

ارائه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای مسئله‌ی مسیریابی - موجودی چنددوره‌یی - چندمحصولی همراه با شکست تقاضا و حمل در بازگشت

محسن فوقانی (دانش‌آموخته‌ی دکتری)

محمدعلی وحدت‌زاد* (دانشیار)

احمد صادقیه (استاد)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۸ (دوره ۱-۳۵، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۱-۱۲۵)

این مقاله در قالب یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی، یک ترکیب عملیاتی از مسئله‌ی مسیریابی - موجودی چنددوره‌یی کلاسیک را بسط داده است و شامل یک مسئله چندمحصولی، همراه با ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه است که کمبود موجودی مجاز نیست و توسط دو ویژگی بسیار مهم و کاربردی مسائل مسیریابی، یعنی «حمل در بازگشت» همراه با اولویت مشتریان خط رفت و «راهدرد ارسال شکسته» که امکان خدمت‌دهی به هر مشتری توسط حداقل یک وسیله‌ی نقلیه را فراهم می‌کند، ترکیب شده است. نخست یک مدل ریاضی جدید برای مسئله‌ی مورد نظر ارائه شده است. این مسئله از نوع چندجمله‌یی نامعین سخت (NP-hard) است؛ با توجه به پژوهش‌های پیشین مسائل مسیریابی - موجودی، برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سازی خفاش که عملکرد آن توسط یک الگوریتم ژنتیک کارا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، برای حل مدل توسعه داده شده است. در پایان به تحلیل نتایج عددی حاصل از این الگوریتم برای مسائل آزمون، پرداخته می‌شود.

forghani_mink@yahoo.com
mvahdat@yazd.ac.ir
sadeqheih@yazd.ac.ir

واژگان کلیدی: مسیریابی - موجودی، حمل در بازگشت، تقسیم تقاضا، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، الگوریتم ژنتیک، چندمحصولی.

۱. مقدمه

زنجیره‌ی تأمین به عنوان یک ساختار یکپارچه، تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد از مرحله‌ی تهیه‌ی ماده‌ی اولیه تا مرحله‌ی تحویل محصول به مصرف‌کننده را شامل می‌شود. شبکه‌ی توزیع به عنوان یکی از عوامل اصلی ایجاد هزینه در زنجیره‌ی تأمین، عملکرد زنجیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد و شرکت‌ها و سازمان‌ها سال‌هاست که به اهمیت یکپارچه‌سازی و هماهنگی بین فعالیت‌های انجام شده در یک زنجیره و مدیریت کارآمد فرایندهای آن پی برده‌اند. یکی از انواع هماهنگی بین اجزای زنجیره، هماهنگی موجودی و مسیریابی در سیستم‌های توزیع است.

مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI)^۱ یکی از به‌روزترین نمونه‌ها در ایجاد ارزش افزوده از طریق خدمات لجستیک است و به عنوان یک سیاست برد - برد برای تأمین‌کننده و مشتری، مشتریان را از سرمایه‌گذاری بالا در موجودی و پیچیدگی کنترل موجودی رها می‌سازد.^[۱] فروشنده با ایجاد یک سیستم VMI، با یک مسئله‌ی مسیریابی - موجودی (IRP)^۲ مواجه می‌شود که به دنبال هماهنگی و یکپارچه‌سازی دو جزء کلیدی زنجیره یعنی مدیریت موجودی و مسئله‌ی مسیریابی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۷/۴/۹، پذیرش ۱۳۹۷/۵/۳۰

DOI:10.24200/J65.2018.7259.1779

تولیدکننده به توزیع‌کننده^[۴] اشاره کرد و در خصوص مروری بر پیشینه مسائل مسیریابی با حمل در بازگشت می‌توان به کار جوزی برانداو^[۵] و کاوج و لاپرته^[۶] رجوع کرد.

در ادامه یکی دیگر از ویژگی‌های کاربردی مسائل مسیریابی یعنی «شکست تقاضا»^۴ به مسئله اضافه شده و منجر به ایجاد مسئله‌ی جدیدی بنام IRPBSD^۵ می‌شود که تاکنون در پیشینه‌ی مسائل IRP چنین ترکیب عملیاتی مشاهده نشده است. شکست تقاضا باعث استفاده‌ی بهینه از ظرفیت باقی‌مانده‌ی وسایل نقلیه می‌شود و ضمن افزایش پیچیدگی مسئله، استفاده از وسایل نقلیه‌ی کمتر و کاهش مسافت طی‌شده توسط ناوگان حمل را امکان‌پذیر می‌سازد و در کاهش هزینه‌های سیستم مؤثر است. این موضوع فرض پایه‌ی مسئله‌ی مسیریابی را، که هر مشتری حداکثر توسط یک وسیله‌ی نقلیه باید خدمت‌دهی شود، نقض می‌کند. از موارد کاربرد آن می‌توان به موضوع دفع زباله‌های مراکز درمانی - تجاری، توزیع روزنامه از چاپ‌خانه به نمایندگان فروش در کره‌ی جنوبی و غیره اشاره کرد.^[۷] از طرفی بیشتر مقالات مدل خود را به صورت تک‌محصولی ارائه می‌کنند یا اگر به صورت چندمحصولی مطرح شده باشد، به دلیل پیچیدگی زیاد مسئله و افزایش ابعاد آن، مفروضات تسهیل‌کننده به آن اضافه می‌شود و به نوعی دوباره مسئله به حالت تک‌محصولی تبدیل می‌شود.^[۸] این مقاله مسئله‌ی مسیریابی - موجودی با حمل در بازگشت (اولویت خدمت‌دهی با مشتریان خط رفت) و شکست تقاضا را در حالت چند - دوره‌ی، چند - محصولی، چند - وسیله‌ی (MMIRPBSD)^۶ و با هدف کمیته‌سازی مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل (هزینه‌های ثابت استفاده از ناوگان و هزینه‌ی متغیر مسیریابی) و نگهداری موجودی را بررسی می‌کند. زنجیره‌ی تأمین، شامل یک شبکه‌ی توزیع دوسطحی متشکل از یک توزیع‌کننده و مجموعه‌ی مشتریان (خرده‌فروشان) است. در هر دوره مقدار مشخصی از هر یک از محصولات با استفاده از ناوگان نا همگنی از وسایل نقلیه با ظرفیت محدود ولی متفاوت از یکدیگر بین مشتریان توزیع یا دریافت می‌شود. برای هر مشتری در هر دوره یک هزینه‌ی نگهداری موجودی در نظر گرفته می‌شود و هر مشتری یک ظرفیت نگهداری مشخصی دارد. فرض می‌شود که تأمین‌کننده، موجودی کافی برای برآورده کردن تقاضا در طول افق برنامه‌ریزی در اختیار دارد و کمبود و پس‌افت^۷ مجاز نیست. در ابتدای دوره‌ی افق زمانی، تصمیم‌گیرنده از سطح موجودی فعلی تأمین‌کنندگان و مشتریان باخبر است و اطلاعات مربوط به تقاضای هر مشتری در هر دوره‌ی زمانی t را در اختیار دارد. وسایل نقلیه، از قرارگاه مرکزی حرکت و بعد از ملاقات یک یا چند مشتری به قرارگاه باز می‌گردند.

مسئله‌ی مسیریابی - موجودی شامل مسئله‌ی VRP به‌عنوان یک زیربخش است و با توجه به کار لِنسترا و رینوی کان در سال ۱۹۸۱ که NP-hard بودن مسئله VRP را اثبات کردند،^[۹] IRP نیز قویاً یک مسئله‌ی NP-hard است و مسئله‌ی MMIRPBSD تعریف شده در این مقاله از نوع چندجمله‌ی نامعین سخت است. در نتیجه راه حل بهینه برای بیشتر مسائل IRP به دلیل پیچیدگی مسئله، احتمالاً در دسترس نیست و حل مسئله‌ی مذکور با استفاده از روش‌های حل دقیق به‌ویژه برای مسائل با ابعاد بزرگ، در زمان محاسباتی معقول امکان‌پذیر نیست و باید از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده کرد. این مقاله در حوزه‌ی روش حل، برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سازی خفاش را که کارآمدی آن نسبت به سایر روش‌های فراابتکاری توسط محققان ثابت شده است، پیشنهاد می‌کند. سپس نتایج حاصل از این الگوریتم با نتایج حل مدل با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک کارا مقایسه می‌شود.

ساختار ارائه‌ی مطالب بدین‌صورت خواهد بود که پس از مقدمه‌ی ارائه شده در

این بخش، در بخش دوم، به مطالعه‌ی تحقیقات پیشین پرداخته می‌شود، در بخش سوم مدل ریاضی مسئله که متشکل از یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است، ارائه خواهد شد. در بخش چهارم ساختار الگوریتم حل پیشنهادی تشریح می‌شود و بخش پنجم به بیان نتایج محاسباتی اختصاص یافته است. سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. پیشینه‌ی تحقیق

معرفی مسئله‌ی مسیریابی - موجودی به ابتدای دهه‌ی هشتاد میلادی برمی‌گردد. بل و همکاران اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۸۳ مسئله‌ی مسیریابی - موجودی را مدل و بررسی کردند. چاین و همکاران مسئله‌ی مسیریابی - موجودی تک‌دوره‌ی را مدل‌سازی کردند. در این مسئله، با انتقال اطلاعات پیمان هر دوره به دوره‌ی بعد، یک مدل برنامه‌ریزی چنددوره‌ی شبیه‌سازی می‌شود.^[۱۱] در بخش مسائل چنددوره‌ی با تقاضای احتمالی می‌توان به کار کلیوگت و همکاران^[۱۲] و همچنین آدلن^[۱۳] اشاره کرد. برتازی و همکاران سیاست کنترل موجودی بازسازی قطعی را برای مسئله‌ی مسیریابی موجودی با تقاضای پویا و قطعی در نظر گرفتند و یک روش ابتکاری دومرحله‌ی برای حل آن ارائه دادند.^[۱۵] از جمله کاربردهای مسائل مسیریابی - موجودی، توزیع میعانات گاز طبیعی و مسئله‌ی حمل‌ونقل دریایی،^[۱۶] توزیع مواد اولیه‌ی صنعت کاغذ،^[۱۷] توزیع مواد غذایی در زنجیره‌ی سوپرمارکت‌ها^[۱۸] را می‌توان نام برد. در سال‌های گذشته محققان دسته‌بندی‌های مختلفی برای مسائل IRP بیان کرده‌اند. برای مثال: پایتا و همکاران یک دسته‌بندی شامل هفت عامل را معرفی کردند که عبارت‌اند از: ۱. توپولوژی (شبکه‌ی توزیع یک به چند، چند به یک و یک به یک)، ۲. تعداد گزینه‌ها، ۳. نوع تقاضا، ۴. دامنه‌ی تصمیم‌گیری‌ها (زمان و بسامد)، ۵. محدودیت‌ها، ۶. هزینه‌ها و ۷. روش حل.^[۱۹] کلیوگت و همکاران چهار عنصر کلیدی را مدنظر قرار داده‌اند که شامل: ۱. نوع تقاضا، ۲. اندازه‌ی ناوگان حمل‌ونقل، ۳. افق برنامه‌ریزی و ۴. نوع تحویل است.^[۲۰] کوتلیو و همکاران با توجه به تمام مطالعاتی که تا آن زمان انجام شده بود، یک دسته‌بندی استاندارد را برای مسائل مسیریابی - موجودی مطرح کردند. در ابتدا یک دسته‌بندی هفت عاملی برای مسائل پایه‌ی IRP ارائه داده‌اند که شامل: ۱. افق برنامه‌ریزی، ۲. توپولوژی یا ساختار مسئله، ۳. نوع مسیریابی، ۴. نوع سیاست موجودی، ۵. تصمیمات مربوط به موجودی (سفارش‌های به تعویق افتاده،^۸ فروش از دست‌رفته^۹ و موجودی غیرمنفی)، ۶. نوع ناوگان و ۷. اندازه‌ی ناوگان است؛ سپس مسائل توسعه داده شده از مسائل کلاسیک مسیریابی - موجودی را معرفی کرده‌اند (شامل تولید - مسیریابی - موجودی، مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی، مسائل چندمحصولی) و در نهایت مسائل IRP را از لحاظ نوع تقاضا (قطعی یا احتمالی) تقسیم‌بندی کردند.^[۲۱]

آرکتی و همکاران، مسئله‌ی مسیریابی موجودی تک‌محصولی، تک‌وسایله‌ی را بررسی کردند. در این مسئله تقاضا پویا و سیاست موجودی، سفارش تا حد معین^{۱۰} است و از روش شاخه‌وبرش برای حل آن استفاده شده است.^[۲۲] از دیگر کاربردهای روش‌های دقیق برای این دست از مسائل می‌توان به روش شاخه - قیمت - برش دیسولنیز و همکاران^[۲۳] و شاخه - برش در کار سولیلی و همکارش^[۲۴] و کار لیفور و همکارانش که از سیاست موجودی بیشینه‌ی سطح موجودی^{۱۱} و گزینشی انتقال که امکان جابه‌جایی کالا بین دو تأمین‌کننده یا دو خرده‌فروش امکان‌پذیر است، اشاره کرد.^[۲۵] در خصوص الگوریتم‌های ابتکاری برای مسئله‌ی تک‌محصولی، تک‌وسایله‌ی می‌توان الگوریتم ابتکاری ترکیبی آرکتی و همکاران^[۲۶] و الگوریتم

ارسال‌ها از نوع شکسته بود، ارائه کردند.^[۴۵] یو و همکاران مدل قبلی خود را در سال ۲۰۱۲ در حالت تقاضای احتمالی توسعه دادند و از دیدگاه رویکرد حل و غیرخطی بودن تابع هدف و بعضی از محدودیت‌ها مانند سطح خدمت دهی، این کار متفاوت از کار قبلی آن‌ها بود.^[۴۶]

از جمله کاربردهای روش‌های فراابتکاری برای مسائل مسیریابی - موجودی به روش بهینه‌سازی کلونی مورچه می‌توان به کار هووانگ و لین برای یک مسئله تک‌محصولی با ناوگان ناهمگن محدود و مجاز بودن کمبود موجودی،^[۴۷] روش جستجوی ممنوع به همراه روش آزادسازی لاگرانژ برای ایجاد کران پایین در کار لی و همکاران،^[۴۸] الگوریتم‌های فراابتکاری تبرید شبیه‌سازی شده و جستجوی ممنوع در کار میرزایی و سیفی^[۴۹] و الگوریتم ازدحام ذرات در کار لیو و همکاران^[۵۰] اشاره کرد. در خصوص الگوریتم ژنتیک می‌توان کار ربانی و همکاران که ترکیبی از ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات است استفاده کرده‌اند،^[۵۱] کار پارک و همکاران که از الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله تک‌محصولی و مجاز بودن کمبود و ناوگان همگن محدود از وسایل نقلیه در یک زنجیره‌ی دوسطحی به کارگرفته‌اند،^[۵۲] و همچنین کار آزاده و همکاران که در کنار الگوریتم ژنتیک از طراحی آزمایش‌های تاکوچی برای محاسبه‌ی مقادیر پارامترها بهره برده‌اند،^[۵۳] نام برد. الگوریتم خفاش یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت است که ایده‌ی اولیه‌ی آن توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ مطرح شد و در سال ۲۰۱۰ گسترش یافت که نشان از کاربرد زیاد آن در مسائل مختلف بهینه‌سازی دارد.^[۵۴] این روش در حوزه‌های مختلف بهینه‌سازی مورد استقبال زیادی قرار گرفته است و می‌توان به مواردی نظیر بهینه‌سازی جایگشت مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی،^[۵۵] برنامه‌ریزی صحیح جلسات آموزشی ورزشی،^[۵۶] و مسئله‌ی برآورد قیمت (مورد مطالعه فلز مس)^[۵۷] اشاره کرد. در حوزه‌ی مسائل مسیریابی برای اولین بار در سال ۲۰۱۶ اوسابا و همکارانش الگوریتم خفاش را برای مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، در حالت تقارن و عدم تقارن شبکه‌ی توزیع به کار بردند و برای مسائل آزمون مورد نظر، نتایج حاصل از این الگوریتم نشان از کارآمدی آن نسبت به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، و الگوریتم کرم شب‌تاب داشته است.^[۵۸] پس از آن جایی که کارآمدی این الگوریتم در مسائل مشابه توسط محققان ثابت شده است و دربرگیرنده‌ی مزیت‌های سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت موجود است، در این مقاله از این روش استفاده شده است.

۳. مدل ریاضی

با توجه به پیشینه‌ی موضوع و توضیحات بخش اول، این مقاله مسئله‌ی MMIRPBSD همراه با افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ی، با راهبرد توزیع ارسال در طی مسیر را بررسی می‌کند؛ در ضمن تقاضای مشتریان در هر دوره متغیر ولی مشخص است. ظرفیت تأمین‌کننده نامحدود و ظرفیت انبار مشتری محدود در نظر گرفته شده است. با توجه به این فرضیات، مدل ریاضی مسئله در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به شرح زیر است.

۱.۳. نمادگذاری

V : تعداد کل مشتریان؛ $V = \{1, 2, \dots, m, m+1, m+2, \dots, m+n\}$ ؛
 m : اندیس گره تقاضای مشتریان خط رفت $L = \{1, 2, \dots, m\}$ ؛
 n : اندیس گره مشتریان خط برگشت $B = \{m+1, \dots, m+n\}$ ؛
 $i, j, s, r \in V$ (مشتریان) $i, j, s, r \in V$ و همچنین گره o و

فراابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی^[۱۲] کوتلیو و همکاران^[۲۷] را نام برد. در مورد مسائل مسیریابی - موجودی چندوسیله‌ی می‌توان به کار کوتلیو و همکاران^[۲۸] و آدولیزاک و همکاران^[۲۹] اشاره کرد. آن‌ها برای حل مسئله‌ی خود از روش دقیق شاخه و برش استفاده کردند. عبدالمجید یک الگوریتم ابتکاری سازنده را مطرح کرد^[۳۰] و به منظور بهبود کیفیت جواب‌های به دست آمده از این روش ابتکاری، وی و همکارش دسوکی الگوریتم ژنتیک را برای این مسائل به کار بردند.^[۳۱] کوتلیو و همکاران از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی که با روش دقیق برنامه‌ریزی خطی عددصالح مختلط ترکیب شده است، برای مسئله‌ی مسیریابی - موجودی چندوسیله‌ی استفاده کردند.^[۳۲] سانتوز و همکاران یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی مبتنی بر جستجوی محلی تکرارشونده را برای این مسائل پیشنهاد دادند.^[۳۳] همچنین دبیری و همکاران مسئله‌ی تک‌محصولی - چندوسیله‌ی را در حالت دوهدفه مطرح کردند و برای حل آن از روش محدودیت اسپیلون و الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه استفاده کردند.^[۳۴]

در خصوص مسئله‌ی مسیریابی - موجودی چندمحصولی چندین مطالعه انجام شده و برای حل از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است. برای مثال معین و همکاران از یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی کارا^[۳۵] استفاده کردند و مجیردا و همکاران یک جستجوی دو مرحله‌ی برای مسائل مسیریابی - موجودی چنددوره‌ی - چند کالاوی و توپولوژی چند به یک، متشکل از دو الگوریتم نزول همسایگی^[۱۳] و جستجوی همسایگی متغیر^[۱۴] استفاده کرده‌اند.^[۳۶] پوپویک و همکاران در حوزه‌ی تحویل سوخت یک مسئله‌ی چندمحصولی را بررسی کردند و برای حل آن از روش فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر استفاده کردند.^[۳۷] همچنین فتاحی و پرند مسئله‌ی چندمحصولی را در حالتی که کمبود (حالت پس‌افت) مجاز است را مطرح و در خصوص موعد تحویل کالا به مشتریان از ویژگی پنجره‌ی زمانی نرم^[۱۵] استفاده کردند و برای حل آن یک الگوریتم ابتکاری سازنده پیشنهاد کردند و نتایج آن را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند.^[۳۸] آرکتی و همکاران مسئله‌ی مسیریابی - موجودی را در حالت برداشت و گذاشت^[۱۶] مدل‌سازی کردند و برای حل آن از روش شاخه و برش استفاده نمودند.^[۳۹]

برای اولین بار کوتلیو و لاپورته مسئله‌ی مسیریابی - موجودی چندمحصولی - چندوسیله‌ی را مطرح کردند^[۴۰] که با مطالعاتی که تاکنون مرور شد، متفاوت است. آن‌ها یک مدل ریاضی خطی عددصالح مختلط را برای آن ارائه و از روش دقیق شاخه و برش برای حل آن بهره بردند. کوردنو و همکاران مسئله‌ی فوق را بدون در نظر گرفتن داده‌های مربوط به تأمین‌کننده بررسی کردند و برای حل آن یک روش ابتکاری مبتنی بر تجزیه‌ی سه مرحله‌ی پیشنهاد دادند. نکته حائز اهمیت در این مقاله این است که موضوع چند محصولی بدین صورت تعریف شده است که هر مشتری برای هر محصول یک محل ذخیره‌ی خاص دارد و همه‌ی محصولات نمی‌توانند در یک جا ذخیره شوند. پس باز هم هر وسیله فقط یک نوع محصول را حمل خواهد کرد و تأمین‌کننده محدودیت ظرفیتی برای محصولات ندارد.^[۴۱] گومری و همکاران یک الگوریتم ابتکاری حریمانه^[۱۷] را برای مسائل چندمحصولی - چندوسیله‌ی مطرح کردند.^[۴۲]

مسئله‌ی تقسیم تقاضا برای اولین بار حدود سی سال پیش برای مسائل مسیریابی وسایل نقلیه معرفی شد و در سال ۲۰۰۸ مروری بر پژوهش‌های مسیریابی وسایل نقلیه با تقسیم تقاضا توسط آرکتی و همکاران صورت گرفت.^[۴۳] در حوزه‌ی مسائل مسیریابی - موجودی یو و همکاران یک مسئله‌ی IRP تک محصولی، با تقاضای احتمالی و ناوگان همگن وسایل نقلیه را در حالت تقسیم تقاضا مطرح کردند.^[۴۴] وی و همکارانش در سال ۲۰۰۸، همان مسئله را در حالتی که تقاضا قطعی و ایستا و

$m + n + 1$ بیان‌گر دپوی مرکزی هستند؛

t : اندیس دوره‌های زمانی $\{1, 2, \dots, t\}$ ؛

p : اندیس محصولات قابل توزیع $\{1, 2, \dots, p\}$ ؛

k : اندیس وسایل نقلیه $\{1, 2, \dots, k\}$.

$$I_{i,t-1}^p - \sum_{k=1}^K UB_{ikt}^p + DB_{it}^p = I_{it}^p; \forall i \in B; p \in Pt \in T \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^m G_{rikt}^p - \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{m+n+1} G_{sikt}^p = \sum_{k=1}^K UL_{ikt}^p$$

$$\forall i \in L; p \in P; t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{m+n+1} G_{sikt}^p - \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^{m+n} G_{rikt}^p = \sum_{k=1}^K UB_{ikt}^p$$

$$\forall i \in B; p \in P; t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^P I_{it}^p \leq WC_i; \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{p=1}^P G_{ijkt}^p \times w^p \leq Q_k \cdot x_{ijkt}; \quad i = m, \dots, m+n;$$

$$j = m+1, \dots, m+n+1; \quad \forall k \in K; t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^P G_{ijkt}^p \times w^p \leq (Q_k - \sum_{p=1}^P DL_{it}^p \cdot w^p) x_{ijkt};$$

$$i = 0, 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m \quad \forall k \in K; t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^P G_{ijkt}^p \times w^p \leq (Q_k - z_{ikt} \times \sum_{p=1}^P UL_{ikt}^p \times w^p);$$

$$i = 0, 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m \quad \forall k \in K; t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{p=1}^P G_{ijkt}^p \times w^p \geq (z_{jkt} \times (\sum_{p=1}^P UL_{ikt}^p \times w^p)) - M(1 - x_{ijkt});$$

$$i = 0, 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m \quad \forall k \in K; t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K z_{ikt} = 1; \quad i = 1, 2, \dots, m+n; \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m+n+1} z_{ikt} \times x_{ijkt} = 1; \quad i = 1, \dots, m+n; \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{m+n} x_{ijkt} \geq 0; \quad j = 1, \dots, m+n+1; \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{0jkt} \leq 1 \quad \forall k \in K; \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} x_{i,(m+n+1)kt} = \sum_{j=1}^m x_{0jkt} \quad \forall k \in K; \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{i=l+1}^{m+n} \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^K x_{ijkt} = 0; \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} x_{irkt} - \sum_{j=1}^{m+n+1} x_{rjkt} = 0;$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, m+n; k \in K; t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijkt} \leq |S| - 1;$$

$$\forall k \in K, S \subseteq \{1, 2, \dots, n+m\}, 2 \leq |S| \leq m+n-2 \quad (18)$$

۲.۳. پارامترهای مسئله

DL_{ip}^t : تقاضای مشتری i ام در خط رفت برای p ام محصول در دوره t از نظر وزنی ($i \in L$)؛

DB_{ip}^t : تقاضای مشتری i ام در خط برگشت برای p ام محصول در دوره t از نظر وزنی ($i \in B$)؛

WC_i : ظرفیت موجودی انبار مشتری i ام از نظر وزنی؛

d_{ij} : طول یال بین دو مشتری i و j به طوری که $i, j \in V$ ؛

HC_i^p : هزینه نگهداری محصول p ام توسط مشتری i ام؛

FC_k^t : هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه‌ی نوع k ام در دوره t ؛

VC_k^t : هزینه متغیر مسیریابی برای هر وسیله‌ی نقلیه‌ی نوع k ام در دوره t (به ازای هر واحد مسافت طی شده)؛

Q_k : ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ی k ام از نظر وزنی؛

w^p : وزن محصول p ام بر حسب واحد ظرفیت؛

M : یک عدد مثبت بسیار بزرگ.

۳.۳. متغیرهای تصمیم

UL_{ikt}^p : مقدار کالای نوع p ام تحویلی به مشتری i ام توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k ام در آغاز دوره t (خط رفت).

UB_{ik}^p : مقدار کالای نوع p ام در ابتدای دوره از مشتری i ام توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k ام در آغاز دوره t (خط برگشت).

G_{ijkt}^p : مقدار بار محصول p ام که توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k ام از مشتری i به j در دوره t جابه‌جا می‌شود.

I_{it}^p : مقدار موجودی محصول p ام نزد مشتری i ام در انتهای دوره t .

$$x_{ijkt} = \begin{cases} 1 & \text{اگر مشتری } j \text{ ام بعد از مشتری } i \text{ ام توسط} \\ & \text{ماشین } k \text{ ام در دوره } t \text{ خدمت‌دهی شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

z_{ikt} : کسری از تقاضای مشتری i ام که توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k ام در دوره t برآورده می‌شود.

۴.۳. فرمول‌بندی

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m+n} FC_k^t \cdot x_{0jkt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{p=1}^P HC_i^p \cdot I_{it}^p$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n+1} \sum_{k=1}^K d_{ij} \cdot VC_k^t \cdot x_{ijkt} \quad (1)$$

$$I_{i,t-1}^p - I_{it}^p + \sum_{k=1}^K UL_{ikt}^p = DL_{it}^p; \forall i \in L; p \in Pt \in T \quad (2)$$

۴. الگوریتم پیشنهادی

با توجه به ماهیت مسئله‌ی تعریف شده و پیشینه‌ی تحقیق در حوزه‌ی روش‌های حل مسائل مسیریابی - موجودی که در بخش ۲ مقاله تشریح شد، استفاده از روش‌های حل دقیق به خصوص برای مسائل با ابعاد بزرگ در زمان محاسباتی معقول امکان‌پذیر نیست. همچنین در سال‌های اخیر تمرکز بر روی روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری دوچندان شده است و در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش استفاده می‌شود و کارایی آن با الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌شود.

۴.۱. الگوریتم خفاش

امروزه گرایش به استفاده از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت و مبتنی بر هوش جمعی حیوانات، به خصوص در حوزه‌های بهینه‌سازی مورد استقبال زیادی قرار گرفته است. در الگوریتم خفاش ویژگی مکان‌یابی صوتی، خفاش‌ها را قادر می‌سازد تا بتوانند شکار خود را بیابند. آن‌ها با استفاده از تأخیر انعکاس و تشخیص بازتاب، اختلاف زمانی بین دو گوش و تغییر بلندی صوت بازتابی، می‌توانند یک فضای سه بعدی اطراف خود تصور کنند و فاصله و جهت هدف و حتی سرعت شکار خود را تشخیص دهند. منطق این الگوریتم به این صورت است که هر خفاش مجازی با یک سرعت برابر v_i به طور تصادفی پرواز می‌کند و مکان آن (p_i) جواب نهایی این الگوریتم است. یک خفاش در حین جستجوی خود برای یافتن شکار بلندی صدا (A_i) و نرخ انتشار پالس (r_i) را تغییر می‌دهد. همچنین جستجو توسط یک گام تصادفی تقویت می‌شود. انتخاب بهترین، تا زمانی که یکی از شرایط توقف برقرار شود، ادامه دارد. رفتار انعکاسی خفاش‌ها با فرض‌های زیر می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی مدل‌سازی شود: الف) خفاش‌ها به صورت تصادفی با سرعت v_i در موقعیت P_i با بسامد ثابت f_{min} و طول موج‌های λ مختلف و بلندی صوت A شکار خود را دنبال می‌کنند و می‌توانند به صورت خودکار طول موج و همچنین، نرخ پالس‌های ارسالی خود را $r_i \in [0, 1]$ با توجه نزدیکی به شکارشان تنظیم کنند. ب) اگرچه بلندی صوت می‌تواند در بسیاری از حالات متفاوت باشد، با این حال فرض می‌شود که این تغییرات از بیشترین مقدار A تا کمترین مقدارش به عنوان A_{min} محدود باشد. پس از دلایل مهم موفقیت الگوریتم خفاش نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. تنظیم بسامد (که می‌تواند برخی از قابلیت‌هایی را که ممکن است شبیه به قابلیت‌های کلیدی مورد استفاده در بهینه‌سازی انبوه ذرات و جستجوی هارمونی باشد، ایجاد کند)؛ ۲. زوم خودکار (که یک مزیت متمایزکننده نسبت به سایر الگوریتم‌هاست و توسط چندین مرحله‌ی خودکار، از حرکت اکتشافی تا جستجوی فشرده‌ی محلی انجام می‌شود و باعث می‌شود BA دارای نرخ هم‌گرایی سریع، حداقل در مراحل اولیه‌ی تکرار، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها باشد)؛ ۳. کنترل پارامتر (که برخلاف سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری که از پارامترهای ثابت به کمک پیش تنظیم پارامترهای وابسته به الگوریتم استفاده می‌کنند، این الگوریتم از پارامترهای کنترل (A, r) که مقادیر آن در تکرارهای مختلف، تغییر می‌کند، بهره می‌برد. [۶۰] در ادامه مراحل پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای مسئله‌ی مطرح شده تشریح می‌شود.

۴.۱.۱. نحوه‌ی نمایش جواب

نحوه‌ی نمایش جواب در مسائل مسیریابی به دلیل الزام در استفاده از یک توالی از اعداد مشخص، پیچیده است. در این مقاله به دلیل ماهیت مدل و همچنین

$$d_{0,m+n+1} = d_{m+n+1,0} = 0 \quad (19)$$

$$C_{0,m+n+1,k,t} = 0 \quad (20)$$

$$X_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$UL_{ikt}^P, UB_{ikt}^P, G_{ijkl}^P \geq 0 \quad (22)$$

$$I_{it}^P, z_{ikt} \geq 0 \quad (23)$$

رابطه‌ی ۱، تابع هدف مسئله است و بیان‌گر هزینه‌های ثابت استفاده از ناوگان حمل‌ونقل، هزینه‌های متغیر مسیریابی و هزینه‌های نگهداری موجودی پایان دوره در انبار مشتری است. محدودیت ۲، معادله‌ی بالانس موجودی شامل تقاضای مشتریان خط رفت، کالای تحویل داده شده به مشتریان در خط رفت و موجودی هر کالا در انتهای هر دوره برای هر مشتری است. محدودیت ۳، معادله‌ی تعادل موجودی برای خط برگشت و شامل تقاضای مشتریان خط برگشت، کالای دریافتی از آن‌ها و موجودی هر کالا در انتهای هر دوره برای مشتری مورد نظر است. محدودیت ۴، رابطه‌ی بین کالای تحویلی به مشتریان و مقدار کالای حمل‌شده از هر نوع، در مسیرهای رفت مسئله در هر دوره است. محدودیت ۵، رابطه‌ی تعادلی بین کالای دریافتی از مشتریان و مقدار کالای حمل‌شده از هر نوع، در مسیرهای برگشت مسئله در هر دوره است. محدودیت ۶ بیان‌گر حد مجاز ظرفیت هر مشتری برای نگهداری کالاهای مختلف است. محدودیت‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برای محدود کردن جریان کالای حمل‌شده توسط هر وسیله‌ی نقلیه است که به یک مشتری وارد می‌شود و از آن خارج می‌شود. در صورت وجود مسیری از یک مشتری به مشتری دیگر، طبق حدود مشخص شده جریان برقرار خواهد بود و در صورت عدم وجود مسیر (تور) توسط یک وسیله‌ی نقلیه بین دو مشتری، طبیعتاً جریانی هم برقرار نخواهد شد. محدودیت ۷ جریان کالا را برای مشتریان خط برگشت و محدودیت ۸، ۹ و ۱۰ جریان کالا را برای مشتریان خط رفت نشان می‌دهند. محدودیت ۱۱ بیان‌گر آن است که تمام تقاضای مشتریان طبق برنامه‌ریزی انجام شده در هر دوره، هم در خط رفت و هم در خط برگشت برآورده می‌شود. محدودیت ۱۲ که پس از خطی‌سازی به صورت دو محدودیت ۲۴ و ۲۵ در آمده است، تضمین می‌کند در صورتی تقاضای مشتری i برآورده می‌شود که حداقل یک وسیله‌ی نقلیه از آن‌جا عبور کند.

$$z_{ikt} \leq \sum_{j=0}^{m+n} x_{jikl}; i = 1, \dots, m+n; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{j=0}^{m+n} x_{jikl} \leq M \times z_{ikt} \quad (25)$$

$$i = 1, 2, \dots, m+n; \forall k \in K; \forall t \in T$$

محدودیت ۱۳ بیان‌گر آن است که تقاضای هر مشتری حداقل توسط یک وسیله‌ی نقلیه برآورده می‌شود. تضمین این‌که هر وسیله‌ی نقلیه (شروع هر تور) از دپوی مرکزی است و نهایتاً به دپو باز خواهد گشت و شروع تمام مسیرها از مشتریان رفت است، توسط محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ برآورده می‌شود. محدودیت ۱۶ بیان‌گر آن است که اولویت خدمت‌دهی با مشتریان خط رفت است. محدودیت ۱۷ پیوستگی مسیر را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۸ برای رفع زیرتور در مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه است. [۵۹] محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب بدان معنا هستند که ابتدا مسیری از دپو به دپو وجود ندارد. در ضمن هزینه‌ی جابه‌جایی از دپو به دپو هم صفر است. محدودیت‌های ۲۱ الی ۲۳ نیز نشان‌دهنده محدودیت‌های علامتی هستند.

نوع الگوریتم، نحوه‌ی نمایش جواب در قالب دو ماتریس موقعیت و توزیع انجام می‌شود.

ماتریس موقعیت: این ماتریس، بیان‌گر برنامه‌ی زمان‌بندی و توالی حرکت وسایل نقلیه بین مشتریان خط رفت و برگشت است و نشان می‌دهد که در هر دوره از چه وسیله‌ی نقلیه‌ی باید استفاده شود. ماتریس موقعیت یک ماتریس سه‌بعدی است که به تعداد وسایل نقلیه (k) سطر و به تعداد مشتریان خط رفت و برگشت ($m+n$) ستون دارد و به تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی (T) این ماتریس تکرار می‌شود (یعنی T تا ماتریس $(m+n) \times k^*$). درایه‌های این ماتریس «اولویت» بازدید مشتریان توسط هر وسیله‌ی نقلیه را نشان می‌دهد. به‌عنوان نمونه اگر مسئله شامل ۴ مشتری رفت و ۳ مشتری برگشت باشد و ماتریس موقعیت در دوره‌ی دوم طبق جدول ۱ باشد. سطر اول بیان‌گر آن است که در این دوره، وسیله‌ی اول، به ترتیب مشتری دوم و چهارم از خط رفت و سپس مشتری هفتم، پنجم و ششم از خط برگشت را به ترتیب خدمت‌دهی می‌کند و چنانچه از وسیله‌ی نقلیه‌ی استفاده نشود تمام درایه‌های آن سطر صفر است (مانند وسیله نقلیه‌ی سوم).

ماتریس توزیع: به دلیل چندمحصولی بودن مسئله، برای مشخص شدن این‌که در هر دوره چه مقدار از تقاضای هر مشتری (هم خط رفت و هم خط برگشت) برای انواع محصولات و توسط کدام یک از وسایل نقلیه برآورده خواهد شد، از ماتریس توزیع استفاده می‌شود. این ماتریس، برخلاف ماتریس موقعیت چهاربعدی است و از آن‌جایی که امکان ارسال شکسته بین مشتریان توسط وسایل نقلیه مختلف وجود دارد، به تعداد مشتریان رفت و برگشت ستون و به تعداد محصولات سطر دارد که به تعداد بعد سوم ماتریس یعنی وسایل نقلیه (k) و بعد چهارم آن یعنی تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی (T)، این ماتریس $p^*(m+n)$ تکرار می‌شود. نکته‌ی بسیار مهم آن‌که راهبرد تقسیم تقاضا در این مقاله بر اساس ظرفیت باقی‌مانده‌ی وسیله‌ی نقلیه است و بسته به میزان تقاضای هر مشتری می‌تواند توسط یک یا چند وسیله‌ی نقلیه خدمت‌رسانی شود. به‌عنوان نمونه با توجه به ماتریس موقعیت (جدول ۱)، چنانچه برای دوره‌ی دوم و خودروی اول، ماتریس توزیع به‌صورت جدول ۲ باشد، نشان‌دهنده‌ی آن‌است که هیچ کالایی توسط این ماشین به مشتری یک ارسال نمی‌شود؛ فقط ۲۸ واحد از محصول نوع اول و ۲۵ واحد از محصول نوع چهارم به مشتری شماره‌دوم تخصیص می‌یابد و به همین ترتیب برای سایر مشتریان با توجه به اولویتی که در ماتریس موقعیت تعیین شده است، انواع محصولات به

جدول ۱. نمایش ماتریس موقعیت.

ردیف	مشتری						
	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
وسیله							
ماشین ۱	۳	۵	۴	۲	۰	۱	۰
ماشین ۲	۰	۳	۰	۰	۰	۲	۱
ماشین ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳

جدول ۲. نمایش ماتریس موقعیت.

مشتری	دوره‌ی دوم، ماشین اول						
	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
کالا ۱	۹	۰	۱۲	۱۲	۰	۲۸	۰
کالا ۲	۱۰	۲۲	۱۵	۱۶	۰	۰	۰
کالا ۳	۱۹	۱۸	۰	۲۹	۰	۰	۰
کالا ۴	۰	۰	۰	۲۴	۰	۲۵	۰

مشتریان خط رفت تحویل و از مشتریان خط برگشت دریافت می‌شود.

۲.۱.۴. تولید جمعیت اولیه

در الگوریتم‌های فراابتکاری، طراحی روشی مؤثر برای تولید جواب‌های اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا کیفیت جواب‌های آغازین بر عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری تأثیر بسزایی دارد. در الگوریتم پیشنهادی برای تولید جواب اولیه، روشی شبه تصادفی طراحی شده است و گام‌های آن به شرح زیر است:

الف) یک توالی تصادفی از وسایل نقلیه و مشتریان خط رفت و برگشت در هر دوره به‌منظور ایجاد جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

ب) دو عنصر مهم زمان‌بندی ارسال برای هر مشتری و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه در تخصیص مشتری به یک وسیله‌ی نقلیه مؤثر است. از طرفی به دلیل امکان ارسال شکسته با توجه به ظرفیت باقی‌مانده وسیله‌ی نقلیه، تقاضای یک مشتری می‌تواند توسط بیش از یک وسیله‌ی نقلیه برآورده شود. با توجه به توالی تصادفی ایجاد شده گام نخست، ابتدا از وسیله‌ی نقلیه‌ی اول شروع می‌شود و مشتریان خط رفت با توجه به ظرفیت باقی‌مانده و رعایت اصول زمان‌بندی به‌ترتیب به آن وسیله تخصیص داده می‌شود تا ظرفیت خودرو تکمیل شود؛ چنانچه تقاضای یک مشتری به‌طورکامل برآورده نشود، باقی تقاضای آن به ماشین بعدی اختصاص می‌یابد. این روند در خصوص مشتریان خط برگشت برای خودروی انتخابی اعمال می‌شود. سپس به سراغ ماشین انتخابی بعدی می‌رود و روند تخصیص تقاضا برای مشتریان باقی‌مانده با توجه به شروط فوق ادامه می‌یابد تا تمام تقاضای مشتریان خط رفت و برگشت توسط وسایل نقلیه‌ی موجود در دوره‌ی زمانی مورد نظر برآورده شوند. این روند برای تمام دوره‌ها تکرار می‌شود.

ج) در مرحله‌ی آخر مقدار موجودی و بار تحویلی یا دریافتی از مشتریان با توجه به ماتریس‌هایی که در قسمت قبل توضیح داده شدند، مشخص می‌شوند.

۳.۱.۴. محاسبه‌ی شایستگی هر جواب

در این الگوریتم، از تابع هدف مسئله به‌عنوان معیار تعیین شایستگی هر موقعیت (جواب) استفاده می‌شود.

۴.۱.۴. تولید موقعیت جدید موقت

با توجه به قوانین توصیف شده در بخش (۱-۴)، به‌منظور مدل‌سازی ریاضی الگوریتم پیشنهادی، برای هر خفاش مجازی i ام در فضای جستجوی d بعدی در تکرار t ام الگوریتم، موقعیت P_i و سرعت v_i و همچنین بسامد f_i را می‌توان از روابط ۲۶ الی ۲۸ به دست آورد:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \beta \quad (26)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (P_i^t - P_{best}) f_i \quad (27)$$

$$P_i^t = P_i^{t-1} + v_i^t \quad (28)$$

در روابط بالا t شماره‌ی تکرار الگوریتم و β یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی صفر و یک است. P_{best} بهترین راه‌حل جهانی موجود به حساب می‌آید که بعد از مقایسه‌ی تمام راه‌حل‌ها (جواب‌ها) در بین n خفاش، تعیین می‌شود. روابط ۲۶ و ۲۷ نشان می‌دهند که بسامدهای مختلف باعث می‌شوند که خفاش‌ها در جهت‌های متفاوتی به سمت بهترین جواب‌ها میل کنند. در ضمن تثبیت عامل f_{max} بستگی به نوع مسئله‌ی مورد بررسی و ابعاد آن مسئله دارد و معمولاً $f_{min} = 0$ در نظر گرفته می‌شود. به روزرسانی سرعت و موقعیت خفاش‌ها دقیقاً مشابه الگوریتم ازدحام ذرات است؛ به‌طوری‌که f_i سرعت و محدوده‌ی جابه‌جایی (دامنه‌ی حرکت)

انبوه ذرات را کنترل می‌کند. بر اساس مدارک، BA را می‌توان یک ترکیب متعادل از PSO و جستجوی محلی پر قدرت که توسط بلندی صدا و نرخ پالس، کنترل می‌شود، در نظر گرفت. [۶۰]

۵.۱.۴. جستجوی محلی

یک جواب در میان بهترین جواب‌های موجود انتخاب و یک جواب جدید برای هر خفاش به صورت محلی با گام تصادفی زیر یعنی رابطه‌ی ۲۹ به روز می‌شود:

$$P_{new} = P_{old} + \varepsilon \cdot A^t \quad (29)$$

که در آن $\varepsilon \in [-1, 1]$ برای محدود کردن پله‌های گردش تصادفی به‌کار گرفته شده است. در این رابطه $A^t = \langle A_i^t \rangle$ میانگین بلندی صدای همه‌ی خفاش‌ها در تکرار t ام تعریف می‌شود.

۶.۱.۴. تعیین موقعیت جدید قطعی

شرط انتخاب جواب جدید در الگوریتم خفاش کاملاً متفاوت از سایر الگوریتم‌هاست. منطق این الگوریتم بدین صورت است که همیشه از جواب خوب به جواب بهتر نمی‌رسیم و بعضی وقت‌ها از جواب بد می‌توان به جواب بهتر رسید. بنابراین با یک ضریب تصادفی یک جواب بد جایگزین جواب خوب می‌شود تا از آن جواب بد به جواب بهتر برسیم و این از قابلیت‌های منحصر به فرد الگوریتم خفاش است. بنابراین شرط انتخاب جواب جدید، شایستگی بهتر نسبت به موقعیت قبلی خود است و همچنین با تولید یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱، چنانچه بلندی صدای ساطع شده از خفاش مورد نظر یعنی A_i ، بزرگ‌تر از آن باشد، موقعیت موقت ایجاد شده تبدیل به جواب قطعی جدید می‌شود و بلندی صدا A_i و نرخ انتشار پالس r_i بر اساس یک روند تکرار طبق روابط زیر (معادلات ۳۰-۳۱) روزآمد می‌شود. در نتیجه بلندی صدا معمولاً در خفاش‌ها، هنگام نزدیکی به طعمه کاهش می‌یابد و نرخ انتشار پالس افزایش می‌یابد. بلندی صدا می‌تواند با هر مقداری متغیر باشد. برای مثال $R_{min} = 0$ یعنی این‌که یک خفاش، طعمه‌ی خود را یافته و در نتیجه تولید صدا را قطع کرده است.

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad \forall 0 < \alpha < 1 \quad (30)$$

$$r_i = [1 - \exp(-\gamma \cdot t)] \quad \forall \gamma \geq 0 \quad (31)$$

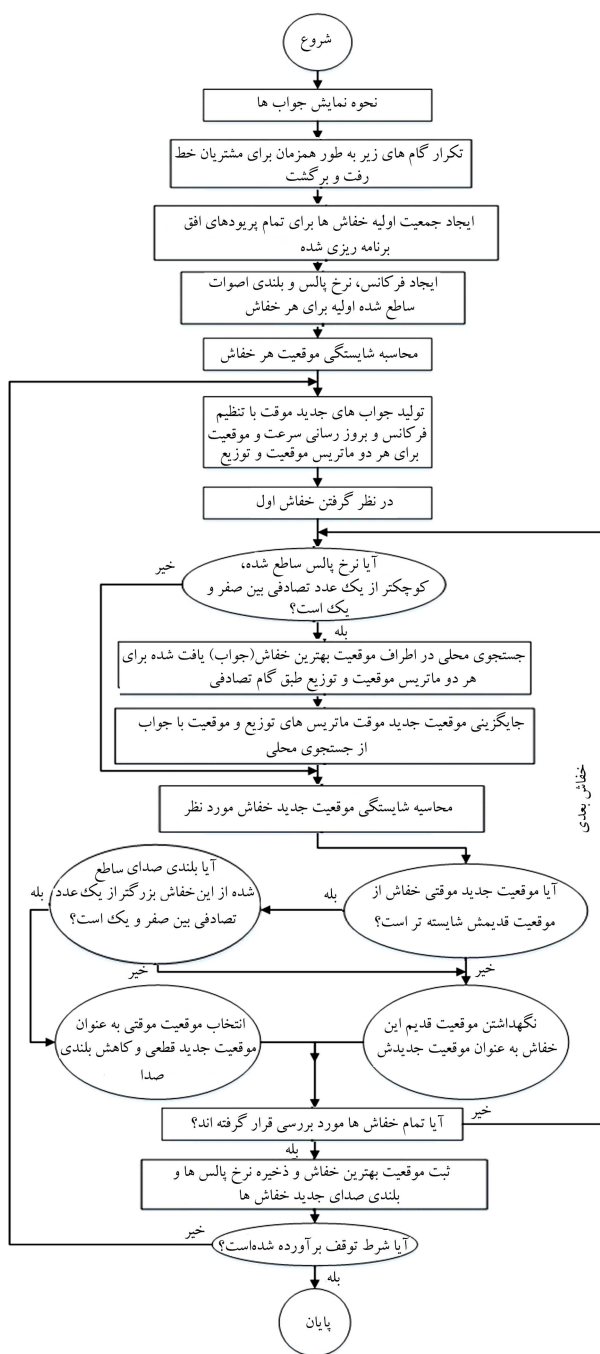
α و γ مقادیر ثابتی هستند و در واقع α شبیه به عامل خنک‌کننده‌ی یک برنامه‌ی خنک‌کننده در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده است و همچنین بازه‌ی تعریف آن‌ها $0 < \alpha < 1$ و $0 < \gamma$ است و برای سادگی $\alpha = \gamma = 0.9$ در نظر گرفته می‌شود. [۵۸] نکته‌ی حائز اهمیت این است که با انتخاب متغیرهای $r_i = A_i = 0$ این الگوریتم مشابه الگوریتم ازدحام ذرات عمل می‌کند یا با برابر قرار دادن متغیرهای $r_i = A_i = 0.7$ این الگوریتم شبیه الگوریتم جستجوی هارمونی رفتار می‌کند. [۶۱] شکل ۱ فلوجارت کامل الگوریتم خفاش پیشنهادی را برای حل مسئله‌ی مورد نظر ارائه می‌دهد.

۲.۴. الگوریتم ژنتیک کارا

برای ارزیابی نتایج حاصل از الگوریتم خفاش، یک الگوریتم ژنتیک کارا برای مسئله‌ی مورد نظر پیشنهاد شده است. نحوه‌ی نمایش کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک کارا پیشنهادی دقیقاً مشابه با ماتریس‌های موقعیت و توزیع معرفی شده در الگوریتم خفاش پیشنهادی است. این الگوریتم دارای دو کروموزوم، به نام‌های کروموزوم مسیریابی در قالب یک ماتریس سه بعدی $K \times (m+n) \times T$ و کروموزوم توزیع در قالب ماتریس چهار بعدی $P \times (m+n) \times K \times T$ است.

۵. نتایج محاسباتی

در این مقاله با استفاده از مسائل آزمون تصادفی، عملکرد الگوریتم خفاش و ژنتیک کارا پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته و برای مسائل با ابعاد کوچک نتایج حاصل از هر دو الگوریتم با روش گمز مقایسه و بررسی شده است. این الگوریتم‌ها در محیط Matlab ۸/۶ برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی شده است. الگوریتم‌ها در رایانه‌ی با مشخصات پردازنده‌ی Intel core i۳، ۶۴ بیت، ۱/۷ گیگاهرتز، ویندوز سیون و ۴ گیگابایت رم اجرا شده است.



شکل ۱. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی خفاش پیشنهادی.

جدول ۳. مقداردهی پارامترهای تولید مسائل آزمون.

ردیف	نام پارامتر	مقدار پارامتر	ردیف	نام پارامتر	مقدار پارامتر
۱	h_i^p	$U[100, 500]$	۶	d_{ij}	$U[70, 500]$
۲	w^p	$U[10, 20]$	۷	f_k^t	$U[1000, 3000]$
۳	q_{ik}^t	$U[20, 60]$	۸	Q_k	$U[1500, 5000]$
۴	R_{ik}^t	$U[20, 60]$	۹	C_i	$U[1000, 5000]$
۵	g_k^t	$U[100, 400]$			

۱.۵. چگونگی ایجاد مسائل آزمون

در این مقاله مسائل آزمون در سه گروه کوچک، متوسط و بزرگ به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. پارامترهای مهم مسائل آزمون، ابعاد مسئله (تعداد مشتریان خط رفت و برگشت)، تنوع محصولات، تنوع ظرفیت وسایل نقلیه و تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی است که طبق جدول‌های ۸، ۹ ارائه شده‌اند. همچنین در خصوص سایر پارامترهای ورودی مسئله از توزیع یکنواخت طبق جدول ۳ استفاده شده است.

۲.۵. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها

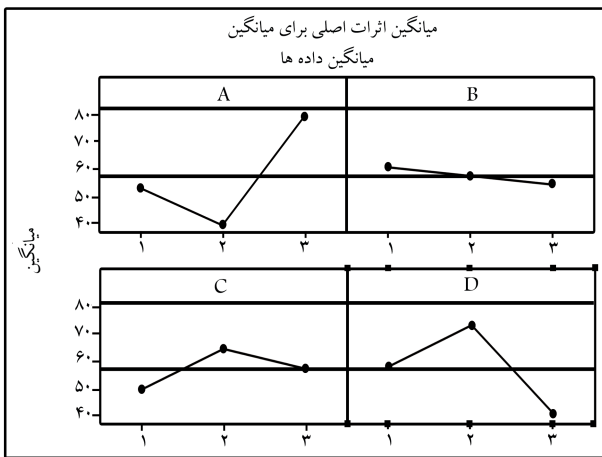
کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری، ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد؛ به طوری که انتخاب صحیح مقادیر پارامترها، سبب افزایش کارایی الگوریتم می‌شود. از جمله روش‌های توانمند آماری برای تنظیم پارامترها، روش تاگوچی است. در این روش عامل‌ها به دو دسته قابل کنترل و تصادفی تقسیم می‌شوند. در این روش عامل‌ها به دو دسته قابل کنترل و تصادفی تقسیم می‌شوند. عامل‌های تصادفی عامل‌هایی هستند که قابل کنترل نیستند و بر نتایج آزمایش تأثیر می‌گذارند. از آن‌جا که دوری جستن از تأثیرات عامل‌های تصادفی غیرقابل اجتناب است، در روش تاگوچی سعی می‌شود تا تأثیرگذاری این عوامل کمینه شود و همچنین عامل‌های قابل کنترل در سطوحی تعیین شوند تا کارایی روش بیشینه و پایداری آن نیز حفظ شود.

تابع هدف در این مقاله از نوع کمینه‌سازی است؛ بنابراین نرخ S/N مربوط به آن به صورت زیر محاسبه می‌شود (معادله ۳۲) و در این نسبت S میزان مطلوبیت (مقادیر پاسخ) و N مقدار عدم مطلوبیت (انحراف استاندارد مقادیر پاسخ) است و پارامتر n بیانگر تعداد تکرار آزمایش و y_i پاسخ مسئله است.^[۶۱]

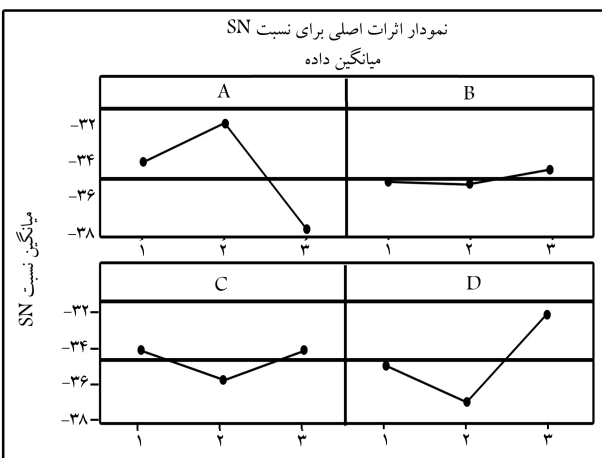
$$S/N = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (32)$$

۱.۲.۵. پارامترهای الگوریتم خفاش پیشنهادی

پارامترهای ورودی الگوریتم خفاش شامل اندازه‌ی جمعیت، نرخ انتشار پالس، بلندی صوت و بیشینه‌ی بسامد است که در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس مقاله‌ی یانگ و همکاران بلندی صدای اولیه A_i می‌تواند تقریباً در بازه‌ی [۲۰] باشد در حالی که نرخ اولیه‌ی انتشار پالس r_i^p می‌تواند در حدود صفر باشد یا از ارقام دیگر یعنی $r_i^p \in [0, 1]$ انتخاب شود.^[۶۰] با توجه به این که برای هر یک از پارامترها سه حالت در نظر گرفته شده است در کل باید $3^2 = 81$ حالت بررسی شود. اما با استفاده از روش تاگوچی فقط ۹ حالت از ۸۱ حالت بررسی می‌شود. مسئله‌ی آزمون برای هر یک از حالات ۱۰ بار حل شده است. سایر پارامترها بنا بر پیشنهاد طراح الگوریتم به صورت $\alpha = \gamma = 0/9$ و $f_{min} = 0$ و $A_{min} = 0$ در نظر



شکل ۲. تغییرات میانگین جواب‌ها به ازای سطوح مختلف پارامترها.



شکل ۳. تغییرات نرخ S/N به ازای سطوح مختلف پارامترها.

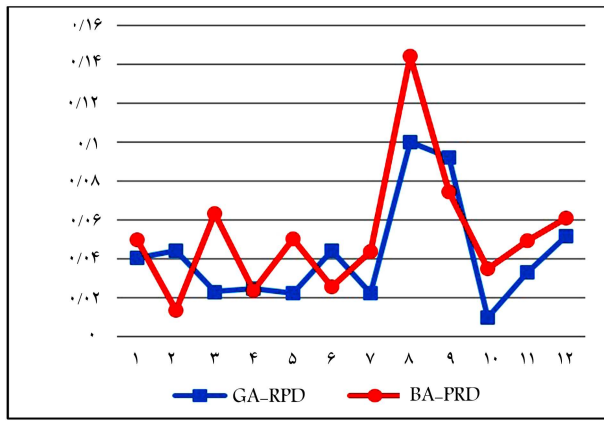
جدول ۴. سطوح پیشنهادی پارامترها در الگوریتم خفاش.

سطوح	پارامتر		
	اندازه‌ی جمعیت	بلندی صوت	نرخ انتشار پالس
۱ (پایین)	۱۰۰	۱	۰٫۱
۲ (متوسط)	۱۵۰	۱٫۵	۰٫۲
۳ (بالا)	۲۰۰	۲	۰٫۳

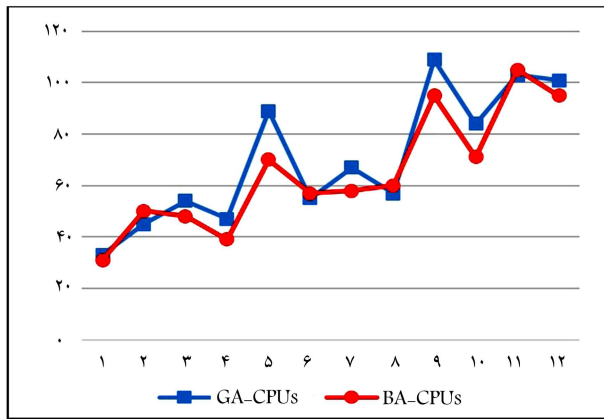
گرفته شده است. که با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، برای اندازه‌ی جمعیت سطح ۲، برای بلندی صدا سطح ۳، برای نرخ انتشار پالس سطح ۱ و برای بیشینه‌ی بسامد سطح ۳ انتخاب شد.

۲.۲.۵. پارامترهای الگوریتم ژنتیک کارای پیشنهادی

پارامترهای مهم الگوریتم ژنتیک اندازه‌ی جمعیت، احتمال تقاطع، احتمال جهش و بیشینه‌ی تکرار الگوریتم هستند که برای هر یک از آن‌ها سه سطح نیز لحاظ شده است (جدول ۵) و با تحلیل سطوح مختلف آن به روش تاگوچی برای اندازه‌ی جمعیت اولیه سطح ۲، برای تعداد تکرار سطح ۱، برای نرخ تقاطع سطح ۱ و برای نرخ جهش سطح ۲ انتخاب شد.



شکل ۴. مقایسه شاخص RPD الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل کوچک.



شکل ۵. مقایسه زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل کوچک.

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۷، مشاهده می‌شود که در مسائل کوچک هر دو الگوریتم خفاش و ژنتیک پیشنهادی، با درصد خطای مناسبی توانسته‌اند به جواب‌های خوبی نسبت به جواب بهینه دست یابند و الگوریتم خفاش به طور متوسط دارای خطای ۲/۸۸ درصد و الگوریتم ژنتیک به طور متوسط دارای خطای ۳/۱۱ درصد نسبت جواب بهینه هستند. همچنین در مجموع الگوریتم خفاش متوسط خطای کمتری نسبت جواب بهینه دارد که نشان از کارآمدی بیشتر این الگوریتم برای مسائل آزمون طراحی شده است.

۳.۳.۵. نتایج به دست آمده برای مسائل متوسط

مسائل آزمون به صورت تصادفی و بر اساس مقادیر تعریف شده در جدول ۳، برای مسائل متوسط با ابعاد ۱۵ الی ۲۶ مشتری طبق جدول ۸ طراحی و نتایج حاصل از حل مدل توسط الگوریتم خفاش و ژنتیک به همراه زمان حل و شاخص RPD به شرح زیر است:

در خصوص مسائل متوسط با توجه به نتایج جدول ۸ برخلاف مسائل کوچک - حدود ۵۸٪ از نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، بهتر از الگوریتم خفاش است. اما در خصوص زمان حل الگوریتم خفاش متوسط زمان بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک را دارد (۲۵۷ ثانیه به ۲۸۰ ثانیه). شاخص درصد انحراف نسبی در الگوریتم ژنتیک برای مسائل آزمون با اندازه‌ی متوسط، (با میانگین ۰/۲۲۵) بهتر از الگوریتم خفاش (با میانگین ۰/۳۰۶) است.

با توجه به شکل ۶، روند تغییرات زمان حل مسائل متوسط متناسب با افزایش اندازه‌ی مسئله افزایش می‌یابد؛ اما در مورد شاخص RPD (شکل ۷)،

جدول ۵. سطوح پیشنهادی پارامترها در الگوریتم ژنتیک کارای پیشنهادی.

سطوح	پارامتر		
	جمعیت اولیه	تعداد تکرار	نرخ تقاطع
۱ (پایین)	۱۰۰	۱۰۰	۰/۵
۲ (متوسط)	۱۵۰	۱۲۰	۰/۶
۳ (بالا)	۲۰۰	۱۵۰	۰/۷

۳.۵. نتایج عددی و تحلیل آن‌ها

در این قسمت هر یک از مسائل آزمون در دسته‌های کوچک، متوسط و بزرگ بر اساس پارامترهای مختلف مسئله، ۵ بار توسط الگوریتم‌های خفاش و ژنتیک اجرا و مقادیر میانگین و بهترین جواب حاصل از اجرای الگوریتم‌ها طبق جدول ۶، در ستون‌های میانگین و بهترین درج شده است و در ستون زمان، متوسط زمان حاصل از اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی (به ثانیه) آمده است. همچنین مسائل کوچک ایجاد شده (با ابعاد ۴ الی ۱۲ مشتری رفت و برگشت) به روش دقیق گمز حل و نتایج آن با جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های خفاش و ژنتیک کارا مقایسه شده است.

یک ابزار کارآمد در تحلیل نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی، تشخیص میزان پراکندگی جواب‌های حاصل از اجرای هر دو الگوریتم و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر است. برای این منظور از شاخص درصد انحراف نسبی (RPD) (۲۱) طبق معادله ۳۳ برای هر دو الگوریتم پیشنهادی استفاده و نتایج آن در جداول ۶، ۸ و ۹ آورده شده است.

$$RPD = \frac{(Alg_{sol} - Min_{sol})}{Min_{sol}} \times 100 \quad (33)$$

ارزش هدفی است که به ازای یک آزمایش از طریق یک الگوریتم به دست می‌آید و Min_{sol} نیز بهترین مقداری است که به ازای هر آزمایش، از طریق الگوریتم‌های پیشنهادی محاسبه می‌شود.

۱.۳.۵. نتایج به دست آمده برای مسائل کوچک

مسائل آزمون به صورت تصادفی و بر اساس مقادیر تعریف شده در جدول ۳، برای مسائل کوچک با ابعاد ۴ الی ۱۳ مشتری طبق جدول ۶ طراحی و نتایج حاصل از حل مدل توسط الگوریتم خفاش و ژنتیک به همراه زمان حل و شاخص RPD به شرح زیر است:

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، برای مسائل کوچک حدود ۶۰٪ از نتایج حاصل توسط الگوریتم خفاش پیشنهادی بهتر از الگوریتم ژنتیک کارای ارائه شده است. در خصوص شاخص RPD ، الگوریتم ژنتیک به طور میانگین با نسبت ۰/۴۲۱ به ۰/۵۲۶ دارای عملکرد بهتری است و روند تغییرات، دارای نوسان کمتری است. (شکل ۴) در خصوص زمان حل مسائل آزمون با ابعاد کوچک، هر دو الگوریتم تقریباً عملکرد مناسبی را دارند؛ اما الگوریتم خفاش با متوسط زمان ۶۴/۹۲ ثانیه نسبت ۷۰/۸ ثانیه عملکرد بهتری را دارد. با توجه به شکل ۵، تغییرات زمان حل مسائل آزمون برای هر دو الگوریتم دارای روندی متناسب با یکدیگر است.

۲.۳.۵. نتایج به دست آمده از روش گمز

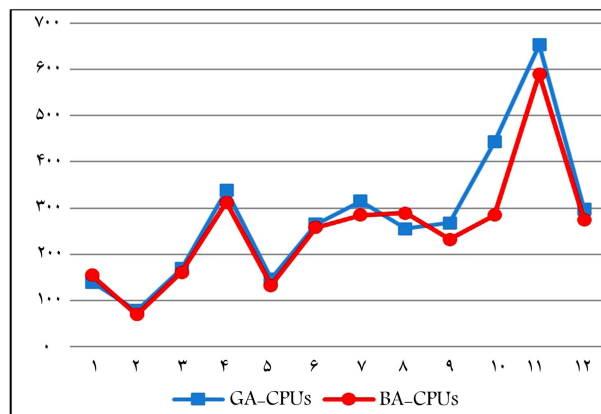
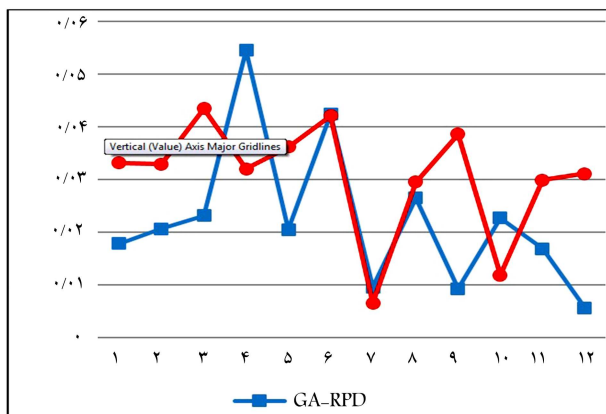
در این بخش نتایج حاصل از حل مسائل آزمون با روش دقیق گمز برای ۱۰ مسئله آزمون $FSTPS - n10$ الی $FSTPS - n1$ طبق جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۶. مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک و خفاش به همراه مقایسه‌ی آن‌ها برای مسائل کوچک.

ردیف	نام مسئله	مشخصات مسئله (L/B/P/K/T)	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی			الگوریتم خفاش پیشنهادی		
			میانگین	بهترین	زمان	میانگین	بهترین	زمان
۱	FSTPS - n۰۱	۲,۲,۳,۴,۳	۷۹۶۳۰	۷۸۵۹۳	۳۳	۸۰۸۹۲	۳۱	
۲	FSTPS - n۰۲	۳,۲,۲,۳,۴	۱۴۰۷۴	۱۴۶۷۹۹	۴۵	۱۵۰۹۵۹	۵۰	
۳	FSTPS - n۰۳	۴,۳,۵,۳,۳	۱۴۳۷۰	۱۴۲۴۹۹	۵۴	۱۴۵۷۹۱	۴۸	
۴	FSTPS - n۰۴	۳,۴,۳,۴,۳	۱۵۴۷۶	۱۵۱۰۶۹	۴۷	۱۴۷۸۵۲	۳۹	
۵	FSTPS - n۰۵	۴,۴,۴,۵,۴	۲۴۳۷۳	۲۳۸۴۷۰	۸۹	۲۳۰۰۰۲	۷۰	
۶	FSTPS - n۰۶	۵,۴,۳,۳,۳	۱۷۷۲۴	۱۶۹۷۸۵	۵۵	۱۷۳۲۷۹	۵۷	
۷	FSTPS - n۰۷	۵,۵,۳,۵,۳	۲۰۴۷۶	۲۰۰۳۶۱	۶۴	۱۹۵۳۴۵	۵۸	
۸	FSTPS - n۰۸	۶,۵,۲,۴,۳	۲۳۹۷۸	۲۱۸۰۴۸	۵۷	۲۱۰۱۱۹	۶۰	
۹	FSTPS - n۰۹	۷,۵,۴,۴,۴	۳۷۳۸۳	۳۴۲۳۶۵	۱۰۹	۳۴۰۵۷۸	۹۵	
۱۰	FSTPS - n۱۰	۴,۸,۴,۵,۳	۲۷۳۰۶	۲۷۰۴۸۵	۸۴	۲۶۷۲۱۲	۷۱	
۱۱	FSTPS - n۱۱	۵,۷,۳,۴,۴	۳۶۹۲۱	۳۵۷۴۹۰	۱۰۳	۳۵۱۲۹۸	۱۰۵	
۱۲	FSTPS - n۱۲	۸,۵,۵,۶,۳	۲۸۰۰۹	۲۶۶۳۹۶	۱۰۱	۲۷۸۴۵۵	۹۵	
میانگین			۷۰,۰۸	۰,۴۲۱	۶۴,۹۲	۰,۵۲۶		

جدول ۷. مقادیر به دست آمده از روش گمز و مقایسه‌ی آن با سایر الگوریتم‌ها.

ردیف	نام مسئله	مشخصات مسئله (L/B/P/K/T)	ژنتیک بهترین	خفاش بهترین	گمز	GAP%	
						(گمز و ژنتیک)	(گمز و خفاش)
۱	FSTPS - n۰۱	۲,۲,۳,۴,۳	۷۸۵۹۳	۸۰۸۹۲	۷۷۴۷۰,۲۷	۱,۴۳	۴,۲۳
۲	FSTPS - n۰۲	۳,۲,۲,۳,۴	۱۴۶۷۹۹	۱۵۰۹۵۹	۱۴۴۷۳۹/۵	۱/۴۰	۴/۱۲
۳	FSTPS - n۰۳	۴,۳,۵,۳,۳	۱۴۲۴۹۹	۱۴۵۷۹۱	۱۴۰۱۳۴/۳	۱/۶۶	۳/۸۸
۴	FSTPS - n۰۴	۳,۴,۳,۴,۳	۱۵۱۰۶۹	۱۴۷۸۵۲	۱۴۴۰۲۲/۶	۴/۶۶	۲/۵۹
۵	FSTPS - n۰۵	۴,۴,۴,۵,۴	۲۳۸۴۷۰	۲۳۰۰۰۲	۲۲۴۱۸۲/۹	۵/۹۱	۲/۵۳
۶	FSTPS - n۰۶	۵,۴,۳,۳,۳	۱۶۹۷۸۵	۱۷۳۲۷۹	۱۶۶۵۹۰/۴	۱/۸۸	۳/۸۶
۷	FSTPS - n۰۷	۵,۵,۳,۵,۳	۲۰۰۳۶۱	۱۹۵۳۴۵	۱۹۲۰۸۲/۷	۴/۱۳	۱/۶۷
۸	FSTPS - n۰۸	۶,۵,۲,۴,۳	۲۱۸۰۴۸	۲۱۰۱۱۹	۲۰۶۵۲۶	۵/۲۸	۱/۷۱
۹	FSTPS - n۰۹	۷,۵,۴,۴,۴	۳۴۲۳۶۵	۳۴۰۵۷۸	۳۳۲۴۳۸/۲	۲/۹۰	۲/۳۹
۱۰	FSTPS - n۱۰	۴,۸,۴,۵,۳	۲۷۰۴۸۵	۲۶۷۲۱۲	۲۶۱۵۷۳/۸	۳/۲۹	۲/۱۱
میانگین						۳,۱۱	۲,۸۸



شکل ۷. مقایسه‌ی شاخص RPD الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل متوسط.

شکل ۶. مقایسه‌ی زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل متوسط.

جدول ۸. مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک و خفاش به همراه مقایسه‌ی آن‌ها برای مسائل متوسط.

ردیف	نام مسئله	مشخصات مسئله (L/B/P/K/T)	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی				الگوریتم خفاش پیشنهادی			
			میانگین	بهترین	زمان	RPD	میانگین	بهترین	زمان	RPD
۱	FMTPS - n ^۰ ۱	۷,۸۳,۳,۶,۳	۳۳۰۵۱۳	۳۲۴۷۱۴	۷۸	۰/۰۱۷۹	۳۳۰۸۶۲	۳۲۰۲۴۸	۷۱	۰/۰۳۳۱
۲	FMTPS - n ^۰ ۲	۱۰,۵,۴,۸,۴	۴۷۵۳۸۱	۴۶۵۷۸۹	۱۴۷	۰/۰۲۰۶	۴۷۱۹۸۵	۴۵۶۹۴۶	۱۶۴	۰/۰۳۲۹
۳	FMTPS - n ^۰ ۳	۶,۹,۵,۸,۴	۴۹۲۷۲۶	۴۸۱۵۸۱	۱۴۰	۰/۰۲۳۱	۵۶۴۸۹۲	۵۴۱۳۶۷	۱۵۵	۰/۰۴۳۵
۴	FMTPS - n ^۰ ۴	۸,۸,۵,۷,۵	۶۶۷۸۴۹	۶۳۳۲۸۲	۱۶۹	۰/۰۵۴۶	۶۹۳۳۹۵	۶۷۱۸۶۴	۱۷۵	۰/۰۳۲۰
۵	FMTPS - n ^۰ ۵	۹,۱۰,۷,۸,۶	۱۰۴۷۴۱	۱۰۲۶۳۹۴	۳۳۸	۰/۰۲۰۵	۱۰۳۴۸۶	۹۹۸۷۴۲	۳۱۲	۰/۰۳۶۲
۶	FMTPS - n ^۰ ۶	۱۰,۱۰,۶,۹,۵	۸۷۹۷۶۴	۸۴۳۹۵۳	۲۶۵	۰/۰۴۲۴	۱۰۱۰۸۵	۹۷۰۰۰۳	۲۵۸	۰/۰۴۲۱
۷	FMTPS - n ^۰ ۷	۱۱,۶,۷,۷,۶	۹۵۰۴۸۳	۹۴۱۴۷۹	۳۱۵	۰/۰۰۹۶	۱۱۱۰۸۶	۱۱۰۳۶۴۸	۲۸۵	۰/۰۰۶۵
۸	FMTPS - n ^۰ ۸	۱۲,۸,۵,۸,۵	۸۷۳۲۹۶	۸۵۰۷۷۶	۲۶۸	۰/۰۲۵۶	۹۷۵۶۵	۹۵۱۴۶۱	۲۳۲	۰/۰۲۹۵
۹	FMTPS - n ^۰ ۹	۱۱,۱۱,۶,۹,۴	۷۷۱۵۸۲	۷۶۴۵۰۰	۲۵۵	۰/۰۰۹۳	۷۸۰۳۲۲	۷۵۱۳۰۲	۲۸۹	۰/۰۳۸۵
۱۰	FMTPS - n ^۰ ۱۰	۱۲,۱۲,۶,۹,۶	۱۳۱۵۸۰۷	۱۲۸۶۶۵۶	۴۴۳	۰/۰۲۲۷	۱۲۸۵۳۴	۱۲۷۰۳۴۱	۲۸۵	۰/۰۱۱۸
۱۱	FMTPS - n ^۰ ۱۱	۱۳,۱۳,۸,۱۰,۷	۱۷۶۲۹۴	۱۷۳۳۷۴۰	۶۵۳	۰/۰۱۶۸	۲۰۲۹۸۶	۱۹۷۰۹۸۸	۵۹۰	۰/۰۲۹۹
۱۲	FMTPS - n ^۰ ۱۲	۱۴,۱۲,۴,۸,۵	۱۱۰۲۲۹	۱۰۹۶۱۷۷	۲۹۸	۰/۰۰۵۶	۱۳۱۴۲۵	۱۲۷۴۶۲۹	۲۷۵	۰/۰۳۱۱
	میانگین		۲۸۰,۷۵	۰,۲۲۵	۲۸۰,۷۵	۰,۲۲۵	میانگین	۲۵۷,۵۸	۰,۳۰۶	۲۵۷,۵۸

جدول ۹. مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک و خفاش به همراه مقایسه‌ی آن‌ها برای مسائل بزرگ.

ردیف	نام مسئله	مشخصات مسئله (L/B/P/K/T)	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی				الگوریتم خفاش پیشنهادی			
			میانگین	بهترین	زمان	RPD	میانگین	بهترین	زمان	RPD
۱	FLTPS - n ^۰ ۱	۱۳,۱۵,۴,۹,۴	۹۳۰۷۳۶	۹۰۸۸۶۰	۳۱۱	۰/۰۲۴۱	۱۰۱۱۳۶	۹۸۰۳۶۵	۳۲۶	۰/۰۳۱۶
۲	FLTPS - n ^۰ ۲	۱۵,۱۵,۵,۱۰,۵	۱۳۱۳۱۵	۱۲۹۲۳۸۳	۴۸۷	۰/۰۱۶۱	۱۴۵۱۶۷	۱۴۲۸۰۰۲	۴۹۰	۰/۰۱۶۶
۳	FLTPS - n ^۰ ۳	۱۶,۱۹,۶,۱۱,۶	۱۹۱۲۰۷	۱۸۷۸۳۲۸	۸۱۱	۰/۰۱۸۰	۲۰۴۰۴۱	۲۰۱۵۶۴۲	۷۳۰	۰/۰۱۳۳
۴	FLTPS - n ^۰ ۴	۱۰,۱۸,۷,۱۱,۴	۹۹۱۷۶۰	۹۶۶۳۸۸	۶۵۸	۰/۰۲۶۳	۹۸۵۴۶۴	۹۶۳۵۶۴	۳۳۳	۰/۰۲۲۷
۵	FLTPS - n ^۰ ۵	۲۰,۱۰,۸,۹,۶	۱۶۸۵۰۱	۱۶۲۰۴۹۹	۷۹۶	۰/۰۳۹۸	۱۶۵۲۳۷	۱۶۰۱۳۹۱	۴۹۷	۰/۰۳۱۸
۶	FLTPS - n ^۰ ۶	۱۵,۲۰,۹,۱۲,۷	۲۴۷۷۹۴	۲۴۳۷۹۴۲	۱۱۹۶	۰/۰۱۷۱	۲۴۰۱۳۴	۲۳۶۰۸۷۵	۹۶۵	۰/۰۱۷۱
۷	FLTPS - n ^۰ ۷	۲۵,۱۲,۶,۱۱,۸	۲۷۵۵۰۸	۲۶۸۷۵۰۹	۱۰۷۳	۰/۰۲۵۱	۳۰۶۱۳۸	۲۹۶۴۷۱۰	۹۲۵	۰/۰۳۲۶
۸	FLTPS - n ^۰ ۸	۲۲,۲۵,۵,۱۱,۸	۳۴۲۸۶۹	۳۳۵۵۸۶۳	۱۱۶۴	۰/۰۲۱۷	۳۳۵۲۸۷	۳۲۹۰۱۱۷	۱۱۴۳	۰/۰۱۹۱
۹	FLTPS - n ^۰ ۹	۲۸,۱۸,۶,۱۰,۵	۲۰۱۱۰۲	۱۹۴۲۸۶۰	۷۸۰	۰/۰۳۵۱	۲۲۰۵۳۷	۲۱۴۶۷۹۱	۶۵۵	۰/۰۲۷۳
۱۰	FLTPS - n ^۰ ۱۰	۲۵,۲۵,۶,۱۰,۷	۳۱۷۳۵۱	۳۱۰۹۲۷۰	۱۳۷۸	۰/۰۲۰۷	۳۱۲۰۳۸	۳۱۰۶۹۱۸	۱۰۳۸	۰/۰۰۴۳
۱۱	FLTPS - n ^۰ ۱۱	۲۸,۲۴,۵,۱۱,۶	۳۳۹۰۹۲	۳۳۱۴۶۱۷	۱۱۶۴	۰/۰۲۳	۳۳۵۸۴۲	۳۲۹۵۵۷۹	۹۸۶	۰/۰۱۹۱
۱۲	FLTPS - n ^۰ ۱۲	۳۰,۲۵,۷,۱۲,۸	۳۵۴۷۲۵	۳۴۰۲۹۸۵	۹۸۸	۰/۰۴۸۳	۳۷۶۵۸۹	۳۷۰۰۴۶۸	۱۰۰۳	۰/۰۱۷۷
۱۳	FLTPS - n ^۰ ۱۳	۳۲,۳۰,۶,۱۲,۵	۲۸۰۰۶۴	۲۶۸۱۱۴۳	۱۰۸۵	۰/۰۴۴۶	۲۶۹۰۷۴	۲۶۰۱۳۱۲	۹۵۷	۰/۰۳۴۴
۱۴	FLTPS - n ^۰ ۱۴	۳۵,۳۰,۷,۱۱,۷	۳۹۹۰۸۸	۳۸۷۹۹۰۲	۱۶۱۹	۰/۰۲۸۶	۳۸۶۹۰۱	۳۷۴۹۲۱۰	۱۳۷۶	۰/۰۳۲۰
۱۵	FLTPS - n ^۰ ۱۵	۳۸,۳۲,۸,۱۲,۷	۴۲۵۶۷۹	۴۱۳۶۷۲۱	۱۸۴۶	۰/۰۲۹۰	۴۱۰۹۷۳	۴۰۲۴۸۶۳	۱۵۱۱	۰/۰۲۱۱
	میانگین		۱۰۲۴	۰,۲۷۲	۱۰۲۴	۰,۲۷۲	میانگین	۸۶۲	۰,۲۳۱	۸۶۲

۴.۳.۵. نتایج به دست آمده برای مسائل بزرگ

مسائل آزمون به صورت تصادفی و بر اساس مقادیر تعریف شده در جدول ۳، برای مسائل بزرگ با ابعاد ۲۸ الی ۶۲ مشتری طبق جدول ۹ طراحی و نتایج حاصل از حل مدل توسط الگوریتم خفاش و ژنتیک به همراه زمان حل و شاخص RPD به شرح زیر است:

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۹ برای مسائل بزرگ (۲۷ الی ۷۲ مشتری)،

روند تغییرات برای هر دو الگوریتم پیشنهادی تقریباً کاهشی است؛ اما نوسانات تغییر برای الگوریتم ژنتیک با وجود بهتر بودن این شاخص، بیشتر از الگوریتم خفاش است. از دلایل مهم این امر، دو ویژگی منحصر به فرد الگوریتم خفاش یعنی کنترل پارامتر در هر مرحله از اجرای الگوریتم و ویژگی زوم خودکار است که منجر به نرخ هم‌گرایی سریع، حداقل در مراحل اولیه‌ی تکرار، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها می‌شود.

جدول ۱۰. نتایج حاصل از آزمون فرض.

n	$Pvalue$	\bar{d}	S_d^2	S_d	t	$t_{\alpha/2, n-1}$
۱۲	۰٫۰۵	۵۰۹۸	۹۲۱۹۱۵۸	۶۸۷۵	۲٫۵۹۹	۱٫۷۹۶
نتیجه					$t > t_{\alpha/2, n-1}$	

زیراست:

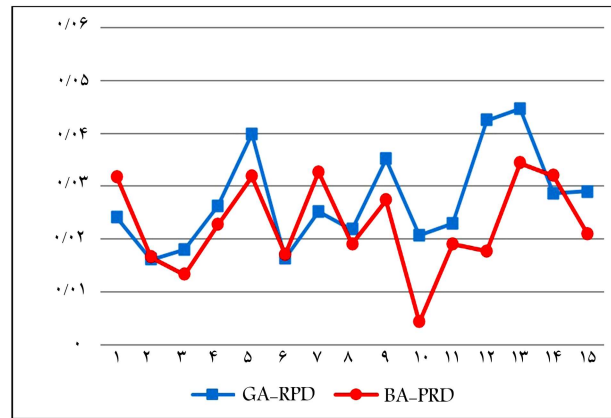
$$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{s_d / \sqrt{n}} \quad (34)$$

این آزمون برای $Pvalue = 0/05$ و درجه‌ی آزادی ۱۱ انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمون (جدول ۱۰) بیان‌گر آن است که فرض H_0 رد و فرض معنادار بودن نتایج با احتمال ۹۵٪ پذیرفته شد.

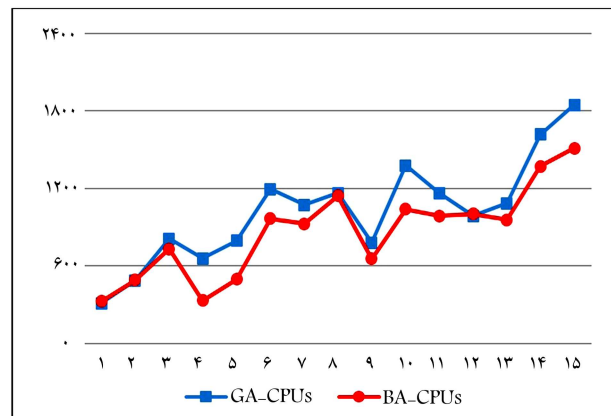
۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

وجود رقابت در توزیع کالا سبب شده است بازیگران عرصه‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین، حیطة‌ی تصمیم‌گیری خود را تا حدی گسترش دهند و مدیریت موجودی مشتریان را به آن اضافه کنند و بر ایجاد یک سیستم حمل‌ونقل کارا ترکز کنند. این مقاله مدل پایه‌ی مسائل مسیریابی - موجودی چنددوره‌ی را در حالت چندمحصولی، همراه با ناوگان ناهم‌سان وسایل نقلیه، که با راهبرد توزیع ارسال در طی مسیر به مشتریان خدمت‌رسانی می‌کنند، بسط داده است. در این مسئله از دو ویژگی کاربردی و عملیاتی «حمل در بازگشت» و «ارسال شکسته» که منجر به افزایش بهره‌وری سیستم توزیع می‌شوند، برای برآوردن احتیاجات مشتریان خط رفت و برگشت استفاده شد. به دلیل NP-Hard بودن مسئله و افزایش زمان محاسباتی روش‌های دقیق به صورت نمایی با بزرگ شدن ابعاد مسئله، استفاده از روش‌های فراابتکاری به دلیل نزدیکی به بهینه بودن جواب‌ها و کاهش قابل توجه زمان محاسباتی از اهمیت و محبوبیت خاصی برخوردار است.

در این مقاله برای اولین بار از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش در پژوهش‌های مسائل مسیریابی - موجودی استفاده شد و عملکرد آن توسط یک الگوریتم ژنتیک کارا ارزیابی شد. با توجه به نتایج جدول‌های ۸، ۶ و ۹ الگوریتم خفاش از لحاظ زمان حل برای تمام مسائل کوچک، متوسط و بزرگ عملکرد بهتری داشت. از لحاظ شاخص RPD، برای مسائل کوچک و متوسط الگوریتم ژنتیک بهتر بود. اما برای مسائل بزرگ، الگوریتم خفاش عملکرد بهتری را داشت. از لحاظ کیفیت جواب‌های به دست آمده برای مسائل کوچک و بزرگ، الگوریتم خفاش عملکرد بهتری داشت و برای مسائل متوسط الگوریتم ژنتیک موفق‌تر بود. با مقایسه‌ی جواب‌های هر دو الگوریتم نسبت به روش دقیق گمز برای مسائل کوچک، الگوریتم خفاش با درصد خطای مناسب نسبت به جواب بهینه به‌طور متوسط از الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشت (۲٫۸۸ درصد به ۳٫۱۱ درصد) (جدول ۷). پیشنهاد می‌شود ویژگی‌هایی از قبیل «بازه‌ی زمانی»، مجاز بودن کمبود، در نظر گرفتن اهداف دیگری از قبیل ملاحظات زیست‌محیطی و کاهش ریسک، در تحقیقات آتی بررسی شود و همچنین در خصوص روش‌های حل از سایر روش‌های فراابتکاری جدید مانند جاذبه‌ی گرانشی، الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی، ساقه و ریشه‌های رونده،^{۲۲} و همچنین روش ابتکاری آزادسازی لاگراژ استفاده شود و نتایج حاصل از آن‌ها با الگوریتم پیشنهادی مقایسه شود.



شکل ۸. مقایسه شاخص RPD الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل بزرگ.



شکل ۹. مقایسه زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی برای مسائل بزرگ.

حدود ۶۰٪ از نتایج، الگوریتم خفاش از الگوریتم ژنتیک برتری دارد که نشان از کارایی این الگوریتم برای مسائل بزرگ است. شاخص RPD بر خلاف مسائل کوچک و متوسط، در مسائل بزرگ الگوریتم خفاش عملکرد بهتری داشته است (نسبت ۲۳۱٫۰٪ به ۲۷۲٫۰٪) (شکل ۸). در خصوص زمان حل ضمن صعودی بودن تغییرات آن برای هر دو الگوریتم با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله (شکل ۹)، همانند مسائل کوچک و متوسط، الگوریتم خفاش متوسط زمان حل کوتاه‌تری را نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

۵.۳.۵. تحلیل آماری

برای تحلیل وجود تفاوت معنادار بین جواب‌های ناشی از روش‌های GA و BA از آزمون فرض t زوجی با جزئیات زیر استفاده کرده‌ایم. مسائل آزمون طراحی شده در اندازه‌ی کوچک (جدول ۶) مورد آزمون قرار گرفتند و دو جامعه‌ی آماری از یکدیگر مستقل نیستند. در صورت وجود یک اختلاف معنادار، فرض بهتر بودن روش پیشنهادی (خفاش) پذیرفته می‌شود. در ابتدا آزمون فرض به شرح زیر برای مسئله ایجاد کردیم:

$$H_0 : \mu_d = 0$$

$$H_1 : \mu_d > 0$$

d اختلاف بین نتایج دو الگوریتم دارای توزیع t با $n - 1$ درجه آزادی و تابع احتمال

پانویسها

1. vendor Managed inventory
2. inventory routing problem
3. inventory routing problem with backhuals
4. Split Delivery
5. inventory routing problem with backhuals and split delivery (IRPBSD)
6. Multi-product multi-vehicle inventory routing problem with backhuals and Split Delivery
7. Backlogging
8. Back-order
9. Lost sales
10. Order - up - to (OU)
11. max- level (ML)
12. adaptive large neighborhood search (ALNS)
13. variable neighborhood descent (VND)
14. variable neighborhood search (VNS)
15. soft time windows
16. pickup and delivery
17. greedy randomized adaptive search procedure (GRASP)
18. Loudness
19. rate of pulse emission
20. wavelength
21. relative percentage deviation (RPD)
22. runner-root

منابع (References)

1. Kaipia, R., Holmström, J. and Tanskanen, K. "VMI: what are you losing if you let your customer place orders?", *Production Planning and Control*, **13**(1), pp. 17-25 (2002).
2. Aghezzaf, E., Raa, B. and Van Landeghem, H. "Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products", *European Journal of Operational Research*, **169**, pp. 1048-1063 (2006).
3. Røpke, S. and Pisinger, D. "A unified heuristic for vehicle routing problems with backhuals", *European Journal of Operational Research*, **171**, pp. 750-775 (2006).
4. Walmart, 2017. <https://www.walmart.com/> (accessed 03.01.2017).
5. Brandáfor o, J. "A deterministic iterated local search algorithm the vehicle routing problem with backhuals", *TOP*, **24**(2), pp. 445-465 (2016).
6. Koç, Ç., Laporte, G., *Vehicle Routing with Backhuals: Review and Research Perspectives*, *Computers and Operations Research*, **91**, pp.79-91 (2018).
7. Song, S. H., Lee, K. S. and Kim, G. S. "A practical approach to solving a newspaper logistics problem using a digital map", *Computers and Industrial Engineering*, **43**(1), pp. 315-330 (2002).
8. Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. and Rekik, Y. "Multi-product multi-period inventory routing problem with a transshipment option: a green approach", *International Journal of Production Economics*, **157**, pp. 80-88 (2014).
9. Cordeau, J.F., Laganà, D., Musmanno, R. and et al. "A decomposition based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem", *Computers and Operations Research*, **55**, pp. 153-166 (2015).
10. Lenstra, J.K. and Rinnooy, K.A.H.G. "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", *Networks*, **11**, pp. 221-227 (1981).
11. Chien, T. W., Balakrishnan, A. and Wong, R.T. "An integrated inventory allocation and vehicle routing problem", *Transportation Science*, **23**(2), pp. 67-76 (1989).
12. Kleywegt, A.J., Nori, V.S. and Savelsbergh, M.W.P. "The stochastic inventory routing problem with direct deliveries", *Transportation Science*, **36**(1), pp. 94-118 (2002).
13. Kleywegt, A.J., Nori, V.S. and Savelsbergh, M.W.P. "Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem", *Transportation Science*, **38**, pp. 42-70 (2004).
14. Adelman, D. "A price-Directed approach to stochastic inventory/routing", *Operations Research*, **52**(4), pp. 499-514 (2004).
15. Bertazzi, L., Paletta, G. and Speranza, M.G. "Deterministic order-up-to level policies in an inventory routing problem", *Transportation Science*, **36**(1), pp. 119-132 (2002).
16. Andersson, H., Christiansen, M., Fagerholt, K. and et al. "Transportation planning and inventory management in the LNG supply chain", In: Bjørndal E, Bjørndal M, Pardalos PM, Ronnqvist M, editors. *Energy, Natural Resources and Environmental Economics*, New York: Springer. pp. 223-248 (2010).
17. Dauzere-Peres, S., Nordli, A., Olstad, A. and et al. "Omya hustadmarmor optimizes its supply chain for delivering calcium carbonate slurry to european paper manufacturers", *Interfaces*, **37**(1), pp. 39-51 (2007).
18. Mercer, A. and Tao, X. "Alternative inventory and distribution policies of a food manufacturer", *Journal of the Operational Research Society*, **47**(6), pp. 755-65 (1996).
19. Baita, F., Ukovich, W., Pesenti, R. and et al. "Dynamic routing-and-inventory problems: a review", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **32**(8), pp. 585-598 (1998).
20. Kleywegt, A.J., Nori, V.S., Savelsbergh, M. W. P. "The stochastic inventory routing problem with direct deliveries", *Transportation Science* **36**(1), pp. 94-118 (2002).
21. Coelho, L.C., Cordeau, J-F. and Laporte, G. "Thirty years of inventory routing", *Transportation Science*, **48**(1), pp. 1-19 (2014).
22. Archetti, C., Bertazzi, L, Laporte, G. and et al. "A branch and cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem", *Transportation Science*, **41**(3), pp. 382-391 (2007).
23. Desaulniers, G., Rakke, J.G. and Coelho, L.C. "A branch-price-and-cut algorithm for the inventory-routing problem", *Transportation Science*, **50**(3), pp. 1060-1076 (2016).
24. Solyali, O. and Süral, H. "A branch-and-cut algorithm using a strong formulation and an a priori tour-based heuristic for an inventory-routing problem", *Transportation Science*, **45**(3), pp. 335-345 (2011).
25. Lefever, W., Aghezzaf, E.H., Hadj-Hamou, K. and et al. "Analysis of an improved branch-and-cut formulation

- for the inventory-routing problem with transshipment”, *Computers and Operations Research*, **98**, pp. 137-148 (2018).
26. Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, L. and et al. “A hybrid heuristic for an inventory routing problem”, *INFORMS Journal on Computing*, **24**(1), pp. 101-116 (2012).
 27. Coelho, L.C., Cordeau, J.-F. and Laporte, G. “Consistency in multivehicle inventory-routing”, *Transportation Resreach. Part C: Emerging Tech.* **24**(1), pp. 270-287 (2012a).
 28. Coelho, L.C., and Laporte, G. “A branch-and-cut algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory-routing problem”, *International Journal of Production Research*, **51**(23-24), pp. 7156-7169 (2013a).
 29. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. and Jans, R. “Formulations and branch-and-cut algorithms for multi vehicle production and inventory routing problems”, *INFORMS Journal on Computing*, **26**(1), pp. 103-120 (2014).
 30. Abdelmaguid, T.F. “Heuristic approaches for the integrated inventory distribution problem”, PhD Thesis, University of Southern California, Los Angeles, USA, (2004).
 31. Abdelmaguid, T.F., Dessouky, M.M. “A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problem”, *International Journal of Production Research*, **44**(21), pp. 4445-4464 (2006).
 32. Coelho, L.C., Cordeau, J.-F. and Laporte, G. “Dynamic and stochastic inventory-routing”, Technical Report, CIRRELT-201237, Montreal, Canada (2012b).
 33. Santos, E., Ochi, L.S., Simonetti, L. and et al. “A hybrid heuristic based on iterated local search for multivehicle inventory routing problem”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, **52**, pp. 197-204 (2016).
 34. Dabiri, N., Tarokh, M.J. and Alinaghian, M. “New mathematical model for the bi-objective inventory routing problem with a step cost function: a multi-objective particle swarm optimization solution approach”, *Applied Mathematical Modelling*, **49**(1), pp 302-318 (2017).
 35. Moin, N.H., Salhi, S. and Aziz, N.A.B. “An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem”, *International Journal of Production Economics*, **133**(1), pp. 334-343 (2011).
 36. Mjirda, A., Jarbouï, B., Rita, M. and et al. “A two phase variable neighborhood search for the multi-product inventory routing problem”, *Computers & Operations Research*, **52**, Part B, pp. 291-299 (2014).
 37. Popović, D., Vidović, M. and Gordana, R. “Variable neighborhood search heuristic for the inventory routing problem in fuel delivery”, *Expert Systems with Applications*, **39**(18), pp. 13390-13398 (2012).
 38. Fattahi, P. and Parand, H. “A model and constructive heuristic approach for multi-product multi-period inventory routing problem with backlogging and time window”, *Sharif journal of Industrial Engineering and Management*, **32.1**(1.1), pp. 99-111 (2016).
 39. Archetti, C., Christiansen, M. and Speranza, M.G. “Inventory routing with pickups and deliveries”, *European Journal of Operational Research*, **268**(1), pp. 314-324 (2018).
 40. Coelho, L.C. and Laporte, G. “The exact solution of several classes of inventory-routing problems”, *Computers & Operations Research*, **40**(2), pp. 558-565 (2013b).
 41. Cordeau, J.-F., Laganà, D., Roberto, M. and Francesca, V. “A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem”, *Computers & Operations Research*, **55**, pp. 153-166 (2015).
 42. Guemri, O., Bekrar, A., Bouziane, B. and et al. “GRASP-based heuristic algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory routing problem”, *JOR*, **14**(4), pp. 377-404 (2016).
 43. Archetti, C. and Speranza, M.G. “The split delivery vehicle routing problem: a survey”, *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, B. Golden, S. Raghavan and E. Wasil. Boston, MA, Springer US, pp. 103-122 (2008).
 44. Yu, Y., Chen, H. and Chu, F. “Large scale inventory routing problem with split delivery: a new model and Lagrangian relaxation approach”, In: *2005 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Beijing, China, (2005).
 45. Yu, Y., Chen, H. and Chu, F. “A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems”, *European Journal of Operational Research*, **189**(3), pp. 1022-1040 (2008).
 46. Yu, Y., Chu, C., Chen, H. and et al. “Large scale stochastic inventory routing problems with split delivery and service level constraints”, *Annals of Operations Research*, **197**(1), pp. 135-158 (2012).
 47. Huang, S.-H., Lin, P.-C. “A modified ant colony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**(5), pp. 598-611 (2010).
 48. Li, K., Chen, B., Sivakumar, A.L. and et al. “An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization”, *European Journal of Operational Research*, **236**(3), pp. 936-945 (2014).
 49. Mirzaei, S. and Seifi, A. “Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods”, *Computers & Industrial Engineering*, **87**, pp. 213-227 (2015).
 50. Liu, S.-C., Lu, M.-C. and Chung, C.-H. “A hybrid heuristic method for the periodic inventory routing problem”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **85**(9), pp. 2345-2352 (2016).
 51. Rabbani, M., Baghersad, M. and Jafari, R. “A new hybrid GA-PSO method for solving multi-period inventory routing problem with considering financial decisions”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, **6**(4), pp. 909-929 (2013).
 52. Park, Y.-B., Yoo, J.-S. and Park, H.-S. “A genetic algorithm for the vendor-managed inventory routing problem with lost sales”, *Expert Systems with Applications*, **53**, pp. 149-159 (2016).
 53. Azadeh, A., Elahi, S., Farahani, M.H. and et al. “A genetic algorithm-taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment”, *Computers & Industrial Engineering*, **104**, pp. 124-133 (2017).

54. Yang, X.-S. "A new meta-heuristic bat-inspired algorithm", In: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. Springer, pp. 65-74 (2010).
55. Luo, Q., Zhou, Y., Xie, J. and et al. "Discrete bat algorithm for optimal problem of permutation flow shop scheduling", *The Scientific World Journal*, pp. 1-15 (2014).
56. Fister, I., Rauter, S., Yang, X.S. and et al. "Planning the sports training sessions with the bat algorithm", *Neurocomputing*, **149**, pp. 993-1002 (2015).
57. Dehghani, H. and Bogdanovic, D. "Copper price estimation using bat algorithm", *Resources Policy*, **55**, pp. 55-61 (2018).
58. Osaba, E., Yang, X.-S., Diaz, F. and et al. "An improved discrete bat algorithm for symmetric and asymmetric traveling salesman problems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **48**(1), pp. 59-71 (2016).
59. Bektaş, T. and Gouveia, L. "Requiem for the Miller-tucker-zemlin subtour elimination constraints?", *European Journal of Operational Research*, **236**(3), pp. 820-832 (2014).
60. Yang, X.-S. "Artificial intelligence, evolutionary computing and meta-heuristic studies in computational intelligence", *Springer Publishing*, **427**(1), pp. 421-434 (2013).
61. Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y., Taguchi's Quality Engineering Handbook, Wiley Publishing (2005).