توسعه مدل یکپارچه برای بررسی هم‌زمان مکان‌یابی، مسیریابی وسائل حمل و نقل و کنترل موجودی در یک زنجیره تأمین دو رده‌ای

حسن حسینی نسب[۱]
علی صدیقی[۲]

چکیده

در این مقاله، یک مدل جدید برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص خرده‌فروش‌ها، کنترل موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه ارائه گردیده است. در این مدل، خط‌مشی کنترل موجودی، برای خرده‌فروش‌هایی با تقاضای قطعی و معین تعیین، و به صورت دوره زمانی ثابت با تدارک مجدد موجودی، برای خرده‌فروش‌هایی که در یک مسیر قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، یک روش حل دقیق از طریق فرموله کردن مسئله به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه، و با توجه به NP-Hard بودن مسئله برای حل آن، یک روش ابتکاری بر پایه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسعه داده شده است. برای بررسی کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده از این الگوریتم، روشی برای کران پایین پیشنهاد و مسئله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج محاسباتی برای حالات مختلف در نظر گرفته شده برای مسئله، نشان می‌دهد که الگوریتم ابتکاری پیشنهادی، یک الگوریتم کارا و سریع برای حل مسائل یکپارچه برای بررسی هم‌زمان مکان‌یابی، مسیریابی وسائل حمل و نقل و کنترل موجودی در یک زنجیره تأمین دورده‌ای با ابعاد مختلف می‌باشد.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی، مسیریابی وسائل نقلیه، کنترل موجودی، زنجیره تأمین یکپارچه، شبیه‌سازی تبرید.

Keywords: Location, Vehicle Routing, Inventory control, Supply Chain, Simulated annealing.
JEL Classification: R30, R4, Q31.

[۱]. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول)

hhn@yazd.ac.ir

[۲]. کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۱-مقدمه

در سه دهه اخیر، مفاهیم سیستم‌های لجستیکی[1] یکپارچه و یکپارچگی تصمیم‌گیری، به یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مدیریت زنجیره تأمین[2] بدل شده‌اند. این مفاهیم به بررسی وابستگی‌های میان مکان تسهیلات، تخصیص تأمین‌کنندگان و خرده‌فروش‌ها به تسهیلات، ساختار سیستم حمل ونقل، سیستم کنترل موجودی‌ها، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید می‌پردازند. به‌کاربردن رویکرد جامع و حل هم‌زمان مسائل لجستیکی، مانع بهینه‌سازی محلی مسائل وابسته به هم می‌شود. مسائل یکپارچه لجستیک دارای انواع مختلفی هستند که می‌توان به مسائلی نظیر مسیریابی- موجودی، مکان‌یابی - مسیریابی، مکان‌یابی – موجودیاشاره کرد.

طراحی یک شبکه توزیع که شامل سه زیر مسئله مکان یابی-تخصیص، مسیریابی وسایل حمل ونقل و مسئله کنترل موجودی‌هاست، می‌تواند اهداف متنوع یک زنجیره تأمین از هزینه پایین تا قدرت پاسخگویی بالا را برآورده کرده و باعث سودآوری و بهره‌وری آن شود. تا به حال مطالعات زیادی در حوزه بررسی یکپارچه و همزمان سه مسئله مکان یابی، مسیریابی و کنترل موجودی انجام نشده‌است، ولی مطالعات گوناگونی در زمینه هماهنگی دو تا از سه مسئله فوق شامل مسائل مسیریابی– موجودی، مکان‌یابی- مسیریابی و مسائل موجودی- مکان‌یابی انجام شده است (احمدی جاوید و همکاران، ۲۰۱۰). در حوزه مسئله مسیریابی– موجودی (IRP[3])، بل[4] و همکاران (۱۹۸۳) تقریباً اولین کسانی بودند که یک مدل یکپارچه از مدیریت موجودی و زمان‌بندی وسائل نقلیه معرفی کردند (بیرگر و هوساین[5]، ۲۰۰۹). پس از آنها فدرگروئن[6] و همکاران (۱۹۸۴)، اولین مدل IRP با تقاضای احتمالی را ارائه کردند. پس از این معرفی، چندین نوع مدل IRP توسط افراد مختلف توسعه داده‌شد از قبیل IRP تک‌محصولی (شنگ و ماساکوزا، ۲۰۰۷)، چندمحصولی (محمدی و همکاران ۱۳۸۸)، با ناوگان حمل و نقل یکسان و یا متفاوت (لوکا و همکاران ۲۰۱۱)، IRP با تقاضای احتمالی،IRP با تقاضای وابسته به قیمت محصول(شو و جین ۲۰۱۱) ، IRP با فرض تحویل‌های جداگانه (یوگانگ و همکاران ۲۰۰۷) و یا IRP با فرض مجاز بودن نقل و انتقال محصول بین خرده‌فروش‌ها (لوناردو و همکاران، ۲۰۱۲).

---

1. Logistic
2. Supply Chain Management
3. Inventory Routing Problem
4. Bell (1983)
5. Birger and El-Houssaine A (2009).
6. Federgruen (1984)

با توجه به NP-Hard بودن مسئله مسیریابی وسائل نقلیه (VRP[1]) به عنوان یکی از زیر مسئله‌های مسیریابی موجودی، در نتیجه خود مسئله IRP نیز NP-Hard است که به دلیل وجود تعداد زیادی متغیر عدد صحیح در مدل می‌باشد و در نتیجه روش‌های ابتکاری زیادی در این حوزه توسعه داده شده است که الگوریتم پیشنهادشده توسط ژائو[2] و همکاران (۲۰۰۸)، یکی از کاراترین و مناسب‌ترین روش‌های ابتکاری را برای حل مسئله مسیریابی موجودی ارائه می‌دهد. آن‌ها این کار را با توسعه یک الگوریتم جستجوی ممنوع[3] و با استفاده از دو روش جستجوی همسایگی متفاوت انجام می‌دهند.

در حوزه مکان‌یابی– مسیریابی، اولین قدم‌ها برای مدل‌سازی این نوع مسئله در دهه ۱۹۶۰ برداشته شد. با این حال مدل‌های ریاضی ایجادشده را نمی‌توان مدل‌های دقیقی از مدل مکان‌یابی– مسیریابی دانست، چرا که در آن مدل‌ها، مسیرهای حمل و نقل و بازگشت به تسهیل در نظر گرفته نشده بود (آلمور و کارا[4]، ۲۰۰۷). ایجاد اولین مدل‌های واقعی این نوع مسائل در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ با فعالیت دیگر محققان اتفاق افتاد (نگی و صلحی[5]، ۲۰۰۷). در طول سالیان اخیر، توجه محققین و متخصصین لجستیک بر انواع کاربردی‌تر مسائل مکان‌یابی– مسیریابی و نیز روش‌های حل متنوع‌تر برای این مسایل واقع شده‌است. با توجه به این که دو زیر مسئله مکان‌یابی– تخصیص و زیرمسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) هر دو NP-Hard هستند، خود مسئله مکان‌یابی– مسیریابی نیز NP-Hard است و برای حل آن روش‌های ابتکاری زیادی توسعه داده شده‌است. برونو[6] و همکاران (۱۹۹۸) با در نظر گرفتن شبکه حمل و نقل چندوجهی، یک الگوریتم ابتکاری بر پایه مسئله کوتاه‌ترین مسیر ارائه کردند. توزان و برک (۱۹۹۹)، ضمن مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی– مسیریابی یک‌رده‌ای با محدودیت ظرفیت ناوگان حمل و نقل، یک الگوریتم فراابتکاری بر پایه الگوریتم جستجوی ممنوع دو مرحله‌ای طراحی نمودند. گیانی و امپروتا[7] (۲۰۰۰) برای همین مسئله، یک مدل ریاضی جدید بر پایه مسئله مسیریابی سویه‌های ظرفیت‌دار ارائه نمودند. چان و همکاران (۲۰۰۱)، ضمن در نظر گرفتن فرض محدودیت حداکثر طول مسیر و تقاضای تصادفی، به حل مسئله با روش ابتکاری ذخیره/ ورود و تجزیه

---

1. Vehicle Routing Problem
2. Zhao (2008)
3. Tabu Search
4. Alumur ans Kara (2007)
5. Nagy and Salhi (2007)
6. Bruno (1998)
7. Ghiani and Improta (2007)

تصادفی پرداخته‌اند و کران بالا و پایین برای تعداد تسهیلات و نیز تعداد وسایل نقلیه در هر تسهیل ارائه کرده‌اند. وو[1] و همکاران (۲۰۰۲)، با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه و وجود ناوگان حمل و نقل متنوع، روشی ابتکاری بر پایه تجزیه و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائهکرده‌اند. لین[2] و همکاران (۲۰۰۲)، برای حل مسئله مکان‌یابی– مسیریابی دوره‌ای با فرض محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه و حداکثر طول مسیر، یک روش ابتکاری سه‌مرحله‌ای بر پایه سه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، انشعاب‌وتحدید و فروشنده دوره‌گرد ایجاد نموده‌اند. کاپانرا[3] و همکاران (۲۰۰۴)، به ارائه روش حلی برمبنای تئوری شبکه، تجزیه مسئله،آزادسازی لاگرانژی و انشعاب و تحدید برای مسائل تسهیلات و مواد مضر چندهدفه با در نظر گرفتن تأثیر جریان کالا بر دیگر تسهیلات مستقر در مسیر پرداخته‌اند. واسنر و زپفل[4] (۲۰۰۴)، برای حل مسئله مکان‌یابی- مسیریابی دورده‌ای با فرض‌های بارگیری و تحویل، محدودیت حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه و حداکثر طول مسیر، یک روش حل دومرحله‌ای بر پایه روش ابتکاری ابتدا مکان‌یابی– تخصیص و سپس مسیریابی و بازخورد بین مراحل ارائه کرده‌اند. لشاین[5] و همکاران (۲۰۰۷)، برای مسائل مکان‌یابی- مسیریابی دو رده‌ای با فرض محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و روش حل بر مبنای آزادسازی لاگرانژی، روش جستجوی جزء گرادیان و مسئله فروشنده دوره‌گرد ارائه نموده‌اند. ازیورت[6] و همکاران (۲۰۰۷) برای مسئله مکان‌یابی– مسیریابی یک‌رده‌ای، روش‌های ابتکاری بر پایه جستجوی ممنوع، انشعاب و تحدید، آزادسازی لاگرانژی و حداقل جنگل پوشاننده ایجاد نموده‌اند. آلباردا– سامبولا[7] و همکاران (۲۰۰۷) به ارائه روش حل ابتکاری بر پایه جستجوی همسایگی‌ها و کران پایین بر پایه تجزیه برای مسئله مکان‌یابی– مسیریابی یک رده‌ای با حضور خرده‌فروش‌های تصادفی و جریمه عدم برآورد تقاضا پرداخته‌اند.

در حوزه مسائل مکان‌یابی– موجودی، یک مدل توسط واسکین و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده است و شن[8] و همکاران (۲۰۰۷)، این مدل مکان‌یابی– موجودی را اصلاح کرده‌اند. این مدل فقط تصمیمات مکان‌یابی و کنترل موجودی را بهینه‌سازی می‌کند. تابع هدف مدل، جمع هزینه‌های

[1]. Wu (2002)
[2] . Lin (2002)
[3]. Cappanera (2004)
[4] . Wasner and Zäpfel (2004)
[5] . Lashine (2006)
[6] . Özyurt (2007)
[7] . Albareda-Sambola (2007)
[8] . Shen (2007)

مکان‌یابی و موجودی است و همچنین یک هزینه مسیریابی تقریبی که تنها وابسته به مکان‌هایی است که مراکز توزیع در آن‌جا افتتاح شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش هزینه معنی‌داری از طریق استفاده از این مدل در مقایسه با استفاده از یک رویکرد ترتیبی به دست می‌آید (شن و کی ۲۰۰۷).

اخیراً احمدی‌جاوید و همکاران (۲۰۱۰)، برای اولین بار یک مدل اولیه برای بهینه‌سازی هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی– تخصیص، موجودی و مسیریابی در یک سیستم زنجیره تأمین احتمالی ارائه کرده‌اند. در این مدل، تقاضای هر مشتری، غیرقطعی و از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند و هر مرکز توزیع یک مقدار معین ذخیره اطمینان نگهداری می‌کند. مدل به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط محدب فرموله شده است و در ابتدا با استفاده از روش‌های دقیق حل می‌شود و سپس یک روش ابتکاری مبتنی بر ترکیب الگوریتم‌های جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید توسعه داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل با اندازه‌های بزرگ بسیار مناسب و کاراست. هم‌چنین این تحقیق، با مقایسه نتایج مسئله مکان‌یابی- موجودی ارائه‌شده توسط شن و همکاران (۲۰۰۷) و مدل پیشنهادی خود نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری یکپارچه مکان‌یابی– مسیریابی– موجودی، باعث بهبود عملکرد کلی سیستم در کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین خواهد شد.

همان‌طور که در مرور ادبیات بیان شد، مطالعات زیادی در حوزه بررسی یکپارچه و هم‌زمان مسائل مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی، انجام نشده است. در مدل پیشنهادی احمدی‌جاوید و همکاران (۲۰۱۰) برای این نوع مسائل، خط‌مشی کنترل موجودی تنها برای مراکز توزیع لحاظ شده است و از نوع مقدار سفارش ثابت و بدین صورت است که وقتی سطح موجودی مراکز توزیع به نقطه سفارش مجدد رسید، یک مقدار ثابت به مرکز توزیع اصلی سفارش داده می‌شود. در این مقاله، برای اولین بار یک مدل یکپارچه مکان‌یابی–مسیریابی– موجودی توسعه داده می‌شود که در آن خط‌مشی کنترل موجودی برای خرده‌فروش‌ها تعیین می‌گردد. این خط مشی به صورت دوره زمانی تدارک مجدد موجودی (فاصله زمانی اعزام وسایل نقلیه بر پرکردن مجدد موجودی یک خرده‌فروش) است. در این مدل پیشنهادی، دوره تدارک مجدد موجودی برای خرده‌فروش‌هایی که در یک مسیر قرار می‌گیرند یکسان است و ظرفیت ناوگان حمل و نقل و همچنین حداکثر طول مسیر به میزان مشخصی محدود فرض شده‌است. برای حل مسئله، یک روش حل بهینه از طریق بیان مسئله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه می‌شود. با توجه به

این که زیر مسئله‌های مسیریابی– موجودی و مکان یابی– مسیریابی، NP-Hard هستند، مسئله یکپارچه مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی نیز NP-Hard است و از این رو، برای این مدل جدید و حل مثال‌های با اندازه بزرگ، یک روش ابتکاری توسعه داده می‌شود. این روش ابتکاری پیشنهادی، یک الگوریتم دومرحله‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید است. در مرحله اول، ابتدا با استفاده از الگوریتمی یک جواب اولیه ایجاد می‌شود. مرحله بعدی، مرحله بهبود جواب اولیه است که به ترتیب در دو فاز مسیریابی و کنترل موجودی انجام می‌شود. برای هر فاز، از روشی مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای بهبود جواب استفاده می‌شود.

ادامه این مقاله بدین شرح است: در بخش ۲، یک مدل ریاضی برای مسئله فوق ارائهمی‌شود. در بخش ۳، روشیابتکاری دو مرحله‌ای بر پایه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله پیشنهاد می‌شود. در بخش ۴، اعتبار مدل و روش حل پیشنهادی با استفاده از نتایج محاسباتی بررسی می‌شود و در پایان در بخش ۵ نتیجه تحقیق ارائه می‌شود.

۲- شرح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

مسئله مورد نظر این مقاله، یک زنجیره تأمین شامل مجموعه‌ای از مراکز توزیع اصلی، مراکز توزیع جزیی و خرده‌فروش‌هاست که از لحاظ جغرافیایی پراکنده در یک منطقه معین هستند. این مسئله بر روی یک گراف بدون جهت $G = (N, E)$ تعریف می‌شود. مجموعه گره‌های این گراف (N) متشکل از گره‌های مراکز توزیع اصلی (CD)، گره‌های مراکز توزیع جزیی (RD) و گره خرده فروش‌ها (C) است. مجموعه کل یال‌های (راه‌های ارتباطی) موجود در گراف این شبکه توزیع (E) شامل یال‌های بدون جهت، اتصال‌دهنده تولید کننده به مراکز توزیع، مراکز توزیع به خرده‌فروش‌ها و همچنین خرده‌فروش‌ها به یکدیگر است. در مورد طول یال‌های اتصال‌دهنده مراکز توزیع به خرده‌فروش‌ها و خرده‌فروش‌ها به یکدیگر اصل نامساوی مثلثی صدق می‌کند ($d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$).

۲-۱-مفروضات

- تنها یک محصول بین خرده‌فروش‌ها توزیع می‌شود.
- ظرفیت مراکز توزیع اصلی و جزیی، مقادیری قطعی و محدود هستند.
- ظرفیت وسایل نقلیه یکسان و دارای مقادیری قطعی و محدود هستند. ناوگان حمل و نقل یکسان فرض شده است.

- تقاضای خرده‌فروش‌ها، قطعی و معین است و شکستن آن بین چند مرکز توزیع جزیی مجاز نیست. تقاضای خرده‌فروش‌ها مستقل از یکدیگر است.
- خط مشی موجودی در خرده‌فروش‌ها به صورت دوره زمانی تدارک مجدد موجودی ثابت (فاصله زمانی اعزام وسایل نقلیه بر پرکردن مجدد موجودی یک خرده‌فروش) است. در مدل پیشنهادی، دوره تدارک مجدد موجودی برای خرده‌فروش‌هایی که در یک مسیر قرار دارند یکسان است.
- حداکثر طول مسیر به دلایلی مثل نوع کالای در حال تحویل و یا قوانین کار، به میزان مشخصی محدود است.
- هر خرده‌فروش تنها توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود.
- تقاضای کل هر مسیر باید کمتر یا مساوی ظرفیت وسیله نقلیه باشد.
- هرمسیر از یک مرکز توزیع شروع می‌شود و در همان مرکز توزیع پایان می‌پذیرد.
- هزینه و زمان بار کردن و تخلیه وسایل نقلیه در نظر گرفته نشده است.
- کمبود موجودی در مراکز توزیع و خرده‌فروش‌ها مجاز نیست. هیچ‌گونه نقل‌وانتقال موجودی بین مراکز توزیع و یا بین خرده‌فروش‌ها امکان‌پذیر نیست.

۲-۲- اهداف مدل پیشنهادی

با هدف کمینه کردن هزینه‌های کل زنجیره تأمین، در این مدل تصمیم‌گیری‌های زیر انجام می‌شود:

۱) مکان یابی مراکز توزیع جزیی
۲) تخصیص خرده‌فروش‌ها به مراکز توزیع جزیی
۳) تعیین مسیرهای حمل ونقل محصول از مراکز توزیع به خرده‌فروش‌ها
۴) تعیین سیاست‌های کنترل موجودی برای خرده‌فروش‌ها
۵) تعیین میزان محصول حمل شده از مراکز توزیع اصلی به مراکز توزیع فرعی

۲-۳- علائم و اختصارات

علایم و اختصارات مورد استفاده در این تحقیق به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول (۱): علائم و اختصارات

مجموعه‌ها	پارامترها
CD: مجموعه گره‌های مراکز توزیع اصلی	τ: حداکثر مسافت قابل طی توسط هر وسیله نقلیه در هر روز
RD: مجموعه گره‌های مراکز توزیع جزیی	q_k: مقدار تقاضای مشتری k ام بر حسب واحد محصول در هر روز
C: مجموعه گره‌های خرده‌فروش‌ها	$\propto$: هزینه ثابت حمل و نقل بین گره‌های مراکز توزیع جزیی و خرده‌فروش‌ها به ازای واحد مسافت
R: مجموعه کلیه وسایل نقلیه (مسیر) بالقوه موجود	d_{rkm}: مسافت ما بین گره k و گره m در مسیر r $(k \,\&\, m \in N_1)$
N_1: مجموعه کلیه گره‌های عضو $(RD \cup C)$	A: هزینه سفارش‌دهی به ازای هر بار سفارش
V_r: مجموعه خرده‌فروش‌ها برای مسیر r	h: هزینه نگهداری در هر دوره به ازای واحد محصول
پارامترها	w: روزهای کاری در افق برنامه‌ریزی
f_i: ظرفیت عرضه مجموعه گره‌های مراکز توزیع اصلی i ام	q_{kmax}: حد بالا برای تقاضای مشتری k در هر روز
f_j: ظرفیت مجموعه گره‌های مراکز توزیع جزیی j ام	q_{kmin}: حد پایین برای تقاضای مشتری k در هر روز
cr_{ij}: هزینه انتقال واحد محصول از عرضه مجموعه گره‌های مراکز توزیع اصلی i ام به مجموعه گره‌های مراکز توزیع جزیی j ام	**متغیرهای تصمیم**
fc_j: هزینه ثابت افتتاح گره‌های مراکز توزیع جزیی j ام	T_r: متغیر زمان تدارک مجدد مسیر r. (متغیر صحیح)
vc_j: هزینه متغیر فعالیت گره‌های مراکز توزیع جزیی j ام به ازای واحد محصول	x_{ij}: متغیر مقدار واحد محصول حمل‌شده از مرکز توزیع اصلی(مجموعه گره‌های مراکز توزیع اصلی) i ام به مرکز توزیع جزیی(گره‌های مراکز توزیع جزیی) j ام. (متغیر صحیح)
cv: هزینه ثابت هر واحد وسیله نقلیه	y_j: متغیر صفر و یک عدم احداث یا احداث یک مرکز توزیع جزیی(گره‌های مراکز توزیع جزیی) در مکان بالقوه j ام.
σ: ظرفیت وسایل نقلیه ناوگان حمل ونقل	u_{rkm}: متغیر صفر ویک نگذشتن یا گذشتن مسیر (وسیله نقلیه) r ام از گره k به گره m. $(k \,\&\, m \in N_1)$
nv_j: حداکثر تعداد وسایل نقلیه قابل تخصیص به گره‌های مراکز توزیع جزیی j ام که در اینجا برابر با $nv_j = \lceil f_j/\sigma \rceil$ است.	z_{kj}: متغیر صفر ویک عدم تخصیص یا تخصیص خرده‌فروش k ام به مرکز توزیع جزیی(گره‌های مراکز توزیع جزیی) j ام.

مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی–مسیریابی– موجودی دو رده‌ای با در نظرگرفتن تقاضای معین خرده‌فروش و محدودیت‌های ناوگان حمل و نقل و حداکثر طول مسیر به شرح زیر فرموله می‌شود:

$$Min. \quad \sum_{j\in RD} fc_j y_j + \sum_{i\in CD}\sum_{j\in RD} cr_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in RD} vc_j \sum_{k\in C} q_k z_{kj} + \sum_{r\in R}\sum_{m\in N_1}\sum_{k\in N_1} \frac{d_{rkm}*\alpha+cv}{T_r} * u_{rkm} + \sum_{r\in R}\frac{A}{T_r} + \sum_{r\in R}\sum_{k\in V_r}\frac{T_r*q_k*h}{2} \qquad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j\in RD} w x_{ij} \le \acute{f}_i \quad ,\forall i \in CD \qquad (2)$$

$$\sum_{i\in CD} wx_{ij} \le f_j y_j \quad ,\forall j \in RD \qquad (۳)$$

$$\sum_{k\in C} q_k z_{kj} - \sum_{i\in CD} x_{ij} = 0 \quad , \forall j \in RD \qquad (۴)$$

$$\sum_{r\in R} \sum_{m\in N_1} u_{rkm} = 1 \quad ,\forall k \in C \qquad (۵)$$

$$\sum_{m\in N_1} \sum_{k\in N_1} d_{rkm} u_{rkm} \le \tau \quad ,\forall r \in R \qquad (۶)$$

$$\sum_{k\in V} \sum_{m\in V} \sum_{r\in R} u_{rkm} \le |V| - \left\lceil \sum_{k\in V} {}^{q_k}/_{\sigma} \right\rceil \quad , 2 \le |V| \le |C|, \ \forall V \subseteq C \qquad (۷)$$

$$\sum_{m\in N_1} u_{rkm} - \sum_{m\in N_1} u_{rmk} = 0 \quad ,\forall k \in N_1, \forall r \in R \qquad (۸)$$

$$\sum_{m\in N_1} u_{rkm} + \sum_{n\in N_1} u_{rjn} - z_{kj} \le 1 \ , \ \forall k \in C \ , \forall j \in RD \ , \forall r \in R \qquad (۹)$$

$$\sum_{r\in R} \sum_{k\in C} u_{rjk} \le nv_j y_j \quad , \ \forall j \in RD \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{k\in V_r} q_k * T_r \le \sigma \ , \ \forall r \in R \qquad (۱۱)$$

$$q_{kmin} \le q_k \le q_{kmax} \ ,\forall k \in C \qquad (۱۲)$$

$$x_{ij} \ge 0 \ , Integer \quad , \ \forall i \in CD \ , \forall j \in RD \qquad (۱۳)$$

$$T_r \ge 0 \ , Integer \quad , \ \forall r \in R \qquad (۱۴)$$

$$y_j \in \{0,1\} \ ,\forall j \in RD \qquad (۱۵)$$

$$u_{rkm} \in \{0,1\} \ ,\forall k \in N_1 \ , \forall m \in N_1 \ , \forall r \in R \qquad (۱۶)$$

$$z_{kj} \in \{0,1\} \ , \ \forall k \in C \ , \forall j \in RD \qquad (۱۷)$$

در مدل فوق، رابطه (۱)، نشان‌دهنده تابع هدف است که به ترتیب شامل هزینه ثابت افتتاح RDها، هزینه انتقال کالا از CDها به RDها، هزینه متغیر فعالیت RDها، کل هزینه‌های حمل و نقل از RDها به خرده‌فروش‌هادر هر روز، هزینه سفارش‌دهی در هر روز و هزینه نگهداری محصول در هر روز است. رابطه (۲)، ظرفیت کالای خروجی از CDها را محدود می‌سازد. رابطه (۳)، نشان‌دهنده محدودیت جریان ورودی به RDها است و رابطه (۴)، تعادل جریان در RDها (برابر بودن جریان ورودی و خروجی) را برقرار می‌سازد. رابطه (۵)، باعث می‌شود که هر مشتری تنها به یک وسیله نقلیه (مسیر) تعلق داشته باشد. رابطه (۶)، نیز حداکثر طول مسیر هر وسیله نقلیه را

محدود می‌سازد. رابطه (۷)، مشهور به محدودیت حذف زیرتور، از ایجاد مسیرهایی که به یک RD متصل نیستند، جلوگیری می‌کند. همچنین این محدودیت، حداکثر تقاضای تخصیص داده شده به هر وسیله نقلیه را به ظرفیت آن وسیله نقلیه محدود می‌سازد. رابطه (۸) یا محدودیت حفظ روند، هر وسیله نقلیه را ملزم می‌کند تا از همان گرهی که به آن وارد شده‌است، خارج شود. رابطه (۹)، باعث تخصیص مشتری به یک RD در صورت قرار گرفتن آن مشتری در مسیر وسیله نقلیه متعلق به همان RDمی‌شود. رابطه (۱۰)، تعداد وسایل نقلیه (مسیر) اختصاص‌یافته به یک RD را به حداکثر تعداد وسایل نقلیه در دسترس محدود می‌کند. رابطه (۱۱)، نشان می‌دهد که تقاضای مشتری k در هر روز در بین یک حد بالا و پایین معین قرار می‌گیرد. رابطه (۱۲)، نشان می‌دهد که تقاضا در هر روز برای مسیر rضرب در زمان تدارک مجدد آن مسیر باید کمتر مساوی ظرفیت وسیله حمل ونقل باشد. در نهایت رابطه‌های (۱۷-۱۳) نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کنند.

۳- روش حل

در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پیشنهادی فوق، محدودیت حذف زیرتورها به دلیل ماهیت ترکیبی خود، حل دقیق مسئله را مشکل می‌سازد. با توجه به این مورد و نیز NP-Hard بودن مسئله مکان‌یابی– مسیریابی- موجودی، حل بهینه این مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ با استفاده از روش‌های دقیق در زمان چندجمله‌ای امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل برای حل این نوع مسائل در زمان معقول باید از روش‌های ابتکاری استفاده کرد.

۳-۱-الگوریتم ابتکاری

در این بخش، یک روش حلابتکاری بر پایه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائهمی‌شود.الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، یک الگوریتم فراابتکاری تصادفی برای حل مسائل ترکیبی است. ایده اصلی این الگوریتم، انتخاب تصادفی یک جواب از همسایگی جواب فعلی در هر مرحله است. جواب همسایه انتخاب‌شده در صورتی که تابع هدف بهتری نسبت به جواب فعلی داشته باشد،جایگزین جواب فعلی می‌شود. در غیر این صورت، به صورت تصادفی با احتمالی بین صفر تا یک جایگزین جواب فعلی می‌گردد. در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید،احتمال انتخاب جوابی با تابع هدف بدتر متناسب با میزان تفاوت توابع هدف دو جواب است. جواب‌های با اختلاف کمتر تابع هدف از مقدار تابع هدف فعلی با احتمال بیشتر و جواب‌های با اختلاف زیادتر به ندرت انتخاب می‌شوند.

بنابراین با افزایش تعداد تکرارهای این الگوریتم، احتمال خارج‌شدن از جواب‌های بهینه محلی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر همراه با کاهش احتمال پذیرش جواب‌های با توابع هدف بدتر در طول زمان به دلیل کاهش درجه حرارت سیستم، الگوریتم در نهایت به یک جواب بهینه خوب همگرا می‌رسد (هندرسون[1] و همکاران، ۲۰۰۳).

روش ابتکاری پیشنهادی این مقاله، یک الگوریتم دومرحله‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید است. ابتدا با استفاده از یک الگوریتم، نخست مکان‌یابی و سپس تخصیص–مسیریابی، یک جواب اولیه ایجاد می‌شود و سپس مسیرهای آن به صورت محلی توسط الگوریتم ابتکاری تعویض Or-opt پیشنهادی توسط اور (۱۹۷۶) بهبود داده می‌شود. در نهایت با استفاده از ساختار عمومی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بر روی شش همسایگی جواب اولیه طی سه مرحله جستجو انجام می‌شود و جواب اولیه بهبود می‌یابد. ایجاد شش همسایگی مرحله بهبود، ترکیبی از روش پیشنهادی زگردی و همکاران (۱۳۸۸) برای مسئله مکان‌یابی- مسیریابی دو رده‌ایاست که در آن پنج همسایگی(N_1 (x)، N_2 (x)، N_3 (x)، N_4 (x)و N_5 (x)) برای حل این نوع مسائل ارائه کرده‌است و توسعه روش پیشنهادی ژائو و همکاران(۲۰۰۷)برای همسایگی ششم (N_6 (x)) برای بخش کنترل موجودی و تعیین دوره سفارش ثابت است.

۳-۲-ایجاد جواب اولیه

۳-۲-۱- مکان‌یابی

در این گام، مراکز توزیع جزیی (RD) که باید افتتاح شوند باید طوری انتخاب شوند که هزینه گشایش آنها، تخصیص جریان حمل مواد بین CDها و آنها، و نیز هزینه متغیر فعالیت آنها مینیمم شود که این گام معادل حل مسئله زیر است:

$$Min. \quad \sum_{j\in RD} fc_j y_j + \sum_{i\in CD}\sum_{j\in RD} cr_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in RD} vc_j \sum_{i\in CD} x_{ij} \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j\in RD} wx_{ij} \le \acute{f}_i \quad ,\forall i \in CD \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{i\in CD} wx_{ij} \le f_j y_j \quad ,\forall j \in RD \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{i\in CD}\sum_{j\in RD} x_{ij} = \sum_{k\in C} q_k \qquad (۲۱)$$

[1] . Henderson (2003)

در این مسئله، روابط (۲۰-۱۹) مانند روابط (۳-۲) هستند و رابطه (۲۱) باعث می‌شود که مجموع کالای حمل‌شده از CDها به RDها برابر تقاضای کل باشد. مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فوق توسط نرم‌افزارهای بهینه‌سازی حل می‌گردد.

۳-۲-۲- تخصیص–مسیریابی

در این گام باید مراکز توزیع جزیی، گشایش‌یافته و خرده‌فروش‌ها بر اساس اصل نزدیک‌ترین همسایگی با شرط عدم نقض محدودیت‌های حداکثر ظرفیت RD، حداکثر طول مسیر و حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه به RDها تخصیص داده شده و وارد مسیرها شوند. انتخاب اولین RD بر اساس کمترین نسبت هزینه ایجاد به ظرفیت انجام می‌پذیرد و در طول زمان پس از عدم امکان تخصیص مشتری بیشتر به یک RD، RD بعدی بر اساس معیار ذکر شده گشایش می‌یابد.

۳-۲-۳- بهبود مسیرهای اولیه

در این مرحله، مسیرهای اولیه ایجاد شده توسط مرحله قبل به وسیله روش ابتکاری Or-opt بهبود داده می‌شود.

۳-۲-۴- کنترل موجودی

در این مرحله، مقدار اولیه ۱، برای دوره تدارک مجدد موجودی برای هر یک از مسیرهای ایجادشده و در نهایت بهبودیافته در دو مرحله قبل در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-مرحله بهبود روش حل ابتکاری

در مرحله بهبود جستجو بر روی پنج همسایگی که بر اثر تعویض RDها در مبدأ دو مسیر ایجاد می‌شود و نیز جستجو بر روی همسایگی ششم که بر اثر تغییر دوره تدارک مجدد موجودی ایجاد می‌شود، در سه بخش بر اساس ساختار الگوریتم شبیه سازی تبرید انجام می‌شود. ایده اصلی این مرحله، یافتن ترکیبی مناسب از RD هایی است که باید در هر تکرار گشایش یابند و یافتن بهترین ترکیب مسیرها با توجه به ترکیب RDهای انتخابی و نیز بهترین زمان تدارک مجدد موجودی برای هریک از مسیرهاست. روال کلی الگوریتم پیشنهادی (جدول ۲)، به این ترتیب است که در ابتدا با اجرای زیرمسئله مسیریابی (جدول ۳)، بر روی جواب اولیه به دست آمده این جواب بهبود

محلی داده می‌شود. روش اجرای زیرمسئله مسیریابی به صورت جستجو بر روی جواب‌های عضو اشتراک ۳ تا از ۵ همسایگی ایجاد شده (N_1 (x)، N_2 (x) و N_5 (x)) با هدف بهبود جواب فعلی با توجه به RDهای گشایش یافته اولیه است. سپس با اجرای زیرمسئله کنترل موجودی (جدول ۴)، جواب فعلی باز هم بهبود محلی داده می‌شود. روش اجرای زیرمسئله کنترل موجودی به صورت جستجو بر روی اشتراک جواب ایجاد شده در مرحله زیرمسئله مسیریابی با جواب همسایگی ایجادشده ششم با هدف بهبود جواب فعلی الگوریتم است. سپس در ادامه زیر مسئله اصلی جستجوی الگوریتم، جستجو بر روی جواب‌های متعلق به اشتراک همسایگی‌های N_3 (x) و N_4 (x) و آخرین همسایگی ایجاد شده در مرحله زیرمسئله کنترل موجودی را با هدف ایجاد تنوع در جواب و گسترش محدوده جستجو به وسیله گشایش و یا بستن RDها انجام می‌دهد. در پایان تکرار هر زیرمسئله اصلی جستجو، دمای الگوریتم جستجوی همسایگی‌های مربوطه کاهش می‌یابد و سپس برای بهبود محلی مسیرهای به دست آمده و نیز زمان تدارک مجدد هر مسیر، به ترتیب زیرمسئله‌هایمسیریابی و کنترل موجودی با توجه به RDهای گشایش یافته اجرا می‌شوند. این فرآیند تا زمان برآورده شدن شرایط انجماد در زیرمسئله اصلی جستجوی الگوریتم ادامه می‌یابد.

۳-۴-شرایط انجماد

شرایط انجماد در هر دو بخش اصلی جستجوی الگوریتم و مسیریابی، رسیدن به حد بالای تعداد تکرارهای اصلی (K) است. هم‌چنین اگر مقدار صرفه‌جویی بین سه تکرار اصلی جستجوی گام چهارمجدول(۲) و یا گام دومجدول‌های(۳) و (۴) کمتر از مقدار مشخصی مانند ε باشد، آنگاه جستجوی مربوط به آن گام خاتمه می‌یابد.

۳-۵- همگرایی روش ابتکاری

اثبات همگرایی روش ابتکاری پیشنهادی این مقاله، از آنالیز همگرایی با پشتوانه نظری غنی‌ای که برای الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید توسعه داده شده‌است، پیروی می‌کند. در ادبیات چندین محقق مانند جمان و همکاران (۱۹۸۴)، میترا و همکاران (۱۹۸۶) و برنسیمس و همکاران (۱۹۹۳)، همگرایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بررسی شده‌است و آن‌ها توانسته‌اند ثابت کنند که این الگوریتم در محدوده یک جواب بهینه سراسری با احتمال یک، همگرا می‌شود بدین معنی که یک برنامه تبرید طولانی نمایی می‌تواند همگرایی به جواب بهینه سراسری را تضمین کند. در

پژوهش اسپال(۲۰۰۳)، از هر دو جنبه نظری و عملی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در این مورد به طور مفصل‌تری بحث شده‌است.

۳-۶- کران خطا

برای فهمیدن کیفیت جواب‌های به دست آمده از روش ابتکاری، یک کران خطا ارائهمی‌شود. در این بخش، برای توسعه یک کران خطا، حد پایینی برای مقدار بهینه تابع هدف از راه حل کردن مدلی پیدا می‌شود که در حقیقت از طریق آزادسازی محدودیت‌های زیرتور نظیر محدودیت(۷)، در مدل پیشنهادی در بخش دو مقاله، به دست می‌آید.

جدول (۲): نمای کلی الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

مرحله ایجاد جواب اولیه

۱) مکان‌یابی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و حل آن به وسیله روش‌های دقیق
۲) تخصیص خرده‌فروش‌ها به RDها با حداقل نسبت هزینه احداث به ظرفیت و ساختن مسیرهای اولیه
۳) بهبود مسیرهای اولیه بر اساس الگوریتم Or-opt
۴) دادن مقدار اولیه $1\mathbf{T_r}$ =برای همه مسیرهای ایجاد شده (r)

مرحله بهبود

۱) اجرای زیرمسئله مسیریابی
۲) اجرای زیرمسئله کنترل موجودی
۳) تعیین مقدار دمای اولیه ($\mathbf{H_{01}}$) و ضریب کاهش ($\mathbf{e_1}$)
۴) تا هنگامی که شرایط انجماد برآورده نشده‌است:
۴-۱) تکرار حلقه زیر برای $\mathbf{L_1}$ مرتبه:
۴-۱-۱) انتخاب یک جواب تصادفی مانند $\acute{\mathbf{x}}$ از اشتراک همسایگی‌های تولیدشده$(\mathbf{x})$ $\mathbf{N_3}$ و $(\mathbf{x})$ $\mathbf{N_4}$ و آخرین همسایگی تولیدشده در بخش زیرمسئله کنترل موجودی
۴-۱-۲) $\Delta = \mathbf{f}(\acute{\mathbf{x}}) - \mathbf{f}(\mathbf{x})$
۴-۱-۳) اگر $\Delta \leq \mathbf{0}$ آنگاه $\mathbf{x}=\acute{\mathbf{x}}$
۴-۱-۴) اگر $\Delta \geq \mathbf{0}$ آنگاه $\mathbf{x}=\acute{\mathbf{x}}$ با احتمال $\mathbf{e}^{-\Delta/\mathbf{H_{01}}}$
۴-۲) کاهش دما $\mathbf{H_{01}} \leftarrow \mathbf{e_1} * \mathbf{H_{01}}$
۴-۳) اجرای زیرمسئله مسیریابی
۴-۴) اجرای زیرمسئله کنترل موجودی

جدول (۳): نمای کلی زیرمسئله مسیریابی الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

زیرمسئله مسیریابی
۱) تعیین مقدار دمای اولیه (H_{02}) و ضریب کاهش (e_2)
۲) تا هنگامی که شرایط انجماد برآورده نشده‌است:
۲-۱) تکرار حلقه زیر برای L_2 مرتبه:
۲-۱-۱) انتخاب یک جواب تصادفی مانند $\acute{x}$ از اشتراک همسایگی‌های تولیدشده($N_1(x)$،$N_2(x)$ و $N_5(x)$ و آخرین همسایگی تولیدشده در بخش زیرمسئله کنترل موجودی
۲-۱-۲) $\Delta = f(\acute{x}) - f(x)$
۲-۱-۳) اگر $\Delta \leq 0$ آنگاه $x=\acute{x}$
۲-۱-۴) اگر $\Delta \geq 0$ آنگاه $x=\acute{x}$ با احتمال $e^{-\Delta/H_{02}}$
۲-۲) کاهش دما $H_{02} \leftarrow e_2 H_{02}$

جدول (۴): نمای کلی زیرمسئله کنترل موجودی الگوریتم ابتکاری پیشنهادی

زیرمسئله کنترل موجودی
۱) تعیین مقدار دمای اولیه (H_{03}) و ضریب کاهش (e_3)
۲) تا هنگامی که شرایط انجماد برآورده نشده‌است:
۲-۱) تکرار حلقه زیر برای L_3 مرتبه:
۲-۱-۱) انتخاب یک جواب تصادفی مانند $\acute{x}$ از اشتراک آخرین همسایگی‌های تولیدشده در زیرمسئله مسیریابی و همسایگی تولیدشده$N_6(x)$
۲-۱-۲) $\Delta = f(\acute{x}) - f(x)$
۲-۱-۳) اگر $\Delta \leq 0$ آنگاه $x=\acute{x}$
۲-۱-۴) اگر $\Delta \geq 0$ آنگاه $x=\acute{x}$ با احتمال $e^{-\Delta/H_{03}}$
۲-۲) کاهش دما $H_{03} \leftarrow e_3 H_{03}$

۴- نتایج محاسباتی

۴-۱- طراحی آزمایش‌های عددی

برای ارزیابی کارایی روش حل پیشنهادی از ۱۰ نمونه مسئله تصادفی تولیدشده در سه دسته مسئله با ابعاد کوچک (۳ نمونه)، مسئله با ابعاد متوسط (۳ نمونه) و با ابعاد بزرگ (۴ نمونه)، استفاده می‌شود. دسته مسائل تولید شده، در تعداد خرده‌فروش‌هاو در تعداد مراکز توزیع جزیی و اصلی با هم متفاوت هستند.گره‌های گراف مسئله، به‌طور تصادفی در فضایی به اندازه ۱۰۰۰*۱۰۰۰ تولید می‌شوند. تقاضای خرده‌فروش‌ها، ظرفیت RDها و CDها به ترتیب و به طور تصادفی از فواصل U[7,30]،U[30,140] و U[100,600]انتخاب می‌شوند. هزینه ثابت وسایل نقلیه برابر ۲۵۰ و هزینه ثابت و متغیر بازگشایی RDها به ترتیب و به‌طورتصادفی از فاصله U[20,80]+U[10,110]*f_j^2 و U[1.5,3]+U[0.01,0.03]*f_j انتخاب می‌شوند. هزینه حمل و

نقل بین CDها و RDها و هم‌چنین بین RDها و خرده‌فروش‌ها به ترتیب برابر ۰/۱۰۰ و ۰/۵ واحد فاصله اقلیدسی بین گره‌ها فرض می‌شود. هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری موجودی به ترتیب و به‌طور تصادفی از فواصل U[5,15] و U[100,250] انتخاب می‌شوند. ظرفیت وسایل نقلیه و حداکثر طول مسیر برای هر مسئله طوری تعیین می‌گردد که برای ابعاد کوچک هر مسیر به طور متوسط ۲ خرده‌فروش و برای ابعاد بزرگ هر مسیر به طور متوسط ۵ خرده‌فروش داشته باشد.

حل دقیق مسائل توسط نرم افزار لینگو ۱۱ انجام شده‌است و الگوریتم پیشنهادی توسط نرم‌افزار Matlabبرنامه‌نویسیشدهو در سیستم رایانه با مشخصات پردازش‌گر Core i5 2.40 GHz و حافظه جانبی 4G اجرا شده است. مقداردهی مناسب پارامترهای الگوریتم پیشنهادی نقش بسزایی در کیفیت جواب‌های حاصله دارد، بدین منظور برای هر پارامتر تعدادی مقادیر پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود، سپس مقدار هر پارامتر با ثابت نگاه داشتن بقیه پارامترها در کمترین مقدار خود، بر اساس میزان تابع هدف و زمان رسیدن به جواب تنظیم می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های بالا بهروی یکی از مسئله‌های تولید شده، مقدار تنظیم شده هر پارامتر الگوریتم پیشنهادی در جدول (۵) نشان داده شده‌است و نتایج به‌دست‌آمده از حل ۱۰ نمونه مسئله تولید شده به دو روش حل دقیق و حل به روش ابتکاری پیشنهادی این مقاله در جدول (۶) نشان داده شده‌است (الگوریتم ابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل هر نمونه مسئله، ۱۰ بار اجرا شده است).

جدول (۵): پارامترهای تنظیم شده الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم	پارامترهای تنظیم‌شده			
	H_0	e	L	K
اصلی	۲۰۰	۰/۹۸	۳۵	۳۵
مسیریابی	۲۰۰	۰/۹۳	۱۵	۱۰
کنترل موجودی	۲۰۰	۰/۹۳	۱۵	۱۰

جدول (۶): نتایج محاسباتی

Gap (٪)	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید		حل دقیق		تعداد خرده‌فروش‌ها	تعداد مراکز توزیع فرعی بالقوه	تعداد مرکز توزیع اصلی	شماره مسئله	دسته مسائل
	میانگین زمان حل (ثانیه)	میانگین جواب (هزینه کل سیستم)	زمان حل (ثانیه)	جواب (هزینه کل سیستم)					
۰/۰	۱	۱۲۱۸/۲	۹	۱۸۱۲/۲	۴	۲	۱	۰۱	ابعاد کوچک
۰/۰	۳	۲۵۹۸/۱	۳۷۹	۲۵۹۸/۱	۶	۳	۱	۰۲	
۰/۰	۴	۲۷۴۱/۸	۵۸۷	۲۷۴۱/۸	۶	۴	۲	۰۳	
۱/۰۹	۱۱	۳۲۵۰/۳	۳۱۴۸۵	۳۲۱۵/۱	۱۰	۴	۲	۰٤	متوسط
-۱۴/۷۶	۳۴	۳۸۰۴/۳	محدودیت ۲۴ ساعت	۴۴۶۲/۵	۲۰	۶	۲	۰۵	
-۱۳/۱۰	۳۵	۵۹۰۹/۴	محدودیت ۲۴ ساعت	۶۸۰۰۰/۶	۲۰	۶	۳	۰٦	
-۱۷/۰۲	۶۶	۱۸۹۵۵/۱	محدودیت ۷۲ ساعت	۲۲۸۴۳/۱	۵۰	۲۵	۵	۰۷	بزرگ
-	۱۰۴	۱۸۵۷۱/۲	-	-	۱۰۰	۲۵	۵	۰۸	
-	۱۹۱	۵۷۵۴۶/۱	-	-	۱۰۰	۵۰	۵	۰۹	
-	۴۳۷	۸۸۰۸۵/۶	-	-	۱۰۰	۵۰	۱۰	۱۰	

جدول(۷): بررسی کیفیت کران پایین محاسبه شده برای نمونه مسائل با ابعاد کوچک

انحراف (٪)	کران پایین	تعداد خرده‌فروش‌ها	تعداد مراکز توزیع فرعی بالقوه	تعداد مرکز توزیع اصلی	شماره مسئله
۶/۴۹	۱۶۹۴/۶	۴	۲	۱	۰۱
۶/۳۷	۲۴۳۴/۳	۶	۳	۱	۰۲
۶/۱۶	۲۵۷۱/۸	۶	۴	۲	۰۳
۶/۹۴	۳۰۱۹/۲	۱۰	۴	۲	۰٤
۶/۹۶	**میانگین درصد انحراف**				

جدول (۸) : کران خطای محاسبه شده به منظور ارزیابی کیفیت جواب‌های الگوریتم ابتکاری

کران خطا (٪)	کران پایین		تعداد خرده‌فروش‌ها	تعداد مراکز توزیع فرعی بالقوه	تعداد مرکز توزیع اصلی	شماره مسئله
	زمان حل (ثانیه)	مقدار				
۷۵/۶	۳۰۸۲	۳۵۶۳	۲۰	۶	۲	۰۵
۶/۹۷	۳۱۵۵	۵۵۳۳	۲۰	۶	۳	۰٦
۶/۳۴	۳۰۵۴۱	۱۷۸۰۹	۵۰	۲۵	۵	۰۷
۶/۸۲	۱۸۲۳۳۲	۱۷۴۷۳	۱۰۰	۲۵	۵	۰۸
۶/۹۲	۲۰۰۰۱۲	۵۴۱۴۰	۱۰۰	۵۰	۵	۰۹
۶/۳۲	۲۰۶۵۷۹	۸۲۹۱۹	۱۰۰	۵۰	۱۰	۱۰
۶/۶۴	**میانگین درصد کران خطا**					

۴-۲- مقایسه الگوریتم پیشنهادی با روش حل دقیق

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، مدل ارائه‌شده در بخش ۲ با تولید ۱۰ مسئله نمونه به طور بهینه از طریق نرم‌افزار Lingo و هم چنین از طریق روش ابتکاری پیشنهادی حل شده‌است. از نتایج جدول(۶) نتیجه گرفته می‌شود که در نمونه مسائل ۰۱ تا ۰۴، میانگین جواب‌های به‌دست‌آمده از روش ابتکاری، بهینه یا نزدیک به بهینه و میانگین زمان حل توسط این الگوریتم، مساوی یا کمتر از ۱۱ ثانیه است، در حالی که برای روش حل دقیق، بیشترین زمان حل (برای مسئله ۰۴)، ۳۱۴۸۵ ثانیه است. برای نمونه مسائل ۰۵ تا ۱۰، نرم‌افزار Lingo نمی‌تواند به یک جواب بهینه در زمانی قابل قبول دست پیدا کند و با توجه به ستون Gap در جدول (۶) که نشان دهنده درصد اختلاف جواب‌های الگوریتم ابتکاری و بهترین جواب به‌دست‌آمده از روش حل دقیق است، می‌توان دید که جواب‌های روش ابتکاری برای این نوع مسائل به طور معناداری بهتر از بهترین جواب به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Lingo است.

همچنین با مشاهده میانگین زمان حل برای نمونه مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ می‌توان دید که این الگوریتم برای هر دسته از نمونه مسائل تولیدشده در یک زمان قابل قبول (به طور مثال برای مسائل با ابعاد بزرگ در زمانی کمتر از ۸ دقیقه) به جواب می‌رسد.

۴-۳- محاسبه کران خطا

در این بخش، روش ابتکاری این مقاله از طریق محاسبه کران خطا برای جواب‌های به‌دست‌آمده برای نمونه مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ توسط این روش، ارزیابی می‌شود. به منظور ارزیابی کیفیت کران پایین به‌دست‌آمده از مدل معرفی‌شده در بخش ۳-۶، نتایج جدول(۷) نشان می‌دهد که وقتی تعداد خرده‌فروش‌ها افزایش می‌یابد، درصد انحراف به طور ملایمی کاهش پیدا می‌کند. میانگین درصد انحراف در این قسمت ۶/۹۶ درصد است.

بعد از بررسی کیفیت کران پایین برای نمونه مسائل کوچک، کران خطای مربوط به هر نمونه مسئله بر اساس کران پایین پیشنهادی، برای ابعاد متوسط و بزرگ محاسبه می‌شود. نتایج در جدول(۸) نشان داده شده‌است که می‌توان دید میانگین کران خطا ۶/۶۴ درصد است که از میانگین درصد انحراف (۶/۹۶ درصد)، کمتر است. هم‌چنین این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد خرده‌فروش‌ها، درصد کران خطا کاهش می‌یابد. رفتار روش ابتکاری پیشنهادی این مقاله، تحت پارامترهای مختلف مسئله پایدار است که نشان می‌دهد کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده از این الگوریتم، مناسب است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، حالت خاصی از مسایل لجستیک یکپارچه یعنی مسئله مکان‌یابی– مسیریابی– موجودی،بررسی شد. تا به حال، مطالعات گوناگونی در زمینه هماهنگی دو تا از سه مسئله فوق شامل مسائل مسیریابی– موجودی، مکان‌یابی– مسیریابی و مسائل موجودی–مکان‌یابی انجام شده‌ولی مطالعات زیادی در حوزه بررسی یکپارچه و همزمان سه مسئله مکان یابی، مسیریابی و کنترل موجودی انجام نشده‌است. طراحی یک شبکه توزیع که شامل سه زیر مسئله مکان یابی- تخصیص، مسیریابی وسایل حمل ونقل و مسئله کنترل موجودی‌هاست، می‌تواند اهداف متنوع یک زنجیره تأمین از هزینه پایین تا قدرت پاسخگویی بالا را برآورده کرده و باعث سودآوری و بهره‌وری آن شود.این نوع مسئله به دلیل در نظر گرفتن وابستگی‌های میان مکان توزیع‌کننده‌ها، نحوه تخصیص خرده‌فروش‌ها، ساختار مسیرها، نوع سیاست کنترل موجودی و حل هم‌زمان مسئله، مانع بهینه‌سازی محلی تصمیمات مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی می‌شود.

در مدلی که احمدی‌جاوید و همکاران (۲۰۱۰) برای بهینه‌سازی هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی– تخصیص، موجودی و مسیریابی در یک سیستم زنجیره تأمین احتمالی ارائه کرده‌اند، خط مشی کنترل موجودی تنها برای مراکز توزیع لحاظ شده‌است و از نوع مقدار سفارش ثابت و بدین صورت است که وقتی سطح موجودی مراکز توزیع به نقطه سفارش مجدد رسید، یک مقدار ثابت به مرکز توزیع اصلی سفارش داده می‌شود. در این مقاله، برای اولین باریک مدل یکپارچه مکان‌یابی– مسیریابی– موجودی توسعه داده شد که در آن خط مشی کنترل موجودی برای خرده‌فروش‌هایی با تقاضایقطعی و معین تعیین و به صورت دوره زمانی ثابت تدارک مجدد موجودی و یکسان برای خرده‌فروش‌هایی که در یک مسیر قرار می‌گیرند، در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله، نشان داده شده‌است که می‌توان این مسئله را به صورت یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط فرموله کرد. همچنین با توجه به NP-Hard بودن مدل، یک الگوریتم ابتکاری دو مرحله‌ای بر پایه شبیه‌سازی تبرید ارائهشد که در این روش در مرحله اول، ابتدا با استفاده از الگوریتمی یک جواب اولیه ایجاد و در مرحله بعدی به ترتیب در دو فاز مسیریابی و کنترل موجودی، بهبود جواب انجام می‌شود. سپس برای بررسی کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده از این الگوریتم ابتکاری روشی برای کران پایین و محاسبه کران خطا پیشنهاد شد و در نهایت، نتایج محاسباتی نشان داد که الگوریتم ابتکاری پیشنهادی، یک الگوریتم کارا و سریع برای حل مسائل با ابعاد مختلف است.

زمینه‌های تحقیقاتی آینده، یکی در حوزه توسعه مدل شامل مواردی نظیر در نظر گرفتن فاکتورهایی که به علت محدودیت‌های مدل پیشنهادی این مقاله نادیده گرفته شده‌است مانند ناوگان وسائل نقلیه متفاوت، چند محصولی بودن مدل، محدودیت پنجره زمانی تحویل، مجاز بودن کمبود موجودی در مراکز توزیع یا خرده‌فروشی‌ها، مجاز بودن تحویل جداگانه و یااضافه کردن متغیرهای تصمیم جدید به مسأله مثل برنامه‌ریزی خرید مواد اولیه، برنامه‌ریزی تولید محصول یا در نظر گرفتن تعداد وسائل نقلیه به عنوان متغیر تصمیم و غیره و دیگری در حوزه توسعه روش حل مدل جدید پیشنهادی با ارائهروش‌های حل ابتکاری یا فراابتکاری جدید برای مقایسه با الگوریتم پیشنهادی این مقاله از نظر زمان حل و کیفیت جواب تابع هدف می‌تواند باشد.

ضمیمه

توسعه روش پیشنهادی جستجوی همسایگی به شیوه جایگذاری (Insertion) توسط ژائو و همکارانبرای فاز کنترل موجودی:

۱- انتخاب m تا مرکز توزیع جریی به صورت تصادفی (m عدد تصادفی یکنواخت از فاصله$u\left[1, \left[\frac{N}{4}\right]\right]$، N تعداد مراکز توزیع جزیی)

۲- برای هر مرکز توزیع انتخابی، انتخاب c تا مسیر به صورت تصادفی (c عدد تصادفی یکنواخت از فاصله $u\left[1, \left[\frac{V}{4}\right]\right]$ و V تعداد مسیرهای مرکز توزیع i)

۳- z_v (مثبت یا منفی) را از فاصله $u[-2, 2]$ به طور تصادفی به صورت عدد صحیح تولید کرده و به T_r مسیرهای انتخابی اضافه کنید به شرطی که از حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه و یا حداکثر ظرفیت مرکز توزیع مربوطه تخطی نکند. (توضیح: اگر T_r جدید صفر یا منفی شد عدد تصادفی جدید تولید می‌شود).

منابع و مآخذ

الف) منابع و مآخذ فارسی

۱. ذگردی، سیدحسام الدین و نیک بخش، احسان (۱۳۸۸). "حل ابتکاری و کرانه‌پایینبرای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوره‌ای". نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید. **۲۰** (۱): ۱۶-۳۴.

۲. محمدی زنجیرانی، داریوش، و اسعدی آقاجری، مجید (۱۳۸۸). "طراحی الگوی ریاضی مسیریابی موجودی‌ها در زنجیره تأمین با بررسی موردی در شرکت دونار خزر". مدیریت صنعتی. **۱**(۳): ۱۱۹-۱۳۶.

ب) منابع و مآخذ لاتین

1. Ahmadi Javid, A., Azad, N. (2010). "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design" Transportation Research Part E 46: 582-597.

2. Albareda-Sambola, M., Fernández, E., Laporte, G., (2007). "Heuristics and Lower Bound for a Stochastic Location-Routing Problem", European Journal of Operational Research, 179: 940-955.

3. Alumur, S., Kara, B.Y., (2007). "A New Model for the Hazardous Waste Location-Routing Problem", Computers& Operations Research, 34(5): 1406-1423.

4. Birger R., El-Houssaine A., (2009). "A practical solution approach for the cyclic inventory routing problem" European Journal of Operational Research 192: 429–441.

5. Bruno, G., Ghiani, G., Improta, G., (1998). "A Multi-Modal Approach to the ocation of a Rapid Transit Line", European Journal of Operational Research, 104: 321-332.

6. Cappanera, P., Galloa, G., Maffioli, F., (2004). "Discrete Facility Location and Routing of Obnoxious Activities", Discrete Applied Mathematics, 133: 3-28.

7. Chan, Y., Carter, W.B., Burnes, M.D., (2001). "A Multiple- Depot, Multiple-Vehicle, Location-Routing Problem with Stochastically Processed Demands", Computers &Operations Research, 23: 803-826.

8. Ghiani, G., Improta, G., (2000). "An Efficient Transformation of the Generalized Vehicle Routing Problem", European Journal of Operational Research, 122: 11-17.

9. Henderson, D., Jacobson, S.H., Johnson, A.W., (2003). The Theory and Practice of Simulated Annealing, In Handbook of Meta heuristics, Kluwer: New York, NY.

10.Lashine, S.H., Fattouh, M., Issa, A., (2006). "Location/Allocation and Routing Decisions in Supply Chain Network Design", Journal of Modelling in Management, 1(6): 173-183.

11.Leandro C. Coelho, Jean-Franc-ois Cordeau,GilbertLaporte. (2012).“The inventory-routing problem with transshipment”. Computers & Operations Research. 32: 433-460.
12.Lin, C.K.Y., Chow, C.K., Chen, A., (2002). “A Location- Routing-Loading Problem for Bill Delivery Services”, Computers & Industrial Engineering, 43: 5-25.
13.Luca B., Adamo B., Francesca G., Demetrio L., (2011).”A stochastic inventory routing problem with stock-out”, Transportation Research Part C, 21: 44-59.
14.Nagy, G., Salhi, S., (2007). “Location-Routing: Issues, Models and Methods”, European Journal of Operational Research,Vol. 177(2): 649-672.
15.Özyurt, Z., Aksen, D., (2007). Solving the Multi-Depot Location-Routing Problem with Lagrangian Relaxation, in Extending the Horizons: Advances in Computing, Optimization, and Decision Technologies, Springer: New York, NY.
16.Shen, Z., Qi, L., (2007). ”Incorporating inventory and routing cost in strategic location models”,European Journal of Operational Research 179: 372-389.
17.Sheng-Yuan S., Masakazu H., (2007). “Incorporating lateral transfers of vehicles and inventory into an integrated replenishment and routing plan for a three-echelon supply chain”. Computers & Industrial Engineering 56: 754–775.
18.Shu-Chu L., Jyun-Ruei C., (2011). “A heuristic method for the inventory routing and pricing problem in a supply chain”. Expert Systems with Applications 38: 1447-1456.
1. Spall, J., (2004). Introduction to Stochastic Search and Optimization,John Wiley & Sons, New Jersey.
19.Tuzun, D., Burke, L. I., (1999). “A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem”, European Journal of Operational Research, 116: 87-99.
20.Wasner, M., Zäpfel, G., (2004). “An Integrated Multi-Depot Hub-Location Vehicle Routing Model for Network Planning of Parcel Service”, International Journal of Production Economics, 90: 403-419.
21.Wu, T.H., Low, C., Bai, J.W., (2002). “Heuristic Solutions to Multi-Depot Location-Routing Problems”,Computers &Operations Research, 29: 1393-1415.
22.Yugang Y., Haoxun C., Feng C., (2007). “A new model and hybrid approach for large scaleinventory routing problems”, European Journal of Operational Research 189: 1022-1040.