱	۱۱۲۰	۶/۴۱	۱۰۸۹۵	۶۵۹۰
۲۴	۱۳	۲	۷	۲۹	۱۰	۱۴۴۹۵	۱۰۰۵۰	۲۲۸۲۵	< ۱	۱۷۲۰	۷/۵۴	۱۳۶۳۵	۹۱۹۰
۲۵	۱۳	۲	۷	۲۹	۱۰	۲۳۲۲۰	۱۹۱۵۰	۳۹۶۸۵	< ۱	۲۶۸۵	۶/۷۷	۲۱۸۷۷/۵	۱۷۸۰۷/۵
۲۶	۱۵	۲	۷	۳۴	۱۰	۳۱۹۹۰	۱۹۹۰۰	۴۸۴۲۰	< ۱	۳۴۷۰	۷/۱۷	۳۰۲۵۵	۱۸۱۶۵
۲۷	۱۵	۲	۷	۱۷	۱۰	۱۳۵۲۵	۱۰۰۰۰	۲۲۰۰۰	< ۱	۱۵۲۵	۶/۹۳	۱۲۷۶۲/۵	۹۲۳۷/۵
۲۸	۱۵	۳	۷	۳۸	۱۹	۳۴۷۰۰	۳۰۰۵۰	۶۱۵۵۵	< ۱	۳۱۹۵	۵/۱۹	۳۳۱۰۲/۵	۲۸۴۵۲/۵
۲۹	۱۵	۳	۷	۳۸	۱۹	۱۵۹۶۰	۱۶۷۰۰	۳۱۵۶۶	< ۱	۱۰۹۴	۳/۴۷	۱۵۴۱۳	۱۶۱۵۳
۳۰	۱۶	۴	۱۰	۴۰	۲۰	۲۷۸۶۰	۲۸۲۰۰	۵۲۷۱۰	< ۱	۳۳۵۰	۶/۳۶	۲۶۱۸۵	۲۶۵۲۵
۳۱	۱۶	۴	۱۰	۲۵	۲۰	۲۰۳۵۵	۱۵۵۵۰	۳۳۱۰۵	< ۱	۲۸۰۰	۸/۴۶	۱۸۹۵۵	۱۴۱۵۰

جدول ۴. اطلاعات مربوط به مسائل با اندازه شبکه‌ی نسبتاً بزرگ.

شماره‌ی مسئله	تعداد گره			تعداد تقاضا	تعداد سرویس	هزینه‌ی جاده	هزینه‌ی ریل	هزینه‌ی متمرکز	زمان حل (ثانیه)	عایدی ائتلاف	صرفه‌جویی (درصد)	تخصیص هزینه	
	جاده	ریلی	چندوجهی									به جاده	به ریل
۳۲	۱۸	۴	۱۰	۴۰	۲۰	۲۸۹۰۰	۲۸۲۰۰	۵۳۷۵۰	< ۱	۳۳۵۰	۶٫۲۳	۲۷۲۲۵	۲۶۵۲۵
۳۳	۱۸	۴	۱۰	۲۵	۲۰	۲۱۰۷۰	۱۵۵۵۰	۳۳۸۲۰	< ۱	۲۸۰۰	۸٫۲۸	۱۹۶۷۰	۱۴۱۵۰
۳۴	۲۰	۴	۱۲	۴۳	۲۰	۲۸۹۰۰	۳۳۵۰۰	۵۹۲۵۰	۲	۳۱۵۰	۵٫۳۲	۲۷۳۲۵	۳۱۹۲۵
۳۵	۲۰	۴	۱۲	۲۶	۲۰	۱۹۰۲۵	۱۸۳۵۰	۳۵۳۴۰	۱	۲۰۳۵	۵٫۷۶	۱۸۰۰۷٫۵	۱۷۳۳۲٫۵
۳۶	۲۴	۴	۱۲	۴۶	۲۰	۳۷۳۷۰	۲۹۹۵۰	۶۳۲۰۰	۲	۴۱۲۰	۶٫۵۲	۳۵۳۱۰	۲۷۸۹۰
۳۷	۲۴	۴	۱۲	۳۲	۲۰	۱۹۰۲۵	۱۸۳۵۰	۳۵۳۴۰	۱	۲۰۳۵	۵٫۷۶	۱۸۰۰۷٫۵	۱۷۳۳۲٫۵
۳۸	۲۶	۴	۱۴	۵۲	۲۶	۴۶۰۰۰	۳۸۸۷۵	۷۹۴۰۵	۴۵	۵۴۷۰	۶٫۸۹	۴۳۲۶۵	۳۶۱۴۰
۳۹	۲۶	۴	۱۴	۳۶	۲۶	۳۲۴۱۰	۲۵۷۲۵	۵۴۰۸۸	۱۸	۴۰۴۷	۷٫۴۸	۳۰۳۸۶٫۵	۲۳۷۰۱٫۵
۴۰	۳۰	۴	۱۴	۵۶	۲۶	۶۲۴۶۰	۲۴۶۷۵	۸۰۰۸۵	۴۳	۷۰۵۰	۸٫۸	۵۸۹۳۵	۲۱۱۵۰
۴۱	۳۰	۴	۱۴	۲۸	۲۶	۲۹۵۸۰	۲۳۰۰۰	۴۹۷۲۰	۳۶	۲۸۶۰	۵٫۷۵	۲۸۱۵۰	۲۱۵۷۰
۴۲	۳۰	۶	۱۴	۸۰	۲۶	۷۶۳۷۵	۶۵۸۲۵	۱۳۲۰۹۰	۸۶	۱۰۱۱۰	۷٫۶۵	۷۱۳۲۰	۶۰۷۷۰
۴۳	۳۰	۶	۱۴	۴۰	۲۶	۳۵۲۲۰	۳۶۰۷۵	۶۷۳۳۰	۵۳	۳۹۶۵	۵٫۸۹	۳۳۲۳۷٫۵	۳۴۰۹۲٫۵
۴۴	۳۶	۴	۱۴	۶۲	۲۶	۷۸۳۱۰	۲۷۳۵۰	۹۴۶۷۰	۱۱۲	۱۰۹۹۰	۱۱٫۶۱	۷۲۸۱۵	۲۱۸۵۵
۴۵	۳۶	۴	۱۴	۲۹	۲۶	۳۴۱۴۵	۱۷۸۰۰	۴۷۹۹۵	۹۱	۳۹۵۰	۸٫۲۳	۳۲۱۷۰	۱۵۸۲۵
۴۶	۳۶	۶	۱۴	۹۰	۲۶	۹۷۹۲۰	۶۶۰۰۰	۱۵۱۶۰۰	۲۰۸	۱۲۳۲۰	۸٫۱۳	۹۱۷۶۰	۵۹۸۴۰
۴۷	۳۶	۶	۱۴	۴۵	۲۶	۴۴۸۹۵	۳۵۸۰۰	۷۶۶۶۵	۲۰۰	۴۰۳۰	۵٫۲۶	۴۲۸۸۰	۳۳۷۸۵
۴۸	۴۰	۴	۱۴	۶۶	۲۶	۸۹۸۷۵	۲۷۳۵۰	۱۰۴۷۶۰	۷۱	۱۲۴۶۵	۱۱٫۹	۸۳۶۴۲٫۵	۲۱۱۱۷٫۵
۴۹	۴۰	۴	۱۴	۳۳	۲۶	۴۰۶۶۰	۱۷۸۰۰	۵۳۳۸۵	۳۶	۵۰۷۵	۹٫۵۱	۳۸۱۲۲٫۵	۱۵۲۶۲٫۵
۵۰	۴۰	۶	۱۴	۹۷	۲۶	۱۱۴۸۹۰	۶۶۰۰۰	۱۶۸۲۰۰	۵۵	۱۲۶۹۰	۷٫۵۴	۱۰۸۵۴۵	۵۹۶۵۵
۵۱	۴۰	۶	۱۴	۴۹	۲۶	۵۳۱۳۰	۳۵۸۰۰	۸۵۰۵۶	۴۵	۳۸۷۴	۴٫۵۵	۵۱۱۹۳	۳۳۸۶۳
۵۲	۴۶	۴	۱۴	۸۰	۲۶	۶۵۸۰۵	۲۷۳۵۰	۸۴۹۶۵	۶۶	۸۱۹۰	۹٫۶۴	۶۱۷۱۰	۲۳۲۵۵
۵۳	۴۶	۴	۱۴	۴۰	۲۶	۲۵۷۸۵	۹۶۵۰	۳۲۸۶۰	۶۵	۲۵۷۵	۷٫۸۴	۲۴۴۹۷٫۵	۸۳۶۲٫۵
۵۴	۴۶	۶	۱۴	۱۰۶	۲۶	۱۳۱۷۰۵	۶۶۰۰۰	۱۸۱۳۶۵	۸۷	۱۶۳۴۰	۹٫۰۱	۱۲۳۵۳۵	۵۷۸۳۰
۵۵	۴۶	۶	۱۴	۵۳	۲۶	۶۰۴۲۰	۳۵۸۰۰	۹۰۱۱۵	۸۰	۶۱۰۵	۶٫۷۷	۵۷۳۶۷٫۵	۳۲۷۴۷٫۵
۵۶	۵۲	۴	۱۴	۸۷	۲۶	۱۳۶۴۷۵	۲۶۹۵۰	۱۴۰۷۰۵	۷۵	۲۲۷۲۰	۱۶٫۱۵	۱۲۵۱۱۵	۱۵۵۹۰
۵۷	۵۲	۴	۱۴	۵۷	۲۶	۶۷۶۳۵	۱۷۵۲۵	۷۳۳۶۵	۱۰۴	۱۱۷۹۵	۱۶٫۰۸	۶۱۷۳۷٫۵	۱۱۶۲۷٫۵
۵۸	۵۲	۶	۱۴	۱۱۳	۲۶	۱۴۴۹۵۵	۶۶۰۰۰	۱۹۳۱۰۰	۷۰	۱۷۸۵۵	۹٫۲۵	۱۳۶۰۲۷٫۵	۵۷۰۷۲٫۵
۵۹	۵۲	۶	۱۴	۵۷	۲۶	۶۹۶۸۰	۳۵۸۰۰	۹۷۴۸۵	۶۵	۷۹۹۵	۸٫۲	۶۵۶۸۲٫۵	۳۱۸۰۲٫۵
۶۰	۵۶	۴	۱۴	۹۲	۲۶	۱۴۴۶۸۰	۲۷۳۵۰	۱۴۹۹۸۵	۱۱۰	۲۲۰۴۵	۱۴٫۷	۱۳۳۶۵۷٫۵	۱۶۳۲۷٫۵
۶۱	۵۶	۴	۱۴	۴۶	۲۶	۷۲۰۱۵	۱۷۸۰۰	۷۸۴۰۵	۸۸	۱۱۴۱۰	۱۴٫۵۵	۶۶۳۱۰	۱۲۰۹۵
۶۲	۵۶	۶	۱۴	۱۱۸	۲۶	۱۵۳۳۲۰	۶۶۰۰۰	۱۹۸۵۸۵	۱۲۷	۲۰۷۳۵	۱۰٫۴۴	۱۴۲۹۵۲٫۵	۵۵۶۳۲٫۵
۶۳	۵۶	۶	۱۴	۵۹	۲۶	۷۴۲۲۰	۳۵۸۰۰	۱۰۰۴۸۵	۱۲۰	۹۵۳۵	۹٫۴۹	۶۹۴۵۲٫۵	۳۱۰۳۲٫۵

جدول ۵. ضریب همبستگی بین میزان صرفه‌جویی و عوامل کلیدی.

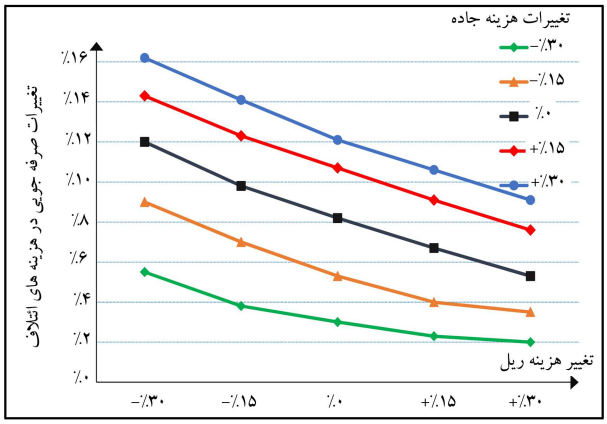
عامل	ضریب همبستگی خطی
تعداد پایانه بخش جاده	۰٫۴۴*
تعداد پایانه بخش ریلی	۰٫۱۵
تعداد پایانه چندوجهی	۰٫۲۸*
تعداد تقاضا	۰٫۳۴*
تعداد سرویس	۰٫۲۸*
هزینه‌ی انفرادی جاده	۰٫۴۵*
هزینه‌ی انفرادی ریل	۰٫۰۹

۲.۴. تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی

به‌منظور بررسی بیشتر تأثیر عوامل (پارامترها) کلیدی هزینه‌ی جاده و ریل به‌عنوان پارامترهای ورودی بر میزان صرفه‌جویی ناشی از همکاری به‌عنوان پارامتر خروجی، به‌کمک روش طراحی آزمایش‌ها[7] طرحی دو عاملی طراحی شد که هر عامل ۵ سطح دارد. این ۵ سطح چنین تنظیم شده‌اند که سطحی پایه برای هزینه‌ی حمل‌ونقل واحد بار هرکدام از حامل‌های ریلی یا جاده‌یی در نظرگرفته شده است. سپس دو سطح افزایشی شامل ۱۵ و ۳۰ درصد افزایش و دو سطح کاهشی شامل ۱۵ و ۳۰ درصد کاهش در هزینه‌های حمل‌ونقل واحد بار نسبت به سطح پایه محاسبه شده است. این آزمایش‌ها شامل مجموعه‌یی از اجراهاست؛ به‌طوری‌که در هر سلول ۱۰ مسئله‌ی آزمایشی حل شده است. مطابق شیوه‌ی معمول طراحی آزمایش‌ها، دو

جدول ۶. تحلیل واریانس طرح دوعاملی.

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات تعدیل شده	آماره F	P- مقدار
عامل هزینه‌ی جاده	۴	۰٫۲۷۰۶۷۲	۰٫۰۶۷۶۶۸	۶۰٫۵۶	<۰٫۰۰۱
عامل هزینه‌ی ریل	۴	۰٫۱۰۹۰۳۲	۰٫۰۲۷۲۵۸	۲۴٫۴	<۰٫۰۰۱
عامل برهم‌کنش (هزینه‌ی جاده × هزینه‌ی ریل)	۱۶	۰٫۰۰۶۱۹۲	۰٫۰۰۰۳۸۷	۰٫۳۵	۰٫۹۹۲
خطا	۲۲۵	۰٫۲۵۱۴	۰٫۰۰۱۱۱۷	۰	۰
کل	۲۴۹	۰٫۶۳۷۲۹			



شکل ۳. تغییرات میانگین صرفه‌جویی هزینه برحسب هزینه.

فرضیه‌ی آماری زیر مورد آزمون قرار می‌گیرد:

- فرضیه‌ی صفر: برابری میانگین همه‌ی گروه‌ها (که به معنی عدم تأثیرگذاری عامل مورد مطالعه است).
- فرضیه‌ی مقابل: عدم برابری میانگین‌ها.

متغیر پاسخ، درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های ائتلاف است. برای تحلیل آزمایش‌های انجام‌گرفته از نرم‌افزار Minitab نسخه‌ی ۱۶ استفاده شده است. تحلیل واریانس به‌صورت جدول ۶ است. همان‌طورکه از جدول تحلیل واریانس برمی‌آید، مقادیر p- مقدار برای هر دو عامل هزینه‌ی ریل و جاده برابر صفر است که این به معنی رد فرض صفر و تأثیرگذاری معنی‌دار این پارامترهاست. همچنین هزینه‌های ریل و جاده دارای اثر متقابل نیستند. توجه شود که یافته‌های این آزمایش‌ها با تحلیل بخش قبل که در آن هزینه‌های انفرادی ریل تأثیر معنی‌داری بر میزان صرفه‌جویی نداشت، تناقضی ندارد. در واقع، در این‌جا میزان تأثیر هزینه‌ی حمل واحد بار در هرکدام از دو شیوه‌ی ریلی و جاده‌یی به‌عنوان عوامل آزمایش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ در حالی‌که در بخش قبل، کل هزینه‌های انفرادی حامل ریلی مورد بحث بود. این مطلب نشان می‌دهد در همکاری بین حامل‌های ریلی و جاده‌یی، کل هزینه‌های انفرادی حامل ریلی برای صرفه‌جویی چندان اهمیت ندارد؛ در حالی‌که هزینه‌ی حمل واحد بار در بخش ریلی برای ثمربخش بودن ائتلاف کلیدی است. می‌توان چنین هم برداشت کرد که حامل جاده‌یی از ائتلاف با بخش ریلی بیشتر منتفع می‌شود. شکل ۳ کیفیت تأثیرگذاری این عوامل را بر میزان صرفه‌جویی نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود به‌عنوان یک روند کلی، به‌ازای سطوح ثابتی از هزینه‌ی جاده با افزایش هزینه‌ی ریل میزان صرفه‌جویی کاهش می‌یابد. به‌بیان‌دیگر، با افزایش هزینه‌ی حمل واحد بار در ریل و کاهش موازی هزینه‌ی حمل واحد بار در بخش جاده، تبادل کالا و جابه‌جایی تقاضا از جاده به ریل کاهش می‌یابد و درنتیجه میزان صرفه‌جویی هزینه در ائتلاف نیز کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در صنعت حمل‌ونقل شرکت‌ها برای طراحی شبکه‌ی خدمت و عملیات حمل‌ونقل ائتلاف‌هایی را تشکیل می‌دهند. آن‌ها دارایی‌های اطلاعاتی و فیزیکی خود را به اشتراک می‌گذارند و از آن برای بهره‌گیری بهتر از ظرفیت شبکه و مسیریابی کالا در شبکه استفاده می‌کنند. شبکه‌های همکارانه به شرکت‌های حمل‌ونقل برای بهبود بهره‌برداری از دارایی، تقسیم هزینه‌های سرمایه، دست‌یابی به اقتصاد به مقیاس و کشف بازارهای جدید کمک می‌کنند.

در تحقیق جاری، با مدنظر قراردادن همکاری بین دو حامل ریلی و جاده‌یی، به‌منظور مسیریابی همکارانه تقاضاهای ادغام‌شده از حاملان یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح فرمول‌بندی شد. در این مدل که در آن مسئله‌ی بلاکینگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در شیوه‌ی ریل نیز لحاظ شده است، مجموعه‌یی از تقاضاهای ادغام‌شده با مبادی و مقاصد مشخص از حاملان ریلی یا جاده با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ائتلاف در طول شبکه مسیریابی می‌شوند. در بحث همکاری میان حاملان مباحث مربوط به تخصیص عادلانه‌ی هزینه‌ها (یا صرفه‌جویی حاصل از همکاری) دارای اهمیت فراوانی هستند. به‌منظور اعمال این تخصیص به هر حامل، ارزش شپلی به‌عنوان مقداری عادلانه پیشنهاد شد و سازوکاری هم برای دست‌یابی به آن طراحی شد. ایده‌ی کلیدی این سازوکار بر اساس مفاهیم پایه‌ی برنامه‌ریزی آرمانی طراحی شد. همچنین برای الزام حاملان به پای‌بندی به دست‌یابی به ارزش شپلی، هر حامل موظف است بابت جابه‌جایی کالای خود توسط دیگر حاملان هزینه‌های جانبی را در برخی از سرویس‌ها پرداخت نماید.

به‌کمک اثبات برخی قضایا و روابط شیوه‌ی حل مدل تخصیص هزینه‌ها تسهیل شد و از فرم برنامه‌ریزی غیر خطی به فرم یک برنامه خطی تبدیل شد که حل آن در مقیاس‌های بزرگ نیز میسر است. طیف متنوعی از مسائل آزمایشی برای اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه‌شده طراحی و حل شد و نتایج آن مورد بحث قرارگرفت. به‌عنوان یک دستاورد کلیدی می‌توان به صرفه‌جویی چشم‌گیر ناشی از همکاری حاملان ریلی و جاده‌یی اشاره کرد. به‌علاوه، به‌منظور بررسی تأثیرگذاری پارامترهای هزینه‌ی جابه‌جایی واحد بار در دو شیوه‌ی ریل و جاده بر صرفه‌جویی ناشی از همکاری، بر اساس مفاهیم طراحی آزمایش‌ها تحلیل‌هایی صورت گرفت که نحوه‌ی تأثیرگذاری این عوامل را روشن‌تر کرد. به‌طور خلاصه، نشان داده شد که با افزایش هزینه‌ها در شیوه‌ی جاده یا کاهش هزینه‌ها در شیوه‌ی ریل همکاری حاملان ریلی و جاده‌یی از جذابیت بیشتری برخوردار است و در این شرایط میل به همکاری افزایش می‌یابد.

یکی از اولین نقاط مورد توجه برای تعمیم این بحث توجه به بعد زمان است. به‌عنوان پیشنهادی برای ادامه‌ی تحقیق، لحاظ‌کردن پنجره‌های زمانی برای سفارش‌ها یا سرویس‌های ارائه‌شده می‌تواند در نزدیک کردن مسئله به دنیای واقعی تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر، اگر بتوان مسئله را از بعد صرفاً مکانی به یک شبکه‌ی مکان ـ زمان انتقال داد، آنگاه بسیاری از جنبه‌های عملیاتی حمل‌ونقل ریل و جاده در نظر گرفته خواهد شد. همچنین بررسی نوع و میزان همکاری در حاملان جاده و ریل از دیگر گزینه‌های قابل بررسی در تحقیقات آینده است. به‌عبارت دیگر، آیا همکاری کامل یا به اشتراک‌گذاری همه‌ی تقاضاها همیشه بهترین گزینه است یا اینکه حاملان باید با توجه به معیارهای مختلف فقط بخشی از تقاضاها را به اشتراک بگذارند. یکی دیگر از جنبه‌های مناسب برای تحقیقات آتی، درنظرگرفتن شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل، داشتن بیش از دو حامل در ائتلاف، طرح مباحث مربوط به انتخاب شیوه و به‌دست‌آوردن بهترین ترکیب شیوه در ائتلاف‌هاست.

پانوشت‌ها

1. door-to-door
2. vertical cooperation
3. auction-based mechanisms
4. pickup and delivery problem with time window (PDPTW)
5. multi-depot
6. core
7. design of experiments (DOE)

منابع (References)

1. *Reformation of the Consumption Pattern in Transport Sector*, Tehran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agricluture, Commision of Transport, Transit and Custom Affairs (2009).
2. Kuo, A. and Miller-Hooks E. "Developing responsive rail services through collaboration", *Transp. Res. Part B Methodol.*, **46**(3), pp. 424-439 (2012).
3. Simchi-Levi, D., *Designing and Managing the Supply Chain*, Mcgraw-Hill College (2005).
4. Agarwal, R., Ergun, Ö., Houghtalen, L. and Ozener, O.O. "Collaboration in cargo transportation", in *Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise*, **30**, Springer, pp. 373-409 (2009).
5. Ergun, O., Kuyzu, G. and Savelsbergh, M. "Reducing truckload transportation costs through collaboration", *Transp. Sci.*, **41**(2), pp. 206-221 (2007).
6. Theys, C., Dullaert, W. and Notteboom, T. "Analyzing cooperative networks in intermodal transportation: A game-theoretic approach", in Nectar Logistics and Freight Cluster Meeting, Delft, The Netherlands (2008).
7. Niérat, P. "Market area of rail-truck terminals: Pertinence of the spatial theory", *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, **31**(2), pp. 109-127 (1997).
8. Lehoux, N., Audy, J.F., D'amours, S. and Rönnqvist, M. "Issues and experiences in logistics collaboration", *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, **307**, pp. 69-76 (2009).
9. Cruijssen, F. and Salomon, M. "Empirical study: Order sharing between transportation companies may result in cost reductions between 5 to 15 percent", CentER Discussion Paper, Tilburg Tilburg University (2004).
10. Krajewska, M.A. and Kopfer, H. "Collaborating freight forwarding enterprises", *OR Spectr.*, **28**(3), pp. 301-317 (2006).
11. Cruijssen, F., Bräysy, O., Dullaert, W., Fleuren, H. and Salomon, M. "Joint route planning under varying market conditions", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **37**(4), pp. 287-304 (2007).
12. Erera, A.L., Morales, J.C. and Savelsbergh, M. "Global intermodal tank container management for the chemical industry", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, **41**(6), SPEC. ISS., pp. 551-566 (2005).
13. Krajewska, M.A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S. and Zaccour G. "Horizontal cooperation among freight carriers: Request allocation and profit sharing", *Journal of the Operational Research Society*, **59**(11), pp. 1483-1491 (2008).
14. Dahl, S. and Derigs, U. "Cooperative planning in express carrier networks - An empirical study on the effectiveness of a real-time decision support system", *Decis. Support Syst.*, **51**(3), pp. 620-626 (2011).
15. Liu, R., Jiang, Z., Fung, R.Y.K., Chen, F. and Liu, X. "Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration", *Comput. Oper. Res.*, **37**(5), pp. 950-959 (2010).
16. Bailey, E., Unnikrishnan, A. and Lin, D.-Y. "Models for minimizing backhaul costs through freight collaboration", *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, (2224), pp. 51-60 (2011).
17. Song, J. and Regan, A.C. "An auction based collaborative carrier network", Univ. Calif. Transp. Cent. (2003).
18. Ahuja, R.K., Cunha, C.B. and Şahin, G. "Network models in railroad planning and scheduling", Emerging Theory, Methods, and Applications, INFORMS, pp. 54-101, (2005).
19. Wieberneit, N. "Service network design for freight transportation: A review", *OR spectrum*, **30**(1), pp. 77-112 (2008).
20. Peters, H., *Game Theory: A Multi-Leveled Approach*, 2nd Edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2015).