فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۴، ص. ۵۴۱۵-۵۳۹۵
مقاله علمی-پژوهشی

توسعه مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه ناهمگن ظرفیت‌دار با کراس داک چند درب با درنظرگرفتن پنجره زمانی

فاطمه خواجه‌سعیدی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سید فرید قنادپور (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: ghannadpour@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

چکیده

بسیاری از شرکت‌های صنعتی به منظور بهبود عملکرد خود در عملیات پرهزینه توزیع از کراس داک به عنوان یک استراتژی لجستیکی استفاده می‌کنند. در کراس داک کالاهای جمع‌آوری شده توسط وسایل نقلیه در درب‌های ورودی کراس داک با حداقل فضای ذخیره‌سازی تخلیه می‌شوند و پس از صرف زمان پردازش کوتاهی در درب‌های خروجی بارگیری می‌شوند. مسائل اصلی حوزه لجستیک و حمل ونقل که در سطح عملیاتی کراس داک بررسی می‌شوند شامل مسائل مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه است که تاثیر بسزایی در کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی سیستم‌های توزیع دارد. در این پژوهش، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه ناهمگن ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی توسعه داده شده است. اهداف این مدل شامل حداقل‌سازی هزینه‌های حمل و نقل و کاهش زمان رسیدن وسایل نقلیه به کراس داک است. در این مدل، نقش کراس‌داک به‌عنوان یک نقطه تجمیع و توزیع بارها در بهینه‌سازی مسیرها و زمان‌بندی حرکت وسایل نقلیه مورد توجه قرار گرفته است. برای حل مدل پیشنهادی و مواجه با پیچیدگی‌های مسئله از الگوریتم AUGMECON2 استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی کراس داک، زمانبندی کراس داک، وسایل نقلیه ناهمگن، پنجره زمانی، مدل ریاضی چند هدفه

۱. مقدمه

در بازار رقابتی جهانی امروزه، شرکت‌ها به دنبال کاهش مدت چرخه سفارش محصولات خود برای بهبود رضایت مشتری هستند. برای مثال آمازون و والمارت با ناوگان حمل و نقل خود از کراس داک به عنوان یک مزیت رقابتی در بازار برای کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری موجودی و حمل و نقل و در عین حال ارائه خدمات بعدی یا مشابه بهره برده‌اند. طبق مطالعه انجام شده تقریبا حدود ۳۰ درصد از قیمت هر محصول به دلیل توزیع آن است [Apte and Viswanthan, 2000]. یکی از موضوعات اصلی که برای مدت زمان طولانی در مدیریت زنجیره تامین مورد بررسی قرار گرفته است استفاده از سیستم کراس داک به عنوان مرکز توزیع است. کراس داک‌ها از طریق بهینه سازی هزینه‌های عملیاتی و زمان، رضایت مشتری را تضمین می کنند و افزایش می‌دهند [Mousavi and Vahdani, 2014]. کراس داک برای سیستم‌های کلان با مقدار تقاضای بالا کاربرد زیادی دارد. در سیستم کراس داک کالاهای جمع‌آوری شده در درب‌های ورودی تخلیه می‌شود. آن‌ها پس از بسته‌بندی مجدد بر اساس مقاصد مشترک خود به درهای خروجی کراس داک منتقل می‌شوند و ظرف مدت زمان کمتر از ۲۴ ساعت پس از ورود، کالاها بر روی وسایل نقلیه بارگیری شده و به مقاصد ارسال می‌شوندChen and Guo, 2006]. [مطالعات زیادی در مورد کراس داک انجام شده است. این مطالعات شامل جنبه های استراتژیک مانند تعیین مکان کراس داک در شبکه توزیع و همچنین شکل کراس داک و جنبه‌های عملیاتی مانند حمل و نقل و زمانبندی وسایل نقلیه ورودی و خروجی و فرآیندهای تثبیت در داخل کراس داک است.

باتوجه به مطالعات انجام شده توسط [Belle, Valckenaers, and Cattrysse, 2012] به طور کلی مطالعات مطالعات انجام شده در زمینه کراس داک را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد: تصمیمات مربوط به مکان کراس داک در یک شبکه توزیع، نصب تأسیسات کراس داک، تخصیص کامیون‌ها به درها، حمل و نقل وسایل نقلیه ورودی و خروجی، زمانبندی وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی منابع در داخل تأسیسات کراس داک و تخلیه/ بارگیری محصولات در/از درهای ورودی/خروجی توسط وسایل نقلیه.

تمرکز اصلی این پژوهش تصمیمات مربوط به حمل و نقل و زمانبندی وسایل نقلیه است. مسئله حمل و نقل به دنبال یافتن بهترین مسیر برای و بهینه‌سازی مسیریابی برای وسایل نقلیه ورودی و خروجی است. مسئله زمانبندی وسایل نقلیه سعی می کند وسایل نقلیه ورود ی و خروجی را به طوربهینه به درهای کراس داک اختصاص دهد و ترتیب پردازش وسایل نقلیه را در هر در کراس داک تعیین کند [Boysen, Fliedner, and Scholl, 2010].

در اکثر مطالعات مربوط به کراس داک به دلیل پیچیدگی مدلسازی کراس داک به صورت تک درب درنظر گرفته می‌شود. همچنین در این مطالعات وسایل نقلیه همگن فرض می‌شوند و لزوم درنظر گرفتن پنجره‌ی زمانی در هر گره از تامین‌کنندگان، خرده فروشان و مشتریان نادیده گرفته می‌شود. با تعیین پنجره‌ی زمانی می‌توان از جریمه‌های ناشی از تاخیر در فرآیند جمع‌آوری و تحویل جلوگیری کرد [Cota, Nogueira, Juan and Ravettiani, 2022]. بسیاری از سیستم‌های حمل و نقل در دنیای واقعی از ناوگان‌های ناهمگن استفاده می‌کنند. مدلسازی این ناهمگنی در مسائل مسیریابی، نتایج بهینه‌تری ارائه می‌دهد. [Yu, Jewpanya, Perwira Redi and Tsao, 2022].

در سال‌های اخیر و با توجه به اهداف گوناگونی که برای مسئله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه می‌توان در نظر گرفت، مطالعات مسیریابی و زمانبدی با کراس داک به دنبال طرح اهداف چندگانه برای بهینه‌سازی هستند که این امر موجب پیچیدگی مدلسازی ریاضی شده است. در این مطالعه به مدل ریاضی چندهدفه برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل و زمان عملیات

پرداخته شده است و یک رویکرد حل دقیق برای بهینه‌سازی آن مطرح شده است.

در ادامه این مقاله، ابتدا مرور ادبیات مرتبط با موضوع ارائه می شود. سپس، مدل ریاضی پیشنهادی تشریح شده و روش حل آن توضیح داده خواهد شد. در نهایت، نتایج عددی و تحلیل کارایی مدل ارائه شده و جمع‌بندی مطرح می‌شود.

۲. ادبیات پژوهش

استفاده روزافزون ازتکنیک‌های کراس داک و اهمیت مشکلات مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه در مدیریت لجستیک یک شرکت، پژوهشگران را برانگیخته تا راه‌های جدیدی را برای بهبود عملکرد این دو مشکل بررسی کنند. مطالعات اولیه در مورد مسیریابی وسایل نقلیه و مشکل زمانبندی در کراس داک توسط لی و همکاران [Lee et al. 2006] مطرح شد. وحدانی و همکاران[Vahdani et al. 2012] یک فراابتکاری جدید از جمله بهینه‌سازی شنای ذرات، بازپخت شبیه‌سازی شده و جستجوی متغیر همسایگی را برای حل مشکل مسیریابی و زمان‌بندی کراس داک در نظر گرفتند. از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ دوندو و همکاران [Dondo et al. 2013, 2014, 2015] قرمول‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) را ارائه کردند که هزینه حمل و نقل را به طور همزمان با برنامه زمانبندی و مسیرهای تحویل به حداقل می‌رساند. آنها به بررسی کراس داک چند درب پرداختند. در ادامه این مطالعات، در این پژوهش تخصیص همزمان کامیون‌ها به درهای کراس‌داک همراه با مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه بررسی شده و مدل توسعه داده شده است. در این مدل تأثیر همزمان درنظر گرفتن توالی کامیون‌ها و تخصیص درها بر کیفیت زمان‌بندی و مسیریابی تحلیل شده است. همچنین به منظور بهبود زمان‌بندی عملیات جمع‌آوری و تحویل کالا، محدودیت‌های پنجره زمانی در مدل اعمال شده است.

رهبری و همکاران [Rahbari et al. 2017] برای مسئله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه با کراس داک یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نظر گرفتند که زمان بارگیری/ تخلیه در دربهای ورودی/ خروجی متفاوت است.

پورشیرازی و همکاران [Pour Shirazi et al. 2017] مدلی را بررسی کردند که هدف آن بهینه‌سازی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با درنظرگرفتن انبار میانی و امکان ارسال جزئی سفارشات به مشتریان است. در این مدل، دو نوع فرآیند توزیع کالا در نظر گرفته شده: وسایل نقلیه پس از ترک انبار، محصولات را از تامین‌کنندگان مختلف جمع‌آوری کرده و به انبار بازمی‌گردانند. سپس کالاها در انبار پردازش، جداسازی و ادغام شده و در ادامه، یا به صورت مستقیم از کارخانه‌ها به مشتریان ارسال می‌شوند یا از طریق انبار به صورت تجمیعی توزیع می‌گردند. برای حل مسئله، از دو الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات و جستجوی ممنوع و همچنین یک الگوریتم ابتکاری بر پایه جستجوی همسایگی استفاده شده است.

جوانفر و همکاران [Javanfar et al. 2017] یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله مکان‌یابی–مسیریابی با استفاده از انبارهای عبوری در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان، انبارهای عبوری و مشتریان ارائه کرده‌اند. در این مدل، چندین مرکز انبار عبوری، تأمین‌کننده، مشتری، وسیله نقلیه و نوع کالا در نظر گرفته شده است. انبارهای عبوری و وسایل نقلیه دارای محدودیت ظرفیت بوده و امکان برداشت و تحویل چندباره کالا وجود دارد. هدف مدل، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های راه‌اندازی انبارهای عبوری و هزینه‌های حمل و نقل شامل هزینه‌های توزیع و هزینه‌های عملیاتی وسایل نقلیه می باشد.

دلاوری و همکاران [Delavari et al. 2017] برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی در سیستم‌های کراس‌داک، راهکارهایی به‌منظور تعیین زمان حرکت وسایل نقلیه و تضمین تحویل به‌موقع محصولات به مشتریان با حداقل هزینه، شامل هزینه‌های نگهداری، حمل‌ونقل، زودرسی و دیرکرد، ارائه داده‌اند. در این مدل، فرض وجود پنجره‌های زمانی باعث می‌شود که

سرویس‌دهی خارج از بازه مجاز نبوده و برای هر واحد تخطی از زمان‌بندی تعیین شده، جریمه‌ای اعمال شود. با توجه به ماهیت مسئله و به‌منظور کاهش فضای جست‌وجو، از دسته‌بندی مشتریان در نواحی مختلف استفاده شده است. علاوه بر این، برای حل مسئله از سه روش فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی مورچگان بهره گرفته شده است.

نصیری و همکاران [Nasiri et al. 2018] انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش را در مسئله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه با کراس داک بررسی کردند. آن‌ها یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) را فرموله کردند و برای حل آن از الگوریتم حل دو مرحله‌ای استفاده شده است.

حسنی گودرزی و همکاران [Hasanigodarzi et al. 2018] تحویل گسسته را در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با کراس داک مطرح کردند که زمانبندی وسایل نقلیه را برنامه‌ریزی می‌کند. اهداف این مسئله شامل دو هدف به حداقل رساندن کل هزینه عملیات و بهینه کردن مجموع حداکثر زودرسی و تأخیر است.

علینقیان و همکاران [Alinaghian et al. 2019] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) ارائه شده است که به طور همزمان به تخصیص سکو و مسیریابی وسایل نقلیه می‌پردازد. با توجه به اهمیت زمان‌بندی خدمات مشتریان، در این مدل برای مشتریان، پنجره زمانی نرم نیز لحاظ شده است. هدف این مدل کاهش هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل و نقل بین گره‌ها و حمل و نقل داخل کراس داک است. برای حل این مدل یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسعه داده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج به دست آمده در مسائل کوچک‌مقیاس با روش‌های دقیق و الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه مقایسه شده‌اند. همچنین در مسائل بزرگ‌مقیاس، مقایسه عملکرد بین الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه صورت گرفته است.

کبودانی و همکاران [Kaboudaniet al. 2020] پژوهشی ارائه دادند که برای اولین‌بار لجستیک رو به جلو و معکوس را در یک مدل یکپارچه زمانبندی و مسیریابی وسیله نقلیه با یک شبکه توزیع به مرکزیت کراس داک بررسی کرده است. برای پرداختن با لجستیک رو به جلو و معکوس دو استراتژی مدل ریاضی ارائه شده است. به این ترتیب به منظور یافتن بهترین مسیریابی برای انتقال محصولات از تامین‌کنندگان به خرده‌فروشان و سپس بازگرداندن محصولات از خرده‌فروشان به تامین‌کنندگان از طریق کراس داک با حداقل هزینه حمل و نقل یک مدل ریاضی برای هر استراتژی ایجاد می‌شود. یک الگوریتم ابتکاری مبتنی‌بر بازپخت شبیه‌سازی شده برای بهینه‌سازی مدل ریاضی ارائه شده توسعه داده شده است.

گوناوان و همکاران [Gunawan et al. 2021] برای یافتن مجموعه‌ای از مسیرها جهت تحویل محصولات از مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان به مجموعه‌ای از مشتریان از طریق تأسیسات کراس‌داک، به گونه‌ای که هزینه‌های عملیاتی و حمل‌ونقل حداقل شده و ظرفیت خودروها و محدودیت‌های افق زمانی رعایت شود، مطالعه‌ای ارائه دادند. در این پژوهش، یک مدل ریاضی دو فازی مبتنی بر روش تولید ستون پیشنهاد شده است. فاز اول بر تولید مجموعه‌ای از مسیرهای کاندیدای امکان‌پذیر برای فرآیندهای جمع‌آوری و تحویل، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیقی تمرکز دارد که در آن از اپراتورهای تخریب و بازسازی برای کاوش مؤثر در فضای محله‌ها استفاده شده است. فاز دوم نیز بر حل مدل پارتیشن‌بندی مجموعه‌ها به منظور تعیین راه‌حل نهایی متمرکز شده است.

گوناوان و همکاران [Gunawan et al. 2022] در ادامه مطالعات خود، با توسعه مزایای سیستم کراس‌داک در زمینه لجستیک معکوس، یک مدل ریاضی برای به حداقل رساندن هزینه‌های جابجایی محصولات در یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی شامل تأمین‌کنندگان، کراس‌داک، مشتریان و خروجی‌ها ارائه دادند. برای حل نمونه‌های معیار، از روش الگوریتم

جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیقی و فرمول پارتیشن‌بندی مجموعه‌ها استفاده کرده‌اند.

شهابی شاهمیری و همکاران [Shahabi Shahmiri et al. 2021] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) چند هدفه برای مسئله زمانبندی و مسیریابی وسیله نقلیه برای محصولات فاسد شدنی، با در نظر گرفتن تحویل گسسته ارائه دادند. اهداف اصلی مسئله زمانبندی و مسیریابی وسیله نقلیه توسعه‌یافته توسط آن‌ها کاهش هزینه‌های توزیع، کاهش زمان پردازش توزیع و حداکثر کردن نرخ بهره‌برداری از ظرفیت شبکه کراس داک است. این مسئله با یک روش دقیق هیبریدی جدید حل شده است

کوتا و همکاران [Cota et al. 2022] یک مدل ریاضی برای مسئله زمانبندی و مسیریابی باز وسایل نقلیه پیشنهاد کردند. در مسئله مسیریابی باز وسایل نقلیه با کراس داک برگشت وسایل نقلیه که برای تحویل کالا به مشتری فرستاده شده‌اند به کراس داک الزامی نیست. در مطالعه‌ی آن‌ها زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی و مسیرهای کامیون‌های خروجی را تعیین می شود. در این مطالعه مشکل یکپارچه‌ای تجزیه و تحلیل می‌شود که زمانبندی وسایل نقلیه در کراس داک چند درب برنامه‌ریزی می‌کند. این مسئله با مسیریابی وسایل نقلیه باز ترکیب می‌شود و به این ترتیب سناریوهای عملی کراس داک را به میزان قابل ملاحظه‌ای غنی می‌کند. هدف این رویکرد به حداقل رساندن جریمه‌های ناشی از تاخیر در ارائه خدمات به مشتریان است. دو رویکرد برای حل مشکل در نظر گرفته شده است. ابندا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) برای بهینه‌سازی نمونه‌های کوچک ارائه شده است و در مرحله بعد، دو روش اکتشافی سازنده برای کمک به حل این دو مشکل به روشی یکپارچه پیشنهاد شده است.

زکریادیس و همکاران [Zachariadis et al. 2022] یک مطالعه جامع در زمینه زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار با در نظر گرفتن محدودیت‌های پردازشی کراس داک ارائه کرده‌اند. آن‌ها مسئله‌ای جدید را مطرح کرده‌اند که در آن، محدودیت فضای فیزیکی و منابع موجود در کراس داک در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ شده است. به طور خاص، در این پژوهش، ظرفیت پردازشی کراس داک به عنوان حداکثر میزان محموله‌هایی که می‌توانند به طور همزمان در فرآیند تخلیه، تثبیت و بارگیری قرار گیرند، تعریف شده است. از سوی دیگر، سیاست اولویت ورود، اولویت خروج برای کنترل جریان ورودی وسایل نقلیه به کراس داک در نظر گرفته شده است، که این موضوع تاکنون در ادبیات موضوع کمتر بررسی شده بود. پژوهشگران ابتدا یک مدل ریاضی برای این مسئله طراحی کرده و سپس با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جستجوی محلی به حل آن پرداختند. آزمایش‌های محاسباتی روی مجموعه داده‌های استاندارد و مجموعه داده‌های جدیدی که در این مطالعه تعریف شده‌اند، انجام شد. نتایج نشان داد که مدیریت ظرفیت پردازش در کراس داک تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه‌های حمل‌ونقل دارد. از نظر روش‌شناسی، این مسئله چالش‌های متعددی را به همراه دارد، به همین دلیل، پژوهشگران از دو رویکرد جایگزین شامل یک روش اکتشافی و یک مدل برنامه‌نویسی محدودیت برای بررسی امکان‌سنجی راه‌حل‌های پیشنهادی استفاده کرده‌اند.

سن و همکاران [Cen et al. 2023] با تمرکز بر محدودیت‌های بارگیری سه‌بعدی در برنامه‌ریزی مسیر وسایل نقلیه، مدل ریاضی جدیدی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) را برای زمان‌بندی و مسیریابی در سیستم‌های کراس داک ارائه کردند. آن‌ها شرایطی مانند امکان‌سنجی هندسی، پایداری بار، جهت‌گیری صحیح کالاها و محدودیت‌های مربوط به شکنندگی و انباشتگی را بررسی کردند. این مطالعه شامل دو فاز عملیاتی اصلی است: فرآیند جمع‌آوری، که شامل حمل کالا از تامین‌کنندگان به کراس داک و بازگشت مجدد به کراس داک است، و فرآیند تحویل، که کالاها را از کراس داک به مشتریان می‌رساند. پژوهشگران برای حل این مسئله یک الگوریتم اکتشافی ترکیبی طراحی کردند که روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی را با الگوریتم بسته‌بندی جستجوی محلی

چندهدفه ادغام کرده است. برای افزایش کارایی، در این الگوریتم یک استراتژی مدیریت ذخیره‌سازی در کراس داک نیز در نظر گرفته شده است.

اکبری و همکاران [Akbari et al. 2023] به منظور طراحی یک شبکه زنجیره تأمین امداد بشردوستانه، مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه با اتصال متقاطع ارائه داده‌اند. برای حل این مدل، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی تحت سلطه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه بیشترین تأثیر را بر تابع هدف اول (نسبت بیماران به کل مجروحین) و پس از آن بر تابع هدف دوم (کمبود منابع) داشته است، در حالی که اثر آن بر تابع هزینه کل نسبتاً کمتر بوده است. همچنین، مشخص شد که هزینه حمل از تأمین‌کننده به انبار عبوری نسبت به هزینه حمل مستقیم از تأمین‌کننده به توزیع‌کننده اثرگذاری بیشتری بر هزینه‌های کل دارد و مدل نسبت به تغییرات این هزینه حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش هزینه حمل از توزیع‌کننده به انبار عبوری منجر به افزایش نسبت بیماران به کل مجروحین و کمبود منابع شده و در نتیجه باعث واکنش منفی مدل گردیده است.

سوزا و همکاران [Souza et al. 2024] به بررسی زمان‌بندی درخواست‌های تخلیه و بارگیری مجدد در فرآیند بارگیری متقابل پرداخته‌اند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با کراس داک توسعه داده‌اند. آن‌ها این مسئله را تحت عنوان مسیریابی وسایل نقلیه با کراس داک و زمان‌بندی در ایستگاه کراس داک معرفی کرده‌اند. در این مطالعه، یک الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر عمومی برای حل مسئله ارائه شده که با استفاده از آن، برنامه‌ریزی کارآمدتر و بهینه‌تری برای جریان ورودی و خروجی در کراس داک حاصل می‌شود.

در ادامه جدول خلاصه مقالات آورده شده است.

جدول ۱. لیست مطالعات انجام شده

نویسندگان	ظرفیت	پنجره زمانی	وسایل نقلیه ناهمگن	کراس داک چند درب	توالی وسایل نقلیه در درب‌ها	چند هدفه
Vahdani et al[19]	✓					
Dondo et al[6]	✓			✓		✓
Dondo et al[7]	✓		✓	✓		✓
Rahbari et al[16]	✓	✓	✓	✓		
Nasiri et al[14]	✓	✓	✓	✓		✓
H.Godarzi et al[8]	✓	✓				✓
Kaboudani et al[10]	✓					
Shahabi et al[17]	✓	✓	✓	✓		✓
Cota et al[15]		✓		✓		
Zachariadet al[22]	✓					
Cen et al[3]	✓	✓				
Souza et al[18]		✓		✓		✓
تحقیق حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓

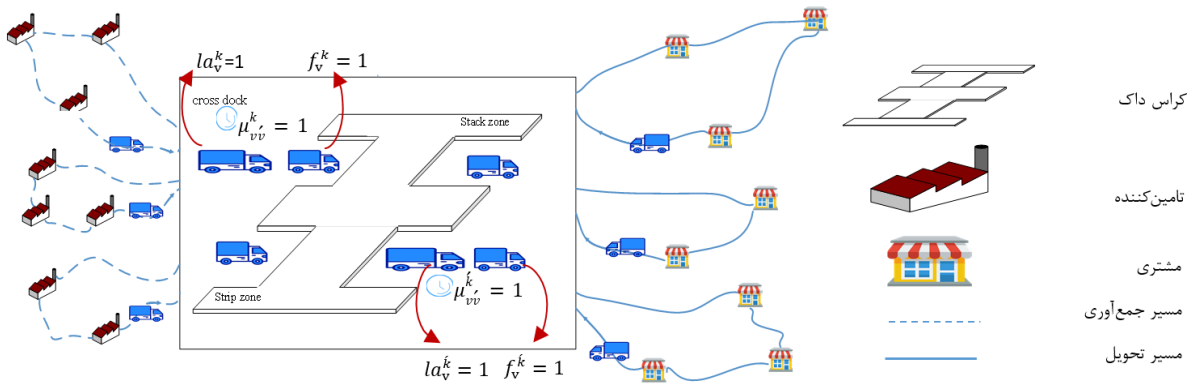
با توجه به مرور ادبیات و جدول خلاصه مقالات، در اکثر مطالعات پیشین به دلیل پیچیدگی مسئله، فرآیندهای جمع‌آوری و تحویل کالا به‌طور همزمان مورد توجه قرار نگرفته و معمولاً این فرآیندها به‌صورت جداگانه یا تنها یکی از آن‌ها بررسی شده‌اند. همچنین، به علت پیچیدگی مدل، در اغلب پژوهش‌ها، کراس‌داک عمدتاً به‌صورت تک‌درب مدل‌سازی شده است، در حالی که در محیط‌های واقعی، استفاده از کراس‌داک‌های چنددرب رایج می‌باشد. علاوه بر این، تحلیل یکپارچه‌ی زمان‌بندی، مسیریابی و تخصیص وسایل نقلیه و تاثیر متقابل این عوامل بر یکدیگر در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته و معمولاً تنها ترکیبی از دو مؤلفه بررسی شده است. در این پژوهش، برای رفع شکاف‌های شناسایی‌شده، اقدامات زیر صورت گرفته است.

- پرداختن همزمان به فرآیند جمع‌آوری و تحویل کالا.
- مدلسازی مسئله بر مبنای کراس‌داک چنددرب و تخصیص وسایل نقلیه به درب‌ها.
- تحلیل همزمان مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص وسایل نقلیه با درنظرگیری اثرات متقابل آن‌ها.
- بررسی توالی سرویس‌دهی وسایل نقلیه برای تخلیه و بارگیری مجدد کالا و تاثیر آن بر زمان‌بندی.
- مدلسازی تخصیص وسایل نقلیه با تمرکز بر بهینه‌سازی تابع هدف زمان.
- لحاظ نمودن حداقل‌سازی زمان رهاسازی وسایل نقلیه به عنوان تابع هدف.

۳. روش پژوهش

۳-۱ تعریف مسئله

در این بخش، یک چارچوب مدل‌سازی برای بهینه‌سازی مسئله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه در کراس داک ارائه می‌شود که شامل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی وسایل نقلیه و اختصاص وسایل نقلیه به درب‌های ورودی و خروجی است. در این مسئله، مجموعه‌ای از نقاط بارگیری و تحویل در نظر گرفته شده است که در آن، نقاط بارگیری نمایانگر تامین‌کنندگان و نقاط تحویل نشان‌دهنده مشتریان هستند. هر تأمین‌کننده مقدار مشخصی از یک محصول را عرضه می‌کند که باید توسط وسایل نقلیه جمع‌آوری شود، و هر مشتری مقدار معینی از همان محصول را درخواست می‌کند که باید به او تحویل داده شود.



شکل ۱. فرآیند بارگیری و تحویل

عملیات بارگیری و تحویل توسط ناوگانی از وسایل نقلیه ناهمگن با ظرفیت‌های مختلف انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فرآیند حمل‌ونقل هر وسیله نقلیه شامل مراحل زیر است: خروج وسیله نقلیه از کراس داک، جمع‌آوری محصولات از تأمین‌کنندگان، بازگشت به کراس داک و تخلیه محصولات، پس از اتمام عملیات تخلیه، حرکت وسیله نقلیه به سمت درب خروجی کراس داک جهت بارگیری محصولات، تحویل محصولات به مشتریان، بازگشت مجدد به

کراس داک. در این مدل، پنجره‌های زمانی برای تمامی مراحل عملیات در نظر گرفته شده‌اند، بدین معنا که هر وسیله نقلیه باید در یک بازه زمانی مشخص به نقاط بارگیری و تحویل مراجعه کند. همچنین، زمان سفر بین گره‌های بارگیری، کراس داک و تحویل مشخص شده است. زمان سرویس‌دهی در هر یک از نقاط بارگیری و تحویل نیز متناسب با مقدار بار و نرخ بارگیری/تخلیه تعیین می‌شود. در این پژوهش، یک کراس داک چند درب در نظر گرفته شده است که در آن تعداد وسایل نقلیه ورودی بیشتر از تعداد درهای ورودی و خروج ی موجود است. به همین دلیل، مدیریت صحیح فرآیند ورود و خروج وسایل نقلیه نقش مهمی در بهینه‌سازی کل سیستم دارد .

با در نظر گرفتن این موارد، مدل ارائه شده تلاش می‌کند تا هزینه‌های حمل و نقل را به حداقل رسانده، زمان کل عملیات را کاهش داده و تخصیص بهینه وسایل نقلیه و درب‌های کراس داک را انجام دهد.

۳-۲ مفروضات مسئله

برای مدل‌سازی این مسئله، مجموعه‌ای از مفروضات در نظر گرفته شده است:

- ناوگان ناهمگن هستند. وسایل نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوتی هستند و هر یک می‌توانند حجم مشخصی از کالا را حمل کنند.
- پنجره‌های زمانی در نظر گرفته می‌شود. هر وسیله نقلیه باید در یک بازه زمانی مشخص عملیات بارگیری و تحویل را انجام دهد.
- کراس داک به صورت چند درب است. تعداد درهای ورودی و خروجی در کراس داک محدود است و وسایل نقلیه باید به این درها تخصیص داده شوند.
- وسایل نقلیه تک مسیره هستند. هر وسیله نقلیه در هر سفر خود یک مسیر بارگیری و یک مسیر تحویل مشخص دارد و نمی‌تواند از مسیر خود منحرف شود.
- تخلیه و بارگیری در درب‌های کراس داک انجام می‌شود. وسایل نقلیه ابتدا کالاها را در درب ورودی کراس داک تخلیه کرده و سپس از درب خروجی مجددا بارگیری انجام می‌دهند.
- محدودیت‌های زمانی سرویس‌دهیوجود دارد. هر وسیله نقلیه باید در یک زمان مشخص به نقاط بارگیری و تحویل مراجعه کند و امکان تأخیر از حد معینی بیشتر وجود ندارد.

۳-۳ مجموعه‌ها، پارامترها و متغییرهای مسئله

- اندیس‌ها و مجموعه‌ها

N	مجموعه‌ای از تمام گره‌ها (کراس داک و جمع‌آوری و تحویل) $i,j,O \in N$
O	مجموعه‌ی کراس داک $o \in O$
V	مجموعه‌ی وسایل نقلیه $v,v' \in V$
P	مجموعه‌ای از گره‌های جمع‌آوری $p,\acute{p} \in P$
D	مجموعه‌ای از گره‌های تحویل $d,\acute{d} \in D$
K	مجموعه‌ای از درب‌های ورودی و خروجی $k,\acute{k} \in K$
k	مجموعه‌ای از درب‌های ورودی
$\acute{k}$	مجموعه‌ای از درب‌های ورودی

- پارامترها

ν_T	حداکثر وسایل نقلیه در دسترس
t	زمان جابه‌جایی وسایل نقلیه
M	عدد بسیار بزرگ
Q_i	مقدار محصول موجود در هرگره $i \in N$
C_v	ظرفیت وسیله نقلیه
Fc_v	هزینه‌ی ثابت استفاده از وسیله نقلیه v
$\dot{C}_{ij}$	هزینه حرکت بین گره‌ها $i \in (P \cup O \cap (D \cup O))$
τ_{ij}	زمان حرکت بین گره‌ها $i \in (P \cup O \cap (D \cup O))$
s_i	زمان سرویس‌دهی در هر گره $i \in (P \cap D)$
e_i	زودترین زمان رسیدن به هر گره $i \in (P \cap D)$

l_i دیرترین زمان رسیدن به هر گره $i \in (P \cap D)$

- متغیرها

x_{ijv} اگر وسیله نقلیه v بین گره‌های i,j حرکت کند یک، در غیراین صورت صفر

y_{iv} اگر وسیله نقلیه v گره را بازدید کند یک، در غیراین صورت صفر $i \in (P \cap D)$

$\dot{x}_{vk}$ اگر وسیله نقلیه v به درب K تخصیص داده شود یک، در غیراین صورت صفر

f_v^k اگر وسیله نقلیه v در درب‌های ورودی به عنوان اولین وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

$f_v^{\acute{k}}$ اگر وسیله نقلیه v در درب‌های خروجی به عنوان اولین وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

la_v^k اگر وسیله نقلیه v در درب‌های ورودی به عنوان آخرین وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

$\mu_{v\acute{v}}^k la_{\acute{v}}^{\acute{k}}$ اگر وسیله نقلیه v در درب‌های خروجی به عنوان آخرین وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

اگر وسیله نقلیه v و $\acute{v}$ به درب‌های ورودی یکسان تخصیص داده شود و وسیله نقلیه v قبل از وسیله نقلیه $\acute{v}$ سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

$\mu_{v\acute{v}}^{\acute{k}}$ اگر وسیله نقلیه v و $\acute{v}$ به درب‌های خروجی یکسان تخصیص داده شود و وسیله نقلیه v قبل از وسیله نقلیه $\acute{v}$ سرویس‌دهی شود یک، در غیر این صورت صفر

α_v اگر وسیله نقلیه v برای بازدید از گره‌های انتخاب شده باشد یک، در غیر این صورت صفر

β_v اگر وسیله نقلیه v برای بازدید از گره‌های تحویل انتخاب شده باشد یک، در غیر این صورت صفر

T_{iv} زمان رسیدن وسیله نقلیه v به هر گره $i \in (P \cap D)$

AT_v زمان رسیدن وسیله نقلیه v به کراس داک

$rd^k{}_v$ زمان رهاسازی وسیله نقلیه v از درب‌های ورودی و یا خروجی $K \in (k \cap \acute{k})$

۳-۴ مدل ریاضی

مدل پیشنهادی برای مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه با کراس داک چند درب به صورت زیر است.

$$Min\ Z_1 = \sum_{\substack{i \in (P \cup O \cap D \cup O) \\ i \neq j}} \sum_{\substack{j \in (P \cup O \cap D \cup O) \\ i \neq j}} \sum_{v=1} \dot{C}_{ij} \times x_{ijv} + \sum_{v=1} Fc_v \times \alpha_v + \sum_{v=1} Fc_v \times \beta_v \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{v=1} rd^K{}_v \quad K \in (k \cap \acute{k}) \quad (۲)$$

s.t.

$$\sum_{\substack{j \in (P \cup O \cap D \cup O) \\ i \neq j}} x_{ijv} = y_{iv} \quad \forall\, i \in (P \cap D), \forall\, v \in V \quad (۳)$$

$$\sum_{\substack{i \in (P \cup O\ or\ D \cup O) \\ i \neq j}} x_{ijv} = y_{jv} \quad \forall\, j \in (P \cap D), \forall\, v \in V \quad (۴)$$

$$\sum_{v=1} y_{iv} = 1 \quad \forall\, i \in (P \cap D) \quad (۵)$$

$$\sum_{\substack{j \in (P \cup O) \\ i \neq j}} x_{ojv} \leq \alpha_v \quad \forall\, v \in V \quad (۶)$$

$$\sum_{\substack{i \in (P \cup O) \\ i \neq j}} x_{iov} \leq \alpha_v \quad \forall\, v \in V \quad (۷)$$

$$\sum_{\substack{j \in (D \cup O) \\ i \neq j}} x_{ojv} \leq \beta_v \quad \forall\, v \in V \quad (۸)$$

$$\sum_{\substack{i \in (D \cup O) \\ i \neq j}} x_{iov} \leq \beta_v \quad \forall\, v \in V \quad (۹)$$

$$\sum_{\substack{i\in(P\cup O\,\cap\, D\cup O)\\ i\neq j}} x_{ijv} - \sum_{\substack{i\in(P\cup O\,\cap\, D\cup O)\\ i\neq j}} x_{jiv} = 0 \;\; \forall\, j \in (P\cup O)\cap(D\cup O), \forall\, v\in V \quad (10)$$

$$x_{iiv} + x_{i\grave{\imath}v} \le 1 \qquad \forall(\, i,\grave{\imath}\in P)\cap(\, i,\grave{\imath}\in D), \forall\, v\in V \quad (11)$$

$$\sum_{i\in(P\cap D)}\sum_{v=1} x_{oiv} \le v_T \qquad \forall\, o\in O \quad (12)$$

$$\sum_{i\in(P\cap D)} y_{iv} \times Q_i \le C_v \qquad \forall v\in V \quad (13)$$

$$T_{iv} \ge T_{ov} + \tau_{oi}\times x_{oiv} + Q_i \times y_{iv}\times s_i - M\times(1-x_{oiv}) \qquad \forall\, i\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (14)$$

$$T_{jv} \ge T_{iv} + \tau_{ij}\times x_{ijv} + Q_j \times y_{jv}\times s_j - M\times(1-x_{ijv}) \qquad \forall\, i\in((P\cup O)\cap(D\cup O)),\ j\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (15)$$

$$T_{iv} \ge e_i \times y_{iv} \qquad \forall\, i\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (16)$$

$$T_{iv} \le l_i \times y_{iv} \qquad \forall\, i\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (17)$$

$$AT_v \ge T_{iv} + \tau_{io}\times x_{iov} - M\times(1-x_{iov}) \qquad \forall\, i\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (18)$$

$$\sum_{k\in(k\,\cap\,\acute{k})} \dot{x}^{i}{}_{vK} \ge y_{iv}\ \forall\in(P\cap D), \forall\, v\in V \quad (19)$$

$$f_{\mathrm{v}}^{k} + \sum_{v\neq\grave{v}} \mu_{v\acute{v}}^{k} = \sum_{k=1} \dot{x}^{k}{}_{vk} \qquad \forall\, v\in V \quad (20)$$

$$f_{\mathrm{v}}^{\acute{k}} + \sum_{v\neq\grave{v}} \mu_{v\acute{v}}^{\acute{k}} = \sum_{\acute{k}=1} \dot{x}^{\acute{k}}{}_{v\acute{k}} \qquad \forall\, v\in V \quad (21)$$

$$la_{\mathrm{v}}^{k} + \sum_{v\neq\grave{v}} \mu_{v\acute{v}}^{k} = \sum_{k=1} \dot{x}^{k}{}_{vk} \qquad \forall\, v\in V \quad (22)$$

$$la_{\mathrm{v}}^{\acute{k}} + \sum_{v\neq\grave{v}} \mu_{v\acute{v}}^{k} = \sum_{\acute{k}=1} \dot{x}^{\acute{k}}{}_{v\acute{k}} \qquad \forall\, v\in V \quad (23)$$

$$\mu_{v\acute{v}}^{K} - 1 \le \dot{x}^{K}{}_{vK} - \dot{x}^{K}{}_{\acute{v}K} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\in K(k\cap\acute{k}) \quad (24)$$

$$\dot{x}^{K}{}_{vK} - \dot{x}^{K}{}_{\acute{v}K} \le 1 - \mu_{v\acute{v}}^{K} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\in K(k\cap\acute{k}) \quad (25)$$

$$f_{\mathrm{v}}^{k} + f_{\grave{v}}^{k} \le 3 - \dot{x}^{k}{}_{vk} - \dot{x}^{k}{}_{\grave{v}k} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\, k\in K \quad (26)$$

$$f_{\mathrm{v}}^{\acute{k}} + f_{\grave{v}}^{\acute{k}} \le 3 - \dot{x}^{\acute{k}}{}_{v\acute{k}} - \dot{x}^{\acute{k}}{}_{\grave{v}\acute{k}} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\, \acute{k}\in K \quad (27)$$

$$la_{v}^{k} + la_{\grave{v}}^{k} \le 3 - \dot{x}^{k}{}_{vk} - \dot{x}^{k}{}_{\grave{v}k} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\, k\in K \quad (28)$$

$$la_{\mathrm{v}}^{\acute{k}} + la_{\grave{v}}^{\acute{k}} \le 3 - \dot{x}^{\acute{k}}{}_{v\acute{k}} - \dot{x}^{\acute{k}}{}_{\grave{v}\acute{k}} \qquad \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\, \acute{k}\in K \quad (29)$$

$$rd^{K}{}_{v} \ge AT_v - M\times(1-\dot{x}^{K}{}_{vK})\ \forall\, v\in V, \forall\in K(k\cap\acute{k}) \quad (30)$$

$$rd^{K}{}_{\acute{v}} \ge rd^{K}{}_{v} + t\times\mu_{v\acute{v}}^{K} - M\times(1-\mu_{v\acute{v}}^{K}) - M\times(2-\dot{x}^{K}{}_{\acute{v}K} - \dot{x}^{K}{}_{vK})\ \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\in K(k\cap\acute{k}) \quad (31)$$

$$rd^{K}{}_{v} \ge rd^{K}{}_{\acute{v}} + t\times\mu_{v\acute{v}}^{K} - M\times(1-\mu_{v\acute{v}}^{K}) - M\times(2-\dot{x}^{K}{}_{vK} - \dot{x}^{K}{}_{\grave{v}K})\ \forall\, v\neq\grave{v}\in V, \forall\, K\in(k\cap\acute{k}) \quad (32)$$

توابع هدف (۱) و (۲) با هدف کاهش هزینه کل سفر و زمان سفر طراحی شده‌اند. برای بهینه‌سازی زمان‌بندی در این مسئله، معادله (۲) تلاش می‌کند تا زمان خروج وسایل نقلیه از درب‌های ورودی و خروجی را به حداقل برساند.

معادلات (۳)، (۴) و (۵) این اطمینان را ایجاد می‌کنند که هر گره جمع‌آوری و تحویل تنها توسط یک وسیله نقلیه مورد بازدید قرار گیرد و امکان تحویل گسسته کالاها وجود نداشته باشد. همچنین، این معادلات تضمین می‌کنند که هر گره تنها یک ورود و یک خروجی داشته باشد؛ به این معنا که هر وسیله نقلیه که وارد یک گره می‌شود، در نهایت آن را ترک خواهد کرد. معادلات (۶)، (۷)، (۸) و (۹) مبدا و مقصد حرکت وسایل نقلیه را به‌وضوح مشخص می‌کنند، به این صورت که تمامی مسیرهای تعریف‌شده در فرآیند جمع‌آوری و تحویل برای وسایل نقلیه از کراس داک آغاز شده و پس از اتمام عملیات جمع‌آوری و تحویل، به کراس داک بازمی‌گردند. این محدودیت باعث می شود که تمامی فرآیندهای مسیریابی و زمان‌بندی، بهینه و کنترل‌شده باشند.

معادلات (۱۰) و (۱۱) توالی بازدید وسایل نقلیه از گره‌های جمع آوری و تحویل تعریف‌شده تعیین می‌کنند و از امکان بازگشت وسیله نقلیه به مسیرهای قبلی جلوگیری می‌کند. این معادلات مانع از آن می‌شوند که یک وسیله نقلیه در مسیر خود به یک گره بازگردد. معادله (۱۲) محدودیت حداکثر تعداد تورهای قابل‌تشکیل را کنترل می‌کند تا اطمینان حاصل شود که تعداد مسیرهای ایجادشده از تعداد وسایل نقلیه موجود فراتر نرود. همچنین، معادله (۱۳) به بررسی محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه

پرداخته و تضمین می‌کند که مقدار کالاهای حمل‌شده توسط هر وسیله نقلیه از ظرفیت تعیین‌شده آن فراتر نرود.

معادلات (۱۴) تا (۱۸) به زمان‌بندی وسایل نقلیه در فرآیند جمع آوری و تحویل می‌پردازند. این معادلات تعیین می‌کنند که هر وسیله نقلیه در چه زمانی باید به گره‌های مختلف مراجعه کند و چگونگی ترتیب زمانی بازدید از گره‌های جمع‌آوری و تحویل در مسیرهای مختلف را مشخص می‌نمایند. علاوه بر این، معادلات (۱۶) و (۱۷) محدوده زمانی مشخصی برای هر گره جمع‌آوری و تحویل تعیین کرده و وسایل نقلیه این پنجره‌های زمانی را در نظر می‌گیرند.

معادله (۱۹) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه که تورهای تشکیل شده در فرآیند جمع‌آوری و یا تحویل پیموده است، حداقل به یک در ورودی و یا خروجی تخصیص داده شده است. معادله (۲۰) تا (۲۳) و (۲۶) تا (۲۹) بیان می‌کند که تنها به یک وسیله نقلیه ورودی یا خروجی به عنوان اولین و یک وسیله نقلیه ورودی یا خروجی به عنوان آخرین وسیله در یک درب ورودی یا خروجی سرویس ارائه می‌شود. معادله (۲۴)، و (۲۵) توالی عملیات وسیله نقلیه ورودی یا خروجی را زمانی که هر دو وسیله نقلیه به یک در ورودی یا خروجی اختصاص داده می‌شود، بررسی می‌کند. معادله (۳۰)، تا (۳۲) زمان رهاسازی وسایل نقلیه ورودی یا خروجی از درب‌های ورودی و خروجی را با در نظر گرفتن زمان رسیدن وسیله نقلیه به هر در ورودی یا خروجی و اختصاص دو وسیله نقلیه به همان در ورودی یا خروجی را بررسی می‌کند.

۴. روش حل

۴-۱ روش AUGMECON2

در این بخش، رویکرد حل مسئله چندهدفه با بهره‌گیری از روش محدودیت اپسیلون (Epsilon Constraint Method) ارائه می‌شود تا مدل ریاضی فرموله شده بهینه شود. روش‌های محدودیت اپسیلون از جمله روش‌های رایج در حل مسائل ریاضی چندهدفه (MOMP) و استخراج مجموعه‌ی پارتو می باشند[Hwang and Masud, 1979] . در این رویکرد، مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر، یکی از اهداف اصلی انتخاب شده و اهداف دیگر به عنوان محدودیت‌های اضافی وارد مدل می‌شوند. این تبدیل تنها زمانی می‌تواند منجر به به‌دست آوردن راه‌حل‌های بهینه قابل قبول شود که اطمینان حاصل گردد بهینه‌های منحصر به فرد در مسئله وجود دارند. برای رفع این چالش، [Mavurtas and Florios, 2013] روش AUGMECON را معرفی کردند که نسخه بهبودیافته روش محدودیت اپسیلون است. در این روش، یک عبارت افزوده به صورت زیر به تابع هدف اضافه می شود تا همزمان عملکرد اهداف فرعی را نیز در نظر بگیرد و به این ترتیب کارایی و صحت راه‌حل‌های تولید شده بهبود یابد.

$$\left(eps\left(S_2/r_2 + S_3/r_3 + \cdots + S_p/r_p\right)\right) \quad (۳۳)$$

به عبارت دیگر، تابع هدف در روش AUGMECON به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$max\left(f_1(x) + eps\left(S_2/r_2 + S_3/r_3 + \cdots + S_p/r_p\right)\right) \quad (۳۴)$$

در این فرمول S_2، S_3، ... ،S_p متغیرهای مازاد (slack/surplus) مربوط به اهداف دوم تا p ام، و r_2 ، r_3 ، ... ، r_p دامنه‌های عملکردی هر یک از این اهداف می‌باشند. ضریب eps مقدار کوچکی است که تاثیر اهداف فرعی را به نحوی در تابع هدف وارد می‌کند تا در صورت وجود چندین بهینه جایگزین، به ترتیب بهینه‌سازی بر روی اهداف بعدی نیز انجام شود.

علاوه بر این، [Mavurtas and Florios, 2013] نسخه بهبود یافته‌ای از AUGMECON به نام AUGMECON2 معرفی کرده‌اند. در این نسخه، با استفاده از اطلاعات مربوط به متغیرهای مازاد در هر تکرار و افزودن ضریب عبور (bypass coefficient) به الگوریتم، تکرارهای زائد حذف می‌شود و زمان پردازش کاهش می‌یابد. این بهبودها AUGMECON2 را به ابزاری کارآمد برای مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح

چندهدفه با متغیرهای مکانی گسسته و مجموعه‌های پارتو محدود و قابل شمارش تبدیل کرده است. در فرمول نهایی نسخه AUGMECON2، تابع هدف به صورت زیر اصلاح شده است:

$$max\left(f_1(x) + eps\left(S_2/r_2 + 10^{-1} \times S_3/r_3 + \cdots + 10^{-(p-2)} \times S_p/r_p\right)\right) \quad (۳۵)$$

این تغییرات باعث تضمین بهینه بودن راه‌حل‌های تولید شده از نظر پارتو می‌شود، هرچند با افزایش تعداد اهداف، زمان پردازش نیز افزایش می‌یابد.

مراحل اجرایی AUGMECON2 به شرح زیر است:

- ایجاد جدول عملکرد(Payoff Table) : به طور جداگانه بهینه‌سازی هر یک از توابع هدف انجام شده و نتایج (مقادیر بهینه هر تابع) در یک جدول ثبت می‌شود.
- تعیین حد بالایی و محاسبه دامنه: برای هر تابع هدف از f_2تاf_p، حد بالایی مشخص و دامنه عملکرد آن محاسبه می شود.
- تقسیم‌بندی دامنه اهداف: دامنه هر تابع هدف k به تعداد q_kبازه مساوی تقسیم شده و $q_k + 1$ نقطه شبکه (grid points)به دست می‌آید.
- تنظیم مقدار سمت راست محدودیت‌ها: مقدار محدودیت مربوط به تابع هدف k در هر تکرار از رابطه زیر تعیین می شود:

$$e_k^t = f_{mink} + t \times step_k \quad (۳۶)$$

در این رابطه، f_{mink}کمینه مقدار تابع هدف k از جدول عملکرد و $step_k$ اندازه هر بازه تقسیم‌بندی شده می‌باشد.

- حل مدل تک‌هدفه: مدل تک‌هدفه حاصل که شامل محدودیت‌های وابسته به اهداف فرعی است، با استفاده از یک solverعددی حل می‌شود.
- بررسی متغیرهای مازاد و استفاده از ضریب عبور: در هر تکرار، متغیر مازاد تابع هدف داخلی بررسی می‌شود. با محاسبه ضریب عبور به صورت $b = int(S_k/step_k)$ که تابع intبخش صحیح یک عدد را برمی‌گرداند. در صورتی که متغیر مازاد از مقدار $step_k$ بیشتر باشد، تکرار جاری بدون تولید یک راه‌حل جدید رد شده و همان راه‌حل برای تکرار بعدی حفظ می‌شود. این نوآوری باعث کاهش فراخوانی‌های solverو صرفه‌جویی در زمان پردازش می‌شود.
- استخراج مجموعه راه‌حل‌های پارتو: با توجه به تعداد نقاط شبکه و ضریب‌های عبور، تعداد دقیق راه‌حل‌های پارتو استخراج می‌شود و مجموعه‌ای دقیق از راه‌حل‌های بهینه تولید می‌گردد.

در ادامه شبه کد این الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲. شبه کد الگوریتم AUGMECON2

1. Step 1 Implementing Augmented epsilon constraint method
   1.1 Form the bi-objective mathematical model in the following structure

$$model\ 1\begin{cases}\min R\\ \max S\\ model\ constraint\end{cases}$$

   1.2 Solve model 1 and create a payoff table
   1.3 Set objective R as main and shift objective S to the constraints
   1.4 Calculate the range of objective S Srange
   1.5 Determine the number of grid points N
   1.6 Set epsilon eas follow

$$e = S_{range}/N$$

   1.7 Set model 2 in the following structure and go to the Step2

$$model\ 2\begin{cases}\min R + eps\left(\dfrac{slack}{S_{range}}\right)\\ s,t.\\ S + slack = S_{min} + p.e\\ \text{model constraints}\end{cases}$$

2. Step 2 solving the problem
   2.1 Set $p = 1$
   2.2 Solve model 2
   2.3 If the solution is unique, add it to the Pareto set and go to end else go to 2.4
   2.4 If p > N end the algorithm and report the Pareto set and else $p = p + 1$ and return to 2.2
   2.5 End

۵. نتایج محاسباتی

برای تحلیل دقیق‌تر عملکرد مدل و ارزیابی اثرات پارامترهای مختلف بر معیارهای اصلی، مجموعه‌ای از مسائل نمونه در مقیاس کوچک تولید شده است. در این آزمایشات، تعداد گره‌ها برابر با ۱۰ و ۱۵ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تعداد وسایل نقلیه به‌عنوان یک متغیر کلیدی در دو مقدار ۵ و ۱۰ وسیله نقلیه تنظیم شده است تا تاثیر افزایش تعداد وسایل نقلیه بر عملکرد مدل بررسی شود. از آنجا که یکی از جنبه‌های مهم در مسئله مسیریابی و زمان‌بندی با کراس‌داک، تعداد درهای بارگیری و تخلیه در مراکز کراس‌داک است، در این مطالعه تعداد درها روی مقادیر ۲، ۳ و ۴ تنظیم شده است. این مقادیر به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوان تاثیر تغییر تعداد درها بر زمان انجام عملیات، هزینه‌های حمل‌ونقل و نحوه تشکیل مسیرهای بهینه را بررسی کرد.

برای اجرای این تحلیل‌ها، پارامترهای تصادفی مرتبط با مسئله در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این پارامترها شامل مشخصات مربوط به وسایل نقلیه، ویژگی‌های گره‌ها، زمان‌های سرویس‌دهی و سایر داده‌های موردنیاز برای حل مدل هستند. تنظیم این پارامترها به‌گونه‌ای انجام شده است که شرایط متنوع و سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کند تا بتوان کارایی مدل را در شرایط متفاوت ارزیابی کرد.

به‌منظور حل مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط و دستیابی به نقاط پارتو، مسئله در نرم‌افزار GAMS 24.1.2 کدگذاری شده است. این مدل با استفاده از روش CPLEX در محیط GAMSحل شده و نتایج حاصل از آن برای تحلیل و مقایسه مورد بررسی قرار گرفته است. برای پیاده‌سازی و اجرای مدل، از یک لپ‌تاپ با پردازنده Intel Core i7 Duo با فرکانس ۲,۷ گیگاهرتز و ۸ گیگابایت حافظه رم (RAM) استفاده شده است. حل مدل و اجرای شبیه‌سازی‌ها بر روی این سیستم انجام شده و مدت زمان حل، کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده و میزان کارایی مدل در حل مسائل کوچک و متوسط مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۳. مقدار پارامترهای تصادفی

پارامتر	مقدار
Q_i	uniform∼(۱۰و ۷۰)
C_v	uniform∼(۱۰۰و ۶۰۰)
τ_{ij}	uniform∼(۵۰و ۱۰۰)
k	۲،۳،۴
$\acute{k}$	۲،۳،۴
e_p	uniform∼(۸۰و ۱۵۰)
l_p	uniform∼(۲۰۰و ۳۰۰)
e_d	uniform∼(۴۰۰و ۵۵۰)
l_d	uniform∼(۵۵۰و ۷۰۰)
P	۵ ۸ ۱۰
D	۵ ۸ ۱۰
V	۵ ۱۰

در مطالعه حاضر، مدل مسیریابی و زمان‌بندی با کراس‌داک در چندین سناریو با تعداد گره‌های متفاوت (۱۰) ، (۱۶) و (۲۰) گره و تعداد وسایل نقلیه مختلف به‌کار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد وسایل نقلیه، هزینه‌های کلی سیستم و زمان اجرای فرآیند کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با فراهم شدن گزینه‌های بیشتر برای تخصیص وظایف، می‌توان مسیرهای بهینه‌تر و زمان‌بندی مناسب‌تری را در نظر گرفت؛ به عبارت دیگر، افزایش تعداد وسایل نقلیه امکان استفاده از خودروهای با هزینه عملیاتی پایین‌تر را فراهم می‌کند، اگرچه لازم نیست که تمام وسایل نقلیه موجود در سیستم به کار گرفته شوند. هر وسیله نقلیه دارای هزینه ثابت و متغیری است که در

مدل لحاظ شده و استفاده از آن فقط در صورت نیاز و به‌منظور بهبود عملکرد کلی سیستم انجام می‌شود. همچنین، افزایش تعداد درهای کراس‌داک تأثیر قابل توجهی بر کاهش زمان انتظار و هزینه‌های مرتبط با صف‌های ورود و خروج دارد. با افزایش تعداد درها، امکان توزیع یکنواخت‌تر وسایل نقلیه در طول زمان و کاهش ترافیک در نقطه‌های ورود و خروج ایجاد می‌شود که منجر به کاهش زمان انتظار و در نهایت کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌گردد.

در سناریوهای با تعداد گره‌های بالا (مانند ۲۰ گره)، زمان حل مدل به‌شدت افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در یکی از آزمایش‌های صورت گرفته، محدودیت زمانی حل مدل در نرم‌افزار GAMS به ۳۰۰۰ ثانیه تنظیم شده است تا خروجی قابل قبولی ارائه شود. این امر نشان می‌دهد که با افزایش پیچیدگی مسئله (از نظر تعداد گره‌ها)، نیاز به زمان محاسباتی بیشتر احساس می‌شود. با این روش گاهی هزینه و زمان به دلیل یافتن جواب در زمان کمتر افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که هر دو عامل افزایش تعداد وسایل نقلیه و افزایش تعداد درها می‌توانند به بهبود عملکرد مدل از نظر کاهش هزینه‌ها و زمان کمک کنند؛ اما در عین حال، مدیریت بهینه تخصیص منابع (وسایل نقلیه) که هر یک هزینه‌های جانبی خاص خود را دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد تا استفاده غیرضروری از آن‌ها رخ ندهد و هزینه‌های اضافی به سیستم وارد نشود. در ادامه به بررسی نتایج پرداخته شده است.

جدول ۴. نمونه مسئله ۱

N	P	D	V
۱۰	۵	۵	۵

C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_1-r_2-r_4 r_3 r_5	r_9-r_7-r_{10} r_8 r_6	۵۳۵۷	۷۸/۴۶
۳	r_3- r_4 r_2-r_1 r_5	r_6-r_7-r_{10} r_8-r_9	۵۳۳۷	۷۸/۳۲
۴	r_5-r_2-r_4 r_1 r_3	r_{10} r_7-r_8 r_9 r_6	۵۳۰۸	۷۸/۱۶

N	P	D	V
۱۰	۵	۵	۱۰

C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_3-r_2-r_1 r_4-r_5	r_8-r_6-r_7 r_{10}-r_9	۴۸۶۱/۲	۷۷/۶۱
۳	r_1-r_3-r_5 r_2 r_4	r_8-r_6 r_9 r_{10}-r_7	۴۸۱۱/۳	۷۷/۴۳
۴	r_1-r_2-r_5 r_3- r_4	r_{10} r_8-r_6 r_{10}-r_7	۴۷۸۷/۶	۷۷/۲۱

جدول ۵. نمونه مسئله ۲

N	P	D	V
۱۶	۸	۸	۵

C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_2-r_8-r_5 r_3-r_6- r_7 r_1-r_4	r_{11}-r_9- r_{15} r_{13}-r_{16}- r_{12} r_{14}-r_9- r_{10}	۷۲۸۲	۹۶/۳۴
۳	r_8- r_7-r_5 r_6-r_3- r_4 r_1-r_2	r_{12}-r_9- r_{16} r_{13}- r_{10}- r_{15} r_{11}- r_{14}	۷۲۵۶/۷	۹۶/۰۶
۴	r_4-r_2-r_1 r_3- r_6 r_3- r_7-r_5	r_{14}-r_{12}- r_{11} r_{13}- r_{16} r_{15}- r_{10}- r_9	۷۱۸۹/۶	۹۵/۴۶

N	P	D	V
۱۰	۸	۸	۱۰

C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_3-r_6-r_1 r_4-r_5- r_7 r_2-r_8	r_{11}-r_{15}- r_{12} r_{14}- r_{10} r_{16}- r_{13}- r_9	۶۹۸۵/۳	۹۵/۱
۳	r_8- r_6-r_5 r_7-r_3- r_2 r_1-r_4	r_{15}-r_9-r_{13} r_{10}- r_{14}- r_{16} r_{11}- r_{12}	۶۹۴۰/۳	۹۴/۶۸

۹۴/۴	۶۸۸۷/۵	r_9-r_{12}-r_{11} r_{14}- r_{10} r_{13}- r_{16}- r_9	r_4-r_5-r_6 r_3- r_8 r_1- r_7-r_2	۴

جدول ۶. نمونه مسئله ۳

N	P	D	V
۲۰	۱۰	۱۰	۵

C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_1-r_5-r_6 r_3-r_4- r_7 r_9-r_4-r_8 r_{10}-r_1- r_2	r_{14}-r_{20}- r_{15} r_{13}-r_{16}- r_{19}-r_{11} r_{12}-r_{17}- r_{18}	۹۶۳۲/۴	۱۰۳۲/۵
۳	r_6- r_4-r_5 r_8-r_3-r_9 r_7- r_1-r_2 r_{10}	r_{12}-r_{18}- r_{15} r_{16}- r_{13}- r_{11}-r_{14} r_{17}- r_{19}- r_{20}	۹۶۲۶/۸	۱۰۰۳/۶
۴	r_1-r_5-r_6 r_3-r_8- r_7 r_2-r_4 r_{10}-r_9	r_{17}-r_{12}- r_{11} r_{13}- r_{16}- r_{19} r_{15}- r_{14}- r_{12}-r_{20}	۹۶۱۱/۶	۹۹/۸۶
N	P	D	V	
۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	
C	Rout P	Rout D	cost	time
۲	r_3-r_5-r_4 r_2-r_9- r_1 r_6-r_7- r_{10}-r_8	r_{11}-r_{17}- r_{14} r_{16}- r_{13}- r_{15} r_{12}- r_{20}- r_{19}	۹۵۷۶/۳	۹۹/۹۱
۳	r_8- r_9- r_{10} r_7-r_3- r_1-r_4 r_6-r_5-r_2	r_{15}-r_{19}- r_{12} r_{17} r_{20}- r_{14}- r_{18} r_{11}- r_{13}- r_{16}	۹۵۵۱/۲	۹۶/۲۳
۴	r_8-r_9-r_6 r_3- r_{10}- r_2 r_1- r_7- r_4-r_5	r_9-r_{12}- r_{11} r_{14}- r_{10} r_{13}- r_{16}- r_9	۹۵۱۱/۶	۹۵/۴

همان‌طور که در جداول ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است، به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در ابعاد مختلف، در مجموع ۱۸ نمونه‌مسئله با اندازه‌های متفاوت (۱۰، ۱۶ و ۲۰ گره) حل شده است. برای هر اندازه از گره‌ها، ابتدا مسئله در حالتی حل شده است که تعداد وسایل نقلیه برابر با ۵ و تعداد درهای ورودی و خروجی به ترتیب برابر با ۲، ۳ و ۴ بوده است. سپس همان نمونه‌مسائل با افزایش تعداد وسایل نقلیه به ۱۰ عدد، مجدداً حل شده و نتایج آن گزارش شده است. تحلیل جداول مذکور نشان می‌دهد که افزایش تعداد وسایل نقلیه و همچنین افزایش تعداد درهای ورودی و خروجی کراس‌داک، منجر به بهبود قابل توجهی در شاخص‌های کلیدی نظیر زمان کل عملیات و هزینه حمل‌ونقل شده است.

در گام بعد، به منظور اعتبارسنجی مدل توسعه داده‌شده، ۵ نمونه‌مسئله از داده‌های مطالعات پایه که توسط از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ دوندو و همکاران [Dondo et al. 2013, 2014, 2015] ارائه شده است، انتخاب شده و مقایسه انجام شده است که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. در این راستا، ابتدا مدل پایه‌ی سردا، با نادیده گرفتن محدودیت‌های مرتبط با عملیات داخلی کراس‌داک (عملیات دقیق تخلیه و بارگیری)، پیاده‌سازی شده است. سپس، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، همین مسائل با داده‌های مشابه و با حذف مفروضات توسعه‌یافته حل شده‌اند تا مقایسه‌ای میان مدل پایه و مدل پیشنهادی (با حذف مقروضات توسعه یافته) صورت گیرد. نتایج این مرحله نشان‌دهنده‌ی هم‌راستایی عملکرد دو مدل در شرایط مشابه و درستی پیاده‌سازی مدل پیشنهادی است. در مرحله سوم، همان نمونه‌مسائل با درنظر گرفتن تمامی مفروضات توسعه‌یافته در مدل پیشنهادی حل شده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که این مفروضات سبب بهبود قابل‌توجهی در عملکرد مدل و کاهش هزینه کل و زمان رهاسازی وسایل نقلیه از درب‌های کراس‌داک شده است. این بهبود در برخی نمونه‌ها به حدود ۱۰ درصد نیز می‌رسد.

جدول ۷. مقایسه نمونه مسائل در مدل پایه و مدل پیشنهادی

مسئله	توابع اهداف					
	مدل پایه		مدل پیشنهادی (توسعه نیافته)		مدل پیشنهادی (توسعه یافته)	
	cost	time	cost	time	cost	time
۱	۳۰۱۶/۷	۴۶/۲	۳۰۱۶/۷	۴۶/۲	۲۷۱۰/۲	۲۳
۲	۳۲۵۷/۴	۶۳/۵	۳۲۵۷/۴	۶۳/۵	۲۸۰۹/۹	۴۶/۶
۳	۳۶۲۵/۱	۶۸/۷	۳۶۲۵/۱	۶۸/۷	۲۹۲۳/۳	۴۱/۴
۴	۴۱۱۲/۱	۷۷/۱	۴۱۱۲/۱	۷۷/۱	۳۵۰۹/۶	۵۵/۳
۵	۴۷۳۳/۶	۸۲/۵	۴۷۳۳/۶	۸۲/۵	۴۱۵۹/۴	۶۴/۸

۶. تحلیل حساسیت

در بخش تحلیل حساسیت، برای ارزیابی تأثیر عوامل کلیدی مانند پنجره زمانی و فرض چند درب بودن کراس‌داک، چهار سناریو بر اساس جدول ۸ تهیه شده است.

در سناریو اول، فرض شده است که فرض چند درب بودن کراس‌داک و پنجره زمانی نادیده گرفته می‌شود. در سناریو دوم نیز تنها فرض چند درب بودن اعمال شده است، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی. در سناریو سوم، تنها پنجره زمانی مد نظر قرار گرفته و چند درب بودن کراس‌داک نادیده گرفته شده است. سرانجام، در سناریو چهارم هر دو عامل چند درب بودن کراس‌داک و پنجره زمانی به طور همزمان در مدل لحاظ شده‌اند.

این سناریوها برای یک نمونه مسئله حل شده با ۱۰ گره، ۱۰ وسیله نقلیه و ۴ درب کراس‌داک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج پارتویی به‌دست آمده، همان‌طور که در جدول ۹ آورده شده است، نشان می‌دهد که در سناریوهای حاوی پنجره زمانی و فرض چند درب بودن، عملکرد سیستم بهبود یافته و هزینه‌های کل و زمان اجرای فرآیند به طور محسوسی کاهش یافته‌اند.بررسی دقیق نتایج حاکی از آن است که اعمال پنجره زمانی علاوه بر ایجاد تعادل در زمان‌بندی برداشت کالا، به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و انتظار کمک می‌کند.

از سوی دیگر، در نظر گرفتن چند درب بودن کراس‌داک باعث می‌شود تا بار ترافیکی در نقطه‌های ورود و خروج وسایل نقلیه کاهش یافته و زمان انتظار نیز به طور قابل توجهی کاهش یابد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از چهار سناریو، مشاهده می‌شود که بهترین عملکرد زمانی و اقتصادی در سناریویی به دست می‌آید که هر دو عامل پنجره زمانی و چند درب بودن به‌طور همزمان در نظر گرفته شده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب این دو عامل نه‌تنها به بهبود کارایی سیستم کمک می‌کند، بلکه امکان مدیریت بهتر بارها و کاهش هزینه‌های عملیاتی را نیز فراهم می‌سازد.

همچنین، تفصیل جدول‌ها و نمودارهای تحلیل نتایج ارائه شده است. در جدول ۹ تغییرات عملکردی و بهبودهای حاصل از اعمال این سناریوها به وضوح نشان داده شود. همچنین تغییرات هر سناریو نیز در نمودارهای شکل۲ مورد بررسی قرار می‌گیرند تا عملکرد هر سناریو مقایسه شود.

جدول ۸. سناریو

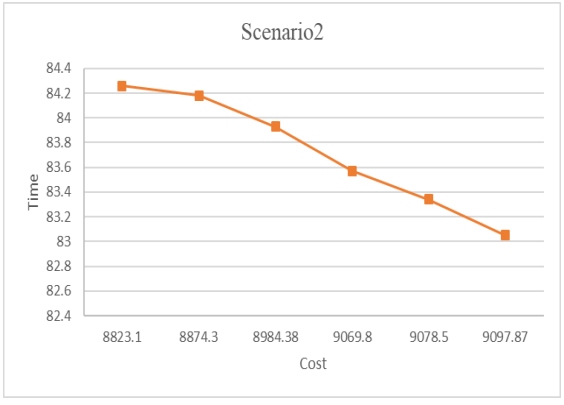
سناریو	پنجره زمانی	چند درب
S1		
S2		✓
S3	✓	
S4	✓	✓

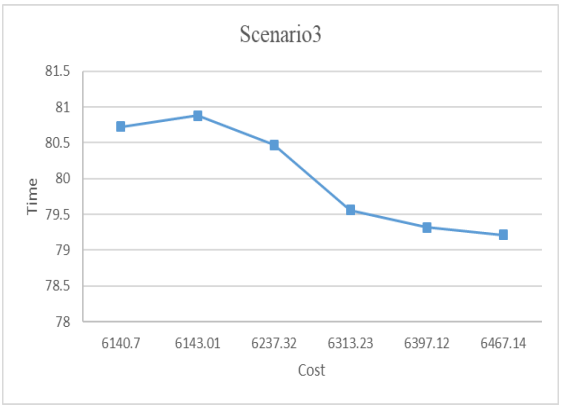
جدول ۹. تحلیل نتایج

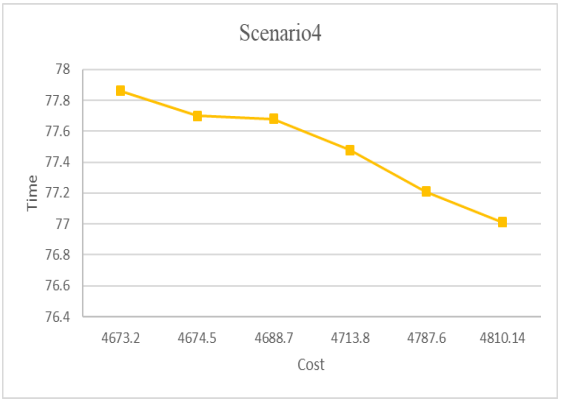
پارتو	تابع هدف	سناریوها			
		S1	S2	S3	S4
۱	cost	۱۳۳۲۶/۵	۹۰۸۷/۵	۶۳۹۷/۱۲	۴۷۸۷/۶
	time	۸۵/۸۲	۸۳/۳۴	۷۹/۳۲	۷۷/۲۱
۲	cost	۱۲۵۳۸/۵	۸۹۸۴/۳۸	۶۲۳۷/۳۲	۴۶۸۸/۷
	time	۸۶/۳۸	۸۳/۹۳	۸۰/۴۷	۷۷/۶۸
۳	cost	۱۳۵۲۴/۶۷	۹۰۹۷/۸۷	۶۴۶۷/۱۴	۴۸۱۰/۱۴
	time	۸۵/۵۶	۸۳/۰۵	۷۹/۲۱	۷۷/۰۱
۴	cost	۱۱۹۶۸/۷	۸۸۷۴/۳	۶۱۴۰/۷	۴۶۷۴/۵
	time	۸۶/۷۹	۸۴/۱۸	۸۰/۷۲۳	۷۷/۷۰

پارتو	تابع هدف	سناریوها			
		S1	S2	S3	S4
۵	cost	۱۲۷۷۹/۶	۹۰۶۹/۸	۶۳۱۳/۲۳	۴۷۱۳/۸
	time	۸۶/۰۲	۸۳/۵۷	۷۹/۵۶	۷۷/۴۸
۶	cost	۱۱۵۸۷/۲	۸۸۲۳/۱	۶۱۴۳/۰۱	۴۶۷۳/۲
	time	۸۷/۱۵	۸۴/۲۶	۸۰/۸۷۸	۷۷/۸۶

در ادامه نمودارهای شکل ۲ ارائه می‌شود ، نمودار اول نشان دهنده سناریو اول و نمودار دوم و سوم و چهارم به ترتیب نشان دهنده سناریو دوم و سوم و چهارم می‌باشند. در هر نمودار شش نقطه‌ی پارتو از هزینه و زمان برای مقایسه بهتر نتایج ذکر شده است.







شکل ۲. بررسی نتایج هزینه/ زمان در سناریوهای مختلف

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه با هدف به حداقل رساندن هزینه حمل و نقل و کاهش زمان عملیات ارائه شده است. از ویژگی‌های برجسته این تحقیق، می‌توان به در نظر گرفتن توالی ورود و خروج کامیون‌ها در درب‌های ورودی و خروجی کراس‌داک چنددرب اشاره کرد. همچنین، به منظور نزدیک کردن مسئله به دنیای واقعی، در مدل از وسایل نقلیه ناهمگن بهره گرفته شده و برای هر گره، پنجره‌های زمانی مشخص در نظر گرفته شده است.

این مطالعه به طور همزمان سه حوزه تصمیم‌گیری مهم در سیستم‌های کراس‌داک را مورد بررسی قرار می‌دهد: مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص وسایل نقلیه به درب‌های مربوطه. این سه حوزه به تنهایی از پیچیدگی‌های قابل توجهی برخوردارند و ترکیب آن‌ها در یک مدل یکپارچه، چالش‌های بیشتری را ایجاد می‌کند. به همین دلیل، برای ارزیابی عملکرد مدل، چند مسئله

نمونه با اندازه‌های متفاوت (از جمله نمونه‌هایی با ۱۰، ۱۶ و ۲۰ گره) مورد بررسی قرار گرفت و تغییر نتایج به‌دست آمده با تغییر بر روی پارامترهای کلیدی مانند تعداد درها، تعدادوسایل نقلیه و تغییر تعداد گره‌ها مقایسه گردید.

علاوه بر این چهار سناریو مربوط به چند درب بودن کراس‌داک و وجود پنجره‌های زمانی برای تحلیل حساسیت مدل بررسی شده است. در سناریوهایی که به صورت همزمان چند درب بودن کراس‌داک و وجود پنجره‌های زمانی در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شود که عملکرد سیستم بهبود یافته و هزینه‌ها و زمان کلی عملیات کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده اهمیت استفاده از استراتژی‌های بهینه در تخصیص منابع و زمان‌بندی دقیق عملیات می‌باشد.

مدل ارائه شده توسط یک روش حل دقیق (روش حل دقیق AGMECON2) مورد حل قرار گرفته است که نتایج آن نشان از قابلیت بالای مدل در ارائه راهکارهای بهینه با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای حساس دارد. نتایج به‌دست آمده بلکه به عنوان ابزاری کارآمد در تصمیم‌گیری‌های لجستیکی در محیط‌های واقعی محسوب می‌شود. این مدل در صنایع و بخش‌هایی که نیاز به تحویل سریع و زمان‌بندی دقیق دارند، نظیر شرکت‌های تامین قطعات یدکی خودرو برای تسریع در فرآیند توزیع قطعات یدکی به نمایندگی‌ها و مشتریان، صنایع لبنی و حمل محصولات فاسدشدنی و سایر مواد غذایی تازه نیازمند حمل‌ونقل سریع و تحویل به موقع هستند تا از کاهش کیفیت یا فساد کالا جلوگیری شود، مراکز تره‌بار و بازارهای محصولات کشاورزی، شبکه‌های حمل نمونه‌های آزمایشگاهی، شرکت‌های پخش دارویی، مراکز توزیع خرده‌فروشی و صنایع لجستیک سریع، کاربرد دارد. بهره‌گیری از مدل توسعه‌یافته می‌تواند موجب بهبود کارایی عملیات، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، تسریع فرآیند تحویل و افزایش رضایت مشتریان در این صنایع شود.

در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، چندین کراس‌داک به عنوان مراکز توزیع در مدل لحاظ شود و با فرض تحویل گسسته ساختار شبکه پیچیده‌تر شود. همچنین پرداختن به جزئیات عملیات داخلی کراس‌داک، که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، می‌تواند به توسعه هرچه بیشتر تحقیقات کمک کند. علاوه بر این، توسعه و طراحی روش‌ها و الگوریتم‌های دقیق و فراابتکاری کارآمد به منظور حل مدل‌های پیشنهادی در ابعاد بزرگ‌تر، از دیگر زمینه‌های مناسب برای تحقیقات آینده به شمار می‌رود.

۸. مراجع

— اکبرپور شیرازی، کریمی و رادمنش. (۱۳۹۶). "ارسال محصولات با استفاده از دو روش توزیع محصول و مقایسه آنها با در نظر گرفتن انبار عبوری." مدیریت زنجیره تأمین، ۱۹(۵۷)، ۴-۱۶.

— اکبری، محتشمی و یزدانی. (۱۴۰۲). طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین امداد بشردوستانه، مبتنی‌بر اتصال متقاطع. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم های تولید، ۱۱(۲۳)، ۱۳۹-۱۵۹.

— جوانفر، رضائیان، شکوفی و مهدوی. (۱۳۹۶). مسئله مکان‌یابی-مسیریابی انبارهای عبوری چند محصولی با در نظرگرفتن وسایل نقلیه ناهمگن ظرفیت‌دار و قابلیت برداشت و تحویل در چند بار در یک شبکه زنجیره تامین چند سطحی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل ۸(۳)، ۳۵۵-۳۶۹.

— دلاوری و کیا (۱۳۹۶). حل مساله زمانبندی و مسیریابی وسایل نقلیه در کراس داک با درنظرگرفتن پنجره‌زمانی سخت و ناحیه‌بندی مشتری، چهاردهمین کنفرانس بین المللی صنایع.

— علینقیان، حسن زاده، البرز و زینل همدانی. (۱۳۹۸). "ارائه‌ی یک مدل ریاضی جدید به‌منظور تخصیص وسایل نقلیه به سکوها و مسیریابی وسایل نقلیه به‌طور هم‌زمان در انبار عبوری با

پنجره‌ی زمانی نرم". مهندسی صنایع و مدیریت، ۳۵(۱،۲)، ۷۵-۸۴.

– A. Gunawan, A.T. Widjaja, P. Vansteenwegen, V.F. Yu, Two-phase matheuristic for the vehicle routing problem with reverse cross-docking, Ann. Math. Artif. Intell. 90 (7–9) (2022) 915–949.

– Apte, U. M., & Viswanathan, S. (2000). Effective cross docking for improving distribution efficiencies. International Journal of Logistics, 3(3), 291–302.

– Boysen, N., & Fliedner, M. (2010). Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. Omega, 38(6), 413–422.

– Cen, Xuekai, et al. "Modelling and heuristically solving three-dimensional loading constrained vehicle routing problem with cross-docking." *Advanced Engineering Informatics* 57 (2023): 102029.

– Chen, P., Guo, Y., Lim, A., & Rodrigues, B. (2006). Multiple crossdocks with inventory and time windows. Computers & Operations Research, 33(1), 43–63.

– Dondo, R., & Cerd´ a, J. (2013). A sweep-heuristic based formulation for the vehicle routing problem with cross-docking. Computers & Chemical Engineering, 48, 293–311.

– Dondo, R., & Cerd´ a, J. (2015). The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. Computers & Chemical Engineering, 76, 42–62.

– Dondo, R., & Cerda, ´ J. (2014). A monolithic approach to vehicle routing and operations scheduling of a cross-dock system with multiple dock doors. Computers & Chemical Engineering, 63, 184–205.

– Gunawan, A., Widjaja, A., Vansteenwegen, P., & Yu, V. (2021). A matheuristic algorithm for the vehicle routing problem with cross-docking. Applied Soft Computing Journal, 103, 107–163.

– Hasani-Goodarzi, A., Nahavandi, N., & Zegordi, S. H. (2018). A multi-objective imperialist competitive algorithm for vehicle routing problem in cross-docking networks with time windows. Journal of Industrial and Systems Engineering, 11(1), 1–23.

– Hwang, C. L., & Masud, A. S. M. (1979). Multiple objective decision making-methods and applications, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 164, Springer.

– Kaboudani, Yaser, et al. "Vehicle routing and scheduling in cross docks with forward and reverse logistics." *Operational Research* 20 (2020): 1589-1622.

– Lee, Y. H., Jung, J. W., & Lee, K. M. (2006). Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain. Computers & Industrial Engineering, 51(2), 247–256.

– Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. Applied Mathematics and Computation, 219(18), 9652–9669.

– Mousavi, S. M., Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Hashemi, H. (2014). Location of cross-docking centers and vehicle routing scheduling under uncertainty: A fuzzy possibilistic–stochastic programming model. Applied Mathematical Modelling, 38 (7–8), 2249–2264.

– Nasiri, Mohammad Mahdi, et al. "Incorporating supplier selection and order allocation into the vehicle routing and multi-cross-dock scheduling problem." *International Journal of Production Research* 56.19 (2018): 6527-6552.

– P.M. Cota, T.H. Nogueira, A.A. Juan, M.G. Ravetti, Integrating vehicle scheduling and open routing decisions in a cross-docking center with multiple docks, Comput. Ind. Eng. 164 (2022) 107869.

– Rahbari, Ali, and Mohammad Mahdi Nasiri. "Robust vehicle routing and cross-dock scheduling with uncertain loading and unloading time." *1st International Conference on Systems Optimization & Business Management*. 2017.

– Shahabi-Shahmiri, R., Asian, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., & Rajabzadeh, M. (2021). A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable.

– Souza, Vitor AA, Rafael A. Melo, and Geraldo R. Mateus. "The Vehicle Routing Problem with Cross-Docking and scheduling at the Docking Station: Compact formulation and a General Variable Neighborhood Search metaheuristic." *Applied Soft Computing* 161 (2024): 111744.

– Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zandieh, M., & Razmi, J. (2012). Vehicle routing scheduling using an enhanced hybrid optimization approach. Journal of Intelligent Manufacturing, 23(3), 759–774.

– Van Belle, Jan, Paul Valckenaers, and Dirk Cattrysse. "Cross-docking: State of the art." *Omega* 40.6 (2012): 827-846.

– Yu, V.F., Jewpanya, P., Redi, A.P., Tsao, Y.C., 2022. Adaptive neighborhood simulated annealing for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with multiple cross-docks. Comput. Oper. Res. 129, 105205.

– Zachariadis, Emmanouil E., et al. "The vehicle routing problem with capacitated cross-docking." Expert Systems with Applications 196 (2022): 116620.

توسعه مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه ناهمگن ظرفیت‌دار با کراس داک چند درب با درنظرگرفتن پنجره زمانی

فاطمه خواجه‌سعیدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع-ایمنی صنعتی را در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی أخذ نمود. در حال حاضر ایشان دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع- مدیریت پروژه در دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشند. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه، زنجیره تامین و سیستم‌های لجستیکی، بهینه‌سازی و مدلسازی و تصمیم گیری در شرایط عدم قطعیت است.

دکتر سید فرید قنادپور، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی مهندسی صنایع – سیستم و مدیریت بهره‌وری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید.زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت حمل و نقل و زنجیره تامین، مسائل بهینه‌سازی و مدلسازی ریاضی، مسائل مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه و پهبادها، برنامه ریزی و کنترل پروژه و تصمیم گیری با عدم قطعیت است. ایشان در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران می باشند.