ارائه یک مدل بهینه برای تخصیص بار در حمل‌ونقل چندوجهی «ریلی و جاده‌ای» با رویکرد استواری

مقاله علمی – پژوهشی

پژمان صالحی*، دانش آموخته دکترا، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند، ایران
مهران خلج، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند، ایران
داود جعفری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، پرند، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: pejmansalehi.metro@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰- پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵
صفحه ۱۳۴-۱۱۷

چکیده

یکی از اهداف مهم صنعت حمل‌ونقل ایران بر اساس سند چشم‌انداز حمل و نقل ریلی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت بهینه منابع انرژی است که بر این اساس لازم است در سال ۲۰۲۹ تا حدود ۳۵ درصد حمل‌ونقل بار در کشور از طریق شبکه ریلی انجام پذیرد. در این خصوص استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی امری بدیهی و مفید به نظر می‌رسد. در این راستا ترویج حمل‌ونقل ریلی به عنوان یک شیوه سبز در مقابل روش های سبز مانند حمل‌ونقل جاده‌ای بیش از هر چیز دیگر، مستلزم ارزیابی و ارائه راهکارهای مؤثر برای بهینه سازی است. لذا در این تحقیق کوشیده شده است یک مدل ترکیبی برای ارزیابی مُدهای مختلف حمل‌ونقل ارائه شود و از این طریق جریان‌های حمل‌ونقل بار در شبکه‌ی ریلی بررسی شود. از این رو در تحقیق حاضر به ارائه یک مدل بهینه سازی تصادفی برای ارزیابی شیوه های حمل و نقل بار پرداخته شده به طوری‌که در آن ضرایب متغیرها از یک انعطاف‌پذیری نسبی برای بهینه‌سازی برخوردار است. لذا برای نیل به هدف استواری پس از فرموله نمودن اولیه که از قطعیت نسبی برخوردار است، بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح به تدوین یک مدل استوار و مقایسه با الگوهای غیر استوار پرداخته‌شده است. چالش‌های برنامه‌ریزی استوار، در یک فضای چندوجهی با لحاظ تنوع تسهیلات حمل‌ونقل بار در وجه‌های جاده‌ای و ریلی، مستلزم در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مترتب بر تابع هدف است که در این تحقیق تلاش شده از طریق تعامل میان انواع جریان‌های شبکه ریلی ارزیابی مناسبی از مدل با توجه به هزینه تسهیلات حمل‌ونقل جاده‌ای–ریلی و ظرفیت شبکه ریلی فراهم شود. ازاین‌رو یک الگوریتم تقریبی برای تدقیق و تبیین آلترناتیوهای قطعی در یک‌زمان محاسباتی معقول موردبررسی قرارگرفته است. مدل‌های استوار و غیر استوار نیز در این تحقیق بر شبکه ریلی کشور تمرکز داشته و کوشیده شده از طریق آزمون کاربردهای مدل ابزاری مناسب و مفیدی برای تحلیل و پاسخ مناسب به تقاضای شرکت‌های ترانزیت بار در شرایط رقابت با بخش جاده‌ای ارائه گردد.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل ریلی، برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح، بهینه‌سازی استوار، قطارهای باری

۱-مقدمه

برای کاهش اثرات ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن و کنترل تغییرات اقلیمی، لازم است سیاست‌های اتخاذ گردد که در آن حمل‌ونقل پاک نقش مؤثرتری را ایفا نماید. بااین‌وجود روند جهانی‌شدن و افزایش تقاضا برای جابجایی بار و مسافر در سرتاسر جهان سبب شده است که ترافیک در سطح جاده‌ها به آستانه‌ای غیر پایدار از منظر زیست‌محیطی برسد. گزارش دپارتمان حمل‌ونقل اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که هدف‌گذاری‌های این اتحادیه به برجسته نمودن ده هدف برای رسیدن به سیستم‌های حمل‌ونقل اثربخش از منظرهای مالی و اداری مشخص‌شده است که بتواند به خلق مزیت رقابتی

بینجامد. هدف از تدوین نظامنامه برای نیل به مقصود کاهش ۶۰ درصدی آلودگی ناشی از گازهای گلخانه‌ای ایجادشده توسط خودروها و سایر اشکال وسایل نقلیه است. یکی دیگر از این اهداف آن است که بتوان تا سال ۲۰۳۰ تا حدود ۳۰ درصد از حمل‌ونقل جاده‌ای در مسافت‌های بیش از ۳۰۰ کیلومتر توسط سایر اشکال حمل‌ونقل پاک نظیر حمل‌ونقل ریلی یا حمل‌ونقل دریایی جایگزین گردد و این عدد تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۵۰ درصد نیز برسد. حمل‌ونقل بار در شبکه ریلی مستلزم مشارکت ذی‌نفعان و سهامداران مختلف است. این مهم به‌ویژه برای شرکت‌های حمل‌ونقل بار، مدیران زیرساخت (که بعضاً مالکیت زیرساخت‌های ریلی را نیز در اختیاردارند و منابع را به آن تخصیص داده و هزینه‌ها را مدیریت می‌نمایند)؛ نهادهای بالادستی در سطح ملی (که بعضاً وظیفه ایجاد دسترسی عادلانه به شبکه ریلی را برای تمامی شرکت‌های بخش ریل بر عهده‌دارند و توسط اتحادیه اروپا تدقیق شده است؛) و نیز سایر نهادها مانند متولیان امنیت ملی و نیز بهره‌برداران که بر اساس نیازهایشان شرکت‌های ریلی را انتخاب می‌نمایند بیشتر نمود می‌یابد. در این بخش سیاست‌ها و اهداف اتحادیه اروپا برای زمینه‌سازی انتقال بار از بخش جاده‌ای به ریل بر اساس شاخص‌های اتحادیه اروپا، تضمین دسترسی عادلانه، ارتقای ایمنی و سطح امنیت و عملیاتی نمودن خدمات بیشتر نمود می‌یابد. درنتیجه از ابتدای ژانویه سال ۲۰۰۷ شرکت‌های یکپارچه پیشین که درگیر در شبکه ریلی بودند به چندین بخش دیگر تفکیک شدند که برخی از آن‌ها عبارت بودند از مدیران سطح ملی مرتبط با زیرساخت‌های بخش ریلی، شرکت‌های درگیر در بخش راه‌آهن و بازار حمل‌ونقل ریلی که برای زمینه‌سازی رقابت این شرکت‌ها به‌طور کامل باز شد. مشاهده می‌شود که شبکه ریلی همواره مستقیماً با شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای و راه‌ها در رقابت بوده است.شرکت‌های باری دائماً برای تصمیم‌گیری در خصوص اینکه کدام‌یک از مُدهای حمل‌ونقل را انتخاب کنند، عمدتاً مواردی نظیر قیمت، تعداد دفعات استفاده، زمان حمل‌ونقل، قابلیت اطمینان و کیفیت ارائه خدمات حمل‌ونقلی به مشتری را موردبررسی قرار می‌دهند. اخیراً نیز، آلودگی ناشی از گازهای گلخانه‌ای که متأثر از نوع سوخت مورداستفاده در وسیله نقلیه است نیز به این موارد افزوده‌شده است. طی سال‌های اخیر، چندین مدل حمل‌ونقل محور در بخش‌های ملی، بین‌المللی و محلی ارائه و ارتقا داده‌شده‌اند تا درک ذی‌نفعان ریلی از تأثیرات مرتبط با سیاست‌های حمل‌ونقل بر شرکت‌های درگیر در حوزه حمل‌ونقل، کشتی‌های باری، مشتریان و ارسال‌کنندگان بار و نیز حفظ محیط‌زیست افزایش دهند. این مدل‌ها بر رویکردها و روش‌های مختلفی که در این حوزه فعال هستند،و به بررسی مقوله پیچیدگی‌ها و نیازهای مُدهای مختلف حمل‌ونقل می‌پردازند، نظیر گنجاندن مدل‌های مختلف حمل‌ونقل، تغییرات احتمالی و فصلی بودن عرضه و تقاضای کالاها در این بخش اشاره دارد. این مقاله می‌کوشد به ارائه‌ی یک مدل ترکیبی برای تخصیص حمل‌ونقل چندحالته با لحاظ ترافیک و تفکیک مُد در مسیرهای ریلی – جاده‌ای بپردازد و این مهم نیز لازم است در سناریوهای آتی و همچنین حالت‌هایی که یک مدل تفکیکی دوحالته که بر اساس امکانات تصادفی موجود است را ارائه می‌کند که برخی از ضرایب آن‌ها ممکن است گستره غیرقابل‌قبولی از انعطاف‌پذیری را از خود نشان دهد. در فرایند تخصیص برای جریان‌های حمل‌ونقل ریلی مؤلفه‌های مختلفی در محیط دارای وسایل نقلیه متفاوت و چندگانه لازم است مدنظر قرار گیرند، که از آن جمله می‌توان به محدودیت‌های صریح در حین تعامل و برهم‌کنش میان انواع مختلف جریان‌ها حمل‌ونقل در شبکه ریلی اشاره نمود که امکان ارزیابی مناسب از انواع هزینه‌های مرتبط با حامل‌های مختلف و ظرفیت شبکه را مقدور می‌سازد. نمونه استواری از این مدل مفهومی بر اساس شیوه‌ای که توسط کوستر و همکاران (۲۰۱۳) توسعه داده شد، فرمول‌بندی شده است تا تفکیک‌های میان مُدهای مختلف حمل‌ونقل برای بدترین حالات ممکن در نظر گرفته شود. لذا در مطالعه حاضر کوشیده شده است الگوریتمی بر اساس تقریب بیرونی ارائه‌شده توسط دوران و گراسمن (۱۹۸۶) برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطّی در یک مدت‌زمان محاسباتی قابل‌قبول،توسعه داده شود. در بخش دوم به تبیین روش‌های نوین در حوزه موضوع مقاله می‌پردازیم. در بخش سوم این مقاله مدل موردنظر به ارائه یک مدل ترکیبی برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح می‌پردازد و در بخش چهارم به ارائه یک نمونه موردی برای مدل بررسی عدم قطعیت با استفاده از تبیین ضرایب ناکارآمدی می‌پردازد. بخش پنجم الگوریتم پیشنهادی را برای حل مسئله و شیوه‌های بهینه‌سازی آن می‌پردازد.

۲- پیشینه تحقیق

تا مدت‌ها فرایند حمل‌ونقل بار در شبکه ریلی مانند حمل‌ونقل مسافر مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. در سطح استراتژیک، مدل‌های تخصیص در حوزه ترافیک چندوجهی یا (چندحالته) در آغاز توسط گولات و همکاران (۱۹۹۰) و کراینیک و همکاران (۱۹۹۰) ارائه گردید که مدل‌هایی ساختارمندی را برای توزیع جریان‌های بار با استفاده از شیوه‌های تعاملی مختلف بیان می‌نماید. مدل ارائه‌شده توسط فرناندز و همکاران (۲۰۰٤) به تحلیل خروجی‌های در بخش شبکه‌های ریلی و به‌طور ویژه حمل‌ونقل باری می‌پردازد. در این مدل به‌صورت یک نامعادله چند متغیره فرمول‌بندی شده که در آن اولویت با توزیع حمل‌ونقل کالاها، شیوه‌های تخصیص ماشین‌های ریلی خالی، به انضمام تخصیص شبکه ریلی به کالاهای که باید جابه‌جا شوند می‌باشد. در این مدل نمایش بسیار مفصّلی از عملیات حمل‌ونقل ریلی در حوزه بار و کالا گنجانیده شده است. در مطالعات اخیر برای مدل بهینه‌سازی ارائه‌شده توسط مایا و دوکوتو (۲۰۱٤) محققان به توجه به مدل تخصیص استراتژیک ترافیک برای شبکه‌های ماکرو با سطح بالای انباشتگی و تردد منحصراً به طراحی ابزار کمکی و پشتیبان برای ترافیک حمل‌ونقل بار و کالا پرداخته‌شده است. این مدل مُدهای مختلف حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی را موردبررسی می‌نماید و دو نوع خاص از حمل کالاها را مدنظر قرار می‌دهد: نخست بارهای جابجا شده در درون شبکه ریلی که معمولاً توسط کانتینر جابه‌جا می‌شوند و دوم بارهای معمولی که درون‌شبکه‌ای به شمار نمی‌رود. در این مطالعه هدف آنالیز اثراتی است که به تشکیل ارتباطات جدید شبکه‌ای و یا بهبود در برخی از ارتباطات شبکه‌ای موجود در بخش حمل‌ونقل ریلی می‌پردازد. در این راستا مدلی که در مطالعه روزل و کودینا (۲۰۲۰) ارائه‌شده است خروجی‌های نسبتاً کم‌هزینه‌ای را بر روی شبکه حمل‌ونقل ریلی برای بهبود ظرفیت شبکه با افزودن سیستم‌های جدید انسداد/کنترل را در یک موقعیت خاص و مشخص را بررسی می‌کند. همچنین، این مدل اثراتی که نتایج و خروجی‌های مدل به‌صورت مشترک بر روی عملیات ریلی و مدیریت زیرساخت‌های حمل‌ونقل برجای می‌گذارد، را نیز آنالیز می‌کند.

کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در ارزیابی سیاست‌ها و اقدامات صورت گرفته توسط بهره‌برداران صنعت حمل‌ونقل ریلی و سایر مراجع ذی‌ربط این حوزه قابل‌ملاحظه می‌باشد. در مطالعه کومی و روزاتی (۲۰۱۳) شیوه‌ای برای ارزیابی سیاست‌های چند مُدی ریلی – جاده‌ای مانند خدمات یا مشوق‌های جدید برای حمل‌ونقل در مسافت‌های طولانی ارائه‌شده است. محققان در این مقاله نمونه‌های مختلفی را بر اساس اهداف و برنامه‌های ملّی کشور ایتالیا در سیستم حمل‌ونقل باری برای مسافت‌های طولانی به منصه آزمایش گذارده‌اند. همچنین در مطالعه آلباته و همکاران (۲۰۱۸)، محققان به ارائه یک مدل تصادفی و تفکیکی برای زنجیره حمل‌ونقل و انتخاب اندازه تسهیلات حمل بار پرداخته‌اند که قابل‌مقایسه با مدل‌های ملّی کشور سوئد بر اساس داده‌های مستقل ولی امّا می‌باشد. جزئیات آنالیز زنجیره حمل‌ونقل باری ارائه‌شده توسط جانسن و همکاران (۲۰۱۹) نیز اهمیت مدل‌های حمل‌ونقل بار را برای اتحادیه اروپا برجسته‌تر می‌نماید. مدل‌های حمل‌ونقل بار که در مطالعات فریتش و کوهن (۲۰۰۷) ارائه گردیده است نگرش اقتصادی خوبی درباره انواع مدل‌های حمل‌ونقل باری به دست داده‌شده است. در این مطالعه محققان ۵ مدل تجاری کلیدی را مورد تحلیل قرارداده‌اند و اینکه این مدل‌ها چگونه نسبت به فهرستی از شاخص‌ها و معیارهایی که یک مدل ایدئال حمل‌ونقل باری لازم است مدنظر قرار دهد واکنش نشان داده و رفتار می‌نمایند. در بخش نتایج این پژوهش، محققان پیشنهاد کرده‌اند که لازم است بررسی‌های بیشتری برای یافتن برخی از جنبه‌های بنیادین اما مبهم این مدل‌ها صورت گیرد. همچنین باید به‌صورت هم‌زمان به قطارهای حمل بار و ارسال و توزیع‌کنندگان بار توجه شود تا ضرورت یکپارچه‌سازی مدل‌های تعادلی و محاسبه پذیر با مدل‌های شبکه‌ای برای لحاظ نمودن محدودیت‌های ناوگان حمل‌ونقل و ظرفیت آن در بارگیری در مسیر بازگشت از مقصد به سمت مبدأ، لحاظ نمودن رقابت‌های ناعادلانه و نیز در نظر گرفتن روایی داده‌ها در فرایند پردازش و نیز مدیریت درآمدهای حاصل از حمل‌ونقل بار از آن جمله است. مدل‌های تقاضای حمل‌ونقل باری در سطوح بین‌المللی لازم است جریان‌های باری میان کشورهای مختلف و همچنین جریان‌های داخلی حمل بار موجود در این کشورها نظیر داده‌های منابع مختلف که اغلب برای طرف‌های ثالث غیرقابل‌دسترس هستند، مورد مداقه قرار دهند. بنابراین یکی از

چالش‌های اساسی در ساخت مدل‌های حمل‌ونقل بار، کیفیت داده‌های مرتبط با آناست (فریتش و کوهن، ۲۰۰۷؛ دی یانگ و همکاران ۲۰۱۶؛ میرسمان و همکاران، ۲۰۱۶).در مطالعه آرنسیبیا، فووالرو و همکاران (۲۰۱۵)، محققان به ارائه مدل‌های گسسته برای آنالیز عوامل کلیدی و اصلی که در سیستم‌های حمل‌ونقل باری منجر به انتخاب حالتی (یک مُد) در جریان‌های ترانزیت میان اسپانیا و اروپا می‌شود، پرداخته‌اند. این محققان از یک شیوه پیمایش ایالتی استفاده نموده‌اند که جامعه موردمطالعه را محدود به شرکت‌های حمل‌ونقل (گیرنده یا فرستنده بار) کرده است. هزینه‌های حمل‌ونقل بار، مدت‌زمان ترانزیت بار، تعداد دفعات ارسال و نیز احتمال بروز تأخیر و یا رخداد هرگونه تأخیر از فاکتورهای تعیین‌کننده مرتبط با امکان به‌کارگیری آلترناتیوهای جایگزین بوده است. یک روش دیگر برای محاسبه پارامترهای مورداستفاده در یک مدل انتخاب‌گر از میان مُدهای مختلف، بهره‌گیری از داده‌های موجود در بانک‌های اطلاعاتی عمومی یا خصوصی و نیز آمارهای رسمی منتشرشده توسط مراجع معتبر حمل‌ونقل است (کریسالی و همکاران ۲۰۱۳؛ هوانگ و اویانگ ۲۰۱۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵) است که معمولاً داده‌هایی پیوسته را در حوزه موردمطالعه فراهم می‌نمایند.

مطالعات نشان می‌دهد مدل‌های برنامه‌ریزی حمل‌ونقل باری از تخصیص و تفکیک مُدهای مختلف و مجزایی استفاده نموده‌اند، در مُد حمل‌ونقل مسافری بین‌شهری، پیش‌تر مدل‌های تخصیص ترافیک و تفکیک مُدهای ترکیبی توسعه داده‌شده بودند (عبدل‌آل و لبلانک، ۱۹۷۹؛ فلوریان، ۱۹۷۷؛ فلوریان و نیوین ۱۹۷۸). مدل‌های ترکیبی مستمراً با سناریوهای مختلف در سیستم حمل‌ونقل شهری تطبیق داده‌شده‌اند. ازاین‌رو مشاهده می‌شود که طی اخیراً در مطالعه‌ای یک مدل تخصیص و تفکیک ترکیبی متناسب با میزان و سطح تقاضای سفر مشخص برای حمل‌ونقل از طریق اتوبوس‌های درون‌شهری و سفرهای ریلی در شهرهایی که با یکدیگر مبادلات اقتصادی دارند، پیشنهادشده است (لی و همکاران ۲۰۰۹). همچنین، در مقالات هو و همکاران (۲۰۲۰) به تبیین یک مدل تخصیص و تفکیک ترکیبی با در نظر گرفتن تسهیلات پارکینگ‌ها و امکان سوار و پیاده شدن پرداخته‌شده است. در مُد حمل‌ونقل باری، روایی مدل‌ها با استفاده از مراحل جداگانه‌ای نظیر آنچه در مطالعه جورکوین (۲۰۱۶) انجام‌شده موردبررسی قرارگرفته است. در تحقیق جورکوین (۲۰۱۶) محقق روشی را برای حالتی که منابع داده‌ای و اطلاعاتی ناهمگون و محدود هستند تطبیق و توسعه داده‌اند که به‌طور ویژه برای پروژه‌های مرتبط با شبکه‌ی بین‌المللی ترانزیت اروپا مناسب است. بااین‌وجود، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد مدل مشابهی برای مُد حمل‌ونقل باری ارائه یا به‌صورت تطبیقی توسعه داده نشده است. لذا در این مطالعه مدل پیشنهادی محققان می‌تواند به‌منظور انتخاب و بررسی شاخص‌ها و معیارهای انتخاب مُدهای حمل‌ونقل مختلف مفید باشد یا دست‌کم بتواند نگرش همسانی را برای انتخاب بهتر در اختیار بهره‌برداران و ذی‌ربطان بار قرار دهد. مطالعه حاضر درعین‌حال بهترین مسیرها را برای حمل‌ونقل باری در شبکه ترانزیت ریلی برجسته می‌سازد. بنابراین، مدل ارائه‌شده در این مطالعه می‌تواند ابزاری مناسب برای طراحی و بهبود خدمات شرکت‌های حمل‌ونقل ریلی باری باشد.

۳- اهداف پژوهش

این مطالعه می‌کوشد مدل تخصیص و تفکیک چندوجهی و ترکیبی را برای شبکه ریلی در مقابل شبکه حمل‌ونقل باری جاده‌ای در حالت‌هایی که چندین بهره‌بردار مشارکت دارند، توسعه دهد. لذا هدف اصلی بدست‌آوردن نقاط تفکیک و سازگار در شبکه ریلی – جاده‌ای که بر آن اساس بتوان مدلی مستقل بر اساس تسهیلات موجود ارائه نمود تا بتواند تغییرات سیستم‌های ریلی را مورد ارزیابی قرار دهد. مدل ارائه‌شده با محدودیت‌هایی به شرح زیر روبروست که نیل به هدف را تا حدودی دشوار می‌سازد و از قابلیت پیش‌بینی آن می‌کاهد:

-کیفیت محدود داده‌های ورودی مدل؛ این داده‌ها ممکن است از منابع ناهمگون و یا مقادیری پیوسته نظیر آمارهای رسمی و یا بانک اطلاعاتی تکمیل‌شده یا داده‌های پیوسته حاصل‌شده باشد. درنتیجه، تمامی یا بخشی از ضرایب مدل ممکن است عدم قطعیت قابل‌ملاحظه‌ای را از خود نشان دهند که علت آن استفاده بسیار کم از قطارهای باری در برخی مسیرها برای برخی کشورهاست.

-داده‌های مطالعه با استفاده از پیمایش‌های منابع راه‌آهن‌های دولتی به‌دست‌آمده‌اند لذا یکی از محدودیت‌های ممکن آن است که انجام اولویت‌بندی به سهولت صورت نمی‌گیرد. بااین‌وجود با توجه به نقایص و محدودیت‌های فنی در انجام

اقدامات آتی برای شبکه ریلی،ضرورت این اولویت‌بندی بیشتر نمایان می‌شود.

در خصوص نقش پیش‌بینی‌کنندگی مدل نیز این احتمال وجود دارد که استواری مدل با تعداد عناصر معدودی از تسهیلات شبکه ریلی که از مقادیر اسمی‌شان به‌صورت هم‌زمان انحراف داشته باشند و سبب بروز تضاد شوند، با اشکال مواجه گردد. بااین‌حال مدل پیشنهادی قاطعانه رقابت میان شرکت‌های فعال در این حوزه را لحاظ نکرده، امّا برخی شرکت‌هایی که ذی‌نفع هستند را نیز مستثنا می‌نماید.

شرکت‌های حمل‌ونقل باری ریلی بسته به میزان سوددهی‌شان و با توجه به محدودیت‌های موجود در زیرساخت‌ها و موجودی بار، به مشتریانشان ارائه خدمات دهند. علاوه بر این، مدل پیشنهادی مشتمل بر مجموعه‌ای از محدودیت‌ها است که لازم است در تعامل با انواع جریان‌های مختلف شبکه‌ی ریلی (نظیر جریان‌های مرتبط با انواع محصولات، جریان‌های واگن‌ها به‌صورت پر یا خالی، جریان‌های قطارهای تشکیل‌شده) و خصوصیات آن‌ها موردبررسی و ملاحظه قرار گیرد.

تبیین مدل

معمولاً در غالب پژوهش‌ها شبکه ریلی با بهره‌گیری از یک گراف غیرمستقیم $G = (N, E)$ مدل‌سازی می‌شود در چنین مدل‌هایی خطوط ریلی به‌صورت یال‌های شبکه $(e \in E)$ در نمودار گرافی نشان داده می‌شوند در این نمودار انطباقی مستقیم میان مسیرها و یال‌های گراف و نیز پایانه‌ها و ایستگاه‌ها به‌عنوان روس گراف و نقاط انتقالی و تقاطعی وجود دارد که این مهم به‌عنوان نود (رأس) شناخته‌شده و به‌صورت $(i \in N)$ نشان داده می‌شود.

با توجه به توپولوژی شبکه ریلی که در آن خطوط ریلی به‌صورت دو جهتی هستند، شبکه ریلی معادل به‌صورت یک گراف مستقیم با عضوهای$G=(N, A)$ نمایش داده می‌شود که در آن هر یال$e \in E$با دو اتصال $a = (i, j)$ و حالت متقارن آن$a = (i, j)$– در مجموعه Aلحاظ می‌گردد. در اینجا فرض بر آن است که هر کمان از گراف در طول خود دارای مشخصات فیزیکی همگون و متجانسی می‌باشد، بدان معنا که در مفروضات چنین در نظر گرفته می‌شود که قطار با سرعت ثابت روی هر یک از یال‌ها مسیر خود را طی می‌نماید.

قطارها در چنین مدل شبکه‌ای از نقاط (گره‌های) مبدأ به گره‌های مقصد در حال سیر هستند که در این مطالعه آن‌ها را با عنوان پایانه نام‌گذاری می‌نماییم. همچنین فرض می‌شود که تقاضا برای محصولات در افق زمانی موردمطالعه ،معین است و با مجموعه‌ای از زوج گره‌های ممکن از مبدأ – مقصد (جفت‌های OD) در شبکه ریلی متناسب است. بنابراین هنگامی‌که جریان‌های چندگانه یا چندوجهی برای محصولات تشریح می‌شود از نقاط چندگانه به‌صورت $\omega = (\delta(\omega), \sigma(\omega), p(\omega))$ استفاده می‌نماییم که $\delta(\omega)$ و $\sigma(\omega)$ و $p(\omega)$ به ترتیب مبدأ، مقصد و نوع محصول قابل‌حمل در یک نقطه سه‌گانه ω می‌باشد. از طریق رابطهW مجموعه تمامی این گره‌های سه مؤلفه‌ای تعیین خواهند شد.

مقدار تقاضای برای محصولات از نوع $p(\omega)$به‌منظور حمل از مبدأ $\delta(\omega)$ به مقصد $\sigma(\omega)$در مدت‌زمان مشخص τ (نظیر یک بازه زمانی یک‌ساله) به‌صورت $\chi\omega$ نشان داده می‌شود. برای یک زوج معینOD، مجموعه یال‌ها (مسیرها)یی که در آن شبکه ریلی مبدأ $\delta(\omega)$ را به گره مقصد $\sigma(\omega)$ متصل می‌نماید و به‌صورت $R(\omega)$ نشان داده می‌شود.

مجموعه‌ی شامل تمامی مسیرهای ممکن به‌صورت $R = U_{\omega \in w} R(\omega)$خواهد بود.

مسیرهای بین گره‌ها (پایانه‌ها)ی مبدأ و مقصد نیز به‌صورت مسیرهای t نمایش داده می‌شوند. هر مسیرt توسط یک شرکت باربری o در مجموعه‌ای از شرکت‌ها یا ترانزیت‌های خدمات باری ریلی بکار گرفته می‌شود. هر جفت ODنیز حداقل توسط یک مسیر t به‌صورت مشترک به هم متصل می‌گردد.

فرض کنید $hr\omega$ تقاضای کل موردنیاز در بازه زمانی τو یا جریان انتقال‌یافته توسط قطار باری برای زوجOD باشد و محصول ω با استفاده از مسیر tبا مقدارrمفروض باشد در این صورت فرض کنید $(h)^w = \sum_{r \in R(\omega)}^{\omega} h_r^{\omega}$باشد و $\check{h}\omega$ تقاضای کل موردنیاز جابه‌جاشده برای زوجOD به ترتیب توسط قطار و کامیون برای یک محصول مدنظر باشد. در این صورت متغیّرهای رابطه را می‌توان در بردارهای جریان h_r^{ω} و $\tilde{h}_r^{\omega}$خوشه‌بندی نمود. برای سهولت در اینجا T نشان‌دهنده ترانهاده است.

فرض کنید که u_r^{ω} و $\tilde{u}_r^{\omega}$به ترتیب نشان‌دهنده هزینه‌های تعمیم‌یافته برای حالت‌های بدون استفاده در زوجOD باشد و واحد محصول از نوع ω باشند که توسط

کامیون یا با قطار با استفاده از مسیرt در $r \in$ R(ω)جابه‌جاشده است. برای تبیین مدل اولیه، متغیّرهای باقیمانده (جریان حمل و یا واگن‌های قطار، لوکوموتیوها، جریان قطارهای بین یال‌ها (مسیرهای ریلی) در بخش‌های بعدی با جزئیات بیشتری موردبحث قرار می‌گیرد و چنین فرض می‌شود که یک بردار حرکتی نسبی از متغیرهای y که در دامنه خاصی از Y قرار دارد، تشکیل‌شده است.

متغیرهای h، $\tilde{h}$ و y به یکدیگر با استفاده از محدودیت‌های مرتبط متصل شده‌اند که ارتباط آن‌ها باهم تابع قاعده زیر است:

$$g_l(h,y) \le 0, l = 1, \dots, m$$

با لحاظ تمامی مفروضات فوق مدل موردنظر در این مطالعه به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\min_{h,\tilde{h},y} F(h,\tilde{h}) = \sum\nolimits_{\omega \in w} \left[\sum_{r \in R(\omega)} U_r^\omega h_r^\omega + \int_0^{\tilde{h}^\omega} G_\omega^{-1}(s)\, ds \right] \quad (۱)$$

s.t

$$\sum_{r \in R(\omega)} h_r^\omega + h^\omega = x^\omega \; \omega \in w \quad (1a)$$

$$l = 1, \dots, m g_l(h,y) \le 0 y \in Y \quad (1b)$$

$$h_r^\omega \ge 0 \quad (1c)$$

$$r \in R(\omega), \omega \in w \quad (1d)$$

$$\tilde{h}^\omega \ge 0 \omega \in w \quad (1e)$$

همان‌طور که در معادله (1a) مشاهده می‌شود کل تقاضای بار موردنیاز (χ^ω) باید برابر با مجموع تقاضای در کل سیستم ریلی (جمله اول) به‌اضافه تقاضای منتسب به سامانه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای (توسط کامیون‌ها) (جمله دوم محدودیت‌ها) باشد. در تابع هدف معادله یا رابطه شماره (۱)، $G_\omega^{-1}(.)$ تابع تقاضای معکوس است که به‌صورت زیر در پژوهش‌های قبلی آمده است (شفی، ۲۰۰۱).

$$G_\omega^{-1}(\tilde{h}_\omega) = \tilde{u}^\omega + log\left(\frac{\tilde{h}^\omega}{x^\omega - \tilde{h}^\omega}\right) \quad (۱)$$

با قراردادن رابطه فوق در معادله محاسباتی تابع هدف (رابطه شماره ۱) می‌توان به معادله زیر رسید:

$$F(h,\tilde{h}) = \sum\nolimits_{\omega \in w} \left[(x^\omega - \tilde{h}^\omega)\, log \frac{x^\omega - \tilde{h}^\omega}{e^{-u^\omega}} + \tilde{h}^\omega \log \frac{\tilde{h}^\omega}{e^{-\tilde{u}^\omega}} - x^\omega\, log\, x^\omega \right] \quad (۲)$$

در معادله فوق($-u^\omega$) و ($-\tilde{u}^\omega$) را می‌توان به ترتیب به‌صورت احتمالات ترجیحی انتخاب شبکه ریلی و شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای (کامیونی) بیان کرد و رابطه زیر هزینه متوسط تعمیم‌یافته برای حمل‌ونقل از طریق ریل در حالتی که $\omega \in w$است را نشان می‌دهد:

$$\left(\sum_{r \in R(\omega)} h_r^\omega\right) / u^\omega = \left(\sum_{r \in R(\omega)} u_r^\omega h_r^\omega\right)$$

بنابراین تابع هدف را در مسئله فوق می‌توان به‌صورت یک آنتروپی منفی نسبی تفسیر نمود و مدل را به‌گونه‌ای تغییر داد که در پی یافتن نزدیک‌ترین حالت‌های ممکن به عدم استفاده از ظرفیت‌ها موجود در شبکه ریلی باری باشد و لذا پارامترهای$\tilde{u}^\omega$ و u_r^ωدر مدل مزبور ناظر بر کارکردهای تصادفی یا RUM می‌باشند. بنابراین چنانچه فرض شودϑ^ω، ξ_r^ω و η^ω به ترتیب ضرایب لاگرانژ مرتبط با محدودیت‌های (1a)، (1d) و (1e) می‌باشد. همچنین

پارامتر γ_r^ω حاصل جمع ضرایب لاگرانژ ς_l از محدودیت‌های مسئله (۱) به‌صورت ادامه می‌باشد.

$$\gamma_r^\omega = \sum_{gl}(h,y) = 0, \zeta_l \frac{\partial gl}{\partial h_r^\omega}$$

با در نظر گرفتن اینکه ضریب لاگرانژی η^ωلازم است متناهی و محدود باشد، می‌توان معادله زیر را به دست آورد:

$$\vartheta^\omega = \min_{r\in R(\omega)} \{U_r^\omega + \gamma_r^\omega\}.\ \omega \in w \qquad (۳)$$

با لحاظ معادلات فوق مدل تفکیک چندوجهی زیر به‌صورت یک مدل لگاریتمی به دست می‌آید:

$$\frac{\tilde{h}^\omega}{x^\omega} = \{1 + exp(\tilde{u}^\omega - \vartheta^\omega)\}^{-1} \qquad (٤)$$

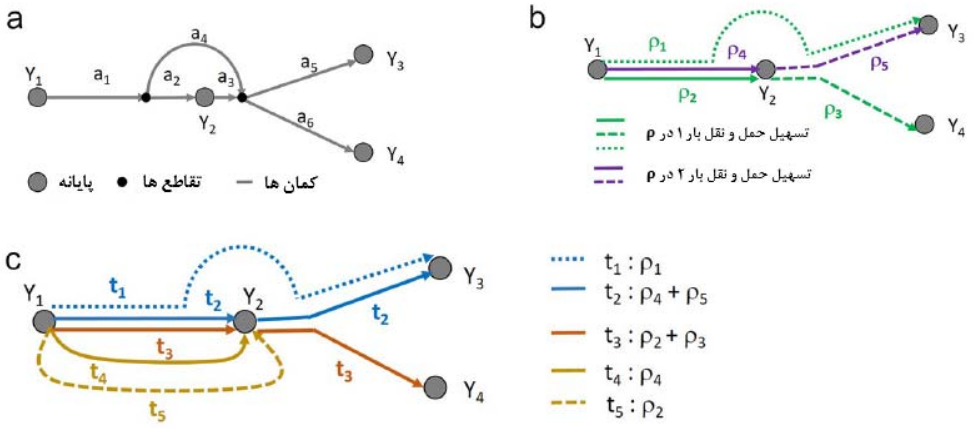
در اینجا لازم به ذکر است که در معادله شبه لگاریتمی شماره چهار، درصد محصولاتی که با شبکه جاده‌ای انتقال‌یافته و امکان جایگزینی با مُد ریلی هستند برابر با ϑ^ωمی‌باشد، بدان معنا که میزان استفاده از ظرفیت شبکه ریلی که در ابتدا u_r^ωبوده است با استفاده از ضرایب γ_r^ωکه متناظر با محدودیت‌های معادله (1b) می‌باشد، اصلاح گردید و می‌تواند بر پتانسیل‌های صریح و ضمنی شبکه ریلی تأثیرگذار باشد. در بخش بعدی شکل تابعی محدودیت (1b) نشان داده می‌شود که به‌صورت خطّی نمایش داده می‌شود.لحاظ کردن محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت‌های جانبی قطار در مدل‌های تعادل، در برخی مطالعات نظیر پژوهش لارسون و پاتریکسون (۲۰۰۱) نیز دیده می‌شود که در آن ضرایب لاگرانژی مربوطه به‌صورت تأخیرها و یا هزینه‌های اضافی تحلیل‌شده‌اند. در مطالعه حاضر با لحاظ نمودن محدودیت‌های جانبی نظیر (1b) در حین ارزیابی‌های نسبی برای وجوه مختلف حمل‌ونقل بار نسبت‌های مُدها را به‌عنوان یک اقدام اصلاحی برای کاربردهای ارزیابی‌شده در پژوهش‌های قبلی در مؤلفه‌ی u_r^ωتبیین می‌کنیم که ممکن است خروجی حاصل از یک مدل تصادفی (RUM) باشد که محدودیت‌های مرتبط با جریان‌های قطار باری و کالا،ممکن است به‌صورت مضرب درستی در خلال محاسبه مدل RUM مدنظر قرار نگرفته باشد.

بیان اجزای عناصر مدل پژوهش

در برخی گره‌ها از شبکه ریلی، واگن‌های قطار را می‌توان مجدداً برای قطارهای خروجی از دپوها در آرایش قطارهای ورودی مورداستفاده قرارداد. از این گره‌ها در مطالعه حاضر به‌عنوان پایانه‌های دریافت و اعزام قطارهای باری یاد می‌شود. علاوه بر این، چنین فرض می‌شود که امکانات مناسبی برای بارگیری از قطارهای ورودی و بارگذاری مجدد آن در دیگر واگن‌های ریلی که قادر به استفاده از مسیرهای خروجی نیز هستند، وجود دارد. تطابق‌پذیری اندازه‌های مسیر، آرایش این تجهیزات و امکانات را مشخص می‌سازد. در اینجا پایانه‌ها نوع خاصی از بارانداز‌ها تلقی می‌شوند که در آن مقدار درستی از محصولات از «فضای بیرون» وارد و یا از آن خارج می‌شوند. بنابراین قطارهای جدید باید تشکیل‌شده و یا بالعکس شماری از واگن‌های خالی پایانه را ترک نمایند. پایانه‌ها معمولاً شامل یک نقطه اتصال در درون وجوه حمل‌ونقل (جاده‌ای – ریلی) هستند. در این مجموعه فضای بارانداز‌ها (یاردها) توسط Y نشان داده می‌شوند، درحالی‌که مجموعه پایانه‌های ریلی به‌صورت $T \subseteq Y$ است و نهایتاً آنکه گره‌های اتصال/ و بازگشت شامل نقاطی از شبکه هستند که در آن چندین مسیر در یکدیگر ادغام‌شده و دو قطار که در جهت مخالف سیر می‌کنند می‌توانند در نقطه‌ای از مسیر به هم برسند و همچنین قطارها می‌توانند از یکدیگر سبقت بگیرند.

با دانستن اینکه حمل‌ونقل بار در شبکه ریلی برای بسیاری از کشورها یک بازار رقابتی مقررات زدایی شده، است لازم به نظر می‌رسد که اثر رقابت چندین شرکت خدمات باربری را در شرایط دارای حدود احتمالی از مقرراتی موردبررسی قرارداد. هر شرکت باربری $O \in \mathcal{O}$ دارای مجموعه‌ای از قطارهای حمل‌ونقل بار است که در خطوطی تشکیل می‌شوند. هر خط می‌تواند در دو جهت سیر نماید و نیز می‌تواند به دو خط جهت‌دار تفکیک شود. هر خط جهت‌دار

به‌صورت یک مسیر ρ نام‌گذاری می‌شود و با نماد ρنیز نشان داده می‌شود و دارای یک بارانداز (یارد) به‌عنوان مبدأ و یک بارانداز (یارد) دیگر به‌عنوان مقصد است. هر مسیر ρخود از زیرمجموعه‌ای از کمان‌های تشکیل‌شده که می‌تواند مجموعه Aرا تشکیل داده و به‌صورت پیوسته هر دونقطه مبدأ و مقصد را به هم متصل نماید. چون می‌توان مسیرهای مختلفی برای اتصال دو گره بارگیری به یکدیگر در نظر داشت لذا لازم است از قبل زیرمجموعه‌ای از کمان‌هایی که هر مسیر ρ را تشکیل می‌دهند به‌صورت دقیق تبیین نمود. مجموعه مسیر ρ برای هر قطار در مسیر ریلی یا کامیون در وجه جاده‌ای به‌صورت $\Gamma(O)$ نشان داده می‌شود و لذا $\Gamma = \mathrm{U}\Gamma(o)$ یک رابطه گسسته از تمامی تسهیلات حمل بار در مسیرهای ρ می‌باشد. همچنین، فرض می‌شود که $Y(o) \subseteq Y$زیرمجموعه تمام پایانه‌هایی باشد که مبدأ یا مقصد حداقل یک مسیر ρ مربوط به تسهیلات حمل‌ونقل $O \in \mathcal{O}$را پوشش می‌دهد. با فرض آنکه یک کمان مانند $a \in A$متناظر با یک تسهیل حمل‌ونقل مانند $O \in \mathcal{O}$ باشد، و با فرض آنکه $\Gamma\left(a\,,0\right)$زیرمجموعه‌ای از $\rho \in \Gamma(0)$و شامل کمان a باشد. شکل 1a با مثال عناصر پایه یک شبکه را نشان می‌دهد، کمان‌ها، یاردها و تقاطع‌ها نیز به‌خوبی مشخص است همچنین در شکل 1b دو تسهیل حمل‌ونقل بار (واگن) و مسیرهای ρ مرتبط با آن نشان داده‌شده است.



تصویر ۱. نمایش اِلمان های شبکه ریلی حمل بار

فرض کنید R(o) مجموعه تمامی مسیرهای t بین پایانه‌های پیشنهادی توسط قطارo باشد. با فرض آنکه یک مسیر t که در آن $r \in R(o)$ باشد، می‌توان این مسیر را به‌صورت مسیری که توسط زیرمجموعه‌ای از مسیرهای ρ که تحت مالکیت تسهیل حمل‌ونقلoبا شرط $\rho \in \Gamma(0)$تشکیل‌شده در نظر گرفت، که پایانه مبدأ، مسیر t را به پایانه مقصد مسیر t به‌صورت پیوسته متصل می‌کند (با لحاظ آنکه دارای ایستگاه‌های متفاوت باشند و تعریف آن توسط پایانه‌ها (یاردها)می‌باشد که بخشی از هر مسیر ρرا تشکیل می‌دهند)، در این صورت شکل 1c مسیرهای مختلف t را که پایانه‌های Y_1، Y_2، Y_3 و Y_4 را به همدیگر متصل می‌کنند، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هر دو مسیرt_1 و t_2 پایانه‌هایY_1 و Y_2را به همدیگر متصل می‌نمایند امّا مسیر t_2 یک ایستگاه در پایانهY_2 دارد. همچنین R(ρ) مجموعه‌ای از مسیرهای t است که شاملρ به‌عنوان بخشی از وجوه ترکیبی حمل‌ونقل می‌باشد که فرض می‌شود مسیرهای ρ بین پایانه‌های دارای مشخصه‌های همگون و متجانس و منطبق با انواع قطارهای درحرکت تنظیم‌شده باشد و لذا عمدتاً تفاوت‌هایی در اندازه‌های طول مسیر یا مقیاس‌های باربری دارند که درنتیجه، فرض می‌شود که مجموعه‌ای از مقیاس‌ها در مسیر ρ در

بخش‌های مختلف مسیر، تشکیل‌دهنده مسیر ρ همگون و متجانس باشند. این مشخصه الزاماً برای مسیرهای t بین پایانه‌ها صدق نمی‌کند. یک پایانه با ویژگی $i \in Y, \Gamma_i^+, \Gamma_i^-$ را به‌صورت مفروض در نظر بگیرید که به ترتیب نشان‌دهنده زیرمجموعه مسیرهای ρبرای قطارهای باری ورودی و خروجی به گرهiباشند و $\Gamma_{i(0)}^+, \Gamma_{i(0)}^-$ نیز به همین صورت نام‌گذاری شود با این تفاوت که محدود به مسیرهای ρ که تحت مالکیت تسهیلات حمل‌ونقل باروهستند، باشد. فرض کنید v مجموعه‌ای از انواع مختلف واگن‌های باری در شبکه ریلی باشد. در این صورت فرض می‌شود که هر نوعی از محصولات را می‌توان با فقط یک زیرمجموعه از انواع واگن‌های ریلی جابه‌جا نمود. برای یک مسیر ρ مشخص، تابع $\nu(\rho)$ نشان‌دهنده مجموعه انواع واگن‌های ریلی $v \in \nu$ است که در مسیر ρ مشغول به فعالیت هستند. واگن‌های باری شبکه ریلی از یک نوع واگن ممکن است گاهی با توجه به‌ضرورت در بیش از یک مقیاس از مسیر در جریان باشند. لذا $\Gamma(v,0)$ زیرمجموعه‌ی مسیرهای ρ را نشان می‌دهد که با واگن خاصی از شبکه ریلی نظیر نوع ν سازگار باشد و توسط تسهیلات حمل‌ونقل بار $O \in \mathcal{O}$ فعالیت می‌نماید. این در حالی است که $\Gamma_i^+(v,0)$، $\Gamma_i^-(v,0) \subseteq \Gamma\left(v\ ،\ o\right)$ نیز به طریق مشابه نشان‌دهنده‌ی زیرمجموعه‌های متناظر با مسیرهای حرکت قطارند با این تفاوت محدود به فقط مسیرهای ρ هستند که به ترتیب در $i \in Y$نمود می‌یابند و یا به $i \in Y$ برخورد می‌نمایند. شبکه حمل‌ونقل ریلی باری از انواع لوکوموتیوها با مشخصات متفاوتی از منظر حداکثر سرعت، حداکثر مقدار بار و یا نسبت‌های سرعت به مقدار بار استفاده می‌نماید. همچنین همانند واگن‌های باری ریلی، تمامی لوکوموتیوها نیز با تمامی انواع مسیرها سازگاری کاملی ندارند. به‌عنوان نمونه فرض کنید K_M مجموعه تمامی انواع لوکوموتیوهای باری است و $k_M(\rho) \subseteq k_M$، در این صورت $k \in K_M$ زیرمجموعه تمامی مسیرهایی از ρ است که با لوکوموتیو مدنظر سازگار است و درنهایت آنکه، شبکه حمل‌ونقل بار جاده‌ای که خود حالتی از حمل‌ونقل بار جایگزین با ریل است توسط یال‌ها (مسیرها)ی جهت‌داری که مستقیماً زوج‌های مبدأ و مقصد را به یکدیگر متصل می‌سازد، نمایش داده می‌شوند.

روابط میان جریان‌های حمل‌ونقل ریلی با شرکت‌های ترانزیت بار

شرکت‌های ترانزیت باربری نیاز دارند که محصولاتشان از مبدأ به سمت مقصد ارسال شود. برای این منظور دو گزینه در پیش رودارند؛ نخست آنکه از قطارهای حمل‌ونقل بار در شبکه ریلی که خدمات حمل‌ونقل بار ارائه می‌دهند، استفاده نمایند و دوم آنکه از تسهیلات مختلف خدمات حمل‌ونقل بار جاده‌ای بهره گیرند. در این بخش کوشیده می‌شود به‌تفصیل به شرایط حمل‌ونقل قطارهای ریلی پرداخته شود تا بتوان تقاضای ریلی را با شیوه‌ای که کالاها توسط قطار جابه‌جا می‌شود به همدیگر مرتبط نمود.

در سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی، محصولات توسط واگن‌های ریلی جابه‌جا می‌شوند. مقدار باری که با قطار جابه‌جا می‌شود می‌تواند توسط حداکثر ظرفیت بار هر واگن ریلی محدود شود. بنابراین فرض کنید $\alpha^{v,P(\omega)}$ پارامتر حداکثر بار به ازای هر واحد محصول p(ω) در واگن حمل بار در شبکه ریلی از نوع ν و $f_\rho^{v,\omega}$متغیری باشد که نشان‌دهنده واگن‌های ریلی بارگیری شده با محصول p(ω) از نوع ν باشد که در مسیر ρ فعالیت می‌نماید و از مبدأ δ(ω) به مقصد σ(ω) درحرکت است. در این معادله شماره (۵) نشان‌دهنده محصولات از نوع p(ω) است که با حمل‌ونقل ریلی از مبدأ δ(ω) به مقصد σ(ω) در مسیر مشخص ρ و توسط شرکت خدمات باربری $O \in \mathcal{O}$ جابه‌جا می‌شوند. طرف چپ نامعادله نیز نشان‌دهنده‌ی مقدار باری است که باید کمتر یا مساوی با مجموع حداکثر ظرفیت بارگذاری موجود برای واگن‌های باری از نوع νباشد که با مسیر ρسازگار می‌باشد.

$$\sum_{r \in R(\rho)} h_r^\omega \leq \sum_{v \in \nu(\rho)} \alpha^{v,P(\omega)} f_\rho^{v,\omega} \quad \forall O \in \mathcal{O}, \forall \rho \in \Gamma_{(0)},\ \forall \omega \in w$$

شرایط واگن‌های حمل بار برای جابه‌جا کردن محصولات و کالاها، عمدتاً به ویژگی‌های فیزیکی سیستم حمل‌ونقل ریلی بستگی دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از مشخصات فنی مسیر ریلی، طول و وزن قطارها، و محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت مسیرها و پایانه‌های ریلی، خدمات باربری که توسط شرکت‌های ترانزیتی ارائه می‌شود و بر روی انتخاب این شرکت‌ها نیز تأثیر می‌گذارد و غیره ...

معادلات زیر مشخصات سامانه‌های حمل‌ونقل باری در شبکه ریلی و الزامات مرتبط با جریان قطارها در شرکت‌های باربری را نشان می‌دهند. ابتدا معادله (٦) را که کل جریان F_{ρ}^{v}را برای واگن‌های شبکه ریلی از نوع v که در مسیر ρ فعالیت می‌کنند؛ را تبیین می‌نماید. در این مطالعه متغیّر $f_{\rho}^{v,\emptyset}$نشان‌دهنده‌ی واگن‌های ریلی خالی است. بنابراین چنانچه واگن‌های ریلی از نوع vبه هر علتی در مسیر ρ نباشند و یا آنکه با مؤلفه‌های فنی این مسیرها سازگاری نداشته باشند. در حالت ایدئال، هدف آن است که واگن‌های ریلی در کل شبکه در حال سیر و حرکت نباشند و پایانه‌ها نیز هیچ‌گونه واگن ریلی بلااستفاده و رها نداشته باشند. در هر پایانه و برای هر شرکت باربری، جریان ورودی واگن‌های باری ریلی از نوع v که متعلق به شرکت o می‌باشد باید مساوی با جریان خروجی آن نوع از واگن باری باشد. همچنین، نقاط تقاطع یا بازگشت لازم باید در مقاطع ورودی و خروجی از توازن برخوردار باشند.

$$F_{\rho}^{v}=\begin{cases} f_{\rho}^{v,\emptyset}+\sum_{\omega\in w} f_{\rho}^{v,\omega} & \forall v\in V,\forall O\in \mathcal{O},\forall \rho\in \Gamma_{(o,v)} \\ 0 & v \text{ and } \rho \text{ incompatibles} \end{cases} \qquad (۶)$$

معادله شماره (۷) تعادل گره‌ها را برای هر یک از واگن‌های شبکه‌ی ریلی و به ازای هر شرکت باربری به‌صورت زیر تبیین می‌نماید:

$$\sum_{\rho\in\Gamma_i^{-}(o,v)} F_{\rho}^{v}=\sum_{\rho\in\Gamma_i^{+}(o,v)} F_{\rho}^{v} \qquad \forall i\in N,\forall v\in V,\forall O\in\mathcal{O} \qquad (۷)$$

بنابراین فرض کنیدm_{ρ}^{k}ناظر بر جریان قطارها از نوع k در مسیر ρ باشد، حداکثر طول قطاری که در مسیر ρ حرکت می‌کند عمدتاً باید توسط حداکثر طول قطعه‌ای که قطار مجاز به استفاده از آن در امتداد مسیر ریلی است برای قطعاتی که بخشی از خطوط اصلی می‌باشند و همچنین توسط حداکثر طول جابه‌جایی و نیز شانت‌هایی که هر قطار باری در پایانه‌ها انجام می‌دهد و در مبدأ یا مقصد خط صورت می‌گیرد، محدود می‌شود. لذا فرض کنیدl^{v} طول واگن‌های قطارهای باری در شبکه ریلی از نوع v باشد و لذا$\bar{L}_{\rho}$ حداکثر طول قطاری است که با توجه به محدودیت قطعات ریلی مجاز به استفاده از مسیر ρ می‌باشد.

معادله شماره (۸) محدودیت‌های جریان قطارها را بر اساس متوسط طول هر قطار بیان می‌نماید. مجموع طول تمامی واگن‌هایی که در مسیر ρ تردد می‌کنند باید کوچک‌تر یا مساوی با مجموع حاصل‌ضرب طول تمامی قطارهایی باشد که در خطوط ریلی تردد دارند در حداکثر طول مجاز هر خط که به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\forall O\in\mathcal{O},\quad \forall \rho\in\Gamma_{(0)} \sum_{v\in v(\rho)} l^{v} f_{\rho}^{v}\le \bar{L}_{\rho}\sum_{k\in k_M} m_{\rho}^{k} \qquad (۸)$$

همچنین محدودیت‌هایی نیز برای حداکثر تناژ قطارهای باری با توجه به محدودیت‌های خط وجود دارد، که در این حالت خاص عبارتند از: ویژگی‌های لوکوموتیو (رابطه بین سرعت و مقدار بار)، ویژگی‌های فنی مسیر حرکتی از منظر قوس و شیب و فراز یا حداکثر وزن نرمال قطار (با لحاظ محدودیت بار محور). بنابراین فرض کنید کهα^{v}وزن خالص واگن‌های باری از نوع v باشند و$\alpha^{v,p(\omega)}$مقدار میانگین وزن برای محصول $p(\omega)$ باشد که قرار است با واگن‌های باری از نوع v جابه‌جا می‌شوند و $\bar{\alpha}_{\rho}^{k}$ حداکثر وزن مجاز برای لوکوموتیوهای از نوع k باشد که در مسیر ρ تردد می‌کنند، باشد. بنابراین معادله شماره ۹ محدودیت‌های جریان‌های قطار بر اساس تناژ میانگین

را نشان می‌دهد که در این صورت مجموع وزن تمامی واگن‌هایی که در مسیر ρ تردد می‌کنند باید کمتر یا مساوی با حاصل‌ضرب مجموع وزن تمامی قطارهایی باشد که در خط تردد دارند در حداکثر تناژ مجاز خط که به‌صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\sum_{v\in v(\rho)}(\alpha v_{\rho}^{f^{v}}+\sum_{\omega}\alpha^{v\cdot p(\omega)}f_{\rho}^{v,\omega})\leq\sum_{k\in k_{M}}\bar{\alpha}_{\rho}^{k}m_{\rho}^{k}\qquad\forall\rho\in\Gamma_{(0)},\forall O\in\mathcal{O}\tag{۹}$$

مدیران زیرساخت‌های شبکه ریلی مسئول تخصیص ظرفیت زیرساخت‌های شبکه به تقاضاهای شرکت‌های ترانزیتی هستند و این شرکت‌ها نیز به‌نوبه خود آن را در میان گزینه‌های موجود به گزینه‌هایی تخصیص می‌دهند که برای آن‌ها سودآور باشد. این گزینه‌ها توسط حداکثر تعداد قطارهای یک شرکت که می‌توانند در هر خط تردد نمایند، محدود می‌شود. لذا در اینجا، Np نشان‌دهنده‌ی تخصیص ظرفیت یک شرکت در مسیر ρ است که محدودیتی را بر روی حداکثر تعداد قطارهایی که در یک خط تردد کنند؛ اعمال می‌نماید که این محدودیت در معادله (۱۰) آمده است.

$$\sum_{k\in k_{M}}m_{\rho}^{k}\ \geq\ N_{P}\qquad\forall\rho\in\Gamma_{(0)},\forall O\in\mathcal{O}\tag{۱۰}$$

به همین منوال، محدودیت مرتبط با ظرفیت مسیرها یعنی Na، حداکثر تعداد قطارهایی است که می‌توانند در مسیر a تردد نمایند که توسط معادله (۱۱) و به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\sum_{O\in\mathcal{O}}\sum_{\rho\in\Gamma(0.a)}\sum_{k\in k_{M}}m_{\rho}^{k}\ \geq\ N_{P}\qquad\forall a\in A\tag{۱۱}$$

یک واگن باری در شبکه ریلی ممکن است بخشی از تسهیلات حمل‌ونقل‌های مختلفی باشد که در طول یک سفر بکار گرفته می‌شوند. بنابراین اگر در مسیر t پایانه‌های میانی مستقل از پایانه‌های مبدأ و مقصد وجود داشته باشند، در این صورت هر گره (ایستگاه) اضافی دیگر برای ترکیب و یا تفکیک قطارها می‌تواند سبب تأخیر و یا افزایش مدت‌زمان سفر و نیز به‌تبع آن افزایش هزینه کل سفر شود. بنابراین، بسیار اهمیت دارد که بدانیم در کجای مسیر ریلی قطارها به هم متصل می‌شوند و یا در کجاهای مسیر از هم تفکیک می‌شوند. فرض کنید که متغیر $\theta_{i',i}^{k,o}$ تعداد قطارهای باری با لکوموتیو از نوع k باشد که توسط شرکت o بکار گرفته می‌شود و در پایانه $i'\in Y_{(o)}$ به هم متصل می‌شوند و در یارد $i\in Y(o),i'\neq i$ از هم تفکیک می‌شوند. همچنین، فرض کنید که $m_{\rho,i}^{k}$ متغیر مربوط به تعداد قطارهای از نوع k باشد که در مسیر ρ توسط شرکت o به سمت پایانه‌ی مقصد i تردد می‌کند. در این صورت تعداد کل قطارهای از نوع k که در مسیر ρ تردد می‌کنند یعنی m_{ρ}^{k},ρ به‌صورت معادله (۱۲) نشان داده می‌شود.

$$m_{\rho}^{k}=\sum_{i\in Y(o)}m_{\rho,i}^{k}\qquad\forall k\in k_{M},\forall\rho\in\Gamma_{(0)},\forall O\in\mathcal{O}\tag{۱۲}$$

در این صورت و با توجه به رابطه میان $m_{\rho,i}^{k}$ و $\theta_{i',i}^{k,o}$ می‌توان معادله شماره (۱۳) را به‌صورت زیر تبیین نمود:

$$\sum_{\rho\in\Gamma_{i'}^{+}(o)}m_{\rho,i}^{k}\ -\sum_{\rho\in\Gamma_{i'}^{-}(o)}m_{\rho,i}^{k}=\theta_{i',i}^{k,o}\forall k\in k_{M},\forall i,i'\in Y_{(o)},i'\neq i,\forall O\in\mathcal{O}\tag{۱۳}$$

محدودیت بعدی در رابطه شماره (١٤) به بیان جریان کل ورودی و خروجی قطارهایی می‌پردازد که در پایانه i می‌توانند به همدیگر متصل و یا از هم تفکیک گردند بر اساس حداکثر ظرفیت پایانه‌ها $i \in Y$ ازنظر تعداد قطارها (پارامتر $\widetilde{N}_i$) به‌صورت رابطه شماره ١٤ نشان داده می‌شود:

$$\sum_{O\in\mathcal{O}}\sum_{i'\in Y_{(o)}}\sum_{k\in k_M}\theta_{i',i}^{k,o} \le \widetilde{N}_i \ , \ \sum_{O\in\mathcal{O}}\sum_{i'\in Y_{(o)}}\sum_{k\in k_M}\theta_{i',i}^{k,o} \le \widetilde{N}_i \quad \forall i \in Y \qquad (١٤)$$

با توجه به هزینه‌های نسبتاً بالای زیرساخت‌های ریلی، شرکت‌های ترانزیت باربری می‌کوشند که تعداد واگن‌ها و لوکوموتیوهای موردنیازشان را طوری تنظیم نمایند که بهره‌وری در بالاترین سطح خود قرار داشته باشد.تخمینی بر اساس قانون لیتل (۲۰۰۱) برای تعیین حد پایینی برای تعداد واگن‌ها و لوکوموتیوهای موردنیاز یک شرکت ترانزیتی برای ارائه خدمات حمل بار از آن جمله است که کوشیده بهینه‌سازی هزینه‌های حمل بار از طریق تخصیص متناسب ظرفیت به بار بپردازد. در این صورت فرض کنید $\overline{\mathcal{T}}$پارامتر مرتبط با مدت‌زمان مؤثری است که یک قطار باری در مدت‌زمان τدر مسیر حرکت می‌کند. به‌عنوان‌مثال چنانچهτبازه زمانی متناظر با یک سال باشد که بر اساس واحد ساعت سنجیده می‌شود$\overline{\mathcal{T}}$ تعداد ساعت‌های کاری مؤثر برای هر قطار باری به شمار می‌رود. این محاسبه بر اساس قانون «لیتل» ممکن است به‌طور خاص برای وقتی‌که درخواست ارسال بار به شرکت‌ها از الگوهای منظمی تبعیت می‌نماید، بسیار مناسب به نظر می‌رسد. اثر الگوهای نامنظم درخواست برای ارسال بار را می‌توان با کاهش مقدار پارامتر $\overline{\mathcal{T}}$و اعمال فاکتورهای متناظر با اوج تقاضا در الگوهای محاسباتی وارد نمود. پارامتر $t\rho$نیز مدت‌زمان متوسط حرکت یک قطار در خط ρ با در نظر گرفتن زمان‌های توقف است، در این صورت$t\rho$ را می‌توان از نسبت میانگین مدت‌زمان به وزن هر نوع خاص از لوکوموتیو به‌اضافه مدت‌زمان بافر و زمان انتظار برای ورود قطار باری به پایانه‌ی مرتبط با رسیدن آن به پایانه مقصد یا خروج از پایانه‌ی مبدأ محاسبه نمود. در اینجا متغیّر $\lambda^{v,o}$ عبارت است از حداقل تعداد واگن‌های ریلی از نوع v متعلق به شرکت o که مشغول به خدمات‌رسانی در شبکه ریلی هستند. بر اساس قانون «لیتل»، اولین نامعادله در رابطه شماره (١٥) نشان می‌دهد که متوسط تعداد واگن‌های ریلی موردنیاز برای انجام خدمات باربری شرکت‌های ترانزیتی برابر با حاصل‌ضرب مجموع تعداد واگن‌هایی که در یک خط تردد می‌کنند در میانگین زمان صرف شده در آن خط؛ که نامعادله دوم حد پایین تعداد واگن‌های ریلی از نوع v برای شرکت o را نشان می‌دهد که توسط پارامتر$L^{v,o}$مشخص می‌شود.

$$\frac{1}{\overline{\mathcal{T}}}\sum_{\rho\in\Gamma_{(o)}} t_\rho F_\rho^v \le \lambda^{v,o} \le L^{v,o} \qquad \forall v \in V, \forall O \in \mathcal{O} \qquad (١٤)$$

معادله شماره (١٦) درواقع همان معادله شماره (١٥) برای لوکوموتیوهاست که در آن پارامتر$\hat{L}^{k,o}$حداکثر تعداد لوکوموتیوهای از نوع k متعلق به شرکت o می‌باشد.

$$\frac{1}{\overline{\mathcal{T}}}\sum_{\rho\in\Gamma_{(o)}} t_\rho\, m_\rho^k \le \hat{L}^{k,o} \forall k \in k_M, \forall O \in \mathcal{O}$$

(١٥)

٤- یافته‌های محاسباتی پژوهش

در این مطالعه مدل پژوهش با استفاده از نرم‌افزار پایتون پیاده‌سازی شد و جواب‌ها از طریق نرم‌افزار CPLEX بهینه‌سازی شدند. تست های موردنیاز با استفاده از یک سیستم کامپیوتری با توان پردازشی ٥٦٤٥ شرکت اینتل و با فرکانس ٢,٤ گیگاهرتز و حافظه ٤ گیگابایت رَم اجرا گردید. تحلیل یافته‌ها نتایج در R انجام شد. آزمون‌ها نیز با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده در شبکه حمل‌ونقل خارجی کشور انجام گردید. تصویر شماره ٢ شماتیک خطوط این شبکه را که آزمون‌ها بر روی آن‌ها انجام گردید را نشان می‌دهد که از کرمانشاه و اهواز در غرب و جنوب غربی تا تهران و ساری در مرکز و

شمال، و از مشهد و بندرعباس گرفته تا تبریز و سرخس در شمال و شمال غرب گسترش دارد. این شبکه ریلی دارای ۱۴۰۰۰ کیلومتر طول و حداکثر طول قطار ۳۵۰ تا ۷۵۰ متر است. حداکثر باری که قطارها می‌توانند جابه‌جا کنند از ۵۵۰ تا ۱۱۰۰ تن متغیر است.

فرآیند گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها برای آزمون مدل دارای چهار مرحله است: الف) انتخاب محصولات و زوج‌هایO-D مرتبط با آن‌ها، ب) انتخاب مؤلفه‌هایی که عدم سودمندی را مشخص می‌سازند، ج) محاسبه پارامترهای قابل‌توجه از طریق یک مدل لوجیت ترکیبی بر اساس مدل RUM و د) محاسبه پارامترهای دیگر که بر مدل تأثیرگذارند.

با توجه به فاکتورهای عدم سودمندی، سه متغیر مرتبط با ویژگی‌های سفر درنهایت انتخاب گردید، که بهینه‌سازی مدل RUM را امکان‌پذیر می‌سازند: الف) مسافت، ب) اختلاف مابین قیمت جابجایی در حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای و ج) میزان آلایندگی وسایل حمل‌ونقل. در ادامه نیز یک متغیر مصنوعی برای هر نوع محصول جابجا شده، افزوده گردید که عبارت است از بازه مقداری بین ۰ تا ۱ برای مشاهده ویژگی‌های خاص هر محصول. حجم بار ترانزیت شده به‌صورت درصدی از کل تقاضای ترانزیت‌شده توسط قطار و کامیون در طول سال ۱۳۹۹برای محصولات و نواحی انتخاب‌شده، محاسبه گردید. این درصد از مقدار ۲۰ درصد تا ۷۰ درصد بسته به نوع محصول و نیز مبدأ و مقصد آن متفاوت بود. کل حجم حمل‌ونقل شده در این بازه زمانی ۷۷٦٤۷٦۰ تن بود که خود شامل مواد شیمیایی (٤۲ درصد)، انواع میوه و سبزی جات (۲۷ درصد)، غلات (۱۳ درصد)، فولاد و آهن (۸ درصد)، وسایل نقلیه (۸ درصد) و قطعات یدکی خودرو (۳ درصد) بوده‌اند. یک تقریب از مدل لوجیت ترکیبی برای محاسبه مقادیر پارامترهای β با استفاده از مدل لوجیت ترکیبی بسته رگرسیون R بکار برده شد (کروسانت، ۲۰۲۰). تخمین تقریبی مشترک برای تمامی زوج‌هایOD انجام شد. آزمون‌های مختلفی برای تأیید کیفیت ضرایب محاسبه‌شده انجام شد که عبارت‌اند از اثرات حاشیه‌ای پارامترهای پیوسته برای هر محصول و ظرفیت بازتولید جریان‌های دیده‌شده بافاصله اطمینان بسیار بالایی از ضرایب دترمینان R2 برابر با ۰,۹۹ محاسبه گردید.

بیان آزمون‌های صورت گرفته در مدل تحقیق

به‌منظور بررسی بهینگی مدل و میزان بازدهی آن آزمون‌ها به‌صورت گروهی انجام شد. ترکیبی از سه شاخص برای تعریف کردن این گروه‌ها مورداستفاده قرار گرفت. نخستین معیار آن بود که آیا در حمل‌ونقل باری در شبکه ریلی رقابت بین شرکت‌های ترانزیت باربری وجود دارد یا نه؟یک‌سوم از آزمون‌های موردی به شبیه‌سازی شرایطی می‌پرداخت که در آن تنها یک شرکت در شبکه ریلی به فعالیت حمل‌ونقل بار مشغول باشد و به‌نوعی مبین انحصار بود. بالعکس، دوسوم باقی‌مانده از آزمون‌ها متناظر با تحلیل رقابت شرکت‌های مختلفی است که در شرایط رقابتی مشغول به فعالیت هستند. معیار دوم بر اساس سطح استواری مدل مدنظر قرار گرفت. در سطح صفر که هیچ‌گونه استواری وجود ندارد، درواقع معادل با یک وضعیت قطعی است. در این حالت، پارامترهای β بر اساس مقادیر میانگینشان استوار هستند. در اینجا عدد سطح حداکثر به تبیین تعداد پارامترهای β می‌پردازد که ممکن است از مقدار میانگینشان دارای انحراف محسوس باشند و مقداری در بازه بین ,+β—β] β+β به خود بگیرند. سومین معیار فقط ناظر بر موارد تأثیرگذاری است که «رقابت شرکت‌ها» در آن جریان داشته و دو نوع آزمون را مشخص می‌نمایند که عبارت است از: الف) آزمون‌هایی که دارای تخصیص گزینه‌های ثابت برای هر شرکت حمل‌ونقل می‌باشد و ب) آزمون‌هایی که در آن تعداد گزینه‌های متغیّر بوده و توسط مدل تدقیق می‌شود و درنتیجه می‌توان به تفکیک حالتی نزدیک به سودمندی‌های مدل RUM دست‌یافت. در این فرموله سازی از دو گروه حروف مخفف استفاده شد که این آزمون‌ها را مشخص می‌سازند و عبارت‌اند از: CF، CD و M که برای مواردی با رقابت شرکت‌ها با تخصیص ثابت (CF)، مواردی با رقابت شرکت‌ها با تخصیص متغیر (CD) و حالت نبود رقابت یا انحصار (M). در بخش دوم، نمادگذاری Det، RL 1، RL 2 و غیره آزمون‌ها را بسته به سطح استواری مدل نشانه‌گذاری می‌نمایند. نشانه Det مربوط به حالت قطعی مدل است که به علت فقدان فضا، فقط مواردی از این حالت گزارش‌شده است. اولین مقدار برای متغیرها و ردیف‌ها متناظر با سطح استواری ۰ است که با آزمون‌های Det مشخص می‌شود، درحالی‌که دومین مقدار برای استوارترین حالت آزمون‌هاست و در آن تعداد متغیرهای

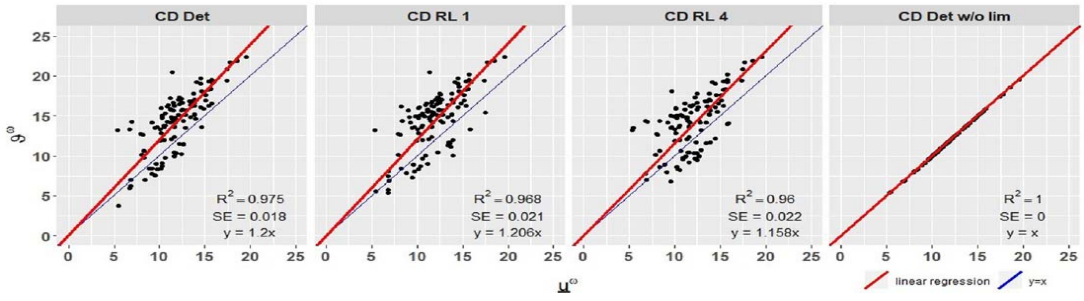
عدد صحیح و متغیرهای دوگانه برای تمامی آزمون‌ها دارای مقدار برابر هستند.

بررسی سازگاری حمل‌ونقل چندوجهی مستقل در مدل

رفتارهای مرتبط با وضعیت مستقل در معادله شماره (٤) تبیین شده است که بسته به دو پارامتر است که عبارت‌اند از : $\tilde{u}\omega$ و $v\omega$. اولین پارامتر متناظر با تابع بهینگی و سودمندی حمل‌ونقل جاده‌ای است و دومی با بهینگی و سودمندی حمل‌ونقل ریلی انطباق کاملاً صریح و دقیقی ندارد: در اینجا ضرایب لاگرانژ مرتبط با محدودیت‌هایی است که نحوه حمل‌ونقل محصولات با قطار را مقید نموده و تأثیراتی که بر وجوه مستقل حمل‌ونقل دارد را بیان می‌نماید. حال این میزان تأثیر کم باشد و یا زیاد خود تا حد زیادی به این مهم بستگی دارد که چگونه عبارت‌های گزاره‌ای سمت راست محدودیت‌های مختلف را در حین محاسبه جواب مسئله بهینه‌سازی استوارتر نماید. در مورد مدل موردبحث در این تحقیق، محدودیت‌هایی که عمدتاً مسئله را مقید می‌نمایند درواقع محدودیت‌هایی هستند که مرتبط با ظرفیت‌های زیرساخت‌ها، ظرفیت مسیر حرکتی قطار و اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه بودن یا سود ده بودن شرکت‌های ترانزیت باربری را تضمین نماید.

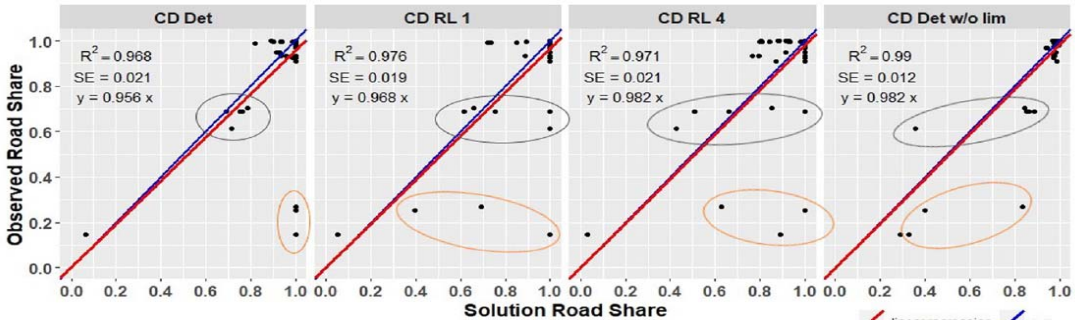
تصویر شماره سه، رابطه میان $u\omega$ و $v\omega$ را برای نمونه‌های مختلف بر اساس موارد مندرج در CD را نشان می‌دهد. نمودار سمت چپ متناظر با آزمون Det (قطعی) است، درحالی‌که دو نمودار بعدی آزمون‌های RL 1 و RL 2 را نمایش می‌دهند. آزمون‌های متناظر با نمودار سمت راست، که CD Det w/o lim نامیده می‌شود بر اساس آزمون CD Det استواری مدل را با لحاظ محدودیت‌های قیدشده در معادلات بررسی می‌نماید. در اینجا مهم‌ترین شاخص‌های رگرسیون خطّی در هر نمودار نشان داده‌شده است (R2 خطای استاندارد SE و ضریب x می‌باشد).

تصویر ۲. شبکه ریلی مورد مطالعه در پژوهش



تصویر ۳. مقایسه بین مقادیر $u\omega$ و $v\omega$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر $u\omega$ و $v\omega$ به‌صورت کامل برای جواب آزمون CD Det w/o lim بر اساس خط y=x دارای همبستگی است، بااین‌حال برای آزمون‌های CD Det، CD RL 1 و CD Rl 4، محدودیت‌های فعال مقدار مورد انتظار برای $v\omega$ را تا حدی تغییر دادند. اگرچه نمودارها بسیار شبیه به یکدیگر هستند، اما نمونه‌ها نشان می‌دهند که پراکندگی داده‌ها با افزایش سطح استواری تا حدود کمی بیشتر می‌شود.



تصویر ٤. مقایسه بین نسبت حمل‌ونقل جاده‌ای جواب مدل به نسبت مشاهده شده

۵- نتیجه‌گیری

تصویر شماره چهار مناسب بودن و میزان سازگاری مدل ارائه‌شده را از طریق مقایسه نسبت حمل‌ونقل جاده‌ای حاصل از خروجی‌های مدل با نسبت مشاهده‌شده برای آزمون‌های CD Det، CD Rl 1 و CD Rl 4 و همچنین برای نمونه Cd w/o lim را نشان می‌دهد. در اینجا تمامی نمودارها مقادیر را مستقیماً با ترسیم نمودار در مقابل دیگری به‌صورت مقایسه اینشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده‌شده در محور عمودی برای تمامی نمودارها یکسان است، درحالی‌که مقادیر محور افقی متناظر با جواب هر آزمون متغیر است. نقاط نمودار که با دو رنگ مجزا متباین شده‌اند که خود متناظر با نقاط سه مؤلفه‌ای مبدأ–مقصد و محصول موردنیاز برای جابجایی برای تمامی آزمون‌ها یکسان است. برای گروه زرد، پیش‌بینی بهتری با توجه به آزمون Det با اعمال مقداری از سطح استواری به دست آمد و بالعکس، برای گروه خاکستری، جواب آزمون Det پیش‌بینی دقیق‌تری را فراهم نمود. این واقعیت که جواب آزمون CD Det w/o lim طرحی اجمالی مدل است و آزمون Det پیش‌بینی بهتری را برای برخی دیگر از آن‌ها فراهم می‌نماید و تأثیر شرایط ریلی بر استقلال و درجه‌ی تفکیک مُدهای رقابتی در حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای را نشان می‌دهد. در این تحقیق یک مدل ترکیبی برای تخصیص چندوجهی در حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی همراه با مدل‌سازی جریان‌های ترافیک ریلی مختلف (واگن‌های ریلی پُر یا خالی، ظرفیت قطارهای متصل شده در پایانه‌ها) برای سناریوهایی که در آن چندین شرکت ترانزیتی که لازم است خدمات را به‌صورت چندوجهی انجام دهند را ارائه نمود. این مدل در قالب یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطّی در برنامه‌ریزی عدد صحیح در مدل حداکثر سازی تابع آنتروپی نسبی فرموله نمود. این مدل انعطاف‌پذیری زیادی با توجه به ضرایب بهینگی و سودمندی دارد که ممکن است به دلایلی نظیر دشواری گردآوری داده‌ها و نقش غالبی که مُدهای حمل‌ونقل جاده‌ای با آن مواجه است را در نظر گرفت. برای این منظور، یک نمونه مناسب از مدل با در نظر گرفتن استقلال وجوه حمل‌ونقل دارای جلوه‌ای است که در آن بدترین حالت را در نظر می‌گیرد و لذا با فرض بدترین حالت ممکن فرمول‌بندی انجام گردید. الگوریتمی بر اساس روش تقریب بیرونی برای به دست آوردن جواب‌های دقیقی در مدت‌زمان محاسباتی قابل‌قبول برای هر دو مدل استوار و غیر استوار ارائه گردید. مثال‌هایی برای بخش شبکه حمل‌ونقل کشور برای آزمون این مدل موردبررسی قرار گرفت. نتایج نیز نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند ابزاری مفید برای ارزیابی رفتارهای ممکن شرکت‌های ترانزیت بار و شرکت‌های خدمات باربری مختلفی که با یکدیگر رقابت می‌نمایند و همچنین سناریوهای مختلفی که در آن‌ها محدودیت ظرفیت لزوماً باید مدنظر قرار گیرد، در اختیار قرار می‌دهد.

این مدل می‌تواند در تحقیقات آتی برای مسائلی نظیر بررسی حالت‌های بیشتر (نظیر حمل‌ونقل آبی و هوائی) در چهارچوبی چندحالته موردبررسی قرار گیرد. همچنین، مؤلفه‌های تخصیص مدل را می‌توان با گنجاندن عوامل غیرخطّی تحت شرایط محدود از طریق نامعادلات و متغیرهای بیشتر بسط داد.

٦- مراجع

-Abate, M., Vierth, I., Karlsson, R., de Jong, G., & Baak, J. (2018). A disaggregate stochastic freight transport model for Sweden. *Transportation,* 46(3), 671–696.

-Abdulaal, M., & Leblanc, L. J. (1979). Methods for combining modal split and equilibrium assignment models. *Transportation Science,* 13(4), 292–314.

-Arencibia, A. I., Feo-Valero, M., García-Menéndez, L., Román, C., et al. (2015). Modelling mode choice for freight transport using advanced choice experiments. Transportation Research Part A: *Policy and Practice,* 75, 252–267.

-Crainic, T. G., Florian, M., & Leal, J. E. (2001). Model for the strategic planning of national freight transportation by rail. *Transportation Science,* 24(1), 1–24.

-Crisalli, U., Comi, A., & Rosati, L. (2013). A methodology for the assessment of railroad freight transport policies. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 87, 292– 305. **doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.611.**

-Croissant, Y. (2020). mlogit: Multinomial logit models. *R package version 1*.1-0,

-Dafermos, S. C. (2001). Integrated equilibrium flow models for transportation planning. In M. A. Florian (Ed.), Traffic equilibrium methods, *Springer Berlin Heidelberg,* 106–118.

-Duran, M. A., & Grossmann, I. E. (1986). An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. *Marhematical Programming,* 36, 307– 339.

-European Commission (2011). White paper on transport: roadmap to a single European transport area: towards a competitive and resource efficient transport system. *Publications Office.*

-European Court of Auditors (2016). Rail freight transport in the EU: Still not on the right track. Technical Report 08. European Court of Auditors. **doi.org/10. 2865/53961.**

-Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. Zhang, M., Janic, M., & Tavasszy, L. A. (2015). A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design. Transportation Research Part E., *Logistics and Transportation Review*, 77, 61–76.

-Fernández L, J. E., de Cea, J., & Giesen, E. R. (2004). A strategic model of freight operations for rail transportation systems. *Transportation Planning and Technology.*

-Florian, M. (2001). Traffic equilibrium model of travel by car and public transit modes. *Transportation Science,* 11(2), 166–179.

-Florian, M., & Nguyen, S. (1978). A combined trip distribution modal split and trip assignment model. *Transportation Research,* 12(4), 241–246.

-Floudas, C. A. (2001). Mixed-integer nonlinear optimization. In Nonlinear and mixedinteger optimization: Fundamentals and applications, *Oxford University Press*, Inc. 480-481.

-Friesz, T. L., & Kwon, C. (2007). Strategic freight network planning models and dynamic oligopolistic urban freight networks. In D. A.

Hensher, & K. J. Button (Eds.), Handbook of transport modelling (vol 1), *Emerald Group Publishing Limited.* 611–631.

-Guelat, J., Florian, M., & Crainic, T. G. (1990). Multimode multiproduct network assignment model for strategic planning of freight flows. *Transportation Science*, 24(1), 25–39.

-Hou, B., Zhao, S., & Liu, H. (2020). A combined modal split and traffic assignment model with capacity constraints for siting remote park-and-ride facilities. *IEEE Access*, 8, 80502–80517.

-Hwang, T., & Ouyang, Y. (2014). Assignment of freight shipment demand in congested rail networks. Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board*, 8(2448), 37–44.

-Jensen, A. F., Thorhauge, M., de Jong, G., Rich, J., Dekker, T., Johnson, D., Nielsen, O. A. (2019). A disaggregate freight transport chain choice model for Europe. Transportation Research Part E. *Logistics and Transportation Review,* 121, 43–62.

-de Jong, G., Tavasszy, L., Bates, J., Grønland, S. E., Huber, S., Kleven, O., Schmorak, N., et al. (2016). The issues in modelling freight transport at the national level. *Case Studies on Transport Policy,* 4(1), 13–21.

-de Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., Ben-Akiva, M., et al. (2013). Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation,* 40(2), 347–371.

-Jourquin, B. (2016). Calibration and validation of strategic freight transportation planning models with limited information. *Journal of Transportation Technologies,* 06(05), 239–256.

-Koster, A. M. C. A., Kutschka, M., & Raack, C. (2013). Robust network design: formulations, valid inequalities, and computations. *Networks,* 61(2), 128–149.

-Larsson, T., & Patriksson, M. (1994). Equilibrium characterizations of solutions to side constrained asymmetric traffic assignment models. *Le Matematiche,* 49(2), 249–280.

-Li, S., Deng, W., & Lv, Y. (2009). Combined modal split and assignment model for the multimodal transportation network of the economic circle in China. *Transport,* 24(3), 241–248.

-Little, J. D. C. (1961). A proof for the queuing formula: L = λW. *Operations Research*, 9(3), 383–387.

-Maia, L. C., & do Couto, A. F. (2014). A rail network optimization model designed to model freight. In R. R. de Sousa, J. F. and (eds.) (Ed.), Computer-based modelling and optimization in transportation 209–222.

-Meersman, H., Ehrler, V. C., Bruckmann, D., Chen, M., Francke, J., Hill, P., Vierth, I., et al. (2016). Challenges and future research needs towards international freight transport modelling. *Case Studies on Transport Policy,* 4(1), 3–8.
doi.org/ 10.1016/j.cstp.2015.12.002.

- Rosell, F., & Codina, E. (2020). A model that assesses proposals for infrastructure improvement and capacity expansion on a mixed railway network. *Transportation Research Procedia,* 47, 441–448.

-Sheffi, Y. (2001). Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods.

Providing an Optimal Model for Load Allocation in Rail and Road Multimodal Transportation with a Robust Approach

Pejman Salehi, Ph.D., Grad., Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Parand, Iran.

Mehran Khalaj, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Parand, Iran.

Davood Jafari, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Parand, Iran.

E-mail: pejmansalehi.metro@gmail.com

Received: June 2023- Accepted: February 2024

ABSTRACT

One of the important goals of Iran's transportation industry, based on the vision document of rail transportation, is to reduce greenhouse gas emissions and optimally manage energy resources, according to which, in 2029, up to 35% of cargo transportation in the country should be carried out through the rail network. In this regard, the use of multimodal transportation seems obvious and useful. In this regard, promoting rail transportation as a green method against green methods such as road transportation, more than anything else, requires evaluating and providing effective optimization solutions. Therefore, in this research, an attempt has been made to provide a hybrid model to evaluate different modes of transportation and in this way to check the flow of freight transportation in the rail network. Therefore, in the present research, a random optimization model has been presented for the evaluation of freight transportation methods, so that the coefficients of the variables have a relative flexibility for optimization. To achieve the goal of stability after initial formulation, which has relative certainty, based on non-linear integer programming, a stable model has been compiled and compared with non-stable models. The challenges of robust planning, in a multimodal space, in terms of the variety of freight transportation facilities in road and rail aspects, require considering the limitations associated with the objective function, which is attempted in this research through the interaction between various types of rail network flows, a proper evaluation of the model about be provided at the expense of road-rail transportation facilities and the capacity of the rail network. Therefore, an approximate algorithm for checking and explaining deterministic alternatives in a reasonable computing time has been investigated. Stable and non-steady models are also focused on the country's rail network in this research, and it has been tried to provide a suitable and useful tool for analyzing and responding to the demand of freight transit companies in the conditions of competition with the road sector through testing the model's applications.

Keywords: Rail Transportation, Nonlinear Integer Programming, Robust Optimization, Freight Trains