JMRA
مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک
ISSN: 2251-7383, eISSN: 2251-7391

یک مدل بهینه‌سازی برای اولویت‌بندی طرح‌های توسعه راه‌آهن، براساس شاخص‌های تاثیرگذار و مبتنی بر توسعه پایدار، با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و مکانیکی

مرتضی نوروزی[۱]، علی نادران[۲]*، جبارعلی ذاکری[۳] .کامران رحیم اف[۴]

۱- دانشجوی دکتری عمران گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
morteza.noruzi@srbiau.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
naderan@srbiau.ac.ir

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت ایران ، تهران، ایران zakeri@iust.ac.ir

۴- استادیار دانشگاه پیام نور، تهران، ایران k_rahimov@yahoo.com

*نویسنده مسئول

چکیده:

پروژه‌های متعددی برای توسعه راه‌آهن در کشورمان در دست مطالعه و اجرا هستند. طرحهای ساخت و توسعه راه آهنMulti discipline بوده و اجرای این طرحها ترکیبی از هم افزایی مهندسی عمران، مهندسی مکانیک، مهندسی برق می باشد. با توجه به محدودیت شدید اعتبارات و هزینه بر بودن اجرای پروژهای توسعه زیرساخت حمل ونقل ریلی و ضرورتهای توسعه هرچه سریع تر شبکه زیرساخت حمل ونقل کشور، نظام‌مند نمودن تصمیم‌گیری درخصوص تعیین اولویت بین طرحهای ریلی به لحاظ محدودیتهای فنی، مالی و اجرائی و آثار وسیع و بلندمدت آن اهمیت دارد. در واقع اولویت بندی بین پروژه ها باید صورت بپذیرد تا بین طرحها, آن طرح که موثر و مفید تر است زودتر اجرایی شود. بدین منظور در ابتدا از راهکارهای اقتصاد مهندسی استفاده می شد. این روشها منافع و هزینه های مالی پروژه را محاسبه و با توجه به طول عمر و نرخ بازگشت اقتصادی پروژه ها, آن ها را اولولیت بندی می نمایند. روشهای و مدلهای نوینی برای اولویت بندی طرحها قابل طراحی است که در این مقاله به معرفی روشی نوین در این خصوص با بهره گیری از مقایسه حل دقیق و روش فرا ابتکاری خواهیم پرداخت.

کلید واژه: بهینه سازی؛ شاخصهای تاثیرگذار؛ جنبه های اقتصادی، زیست محیطی و مکانیکی؛ طرحهای توسعه ریلی؛ طراحی شبکه راه آهن؛ توسعه پایدار؛ اولویت بندی؛ الگوریتم ژنتیکNSGA-II

۱- مقدمه

تحلیل خطوط ریلی همواره با عدم قطعیت‌های بسیاری روبرو می‌باشد. با گذشت زمان ابعاد غیر مالی پروژه ها همچون مولفه هایی مانند کاهش سوانح و افزایش ایمنی , کاهش آلودگی محیط زیست, توسعه اقتصادی و اجتماعی متوازن , توسعه فرصتهای ترانزیتی, افزایش همبستگی و امنیت ملی، توانمندی های حوزه مهندسی مکانیک و تولیدکننده ها و ناوگان و... نیز عیان تر شد. در واقع طرحهای زیربنایی حمل و نقل طرحهایی موثر بر حوزه های اجتماعی و اقتصادی و حتی سیاسی می باشند. پیامدهایی که به سادگی قابل تبدیل به منفعت یا هزینه مالی نبود. در این مقطع روشهای تصمیم گیری چند معیاره شکل گرفت.

در این روشها سعی می شود پیامدهای غیرمالی کمی سازی و در کنار پیامدهای مالی تحلیل شوند. ولی در این راستا با پیشرفت تکنیکهای حل مسئله این سوال پدید آمد که آیا ارزیابی پروژه ها به صورت تک به تک اقدام صحیحی است؟ آیا طرحهای مختلفی که توجیه فنی و اقتصادی خوبی دارند و باتوجه به شاخصهای مختلف نیز در اولویت قرار می گیرند, تاثیری بر هم ندارند؟

به ویژه در بخش حمل و نقل ریلی این سوالات جدی تر می شود. زیرا خطوط ریلی با اتصال به یکدیگر , یک کارکرد شبکه ای دارند و این کارکرد شبکه ای نیازمند یک تحلیل شبکه ای نیز هست. به عبارت دیگر باید پیامدهای پروژه های حمل و نقل ریلی را با نگاهی به دیگر پروژه های دردست بهره برداری و یا درحال ساخت ریلی ارزیابی نمود. لذا باید از دانش برنامه ریزی حمل و نقل ، برای مدلهای طراحی و تحلیل شبکه استفاده نمود.

مسئله طراحی شبکه راه آهن به دلیل اهمیت و تنوع کاربردهای ضروری به عنوان یکی از موضوعات مهم در بخش حمل و نقل شناخته می شود. موضوع اصلی این حوزه تصمیم گیری برای افزایش ظرفیت راه آهن یا احداث مسیر جدید برای پاسخگویی به تقاضا است. اگر چه بودجه دغدغه بزرگ مدیران برای اتخاذ چنین تصمیمی است، اما عوامل محیطی الزاماً باید در فرآیند تصمیم گیری لحاظ شود. بنابراین، این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه (MILP) قوی را پیشنهاد می‌کند تا به طور همزمان هزینه کل و کل اثرات زیست‌محیطی را تحت شرایط نامشخص و در یک افق زمانی معین به حداقل برساند. در مسئله پیشنهادی، تصمیمات استراتژیک و عملیاتی از طریق انتخاب پروژه راه آهن و تعیین جریان محصول مورد توجه قرار می گیرد. به منظور مقابله با دو هدفی بودن مدل و مقابله با پیچیدگی مسئله، یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II) استفاده می‌شود. NSGA-II پیشنهادی می‌تواند در یک زمان حل معقول به راه‌حل‌های پارتو نزدیک به بهینه برسد و عملکرد قابل اعتمادی را برای استفاده در نمونه‌های با اندازه بزرگ نشان داد.

۲- پیشینه پژوهش :

مقالات متعددی در حوزه اولویت بندی و یا بهینه سازی طرحهای زیرساختی در کشورهای مختلف انجام پذیرفته است که در ذیل به تعدادی از موارد مرتبط با قلمرو این مقاله می پردازیم.

ماکورا و همکاران (۲۰۱۱) مدلی برای اولویت بندی پروژه های زیرساختی راه آهن با استفاده از رویکرد تصمیم گیری چند معیاره فرایند تحلیل شبکه ای (ANP) ارائه دادند. مطالعه موردی این تحقیق شامل کریدور X شبکه ریلی صربستان بوده است.

کروویچ و پاموکار (۲۰۱۳) یک مدل پشتیبان تصمیم برای اولویت بندی سطح ایمنی راه آهن با استفاده از رویکرد فازی ارائه دادند. شاخص‌های نظیر چراغ راهنما، زنگ و حصار اطراف ریل به عنوان شاخصهای ایمنی در نظر گرفته شده اند. بدین منظور یک سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) توسعه داده شده است.

شفیع پور و همکاران (۲۰۱۸) مسئله اولویت بندی پروژه های ساخت زیرساخت های جدید راه آهن ایران را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور شاخص‌هایی همچون ظرفیت ریل، میزان ترافیک و ارزش خالص فعلی مد نظر قرار گرفته است.

رزوان و همکاران (۲۰۱۵) از رویکرد نسبت منابع به هزینه برای اولویت بندی راه آهن با در نظر گرفتن پروتکل-های ایمنی برای توسعه زیرساخت حمل و نقلی بهره بردند.

پروکیچ و همکاران (۲۰۱۸) مسئله اولویت بندی پروژه های زیرساختی راه آهن را با استفاده از رویکرد تصمیم گیری چند معیار فرایند تحلیل شبکه ای (ANP) بررسی نمودند. بدین منظور شبکه راه آهن صربستان به عنوان مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

شارما و همکاران (۲۰۱۸) یک چارچوب ارزیابی چند معیاره برای اولویت بندی ایستگاه‌های راه آهن هند با استفاده از روش AHP توسعه دادند. از میان شاخص‌های ارائه شده، شاخص کنترل شرایط به عنوان مهمترین شاخص در اولویت بندی ایستگاه‌ها انتخاب گردید.

رضوانی و همکاران (۲۰۱۵) از رویکرد نسبت منابع به هزینه برای اولویت بندی راه آهن با در نظر گرفتن پروتکل-های ایمنی برای توسعه زیرساخت حمل و نقلی بهره بردند.

برانکو و همکاران (۲۰۲۰) اثرات اقتصادی و زیست محیطی را بر توسعه خطوط ریلی در شبکه حمل و نقلی برزیل ارزیابی نمودند. بدین منظور یک مدل شبکه ای برای شبیه سازی جریان حمل و نقلی ارائه شده است طوریکه هزینه-های حمل و نقلی و میزان آلایندگی انتشار یافته حداقل شود. همچنین از رویکرد تحلیل هزینه موثر برای اولویت بندی سرمایه گذاری در راه آهن استفاده شده است.

در مطالعاتی که به همین منظور و برای اولویت بندی طرحهای حمل ونقل ریلی در کشور برزیل انجام گرفته ایده های مناسبی را برای پیشبرد این تحقیق ارایه می نماید.

کوبی و همکاران. (۲۰۰۱) نشان داد که پروژه‌های راه‌آهن را می‌توان در فازهای مختلف به تدریج یا یک‌باره تکمیل کرد. برای حل این مشکل، آنها از روش توالی زمانی اکتشافی استفاده کردند. آنها همچنین با نادیده گرفتن تقاضاهای کوچک از ماتریس OD اندازه مدل را بسیار کاهش دادند و آنها را در کوتاه ترین مسیر خود از قبل بارگذاری کردند. این کاهش اندازه تأثیر چندانی بر سطح بهینه مسئله نداشت.

لین و همکاران (۲۰۰۲) یک مشکل طراحی شبکه راه آهن را با توجه به بودجه پروژه و هزینه های مسیریابی مطالعه کرد. در مدل آنها تصمیماتی مانند ایجاد راه آهن جدید یا گسترش راه آهن قدیمی گرفته شد.

یان و همکاران (۲۰۰۷) مدل طراحی شبکه راه آهن را در چند مرحله گسترش داد. آنها همچنین اثرات سرمایه گذاری بر انتخاب پروژه راه آهن را بررسی کردند.

آرنولد و همکاران (۲۰۰۴) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را ایجاد کرد که هدف آن تعیین مکان بهینه پایانه های ریلی بود. آنها از یک رویکرد اکتشافی برای حل مدل خود استفاده کردند.

پازور و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل شبکه برای راه‌آهن‌های پرسرعت و بزرگراه‌ها برای کاهش ازدحام در بزرگراه‌ها طراحی کرد. هدف مدل به حداقل رساندن زمان سفر بود و مدل بدون ظرفیت بود.

سان و همکاران (۲۰۱۱) با در نظر گرفتن چند دوره و عدم قطعیت تقاضا در مدل، یک مدل برنامه ریزی دو سطحی برای شبکه حمل و نقل ایجاد کرد. این مدل توانست به طور همزمان شکل شبکه حمل و نقل و زمان ساخت را بهینه کند.

لاپورته و همکاران (۲۰۱۱) یک شبکه راه آهن را با توجه به استحکام شبکه طراحی کرد. تمرکز این مطالعه در طراحی خطوط راه آهن به گونه ای بود که عملکرد مطلوبیت بهینه شود.

نویسنده	سال انتشار	تحلیل فنی	آنالیز اقتصادی	طراحی مدل برای اولویت بندی	ظرفیت شبکه	رویکرد محیط زیست و حمل ونقل پایدار	تحلیل شبکه	رویکرد ارزش ایمنی
برانکو و همکاران	۲۰۲۰	×	×	×		×		
کروویچ و پاموکار	۲۰۱۳	×		×			×	×
شفیع پور و همکاران	۲۰۱۸	×	×		×			
ماکورا و همکاران	۲۰۱۱	×		×	×		×	
رزوان و همکاران	۲۰۱۵	×						×
پروکیچ و همکاران	۲۰۱۸	×		×			×	
شارما و همکاران	۲۰۱۸	×			×			
رضوانی و همکاران	۲۰۱۵	×	×					

مارین و همکاران (۲۰۰۹) مدلی را برای شبکه حمل و نقل سریع ایجاد کردند که هدف آن به حداکثر رساندن تقاضای حمل و نقل و به حداقل رساندن زمان سفر بود. آنها همچنین محدودیت ها و محدودیت های بودجه ای را برای شبکه های فیزیکی در نظر گرفتند.

در مطالعه دیگری، مارین و همکاران. (۲۰۱۱) یک مدل یکپارچه از طراحی شبکه و برنامه ریزی خط را بدون کاهش کارایی سیستم در صورت شکست صفر مطالعه کرد. آنها با توجه به مفهوم استحکام از دیدگاه کاربر و اپراتور مشکل را حل کردند.

در زمینه طراحی شبکه حمل و نقل، کرمانشاهی و همکاران. (۲۰۱۰) از رویکرد فراابتکاری برای حل مشکل استفاده کرد. بنابراین، آنها از الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده برای به حداکثر رساندن پوشش سفر در مسئله استفاده کردند.

گارسیا آرچیلا و همکاران (۲۰۱۳) یک شبکه راه آهن زیرساخت طراحی کرد و مدل قوی مشکل را نیز توسعه داد. آنها از یک روش جستجوی تصادفی تطبیقی حریصانه برای حل مشکل خود استفاده کردند.

کانکا و همکاران (۲۰۱۷) طراحی شبکه حمل و نقل سریع راه آهن را در راستای برنامه ریزی خط ارائه کرد. هزینه های ساخت و ساز در نظر گرفته شده، هزینه خرید ناوگان، هزینه عملیاتی قطار و هزینه پرسنل.

سیدوکیلی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه راه آهن از دیدگاه دولت ارائه کرد. مدل تصمیماتی مانند ساخت یک خط جدید یا بهبود خط موجود را اتخاذ کرد و تابع هدف به حداقل رساندن کل هزینه ها بود.

یک مدل تصمیم گیری چندهدفه مشترک برای بهینه سازی ظرفیت و تخصیص یک شبکه راه آهن شهری توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شد. با استفاده از داده های چند منبع. آنها روش پیشنهادی خود را در سیستم متروی پکن با در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی قطارها و هزینه های مربوط به زمان انتظار مسافران اعمال کردند.

با توجه به ادبیات، ما مشارکت های اصلی خود را به شرح زیر تعریف می کنیم:

۱) امکان گسترش ظرفیت موجود شبکه حمل و نقل ریلی توسط پروژه های عمرانی.

۲) در نظر گرفتن کمبود تقاضا و افق زمانی در مشکل،

۳) در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه عملیات حمل‌ونقل ریلی و به حداقل رساندن مجموع گازهای گلخانه‌ای(اثرات سو زیست محیطی) متناسب با کل هزینه‌ها.

۴) بررسی عدم قطعیت تقاضا با استفاده از رویکرد بهینه سازی قوی

۵) حل مسئله به صورت دو هدفه با استفاده از رویکردهای دقیق و فرا ابتکاری.

لازم بذکر است که مدل استفاده شده در این پژوهش، دارای نوآوری و برای اولین بار تدوین شده است.

۳- مفروضات مسئله و برنامه ریزی ریاضی

۳-۱- مدل برنامه ریزی عددصحیح مختلط طراحی شبکه ریلی

هزینه بالای توسعه شبکه راه آهن و زمانبر بودن ساخت و توسعه آن موضوعی است که همواره یکی از چالش‌های مهم تصمیم‌گیری بوده است. سرمایه گذاری و مالکیت اکثر شبکه های ریلی دنیا مربوط به دولت‌ها است. از آنجا که دولت‌ها این امر را با صرف منابع ملی محدود انجام می دهند، بنابراین انتخاب طرح هایی که بیشترین تاثیر را بر منافع ملی می گذارند، از اهمیت خاصی برخوردار است. طرح‌های افزایش ظرفیت شبکه موجود، طرح های احداث خطوط جدید، طرح های متصل کننده مراکز استان‌ها، اتصال مرزهای بین المللی ریلی، پوشش دادن به مناطق محروم یا طرح های ایجاد مسیرهای کوتاه‌تر بین مبادی و مقاصد بار و مسافر. هر کدام از این طرح ها آثار وسیع بلندمدت و منافع گوناگونی اعم از اقتصادی، مکانیکی یا اجتماعی در پی دارند و بدیهی است که اجرای همزمان همه طرح‌ها به لحاظ محدودیت‌های فنی، مالی و اجرائی بخش حمل‌ونقل کشور مقدور نیست.

در همین راستا اولویت‌بندی و انتخاب بهترین بسته طرح ها از بین فهرست بلند آنها امری ضروری است. نکته مهم دیگر این است که با توجه به اینکه خطوط ریلی در قالب یک شبکه کار می‌کنند، منافع احداث یک خط راه‌آهن خود را بر روی یک شبکه نشان می‌دهد، در نتیجه ارائه مدلی جهت اولویت‌بندی پروژه‌های افزایش ظرفیت ریلی که بتواند اثرات یک پروژه را در کل شبکه مورد بررسی قرار دهد بسیار مهم و ارزشمند می‌باشد. در همین راستا در این بخش یک مدل ریاضی طراحی شبکه جهت اولویت‌بندی پروژه‌های ریلی با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی و توان مکانیکی و عدم‌های قطعیت‌های مرتبط به تحقق تقاضای پیش‌بینی شده پیشنهاد می‌شود.

برای مواجه شدن با توابع چند هدفه، دو راهکار اصلی داریم. روش تجزیه و یا مستقیم. در روشهای تجزیه مساله بهینه سازی را عملا به یک مساله تک هدفه تبدیل می کنیم.

روش تجزیه شامل ۴ روش اصلی زیر است:

الف: مجموع وزن دار: این روش ساده ترین روش تجزیه است که برای هریک از توابع هدف براساس اهمیت شان یک وزن تعریف میکند.

ب: برنامه ریزی آرمانی: ابتدا یک نقطه ایده آل (آرمانی) تعریف می شود و سایر نقاط براساس نزدیکی به این نقطه مورد ارزیابی قرار می گیرد.

ج: رسیدن به هدف : مشابه روش برنامه ریزی آرمانی است . در این روش ابتدا یک نقطه ایده آل تعریف شده و سپس نقاط براساس بیشترین فاصله شان از نقطه ایده آل مورد ارزیابی قرار می گیرند. نقطه ای که بیشترین فاصله اش از نقطه آرمانی نسبت به فاصله سایر نقاط کمتر باشد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می شود.

د: تبدیل به قید: با تعیین قیود یک سری از فضاهای مساله حذف و از پیچیدگی آن کاسته می شود.

در حل مستقیم برخلاف روشهای تجزیه، مساله بهینه سازی چندهدفه به همان صورت حل می شود. الگوریتمهای تکاملی مانند NSGA-II و یا MOPSO نمونه هایی از این روش هستند.

در روش تجزیه به اجبار یک سری از اطلاعات فضای تصمیم از دست می رود که برای حل این مشکل باید مساله چندین بار حل شود که زمانبر است، ولی روش مستقیم چنین مشکلی ندارد.

ضمنا در روشهای تجزیه هربار که حل می شوند یک جواب متفاوت حاصل می شود ولی روش مستقیم همیشه یک مجموعه جواب را ارائه می دهد.

از سوی دیگر، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل‌ونقل ریلی عامل دیگری است که با وجود قوانین و نگرانی‌های زیست‌محیطی اخیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برای تعریف فضای مسئله، مجموعه ای از پارامترها مانند ظرفیت خط شبکه که نقش بسیار کلیدی در مدیریت تقاضای حمل و نقل شبکه ایفا می کند، در نظر گرفته شده است.

موضوع مهم بودجه موجود برای بهره برداری از پروژه طراحی است که صرف ساخت خطوط جدید، بهبود خطوط موجود و تعمیر و نگهداری ساختمان و تاسیسات مکانیک و الکتریکی ایستگاهها می شود. همه این‌ها به طور قابل توجهی بر پارامتر ظرفیت تأثیر می گذارد که در قالب دسته‌بندی به نام پروژه‌های بهبود ظرفیت در نظر گرفته می شوند. از سوی دیگر، برای نزدیک‌تر کردن مدل به شرایط دنیای واقعی، هزینه تقاضای از دست رفته نیز در نظر گرفته شده است که نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین مقادیر بهینه متغیرها و هزینه کل دارد. در نهایت، مهم ترین مسئله در نظر گرفتن درجه عدم قطعیت پارامتر تقاضا در شبکه است که بر اساس عدم قطعیت بازه و برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی توسط برتسیماس و سیم در سال ۲۰۰۴ فرموله شده است. روش پیشنهادی در برخورد با عدم قطعیت کارایی بالایی دارد.

۳-۲- مولفه‌ها و مفروضات مهم

در ادامه ابتدا مدل طراحی شبکه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت معرفی می‌شود:

مولفه‌ها و مفروضات مهم در مساله عبارتند از: (۱) مجموعه‌ای از کمان‌های جدید یا موجود در شبکه در نظر گرفته می‌شود، (۲) بودجه محدود است، (۳) یک دوره برنامه‌ریزی (افق زمانی) تعریف می‌شود، (۴) هر کدام از کمان‌ها یا خطوط ریلی ظرفیت محدودی دارد، (۵) ظرفیت هر کمان یا خط ریلی موجود را می‌توان با تعریف یک پروژه جدید در ابتدای افق زمانی افزایش داد، (۶) هر پروژه هزینه‌ای دارد که براساس بودجه موجود آن انجام می‌شود. (۷) تقاضای از دست رفته در مساله در نظر گرفته شده است، و (۸) تقاضای حمل‌ونقل ریلی بین هر جفت مبدا-مقصد (OD) (بین دو گره) نامشخص است. با توجه به توضیحات بیان شده، مجموعه‌ها، پارمترها و متغیرهای مدل ریاضی پژوهش در ادامه مطرح خواهد شد

۴- برنامه نویسی ریاضی همتای استوار

برنامه ریزی ریاضی برای مسئله طراحی شبکه راه آهن پیشنهادی به شرح زیر ارائه شده است.

مجموعه‌ها:

A	مجموعه ای از کمان های جهت دار (خطوط ریلی)
A'	مجموعه ای از کمان های جهت دار جدید (خطوط ریلی)
K	مجموعه ای از جفت مبدا-مقصد (OD)
P	مجموعه پروژه‌های ارتقای ظرفیت
T	مجموعه ای از دوره های زمانی

پارامترها:

B	بودجه موجود برای پروژه ها
CAP_{ij}	ظرفیت کمان (i,j)
CAP_{ijt}^{p}	ظرفیت اضافه شده به کمان (i,j) در نتیجه پروژه p در دوره t

CC_p	هزینه ثابت اجرای پروژه p
CO_{ijt}	هزینه عملیاتی واحد برای کمان (i,j) در دوره t
GHG_{ij}	تقاضای بین هر جفت OD در دوره t
${CU_t}^{od}$	هزینه تقاضای از دست رفته برای هر جفت OD در دوره t
${D_t}^{od}$	تقاضای بین هر جفت OD در دوره t
δ_{ij}^{p}	اگر قوس (i,j) متعلق به پروژه p باشد، عدد ۱ در غیر این صورت صفر

متغیرهای تصمیم:

${ud_t}^{od}$	تقاضای از دست رفته برای هر جفت OD در دوره t
x_{ijt}^{od}	جریان هر OD در قوس (i,j) در دوره t
y_p	اگر پروژه p انجام شود، ۱ در غیر اینصورت صفر.

با توجه به پارامترها، مجموعه‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل ریاضی قطعی[1] به شرح زیر می‌باشد.

$$\text{minimize } TC = \sum_{t\in T}\sum_{od\in K}\sum_{(i,j)\in A\cup A'} CO_{ijt}\; x_{ijt}^{od} + \sum_{t\in T}\sum_{od\in K} {CU_t}^{od}\; {ud_t}^{od} \qquad (۱-۴)$$

$$\text{minimize } GHG = \sum_{t\in T}\sum_{od\in K}\sum_{(i,j)\in A\cup A'} GHG_{ij}\; x_{ijt}^{od} \qquad (۲-۴)$$

Subject to

$$\sum_{p\in P} CC_p\, y_p \le B, \qquad (۳-۴)$$

$$\sum_j x_{ijt}^{od} - \sum_j x_{jit}^{od} = {D_t}^{od} - {ud_t}^{od} \quad \forall i = o; od \in K; t \in T, \qquad (۴-۴)$$

$$\sum_j x_{jit}^{od} - \sum_j x_{ijt}^{od} = {D_t}^{od} - {ud_t}^{od} \quad \forall i = d; od \in K; t \in T, \qquad (۵-۴)$$

$$\sum_j x_{ijt}^{od} - \sum_j x_{jit}^{od} = 0 \quad \forall i \ne od; od \in K; t \in T, \qquad (۶-۴)$$

$$\sum_{od\in K} x_{ijt}^{od} \le CAP_{ij} + \sum_{p\in P} CAP_{ijt}^{p}\; \delta_{ij}^{p}\; y_p \quad \forall i,j \in A\cup A'; t \in T, \qquad (۷-۴)$$

$$x_{ijt}^{od}, {ud_t}^{od} \ge 0 \quad \forall od \in K; t \in T, \qquad (۸-۴)$$

$$y_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P. \qquad (۹-۴)$$

[1] Determinstic

تابع هدف (۴-۱) شامل به حداقل رساندن هزینه کل شبکه (هزینه های حمل و نقل و تقاضای از دست رفته) است. تابع هدف (۴-۲) به دنبال به حداقل رساندن حجم کل انتشار گازهای گلخانه ای در شبکه حمل و نقل ریلی است. محدودیت (۴-۳) محدودیت بودجه برای کل هزینه پروژه‌ها را بیان می‌کند. این بودجه تمام انواع بودجه های مورد نیاز برای پروژه های ارتقای ظرفیت را پوشش می‌دهد. محدودیت‌های (۴-۴) تا (۴-۶) روابط تعادل شبکه را تعریف می‌کند که تقاضا را از مبدا به مقصد منتقل می‌کند، با در نظر گرفتن امکان از دست دادن تقاضا در هر دوره. محدودیت (۴-۷) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیتی است که از جریان زیاد در کمان‌ها (بلوک های راه آهن) جلوگیری می‌کند و با انجام پروژه‌ها بر روی کمان‌ها ظرفیت را افزایش می‌دهد. اثر افزایش ظرفیت در یک دوره زمانی معین گنجانده خواهد شد. قیود (۴-۸) و (۴-۹) دامنه متغیرها را نشان می‌دهد. مدل ارائه شده با فرض قطعی بودن کلیه پارامترهای مسئله ارائه شده است، این در حالی است که تقاضای ترافیک یک پارامتر نامشخص وغیرقطعی است. از این رو، رویکردی مبتنی بر بهینه‌سازی استوار در ادامه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی مسئله ارائه شده است. بهینه‌سازی استوار به دنبال راه‌حل‌های نزدیک به بهینه است که با احتمال بالا امکان‌پذیر هستند (Tirkolaee et al., 2021a). علاوه بر این، در صورت خطی بودن مدل ریاضی پایه، مسئله همتای استوار همچنان مدل را در فضای خطی حفظ می‌کند که معمولاً این مسئله توسط تکنیک‌های دیگر مانند برنامه‌ریزی تصادفی نادیده گرفته می‌شود. از این رو، در این پژوهش، از روش پیشنهادی (Bertsimas & Sim, 2004) برای استوارسازی مدل ریاضی پایه استفاده می‌شود. در این رویکرد، با در نظر گرفتن انحراف پارامتر غیرقطعی از مقدار مورد انتظار آن، مدل ریاضی از فضای قطعی خارج می‌شود. آن‌ها با معرفی پارامتری به نام سطح محافظه‌کاری (Γ) در واقع به مدل ریاضی قابلیت تنظیم‌شدن در برابر عدم قطعیت را اضافه کردند. منطق ریاضی آن به این صورت بوده که احتمال اینکه تمامی پارامترها به طور همزمان در بدترین شرایط خود قرار گیرند بسیار پایین است در نتیجه پارامتر سطح محافظه‌کاری تعیین می‌کند که به طور همزمان چند پارامتر در مقدار کران بالا یا پایین خود بسته به مسئله قرار می‌گیرند. در نهایت با رویکرد استوارسازی پیشنهادی، مدل قطعی طراحی شبکه به ترتیب زیر به یک مدل استوار تبدیل شده است:

$$\text{minimize } TC = \sum_{t\in T}\sum_{od\in K}\sum_{(i,j)\in A\cup A'} CO_{ijt}\; x_{ijt}^{od} + \sum_{t\in T}\sum_{od\in K} CU_t{}^{od}\; ud_t{}^{od} \qquad (۱۰-۴)$$

$$\text{minimize } GHG = \sum_{t\in T}\sum_{od\in K}\sum_{(i,j)\in A\cup A'} GHG_{ij}\; x_{ijt}^{od} \qquad (۱۱-۴)$$

$$\sum_{p\in P} CC_p\, y_p \le B, \qquad (۱۲-۴)$$

$$\sum_{j} x_{ijt}^{od} - \sum_{j} x_{jit}^{od} = 0 \qquad \forall i \ne od; od \in K; t \in T, \qquad (۱۳-۴)$$

$$\sum_{od\in K} x_{ijt}^{od} \le CAP_{ij} + \sum_{p\in P} CAP_{ijt}^{p}\; \delta_{ij}^{p}\, y_p \qquad \forall i,j \in A\cup A'; t \in T, \qquad (۱۳-۴)$$

$$x_{ijt}^{od}, ud_t{}^{od} \ge 0 \qquad \forall od \in K; t \in T, \qquad (۱۵-۴)$$

$$y_p \in \{0,1\} \qquad \forall p \in P. \qquad (۱۶-۴)$$

$$\left(\overline{D_t{}^{od}} - \Gamma_t{}^{od}\widehat{D_t{}^{od}}\right) - ud_t{}^{od} \le \sum_j x_{ijt}^{od} - \sum_j x_{jit}^{od} \le \left(\overline{D_t{}^{od}} + \Gamma_t{}^{od}\widehat{D_t{}^{od}}\right) - ud_t{}^{od} \qquad (۱۷-۴)$$

$$\forall i = o; od \in K; t \in T,$$

$$\left(\overline{D_t^{od}} - \Gamma_t^{od}\widehat{D_t^{od}}\right) \le \sum_j x_{jit}^{od} - \sum_j x_{ijt}^{od} \le \left(\overline{D_t^{od}} + \Gamma_t^{od}\widehat{D_t^{od}}\right) - ud_t^{od} \quad (۱۸-۴)$$

$\forall i = d; od \in K; t \in T,$

درمدل ریاضی پیشنهادی فوق به جای اینکه متغیر تقاضا به یک مقدار مورد انتظار قطعی محدود شود، یک محدوده $\widehat{D_t^{od}} \in [\overline{D_t^{od}} - \widehat{D_t^{od}}, \overline{D_t^{od}} + \widehat{D_t^{od}}]$ برای آن در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه محدودیت‌هایی که پارامتر تقاضا در آن دخیل بودند، تغییر کرده و محدودیت‌های همتای استوار آن معادل محدودیت‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) می‌باشد. پارامتر Γ_t^{od} نیز تعیین کننده سطح محافظه‌کاری مدل استوار پیشنهادی می‌باشد.

بهینه‌سازی استوار به دنبال راه‌حل‌های نزدیک به بهینه است که با احتمال بالا امکان‌پذیر هستند(Tirkolaee., 2021). علاوه بر این، یک فرمول خطی را پیشنهاد می‌کند که به MILP پیشنهادی مسئله کمک می‌کند، که معمولاً توسط تکنیک‌های دیگر مانند برنامه‌ریزی تصادفی نادیده گرفته می‌شود. از این رو، در این تحقیق، مدل (Bertsimas & Sim, 2004) برای مسئله بهینه‌سازی خطی که در آن تابع هدف به حداقل می‌رسد و ضرایب عدم قطعیت هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها وجود دارد، مورد استفاده قرار می گیرد.

۵- روش حل مدل

در این بخش روش های حل مدل ریاضی قوی ارائه شده است. با توجه به دوهدفه بودن مدل، یک روش محدودیت اپسیلون قرار است مدل را به طور بهینه حل کند. علاوه بر این، یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II) برای حل مسائل با اندازه بزرگ استفاده می‌شود.

۵-۱- روش دقیق: ε-محدودیت (EC)

ε-محدودیت (EC) یک روش محبوب برای مقابله با مسائل چند هدفه با ایجاد مرزهای پارتو است. یکی از اهداف را به عنوان هدف اصلی مسئله در نظر می گیرد و سایر توابع هدف را به محدودیت ها در هر مرحله منتقل می کند (Mavrotas,2009). برتری محدودیت ε در میان روش های دقیق دیگر، توانایی کنترل تعداد راه حل های پارتو تولید شده است. به عبارت دیگر، مشکل با در نظر گرفتن مقادیر مختلف حل می شود و هر بار یک راه حل پارتو گزارش می شود. برای مسئله پیشنهادی، روش EC از طریق مدل (۵-۱) استفاده می شود:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f1(x) \\ &x \in X, \\ &f2(x) \le \varepsilon_2, \\ &\dots \\ &fn(x) \le \varepsilon_n. \end{aligned} \quad (۱-۵)$$

مراحل اصلی روش EC عبارتند از: (۱) انتخاب یک هدف به عنوان تابع هدف اصلی مسئله، (ب) حل مسئله در حالت تک هدفه برای هر تابع هدف، و مقدار بهینه هر تابع هدف. به دست می آید، (iii) تفاوت بین مقادیر حداکثر و حداقل تابع هدف دوم به چندین بخش از پیش تعیین شده تقسیم می شود. سپس جدولی از مقادیر تولید می شود، (iv) مسئله توسط تابع هدف اصلی حل می شود و (v) راه حل های پارتو گزارش می شوند.

۵-۲- رویکرد فراابتکاری: NSGA-II

الگوریتم های فراابتکاری پارادایم های هوش محاسباتی را به ویژه برای مسائل بهینه سازی پیچیده ارائه می کنند (Goli et al., 2020). در ادبیات، NSGA-II یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌ها برای مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه است (Tirkolaee et al., 2021b). این اولین بار توسط Deb در سال ۲۰۰۲ معرفی شد. علاوه بر عملکرد NSGA-II، می توان آن را به عنوان یک استاندارد برای بسیاری از الگوریتم های بهینه سازی چند هدفه دیگر در نظر گرفت. رویکرد منحصر به فرد NSGA-II در برخورد با مسائل بهینه سازی چند هدفه بارها و بارها برای ایجاد یک الگوریتم جدید استفاده شده است. بدون شک این الگوریتم یکی از اساسی‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه است و به همین دلیل در این تحقیق از آن استفاده شده است. برای نمایش یک راه حل قابل دوام از NSGA-II پیشنهادی، یک رشته باینری برای نشان دادن نمایش راه حل تعریف شده است. شکل ۱ رشته مشخص شده برای الگوریتم NSGA-II را نشان می دهد.

1	2	3	4	5	6	7	8	…	p-1	p
0.29	0.64	0.93	0.81	0.19	0.96	0.74	0.08	0.78	0.84	0.22
0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0

شکل۱: سلول پیشنهادی برای NSGA-II

در شکل ۱ یک عدد به طور تصادفی بین ۰ و ۱ به هر سلول اختصاص داده می شود و سلول های با مقدار کمتر از ۰.۵ به ۰ و بالای ۰.۵ به ۱ تبدیل می شوند. سلول های با مقدار ۱ نشان می دهد که پروژه مربوط به آن است. سلول انجام می شود. با تعیین پروژه های انجام شده، قوس های هر پروژه مشخص می شود. سپس، به هر یک از این کمان‌ها مقدار جریانی به طور تصادفی بین نیمی از ظرفیت و ظرفیت کامل آنها اختصاص داده می‌شود. قوس هایی با هزینه کمتر و میزان انتشار کمتر از اولویت بالایی برخوردار هستند. با توجه به پروژه های انجام شده و جریان های قوس، تقاضای از دست رفته محاسبه می شود. همه این مقادیر با هم یک راه حل اولیه را برای الگوریتم NSGA-II تشکیل می دهند. پس از ایجاد راه حل های اولیه، ممکن است یک یا چند محدودیت مشکل را نقض کنند. در این مورد، الگوریتم یک راه حل همسایگی برای ارضای محدودیت ها پیدا می کند. سپس، یک تقاطع و جهش تک نقطه‌ای بر روی راه‌حل‌های اولیه تولید شده، برای تشکیل یک جامعه آماری جدید پیاده‌سازی می‌شود.

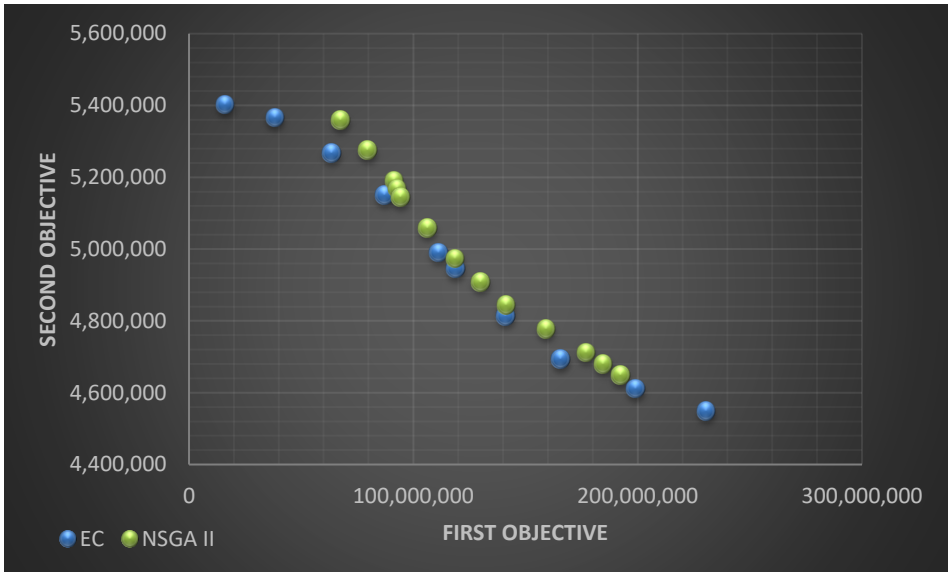
۶- نتایج محاسباتی

در این بخش خروجی های محاسباتی ارائه و تحلیل می شوند. برای انجام این کار، ۱۵ نمونه مسئله در اندازه های کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شده و سپس با روش دقیق پیشنهادی و الگوریتم فراابتکاری حل می شود.

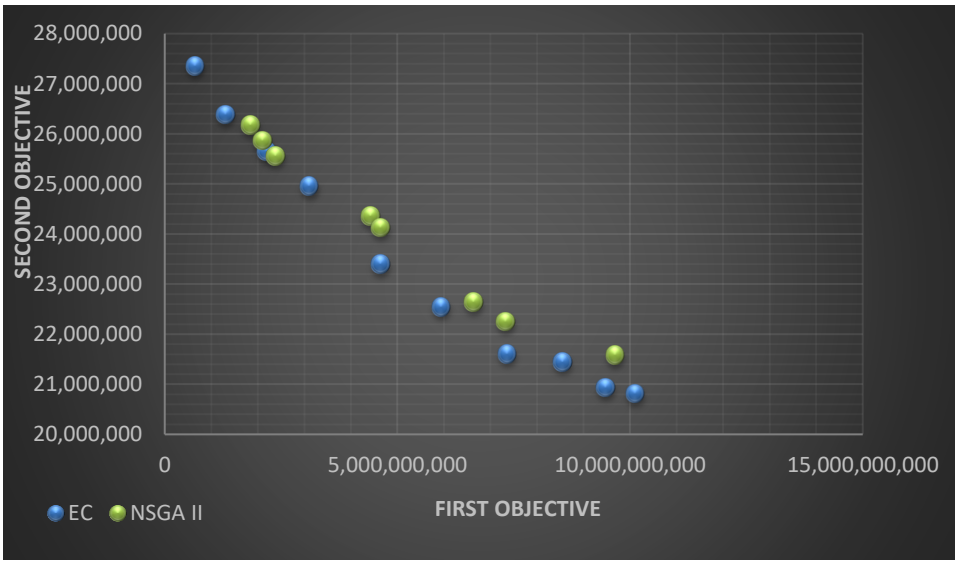
۶-۱- اعتبار سنجی NSGA-II

برای اعتبارسنجی عملکرد NSGA-II، نتایج روش دقیق با الگوریتم مقایسه می‌شود. تمام این ۱۵ نمونه مسئله توسط ε-محدودیت (EC) حل شد و مرز پارتو هر مشکل استخراج شد. روش EC با استفاده از حل کننده CPLEX با محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه در نرم افزار GAMS پیاده سازی شد. سپس نتایج NSGA-II پیشنهادی با EC مقایسه شد و عملکرد الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفت. در مسائل بزرگتر، EC قادر به حل بهینه مسائل در محدودیت زمانی پیشنهادی نبود. نتایج مسائل به صورت مسئله مرزهای پارتو در اندازه کوچک و متوسط نمایش داده می شود. فراابتکاری در نرم افزار MATLAB کدگذاری شد و بر روی یک سیستم عامل Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3.40 گیگاهرتز، ۴.۰۰ گیگابایت و ۶۴ بیت پیاده سازی شد.

شکل ۲ و ۳ به ترتیب مرز پارتو مسائل ۱ و ۶ را نشان می دهد. شکل ها تضاد بین اهداف مدل و مبادله بین آنها را نشان می دهد. به عبارت دیگر، آنها یک رابطه معکوس دارند. هرچه هدف اول بزرگتر باشد هدف دوم پایین تر است.



شکل ۲. مرز پارتو با استفاده از EC و NSGA-II برای مسئله به دست آمده است.



شکل ۳. مرز پارتو با استفاده از EC و NSGA-II برای مسئله به دست آمده است.

مطابق شکل ۲ و ۳، الگوریتم NSGA-II مرزهای پارتو را با شکاف ناچیز نسبت به EC تولید می کند. به عبارت دیگر در دستیابی به راه حل های نزدیک به بهینه موفق بوده و عملکرد قابل اعتمادی از خود نشان می دهد.

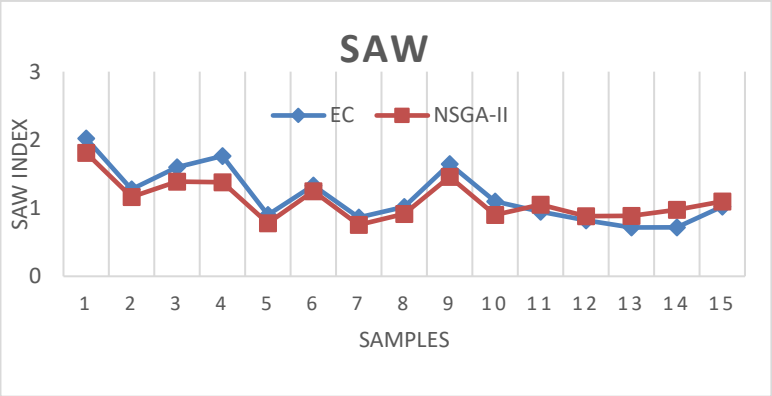
۶-۲- اندازه گیری عملکرد NSGA-II

در این بخش از تعدادی معیار برای ارزیابی عملکرد الگوریتم با دقت بالاتر اســـتفاده شـــده اســـت. میانگین فاصـــله ایده آل (MID)، متریک فضا (SM)، متریک تنوع (DM) و وزن افزودنی ساده (SAW) برای مرزهای پارتو به دست آمده توسط EC و NSGA-II تعریف و محاسبه شده است.

بر این اساس، NSGA-II در یافتن مرزهای پارتو نزدیک به مرزهای بهینه با روش EC دقیق است

۱۵ کمان درشبکه پیش بینی شد. مقدار معیارها در هر یک از ۱۵ مسئله محاسبه گردید. هر دو رویکرد بر این اساس، یعنی NSGA-II در یافتن مرزهای پارتو نزدیک به مرزهای بهینه با روش EC بسیار نزدیک است

علاوه بر این، برای تجزیه و تحلیل کلی عملکرد NSGA-II، مقایسـه اندازه گیری SAW در شـکل ۴ ارائه شـده اسـت. این شـکل همچنین نزدیکی راه حل های پارتو توسـط NSGA-II به راه حل های بهینه پارتو را ثابت می کند. در نتیجه، NSGA-II پیشنهادی می‌تواند در حل مشکلات بزرگی که EC قادر به حل آن‌ها در محدوده زمانی خاص نیست، قابل اعتماد باشد.



شکل ۴. اندازه گیری **SAW** برای مسائل کوچک و متوسط.

الگوریتم NSGA-II پیشـنهادی، به خصـوص زمانی که اندازه مسـاله افزایش می‌یابد، عملکرد بهتری نسـبت به حل دقیق(EC) نشـان می‌دهد. در چنین موقعیتی، NSGA-II پیشـنهادی می تواند بسـیار مفید و قابل اعتماد باشـد. علاوه بر این، جدول ۳ زمان محاسباتی روش ها را برای یک مسئله نشان می دهد. بدیهی است که با افزایش اندازه مسئله، زمان محاسباتی روش EC به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد تا جایی که نتواند مشکل بزرگ را در ۳۶۰۰ ثانیه حل کند. با این حال، NSGA-II پیشـنهادی قادر به حل مشکلات بزرگ در یک زمان معقول است.

Problem	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
EC	0.2	4.3	13.1	17.2	66.9	112.4	549.7	1233	2416	3491	-	-	-	-	-
NSGA-II	13.5	29.4	44.1	60	94.5	112.9	163.2	169.2	181.7	221.5	245.7	266.3	297.6	310.7	350.1

جدول ۳ زمان محاسباتی روش ها را برای هر مسئله

۷- نتیجه گیری، بینش مدیریتی و پیشنهاد کارهای آتی

این مقاله یک طراحی شبکه راه آهن چند دوره ای را با توسعه یک مدل جدید برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه (MILP) مورد مطالعه قرار داد. جنبه های مختلف اقتصادی مرتبط با این مشکل از جمله هزینه های مستقیم/غیر مستقیم و هزینه های عملیاتی و ساخت در مدل در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، این مدل توانست اثرات زیست محیطی را کاهش دهد. برای غلبه بر عدم قطعیت تقاضا، یک رویکرد بهینه‌سازی قوی مبتنی بر عدم قطعیت بازه‌ای استفاده شد. سپس، مدل همتای قوی مسئله توسعه و مورد بحث قرار گرفت. مدل با استفاده از روش ε-محدودیت (EC) حل شد. با توجه به پیچیدگی مدل قوی، یک فراابتکاری کارآمد، یعنی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط NSGA-II ، برای مقابله با مسائل با اندازه بزرگ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج محاسباتی کارایی NSGA-II را در نمونه‌های کوچک و متوسط ثابت کرد، زیرا می‌توانست راه‌حل‌های پارتو تقریباً بهینه را بیابد. در نتیجه، NSGA-II پیشنهادی می‌تواند برای حل نمونه‌های با اندازه بزرگ در زمان بسیار کوتاهی مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه همچنین می تواند کمکی به مدیران و تصمیم گیران این حوزه باشد. ابتدا، با ایجاد مرزهای پارتو، تضاد بین هزینه و انتشار را نشان دادیم. این به این معنی است که مقدار هزینه بالاتر منجر به میزان انتشار کمتر می شود. در اینجا، بسته به دیدگاه مدیران، می توان هر یک از راه حل های پارتو را به عنوان راه حل این مشکل انتخاب کرد. اگر مدیر بر هزینه های کمتر اصرار کند، یک راه حل پارتو از سمت چپ نمودار انتخاب می شود. در مورد مدیر دوستدار محیط زیست، راه حل پارتو از سمت راست منطقی تر است. بنابراین تصمیم گیری را برای مدیران با توجه به دیدگاه و خط مشی آنها تسهیل کرده است. دوم، بحث بر سر تقویت امکانات موجود یا ایجاد تاسیسات جدید همیشه بحث برانگیز بوده است. این مطالعه بر اساس داده های واقعی قادر به اتخاذ چنین تصمیمی است. به عنوان مثال، افزایش ظرفیت توسط مدل زمانی پیشنهاد می شود که خطوط متعددی در دسترس هستند اما نمی توانند به طور کامل تقاضا را برآورده کنند. از سوی دیگر، زمانی که تعداد مناسبی از امکانات نسبت به تقاضا وجود ندارد، ایجاد خط جدید توصیه می شود

همانطور که در بخش‌های مختلف توضیح داده شد، بیان گردید که از میان پروژه‌های منتخب، مدلی چند دوره‌ای اجرا می‌شود تا حالت بهینه اجرای پروژه‌ها مشخص شود. مدل ریاضی مساله مورد نظر در فصل سوم شرح داده شد.

در این راستا و در رویکرد دوم برای مدل سازی، مدل ارایه شده برای توالی زمانی اجرای طرحهای ریلی که در حالت قطعی بود توسعه یافت. مولفه اصلی پایداری یعنی جنبه های اقتصادی و زیست محیطی و همچنین عدم قطعیت در تقاضا مدنظر قرار گرفت.

با رویکرد بهینه سازی استوار(Robust) مدل برای یک شبکه با تعداد محدودی کمان و گره در دو حالت حل شد. یکی به روش حل دقیق و دیگری روش فرا ابتکاری. نتایج تا حد زیادی هم راستا شد. لذا در صورت ورود حجم بالای کمانهای شبکه حمل ونقل و به جای حل دقیق که بسیار زمانبر است، تابع چند هدفه را با رویکرد فرا ابتکاری NSGA-II حل کنیم، با تقریب مناسبی به جواب نزدیک است.

با توجه به محدودیت های اصلی مطالعه، پیشنهادهای زیر را می توان برای جهت گیری های تحقیقاتی آتی در نظر گرفت:

- توسعه سایر تکنیک های مدیریت عدم قطعیت، مانند برنامه ریزی فازی (کلانتری و همکاران، ۲۰۲۳)، برای مقایسه با بهینه سازی قوی پیشنهادی،
- استفاده از الگوریتم‌های معروف دیگر، مانند الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری چند هدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) برای مقایسه با NSGA-II پیشنهادی،(Tirkolaee et al., 2021b) (MOGWO)

- پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی، یادگیری ماشین و ابزارهای یادگیری عمیق برای مقابله با پیش‌بینی‌های تقاضای مؤثر (Nguyen et al., 2018; Turkolaee et al., 2021c; Goli et al., 2021).
- یک مطالعه موردی واقعی می تواند برای نشان دادن کاربرد این مدل در دنیای واقعی و دریافت بینش عمیق تر انجام شود.

منابع

۱. شربتی نوکنده، مرتضی. (۱۳۹۹). تحلیل عوامل و استراتژی‌های مهم توسعه حمل و نقل در مناطق لجستیکی (مطالعه موردی: منطقه مرزی اینچه‌برون). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته عمران گرایش راه و ترابری. موسسه آموزش عالی لامعی گرگانی.

۲. سیدوکیلی، سیدعلیرضا. (۱۳۹۸). مدلسازی توالی زمانی اجرای پروژه‌ها در مساله طراحی شبکه ریلی. رساله دکتری رشته مهندسی راه‌آهن گرایش خط و سازه‌های فنی. دانشگاه علم و صنعت.

۳. امیری، مقصود. دارستانی ، احمد. محبوب‌قدسی، مهسا. (۱۴۰۰). تصمیم‌گیری چندمعیاره. انتشارات دانشگاهی کیان. تهران.

٤. قدسی‌پور، حسن. (۱۳۹۷). مباحثی در تصمیم گیری چند معیاره: برنامه ریزی چندهدفه (روش های وزن دهی بعد از حل). انتشارات دانشگاه امیرکبیر. تهران.

٥. محمودی، رضا. (۱۳۹۸). طراحی شبکه حمل و نقل شهری پایدار با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها و نظریه بازی‌ها. رساله دکتری، رشته مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان.

٦. رییس، ابوالفضل. (۱۳۹۹). ارائه مدلی جهت انتخاب و متعادل سازی سبد پروژه های شرکت های پیمانکاری رتبه یک با در نظر گرفتن ریسک پروژه ها با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه خاتم.

۷. شاوردی، مرضیه. (۱۳۹۹). ارائه مدل بهینه‌سازی سبد طرح‌های صندوق‌های توسعه فناوری (مورد مطالعه: صندوق نوآوری و شکوفایی). رساله دکتری، رشته مدیریت، سیاست‌گذاری علم و فناوری. دانشگاه علم و صنعت.

۸. گلستانه، رامین. (۱۳۹۷). عنوان: ارائه مدل چند هدفه ریاضی به منظور تشکیل پورتفوی سرمایه‌گذاری بانک‌ها با رویکرد شاخص‌های اقتصاد مقاومتی. رساله دکتری، رشته مهندسی صنایع، مرکز تحصیلات تکمیلی.

۹. شریفی قزوینی, محمدرضا, قضاوتی, وحیدرضا, ماکوئی, احمد, رئیسی, صدیق. (۱۳۹۷). ارائه مدلی مفهومی برای انتخاب پرتفوی بهینهٔ پروژه‌ها با رویکرد ترکیبی کارایی-ریسک مبتنی‌بر روش ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب ((NSGAII. مدیریت تولید و عملیات, ۹(۲), ۱۳۹-۱۵۷.

۱۰. باقری، کمال. (۱۳۹۹). بهینه‌سازی سبد پروژه با در نظر گرفتن تعاملات پروژه و سطوح رضایت چندگانه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت.

11. Dolinayova, A.; Kanis, J.; Loch, M. Social and economic efficiency of operation dependent and independent traction in rail freight. *Procedia Eng.* **2016**, *134*, 187–195.
12. Aydin, N.S.; Tirkolaee, E.B. A systematic review of aggregate production planning literature with an outlook for sustainability and circularity. *Environ. Dev. Sustain.* **2022**, 1–42. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02304-8.
13. Zhou, W.; You, X.; Fan, W. A mixed integer linear programming method for simultaneous multi-periodic train timetabling and routing on a high-speed rail network. *Sustainability* **2020**, *12*, 1131.
14. Seyedvakili, S.A.; Nasr Azadani, S.M.; Zakeri, J.A.; Shafahi, Y.; Karimi, M. New model for the railway network design problem. *J. Transp. Eng. Part A Syst.* **2018**, *144*, 04018070.
15. Zeng, Y.; Ran, B.; Zhang, N.; Yang, X. Estimating the Price Elasticity of Train Travel Demand and Its Variation Rules and Application in Energy Used and CO2 Emissions. *Sustainability* **2021**, *13*, 475.
16. Dolinayova, A.; Zitricky, V.; Cerna, L. Decision-making process in the case of insufficient rail capacity. *Sustainability* **2020**, *12*, 5023.
17. Bertsimas, D.; Sim, M. The price of robustness. *Oper. Res.* **2004**, *52*, 35–53.

18. Kuby, M.; Xu, Z.; Xie, X. Railway network design with multiple project stages and time sequencing. *J. Geogr. Syst.* **2001**, *3*, 25–47.
19. Lin, B.; Xu, Z.; Huang, M.; Guo, P. An optimization model to railroad network designing. *J. China Railw. Soc.* **2002**, *24*, 1–6.
20. Yan, H.; Lin, B.; Liang, D. An optimization model of railroad network design and investment including multiple projects in several five-year plans. *J. China Railw. Soc.* **2007**, *29*, 19–24.
21. Arnold, P.; Peeters, D.; Thomas, I. Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2004**, *40*, 255–270.
22. Pazour, J.A.; Meller, R.D.; Pohl, L.M. A model to design a national high-speed rail network for freight distribution. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2010**, *44*, 119–135.
23. Qiang, S.; Qingyun, W.; Yongling, G. Multi-period bi-level programming model for regional comprehensive transport network design with uncertain demand. *J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol.* **2011**, *11*, 111–116.
24. Laporte, G.; Marin, A.; Mesa, J.A.; Perea, F. Designing robust rapid transit networks with alternative routes. *J. Adv. Transp.* **2011**, *45*, 54–65.
25. Marín, Á.; García-Ródenas, R. Location of infrastructure in urban railway networks. *Comput. Oper. Res.* **2009**, *36*, 1461–1477.
26. Marín, Á.; Mesa, J.A.; Perea, F. Integrating robust railway network design and line planning under failures. In *Robust and Online Large-Scale Optimization*; Models and Techniques for Transportation Systems; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; pp. 273–292.
27. Kermansshahi, S.; Shafahi, M.; Mollanejad, Y.; Zangui, M. Rapid transit network design using simulated annealing. In Proceedings of the 12th World Conference of Transportation Research, Lisbon, Portugal, 11–15 July 2010; pp. 11–15.
28. García-Archilla, B.; Lozano, A.J.; Mesa, J.A.; Perea, F. GRASP algorithms for the robust railway network design problem. *J. Heuristics* **2013**, *19*, 399–422.
29. Canca, D.; De-Los-Santos, A.; Laporte, G.; Mesa, J.A. An adaptive neighborhood search metaheuristic for the integrated railway rapid transit network design and line planning problem. *Comput. Oper. Res.* **2017**, *78*, 1–14.
30. Wang, B.; Huang, J.; Xu, J. Capacity optimization and allocation of an urban rail transit network based on multi-source data. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.* **2019**, *10*, 373–383.
31. Alireza Seyedvakili, S.; Zakeri, J.-A.; Nasr Azadani, S.M.; Shafahi, Y. Long-term railway network planning using a multiperiod network design model. *J. Transp. Eng. Part A Syst.* **2020**, *146*, 04019054.
32. Lin, B.; Liu, C.; Wang, H.; Lin, R. Modeling the railway network design problem: A novel approach to considering carbon emissions reduction. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2017**, *56*, 95–109.
33. Tirkolaee, E.B.; Goli, A.; Weber, G.-W.; Szwedzka, K. A novel formulation for the sustainable periodic waste collection arc-routing problem: A hybrid multi-objective optimization algorithm. In *Logistics Operations and Management for Recycling and Reuse*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 77–98.
34. Babaeinesami, A.; Tohidi, H.; Ghasemi, P.; Goodarzian, F.; Tirkolaee, E.B. A closed-loop supply chain configuration considering environmental impacts: A self-adaptive NSGA-II algorithm. *Appl. Intell.* **2022**, *52*, 13478–13496.
35. Ghasemi, P.; Goodarzian, F.; Abraham, A. A new humanitarian relief logistic network for multi-objective optimization under stochastic programming. *Appl. Intell.* **2022**, *52*, 13729–13762.
36. Tirkolaee, E.B.; Goli, A.; Weber, G.-W. A robust two-echelon periodic multi-commodity RFID-Based location routing problem to design petroleum logistics networks: A case study. In Logistics and Supply Chain Management: 7th International Conference, LSCM 2020, Tehran, Iran, 23–24 December 2020; Revised Selected Papers 7; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 3–23.
37. Hatefi, S.M.; Jolai, F.; Torabi, S.A.; Tavakkoli-Moghaddam, R. Reliable design of an integrated forward-revere logistics network under uncertainty and facility disruptions: A fuzzy possibilistic programing model. KSCE J. Civ. Eng. 2015, 19, 1117–1128.
38. Goli, A.; Tirkolaee, E.B.; Weber, G.-W. A perishable product sustainable supply chain network design problem with lead time and customer satisfaction using a hybrid whale-genetic algorithm. In *Logistics Operations and Management for Recycling and Reuse*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 99–124.
39. Tirkolaee, E.B.; Goli, A.; Ghasemi, P.; Goodarzian, F. Designing a sustainable closed-loop supply chain network of face masks during the COVID-19 pandemic: Pareto-based algorithms. *J. Clean. Prod.* **2022**, *333*, 130056.
40. Hajibabaie,M.; Lotfi, M.M. Fuzzy bi-objective inventory-routing problem for blood products in a hospital network during disasters: Two multi-objective meta-heuristic approaches. *Int.J. Logist. Syst. Manag.* **2021**, *39*, 22–51.

41. Kalantari, H.; Badiee, A.; Dezhboro, A.; Mohammadi, H.; Tirkolaee, E.B. A fuzzy profit maximization model using communities viable leaders for information diffusion in dynamic drivers collaboration networks. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* **2022**, *31*, 370–379.
42. Nguyen, H.; Kieu, L.M.; Wen, T.; Cai, C. Deep learning methods in transportation domain: A review. *IET Intell. Transp. Syst.* **2018**, *12*, 998–1004.
43. Tirkolaee, E.B.; Sadeghi, S.; Mooseloo, F.M.; Vandchali, H.R.; Aeini, S. Application of machine learning in supply chain management: A comprehensive overview of the main areas. *Math. Probl. Eng.* **2021**, *2021*, 1476043.
44. Goli, A.; Tirkolaee, E.B.; Weber, G.-W. An integration of neural network and shuffled frog-leaping algorithm for CNC machining monitoring. *Found. Comput. Decis. Sci.* **2021**, *46*, 27–42.