

# مدلسازی ریاضی و ارایه یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت برای

## مسأله مسیریابی - موجودی چند محصولی، چند وسیله‌ای همراه با جریان

### معکوس

محسن فرقانی، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمدعلی وحدت‌زاد\*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

احمد صادقیه، استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mvahdat@yazd.ac.ir](mailto:mvahdat@yazd.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۰

صفحه ۱۷۷-۱۹۴

### چکیده

یکی از مباحث مهم مدیریت عملیات در زنجیره تأمین، مسأله مسیریابی-موجودی است که تلفیقی از مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل می‌باشد. با توجه به ادبیات موضوع، این مقاله یکی از ویژگی‌های کاربردی مسایل مسیریابی تحت عنوان "حمل در بازگشت" که مشتریان به دو گروه خط رفت (تحويل کالا) و خط برگشت (دریافت کالا) تقسیم بندی می‌شوند، را با مسأله مسیریابی-موجودی چند-محصولی، چند-دوره‌ای، چند-وسیله‌ای ترکیب نموده و امکان کمبود و پس‌افت وجود ندارد. استراتژی مسیریابی از نوع ارسال در طی مسیر است. مسأله از نوع چند جمله‌ای نامعین سخت ( $NP - hard$ ) می‌باشد و زمان حل آن توسط روش‌های دقیق با بزرگتر شدن ابعاد مسأله به صورت نمایی افزایش می‌یابد. لذا در این مقاله پس از آشنایی با پیشینه تحقیق، یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارایه و در ادامه یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک کارا برای حل آن پیشنهاد شده و در پایان به تحلیل نتایج عددی حاصل از این الگوریتم برای مسایل آزمون پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، چند محصولی، حمل در بازگشت، مسیریابی-موجودی، ناوگان ناهمگن

### ۱- مقدمه

انجام شود. چراکه نبود هماهنگی در زنجیره تأمین باعث شده تا تولیدکننده و خریدار برای حداکثر کردن سود و یا حداقل نمودن هزینه‌های خود به صورت مستقل تصمیم‌گیری کرده و این امر منجر به بهینه‌سازی کل سیستم نمی‌شود. در سیستم تولید ناب، حداقل مقدار تحویلی محصولات به مشتریان، تابع طول مسیر حرکت یا مدت زمان گردش وسیله نقلیه

امروزه به دلیل افزایش رقابت و کاهش حاشیه سود، فعالیت‌های کل زنجیره تأمین از استخراج مواد خام تا تولید و رسیدن کالا و خدمات به مشتریان، نیازمند اتخاذ رفتاری مناسب و کارا است. با رشد روزافزون رقابت بین زنجیره‌های عرضه و توجه به هماهنگی و همکاری در مدیریت زنجیره تأمین موجب شده است تا پژوهش‌های بیشتری در این زمینه

پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۴، بهار ۱۳۹۷

بوده و برای مشتریان ایده‌آل‌ترین حالت آن است که برای هر کدام از آن‌ها یک وسیله نقلیه تخصیص داده شود تا طول مسیر حرکت و در نتیجه مقدار موجودی‌ها و هزینه‌های مربوط به خواب سرمایه (ذخیره موجودی) حداقل شود. چنین وضعیتی استفاده از تعداد زیادی وسیله نقلیه با ظرفیت پایین را ایجاب می‌کند. بدیهی است استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت کوچک، غالباً افزایش هزینه‌ها را بدنبال خواهد داشت. در سیستم توزیع ناب اختصاص یک وسیله نقلیه به هر مشتری، مقرون به صرفه نبوده (Letchford & Oukil 2009) و مسیریابی وسایل نقلیه، به منظور ایجاد شرایط حمل چندین محصول توسط یک وسیله نقلیه با ظرفیت بزرگ‌تر به چندین مشتری و در عین حال کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری محصولات در مراکز دریافت، مهم تلقی می‌شود. لذا مدیریت موجودی و حمل و نقل دو جزء کلیدی از مدیریت زنجیره تأمین به حساب می‌آیند و ترکیب این دو جزء به عنوان مسأله مسیریابی - موجودی<sup>۱</sup> (IRP) شناخته شده است. مسأله مسیریابی موجودی در بستر مدیریت موجودی توسط فروشنده<sup>۲</sup> (VMI) مطرح می‌شود. در VMI، مدیریت موجودی زنجیره تأمین به فروشنده سپرده می‌شود. یکی از منافع این روش استفاده یکنواخت از منابع حمل و نقل است که منجر به هزینه‌های توزیع کمتر می‌شود. مشتریان از سطوح خدمت بالاتری بهره‌مند شده و به دلیل استفاده مؤثر فروشنده از اطلاعات موجودی مشتریان، سطح در دسترس پذیری بالاتری برای محصولات ایجاد می‌شود.

یکی از مباحث کلیدی در حوزه مسیریابی که منجر به استفاده از ظرفیت بلااستفاده خودرو در هنگام برگشت به انبار مرکزی شده و صرفه‌جویی هزینه‌ای خوبی را به همراه خواهد داشت، حمل در بازگشت<sup>۳</sup> است. این ویژگی نقض کننده فرض پایه‌ای مسایل مسیریابی، یعنی هر مشتری باید حداکثر توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی شود، می‌باشد. در این حرکت سودآور مشتریان به دو گروه خط رفت و برگشت تقسیم می‌شوند. برای مثال در صنعت خواربارفروشی، سوپرمارکت‌ها مشتریان دریافت‌کننده کالا (خط رفت)، و تأمین‌کنندگان خواربار، مشتریان ارسال‌کننده کالا (خط برگشت) به شمار می‌آیند. با توجه به توضیحات فوق یکی از گونه‌های توسعه یافته مسایل مسیریابی - موجودی را می‌توان تحت عنوان مسأله مسیریابی - موجودی

با حمل در بازگشت<sup>۴</sup> معرفی کرده که تاکنون در ادبیات موضوع به آن پرداخته نشده است.

در این مقاله مسأله مسیریابی-موجودی با حمل برگشتی در حالت چند-دوره‌ای، چند-محصولی، چند-وسيله‌ای<sup>۵</sup> و با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل و نقل (هزینه‌های ثابت استفاده از ناوگان و هزینه متغیر مسیریابی) و نگهداری معرفی شده و تاکنون با چنین ترکیب عملیاتی در ادبیات موضوع مشاهده نشده است. زنجیره تأمین شامل یک شبکه توزیع دو سطحی بوده که در هر دوره مقدار مشخصی از هریک از محصولات با استفاده از ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه با ظرفیت محدود ولی متفاوت از یکدیگر، بین خرده-فروشان توزیع می‌شود. از آنجایی که IRP شامل مسأله VRP به عنوان یک زیرمسأله می‌باشد یک مسأله NP - hard است. در نتیجه راه حل بهینه برای اکثر مسایل IRP به دلیل پیچیدگی مسأله، احتمالاً در دسترس نیست و حل مسأله مذکور با استفاده از روش‌های حل دقیق<sup>۶</sup> به ویژه برای مسایل با ابعاد بزرگ، در زمان محاسباتی معقول امکانپذیر نمی‌باشد. بنابراین روش‌های ابتکاری و فراابتکاری مختلفی را برای این دست از مسایل توسعه داده‌اند؛ که با استفاده از آن‌ها می‌توان به جواب‌های تقریبی مناسب در زمان محاسباتی معقول دست یافت. در این مقاله یک الگوریتم ژنتیک کارا برای حل مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله، پیشنهاد شده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از حل مدل با نرم‌افزار GAMS مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است.

ساختار ادامه مطالب بدین صورت است که پس از آشنایی با پیشینه تحقیق در بخش دوم، در بخش سوم مدل ریاضی مسأله موردنظر ارائه می‌شود و برای حل آن در بخش چهارم یک الگوریتم ژنتیک کارا پیشنهاد می‌شود. بخش پنجم به بیان نتایج محاسباتی و تحلیل آن‌ها اختصاص یافته و سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

یکی از گونه‌های توسعه یافته مسایل مسیریابی وسایل نقلیه که در آن تصمیمات مدیریت موجودی در آن لحاظ شده است، مسأله مسیریابی-موجودی است که برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط بل و همکارانش معرفی شد (Bell et al.

(1983). در این مطالعه تنها هزینه‌های حمل و نقل در نظر گرفته شده بود، تقاضای مشتریان تصادفی و باید یک سطحی از موجودی مشتریان، تأمین شود. در طی سه دهه گذشته ویژگی‌های زیادی در مسایل IRP لحاظ شده و با توجه به اهمیتی که هریک از محققان برای این پارامترها قایل شده‌اند، دسته‌بندی‌های مختلفی را برای مسایل IRP ارائه داده‌اند. برای مثال کلیوگت و همکاران و همچنین آدلمن مسأله مسیریابی موجودی را بر اساس چهار ویژگی اساسی تقسیم‌بندی کردند که شامل: ۱- افق برنامه‌ریزی، ۲- تقاضا، ۳- وسایل نقلیه و ۴- استراتژی تحویل (Adelman, Kleywegt, Nori & Savelsbergh, 2002). اندرسون و همکاران چهار مشخصه فوق را بسط داده و سه ویژگی: ۱- توپولوژی (که بیانگر شبکه توزیع یعنی یک به چند<sup>۷</sup>، چند به یک<sup>۸</sup> و یک به یک است)، ۲- تصمیمات مدیریت موجودی، ۳- ترکیب ناوگان حمل را به دسته‌بندی خود اضافه کرده‌اند (Andersson, Christiansen & Fagerholt, 2010). کوئلیو و همکاران با توجه به تمام مطالعاتی که تا آن زمان انجام شده بود، یک دسته‌بندی استاندارد را برای مسایل مسیریابی- موجودی مطرح کردند. در ابتدا یک دسته‌بندی هفت فاکتوری برای مسایل پایه‌ای IRP ارائه داده که شامل: ۱- افق برنامه‌ریزی، ۲- توپولوژی یا ساختار مسأله، ۳- نوع مسیریابی، ۴- نوع سیاست موجودی، ۵- تصمیمات مربوط به موجودی (سفارشات به تعویق افتاده<sup>۹</sup>، فروش از دست رفته<sup>۱۰</sup> و موجودی غیر منفی)، ۶- نوع ناوگان و ۷- سایز ناوگان است؛ سپس مسایل توسعه داده شده از مسایل کلاسیک مسیریابی- موجودی را معرفی کرده (شامل تولید-مسیریابی-موجودی، مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی، مسایل چند محصولی) و در نهایت مسایل IRP را از لحاظ نوع تقاضا (قطعی یا احتمالی) تقسیم‌بندی کردند (Coelho, Cordeau & Laporte, 2014). در این تحقیق با توجه به مشخصه‌های مسأله تعریف شده در مقدمه، به بحث و بررسی پیشینه تحقیق تعدادی از این ویژگی‌ها مانند روش حل، افق برنامه‌ریزی، چندوسیله‌ای، چندمحصولی، حمل در بازگشت پرداخته می‌شود. یکی از معیارهای موجود در ادبیات موضوع مسایل IRP، تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس افق برنامه‌ریزی است که شامل تک‌پریودی، چند پریودی و افق زمانی نامحدود است

(Moin, Salhi, 2007). در خصوص مسایل تک دوره‌ای می‌توان به کار فدرگرن و زیپکین برای برنامه‌ریزی یکپارچه مسایل مسیریابی و تخصیص موجودی اشاره کرد که یک کارخانه با ظرفیت محدود و چند مشتری با تقاضای احتمالی را مورد مطالعه قرار دادند و از استراتژی ارسال در طی مسیر استفاده نمودند (Federgruen, Zipkin, 1984). چاین و همکاران یک مسأله تک دوره‌ای را به گونه‌ای بررسی کردند که با انتقال اطلاعات پایان هر دوره به دوره بعد، یک مدل برنامه‌ریزی چند دوره‌ای شبیه‌سازی می‌شود و الگوریتم ابتکاری ارائه شده، سعی در حداکثر کردن سود روزانه دارد (Chien, Balakrishnan & Wong, 1989). در خصوص مسایل مسیریابی-موجودی تک دوره‌ای با تقاضای احتمالی و استراتژی ارسال چندگانه می‌توان کار باسوک و ارنست (Bassok, Ernst, 1995)، برمن و لارسون (Berman, Larson, 2001) و هووانگ و لین (Huang, Lin, 2010) با ناوگان همگن و هیرر و لوی (Herer, Levy, 1997) با ناوگان ناهمگن را نام برد. کاسیرس کروز و همکاران ترکیبی از شبیه‌سازی و روش‌های ابتکاری را برای مسأله تک دوره‌ای با تقاضای احتمالی ارائه (Cáceres-Cruz et al. 2012) و همچنین مس و همکاران این دست از مسایل را در مسأله جمع‌آوری ضایعات در حالت پویا مورد بررسی قرار دادند (Mes, Schutten & Rivera, 2014). برخی از محققان بر روی مسایل IRP با افق زمانی نامحدود (پیوسته) تمرکز کرده‌اند؛ برای مثال بلامنفلد و همکارانش هزینه‌های توزیع، موجودی و آماده‌سازی برای تولید با استراتژی ارسال مستقیم در نظر گرفتند (Blumenfeld, 1985). آنیلی و فدرگرون یک سیستم توزیع با یک انبار مرکزی و تعدادی مشتری که در یک منطقه جغرافیایی پراکنده شده‌اند را بررسی کردند و برای حل آن از متد خوشه‌بندی استفاده نمودند. استراتژی تحویل آن‌ها چندگانه بود (Anily, Federgruen, 1990). از دیگر تحقیقات در خصوص مسایل IRP با افق زمانی نامحدود می‌توان به کار گالگو و سیمچی لوی (Gallego, Simchi-Levi, 1990)، رآ و آغزاف (Raa, Aghezzaf, 2008) و ژائو و همکاران (Zhao, Chen & Zang, 2009) اشاره کرد. سایر مطالعات بیشتر در قالب چند دوره‌ای بوده است. برای مثال درور و ترودویو در پژوهش خود به

ارزیابی مسأله مسیریابی-موجودی از دیدگاه ارزش جریان نقدی مرتبط با توزیع یک محصول در قالب استراتژی ارسال مستقیم پرداختند (Dror, Trudeau, 1996). ریمن و همکاران به بررسی مسأله مسیریابی-موجودی با تقاضا و زمان سفر احتمالی پرداخته و در آن یک وسیله نقلیه با ظرفیت محدود، محصولات را به تعداد محدودی مشتری ارسال می‌کند و از هردو استراتژی ارسال مستقیم و چندگانه استفاده شده است (Reiman, Rubio & Wein, 1999). در خصوص رویکرد چنددوره‌ای، اکثر مطالعات انجام شده در مسایل مسیریابی-موجودی به صورت تک محصولی و با استفاده از یک نوع وسیله نقلیه برای فرآیند تحویل و در یک محیط VMI قطعی، صورت گرفته است (Cordeau et al., 2015). از جمله مطالعات این حوزه که با استفاده از الگوریتم‌های دقیق مسأله را حل نموده‌اند می‌توان به کار سولالی و سورا (Solyali, Sural, 2011) و کار برتازی و همکاران اشاره کرد (Bertazzi, Paletta & Speranza, 2008) و از جمله روش‌های ابتکاری می‌توان به کار آرکتی و همکاران رجوع کرد (Archetti et al., 2012).

در خصوص مسایل چندوسیله‌ای تاکنون چندین مطالعه انجام شده است. کونلیو و همکاران یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی<sup>۱۱</sup> ترکیب شده با روش دقیق برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط را برای این دست از مسایل ارائه دادند. در این تحقیق چندین ویژگی سازگار با یکدیگر را ترکیب نموده و به صورت محدودیت اضافی و یا به صورت جریمه در تابع هدف مورد استفاده قرار داده‌اند، که به شرح زیر است: ۱- مقدار سازگاری<sup>۱۲</sup>، ۲- نرخ پرکردن خودرو<sup>۱۳</sup>، ۳- سفارش تا حد معین<sup>۱۴</sup>، ۴- ثبات و سازگاری راننده<sup>۱۵</sup>، ۵- ثبات و سازگاری نسبی راننده<sup>۱۶</sup> و ۶- فاصله بین بازدیدها<sup>۱۷</sup> (Coelho, Cordeau & Laporte, 2012b). همچنین وی و همکارانش یک روش شاخه و برش را برای کلاس‌های مختلف مسأله مسیریابی-موجودی چندوسیله‌ای ارائه داده و به منظور بهبود کیفیت جواب‌های بدست آمده از درخت جستجو، از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است (Coelho, Laporte, 2013a). آدولیزاک و همکاران یک مدل ریاضی جدید و الگوریتم دقیق شاخه و برش را چند حالت از مسأله مسیریابی-

موجودی چندوسیله‌ای پیشنهاد داده و از محدودیت‌های شکست متقارن<sup>۱۸</sup> برای بهبود فرمولاسیون و از روش فراابتکاری ALNS برای تعیین یک حد بالا برای مسأله مورد نظر استفاده نموده‌اند (Adulyasak, Cordeau & Jans, 2014). دیسولنیرز و همکاران یک الگوریتم شاخه-قیمت-برش را برای مسأله مسیریابی-موجودی چندوسیله‌ای توسعه داده و از یک متد ابتکاری برجسب موقت<sup>۱۹</sup> برای حل زیرمسأله‌های حاصل از تولید ستون<sup>۲۰</sup> بهره برده‌اند (Desaulniers, Rakke & Coelho, 2016). همکاران یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی مبتنی بر جستجوی محلی تکرارشونده<sup>۲۱</sup> را برای مسأله مسیریابی-موجودی چندوسیله‌ای ارائه کردند (Santos et al., 2016).

مسأله مسیریابی-موجودی چندمحصولی، چندوسیله‌ای برای نخستین بار توسط کونلیو و لاپورته مطرح شد. آن‌ها یک مدل ریاضی خطی عددصحیح مختلط را برای آن ارائه و برای حل آن از روش دقیق شاخه و برش استفاده کردند (Coelho, Laporte, 2013b). گومری و همکاران یک الگوریتم ابتکاری حریصانه<sup>۲۲</sup> را برای مسایل چندمحصولی، چندوسیله‌ای ارائه نمودند (Guemri et al., 2016). به دلیل پیچیدگی مسایل IRP، اغلب روش‌های حل پیشنهادی توسط محققان الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و یا ترکیبی است که جواب‌های نزدیک به بهینه را دارا می‌باشند. از جمله روش‌های حل دقیق که برای مسایل IRP پیشنهاد شده می‌توان به کارهای کونلیو و همکاران (Coelho, Cordeau & Laporte, 2012a), (2012b), کونلیو و لاپورته (Coelho, Laporte, 2013a), (2014)، آدولیزاک و همکاران (Adulyasak, Cordeau & Jans, 2014)، آرکتی و همکاران (Archetti et al., 2014) و دیسولنیرز و همکاران (Desaulniers, Rakke & Coelho, 2016) اشاره کرد. در خصوص روش‌های ابتکاری که اغلب مبتنی بر تجزیه مسأله به زیرمسأله‌های سلسله‌مراتبی هستند، می‌توان به کار کمبل و ساولزبرگ که الهام گرفته از فعالیت شرکت بین المللی گازهای صنعتی پراکسایر بود، اشاره کرد. در این کار مسأله مسیریابی-موجودی را به صورت یک مسأله تخصیص در نظر گرفته و درخصوص اینکه چه مقدار و چه زمانی کالا به مشتریان باید تحویل داده شود و مسیریابی مسیرها باید به چه صورت باشد، تصمیم‌گیری می‌شود

است. از جمله مطالعات اخیر در حوزه VRPB می‌توان به کار جوزی برانداو (Brandão, 2016)، ایسترل و باورن-هانسیل (Oesterle, Bauernhansl, 2016) اشاره کرد. اما تاکنون در حوزه IRP چنین ترکیبی مشاهده نشده و فقط در تعداد محدودی از تحقیقات، مسأله مسیریابی-موجودی را با یکی از گونه‌های کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه یعنی بازه زمانی<sup>۲۴</sup> ترکیب نموده‌اند که می‌توان به کار لیو و لی که مسأله IRPTW تک دوره‌ای، تک کالایی و تقاضای احتمالی و ناوگان ناهمگن را در نظر گرفته (Liu, Lee, 2011)، بنوایست و همکاران که یک مسأله IRPTW سه سطحی، با افق زمانی نامحدود، تقاضای قطعی پویا و تک محصولی را بررسی کرده‌اند (Benoist et al., 2011)، سینگ و همکاران که مسأله IRPTW با تقاضای قطعی ایستا، چندمحصولی و ناوگان ناهمگن محدود را مطرح کردند (Singh, Arbogast & Neagu, 2015) و همچنین رحیمی و همکاران که مسأله IRPTW در یک زنجیره دوسطحی، با تقاضای قطعی پویا برای چند محصول در افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای را لحاظ نموده‌اند (Rahimi, Baboli & Rekik, 2017)، اشاره کرد.

### ۳- مدل ریاضی

در مقایسه با مطالعات پیشین، در این مقاله یک مسأله مسیریابی-موجودی با افق زمانی چنددوره‌ای، چندمحصولی، چندوسيله‌ای با ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه و ظرفیت محدود، تحت استراتژی توزیع ارسال در طی مسیر همراه با حمل در بازگشت مورد بررسی قرار گرفته 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 فرضیات فوق، مدل ریاضی مسأله در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته شده است.

### ۳-۱- نمادگذاری

$G$  تعداد کل مشتریان؛  $G = \{1, \dots, a, a + 1, a + 2, \dots, a + b\}$   
 $i, j, s, r$  اندیس گره تقاضا (مشتریان)؛ و همچنین  $i = 0$  or  $a + b + 1$  بیانگر دپوی مرکزی هستند.  
 $A = \{1, 2, \dots, a\}$  اندیس گره مشتریان خط رفت؛

(Campbell, Savelsbergh, 2004b). عبدالمجید و همکاران که یک مسأله مسیریابی-موجودی چنددوره‌ای، با در نظر گرفتن حالت پس‌افت<sup>۲۳</sup> را بررسی نموده (Abdelmaguid, Dessouky & Ordóñez, 2009) و استالهن و همکاران الگوریتم‌های ابتکاری بهبوددهنده و سازه‌ای را به منظور دستیابی به یک راه‌حل تقریبی برای مسأله IRP ارائه دادند (Stålhan et al., 2012). ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را برای مسأله مسیریابی-موجودی مطرح نموده و بارد و نانانیکول یک آنالیز مقایسه‌ای را برای یک‌سری از روش‌های ابتکاری ارائه شده برای مسایل IRP چند دوره‌ای در یک زنجیره تأمین تولیدی، انجام داده‌اند (Bard, Nananukul, 2009).

از جمله کاربردهای روش‌های فراابتکاری برای مسایل مسیریابی-موجودی می‌توان به روش بهینه‌سازی کلونی مورچه برای یک مسأله مسیریابی-موجودی تک محصولی با ناوگان ناهمگن و مجاز بودن کمبود در کار هووانگ و لین (Huang, Lin, 2010)، روش جستجوی ممنوع به همراه متد آزادسازی لاگرانژ برای ایجاد کران پایین در کار لی و همکاران برای یک شرکت پتروشیمی (Li et al., 2014)، الگوریتم‌های فراابتکاری تبرید شبیه‌سازی شده و جستجوی ممنوع در کار میرزایی و سیفی (Mirzaei, Seifi, 2015) و الگوریتم ازدحام ذرات در کار لیو و همکاران (Liu, Lu & Chung, 2016) اشاره کرد. در خصوص الگوریتم ژنتیک می‌توان کار ربانی و همکاران که ترکیبی از ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نموده (Rabbani, Baghersad & Jafari, 2013)، کار پارک و همکاران که از الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسأله تک محصولی و مجاز بودن کمبود و ناوگان همگن محدود از وسایل نقلیه در یک زنجیره دوسطحی بکار گرفته (Park, Yoo & Park, 2016) و همچنین کار آزاده و همکاران که در کنار الگوریتم ژنتیک از طراحی آزمایشات تاگوچی برای محاسبه مقادیر پارامترها بهره برده‌اند (Azadeh et al., 2017)، را نام برد. مسأله تعریف شده در این تحقیق از ترکیب یکی از گونه‌های کلاسیک مسایل مسیریابی وسایل نقلیه، بنام حمل در بازگشت که برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط دیف و بودین مطرح شد، با مسأله مسیریابی موجودی بوجود آمده

$b$  اندیس گره مشتریان خط برگشت؛  $B = \{a + 1, \dots, a + b\}$   
 $m$  اندیس وسایل نقلیه؛  $M = \{1, 2, \dots, m\}$   
 $p$  اندیس محصولات قابل توزیع؛  $P = \{1, 2, \dots, p\}$   
 $t$  اندیس دوره‌های زمانی؛  $T = \{1, 2, \dots, t\}$

### ۴-۳- فرمولاسیون

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{a+b} UC_m^t \cdot x_{0jmt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=0}^{a+b} \sum_{j=1}^{a+b+1} \sum_{m=1}^M WC_m^t \cdot d_{ij} \cdot x_{ijmt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{a+b} \sum_{p=1}^P h_i^p \cdot I_{it}^p \quad (1)$$

$$I_{i,t-1}^p - E_{it}^p + \sum_{m=1}^M RA_{imt}^p = I_{it}^p; \forall i \in A; p \in P; t \in T \quad (2)$$

$$I_{i,t-1}^p - \sum_{m=1}^M RB_{imt}^p + R_{it}^p = I_{it}^p; \forall i \in B; p \in P; t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{r=0}^l F_{rimt}^p - \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{l+b+1} F_{ismt}^p = \sum_{k=1}^K RA_{ikt}^p \quad (4)$$

$\forall i \in A; p \in P; t \in T$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=a+1}^{a+b+1} F_{iskt}^p - \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^{a+b} F_{rimt}^p = \sum_{m=1}^M RB_{imt}^p \quad (5)$$

$\forall i \in B; p \in P; t \in T$

$$\sum_{p=1}^P RA_{jmt}^p \times w^p \times x_{ijmt} \leq \sum_{p=1}^P F_{ijmt}^p \times w^p \leq \left( QV_m - \sum_{p=1}^P RA_{imt}^p \times w^p \right) x_{ijmt}; \quad (6)$$

$i = 0, 1, \dots, a; j = 1, 2, \dots, a + b + 1; \forall m \in M; t \in T$

$$0 \leq \sum_{p=1}^P F_{ijmt}^p \times w^p \leq QV_m \cdot x_{ijmt}; i = a, \dots, a + b; j = a + 1, \dots, a + b + 1; \forall m \in M; t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^P I_{it}^p \leq QC_i; \quad \forall i \in G \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{a+b} x_{ijmt} \leq 1; j = 1, \dots, a + b + 1; \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{a+b} x_{0jmt} \leq 1; \quad \forall m \in M; \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{a+b} x_{i,(a+b+1)mt} = \sum_{j=1}^{a+b} x_{0jmt}; \forall m \in M; \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^{a+b} \sum_{r \neq i} x_{irmt} - \sum_{j=1}^{a+b+1} \sum_{r \neq j} x_{rjmt} = 0; \quad (12)$$

$\forall r = 1, 2, \dots, a + b; m \in M; t \in T$

### ۳-۲- پارامترهای مسئله

$UC_m^t$  هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه نوع  $m$  در دوره  $t$  ( $m \in M$ )

$WC_m^t$  هزینه متغیر مسیریابی برای هر وسیله نقلیه نوع  $m$  در دوره  $t$  (به ازای هر واحد مسافت طی شده).

$E_{im}^t$  تقاضای مشتری  $i$  نام در خط رفت برای  $p$  محصول در دوره  $t$  از نظر وزنی ( $i \in A$ ).

$R_{im}^t$  تقاضای مشتری  $i$  نام در خط برگشت برای محصول  $p$  نام در دوره  $t$  از نظر وزنی ( $i \in B$ ).

$QV_m$  ظرفیت وسیله نقلیه  $m$  نام از نظر وزنی.

$d_{ij}$  طول یال بین دو مشتری  $i$  و  $j$  بطوریکه  $i, j \in G$

$c_{ijmt}$  هزینه تردد بین دو مشتری  $i$  و  $j$  توسط وسیله نقلیه نوع  $m$  در دوره  $t$  ( $c_{ijmt} = d_{ij} \times WC_m^t$ ).

$h_i^p$  هزینه نگهداری محصول  $p$  نام توسط مشتری  $i$  نام.

$w^p$  وزن محصول  $p$  نام برحسب واحد ظرفیت.

$QC_i$  ظرفیت موجودی انبار مشتری  $i$  نام از نظر وزنی.

$M$  یک عدد مثبت بسیار بزرگ.

### ۳-۳- متغیرهای تصمیم

اگر مشتری  $i$  نام بعد از مشتری  $i$  نام توسط ماشین  $m$  نام در دوره  $t$  سرویس‌دهی شود. در غیر اینصورت

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

$RA_{imt}^p$  مقدار کالای نوع  $p$  نام تحویلی به مشتری  $i$  نام توسط وسیله‌نقلیه  $m$  نام در آغاز دوره  $t$ .

$RB_{imt}^p$  مقدار کالای نوع  $p$  نام دریافتی از مشتری  $i$  نام توسط وسیله‌نقلیه  $m$  نام در آغاز دوره  $t$ .

$F_{ijmt}^p$  مقدار بار محصول  $p$  نام که توسط وسیله نقلیه  $m$  نام از مشتری  $i$  به  $j$  در دوره  $t$  جابجا می‌شود.

هر مشتری تنها یکبار و توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود. اگر امکان شروع تور از همه مشتریان خط رفت و برگشت وجود داشته باشد از محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌شود. این دو محدودیت نشان‌دهنده آن هستند که هر وسیله نقلیه (شروع هر تور) از دپوی مرکزی (توزیع-کننده) بوده و نهایتاً به دپو باز خواهد گشت. چنانچه فرض شود که شروع تمام مسیرها حتماً باید از مشتریان خط رفت باشد از محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ استفاده می‌شود:

$$\sum_{j=1}^a x_{0jmt} \leq 1; \quad m \in M; \forall t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^{a+b} x_{i(a+b+1)mt} = \sum_{j=1}^a x_{0jmt}; \quad \forall m \in M; \forall t \in T \quad (21)$$

محدودیت ۱۲ پیوستگی مسیر را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۳ بیانگر آنست که ابتدا باید تمام مشتریان خط رفت سرویس‌دهی شده، سپس مشتریان خط برگشت خدمت-رسانی بشوند و اولویت سرویس‌دهی با مشتریان خط رفت است. محدودیت ۱۴ هم برای رفع زیرتور در مسأله مسیریابی وسایل نقلیه است. محدودیت ۱۵ و ۱۶ به ترتیب بدان معنا هستند که ابتدا مسیری از دپو به دپو وجود ندارد. در ضمن هزینه جابجایی از دپو به دپو هم صفر است. محدودیت‌های ۱۷ الی ۱۹ نشان‌دهنده محدودیت‌های علامتی هستند.

### ۳-۵- خطی سازی

با توجه به محدودیت ۶، مسأله تعریف شده یک مدل ریاضی غیرخطی (MINLP<sup>۲</sup>) است که پس از خطی‌سازی این نامعادله و تبدیل آن به محدودیت‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ و جایگزینی آن‌ها با محدودیت ۶، مسأله بصورت یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط تبدیل خواهد شد.

$$\sum_{p=1}^P F_{ijmt}^p \cdot w^p \leq (QV_m - \sum_{p=1}^P E_{it}^p \cdot w^p) x_{ijmt}; \quad i = 0, 1, \dots, a; j = 1, \dots, a \quad \forall m \in M; t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{p=1}^P F_{ijmt}^p \cdot w^p \leq (QV_m - \sum_{p=1}^P RA_{imt}^p \cdot w^p); \quad i = 0, 1, \dots, a; j = 1, \dots, a \quad \forall m \in M; t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{i=l+1}^{a+b} \sum_{j=1}^a \sum_{m=1}^M x_{ijmt} = 0; \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijmt} \leq |S| - 1; \quad \forall m \in M, S \subset N, 2 \leq |S| \leq a + b - 2 \quad (14)$$

$$d_{0,a+b+1} = d_{a+b+1,0} = 0 \quad (15)$$

$$C_{0,a+b+1,m,t} = 0 \quad (16)$$

$$x_{ijkt} \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$RA_{imt}^p \geq 0; RB_{imt}^p \geq 0 \quad (18)$$

$$I_{it}^p \geq 0; F_{ijmt}^p \geq 0 \quad (19)$$

تابع هدف بیانگر هزینه‌های مربوط به هزینه‌های ثابت استفاده از ناوگان حمل‌ونقل، هزینه‌های متغیر مسیریابی و هزینه‌های نگهداری موجودی پایان دوره در انبار مشتری است. محدودیت ۲، معادله 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، معادله تعادل موجودی برای خط برگشت و شامل تقاضای مشتریان خط برگشت، کالای دریافتی از آن‌ها و موجودی هر کالا در انتهای هر دوره برای هر مشتری خط برگشت است. محدودیت ۴ رابطه بین کالای تحویلی به مشتریان و مقدار کالای حمل شده از هر نوع، در مسیرهای رفت مسأله در هر دوره است. محدودیت ۵، رابطه تعادلی بین کالای دریافتی از مشتریان و مقدار کالای حمل شده از هر نوع، در مسیرهای برگشت مسأله در هر دوره را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۶ و ۷ برای محدود کردن جریان کالای حمل شده توسط هر وسیله نقلیه که به یک مشتری وارد می‌شود و از آن خارج می‌شود، است. و 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 وسیله نقلیه بین دو مشتری، طبیعتاً جرابانی هم برقرار نخواهد بود. محدودیت ۶ جریان کالا را برای مشتریان خط رفت و محدودیت ۷ برای مشتریان خط برگشت نشان می‌دهد. محدودیت ۸ بیانگر حد مجاز ظرفیت هر مشتری برای نگهداری کالاهای مختلف است. محدودیت ۹ بیانگر فرض پایه‌ای مسیریابی است، یعنی

بررسی است. در این مقاله برای نمایش ذرات، از روش مرسوم و نوظهور رشته‌ای<sup>۲۸</sup> استفاده شده است.

$$\sum_{p=1}^P F_{ijmt}^p \cdot w^p \geq \left( \sum_{p=1}^P RA_{ijmt}^p \cdot w^p \right) - M(1 - x_{ijmt});$$

$$i = 0, \dots, a; j = 1, \dots, a \forall m \in M; t \in T \quad (24)$$

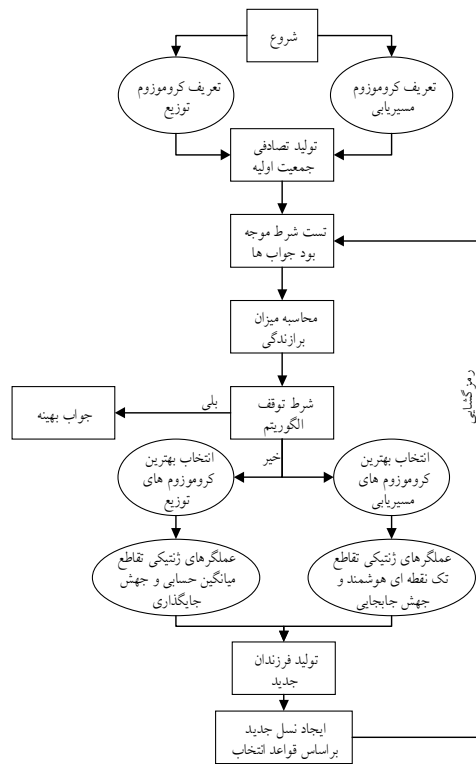
#### ۴- الگوریتم پیشنهادی

روش مورد استفاده برای حل مدل ریاضی از جمله مباحث مهم در ادبیات مسائل بهینه‌سازی است. از آنجاییکه این مسأله جزء مسائل چند جمله‌ای نامعین سخت بوده و به دلیل تنوع متغیرها و ترکیب متغیرهای باینری و غیرمنفی، با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسأله ضمن افزایش پیچیدگی مسأله، حل آن‌ها با استفاده از روش‌های دقیق در زمان محاسباتی معقول امکانپذیر نیست. در این مقاله با توجه به پیشینه تحقیق، از یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک که کارایی آن توسط محققان در مسایل مشابه به اثبات رسیده است، برای حل مدل ریاضی پیشنهاد می‌شود. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجوی تصادفی بوده که با الهام از قوانین تکامل<sup>۲۶</sup>، برای اولین بار توسط جان هالند و همکارانش معرفی شد (اشمیت ۲۰۰۴).

این متد که از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی تلقی می‌شود دارای این مزیت است که به جای اینکه از یک نقطه اولیه شروع به جستجو نماید، یک جمعیت از نقاط فضای جستجو را به عنوان فضای اولیه برای شروع در نظر می‌گیرد و با عملگرهای ژنتیکی، سعی در بهبود نسل‌های بعدی دارد. انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌ها ایده اساسی این الگوریتم است. چنانچه فرض شود مجموعه خصوصیات هر نسل، توسط کروموزوم‌های آن به نسل بعدی انتقال می‌یابد، هر ژن در این کروموزوم‌ها نماینده یک خصوصیت خواهد بود. نمای کلی این الگوریتم در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این روش جواب به دست آمده لزوماً بهترین جواب ممکن نیست اما با توجه به ابعاد و پیچیدگی و سایر شرایط مسأله، یک جواب خوب و مناسب خواهد بود.

#### ۴-۱- نحوه نمایش جواب‌ها

یکی از مهمترین تصمیماتی که در زمان طراحی یک الگوریتم فراابتکاری می‌بایستی اتخاذ شود، نحوه نمایش جواب‌ها<sup>۲۷</sup> و نیز چگونگی برقراری ارتباطی مؤثر، یکتا و قابل شناسایی میان جواب‌ها و فضای جستجوی مسأله مورد



شکل ۱. نمایش کلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

#### ۴-۲- تولید جمعیت اولیه

به طور کلی کیفیت جواب‌های آغازین بر عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری تأثیر بسزایی دارد و طراحی روشی مؤثر برای تولید جواب‌های اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو، در الگوریتم پیشنهادی، برای تولید جواب اولیه، روشی شبه تصادفی طراحی شده است که گام‌های آن به شرح زیر است: ۱- یک توالی تصادفی از وسایل نقلیه و مشتریان خط رفت و برگشت در هر دوره به منظور ایجاد جمعیت اولیه، ایجاد می‌شود. ۲- شرط تخصیص هر مشتری به یک وسیله نقلیه، زمانبندی ارسال برای آن مشتری و ظرفیت خود وسیله نقلیه است و از آنجاییکه هر وسیله نقلیه هر مشتری را حداکثر یک‌بار می‌تواند ملاقات کند، بنابراین آن وسیله نقلیه باید ظرفیت لازم برای تقاضای آن مشتری را داشته باشد. لذا از وسیله نقلیه اول شروع کرده و مشتریان خط رفت را چنانچه از لحاظ ظرفیت و زمان‌بندی مشکلی



ستون (به تعداد مشتریان خط رفت و برگشت) و P سطر (به تعداد محصولات) وجود خواهد داشت. به عنوان نمونه برای دوره اول، کروموزوم توزیع به شکل زیر است (جدول ۲).

	C1	C2	C3	C4	C5	
دوره اول	۲۰	۰	۱۷	۱۸	۱۰	P <sub>1</sub>
	۱۴	۰	۰	۲۳	۱۵	P <sub>2</sub>
	۲۳	۳۲	۰	۲۲	۰	P <sub>3</sub>
	۰	۲۵	۳۲	۰	۰	P <sub>4</sub>
	۲۹	۱۸	۲۴	۰	۱۱	P <sub>5</sub>

جدول ۲. نمایش کروموزوم موقعیت:  $A = 3, B = 2, P = 5$

ستون اول این کروموزوم نشان می‌دهد که در دوره اول، مقدار ۲۰ واحد از محصول نوع اول، ۱۴ واحد محصول نوع دوم و الی آخر به مشتری شماره یک، توسط وسیله نقلیه سوم که در کروموزوم مسیریابی مشخص شده (جدول ۱) ارسال شده است. بعد از محاسبه جمعیت اولیه، باید بهترین جواب موجود را یافته و بر روی آن عملگرهای تقاطع و جهش انجام شود و مراحل الگوریتم تا رسیدن به بهترین جواب ممکن ادامه یابد.

#### ۴-۴- عملگرهای ژنتیکی

##### ۴-۴-۱ عملگر تقاطع کروموزوم توزیع

در این مدل از روش میانگین حسابی استفاده شده است. به عنوان نمونه اگر کروموزوم‌های زیر مبین قسمتی از ماتریس توزیع باشند، می‌توان به فرزندان زیر برسیم (شکل ۲).

Parent <sub>1</sub>	۲۰	۱۰	۱۵	۱۶	۵	۱۱
Parent <sub>2</sub>	۱۴	۱۲	۶	۱۰	۱۱	۹

Child <sub>1</sub>	$P_1(\alpha) + P_2(1-\alpha)$	$0 \leq \alpha \leq 1$	$\alpha = 0.4$
Child <sub>2</sub>	$P_2(\alpha) + P_1(1-\alpha)$		

نداشته باشد، به آن وسیله اختصاص داده و سپس سراغ مشتری بعدی رفته و با توجه به گنجایش باقیمانده وسیله نقلیه و شروط فوق، روند تخصیص برای توالی ایجاد شده از مشتریان ادامه یافته تا ظرفیت خودرو تکمیل شود. فرآیند مذکور عیناً برای مشتریان خط برگشت اعمال می‌شود. سپس سراغ ماشین بعدی رفته و روند تخصیص برای مشتریان باقیمانده ادامه پیدا می‌کند. این مرحله برای تمام دوره‌ها تکرار می‌شود. ۳- در مرحله آخر مقدار بار تحویلی و یا دریافتی از مشتریان و میزان موجودی پایان دوره را با توجه به ماتریس‌هایی که در قسمت بعدی توضیح داده می‌شوند، مشخص می‌کنیم.

#### ۴-۳- تعریف کروموزوم‌ها

##### ۴-۳-۱- کروموزوم مسیریابی

این کروموزوم، زمانبندی و توالی حرکت وسایل نقلیه را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند در هر دوره بایستی از چه وسیله نقلیه‌ای استفاده شود. این کروموزوم دو بعدی بوده و حاوی  $A + B + M - 1$  ستون و T سطر است که  $M - 1$  مقدار از هر سطر صفر و مابقی توالی حرکت وسایل نقلیه در بین مشتریان است. برای مثال در یک افق زمانی دو پرودی، چنانچه در سطرهای کروموزوم مذکور به اعداد زیر برسیم (جدول ۱)، سطر اول نشان دهنده آن است که وسیله اول، ابتدا مشتری سوم و سپس دوم را پوشش دهد. از وسیله دوم استفاده نمی‌شود، ماشین سوم مشتری اول و مشتری چهارم و در نهایت وسیله چهارم تنها به مشتری پنجم، خدمت‌رسانی می‌کند (با حفظ اولویت سرویس‌دهی به مشتریان خط رفت).

دوره اول	۳	۲	۰	۰	۱	۴	۰	۵
دوره دوم	۰	۲	۱	۰	۰	۳	۵	۴

جدول ۱. کروموزوم موقعیت  $A = 3, B = 2, M = 4, T = 2$

##### ۴-۳-۲- کروموزوم توزیع

این کروموزوم مربوط به توزیع محصولات می‌باشد و دارای سه بعد به اندازه  $P * (A + B) * T$  است. یعنی برای هر دوره از افق برنامه‌ریزی، یک ماتریس دوبعدی با  $A + B$

سپس مشتری دوم و در نهایت پنجم حرکت نماید. بنابراین کروموزوم حاصل به صورت شکل ۶ خواهد بود:

Child <sub>1</sub>	۱	۴	۳	۶	۲	۵
Child <sub>2</sub>	۶	۲	۴	۱	۳	۵

شکل ۶. فرزند تولیدی پس از اصلاحات اولیه هوشمندانه

در نهایت با توجه به اینکه ابتدا بایستی مشتریان خط رفت و سپس برگشت، خدمت بگیرند، کروموزوم اصلاحی به شکل زیر در می‌آید:

Child <sub>1*</sub>	۱	۳	۲	۴	۶	۵
Child <sub>2*</sub>	۲	۱	۳	۶	۴	۵

شکل ۷. فرزندهای تولیدی پس از اصلاحات نهایی هوشمندانه

#### ۴-۴-۴- عملگر جهش کروموزوم مسیریابی

در این مدل از عملگر جهش جابجایی<sup>۳۰</sup> استفاده می‌شود که به صورت تصادفی دو ژن را انتخاب نموده و مقادیر آنها را جابجا می‌کند. به عنوان نمونه می‌توان در کروموزوم‌های فوق، با جابجایی مشتریان، به فرزند جدیدی برسیم. البته بایستی ویژگی حق تقدم مشتریان رفت بر برگشت، همچنان حفظ شود (شکل ۸).

Child <sub>1*</sub>	۱	۳	۲	۴	۶	۵
Child <sub>2*</sub>	۲	۱	۳	۶	۴	۵

➔

New Child <sub>1*</sub>	۲	۳	۱	۴	۶	۵
New Child <sub>2*</sub>	۲	۱	۳	۶	۵	۴

شکل ۸. نمایش عملگر جهش بر روی کروموزوم مسیریابی

#### ۴-۵- موجه بودن

برای شدنی بودن مدل، از فرآیند ترمیم استفاده می‌شود. یعنی باید برای تک‌تک مشتریان و وسایل نقلیه، ظرفیت و وسیله نقلیه، ظرفیت انبار بررسی شود. به عنوان مثال به دلیل مجاز نبودن کمبود، بار تحویلی به هر مشتری خط رفت و موجودی پایان دوره قبل نباید از تقاضایش کمتر باشد و

Child <sub>1*</sub>	۱۶/۴	۱۱/۲	۹/۶	۱۲/۴	۸/۶	۹/۸
Child <sub>2*</sub>	۱۷/۶	۱۰/۸	۱۱/۴	۱۳/۶	۷/۴	۱۰/۲

شکل ۲. عملگر تقاطع حسابی بر روی کروموزوم توزیع

#### ۴-۴-۲- عملگر جهش کروموزوم توزیع

از الگوی جهش جایگذاری<sup>۳۱</sup> در این مدل بهره گرفته شده است. ابتدا دو ژن به صورت تصادفی انتخاب شده، در مرحله بعد ژن دوم را در محل ژن بعد از ژن اول درج نموده و در نهایت ژن‌های مابین این دو ژن را به سمت راست شیفت داده می‌شود (شکل ۳).

Child <sub>1</sub>	۱۶/۴	۱۱/۲	۹/۶	۱۲/۴	۸/۶	۹/۸
--------------------	------	------	-----	------	-----	-----

➔

New Child <sub>1</sub>	۱۶/۴	۱۱/۲	۹/۸	۹/۶	۱۲/۴	۸/۶
------------------------	------	------	-----	-----	------	-----

شکل ۳. عملگر جهش جایگذاری بر روی کروموزوم توزیع

#### ۴-۴-۳- عملگر تقاطع کروموزوم مسیریابی

در این مدل از روش تک نقطه‌ای هوشمند<sup>۳۹</sup> برای این منظور استفاده می‌کنیم. نحوه کارکرد این روش را در مثال زیر تبیین می‌کنیم (فرض شود  $A = B = 3$ ) (شکل ۴-۵) و بعد از برش کروموزوم‌های والد در جهت نمایش داده شده به کروموزوم‌های فرزند در شکل ۵ می‌رسیم.

Parent <sub>1</sub>	۱	۴	۳	۲	۶	۵
Parent <sub>2</sub>	۶	۲	۴	۳	۱	۵

شکل ۴. عملگر تقاطع تک نقطه‌ای

Child <sub>1</sub>	۱	۴	۳	۳	۱	۵
Child <sub>2</sub>	۶	۲	۴	۲	۶	۵

شکل ۵. فرزندهای ایجاد شده از عملگر تقاطع در مرحله اول

در فرزند شماره ۱ بعد از مشتری سوم، دوباره این مشتری تکرار شده که اشتباه است، بنابراین خاصیت هوشمند بودن این عملگر، موجب می‌شود که بعد از مشتری سوم، به سراغ مشتری ششم (با توجه به توالی فرزند شماره ۲) رفته و

چنانچه اگر این موضوع اتفاق بیافتد، باید آن مشتری حذف و در فایل نام Assign برای تخصیص مجدد قرار بگیرد.

است. در ضمن در خصوص سایر پارامترهای ورودی مسأله از توزیع یکنواخت طبق جدول ۳ استفاده شده است.

جدول ۳. مقداردهی پارامترهای مسایل نمونه

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار
۱	$QV_m^t$	[۴۵۰-۱۰۰۰]	۵	$WC_m^t$	[۴۰۰-۶۰۰]
۲	$E_{im}^t$	[۱۵-۷۵]	۶	$QC_i$	[۱۰۰-۳۰۰]
۳	$R_{im}^t$	[۱۵-۷۵]	۷	$d_{ij}$	[۱۰۰-۶۰۰]
۴	$UC_m^t$	[۱۰۰۰-۳۰۰۰]	۸	$h_i^p$	[۱۰۰-۴۵۰]
۹	$w^p$	[۲۰-۱۰]			

#### ۴-۶- تکرار الگوریتم

بعد از تولید جمعیت اولیه والدین بصورت تصادفی و ارزیابی آنها، مطابق با روش انتخاب و عملگرهای ژنتیکی که تشریح شد، جمعیت فرزندان به اندازه والدین ایجاد می شود. از ترکیب این دو مجموعه، نسل بعدی طبق ساختاری که قبلاً ارائه شد، ایجاد می گردد و به همین ترتیب این روند تکرار می شود تا زمانی که شرط پایان الگوریتم برقرار گردد.

#### ۵-۲- مفروضات و پارامترهای الگوریتمها

برای تنظیم الگوریتم ژنتیک، آزمایشهای زیادی با مجموعه مقادیر مختلف پارامترها انجام گرفته است و در پایان با استفاده از مجموعه مقادیر زیر بهترین نتایج حاصل شده است (جدول ۴).

#### ۴-۷- شرط توقف الگوریتم

معمولترین شرط، تعداد دفعات تکرار الگوریتم است که مثلاً بعد از  $K$  تکرار، الگوریتم متوقف شود و در این مدل نیز همین معیار انتخاب شده است.

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم ژنتیک کارای پیشنهادی

ردیف	نام پارامتر	مقدار
۱	جمعیت اولیه	۲۵۰
۲	تعداد تکرار	۱۲۰
۳	نرخ تقاطع	۰.۵
۴	نرخ جهش	۰.۴

#### ۵-۰ نتایج محاسباتی

در این مقاله با استفاده از مسایل نمونه تصادفی متعددی، عملکرد الگوریتم ژنتیک کارای پیشنهادی با نرم افزار GAMS ارزیابی می شود. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در محیط Matlab 8.6 برنامه نویسی و پیاده سازی شده است. الگوریتم مذکور در کامپیوتری با مشخصات پردازنده Intel Core i3، ۶۴ بیتی، ۱.۷ گیگاهرتز، ویندوز سیون و ۴ گیگابایت رم، اجرا شده است.

#### نتایج عددی

مسایل نمونه تعریف شده براساس پارامترهای مختلف مسأله، ۶ بار توسط الگوریتم پیشنهادی اجرا شده و بهترین نتایج بدست آمده از الگوریتم به همراه میانگین نتایج حاصله در جدول ۵ ثبت و با جوابهای بدست آمده از روش دقیق (نرم افزار گمز) مقایسه شده و اختلاف تابع برازش بدست آمده از دو روش به همراه متوسط زمان حل الگوریتم ژنتیک برای ۱۲۰ تکرار نیز ارائه گردیده است.

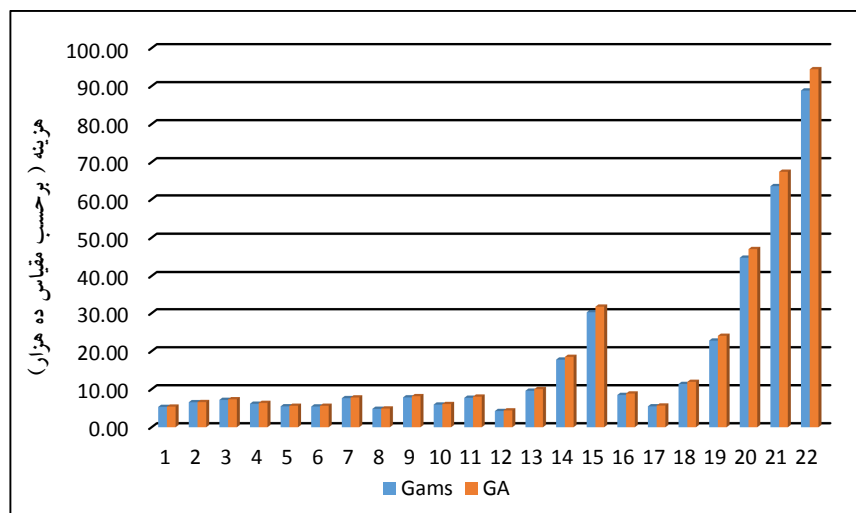
#### ۵-۱- چگونگی ایجاد مسایل نمونه

با توجه تنوع محدودیتها، مخصوصاً متغیرهای مسأله مسایل بزرگ به دلیل زمان محاسباتی بالا و حتی غیرقابل حل بودن آنها، مانع از مقایسه الگوریتم با روش دقیق گمز می شود. بنابراین در این تحقیق از دسته مسایل کوچک و تقریباً متوسط استفاده شده است. از جمله پارامترهای مهم در مسایل نمونه تعداد مشتریان خط رفت (تحويل کالا)، مشتریان برگشت (دریافت کالا) به همراه اولویت خدمت-دهی برای مشتریان رفت، تنوع محصولات، تنوع ظرفیت وسایل نقلیه و همچنین تعداد پروده های افق برنامه ریزی

#### ۵-۳- تحلیل نتایج

صورت نمایی افزایش می‌یابد. همچنین برای تحلیل تغییرات تعداد پروده‌های افق برنامه‌ریزی و تغییر در تنوع محصولات بر نتایج به دست آمده از حل مدل پیشنهادی در این تحقیق ضمن ثابت نگهداشتن سایر پارامترها، مسایل نمونه‌ای طراحی و نتایج آن به شرح زیر است (جدول ۶ و شکل ۱۰ و ۱۱).

برای مسایل نمونه، حداکثر زمان یک ساعت را برای حل مسأله توسط الگوریتم دقیق لحاظ کرده‌ایم. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و گمز و مقایسه آن‌ها باهم (شکل ۹)، مشخص شد که الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی، به طور متوسط جواب‌هایی با اختلاف ۳/۵۱۶ درصد نسبت به روش دقیق را دارا بوده و این اختلاف در مسایل نمونه بزرگتر، بیشتر شده است. این اختلاف قابل قبول بوده چراکه کارآمدی این روش در کاهش قابل ملاحظه زمان (برای ۱۲۰ تکرار) کاملاً مشهود است. در ضمن زمان محاسبات در نرم‌افزار گمز با بزرگتر شدن ابعاد مسأله به



شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و روش گمز

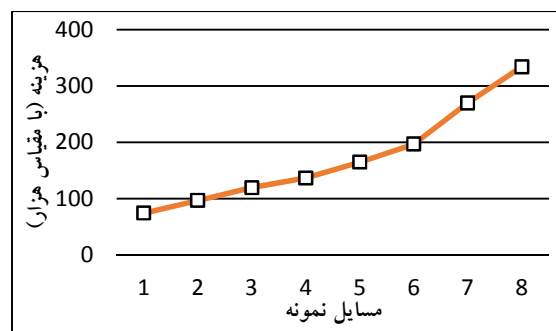
جدول ۵. مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک و گمز به همراه مقایسه آن‌ها

ردیف	نام مسأله	G		T	P	M	Average solution	Best Solution	Gams	GAP%	CPUtime (s)
		A	B								
۱	FTP-n01	۱	۲	۳	۲	۲	۵۸۵۷۷	۵۴۰۷۹	۵۳۴۳۰	۱/۲	۳۵
۲	FTP-n02	۲	۲	۴	۲	۳	۶۶۰۹۱	۶۶۰۹۱	۶۵۷۶۰	۰/۵	۵۸
۳	FTP-n03	۲	۲	۵	۳	۳	۷۴۷۳۵	۷۳۵۴۴	۷۱۹۲۶	۲/۲	۸۰
۴	FTP-n04	۲	۳	۴	۳	۳	۶۴۲۵۱	۶۳۹۲۸	۶۱۷۸۶	۳/۳۵	۷۳
۵	FTP-n05	۳	۳	۳	۲	۳	۵۶۴۵۱	۵۶۴۰۸	۵۴۹۳۵	۲/۶۱	۵۴
۶	FTP-n06	۳	۳	۴	۴	۴	۵۷۳۱۴	۵۶۳۸۵	۵۴۴۲۸	۳/۴۷	۸۵
۷	FTP-n07	۳	۳	۴	۵	۶	۸۱۳۰۲	۷۸۲۳۲	۷۶۴۴۸	۲/۲۸	۸۵
۸	FTP-n08	۴	۳	۳	۳	۳	۴۹۴۰۶	۴۹۲۳۱	۴۸۴۴۳	۱/۶	۵۵
۹	FTP-n09	۳	۴	۴	۴	۴	۸۷۰۹۳	۸۱۶۶۸	۷۸۴۶۷	۳/۹۲	۹۲
۱۰	FTP-n10	۴	۴	۳	۵	۳	۶۸۵۴۷	۶۰۹۸۱	۵۹۵۲۴	۲/۳۹	۷۳
۱۱	FTP-n11	۴	۵	۴	۳	۴	۸۳۸۷۰	۸۰۳۸۰	۷۷۳۵۸	۳/۷۶	۹۳
۱۲	FTP-n12	۵	۴	۳	۲	۵	۴۴۹۶۳	۴۴۱۵۱	۴۲۵۵۷	۳/۶۱	۶۷

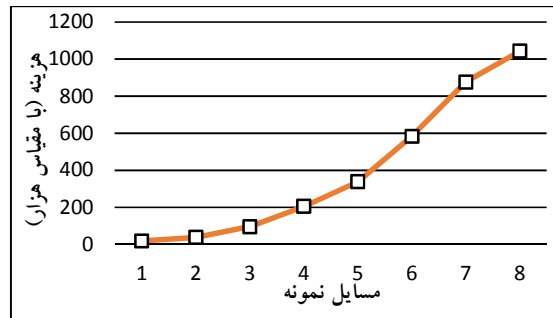
۱۳	FTP-n13	۶	۶	۴	۳	۳	۱۰۷۴۰۷	۱۰۰۲۲۰	۹۶۰۱۱	۴/۲	۱۲۷
۱۴	FTP-n14	۸	۴	۵	۴	۴	۲۰۳۴۹۰	۱۸۴۹۶۸	۱۷۷۸۴۷	۳/۸۵	۱۸۶
۱۵	FTP-n15	۷	۵	۶	۵	۵	۳۷۵۷۵۷	۳۱۷۱۳۵	۳۰۲۴۲۰	۴/۶۴	۲۴۳
۱۶	FTP-n16	۷	۷	۳	۴	۴	۱۰۲۷۶۹	۸۸۶۲۸	۸۴۸۳۴	۴/۲۸	۱۱۲
۱۷	FTP-n17	۶	۷	۳	۲	۴	۵۹۳۲۷	۵۶۸۶۰	۵۴۹۵۵	۳/۳۵	۸۸
۱۸	FTP-n18	۸	۵	۳	۵	۵	۱۲۲۳۵۰	۱۱۹۲۷۶	۱۱۳۷۶۵	۴/۶۲	۱۳۷
۱۹	FTP-n19	۵	۸	۵	۵	۶	۲۸۶۶۴۶	۲۴۰۴۸۸	۲۲۷۹۳۵	۵/۲۲	۲۰۱
۲۰	FTP-n20	۸	۷	۶	۶	۶	۴۸۸۳۳۲	۴۷۰۱۰۸	۴۴۷۶۳۷	۴/۷۸	۳۵۲
۲۱	FTP-n21	۸	۸	۶	۷	۷	۷۰۵۴۵۹	۶۷۲۱۱۴	۶۳۴۴۷۷	۵/۶	۳۲۵
۲۲	FTP-n22	۸	۸	۷	۸	۷	۹۸۶۷۶۹	۹۴۴۳۵۶	۸۸۸۳۵۶	۵/۹۳	۳۹۰
Mean										٪ ۳/۵۱۶	۱۳۶/۸۶ ثانیه

جدول ۶. مسایل نمونه برای آنالیز تغییرات پارامترهای P و T و نتایج حاصل از آنها

ردیف	نام مسأله	PART - A				درصد تغییرات	ردیف	نام مسأله	PART - B				درصد تغییرات
		G		P	Average solution				G		T	Average solution	
		A	B						A	B			
۱	TP-M3-T4-n01	۴	۵	۱	۷۴۵۴۳	۰	۱	TP-M4-P4-n01	۷	۵	۱	۱۸۷۷۲	۰
۲	TP-M3-T4-n02	۴	۵	۳	۹۷۰۲۹	٪ ۳۰	۲	TP-M4-P4-n02	۷	۵	۲	۳۷۹۸۲	٪ ۱۰۲
۳	TP-M3-T4-n03	۴	۵	۴	۱۱۹۵۴۴	٪ ۶۰	۳	TP-M4-P4-n03	۷	۵	۳	۹۵۴۱۱	٪ ۴۰۸
۴	TP-M3-T4-n04	۴	۵	۶	۱۳۶۸۲۴	٪ ۸۳	۴	TP-M4-P4-n04	۷	۵	۵	۲۰۵۰۷۸	٪ ۹۹۲
۵	TP-M3-T4-n05	۴	۵	۸	۱۶۴۹۵۸	٪ ۱۲۱	۵	TP-M4-P4-n05	۷	۵	۷	۳۳۸۴۳۷	٪ ۱۷۰۲
۶	TP-M3-T4-n06	۴	۵	۱۰	۱۹۷۰۰۸	٪ ۱۶۴	۶	TP-M4-P4-n06	۷	۵	۹	۵۸۲۹۵۷	٪ ۳۰۰۵
۷	TP-M3-T4-n07	۴	۵	۱۲	۲۶۹۸۱۲	٪ ۲۶۱	۷	TP-M4-P4-n07	۷	۵	۱۱	۸۷۶۱۲۶	٪ ۴۵۶۷
۸	TP-M3-T4-n08	۴	۵	۱۴	۳۳۴۰۰۴	٪ ۳۴۸	۸	TP-M4-P4-n08	۷	۵	۱۲	۱۰۴۲۸۷۳	٪ ۵۴۵۵



شکل ۱۰. روند تغییرات مسایل نمونه PART-A بر حسب محصول



شکل ۱۱. روند تغییرات مسایل نمونه PART-B برحسب پرورد زمانی

بازگشت، با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌های راه‌اندازی، توزیع و نگهداری موجودی به این مسأله اضافه شده است. خرده‌فروش در هر دوره تنها باید توسط یک وسیله حمل و یکبار خدمت‌دهی شود و کمبود مجاز نیست.

به دلیل NP – Hard بودن مسأله، استفاده از روش‌های حل دقیق به ویژه برای مسایل با ابعاد بزرگ در زمان محاسباتی معقول امکان‌پذیر نیست؛ در این مقاله از یک روش حل تقریبی کارا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در کنار حل مسأله در ابعاد کوچک به کمک نرم‌افزار گمز استفاده شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مسایل نمونه متعددی (حداکثر ۱۶ مشتری) که به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید (جدول ۵) جواب‌های حاصله با میانگین اختلافی در حدود ۳/۵۱۶ درصد از روش دقیق قرار داشته، و نشان از عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی با متوسط زمان حل تقریبی ۱۳۶ ثانیه است.

در تحقیقات آتی، توسعه مسأله فوق برای سایر شرایطی که می‌تواند در صنعت وجود داشته باشد، بسیار مفید خواهد بود. لذا پیشنهاد می‌شود مدل در شرایط مجاز بودن کمبود، امکان شکست تقاضا و تصادفی بودن پارامترهای مسأله توسعه داده شده و برای حل آن از روش‌های فراابتکاری کارآمد مانند جاذبه گرانشی، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش و الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی استفاده شده و نتایج حاصله با روش ژنتیک کارای پیشنهادی مورد مقایسه و تحلیل قرار گیرد.

در قسمت A از جدول ۶، روند تغییرات هزینه‌ی مسایل نمونه به ازای تنوع محصولات را نشان داده (شکل ۱۰) و در قسمت B روند تغییرات هزینه‌ی مسایل نمونه به ازای افزایش پروردهای افق برنامه‌ریزی ارایه شده است (شکل ۱۱). نتایج نشانگر آنست که تفاوت هزینه بین مسأله تک محصولی با چندمحصولی (با ثابت بودن سایر پارامترها) به ازای ۱۲ برابر شدن تنوع محصول، هزینه ۲/۵ برابر شده و در مقابل، تفاوت هزینه‌ای مسأله تک پروردی با چند پروردی بیانگر آن می‌باشد که با ۱۲ برابر شدن تعداد افق برنامه‌ریزی هزینه تقریباً ۴۵ برابر شده است. رشد تغییرات در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به وضوح قابل مشاهده بوده، بطوریکه شیب روند تغییرات در حالت B به مراتب بیشتر از حالت A است.

## ۶- نتیجه‌گیری

هدف مدیریت زنجیره‌ی تأمین، یکپارچه کردن واحدهای سازمانی و هماهنگ کردن جریان مواد، مالی، اطلاعات و در نهایت بهینه‌سازی ارزش تولید شده‌ی کالا یا خدمات برای تمامی طرفین تأثیرگذار است. یکی از رویکردهایی که منجر به یکپارچگی اجزای مختلف زنجیره از ابعاد گوناگون مانند هزینه‌های توزیع و موجودی، زمان و مکان مناسب ارسال و دریافت و جلوگیری از کمبود می‌شود مسأله مسیریابی-موجودی است. در این تحقیق یک مدل مسیریابی-موجودی در حالت چند دوره‌ای، چند محصولی که محصولات از یک توزیع‌کننده با ناوگان ناهمگنی از وسایل حمل و ظرفیت محدود برای مجموعه‌ای از خرده‌فروشان تحت استراتژی توزیع ارسال در طی مسیر توزیع می‌شود، بسط داده شده و یکی از مهمترین ویژگی‌های مسایل مسیریابی، یعنی حمل در

Journal on Computing Vol. 26, No.1, pp. 103-120.

-Andersson H, Christiansen M, Fagerholt K., (2010). "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. 427-439.

-Anily, S. and A. Federgruen (1990), "One Warehouse Multiple Retailer Systems with Vehicle Routing Costs." Management Science Vol. 36, No.1, pp. 92-114.

-Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, L., Speranza, M. G., (2012), "A Hybrid Heuristic for an Inventory Routing Problem." INFORMS Journal on Computing, Vol. 24, No.1, pp. 101-116.

-Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, L., Speranza, M. G., (2014), "Formulations for an inventory routing problem." International Transactions in Operational Research, Vol. 21, No.3, pp. 353-374.

-Azadeh, A., Elahi, S., Farahani, M. H., Nasirian, B., (2017), "A genetic algorithm-Taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment." Computers & Industrial Engineering, Vol. 104, pp. 124-133.

-Bard, J. F. and N. Nananukul (2009), "Heuristics for a multi period inventory routing problem with production decisions." Computers & Industrial Engineering, Vol. 57, No. 3, pp. 713-723.

-Bassok, Y. and R. Ernst (1995), "Dynamic Allocations for Multi-Product Distribution." Transportation Science, Vol. 29, No. 3, pp. 256-266.

-Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., Mack, R. G., Prutzman, P. J., (1983), "Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer". Interfaces, Vol. 13, No. 6, pp. 4-23.

1. Inventory Routing Problem (IRP)
2. Vendor-Managed Inventory (VMI)
3. Backhaul
4. Inventory Routing Problem with Backhaul (IRPB)
5. Multi-product multi-vehicle inventory routing problem with backhaul (MMIRPB)
6. Exact methods
7. One to Many
8. Many to One
9. Back-order
10. Lost sales
11. Adaptive Large Neighborhood Search
12. Quantity consistency
13. Vehicle filling rate
14. Order-up-to level (OU)
15. Driver consistency
16. Driver partial consistency
17. Visit spacing
18. Symmetry Breaking Constraint
19. Ad-hoc labeling
20. Column Generation
21. Iterated local search (ILS)
22. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)
23. Backlogging
24. Time Windows
25. Mixed Integer non-linear programming
26. Evolution
27. Solution Representation
28. String
29. Clever Single Point Crossover
30. Swap
31. Insertion

## ۸- مراجع

-Abdelmaguid, T.F., Dessouky, M. M., Ordóñez, F., (2009), "Heuristic approaches for the inventory-routing problem with backlogging." Computers & Industrial Engineering, Vol.56, No.4, pp. 1519-1534.

-Adelman, D., (2004), "Price-directed approaches to stochastic inventory/routing". Operations Research, Vol.52, No.4, pp. 499-514.

-Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., Jans, R., (2014), "Formulations and Branch-and-Cut Algorithms for Multivehicle Production and Inventory Routing Problems." INFORMS

- Coelho, L.C., Cordeau, J-F., Laporte, G., (2012a) "Consistency in multivehicle inventory-routing". *Transportation Research Part C: Emerging Tech.* Vol. 24, No. 1, pp. 270–287.
- Coelho, L.C., Cordeau, J-F., Laporte, G., (2012b), "Dynamic and stochastic inventory-routing". Technical report, CIRRELT-201237, Montreal, Canada.
- Coelho, L. C., and G. Laporte, (2013a), "A branch-and-cut algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory-routing problem." *International Journal of Production Research.* Vol. 51, No. 23-24, pp. 7156-7169.
- Coelho, L. C., and G. Laporte, (2013b) "The exact solution of several classes of inventory-routing problems". *Computers & Operations Research*, Vol. 40, No.2, pp. 558–565.
- Coelho, L. C. and G. Laporte (2014). "Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products." *Computer & Operation Research* Vol. 47, pp. 42-52.
- Coelho, L. C., Cordeau, J-F., Laporte, G., (2014), "Thirty Years of Inventory Routing." *Transportation Science*, Vol. 48, No.1, pp. 1-19.
- Cordeau, J-F., Laganà, D., Roberto, M., Francesca, V., (2015), "A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem." *Computers & Operations Research*, Vol. 55, pp. 153-166.
- Desaulniers, G., Rakke, J. G., Coelho, L. C., (2016), "A Branch-Price-and-Cut Algorithm for the Inventory-Routing Problem." *Transportation Science*, Vol. 50, No.3, pp. 1060-1076.
- Dror, M., and Trudeau, P., (1996), "Cash flow optimization in delivery scheduling". *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, No. 5, pp. 04–15.
- Federgruen, A., and Zipkin, P. H., (1984), "A combined vehicle routing and inventory
- Benoist, T., Gardi, F., Jeanjean, A., Estellon, B., (2011) "Randomized local search for real-life inventory routing". *Transportation Science*, Vol. 45, No. 3, pp. 381–398.
- Berman, O. and R. C. Larson (2001), "Deliveries in an Inventory/Routing Problem Using Stochastic Dynamic Programming." *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 192-213.
- Bertazzi, L., Paletta, G., Speranza, M.G., (2008), "Inventory Routing. The Vehicle Routing Problem", *Latest Advances and New Challenges*. B. Golden, S. Raghavan and E. Wasil. Boston, MA, Springer US, pp. 49-72.
- Blumenfeld, D.E., Burns, L.D., Diltz, J.D., Daganzo, C.F., (1985), "Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks". *Transportation Research, Part B: Methodological*, Vol. 19, No.5, pp. 361–380.
- Brandão, J., (2016), "A deterministic iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with backhauls." *TOP*, Vol. 24, No.2, pp. 445-465.
- Cáceres-Cruz, J., Juan, A.A., Bektas, T., Grasman, S.E., Faulin, J., (2012), Combining Monte Carlo simulation with heuristics for solving the inventory routing problem with stochastic demands. In: Laroque, C., Himmelspach, J., Pasupathy, R., Rose, O., Uhrmacher, A. (Eds.), *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA.
- Campbell, A. M. and M. W. P. Savelsbergh (2004b), "Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem." *Transportation Science*, Vol.38, No.4, pp. 488-502.
- Chien, T. W., Balakrishnan, A., Wong, R.T., (1989), "An integrated inventory allocation and vehicle routing problem". *Transportation Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 67–76.



- Liu, S.-C., Lu, M.-C., Chung, C.-H., (2016), "A hybrid heuristic method for the periodic inventory routing problem." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 9, pp. 2345-2352.
- Mes, M., Schutten, M., Rivera, A.P., (2014), "Inventory routing for dynamic waste collection." *Waste Management*, Vol. 34, No. 9, pp. 1564-1576.
- Mirzaei, S. and A. Seifi (2015), "Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 87, pp. 213-227.
- Moin, N. H. and S. Salhi (2007), "Inventory Routing Problems: A Logistical Overview." *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, No. 9, pp. 1185-1194.
- Oesterle, J. and T. Bauernhansl (2016), "Exact Method for the Vehicle Routing Problem with Mixed Linehaul and Backhaul Customers, Heterogeneous Fleet, time Window and Manufacturing Capacity." *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 573-578.
- Park, Y.-B., Yoo, J.-S., Park, H.-S., (2016), "A genetic algorithm for the vendor-managed inventory routing problem with lost sales." *Expert Systems with Applications*, Vol. 53, pp. 149-159.
- Raa, B. and E.-H. Aghezzaf (2008), "Designing distribution patterns for long-term inventory routing with constant demand rates." *International Journal of Production Economics*, Vol. 112, No. 1, pp. 255-263.
- Raa, B. and E.-H. Aghezzaf (2009), "A practical solution approach for the cyclic inventory routing problem." *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, No. 2, pp. 429-441.
- Rabbani, M., Baghersad, M., Jafari, R., (2013), "A new hybrid GA-PSO method for solving multi-period inventory routing problem with considering financial decisions." *Journal of industrial engineering allocation problem".* *Operations Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 19–37.
- Gallego, G. and D. Simchi-Levi (1990), "On the Effectiveness of Direct Shipping Strategy for the One-Warehouse Multi-Retailer R-Systems." *Management Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 240-243.
- Guemri, O., Bekrar, A., Bouziane, B., Damien, T., (2016), "GRASP-based heuristic algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory routing problem." *4OR*, Vol. 14, No. 4, pp. 377-404.
- Herer, Y.T. and Levy, R. (1997) *The Metered Inventory Routing Problem, an Integrative Heuristic Algorithm.* *International Journal of Production Economics*, Vol. 51, pp. 69-81.
- Huang, S.-H., and P.-C. Lin (2010). "A modified ant colony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, No. 5, pp. 598-611.
- Kleywegt, A.J., Nori, V.S., Savelsbergh, M. W. P., (2002). "The stochastic inventory routing problem with direct deliveries." *Transportation Science*. Vol. 36, No. 1, pp. 94–118.
- Letchford, A. N. and A. Oukil (2009), "Exploiting sparsity in pricing routines for the capacitated arc routing problem." *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 2320-2327.
- Li, K., Chen, B., Sivakumar, A. L., Wu, Y., (2014), "An inventory–routing problem with the objective of travel time minimization." *European Journal of Operational Research*, Vol. 236, No. 3, pp. 936-945.
- Liu S.-C., Lee W.-T., (2011), "A heuristic method for the inventory routing problem with time windows". *Expert Systems Application*. Vol. 38, No. 10, pp. 13223–13231.

- Singh, T., Arbogast, J. E., Neagu, N., (2015). "An incremental approach using local-search heuristic for inventory routing problem in industrial gases." *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 80, pp. 199-210.
- Solyali, O., Süral, H., (2011), "A branch-and-cut algorithm using a strong formulation and an a priori tour-based heuristic for an inventory-routing problem." *Transportation Science*. Vol. 45, No. 3, pp. 335–345.
- Stålhane, M., J. G. Rakke, C. R. Moe, H. Andersson, M. Christiansen and K. Fagerholt (2012), "A construction and improvement heuristic for a liquefied natural gas inventory routing problem." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 1, pp. 245-255.
- Zhao, Q.-H., Chen, S., Zang, C.-X., (2008), "Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system." *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, No. 3, pp. 623-635.
- and management. Vol. 6, No.4, pp. 909-929.
- Rahimi, M., Baboli, A., Rekik, Y., (2017), *Inventory Routing Problem for Perishable Products by Considering Customer Satisfaction and Green Criteria. Dynamics in Logistics: Proceedings of the 5th International Conference LDIC, 2016 Bremen, Germany*. M. Freitag, H. Kotzab and J. Pannek. Cham, Springer International Publishing, pp. 445-455.
- Reiman, M. I., R. Rubio and L. M. Wein (1999), "Heavy traffic analysis of the dynamic stochastic inventory-routing problem". *Transportation Science*, Vol. 33, No. 4, pp. 361-380.
- Santos, E., Ochi, L. S., Simonetti, L., González, P. H., (2016), "A Hybrid Heuristic based on Iterated Local Search for Multivehicle Inventory Routing Problem." *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, Vol. 52, pp. 197-204.