

ارائه مدل ریاضی مسیریابی - موجودی چندمحصوله برای اقلام دارویی در زنجیره تأمین سرد و روش حل ابتکاری مبتنی بر جست و جوی همسایگی انطباقی

پریزاد وکیلی^۱، سید مهدی حسینی مطلق^۲، محمدرضا غلامیان^۳، عباس جوکار^۴

چکیده: مسئله مسیریابی موجودی به بررسی همزمان مدیریت موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه، در زمان اجرای سیستم مدیریت موجودی بر مبنای فروشنده می‌پردازد. در این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی موجودی قطعی اقلام دارویی در زنجیره تأمین دارو متشکل از یک توزیع کننده و مجموعه‌ای از خرده‌فروشان پرداخته شده است. اقلام دارویی بررسی شده به دو دسته یخچالی و غیر یخچالی تقسیم شده‌اند که برای حمل نوع یخچالی به وسایل نقلیه یخچال دار نیاز است. بنابراین، این مسئله در حوزه زنجیره سرد با دمای کنترل شده تعریف می‌شود. ظرفیت انبار خرده‌فروشان نیز برای نگهداری محصولات، شامل دو قسمت یخچالی و غیر یخچالی است. با هدف مینیمم کردن مجموع هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری موجودی، مدل عدد صحیح مختلط خطی‌ای ارائه شده است. برای حل مدل، روشی ابتکاری مبتنی بر روش جست و جوی همسایگی بزرگ انطباقی ارائه شده و برای ساخت جواب اولیه از یک الگوریتم ابتکاری دو فازی استفاده شده است. از مجموعه داده‌های موجود در ادبیات به منظور آزمایش‌های عددی الگوریتم استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با جواب‌های موجود، کارآمدی الگوریتم نام‌برده تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی: اقلام دارویی، جست و جوی بزرگ همسایگی انطباقی، روش حل ابتکاری، زنجیره تأمین سرد، مسئله مسیریابی موجودی.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲. استادیار گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۴. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۷

نویسنده مسئول مقاله: سید مهدی حسینی مطلق

E-mail: motlagh@iust.ac.ir

مقدمه

مسئله مسیریابی موجودی یکی از مسائل بهینه‌سازی چالش‌برانگیز در مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک بوده و نقطه شروعی برای هماهنگی بین دو هدایتگر کلیدی زنجیره تأمین، یعنی مدیریت موجودی و مسیریابی است. در واقع این مسئله یکی از مسائل اصلی در زمان پیاده‌سازی مدیریت موجودی بر مبنای فروشنده است. در این استراتژی فروشنده با دسترسی به اطلاعات نقطه فروش و سطح موجودی مشتریان، زمان تحویل و مقدار کالایی که باید به آنها تحویل داده شود را تعیین کرده و مسئول برنامه‌ریزی‌های مربوط به موجودی مشتری و نگاهداشت موجودی او در سطحی است که تقاضای مشتری نهایی برآورده شود (یاثو، ۲۰۱۰). در این مسئله می‌توان با کمک یک استراتژی توزیع کارا با مدیریت موجودی و مسیریابی مناسب طی دوره‌های برنامه‌ریزی، هزینه‌های کلی سیستم توزیع را کاهش داد. به‌طور مثال با ارسال بیشتر کالا برای خرده‌فروش در یک دوره می‌توان هزینه مسیریابی را در دوره‌های بعدی کاهش داد (برتازی، ۲۰۱۳).

در این مقاله چگونگی استفاده از مسئله مسیریابی موجودی در سیستم توزیع دارو بررسی شده است. اقلام دارویی بخش شایان توجهی از هزینه‌های بخش سلامت را شامل می‌شوند. هر گونه کمبود موجودی مربوط به داروهای اساسی و توزیع نامناسب این اقلام هزینه‌های هنگفتی به دنبال خواهد داشت (شاه، ۲۰۰۴). یکی از نکاتی که در مورد اقلام دارویی باید به آن توجه کرد، قرار گرفتن این نوع اقلام در حوزه زنجیره سرد است. زنجیره سرد به معنای حمل محصولات در زنجیره از طریق رویکردهای بسته‌بندی حرارتی یا سردخانه‌ای و برنامه‌ریزی لجستیکی به منظور حفظ این شرایط در تمام محموله‌های موجود در زنجیره است. از این رو در این مقاله اقلام دارویی با توجه به ماهیت خود به دو دسته یخچالی و غیر یخچالی تقسیم شده‌اند. به منظور حمل و نگهداری نوع یخچالی داروها به تجهیزات کنترل دمایی نیاز است. به این دلیل وسایل نقلیه مورد استفاده دارای یک قسمت یخچالی هستند. همچنین ظرفیت انبار خرده‌فروشان شامل دو قسمت یخچالی و غیر یخچالی است.

تعریف مسئله

زنجیره تأمین داروی بررسی شده متشکل از یک شرکت توزیع‌کننده دارو و چندین خرده‌فروش (داروخانه‌ها و مراکز درمانی) در نواحی مختلف جغرافیایی است. توزیع‌کننده در هر دوره مقادیر محدودی از انواع مختلف داروها را از عرضه‌کنندگان مختلف خریداری کرده و در انبار خود نگهداری می‌کند. سپس با به‌کارگیری ناوگان همگنی از وسایل نقلیه با ظرفیت مشخص، اقدام

به ارسال داروها به خرده‌فروشان می‌کند. هر وسیله نقلیه دارای دو قسمت یخچالی و غیر یخچالی است. نحوه بازپرسازی به‌گونه‌ای است که برای خرده‌فروشان کمبودی پیش نیاید. در این مقاله هر خرده‌فروش در هر دوره فقط توسط یک وسیله نقلیه ملاقات می‌شود. سیاست موجودی توزیع‌کننده در راستای بازپرسازی انبار خرده‌فروشان سیاست حداکثر سطح است. هر خرده‌فروش در هر دوره زمانی با تقاضای قطعی اما متفاوتی برای هر یک از داروها از طرف مشتریان نهایی مواجه است. هزینه نگهداری داروها نزد خرده‌فروشان و توزیع‌کننده در همه دوره‌ها یکسان اما با توجه به نوع داروها متفاوت است. هدف از این مسئله تعیین مقادیر بهینه از هر نوع دارو است که باید به خرده‌فروشان تحویل داده شود. همچنین زمان تحویل داروها به خرده‌فروشان و مسیرهای وسایل نقلیه نیز تعیین می‌شود.

پیشینه پژوهش

مسئله مسیریابی - موجودی تاکنون توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. مرور جامعی از پژوهش‌های انجام‌گرفته در سال‌های گذشته ارائه شده است (کویلو، ۲۰۱۴). در این پژوهش به بررسی مقالات موجود در این حوزه از سال ۱۹۸۳ پرداخته شده و بر اساس معیارهای نوع افق برنامه‌ریزی، ساختار، مسیریابی، تصمیم‌های موجودی، سیاست موجودی، ترکیب و اندازه ناوگان از پژوهش‌های انجام‌گرفته در ۳۰ سال اخیر در حوزه مسیریابی موجودی، مرور ادبیات جامعی انجام شده است. این محققان طبقه‌بندی مقالات را در دو دسته انجام داده‌اند. دسته نخست، مدل‌های پایه مسیریابی موجودی و رویکردهای حل آنها بوده و دسته دوم، توسعه این مدل‌های پایه است. این پژوهش را می‌توان مکمل پژوهش اندرسون (۲۰۱۱) دانست که در آن بر کاربردهای صنعتی مسیریابی موجودی تأکید شده است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های پیشین مرتبط از دو دیدگاه نوع مسئله و روش حل آن پرداخته می‌شود.

پیشینه مدل‌سازی مسئله

از نخستین پژوهش‌هایی که به‌صورت همزمان موجودی و مسیریابی را در سیستم توزیع گازهای صنعتی در نظر گرفته، مقاله بل و همکاران (۱۹۸۳) است. کمپل و همکاران (۱۹۹۸) نخستین کسانی بودند که عبارت «مسئله مسیریابی - موجودی» را برای این نوع مسائل، که در آن تأمین‌کننده محصولی را طی یک دوره زمانی بین مجموعه‌ای از مشتریان توزیع می‌کند، به‌کار بردند. عبدالماجد و دسوکی (۲۰۰۶) مسئله مسیریابی موجودی با سفارش‌های عقب‌افتاده تک‌انباره را با تقاضای قطعی بررسی کردند. آنها برای هر وسیله نقلیه، امکان انجام چند سفر در مدل مجاز را در نظر گرفته‌اند. اذاف، را و لاندقم (۲۰۰۶) مسئله مسیریابی موجودی را با یک

مرکز توزیع و تعدادی مراکز فروش و نرخ تقاضای متفاوت برای هر مرکز فروش مطالعه کردند. بودیا، لولی و پرینز (۲۰۰۷) مسئله‌ای را مطرح کردند که در آن خرده‌فروشان مقادیر مشخصی از موجودی را ذخیره می‌کنند و این موجودی با میزان مشخصی مصرف می‌شود. بودیا و پرینز (۲۰۰۹) درباره مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و توزیع به منظور تعیین میزان تولید، مقادیر ارسالی به هر مشتری و ترتیب سفرها، با هدف حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت تولید، هزینه متغیر نگهداری در کارخانه و هزینه متغیر حمل‌ونقل مطالعه کردند. زنجیرانی و آقاجانی (۱۳۸۸) به بررسی مسئله مسیریابی موجودی در شرکت دونا خزر در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح پرداخته‌اند. لیو و چن (۲۰۱۱) به بررسی مسئله مسیریابی موجودی در زنجیره تأمین به همراه قیمت‌گذاری پرداختند. لی، چن، سیواکومار و وو (۲۰۱۴) به بررسی مسئله مسیریابی موجودی در صنعت پتروشیمی پرداخته‌اند که در آن قوانین مربوط به زمان سرویس‌دهی و همچنین جلوگیری از مواجهه با کمبود وجود دارد. در تابع هدف نیز علاوه بر کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل، کمینه‌سازی بیشترین زمان سفر نیز مد نظر قرار گرفته است. آکسن، کایا، سالمن و تانسل (۲۰۱۴) به بررسی مسئله مسیریابی موجودی دوره‌ای و انتخابی در کارخانه بازیافت روغن با هدف تصمیم‌گیری در ارتباط با انتخاب نقاط مراجعه برای جمع‌آوری روغن، تعیین زمان مراجعه و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه، پرداختند. با توجه به مرور ادبیات انجام گرفته، به تعریف مسئله مسیریابی - موجودی در حالت چندمحصوله و در حوزه زنجیره سرد کمتر پرداخته شده است.

پیشینه نظری

اسپارچیا - الکاشار و همکاران (۲۰۰۷) با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مسیریابی موجودی با چند محصول، تأثیر مقادیر مختلف پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک را ارزیابی کرده‌اند تا بهترین مجموع مقادیر پارامترهای الگوریتم به دست آید. آرکتی، برتازی، لاپرته و اسپرنزا (۲۰۰۷) مدلی تک‌محصولی با یک مرکز توزیع و چندین مشتری با تقاضای قطعی و ناوگانی شامل یک وسیله نقلیه با هدف به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری در محل توزیع‌کننده و مشتری در نظر گرفتند و سپس یک الگوریتم شاخه و کران^۱ را برای حل این مدل ارائه دادند. ژائو و همکاران (۲۰۰۸) در راستای حل مدل سه‌سطحی (تأمین‌کننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش) از روش جست‌وجوی همسایگی بزرگ متغیر^۲ استفاده

1. Branch-and-Cut Algorithm
2. Variable large neighborhood search

کردند. علاوه بر این با استفاده از روش جست‌وجوی ممنوعه به حل مدل پرداخته و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده جست‌وجوی همسایگی، بهتر از روش جست‌وجوی ممنوعه عمل می‌کند. یوگانگ یو و همکاران (۲۰۰۸)، یک مسئله مسیریابی موجودی با محدودیت‌های تحویل‌های جداگانه و اندازه ناوگان وسایل نقلیه را بررسی کردند که در آن محصولی از یک انبار مرکزی (کارخانه) به تعدادی مشتری طی یک افق برنامه‌ریزی توزیع می‌شود. در این تحقیق برای حل مدل، رویکردی ابتکاری و تقریبی ارائه شده که با استفاده از تکنیک آزادسازی لاگرانژی حل شده است. رئا و آقزاف (۲۰۰۸) با فرض ثابت بودن نرخ تقاضای مشتریان در درازمدت، برنامه‌ای چرخه‌ای برای مسئله مسیریابی موجودی بررسی کرده‌اند. رویکرد ابتکاری ارائه‌شده برای حل این مدل علاوه بر محدودیت‌ها و فرضیه‌های معمول مسئله، قابلیت در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای بارگیری و بارگذاری را دارد. در این رویکرد مسئله در چهار گام حل شده است. گام نخست تخصیص مشتریان به وسایل نقلیه که با رویکردی بر مبنای تولید ستونی حل شده است. در گام بعد مجموعه مشتریانانی که به هر وسیله نقلیه تخصیص داده شده‌اند، با استفاده از الگوریتمی حریصانه به مسیرهای مختلفی تقسیم می‌شوند. سومین گام تعیین فراوانی مناسب برای ارسال به هر مسیر است که با استفاده از الگوریتمی ابتکاری، ساده و تکرارشونده انجام شده است. در آخرین گام باید برای هر ترکیب تقسیم‌بندی مشتریان روی مسیرها و فراوانی ارسال، یک زمان بندی ارسال تهیه شود تا بدین وسیله موجه بودن آنها بررسی شود. لی و همکاران (۲۰۰۸) مسئله مسیریابی موجودی را، در حالتی در نظر گرفتند که تأمین‌کننده فقط یک وسیله نقلیه در اختیار داشته و در هر دوره فقط می‌تواند برای یک مشتری موجودی ارسال کند. آنها ابتدا حالت ساده‌ای از مسئله را بررسی کرده و برای آن جوابی شدنی به دست آوردند. سپس، با بررسی حالتی پیچیده‌تر، با استفاده از نظریه اعداد^۱ و قضیه باقی‌مانده چینی^۲، الگوریتمی ابتکاری برای یافتن توالی شدنی از مسیرها را، به طوری که مشتریان با کمبود مواجه نشوند، ارائه کردند. بودیا و پربینز (۲۰۰۹) در تحقیقی، ساختاری مبتنی بر الگوریتم ممیتیک با مدیریت جمعیت جواب‌ها توسعه داده‌اند.

معین و همکاران (۲۰۱۱) الگوریتم ژنتیک ترکیبی بهبودیافته‌ای ارائه دادند. آنها با بررسی دو نحوه نمایش مختلف جواب، الگوریتم ژنتیک ترکیبی‌ای بر اساس رویکرد نخست تخصیص داده و سپس مسیریابی ارائه کرده‌اند. کوئیلو، کوردئو و لاپرته (۲۰۱۲) مسئله مسیریابی موجودی را با فرض امکان پذیر بودن انتقال^۳ محصول از یک خرده‌فروش به سایر خرده‌فروشان یا تأمین‌کننده،

1. Number theory
2. Chinese remainder theorem
3. Transshipment

بررسی کردند. این انتقال از طریق ارسال مستقیم به سایر نقاط انجام می‌گیرد. در این مقاله برای حل مسئله، جست‌وجوهای محلی مختلفی ارائه و در قالب الگوریتم ابتکاری جست‌وجوی همسایگی بزرگ انطباقی^۱ به کار گرفته شده است. از نر و همکاران (۲۰۱۳) مدل مسیریابی موجودی تک‌محصولی‌ای با یک مرکز توزیع و چند مشتری و با در نظر گرفتن تقاضای قطعی با هدف حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و سرویس‌دهی را مد نظر قرار داده و با استفاده از روشی تقریبی عمومی به حل مدل اقدام کردند. میردا و همکاران (۲۰۱۴) یک مسئله مسیریابی موجودی چندمحصولی با در نظر گرفتن تقاضای قطعی و عدم امکان وجود سفارش‌های عقب‌افتاده، ارائه کردند. آنها از روش جست‌وجوی همسایگی متغیر دومارحله‌ای برای حل مسئله استفاده کردند. در مرحله نخست الگوریتم، با حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود در هر دوره جواب اولیه‌ای بدون در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی ایجاد می‌شود. در مرحله دوم الگوریتم، با کمینه کردن همزمان هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی، جواب اولیه بهتر می‌شود. کین و همکاران (۲۰۱۴) مسئله مسیریابی موجودی دوره‌ای را مطرح کرده‌اند که در آن، مسئله به دو زیرمسئله موجودی و مسیریابی وسیله نقلیه تقسیم شده است. پس از حل مسئله موجودی با استفاده از یک روش جست‌وجوی موضعی، مسئله مسیریابی با استفاده از جواب مسئله موجودی و با به کار بردن روش جست‌وجوی ممنوعه حل می‌شود. وونگ و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل مسیریابی موجودی چندمحصولی و چندپریودی، با افق زمانی محدود در نظر گرفته‌اند و سعی کردند با یک روش جست‌وجوی موضعی به تولید مسیر پرداخته و با توسعه یک الگوریتم مورچگان اصلاح‌شده، به حل مسئله بپردازند. ویدوویچ، پاپوویک و راتکوویک (۲۰۱۴) یک مدل مسیریابی موجودی چندمحصولی چندپریودی با سیستم توزیع یک به چند و تقاضای قطعی را در توزیع سوخت ارائه کردند و با ارائه یک مدل فرموله‌شده برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی^۲ جدید (در بخش مسیریابی) و یک روش حل ابتکاری به حل مسئله پرداختند. شائو و همکاران (۲۰۱۴) به ارائه یک مدل مسیریابی موجودی دوسطحی چندپریودی یک به چند با تقاضای قطعی، در قالب یک مسئله تدارکات شهرک صنعتی، با در نظر گرفتن ناوگان وسایل نقلیه ناهمگن (برای نخستین بار در این نوع مدل‌ها) پرداختند. عبدالهی و همکاران (۲۰۱۴) به ارائه یک مدل مسیریابی موجودی یک به چند تک‌محصولی با تقاضای قطعی، در افق زمانی محدودی پرداخته‌اند و با افزودن پارامتر ریسکی به مسیریابی موجودی سعی کرده‌اند ریسک افزایش سرمایه را کنترل کنند. آنها برای حل این مسئله، از یک روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده

1. Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)

2. Mixed integer programming

کرده‌اند. رئا (۲۰۱۵) یک مسئله مسیریابی موجودی سیکلی را با سیستم توزیع یک به چند و تقاضای قطعی ارائه کرد که در این مدل به کم کردن هزینه‌های ثابت وسیله نقلیه، هزینه‌های هر مسیر (شامل هزینه‌های تحویل، بازپس‌گیری و حمل‌ونقل هر مسیر) و هزینه‌های نگهداری توجه می‌شود. سپس با یک روش ابتکاری دوفازی به حل آن پرداخت.

در این مقاله به ارائه روش حلی مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی انطباقی برای مسئله مسیریابی - موجودی در حالت چندمحصوله و در حوزه زنجیره سرد پرداخته شده است.

مدل‌سازی ریاضی مسئله

با توجه به اینکه در ادبیات موضوع به مسئله مسیریابی - موجودی برای اقلام دارویی در زنجیره تأمین سرد پرداخته نشده است، مدل‌سازی ریاضی برای مسئله تعریف‌شده در این بخش آورده شده است.

جدول ۱. معرفی مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه گره‌ها	$S = \{1, 2, \dots, s\}$ $S^+ = S \cup \{0\}$	مجموعه افق برنامه‌ریزی	$H = \{1, 2, \dots, T\}$ $H^+ = H \cup \{0\}$
مجموعه اقلام	$P = \{1, \dots, p\}$	مجموعه وسایل نقلیه	$V = \{1, \dots, v\}$
اندیس وسایل نقلیه	$v \in V$	اندیس مربوط به گره‌ها به طوری که گره ۰ بیانگر توزیع‌کننده است.	$i, j \in S^+$
		اندیس اقلام	$p \in P$

پارامترها

d_{ij}	مسافت بین دو گره $i, j \in S^+$ (کیلومتر)
c_{pk}	هزینه سفر به ازای هر کیلومتر (واحد پول)
h_{ip}	هزینه نگهداری یک واحد حجمی (مترمکعب) داروی نوع p در مکان $i \in S^+$ (واحد پول)
k_v^c	ظرفیت قسمت یخچالی وسیله نقلیه $v \in V$ (مترمکعب)
k_v^n	ظرفیت قسمت غیر یخچالی وسیله نقلیه $v \in V$ (مترمکعب)
R_{pt}	مقدار داروی نوع $p \in P$ دریافت‌شده توسط توزیع‌کننده در دوره $t \in H$ (تعداد بسته)
d_{ipt}	تقاضا برای داروی نوع $p \in P$ در دوره $t \in H$ که خرده‌فروش i با آن مواجه است (تعداد بسته)
C_i^c	حداکثر ظرفیت نگهداری داروهای یخچالی نزد خرده‌فروش i (مترمکعب)

C_i^n حداکثر ظرفیت نگهداری داروهای غیر یخچالی نزد خرده‌فروش i (مترمکعب)
 v_p حجم یک بسته داروی نوع $p \in P$
 RF_p اگر داروی نوع p یخچالی باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.

متغیرهای تصمیم مسئله

$x_{ijt}^v = \left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right.$ اگر گره $j \in S^+$ بلافاصله بعد از $i \in S^+$ در دوره $t \in H$ توسط وسیله $v \in V$ ویزیت شود برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.
 $z_{it}^v = \left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right.$ اگر خرده‌فروش $i \in S$ در دوره t توسط وسیله v ویزیت شود، برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.
 q_{ipt}^v مقدار داروی نوع $p \in P$ که در دوره $t \in H$ به $i \in S$ توسط وسیله نقلیه $v \in V$ تحویل می‌شود (تعداد بسته).
 w_{ipt}^v مجموع مقادیر داروی نوع $p \in P$ که وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in H$ بعد از ویزیت $i \in S^+$ به سایر گره‌ها تحویل داده است (تعداد بسته).
 I_{ipt} سطح موجودی $i \in S^+$ از نوع داروی $p \in P$ در انتهای دوره $t \in H$ (تعداد بسته)

مدل‌های ریاضی

$$\min \sum_{i \in H} \sum_{v \in V} \sum_{i \in S^+} \sum_{j \in S^+} C_{ij} x_{ijt}^v + \sum_{p \in P} \sum_{t \in H^+} \sum_{j \in S} h_{jp} v_p I_{jpt}$$

$$\sum_{v \in V} z_{it}^v \leq 1 \quad \forall i \in S, t \in H \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\sum_{i \in S} x_{oit}^v \leq 1 \quad \forall t \in H, v \in V \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_{i \in S^+} x_{ijt}^v = z_{jt}^v \quad \forall j \in S, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{j \in S^+} x_{ijt}^v = z_{it}^v \quad \forall i \in S, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{p \in P} v_p RF_p w_{ipt}^v - \sum_{p \in P} v_p RF_p w_{jpt}^v + k_v^c x_{ijt}^v \leq k_v^c - \sum_{p \in P} v_p RF_p q_{jpt}^v \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\forall i, j \in S, t \in H, v \in V$$

$$\sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) w_{ipt}^v - \sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) w_{jpt}^v + k_v^n x_{ijt}^v \leq k_v^n - \sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) q_{jpt}^v \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\forall i, j \in S, t \in H, v \in V$$

$$\sum_{p \in P} q_{jpt}^v \leq \sum_{p \in P} w_{ipt}^v \quad \forall i \in S, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\sum_{p \in P} v_p RF_p w_{ipt}^v \leq k_v^c \quad \forall i \in S, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) w_{ipt}^v \leq k_v^n \quad \forall i \in S, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{p \in P} v_p RF_p q_{ipt}^v \leq k_v^c \quad \forall t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) q_{ipt}^v \leq k_n^c \quad \forall t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$I_{0,p,t-1} + R_{pt} - I_{0pt} = \sum_{i \in S} \sum_{v \in V} q_{ipt}^v \quad \forall p \in P, t \in T \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$I_{ip,t-1} + \sum_{v \in V} q_{ipt}^v - I_{ipt} = d_{ipt} \quad \forall i \in S, p \in P, t \in H \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} v_p RF_p q_{ipt}^v \leq C_i^c - \sum_{p \in P} v_p RF_p I_{ip,t-1} \quad \forall i \in S, t \in H \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) q_{ipt}^v \leq C_i^n - \sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) I_{ip,t-1} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\forall i \in S, t \in H$$

$$\sum_{p \in P} v_p RF_p q_{ipt}^v \leq z_{it}^v C_i^c \quad \forall i \in S, t \in H \quad v \in V \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\sum_{p \in P} v_p (1 - RF_p) q_{ipt}^v \leq z_{it}^v C_i^n \quad \forall i \in S, t \in H \quad v \in V \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$\sum_{p \in P} RF_p I_{ipt} v_p \leq C_i^c \quad \forall i \in S, t \in H \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\sum_{p \in P} (1 - RF_p) I_{ipt} v_p \leq C_i^n \quad \forall i \in S, t \in H \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$x_{ijt}^v \in \{0,1\}, I_{ipt} \geq 0, w_{ipt}^v, q_{ipt}^v \geq 0 \quad \forall i, j \in s^+, i \neq j, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$z_{it}^v \in \{0,1\} \quad \forall i \in s, t \in H, v \in V \quad \text{رابطه ۲۱}$$

تابع هدف در پی کمینه کردن مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه نگهداری موجودی است. محدودیت ۱ تضمین می‌کند که هر خرده‌فروش در هر دوره زمانی حداکثر توسط یک وسیله نقلیه ویزیت شود. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه در هر دوره زمانی حداکثر یک تور تشکیل دهد. محدودیت ۳ و ۴ بیانگر تعادل جریان در گره‌ها هستند. محدودیت‌های ۵ تا ۹ محدودیت‌های مربوط به مسیریابی بوده و یکپارچگی مقدار بار حمل‌شده توسط هر وسیله نقلیه در یک تور را به ترتیب برای قسمت یخچالی و غیریخچالی وسیله نقلیه تضمین کرده و همچنین از ایجاد زیرتور جلوگیری می‌کنند. محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه در محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ بیان‌کننده معادلات تعادل موجودی به ترتیب نزد انبار توزیع‌کننده و خرده‌فروشان است. محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۷ مربوط به در نظر گرفتن سیاست تکمیل موجودی ML توسط توزیع‌کننده هستند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ تضمین می‌کنند که میزان موجودی نزد هر خرده‌فروش از حداکثر ظرفیت انبار آن تجاوز نکند. محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ مربوط به صحیح و غیرمنفی بودن متغیرهای مسئله است.

الگوریتم پیشنهادی بر مبنای جست‌وجوی بزرگ همسایگی انطباقی

با توجه به اینکه مسئله مسیریابی - موجودی مسئله‌ای NP-hard است (رضوی، سوخکیان و زیارتی ۱۳۹۰) و مدل ارائه‌شده فقط در مواردی که تعداد خرده‌فروشان کم باشد، به‌طور دقیق قابل حل است، در شرایط واقعی و در مواردی با تعداد خرده‌فروشان زیاد، نیاز به استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری است. از این رو در این مقاله الگوریتمی ابتکاری بر مبنای جست‌وجوی بزرگ همسایگی انطباقی^۱ پیشنهاد شده است. این الگوریتم توسعه‌ای از الگوریتم جست‌وجوی بزرگ همسایگی است که توسط شاو (۱۹۹۸) ارائه شده و بر پایه ایده بهبود تدریجی جواب اولیه با استفاده از عملگرهای تخریب و ساخت است. الگوریتم ALNS با استفاده از مکانیسم چرخ رولت از عملگرهای برداشت و گذاشت برای جست‌وجوی همسایگی استفاده می‌کند. در این مقاله برای ساخت جواب اولیه مناسب، یک الگوریتم ابتکاری دوفازی ارائه شده که توضیحات کامل این الگوریتم در بخش بعد آورده شده است. در ادامه عملگرهای برداشت و عملگر گذاشت توضیح داده شده و در نهایت چارچوب کلی الگوریتم ابتکاری آورده شده است.

1. Adaptive large neighborhood search

الگوریتم ساخت جواب اولیه

به منظور ساخت جواب اولیه مناسب، الگوریتم ابتکاری دو فاز ای بر مبنای تجزیه مسئله اصلی به دو زیرمسئله مسیریابی و موجودی، ارائه شده است. در فاز نخست، برای تمام خرده فروشان در هر دوره با استفاده از الگوریتم ۲ فقط مسیریابی وسایل نقلیه مد نظر قرار می گیرد، به طوری که طبق رابطه ۲۲ به کمترین هزینه حمل و نقل منجر شود. در این رابطه $C_{ij} = c_{pk}d_{ij}$ در نظر گرفته شده است.

$$\min \sum_{t \in H} \sum_{v \in V} \sum_{i \in S^+} \sum_{j \in S^+} C_{ij} x_{ijt}^v \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

در نهایت جواب حاصل از اجرای فاز نخست شامل ویزیت تمام خرده فروشان در همه دوره ها است. شبه کد مربوط به این فاز در جدول ۲ آورده شده است. در فاز دوم به ملاحظات مربوط به موجودی و سیاست بازسازی توجه می شود. با شروع از آخرین دوره برنامه ریزی، برای تمام خرده فروشان، کاهش هزینه حمل و نقل حاصل از برداشت خرده فروش از مسیر جاری ($-vcost$) و افزایش هزینه نگهداری موجودی حاصل از گذاشت این خرده فروش در دوره قبلی (به صورت مجازی) ($+icost$) محاسبه می شود. در صورتی که رابطه $SC = -vcost + icost < 0$ برقرار باشد، حرکات گذاشت و برداشت مجازی خرده فروش از دوره جاری به دوره قبل انجام گرفته و جواب جاری به روزرسانی می شود. این رویه برای تمام دوره ها به غیر از دوره ۱ اجرا می شود. شبه کد مربوط به فاز ۲ در جدول ۳ آورده شده است. در نهایت با اعمال الگوریتم های بهبوددهنده جستجوی محلی ۲-opt و ۳-opt، مسیرهای وسایل نقلیه بهبود می یابند. جواب تولید شده شرایط شدنی بودن مسئله را رعایت می کند.

جدول ۲. شبه کد مربوط به فاز نخست ساخت جواب اولیه

فاز نخست ساخت جواب اولیه
ورودی: تعداد گره ها، وسایل نقلیه و دوره های زمانی
خروجی: یک جواب اولیه s_initial
۱. قرار دادن یک گره در همه مسیرها به صورت تصادفی
۲. برای تمام گره های روت نشده
۳. محاسبه افزایش هزینه ناشی از گذاشت گره در تمام جایگاه های ممکن با رعایت شرایط شدنی
۴. گذاشت گره ای که دارای کمترین افزایش هزینه است.
۵. تکرار الگوریتم به تعداد کل گره ها

پایان

جدول ۳. شبه کد مربوط به فاز دوم ساخت جواب اولیه

فاز دوم ساخت جواب اولیه
ورودی: یک جواب اولیه $s_initial$
خروجی: جواب اولیه نهایی $s_initial$
۱. برای تمام دوره‌های زمانی (شروع از دوره آخر تا دوره دوم)
۲. برای تمام گره‌های ویزیت‌شده در دوره جاری
۳. محاسبه افزایش هزینه ناشی از گذاشت گره در دوره قبل از دوره جاری، در صورت شدنی بودن
۴. محاسبه کاهش هزینه ناشی از برداشت گره از دوره جاری
۵. گذاشت گره در دوره قبل از دوره جاری در صورت کاهش هزینه کل

پایان

عملگرهای برداشت

با داشتن جواب اولیه، از الگوریتم‌های بهبوددهنده برای جست‌وجوی فضای همسایگی و تولید جواب‌های همسایه استفاده می‌شود. در الگوریتم ALNS از دو نوع عملگر برداشت و گذاشت استفاده می‌شود. در هر تکرار تعدادی از خرده‌فروشان با استراتژی مشخصی انتخاب شده و از جواب برداشته می‌شوند. خروجی این عملگرها یک جواب کاهش یافته، فهرستی از خرده‌فروشان برداشته شده از جواب و دوره‌های زمانی مربوط به آنها است. جواب کاهش یافته شامل مسیرهای وسایل نقلیه در همه دوره‌ها و مقدار داروی تحویل داده شده به آنها است. شبه کد کلی عملگر برداشت در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. شبه کد کلی عملگر برداشت

عملگر برداشت
ورودی: یک جواب شدنی S و ماکزیمم تکرار الگوریتم φ
خروجی: یک جواب کاهش یافته s_remove
ساخت یک فهرست گره‌های برداشته شده به همراه دوره زمانی هر یک $(tp \leftarrow \emptyset, list \leftarrow \emptyset)$ به‌ازای هر φ ؛
اجرای عملگر برداشت برای یافتن مجموعه ρ گره
$list \leftarrow list \cup \rho$
$tp \leftarrow tp \cup \rho$
برداشت زیرمجموعه ρ از S

پایان

برداشت تصادفی^۱

این عملگر به طور تصادفی یک دوره زمانی را انتخاب کرده و یکی از گره‌های موجود در این دوره را به صورت تصادفی از جواب جاری برمی‌دارد. برای $\varphi = \rho$ تکرار این عملگر اجرا می‌شود. ایده انتخاب تصادفی به تنوع مکانیسم جست‌وجو کمک می‌کند.

برداشت حداکثر صرفه‌جویی در هزینه^۲

با اجرای این عملگر، گره‌ای از جواب جاری برداشته می‌شود که در صورت برداشته شدن بیشترین صرفه‌جویی در هزینه‌های کلی سیستم شامل هزینه‌های مسیریابی و نگهداری موجودی را در پی داشته باشد. این عملگر برای $\varphi = \rho$ تکرار اجرا می‌شود.

برداشت شاو^۳

عملگر برداشت شاو برگرفته از ایده ریپکه، پیسینگر و شاو است. با اجرای این عملگر گره‌هایی از جواب جاری برداشته می‌شوند که در فاصله مشخصی از یکدیگر قرار دارند. این عملگر به طور تصادفی یک دوره و یک گره از گره‌های موجود در آن را انتخاب می‌کند. سپس فاصله نزدیک‌ترین گره به این گره انتخابی در همان مسیر (d_{\min}) محاسبه می‌شود. در نهایت کل گره‌هایی که در فاصله ($2d_{\min}$) از گره انتخابی قرار دارند، از مسیر برداشته می‌شوند.

عملگر گذاشت ابتکاری

عملگر گذاشت ابتکاری پیشنهادی، برای تمام گره‌های موجود در فهرست به دست آمده از عملگرهای برداشت، اجرا می‌شود. این عملگر، گره‌های برداشته شده را در بهترین جای ممکن جواب کاهش یافته، قرار داده و به ساخت دوباره مسیرها می‌پردازد. خروجی این عملگر، جوابی ترمیم یافته است. به طور مثال، فرض کنید خروجی حاصل از عملگر برداشت تصادفی به صورت $tp = \{4, 2, 5\}$ list = $\{2, 4, 3\}$ باشد که در آن گره‌های ۴، ۲ و ۳ به ترتیب از دوره‌های زمانی ۴، ۲ و ۵ برداشته شده‌اند. برای نخستین گره موجود در فهرست، عملگر برداشت در گام نخست موجودی در انتهای دوره tp را محاسبه می‌کند. در صورتی که این مقدار منفی باشد، می‌توان گره را در همان دوره tp یا در دوره‌های قبل از tp وارد کرد. در غیر این صورت می‌توان گره را در نخستین دوره بعد از tp که در آن موجودی گره منفی شده است، وارد کرد. در هر یک از دوره‌های ممکن عنوان شده، در صورتی که در دوره نام‌برده گره از قبل ویزیت شده باشد، فقط

1. Random Removal (RR)
2. Maximum Saving Cost (MSC)
3. Shaw removal

افزایش هزینه نگهداری موجودی به عنوان هزینه وارد شدن گره لحاظ می شود. در غیر این صورت علاوه بر افزایش هزینه ناشی از نگهداری موجودی، افزایش هزینه حمل و نقل نیز محاسبه می شود. شبه کد کلی اپراتور گذاشت در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. شبه کد کلی عملگر گذاشت

عملگر گذاشت
<p>ورودی: یک جواب کاهش یافته s_remove، ماکزیمم تکرار φ و فهرست گره های برداشته شده به همراه دوره زمانی هر یک $tp, list$</p> <p>خروجی: جواب جدید s_new</p> <p>به ازای هر عضو مجموعه فهرست برداشت $i \in list$</p> <p>اجرای عملگر گذاشت برای یافتن بهترین مکان برای گره برداشت شده</p> <p>$list \leftarrow list - \rho$</p> <p>وارد کردن گره i در s_remove</p> <p>پایان</p>

چارچوب کلی الگوریتم پیشنهادی

به منظور محدود کردن فضای جست و جوی جواب در الگوریتم ALNS از الگوریتم شبیه سازی تبرید استفاده شده است. ساختار کلی الگوریتم ارائه شده بدین صورت است که با ایجاد یک جواب اولیه توسط الگوریتم سازنده ($s_initial$)، دما را در حالت دمای اولیه ($T = T_0$) قرار داده و با استفاده از عملگرهای بهبوددهنده (توالی از عملگرهای برداشت و گذاشت) به جست و جوی فضای جواب می پردازد. شبه کد کلی الگوریتم ALNS در جدول ۶ آورده شده است.

تنظیم پارامترها

در این بخش نحوه تنظیم پارامترهای استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی و مکانیسم چرخ رولت تشریح شده است. پارامترها شامل تعداد تکرارهای مکانیسم چرخ رولت و سه امتیازی استفاده شده در الگوریتم SA هستند. برای این منظور، همان طور که در جدول ۷ نمایش داده شده است، ترکیبات مختلفی از این پارامترها تست شده اند. به منظور تعیین بهترین مقدار استفاده از این پارامترها ۱۶ حالت ممکن وجود داشته که هزینه های آنها بررسی شده و مینیمم آن انتخاب می شود. در ادامه از بهترین حالت ممکن به دست آمده برای تنظیم پارامترها، که در جدول ۸ آمده، برای تحلیل داده های عددی استفاده شده است.

جدول ۶. شبه‌کد کلی جست‌وجوی بزرگ همسایگی انطباقی برای مسئله مسیریابی موجودی

الگوریتم جست‌وجوی بزرگ همسایگی انطباقی برای مسئله مسیریابی موجودی

ورودی: یک جواب اولیه $s_initial$ ، دمای اولیه و تعداد تکرارها

خروجی: بهترین جواب s_best

۱. قرار دادن وزن‌ها و امتیازهای عملگرها به ترتیب برابر یک و صفر
۲. قرار دادن جواب اولیه به‌عنوان جواب جاری $s_current$ و بهترین جواب s_best
۳. انتخاب یکی از عملگرها با استفاده از مکانیسم چرخ رولت بر مبنای وزن‌های جاری
۴. به‌کارگیری عملگر انتخاب‌شده برای $s_current$ و تولید جواب جدید s_new
۵. به‌روزرسانی تعداد دفعات استفاده از عملگر انتخاب‌شده
۶. اگر هزینه کل جواب جدید کمتر از هزینه کل جواب جاری باشد.
۷. پذیرفتن جواب جدید به‌عنوان جواب جاری
۸. اگر هزینه کل جواب جاری کمتر از هزینه کل بهترین جواب باشد.
۹. پذیرفتن جواب جاری به‌عنوان بهترین جواب
۱۰. افزایش امتیاز عملگر انتخاب‌شده به اندازه σ_1
۱۱. در غیر این صورت
۱۲. افزایش امتیاز عملگر انتخاب‌شده به اندازه σ_2
۱۳. در غیر این صورت
۱۴. اگر جواب جاری توسط معیار پذیرش شبیه‌سازی تبرید پذیرفته شود.
۱۵. پذیرفتن جواب جدید به‌عنوان بهترین جواب
۱۶. افزایش امتیاز عملگر انتخاب‌شده به اندازه σ_3
۱۷. به‌روزرسانی وزن عملگرها و دوباره مساوی صفر قرار دادن امتیازهای آنها بعد از هر ۲۵۰ تکرار
۱۸. به‌کارگیری بهبوددهنده‌های $opt - 2$ و $opt - 3$ به‌منظور بهبود کیفیت جواب تولیدشده

پایان

جدول ۷. تنظیم پارامترهای الگوریتم ALNS

مقادیر عددی مفروض		پارامتر
۴۰۰	۲۰۰	تعداد تکرارها برای مکانیسم چرخ رولت
۵	۱	امتیاز σ_3
۴	۲	امتیاز σ_2
۳	۳	امتیاز σ_1

جدول ۸. سایر پارامترهای الگوریتم ALNS

مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر
۱۰٪ تعداد مشتریان	تعداد گره‌های برداشت ρ	۱۰۰۰	دمای اولیه T_0	۱۰۰۰	ماکزیمم تکرار الگوریتم ALNS
		۰/۹۹۹	نرخ تبرید δ	۰/۱	η پارامتر مربوط به مکانیسم چرخ رولت

نتایج محاسباتی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و کیفیت جواب‌های تولیدشده، از دو نوع از مجموعه داده‌های موجود در ادبیات استفاده شده است. آزمایش‌های عددی بر الگوریتم ارائه‌شده در نرم‌افزار متلب روی سرور با سرعت ۲/۳ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت حافظه RAM اجرا شده است. برای هر مثال الگوریتم پیشنهادی ۱۰ بار تکرار شده است. نخستین مجموعه داده‌ها شامل مسئله‌ای تک‌محصوله و تک‌وسیله نقلیه‌ای است. این مجموعه داده‌ها شامل چهار دسته داده هستند که آرکتی و همکارانش (۲۰۰۷) آن را ارائه داده‌اند و جواب بهینه آنها گزارش شده است. نتایج محاسباتی روی دسته داده‌هایی با هزینه‌های نگهداری موجودی کم و افق برنامه‌ریزی ۳ در جدول ۹ آورده شده است. دومین مجموعه داده‌ها مربوط به مسئله مسیریابی موجودی در حالت چندمحصوله و چند وسیله نقلیه‌ای MMIRP^۱ است. این مجموعه داده‌ها توسط کوئیلو و همکارانش (۲۰۱۳) ارائه شده و با الگوریتم شاخه و کران حل شده است.^۲

جدول ۹. نتایج محاسباتی روی مثال‌های با هزینه‌های نگهداری موجودی کم و افق برنامه‌ریزی ۳

مثال‌ها	آرکتی (۲۰۰۷)			الگوریتم پیشنهادی			زمان حل
	حد پایین	حد بالا	Gap(%)	زمان حل	z	Gap (%)	
absn۰۵	۱۲۳۵/۹۲	۱۲۳۵/۹۲	۰	۰	۱۲۳۵/۹۲	۰	۰
absn۱۰	۱۷۴۳/۰۷	۱۷۴۳/۰۷	۰	۰	۱۷۴۳/۰۷	۰	۰
absn۱۵	۲۱۳۱/۰۴	۲۱۳۱/۰۴	۰	۰	۲۱۳۱/۰۴	۰	۰
absn۲۰	۲۲۶۷/۳۲	۲۲۶۷/۳۲	۰	۰	۲۲۶۷/۳۲	۰	۰
absn۲۵	۲۸۴۰/۹۲	۲۸۴۰/۹۲	۰	۰	۲۸۴۰/۹۲	۰	۱۰
absn۳۰	۳۴۲۷/۷۸	۳۴۲۷/۷۸	۰	۲	۳۴۲۷/۷۸	۰	۹
absn۳۵	۳۳۴۶/۱۲	۳۳۴۶/۱۲	۰	۱	۳۳۴۶/۱۲	۰	۲
absn۴۰	۳۷۰۲/۱۴	۳۷۰۲/۱۴	۰	۳	۳۷۰۲/۱۴	۰	۲
absn۴۵	۳۹۵۰/۸۶	۳۹۵۰/۸۶	۰	۲	۳۹۵۰/۸۶	۰	۲
absn۵۰	۴۰۴۷/۱۸	۴۰۴۷/۱۸	۰	۴۲	۴۰۴۷/۱۸	۰	۲۵

1. Muti-product Milti-vehicle IRP (MMIRP)

2. <http://www.leandro-coelho.com/instances/multi-product-multi-vehicle-inventory-routing->

در جدول ۱۰ الگوریتم پیشنهادی برای ۳۰ مثال با تعداد گره‌های {۱۰, ۲۰, ۳۰, ۴۰, ۵۰} از این مجموعه داده‌ها اجرا شده است. همچنین، افق برنامه‌ریزی این مثال‌ها شامل {۳, ۵, ۷}، تعداد وسایل نقلیه استفاده شده برابر ۳ و تعداد محصولات شامل ۳ است. GAP، درصد اختلاف هزینه کل به دست آمده از رویکرد ابتکاری جدید با مقادیر گزارش شده است که به صورت رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود و در آن هزینه کل حاصل از الگوریتم پیشنهادی و F_s هزینه کل حاصل از روش‌های به کار برده شده است.

$$\text{رابطه ۲۳} \quad \text{GAP} = 100 * (F_p - F_s) / F_s$$

جدول ۱۰. نتایج مربوط به MMIRP با سه وسیله نقلیه و سه محصول

مثال‌ها	کوئیلو (۲۰۱۳)					الگوریتم پیشنهادی		
	افق برنامه‌ریزی	حد پایین	حد بالا	Gap (%)	زمان حل	z	Gap (%)	زمان حل
mmirp۱۰-۱	۳	۴۴۳۶/۹	۴۴۳۶/۹	۰	۲	۴۴۳۶/۹	۰	۲
mmirp۱۰-۲	۳	۴۳۰۶/۱۸	۴۳۰۶/۱۸	۰	۲	۴۳۰۶/۱۸	۰	۲
mmirp۲۰-۱	۳	۶۷۸۹/۷۵	۶۷۸۹/۷۵	۰	۱۱۶۴	۶۷۸۹/۷۵	۰	۶۵۰
mmirp۲۰-۲	۳	۷۱۴۷/۷۶	۷۱۴۷/۷۶	۰	۱۱۷	۷۱۴۷/۷۶	۰	۷۱۰
mmirp۳۰-۱	۳	۸۱۵۵/۳۹	۸۱۵۵/۳۹	۰	۱۰۱۸	۸۱۵۵/۳۹	۰	۸۶۳
mmirp۳۰-۲	۳	۸۴۴۹/۱۹	۸۴۴۹/۱۹	۰	۱۳۲۸۰	۸۴۴۹/۱۹	۰	۲۹۳۲
mmirp۴۰-۱	۳	۱۰۳۴۷/۳	۱۰۳۴۷/۳	۰	۶۱۶	۱۰۳۴۷/۳	۰	۷۲۵
mmirp۴۰-۲	۳	۸۹۸۸/۸۴	۸۹۸۸/۸۴	۰	۲۷۷۲	۸۹۸۸/۸۴	۰	۲۶۳۷
mmirp۵۰-۱	۳	۱۱۲۶۴/۶	۱۱۴۹۸/۵	۲/۰۳	۱۸۷	۱۱۴۶۴/۲۳	۱/۷۴	۳۴۸۱
mmirp۵۰-۲	۳	۱۰۹۹۴/۹	۱۱۶۰۸/۸	۵/۲۹	۱۵۲۸۶	۱۱۵۹۱/۷	۵/۱۵	۳۵۲۹
mmirp۱۰-۱	۵	۶۸۱۵/۷۷	۶۸۱۵/۷۷	۰	۹۱۸	۶۸۱۵/۷۷	۰	۶۹۳
mmirp۱۰-۲	۵	۹۲۰۹/۴۲	۹۲۰۹/۴۲	۰	۲۲۰۰۳	۹۲۰۹/۴۲	۰	۹۵۰
mmirp۲۰-۱	۵	۸۷۳۴/۰۷	۹۸۷۷/۱۳	۱۱/۵۷	۲۲۳۵	۹۰۰۵/۲۲	۳/۰۱	۱۵۲۶
mmirp۲۰-۲	۵	۹۷۶۵/۷۶	۱۲۰۸۰/۵	۱۹/۱۶	۳۴۹۴	۱۱۱۲۱/۴	۱۲/۱۹	۱۹۴۵
mmirp۳۰-۱	۵	۱۰۸۶۵/۷	۱۴۵۴۵/۳	۲۵/۳	۱۱۳۹۱	۱۳۹۳۸/۴	۲۲/۰۴	۲۹۸۵

ادامه جدول ۱۰

مثال‌ها	کوئیلو (۲۰۱۳)					الگوریتم پیشنهادی		
	افق برنامه‌ریزی	حد پایین	حد بالا	Gap (%)	زمان حل	z	Gap (%)	زمان حل
mmirp۳۰-۲	۵	۱۰۷۲۲/۲	۱۴۶۱۵/۲	۲۶/۶۴	۴۳۱۵۲	۱۴۰۵۶/۷۲	۲۲/۷۲	۲۷۲۹
mmirp۴۰-۱	۵	۱۳۲۳۲/۱	۱۶۸۵۱/۴	۲۱/۴۸	۴۳۲۰۰	۱۶۵۲۷/۹۸	۱۹/۹۴	۳۶۸۵
mmirp۴۰-۲	۵	۱۲۹۵۱/۳	۱۷۵۷۴/۷	۲۶/۳۱	۳۸۲۶۰	۱۷۲۳۸/۳۶	۲۴/۸۷	۲۹۳۶
mmirp۵۰-۱	۵	۱۵۵۰۶/۴	۳۷۰۷۴/۴	۵۸/۱۷	۴۳۲۰۰	۳۶۶۴۰/۱	۵۷/۶۸	۳۶۵۳
mmirp۵۰-۲	۵	۱۳۹۴۵/۹	۲۶۱۹۶	۴۶/۷۶	۴۳۲۰۰	۲۵۷۷۸/۹	۴۵/۹	۳۶۹۵
mmirp۱۰۰-۱	۷	۸۵۹۷/۴۹	۱۰۳۲۲/۲	۱۶/۷۲	۲۶۲۳۰	۹۸۶۳/۹۶	۱۲/۸۴	۱۹۲۲
mmirp۱۰۰-۲	۷	۹۴۵۸/۳۵	۱۰۸۵۲	۱۲/۸۴	۳۰۶۱۳	۱۰۴۹۲/۷۲	۹/۸۶	۲۲۵۳
mmirp۲۰-۱	۷	۱۲۸۳۵/۸	۱۸۴۵۶/۸	۳۰/۴۶	۲۳۷۷۱	۱۷۸۹۶	۲۸/۲۸	۲۵۹۳
mmirp۲۰-۲	۷	۱۰۹۱۱/۸	۱۵۸۳۲/۲	۳۱/۰۸	۲۴۸۴۶	۱۵۴۲۶/۳	۲۹/۲۶	۲۹۸۱
mmirp۳۰-۱	۷	۱۳۵۸۸/۸	۱۸۸۵۵/۲	۲۷/۹۳	۳۰۴۶۰	۱۸۴۷۶/۳۵	۲۶/۴۵	۳۲۹۶
mmirp۳۰-۲	۷	۱۲۸۷۵/۶	۲۰۳۴۰/۸	۳۶/۷	۴۳۲۰۰	۱۹۷۱۰/۶	۳۳/۶۸	۳۳۵۴
mmirp۴۰-۱	۷	۱۷۵۴۳/۲	۲۵۹۶۹/۱	۳۲/۴۵	۴۳۲۰۰	۲۵۳۹۶/۳۴	۳۰/۹۲	۳۶۵۲
mmirp۴۰-۲	۷	۱۷۱۷۹/۴	۳۳۱۰۰/۷	۴۸/۱	۴۳۱۸۸	۳۲۶۴۵/۷	۴۷/۲۸	۳۷۶۸
mmirp۵۰-۱	۷	۱۹۱۰۴/۷	۶۴۸۰۲	۷۰/۵۲	۴۳۲۰۰	۶۴۸۰۲/۵	۷۰/۵۲	۴۶۵۲
mmirp۵۰-۲	۷	۱۹۱۲۲/۱۶	۴۴۵۹۴/۵۹	۵۷/۱۲	۴۳۲۰۰	۴۴۵۱۴/۴۸	۵۷/۰۴	۴۷۶۹

با توجه به جدول ۹ الگوریتم پیشنهادی قادر به فراهم آوردن تمام جواب‌های بهینه گزارش شده توسط آرکتی و همکاران برای این دسته از مثال‌ها شده است. همچنین با توجه به جدول ۱۰، الگوریتم پیشنهادی در بیشتر مثال‌های موجود چندمحصوله، نسبت به حد بالای گزارش شده توسط کوئیلو و همکاران، حد بالاتری فراهم آورده است.

نتایج الگوریتم پیشنهادی روی مثال‌های تولیدشده مسئله

در این بخش با توجه به نوع مسئله که برای اقلام دارویی و در یک زنجیره تأمین سرد تعریف شده، داده‌هایی متناسب با نوع مسئله تولید و الگوریتم پیشنهادی روی آن آزمایش شده است. اطلاعات مربوط به داده‌های تولیدشده به صورت $(N - H - K - P)$ است که جزئیات آن در جدول ۱۱ آورده شده است. در تولید داده‌ها برای دو دسته داده با تعداد محصول ۳ و ۲، یکی از اقلام، یخچالی و سایر اقلام غیر یخچالی فرض شده‌اند.

جدول ۱۱. مشخصات مربوط به داده‌های تولیدی

نماد	تعریف	نماد	تعریف
N	تعداد خرده‌فروشان	K	تعداد وسایل نقلیه
H	تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی	P	تعداد اقلام

جدول ۱۲. نتایج الگوریتم پیشنهادی برای مسئله مسیریابی موجودی با اندازه ۱۰

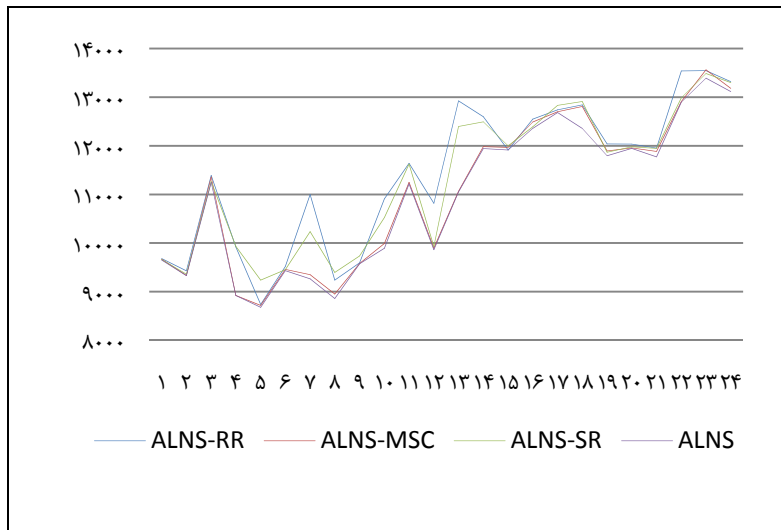
ردیف	مثال‌ها	ALNS-RR	ALNS-MSC	ALNS-SR	ALNS
۱	PV10-3-2-2-1	۹۶۸۳/۰۶	۹۶۶۸/۴۵	۹۶۶۲	۹۶۵۴/۰۴
۲	PV10-3-2-2-2	۹۴۲۸/۷۸	۹۳۳۵/۲۵	۹۳۶۱/۲۴	۹۳۳۰/۱۵
۳	PV10-3-2-2-3	۱۱۳۹۰/۱۴	۱۱۳۶۰/۰۱	۱۱۲۶۵/۰۸	۱۱۲۴۹/۹۶
۴	PV10-3-3-2-1	۹۹۱۹/۲۳	۸۹۲۱/۵۸	۹۹۳۴/۰۳	۸۹۲۱/۵۸
۵	PV10-3-3-2-2	۸۷۳۷/۸۹	۸۷۱۸/۱۲	۹۲۳۷/۳۵	۸۶۷۷/۶۹
۶	PV10-3-3-2-3	۹۵۱۸/۶۹	۹۴۵۸/۰۵	۹۴۵۱/۹۹	۹۴۳۱/۵۵
۷	PV10-3-2-3-1	۱۰۹۹۹	۹۳۵۱/۲۴	۱۰۲۳۴/۵۹	۹۲۶۴/۰۱
۸	PV10-3-2-3-2	۹۲۳۸/۵۵	۸۹۵۳/۲۳	۹۳۹۶/۰۱	۸۸۶۱/۳۶
۹	PV10-3-2-3-3	۹۵۹۴/۲۳	۹۵۸۱/۹۸	۹۷۳۵/۳۵	۹۵۷۵/۱۲
۱۰	PV10-3-3-3-1	۱۰۹۱۱/۷۵	۹۹۹۳/۷۸	۱۰۵۲۵/۵۶	۹۸۹۵/۰۲
۱۱	PV10-3-3-3-2	۱۱۶۴۱/۲۴	۱۱۲۵۰/۵۴	۱۱۶۲۵/۱۴	۱۱۲۱۵/۵۸
۱۲	PV10-3-3-3-3	۱۰۸۱۹/۷۷	۹۸۹۵/۲۸	۹۹۲۹/۱۶	۹۸۶۵/۰۴
۱۳	PV10-6-2-2-1	۱۲۹۲۴/۰۱	۱۱۰۶۶/۲۵	۱۲۳۹۹/۳۵	۱۱۰۵۲/۰۱
۱۴	PV10-6-2-2-2	۱۲۵۹۸/۱۵	۱۱۹۸۵/۰۳	۱۲۴۹۵/۲۴	۱۱۹۴۵/۰۲
۱۵	PV10-6-2-2-3	۱۱۹۱۴/۸۱	۱۱۹۶۶/۹۸	۱۱۹۹۸/۷۱	۱۱۹۱۲/۸۷
۱۶	PV10-6-3-2-1	۱۲۵۴۸/۰۲	۱۲۴۸۹/۱۴	۱۲۳۹۳/۰۴	۱۲۳۵۸/۹۸
۱۷	PV10-6-3-2-2	۱۲۷۴۱/۸۹	۱۲۷۰۱/۹۸	۱۲۸۳۱/۹۵	۱۲۶۸۳/۹۸
۱۸	PV10-6-3-2-3	۱۲۸۴۲/۹۲	۱۲۸۰۹/۶۳	۱۲۹۱۳/۰۱	۱۲۳۵۸/۹۸
۱۹	PV10-6-2-3-1	۹۶۸۳/۰۶	۹۶۶۸/۴۵	۹۶۶۲	۹۶۵۴/۰۴
۲۰	PV10-6-2-3-2	۹۴۲۸/۷۸	۹۳۳۵/۲۵	۹۳۶۱/۲۴	۹۳۳۰/۱۵
۲۱	PV10-6-2-3-3	۱۱۳۹۰/۱۴	۱۱۳۶۰/۰۱	۱۱۲۶۵/۰۸	۱۱۲۴۹/۹۶
۲۲	PV10-6-3-3-1	۹۹۱۹/۲۳	۸۹۲۱/۵۸	۹۹۳۴/۰۳	۸۹۲۱/۵۸
۲۳	PV10-6-3-3-2	۸۷۳۷/۸۹	۸۷۱۸/۱۲	۹۲۳۷/۳۵	۸۶۷۷/۶۹
۲۴	PV10-6-3-3-3	۹۵۱۸/۶۹	۹۴۵۸/۰۵	۹۴۵۱/۹۹	۹۴۳۱/۵۵

به منظور بررسی عملکرد عملگرهای برداشت استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی روی کیفیت تولید جوابها، در جدول ۱۲ برای مثالهای با ابعاد ۱۰ و در جدول ۱۳ برای مثالهای با ابعاد ۳۰، تحلیل حساسیت روی عملگرهای برداشت تصادفی، حداکثر صرفه جویی در هزینه و شاو انجام شده است. در این آزمایش ماکزیمم تکرار الگوریتم ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به این جدولها بهترین عملکرد را عملگر برداشت حداکثر صرفه جویی در هزینه و پس از آن به ترتیب برداشت شاو و برداشت تصادفی در تولید جوابها داشته و استفاده ترکیبی از این عملگرها به نتیجه بهتری منجر شده است.

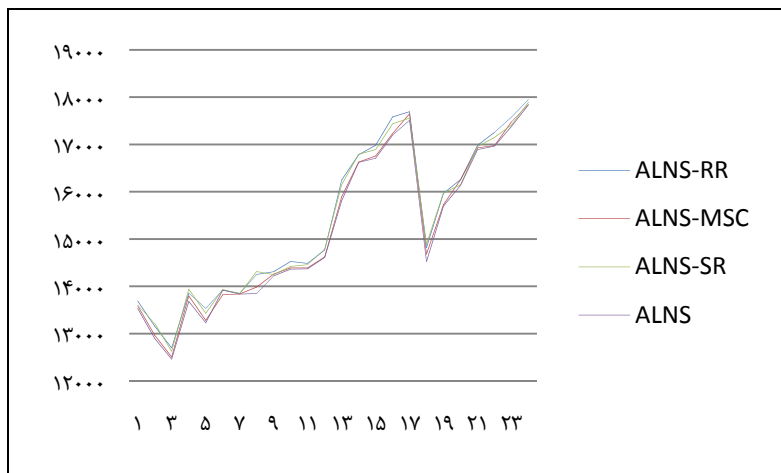
جدول ۱۳. نتایج الگوریتم پیشنهادی برای مسئله مسیریابی موجودی با اندازه ۳۰

ALNS	ALNS-SR	ALNS-MSC	ALNS-RR	مثالها	ردیف
۱۳۵۲۹/۹۹	۱۳۶۰۲	۱۳۵۸۸/۹۶	۱۳۶۹۱/۰۳	PV30-3-2-2-1	۱
۱۲۸۹۶/۹۹	۰۶/۱۳۲۱۵	۱۲۹۶۴/۰۹	۱۳۱۵۹/۲۶	PV30-3-2-2-2	۲
۱۲۴۵۹/۸۶	۸۷/۱۲۶۲۶	۱۲۵۰۵/۷۰	۱۲۶۹۸/۸۹	PV30-3-2-2-3	۳
۱۳۶۸۰/۹۰	۰۶/۱۳۹۳۹	۱۵/۱۳۷۹۸	۰۳/۱۳۸۵۵	PV30-3-3-2-1	۴
۱۳۲۲/۱۷	۹۶/۱۳۴۲۸	۷۸/۱۳۲۸۰	۱۲/۱۳۵۳۴	PV30-3-3-2-2	۵
۱۳۹۱۹/۲۴	۸۶/۱۳۹۳۲	۵۴/۱۳۸۲۰	۳۲/۱۳۹۲۱	PV30-3-3-2-3	۶
۱۳۸۳۶/۵۹	۹۶/۱۳۸۴۶	۰۲/۱۳۸۴۰	۱۳/۱۳۸۵۱	PV30-3-2-3-1	۷
۱۳۸۵۰/۰۲	۸۶/۱۴۳۱۲	۹۸/۱۳۹۸۳	۹۸/۱۴۲۵۱	PV30-3-2-3-2	۸
۱۴۲۲۱/۹۸	۳۶/۱۴۲۴۷	۰۲/۱۴۲۵۸	۸۸/۱۴۳۱۰	PV30-3-2-3-3	۹
۱۴۳۶۱/۸۹	۰۸/۱۴۴۲۱	۱۲/۱۴۳۸۹	۶۹/۱۴۵۲۵	PV30-3-3-3-1	۱۰
۱۴۳۷۱/۱۷	۹۹/۱۴۴۵۶	۰۲/۱۴۳۹۰	۲۱/۱۴۴۸۵	PV30-3-3-3-2	۱۱
۱۴۶۰۹/۸۵	۲۸/۱۴۷۸۶	۹۸/۱۴۶۲۱	۷۲/۱۴۷۶۹	PV30-3-3-3-3	۱۲
۱۵۸۰۹/۵۶	۷۸/۱۶۱۴۵	۲۳/۱۵۸۹۲	۳۶/۱۶۲۵۰	PV30-6-2-2-1	۱۳
۱۶۵۲۰/۷۵	۳۹/۱۶۷۹۲	۸۹/۱۶۵۲۷	۹۹/۱۶۷۸۲	PV30-6-2-2-2	۱۴
۱۶۷۱۰/۹۹	۷۴/۱۶۸۹۳	۰۹/۱۶۷۵۸	۱۳/۱۶۹۸۲	PV30-6-2-2-3	۱۵
۱۷۱۹۸/۳۶	۱۶/۱۷۴۲۸	۷۸/۱۷۲۳۰	۱۹/۱۷۵۸۳	PV30-6-3-2-1	۱۶
۱۷۵۱۰/۸۹	۷/۱۷۵۵۸	۰۳/۱۷۶۵۲	۷۸/۱۷۶۹۲	PV30-6-3-2-2	۱۷
۱۴۵۲۱/۳	۸۵/۱۴۸۹۳	۳/۱۴۶۸۲	۱۷/۱۴۸۲۱	PV30-6-3-2-3	۱۸
۱۳۵۲۹/۹۹	۱۳۶۰۲	۱۳۵۸۸/۹۶	۱۳۶۹۱/۰۳	PV30-6-2-3-1	۱۹
۱۲۸۹۶/۹۹	۰۶/۱۳۲۱۵	۱۲۹۶۴/۰۹	۱۳۱۵۹/۲۶	PV30-6-2-3-2	۲۰
۱۲۴۵۹/۸۶	۸۷/۱۲۶۲۶	۱۲۵۰۵/۷۰	۱۲۶۹۸/۸۹	PV30-6-2-3-3	۲۱
۱۳۶۸۰/۹۰	۰۶/۱۳۹۳۹	۱۵/۱۳۷۹۸	۰۳/۱۳۸۵۵	PV30-6-3-3-1	۲۲
۱۳۲۲/۱۷	۹۶/۱۳۴۲۸	۷۸/۱۳۲۸۰	۱۲/۱۳۵۳۴	PV30-6-3-3-2	۲۳
۱۳۹۱۹/۲۴	۸۶/۱۳۹۳۲	۵۴/۱۳۸۲۰	۳۲/۱۳۹۲۱	PV30-6-3-3-3	۲۴

در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج عملکرد عملگرهای برداشت در مثال‌های تولیدشده در قالب نمودار نشان داده شده است که در آن استفاده ترکیبی از عملگرها پایین‌ترین هزینه را به دنبال دارد.



شکل ۱. مقایسه عملکرد عملگرهای برداشت در مثال‌های با ابعاد ۱۰



شکل ۲. مقایسه عملکرد عملگرهای برداشت در مثال‌های با ابعاد ۳۰

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این مقاله برای اقلام دارویی در یک زنجیره تأمین سرد، مدل مسیریابی موجودی ای متشکل از یک توزیع کننده و چندین خردفروش، ارائه شده است. هدف این مدل کاهش هزینه های کلی سیستم شامل هزینه های حمل و نقل و نگهداری موجودی نزد توزیع کننده و خرده فروشان است. با توجه به پیچیده بودن مدل در این مقاله یک روش حل ابتکاری مبتنی بر جست و جوی همسایگی بزرگ انطباقی پیشنهاد شده است. به منظور ساخت جواب اولیه یک الگوریتم دوفازی ابتکاری ارائه شده است. الگوریتم بهبوددهنده با ترکیب عملگرهای برداشت و گذاشت با استفاده از مکانیسم چرخ رولت به جست و جوی همسایگی می پردازد. همچنین روی عملکرد عملگرهای برداشت بر کیفیت جواب های تولید شده، تحلیل حساسیتی انجام گرفته که نتایج آن در قالب جدول و نمودار ارائه شده است. از جمله پیشنهاد های آتی به منظور بهبود تکنیک و شیوه مدل سازی و همچنین روش حل مسئله می توان مواردی چون استفاده از سایر رویکردهای ابتکاری یا فراابتکاری مانند ژنتیک، کلونی مورچگان و ... به منظور بهبود بیشتر جواب و مقایسه آن با روش پیشنهادی، در نظر گرفتن محدودیت های عملیاتی بیشتر در مدل مسیریابی از قبیل در نظر گرفتن فرض چند دپو برای وسایل نقلیه، در نظر گرفتن امکان انتقال کالا بین مشتریان، در نظر گرفتن پنجره زمانی برای سرویس دهی به مشتریان یا در نظر گرفتن وسایل نقلیه ناهمگون و مدل سازی مسئله به صورت بهینه سازی استوار در شرایط عدم قطعیت تقاضای مشتریان، در نظر گرفتن عدم قطعیت به صورت فازی در پارامترهای زمان خدمت و پنجره زمانی مشتریان را عنوان کرد.

فهرست منابع

- رضوی، م.، سوخکیان، م.ع.، زیارتی، ک. (۱۳۹۰). ارائه الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر سیستم کلونی مورچگان برای مسئله مکان یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه. نشریه مدیریت صنعتی، ۳ (۶)، ۱۷-۳۸.
- محمدی زنجیرانی، د.، اسعدی آقاجری، م. (۱۳۸۸). طراحی الگوی ریاضی مسیریابی موجودی ها در زنجیره تأمین با بررسی موردی در شرکت دونا خزر. نشریه مدیریت صنعتی، ۱ (۳)، ۱۱۹-۱۳۶.
- Abdelmaguid, T. F., & Dessouky, M. M. (2006). A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problem. *International Journal of Production Research*, 44(21), 4445-4464.
- Abdollahi, M., Arvan, M., Omidvar, A., Ameri, F. (2014). A simulation optimization approach to apply value at risk analysis on the inventory routing

- problem with backlogged demand. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 5(4), 603-620.
- Aghezzaf, E.H., Raa, B., Van Landeghem, H. (2006). Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 1048-1063.
- Aksen, D., Kaya, O., Salman, F. S., & Tüncel, Ö. (2014). An adaptive large neighborhood search algorithm for a selective and periodic inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 413-426.
- Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1515-1536.
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem. *Transportation Science*, 41(3), 382-391.
- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., ... & Prutzman, P. J. (1983). Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, 13(6), 4-23.
- Bertazzi, L., Bosco, A., Guerriero, F., & Lagana, D. (2013). A stochastic inventory routing problem with stock-out. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 89-107.
- Boudia, M. & Prins, C. (2009). A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production–distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 703-715.
- Boudia, M., Louly, M. A. O. & Prins, C. (2007). A reactive GRASP and path relinking for a combined production–distribution problem. *Computers & Operations Research*, 34(11), 3402-3419.
- Campbell, A. M. & Savelsbergh, M. W. (2004). A decomposition approach for the inventory-routing problem. *Transportation science*, 38(4), 488-502.
- Campbell, A., Clarke, L., Kleywegt, A. J., & Savelsbergh, M. W. P. (1998). The inventory routing problem in Fleet Management and Logistics, Crainic, TG, and Laporte, G.
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2012). The inventory-routing problem with transshipment. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2537-2548.
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2013). Thirty years of inventory routing. *Transportation Science*, 48(1), 1-19.

- Esparcia-Alcazar, A. I., Lluch-Revert, L., Cardos, M., Sharman, K., & Merelo, J. J. (2007, July). Configuring an evolutionary tool for the Inventory and Transportation Problem. *In Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (pp. 1975-1982). ACM.
- Kaya, O., Salman, F.S., Tüncel, Ö. (2014). An adaptive large neighborhood search algorithm for a selective and periodic inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 413-426.
- Li, J. A., Wu, Y., Lai, K. K., & Liu, K. (2008). Replenishment routing problems between a single supplier and multiple retailers with direct delivery. *European Journal of Operational Research*, 190(2), 412-420.
- Li, K., Chen, B., Sivakumar, A. I., & Wu, Y. (2014). An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 936-945.
- Liu, S. C., & Lee, W. T. (2011). A heuristic method for the inventory routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 13223-13231.
- Mjirda, A., Jarboui, B., Macedo, R., Hanafi, S., & Mladenović, N. (2014). A two phase variable neighborhood search for the multi-product inventory routing problem. *Computers & Operations Research*, 52, 291-299.
- Moin, N. H., Salhi, S. & Aziz, N. A. B. (2011). An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 334-343.
- Özener, O. Ö., Ergun, Ö., & Savelsbergh, M. (2013). Allocating cost of service to customers in inventory routing. *Operations Research*, 61(1), 112-125.
- Qin, L., Miao, L., Ruan, Q., & Zhang, Y. (2014). A local search method for periodic inventory routing problem. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 765-778.
- Raa, B. (2015). Fleet optimization for cyclic inventory routing problems. *International Journal of Production Economics*, 160, 172-181.
- Raa, B., & Aghezzaf, E. H. (2008). Designing distribution patterns for long-term inventory routing with constant demand rates. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 255-263.
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 171(3), 750-775.

- Shah, N. (2004). Pharmaceutical supply chains: key issues and strategies for optimisation. *Computers & chemical engineering*, 28(6), 929-941.
- Shao, S., & Huang, G. Q. (2014, January). A SHIP Inventory Routing Problem with Heterogeneous Vehicles under Order-Up-To Level Policies. In IIE Annual Conference. Proceedings (p. 1106). *Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE)*.
- Shaw, P. (1998, October). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* (pp. 417-431). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2014). Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, 147, 593-604.
- Wong, L., & Moin, N. H. (2014, July). A modified ant colony optimization to solve multi products inventory routing problem. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1605, No. 1, pp. 1117-1122). AIP.
- Yao, Y., Dong, Y., & Dresner, M. (2010). Managing supply chain backorders under vendor managed inventory: An incentive approach and empirical analysis. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 350-359.
- Yu, Y., Chen, H., & Chu, F. (2008). A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 1022-1040.
- Zhao, Q. H., Chen, S., & Zang, C. X. (2008). Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 623-635.