

بهینه سازی یکپارچه زمان بندی- مسیریابی انبارهای متقاطع در زنجیره تأمین

آرزو قلاوند^۱، سیدرضا حسینی^۲

^۱دانشکده فنی مهندسی، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران؛
galavand.arezoo@gmail.com

^۲دانشکده فنی مهندسی، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشگاه خوارزمی، تهران؛ reezaa2013@gmail.com

چکیده

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه یکی از مهم ترین مسائل موجود در صنایع جهان است که امروزه به علت کاربردهای واقعی در مسائل صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شرکتها تمایل دارند هم رضایت مشتریان از تحویل به موقع محصولات را جلب نمایند و هم هزینه های انبارداری و حمل و نقل محصولات را حتی المقدور کاهش یابد. ترکیب استراتژی باراندازی متقاطع با مسئله VRP کلاسیک، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با باراندازی متقاطع را به وجود می آورد. در مسئله مسیریابی هدف آن است که با کمترین هزینه ممکن، محصولات به موقع از کارخانه ها بارگیری و به مقاصد تحویل داده شود، و سطح موجودی و مدت زمان انبارکردن محصولات کاهش یابد. آنچه که ما در این مقاله مورد هدف قرار داده ایم، علاوه بر مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، مسئله زمان بندی وسایل نقلیه در انبارهای متقاطع در زنجیره تأمین مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج این پژوهش انتظار داریم که به مدلی ریاضی دو هدفه برای بهینه سازی و یکپارچگی زمان بندی- مسیریابی انبارهای متقاطع در زنجیره تأمین برسیم و این مهم را به صورت مدلی امکان پذیر نماییم و نتایج به دست آمده را از حل توسط نرم افزار گمز ارائه می دهیم. از نوآوری های اصلی در این پژوهش مکانیابی و مسیریابی باز انبارهای متقاطع در یک زنجیره تأمین چند محصولی با ناوگان نا همگن که دارای ظرفیت حمل و هزینه های متفاوت می باشد و به باز بودن تورهای مسیریابی و لحاظ کردن هزینه عملیات درون انبارهای متقاطع، در تابع هدف و در نظر گرفتن پنجره زمانی سخت اشاره کرد.

کلمات کلیدی: بهینه سازی؛ یکپارچه زمان بندی؛ مسیریابی؛ انبارهای؛ زنجیره تأمین

1- مقدمه

در دنیای رقابتی امروز، رقابت از سطح شرکتها به رقابت میان زنجیره تأمین آنها کشیده شده است. زنجیره تأمین، زنجیره ای است که همه فعالیت های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد، از مرحله تهیه ماده اولیه تا مرحله تحویل کالای نهایی به مصرف کننده را شامل می شود و امروزه زنجیره تأمین از مهمترین بحث های رایج در سازمانها است و برای موفقیت در محیط جدید کسب و کار، زنجیره تأمین به بهبود مداوم نیاز دارد. زنجیره های تأمین از دیر باز مورد توجه محققان بوده که این امر بیانگر اهمیت بالای این موضوع است. از طرف دیگر انبارها و مراکز توزیع همواره در دسته ی عناصر تاثیرگذار زنجیره تأمین قرار گرفته اند و در طول سالهای پیشین مطالعات قابل توجهی جهت طراحی انبارها از جنبه های گوناگون صورت گرفته که به طور طبیعی هدف تمام آنها بهینه سازی زنجیره های تأمین مرتبط با آنها بوده است. از آنجایی که همواره موضوع نگهداری موجودی در کلیه مسائل مرتبط با انبار ایفای نقش می کند، تلاش های بسیاری در راستای بهینه سازی سطح موجودی صورت گرفته تا اینکه مطالعات به سمت حذف کامل موجودی در انبارها گرایش پیدا کرده و مفهوم انبار متقاطع برای حذف موجودی ارائه شد. کنترل صحیح جریان فیزیکی مواد و محصولات یکی از مهم ترین مسائل در مدیریت زنجیره تأمین به شمار می رود. طبق پژوهش های صورت گرفته 30% قیمت



محصولات ناشی از هزینه‌های توزیع و حمل‌ونقل است [1]. بنابراین با مدیریت صحیح جریان مواد و محصولات در زنجیره‌تأمین می‌توان از قیمت نهایی محصولات کاست و بر رضایت مشتریان افزود. از این رو بسیاری از شرکت‌ها روش‌ها و استراتژی‌های نوینی در کنترل سیستم نگهداری جریان محصولات وضع می‌کنند. مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با باراندازی متقاطع VRPCD یکی از مشکل‌ترین مسائل در زنجیره‌تأمین است. در مسئله VRPCD یک یا چند بارانداز با ظرفیت محدود بین عرضه کنندگان و تقاضایان محصولات قرار دارند و مجموعه‌ای از وسایل نقلیه برای حمل‌ونقل محصولات در نظر گرفته می‌شوند به نحویکه امکان تخلیه یا بارگیری مجدد محصولات در باراندازها نیز ممکن است. مفهوم باراندازی متقاطع، به عنوان یکی از استراتژی‌های انبارش، سبب می‌گردد سطح موجودی و به تبع آن هزینه نگهداری محصولات کاهش یابد. هدف از مسئله کاهش مجموع هزینه‌های انبارداری و حمل‌ونقل محصولات است، که این هدف مسیریابی بهینه وسایل نقلیه محقق می‌شود. در این تحقیق، به مدلسازی و حل مسئله VRPCD برای شبکه توزیع چند محصولی پرداخته می‌شود. رسیدن، ورود هم زمان وسایل نقلیه به بارانداز در فرآیند بارگیری و یکپارچه سازی، ادغام محصولات در بارانداز به منظور تحویل به مشتریان دو عنصر مهم در باراندازی تقاطعی هستند که موجب مسیریابی و زمان‌بندی صحیح وسایل نقلیه از شروع فرآیند بارگیری تا اتمام فرآیند تحویل می‌شود [2]. باید توجه داشت که در این تحقیق، حل این مسئله را می‌توان با تلفیق دو مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با مسئله زمان‌بندی در نظر گرفت. اما باید در نظر گرفت، مسیرهای وسیله نقلیه و تحویل مستقل از هم نیستند. بنابراین تلاش برای به حداقل رساندن فاصله مسیرهای تحویل به طور جداگانه کافی نیست؛ مبادله سفارشات در نقطه تحویل نیز باید مورد توجه قرار گیرد [3]. یکی از مهم‌ترین فاکتورها در اجرای مدیریت زنجیره‌تأمین، کنترل کارای جریان فیزیکی کالاها در زنجیره‌تأمین می‌باشد و بسیاری از شرکت‌ها به دنبال توسعه‌ی روش‌های کارا به منظور افزایش رضایتمندی مشتریان و کاهش هزینه‌ها هستند و در بین روش‌های مختلف، انبار متقاطع یک روش خوب به منظور کاهش سطح موجودی و بهبود سطح پاسخ‌گویی به تقاضاهای مختلف مشتریان به شمار می‌رود. به منظور کاربرد کارای انبار متقاطع جریان فیزیکی از تأمین‌کنندگان به انبار متقاطع (فرآیند بارگذاری) و همچنین از انبار متقاطع به مشتریان (فرآیند تحویل) نیز باید در نظر گرفته شود، که این مستلزم بررسی مسیریابی وسایل نقلیه در فرآیندهای بارگذاری و تحویل می‌باشد [4]. همچنین در این تحقیق هر وسیله نقلیه ورودی حداقل به یک تأمین‌کننده و هر وسیله نقلیه خروجی حداقل به یک مشتری خدمت می‌دهد. بنابراین آنچه را که ما در این تحقیق مورد هدف قرار می‌دهیم، علاوه بر مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه، زمان‌بندی این وسایل نقلیه در فرآیند بارگذاری از تأمین‌کنندگان و تحویل به مشتریان نیز مورد بحث قرار می‌گیرد تا از این طریق بتوان به مدلی کاربردی‌تر دست یافت و سپس تعدادی از مسائل آزمایشی در ابعاد کوچک و با نرم افزار گمز GAMZ حل و نتایج محاسباتی آن ارائه می‌شود.

2- پیشینه تحقیق

یکی از نخستین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه توسط [5] صورت گرفت که در آن تئوری استراتژی باراندازی متقاطع تشریح شده و به جنبه عملی آن پرداخته نشد. در ادامه، تحقیقی صورت گرفت که در آن چهارچوب کلی مفهوم باراندازی متقاطع را تشریح و مدل سازی ریاضی یک شبکه توزیع محصولات ارائه شد [1]. بویسن و فیلدر و کمی بعد بل و همکاران مسائلی را که در ارتباط با انبار متقاطع به تناسب سطوح زمانی جهت تصمیم‌گیری وجود دارد، از سطح استراتژیک تا سطح عملیاتی می‌تواند به شرح زیر دسته‌بندی کردند: مکانیابی انبار/انبارهای متقاطع، طراحی چیدمان انبارها، مسیریابی وسایل حمل و نقل، شبکه‌های انبارهای متقاطع، تخصیص کامیون‌ها به درب‌ها، زمان‌بندی کامیون‌ها، زمان‌بندی منابع درون انبارهای



مقاطع، بسته بندی و حمل و نقل درون انبارهای متقاطع [6].
[7]، مساله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار در حالت چند محصولی در انبار متقاطع را بررسی کرده اند. [8]، یک مدل یکپارچه برای مساله مسیریابی با انبار متقاطع با تعیین مسیرهای جمع آوری و پخش و زمانبندی آن ها و همچنین زمانبندی کامیون ها در ترمینال ها ارائه کرده اند.

[9]، در مقاله ای به مسئله مکانیابی انبار متقاطع و مسیریابی کامیون ها را با دو مدل برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح و به صورت یکپارچه و در حالت عدم قطعیت پرداخته است و آن را با یک روش برنامه ریزی احتمالی فازی حل کرده اند. آن ها دو مدل مکانیابی و مسیریابی را به طور جداگانه در نظر گرفته اند؛ از جواب های بدست آمده در مدل اول که مکانیابی است به عنوان پارمترهای مدل دوم استفاده کرده اند. عدم قطعیت در مدل آن ها زمان های رسیدن به انبار و ترک انبار می باشد.

[10]، در مقاله ای با عنوان مسئله مسیریابی با انبار متقاطع پرداخته است. هدف او پیدا کردن مسیری بود که هزینه های کل و ثابت حمل و نقل را کاهش دهد به همین ترتیب به مسئله مکانیابی تخصیص در یک زنجیره تامین پرداخت تا هزینه کل زنجیره کاهش یابد.

[11] یک مدل دو هدفه برای برنامه ریزی حمل و نقل کامیون و مسئله مسیریابی سبز در یک سیستم انبار متقاطع معرفی کرده اند. این مدل سه تصمیم کلیدی در انبار متقاطع را مشخص می کند: 1) تعیین توالی و برنامه کامیون های ورودی در درب پذیرش 2) تعیین یک دنباله و برنامه کامیون های ورودی در درب حمل و نقل 3) تعیین مسیرهای کامیون خروجی که به سمت مشتری می روند. اولین تابع هدف به پاسخگویی شبکه مربوط است که کمینه کردن نقص پنجره زمانی است و دومین هدف کمینه کردن کل مصرف سوخت برای حفظ جنبه زیست محیطی شبکه است. یک اثر یادگیری نیز در زمان فرایند بارگیری و تخلیه در نظر گرفته شده است. برای حل مدل دو هدفه یک مدل شبیه سازی چند هدفه (AMOSA) به کار گرفته شده است. در این پژوهش که از برنامه ریزی ریاضی استفاده کرده اند، چندین مشتری در نظر گرفته شده که هر کدام یک تقاضای از قبل شناسایی شده برای هر نوع محصول و یک پنجره زمانی برای دریافت محصول دارد. یک انبار متقاطع با تنها یک در ورودی و یک در حمل و نقل که محصولات ورودی را جمع می کند، مرتب می کند و آن ها را به کامیون های خروجی توزیع می کند در نظر گرفته شده است.

[12] یک مدل ریاضیاتی چند هدفه برای حل یک مسئله مکانیابی-تخصیص در یک شبکه زنجیره تامین چند لایه برای بهینه سازی سه هدف همزمان کمینه سازی هزینه کل زنجیره تامین، بیشینه سازی نرخ تراکم و کمینه سازی انتشار گاز CO2 ارائه دادند. رویکرد تحلیلی تکاملی ترکیبی استخراج شده از داده ها با ترکیب الگوریتم NSGA-II برای اهداف چندگانه در الگوریتم تفاضلات تکاملی به دست آمده است.

3- مدل سازی مسئله

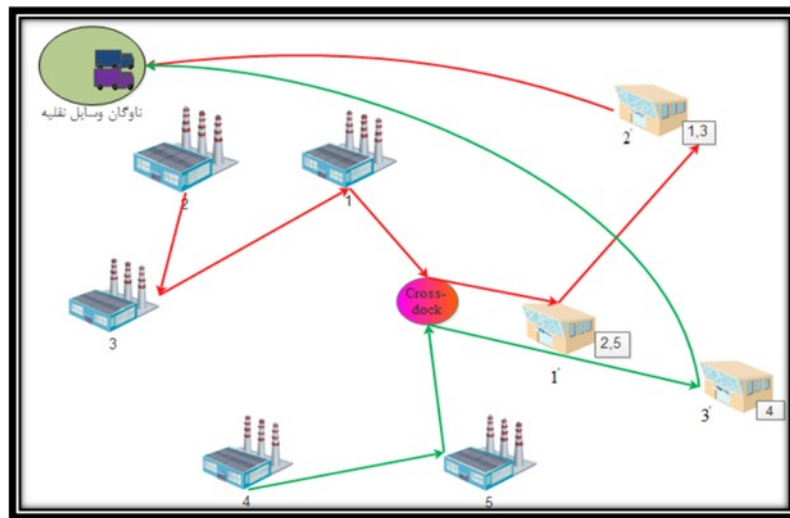
مسئله مفروض برای توزیع کالاها در زنجیره تامین ذکر شده، سه مرحله در نظر می گیرد. در مرحله اول که از بارانداز شروع می شود. کامیون ها با تشکیل تور متشکل از تامین کنندگان مختلف، کالاهایی را که باید به خرده فروشان تحویل داده شوند جمع آوری کرده و در بارانداز تخلیه می کنند. بعد از مرتب سازی و ترکیب بارها در بارانداز، مرحله دوم شروع می شود و کامیون ها برای ارسال به خرده فروشان بارگیری می شوند. در این مرحله با تحویل کالاهای درخواستی به خرده فروشان همزمان کالاهای برگشتی آن ها هم بارگیری می شود، با تکمیل تور کامیون ها به بارانداز باز می گردند. در مرحله سوم، پس از تخلیه و ترکیب کالاهای بازگشتی در بارانداز، این کالاها بارگیری شده و به تامین کنندگان ارسال می گردد. با تکمیل تور و برگشت کامیون ها به ناوگان این فرایند تکمیل می شود.

3. 1- تعریف مسئله

در این تحقیق، هدف طراحی بهینه شبکه زنجیره عرضه محصولات یک شرکت، به مشتریان متقاضی آن‌ها است. این شرکت چندین کارخانه تولیدی دارد که هر کدام محصول خاصی را جهت عرضه به بازار آماده می‌کنند. پس از تولید محصولات در کارخانه‌ها، شرکت قصد دارد یک استراتژی مناسب در توزیع محصولات به مشتریان تدوین کند به نحوی که هزینه‌های کل و زمان تحویل محصولات کمینه گردد. این شرکت تصمیم دارد از استراتژی باراندازی متقاطع (CD) به منظور انبارش و توزیع محصولات استفاده کند. بنابراین، ابتدا می‌بایست از مکان‌های بالقوه مشخص شده مراکز CD به نحو بهینه مکانیابی شوند. و سپس شبکه توزیع و حمل‌ونقل محصولات از کارخانه‌ها به مشتریان، توسط مراکز CD، تعیین گردد.

با توجه به محدودیت بودجه، شرکت در نظر دارد تنها یک مکان را به عنوان بارانداز (مرکز CD)، در نظر گیرد. هزینه ثابت برقراری مرکز CD، و هزینه‌های حمل‌ونقل از کارخانه‌ها به بارانداز و از بارانداز به مشتریان، عوامل تأثیرگذار در مکانیابی این مرکز هستند. به عبارت دیگر، مرکز CD در مکانی قرار می‌گیرد که اولاً هزینه ثابت برای در اختیار داشتن این مکان پایین باشد، ثانیاً؛ با توجه به آنکه هزینه حمل و نقل تابعی از فاصله‌های پیموده شده است، کمترین فاصله را با کارخانه‌ها و مشتریان داشته باشد. ظرفیت باراندازها، لزوم تحویل دادن تمام تقاضای مشتریان، لزوم اتصال کارخانه‌ها و مشتریان به مرکز CD، برای حمل‌ونقل محصولات از جمله محدودیت‌های تصمیم‌گیری در گام یک (مکانیابی مرکز CD) هستند.

پس از مشخص شدن مکان بهینه بارانداز، باید وسایل نقلیه برای حمل‌ونقل محصولات انتخاب شوند و مسیریابی حرکت آن‌ها صورت پذیرد. برای این منظور، شرکت مورد نظر از یک شرکت حمل‌ونقل چندین وسیله نقلیه (نه لزوماً همگن) را اجاره می‌گیرد. به محض حرکت وسایل نقلیه به سمت کارخانه‌ها، هزینه ثابت اجاره این وسایل نقلیه لحاظ می‌شود. سپس، مسیریابی وسایل نقلیه ابتدا از کارخانه‌ها به بارانداز، به منظور فرایند بارگیری و بعد از آن از بارانداز به مشتری‌ها، به منظور فرایند تحویل سفارشات، انجام می‌شود. توجه کنید که عملیات تخلیه و بارگیری مجدد محصولات برای برخی از وسایل از وسایل نقلیه در بارانداز انجام می‌شود. واضح است، در گام دوم، شرکت با یک مسئله مسیریابی باز روبه‌رو است. که با در نظر گرفتن استراتژی باراندازی متقاطع، به عنوان مسئله مسیریابی باز وسیله نقلیه با باراندازی متقاطع (OVRPCD) شناخته می‌شود. در اینجا، هدف شرکت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل وسایل نقلیه و همچنین هزینه ثابت اجاره وسایل نقلیه است. که انتخاب درست وسایل نقلیه و مسیریابی صحیح آن‌ها موجب می‌شود، هدف مذکور در حد بهینه محقق شود. در دستیابی به این هدف محدودیت‌هایی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به ظرفیت وسایل نقلیه، لزوم تحویل تمام تقاضای مشتریان، ممنوعیت گذر وسایل نقلیه از مسیرهای ناموجه، لزوم بارگیری قبل از تحویل و لزوم تخلیه قبل از بارگیری مجدد اشاره کرد. هر وسیله نقلیه، بعد از اجاره شدن مسیر حرکت خود را از یک کارخانه شروع می‌کند و پس از بارگیری محصولات یک یا چند کارخانه به بارانداز می‌رود. ادامه مسیر از بارانداز شروع می‌شود و این بار وسایل نقلیه مسیری را بین مشتریان طی می‌کنند تا سفارشات آن‌ها را تحویل دهند. وسایل نقلیه بعد از تحویل سفارش آخرین مشتری متناظر با آن‌ها، باید کاملاً خالی باشند و به ناوگان شرکت اجاره دهنده وسایل نقلیه باز گردد. بنابراین، گرچه شروع مسیر هر وسیله نقلیه از یک کارخانه است، ولی بازگشت مجدد به کارخانه صورت نمی‌گیرد، لازم به ذکر است که این نوع مسائل مسیریابی در ادبیات با نام مسائل مسیریابی باز شناخته شده‌اند. هر مشتری متقاضی مقداری مشخص از یک یا چند محصول است. فرض می‌شود که مشتریان سفارشات خود را از قبل به شرکت اطلاع داده‌اند، لذا تقاضای محصولات قطعی و از قبل مشخص است. شرکت می‌بایست توسط وسایل نقلیه اجاره شده سفارش مشتریان را تحویل



شکل 1: مسیریابی وسایل نقلیه در مسئله OVRPCD

4- پارامترهای مدل

جدول 1: مجموعه‌ها

$F = \{1, 2, 3, \dots, n\}; f \in F$	کارخانه تولید کننده محصولات
$P = \{1, 2, 3, \dots, n\}; p \in P$	محصولات (برای سادگی فرض می‌کنیم محصول P در کارخانه $f=p$ تولید می‌شود)
$D = \{1, 2, 3, \dots, m\}; d \in D$	مشتریان
$CD = \{1, 2, 3, \dots, k\}; cd \in CD$	مکان بالقوه به منظور برقراری مرکز باراندازی متقاطع
$V = \{1, 2, 3, \dots, q\}; v \in V$	وسایل نقلیه (وسایل نقلیه در ظرفیت و هزینه اجاره یا هم متفاوت اند)
$\{O\}$	ناوگان وسایل نقلیه (شرکتی که وسایل نقلیه از آن اجاره می‌شود)
$N = F \cup D \cup \{cd^*\} \cup \{O\}; i \in N$	گره‌های شبکه (منظور از cd^* مرکزی است که به عنوان مکان بهینه باراندازی در شبکه، در گام اول مدل تعیین می‌شود)

جدول 2: پارامترها

fix_{cd}	هزینه برقراری مرکز باراندازی متقاطع در مکان cd	cap^7	ظرفیت وسیله نقلیه v
$t_{(i,j)}$	زمان حمل و نقل بین گره i ، j	$\alpha_i, \beta_i, \zeta_i$	بازه زمانی (time window) برای گره i ام شبکه
ζ_1	مبدل زمان حمل و نقل به فاصله / هزینه	ψ	زمان انتظار برای شروع انجام عملیات تخلیه یا بارگیری مجدد در بارانداز
ζ_2	مبدل زمان فرایندهای تخلیه و بارگیری به هزینه	φ	متوسط زمان بارگیری یا تخلیه وسایل نقلیه برای هر واحد از هر محصول
cap_{cd}	ظرفیت مرکز cd	M	عدد ثابت و بزرگ (Big number)
$MaxBudg$	حداکثر بودجه در دسترس برای برقراری مرکز باراندازی متقاطع	dem_p	میزان تقاضا از محصول p
$Rent_7$	هزینه ثابت اجازه وسیله نقلیه v	$\ell^{pic,i}$	مدت زمان بارگیری محصول از کارخانه i
$b_{d,p}$	پارامتری باینری که نشان می‌دهد مشتری d متقاضی محصول P است یا خیر	$\ell^{del,i}$	مدت زمان تحویل محصول به مشتری i

جدول 3: متغیرهای باینری

Z_{cd}	اگر مرکز cd برقرار شود 1، در غیر این صورت 0	u_p^v	اگر وسیله نقلیه v محصول p را در بارانداز تخلیه کند 1، در غیر این صورت 0
$X_{(f,cd)}$	اگر کارخانه f به بارانداز cd وصل شود 1، در غیر این صورت 0	r_p^v	اگر وسیله نقلیه v محصول p را از بارانداز مجدداً بارگیری کند 1، در غیر این صورت 0
$X_{(cd,d)}$	اگر بارانداز cd به مشتری d وصل شود 1، در غیر این صورت 0	q^v	اگر وسیله نقلیه v در بارانداز تخلیه بار داشته باشد 1، در غیر این صورت 0
$X_{(i,j)}^v$	اگر وسیله نقلیه v از پال (i, j) بگذرد 1، در غیر این صورت 0	h^v	اگر وسیله نقلیه v در بارانداز بارگیری مجدد داشته باشد 1، در غیر این صورت 0
x_p^{1v}	اگر در پایان consolidation محصول p در وسیله نقلیه v قرار گیرد 1، در غیر این صورت 0	y^v	اگر وسیله نقلیه v اجاره شود 1، در غیر این صورت 0

جدول 4: متغیرهای پیوسته

$vol^{v,pick}$	حجم محصولات بارگیری شده در وسیله نقلیه v در پایان فرایند بارگیری	$t^{v,u}$	زمانی که وسیله نقلیه v در بارانداز تخلیه محصول را به پایان می رساند.
$vol^{v,del}$	حجم محصولات بارگیری شده در وسیله نقلیه v در پایان فرایند Cross docking (شروع فرایند تحویل محصولات)	$t^{v,r}$	زمانی که وسیله نقلیه v در بارانداز بارگیری مجدد محصول را شروع می کند.
S_i^v	زمانی که وسیله نقلیه v به گره i می رسد.	$t^{p,u}$	زمانی که محصول p در بارانداز تخلیه شده است.
$S_{cd \rightarrow i}^{v,1}$	زمانی که وسیله نقلیه v بارانداز را ترک می کند.		

5- مدل ریاضی مسئله

گام اول مدل ریاضی - مکانیابی بارانداز

$$Min C_L = \sum_{cd} fix_{cd} \cdot z_{cd} + \zeta \sum_{f \in F} \sum_{cdeCD} t_{(f,cd)} \cdot X_{(f,cd)} + \zeta \sum_{deD} \sum_{cdeCD} t_{(cd,d)} \cdot X_{9cd,d} \quad (1)$$

$$\sum_{cdeCD} x_{(f,cd)} = 1 \quad \forall f \quad (2)$$

$$\sum_{cdeCD} x_{(cd,d)} = 1 \quad \forall d \quad (3)$$

$$\sum_{cdeCD} z_{(cd)} = 1 \quad \forall cd \quad (4)$$

$$x_{(f,cd)} \leq 1 \quad \forall f \quad (5)$$

$$x_{(f,cd)} \leq 1 \quad \forall d \quad (6)$$

$$\sum_{cd} fix_{cd} \cdot z_{cd} \leq max\ Bugh \quad \forall cd \quad (7)$$

$$\sum_{pep} dem_p x_{(f=p,cd)} \leq cap_{cd} \quad \forall cd \quad (8)$$

$$x_{(f=p,cd)} \wedge x_{(cd,f)} \wedge z_{cd} \in \{0,1\} \quad (9)$$

در مدل P1 رابطه (1) هزینه مکانیابی را نشان می دهد که برابر است با مجموع هزینه های استقرار بارانداز، و حمل و نقل از کارخانه به بارانداز و از بارانداز به مشتریان. با حل مدل P1 مسئله، مکان بهینه جهت استقرار بارانداز، مشخص می شود که این مکان را با CD نشان می دهیم. حال در مدل زیر مسیریابی و زمان بندی وسایل نقلیه با توجه به موقعیت جغرافیایی این مکان و کارخانه ها و مشتریان صورت می گیرد.

گام دوم مدل ریاضی - مسیریابی و زمان بندی وسایل نقلیه

$$Min C_{VRP} = C_{rent} + C_{transport} + C_{cross-docking} \quad (10) \quad \sum_{veV} r_{(i)}^v \leq 1 \quad \forall i = p \in P \quad 28$$

$$C_{rent} = \sum_{veV} Rent_v \cdot y^v$$

$$y^v \geq \sum_{ieF} \sum_{jeF} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$C_{transport} = C_{trans}^{pick} + C_{trans}^{del}$$

$$C_{trans}^{pick} = \zeta 1. \sum_{veV} \sum_{ieF} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$C_{trans}^{del} = \zeta 1. \sum_{veV} \sum_{ieD} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$C_{cross-docking} = \zeta 2 \sum_{veV} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$\sum_{ieF} \sum_{veV} x_{(i,f)}^v \leq 1 \forall f$$

$$\sum_{ieF} \sum_{veV} x_{(i,f)}^v = 1 \forall f$$

$$\sum_{ieD} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in d \cup \{cd^i\}} x_{(j,d)}^v \geq b_{d,i} \forall i = p \in P, d$$

$$\sum_{j \in d \cup \{cd^i\}} x_{(j,d)}^v \geq b_{d,i} \cdot x_i^{iv} \forall i = p \in P, d$$

$$\sum_{ieF} \sum_{jeF} x_{(i,j)}^v - \sum_{jeF} \sum_{heF} x_{(j,h)}^v = 0 \forall v \in \bar{i}\bar{j}$$

$$\sum_{i \in D \cup \{cd^i\}} \sum_{veV} x_{(i,j)}^v - \sum_{jeD} \sum_{heD \cup \{O\}} x_{(j,h)}^v = 0 \forall v \in \bar{i}\bar{j}$$

$$\sum_{feF} x_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$vol^{v,pick} = \sum_{ieF} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$vol^{v,pick} \leq cap^v \forall v$$

$$u_p^v + r_p^v \leq 1 \forall p, v$$

$$u_i^v \leq \sum_{jeF \cup \bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$u_i^v \leq \sum_{jeF \cup \bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$(11) \quad x_i^{iv} \leq \sum_{ieF \cup \bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$(12) \quad vol^{v,del} = \sum_{ieF} \sum_{jeF} dem_i \cdot x_i^{iv} \forall v$$

$$(13) \quad vol^{v,del} \leq cap^v \forall v$$

$$(14) \quad \sum_{veV} \sum_{\bar{i}\bar{j}} \bar{i}\bar{j}$$

$$(15) \quad S_j^v \geq S_i^v + t_{(i,j)} + t_{pick,i} - M(1 - x_{(i,j)}^v)$$

$$(16) \quad t^{v,u} = S_{cd * \bar{i}^v} + \psi g^v + \varphi \sum_{ieP} dem_i \cdot u_i^v \forall \bar{i}\bar{j}$$

$$(17) \quad \frac{1}{M} \sum_{ieP} u_i^v \leq g^v \leq \sum_{ieP} u_i^v \forall v$$

$$(18) \quad t^{v,r} \geq t^{v..u} \forall v$$

$$(19) \quad t^{v,r} \geq t^{p..u} - M(1 - r_p^v) \forall v, P$$

$$(21) \quad t^{p..u} \geq t^{v..u} - M(1 - u_i^v) \forall v, P$$

$$(22) \quad S_{cd * \bar{i}^{iv}} = t^{v,r} + \psi h^v + \varphi \sum_{ieP} dem_i \cdot r_i^v \forall \bar{i}\bar{j}$$

$$(23) \quad \frac{1}{M} \sum_{ieP} r_i^v \leq h^v \leq \sum_{ieP} r_i^v \forall v$$

$$(24) \quad S_i^v \geq S_{cd * \bar{i}^{iv}} + t_{(cd*,i)} - M(1 - x_{(cd*,i)}^v) \forall i \in D, v \in \bar{i}\bar{j}$$

$$(25) \quad S_j^v \geq S_i^v + t_{del,i} + t_{(i,j)} - M(1 - x_{(i,j)}^v) \forall$$

$$\alpha_i \leq S_i^v \leq \alpha \beta_i \forall i \in F \cup D \cup \{cd^i\}$$

$$\sum_{deD} x_{(d,O)}^v = y^v \forall v$$

$$x_{(cd^i,f)}^v = x_{(d,cd^i)}^v = \forall v, f, d$$

$$(26) \quad x_{(i,j)}^v = 0 \forall v, i \in N$$

$$(27)$$

در P2، رابطه (10) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که هزینه اجاره وسایل نقلیه،

هزینه حمل و نقل و هزینه بار انداز متقاطع را دربر می گیرد و هدف کمینه سازی مجموعه این هزینه ها است.
رابطه (31) مجدداً ظرفیت وسیله نقلیه را کنترل می کند.

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in d \cup |cd^i|} x_{(j,d)}^v \geq b_{d,i} \forall i = p \in P.d \quad (1) \quad 32-)$$

$$\sum_{j \in d \cup |cd^i|} x_{(j,d)}^v \geq b_d \cdot x_i^{tv} \forall i = p \in P.d \quad (2) \quad 32-)$$

توجه کنید که هدف از حل مسائل P1 (گام اول) و P2 (گام دوم)، کم کردن هزینه کل توزیع محصولات از کارخانه های شرکت به مشتریان آن است. هزینه کل برابر است با $C_{total} = CL + CVRP$ مکان یابی بهینه بارانداز، انتخاب و مسیریابی بهینه وسایل نقلیه سبب می گردد که هزینه کل کمینه گردد.

6- حل مدل

همان طور که اشاره شد، مدل بهینه سازی ارائه شده یک مسئله MILP است. در پژوهش حاضر در مسئله مسیریابی باز وسایل نقلیه در سیستم باراندازی متقاطع با در نظر گرفتن بازه زمانی (OVERPCDTW) می توان مدل بهینه سازی MILP ارائه شده را در نرم فزاری GAMS کد نویسی و مسئله در ابعاد کوچک حل می نماییم.

6. 1- نوآوری ها

- تابع هدف مدل در گام دوم، علاوه بر ترم هزینه ای مربوط به مجموعه هزینه های حمل و نقل عملیات بارگیری و تخلیه، شامل ترم های هزینه ای عملیات درون انبار متقاطع CROSS - DOCKING و هزینه اجاره وسایل نقلیه c_{min}^4 نیز است که هزینه عملیات درون انبار متقاطع از طریق مجموع حاصل ضرب مدل زمان فرایندهای تخلیه و بارگیری به هزینه، در مدت زمان عملیات درون انبار متقاطع بدست می آید و هزینه اجاره وسایل نقلیه نیز از مجموعه ضرب متغیرهای باینری انتخاب وسیله، در هزینه اجاره وسایل نقلیه بدست می آید.
- مدل شامل وسایل نقلیه ناهمگن است و ناوگان حمل اجاره ای است از این رو در مدل امکان انتخاب وسایل نقلیه اجاره شده از ناوگان حمل، براساس ظرفیت (Cap) و هزینه اجاره وسیله (Rent) نقلیه لحاظ شده است.
- مدل از نوع مسیریابی باز (OVRP) است که در آن امکان بازگشت وسایل نقلیه به انبار متقاطع بعد از بازدید آخرین مشتری، وجود ندارد. با توجه به اینکه مقاله های پایه مرور شده همگی به بحث راجع به مسیریابی (VRP) در انبار متقاطع پرداخته بودند. در نظر گرفتن بحث مسیریابی باز از نوآوری های اصلی این پژوهش به شمار می رود.
- مدل چند محصولی است.

6. 2- یک مسئله OVRPCDTW و حل آن با CPLEX

در این قسمت، یک مسئله عددی مسیریابی باز با محدودیت افق زمانی ارائه می شود که در آن از استراتژی باراندازی متقاطع، در توزیع محصولات استفاده شده است. ابتدا براساس فرمولاسیون بیان شده و پارامترهای تعریف شده در جدول 5 مدل دو مرحله ای این مسئله ارائه می شود. سپس با استفاده از CPLEX به حل آن پرداخته می شود و جواب بهینه بیان می گردد.

جدول 5: معرفی مجموعه‌های مطرح شده در مسئله OVERPCDTW

تعداد کارخانه‌ها	تعداد مشتریان	مکان‌های بالقوه بارانداز	تنوع محصولات	تنوع وسایل نقلیه
10	4	8	10	5

جدول 6: معرفی مکان‌های بالقوه باراندازی مطرح شده در مسئله OVERPCDTW

مکان‌های بالقوه cross-docking	هزینه	طرفیت
CD ₁	487	30000
CD ₂	490	5000
CD ₃	519	1000
CD ₄	478	4000
CD ₅	522	6205
CD ₆	491	4290
CD ₇	409	7300
CD ₈	449	5500

جدول 7: محصولات و حجم قاضای هر محصول مطرح شده در مسئله OVERPCDTW

کارخانه	محصول	میزان تقاضا
F ₁	P ₁	300
F ₂	P ₂	400
F ₃	P ₄	550
F ₄	P ₅	400
F ₅	P ₆	200
F ₆	P ₇	100
F ₇	P ₈	130
F ₈	P ₁	320
F ₉	P ₉	200
F ₁₀	P ₁₀	300

جدول 8: اطلاعات مربوط به وسایل مطرح شده در مسئله OVERPCDTW

وسيله نقلیه	طرفیت	هزینه متغیر	هزینه ثابت/هزینه اجازه
V ₁	1800	4.8	200
V ₂	2000	4.5	400
V ₃	2000	6.3	700
V ₄	1200	7	500
V ₅	2100	6.5	400

جدول 9: فاصله مشتریان از محصولات در مسئله OVERPCDTW

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	[α , β]
d ₁	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	[0, 5]
d ₂	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	[.5, 4]
d ₃	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	[0, 4]
d ₄	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	[1.15, ∞]

جدول 10: فاصله کارخانه‌ها از بارانداز و بارانداز از مشتریان مطرح شده در مسئله OVERPCDTW

	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8		d 1	d 2	d 3	d 4
F1	49	77	56	69	5	71	39	68	CD1	407	445	480	355
F2	45	80	44	32	10	4	66	76	CD2	122	480	170	377
F3	65	19	38	95	82	28	17	74	CD3	465	274	293	138



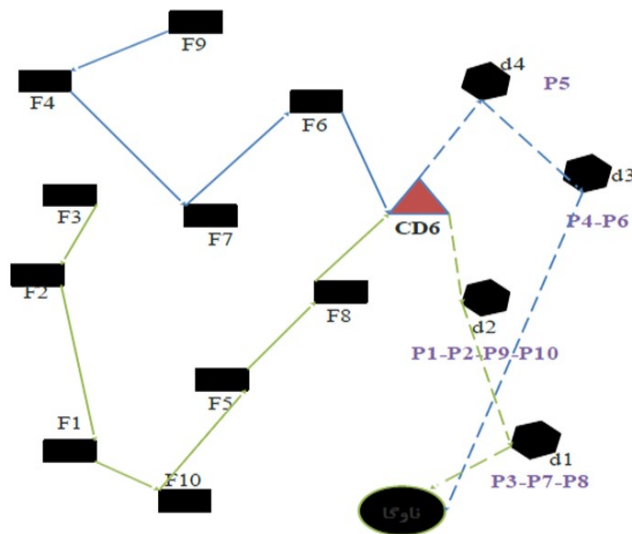
F4	65	77	56	95	82	28	17	68	CD4	175	69	112	340
F5	49	80	44	69	5	71	39	76	CD5	98	75	376	328
F6	45	19	38	32	10	44	66	74	CD6	126	129	128	81
F7	65	77	56	95	82	28	17	68	CD7	308	420	253	59
F8	49	77	56	69	5	71	39	68	CD8	237	127	350	249
F9	49	19	38	69	5	71	39	76	CD9				
F10	45	80	44	32	10	44	66	76	CD10				

همان طور که در بخش تعریف و مدل سازی مسئله اشاره شد، مسئله براساس یک رویکرد دو مرحله ای حل می شود که در گام نخست آن، بهترین مکان موجود برای CROSS- DOCKING مکانیابی می شود. در اینجا معیار انتخاب بهترین مکان، آن است که در مجموعه به کارخانه ها و مشتریان نزدیک ترین باشد. (MIN SUM) ظرفیت آن کافی باشد و هزینه آن از حداکثر بودجه در نظر گرفته شده بیشتر نباشد. جدول 11 هزینه هشت مکان بالقوه را برای باراندازی متقاطع نشان می دهد که بر اساس آن مکان CD6، به عنوان مکان بهینه، مکانیابی می شود. در گام دوم مسئله، هدف توزیع بهینه محصولات 10 کارخانه، به 4 مشتری متقاضی آن است که مکان CD6 به عنوان بارانداز در مسیر قرار می گیرد تا عملیات ادغام (در صورت نیاز) در آنجا صورت گیرد.

جدول 11: جواب بهینه مکانیابی مطرح شده برای گام اول مسئله OVERPCDTW

وضعیت مکان های بالقوه برای مکان یابی							مکان بهینه		
CD ₁	CD ₂	CD ₃	CD ₄	CD ₅	CD ₆	CD ₇	CD ₈	مکان	هزینه
9897600	10464300	9782200	9581400	1128900	9389100	10076100	1456700	ن	9289100

در جواب بهینه مسئله در گام دوم، وسیله نقلیه V1 (آبی رنگ)، محصولات کارخانه های F4، F7، F9 و نهایتاً F6، را به ترتیب، بارگیری میکند و وسیله نقلیه V2 (سبز رنگ)، به ترتیب، محصولات کارخانه های F3، F2، F1، F10، F5، F8 را بارگیری می کند. سپس فرایند CONSOLIDATION در بارانداز شروع می شود که طی آن V1 محصولات P7، P9 را تخلیه و محصول P5 را که توسط V2 تخلیه شده است را، بارگیری مجدد می نماید. V2 نیز محصولات P7، P9 را در فرایند ادغام، بارگیری مجدد می نماید. در مسیر تحویل نیز سفارش مشتریان d3، d4 توسط V1 و سفارش مشتریان d1، d2 توسط V2 تحویل داده می شود.



شکل 2: نمای شماتیک مسیریابی و توزیع بهینه محصولات مطرح شده در گام دوم
مسئله OVERPCDTW

جدول 12: جواب بهینه انتخاب، مسیر و زمانبندی بارگیری و تحویل محصولات مطرح
شده برای گام دوم مسئله OVERPCDTW

رویکرد دقیق (CPLEX))		
وسایل نقلیه انتخاب شد	مسیر حرکتی	ادغام Consolidation
V1	F9-F4-F7-F6-CD6-d4-d3	p5 و p7 تخلیه بارگیری P9
V2	F3-F2-F1-F10-F5-F8-CD6-d2-d1	p7 و P9 تخلیه بارگیری P5
هزینه: 62800.00		
زمان حل: Sec. 14.55		

7- نتیجه گیری

در این پژوهش ضمن نشان دادن مزیت سیستم باراندازی متقاطع در کاهش هزینه‌ها و زمان تحویل محصولات به مشتریان، به منظور پوشش خط تحقیقاتی در زمینه یکپارچه‌سازی تصمیمات بلندمدت و کوتاه مدت مرتبط با استراتژی انبارداری متقاطع، بر آن شدیم تا ضمن مدل سازی مسئله مکان یابی مسیریابی باز در زنجیره تأمین شامل انبارهای متقاطع، پردازیم. در این پژوهش پس از بیان مقدمه و مفاهیم اصلی مرتبط با موضوع به مرور ادبیات مرتبط با حوزه پژوهش پرداخته شد و ضمن مرور مقالات پایه، ایده‌ها و نوآوری‌های لازم برای ساخت مدل فراهم گردید و در قالب مدل MILP شامل دو گام مکانیابی و مسیریابی باز انبارهای متقاطع برای شبکه توزیع چند محصولی با محدودیت پنجره زمانی، مدل ارائه شده در ابعاد کوچک توسط نرم افزار گمز CPLEX SOLVER حل گردیده است.

نوآوری‌های اصلی پژوهش شامل مسیریابی باز و در نظر گرفتن فرض پنجره زمانی و مدل چند محصولی با ناوگان حمل ناهمگن است. مدل این پژوهش ضمن در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های کلی شبکه توزیع از طریق فرض لحاظ کردن فرض پنجره‌های زمانی، به بحث رضایت مشتری و تحویل به موقع سفارشات در بازه زمانی مورد نظر مشتریان، توجه داشته است که این توجه توأمان به بحث‌های هزینه‌ای و رضایت مشتری، کلید موفقیت و بقا در بازارهای رقابتی امروز بوده و به ارزش نتایج حاصل از این پژوهش خواهد افزود.

8- پیشنهادات آتی

- در این تحقیق، تقاضای مشتریان، مدت زمان عملیات بارگیری و تحویل، و تعداد وسایل نقلیه در دسترس را مقادیر ثابت و قطعی در نظر گرفته ایم؛ این در صورتی است که در عمل معمولاً در این پارامترها عدم قطعیت وجود دارد. لذا در تحقیقات آتی می توان از رویکردهای بهینه سازی در شرایط عدم قطعیت، استفاده نمود تا مدل به دنیای واقعی نزدیک تر گردد.
1. مدل سازی مسئله در یک زنجیره تامین سبز (Green VRP)، افزایش نگرانی های زیست محیطی ناشی از رشد روز افزون اثرات تهدید کننده فعالیت های مؤثر بر محیط زیست اغلب تصمیم گیرندگان بخش های مختلف صنعتی و خدماتی را ملزم به توجه بیشتر به پیامدهای زیست محیطی فعالیت آن ها نموده است به همین منظور در این حالت مدل پژوهش می تواند شامل اهداف چندگانه مانند مینیمم سازی هزینه های حمل و نقل و مقدار گاز CO₂ نیز باشد.
 2. مدل سازی مسئله در حالت عدم قطعیت موجود در پارامترهای زیر به منظور نزدیک تر کردن مدل مسئله به دنیای واقعی؛ تقاضای مشتریان، مدت زمان عملیات بارگیری و تحویل، تعداد وسایل نقلیه.
 3. پیاده سازی مدل پژوهش به صورت مطالعه موردی در شرکت های توزیع و لجستیکی.
 4. پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی، برنامه ریزی مسائل درون انبارهای متقاطع مانند برنامه ریزی موجودی و منابع به مدل این پژوهش اضافه شود.
 5. می توان از الگوریتم های فرا ابتکاری مانند ژنتیک، مورچگان و یا جستجوی ممنوع و ... ، برای حل این مسئله ارائه نمود.
 6. می توان از چندین انبار متقاطع در شبکه توزیع استفاده نمود.

9- منابع

- [1] U. M. Apte and S. Viswanathan, "Effective Cross Docking for Improving Distribution Efficiencies," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 3, no. 3, pp. 291–302, Nov. 2000, doi: 10.1080/713682769.
- [2] Y. H. Lee, J. W. Jung, and K. M. Lee, "Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 51, no. 2, pp. 247–256, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.cie.2006.02.006.
- [3] S. Larioui and M. Reghioui, "Resolution of the vehicle routing problem with cross-docking," 2017.
- [4] A. Shadman, A. Bozorgi-amiri, and D. Rahmani, "A mathematical model for vehicle routing and scheduling problem with cross-docking by considering risk," *Int. J. Ind. Eng. Prod. Res.*, vol. 28, no. 2, pp. 189–199, 2017, doi: 10.22068/ijiepr.28.2.189.
- [5] M. Rohrer, "Simulation and cross docking," in *Winter Simulation Conference Proceedings*, 1995, pp. 846–849, doi: 10.1109/WSC.1995.478868.
- [6] N. Boysen and M. Flidner, "Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda," *Omega*, vol. 38, no. 6, pp. 413–422, Dec-2010, doi: 10.1016/j.omega.2009.10.008.
- [7] A. Hasani-Goodarzi and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Capacitated Vehicle Routing Problem for Multi-Product Cross- Docking with Split Deliveries and Pickups," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 62, pp. 1360–1365, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.232.
- [8] R. Dondo and J. Cerdá, "A sweep-heuristic based formulation for the vehicle routing problem with cross-docking," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 48, pp. 293–311, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.016.
- [9] S. M. Mousavi, B. Vahdani, R. Tavakkoli-Moghaddam, and H. Hashemi, "Location of cross-docking centers and vehicle routing scheduling under uncertainty: A fuzzy possibilistic-stochastic programming model," *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 7–8, pp. 2249–2264, 2014, doi: 10.1016/j.apm.2013.10.029.
- [10] Ş. Birim, "Vehicle Routing Problem with Cross Docking: A Simulated Annealing Approach," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 235, pp. 149–158, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.sbspro.2016.11.010.
- [11] M. Musavi, R. Tavakkoli-Moghaddam, and F. Rayat, "A Bi-Objective Green Truck Routing and Scheduling Problem in a Cross Dock with the Learning Effect," *Iran. J. Oper. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 2–14, Apr. 2017, doi: 10.29252/iors.8.1.2.



سیزدهمین کنفرانس بین المللی انجمن ایرانی تحقیق در عملیات
۳ و ۴ اردیبهشت ۱۳۹۹

13th International Conference of Iranian Operations Research Society
22-23 April 2020



- [12] I. S. Doolun, S. G. Ponnambalam, N. Subramanian, and G. Kanagaraj, “Data driven hybrid evolutionary analytical approach for multi objective location allocation decisions: Automotive green supply chain empirical evidence,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 98, pp. 265–283, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cor.2018.01.008.