ارائۀ یک روش فراابتکاری ترکیبی برای مسئلۀ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی با شرایط گذاشت و برداشت

محمدرضا قطره‌سامانی[۱]، سیدمهدی حسینی مطلق[۲*]، سعید یعقوبی[۳]، عباس جوکار[۴]

۱. دانشجوی دکتری دانشکدۀ مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

۲. استادیار دانشکدۀ صنایع، دانشگاه علم و صنعت

۳. استادیار دانشکدۀ صنایع، دانشگاه علم و صنعت

۴. دانشجوی دکتری دانشکدۀ مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۰۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۵/۱۰/۰۵، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۱/۳۰)

چکیده

در سال‌های اخیر، رویکردهای بهینه‌سازی یکپارچه در زنجیرۀ تأمین، به یکی از مسائل مورد توجه محققان تبدیل شده است. در این پژوهش، مدلی برای مسئلۀ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی با شرایط گذاشت و برداشت ارائه می‌شود؛ به‌طوری‌که بین مراکز اصلی توزیع و مشتریان، یک لایه از تسهیلات با نام انبار میانی استقرار می‌یابد. هریک از مشتریان این شبکه، علاوه‌بر تقاضای دریافت کالا، هم‌زمان درخواست تحویل کالا به وسایل نقلیه را نیز دارند. در این مقاله، ابتدا یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوسطحی برای این مسئله ارائه می‌شود که در آن‌ها، ظرفیت انبارهای مرکزی، انبارهای میانی و وسایل نقلیه، محدود درنظر گرفته شده است. سپس برای حل مدل مذکور، روش حل فراابتکاری ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید ارائه شده است. نتایج محاسباتی حاصل از حل مسائل نمونه در اندازه‌های مختلف و تحلیل نتایج آن نشان می‌دهد الگوریتم ارائه‌شده کارایی مناسبی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، دوسطحی، گذاشت و برداشت هم‌زمان، مسئلۀ مکان‌یابی- مسیریابی.

مقدمه

رقابت سازمان‌ها در عرضۀ کالا و خدمات، واقعیت انکارناپذیر دو دهۀ گذشته در سطح جهان بوده است. امروزه یکی از رویکردهای ایجاد مزیت رقابتی در شرکت‌ها و موفقیت در این محیط، یکپارچگی منظم در تمامی فرایندهای تولیدی از مادۀ خام تا مصرف کنندۀ نهایی است که موجب انعطاف‌پذیری در عرضه، تولید و توزیع محصولات می‌شود. زنجیرۀ تأمین، رویکردی مناسب برای پاسخگویی سریع و کارا در این فضای کسب‌وکار به‌شمار می‌آید.

از مهم‌ترین مسائل زنجیرۀ تأمین، طراحی شبکه‌های توزیع است که با طراحی دقیق آن‌ها می‌توان هزینه‌های سیستم را تا حد زیادی کاهش داد. مسئلۀ مکان‌یابی- مسیریابی وسیلۀ نقلیه[۱]، یکی از مسائلی است که در حوزۀ سیستم‌های توزیع و پشتیبانی زنجیرۀ تأمین به آن توجه می‌شود و دو جزء کلیدی سیستم‌های لجستیکی، یعنی مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه را هم‌زمان دربرمی‌گیرد [۱].

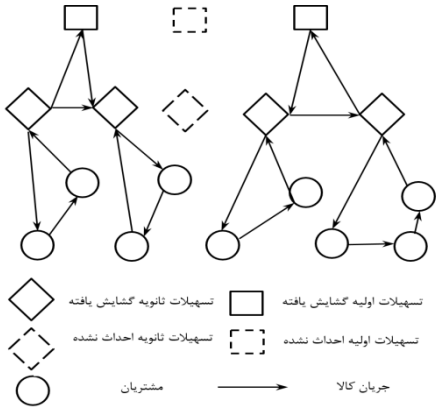
در دنیای امروزی، با گسترش سطوح زنجیرۀ تأمین به‌منظور کاهش هزینه‌های کلی سیستم، لایه‌های متفاوتی از تسهیلات بین سطح اول زنجیره و مشتریان نهایی قرار گرفته‌اند. با قرارگرفتن هر لایه از تسهیلات، بر پیچیدگی شبکه افزوده می‌شود و جریان کالا بین سطوح مختلف، با محدودیت‌های مختلفی روبه‌رو می‌شود. به این مسائل در دهۀ اخیر، بیشتر توجه شده است. این مسائل با نام مسائل چندسطحی در ادبیات معرفی می‌شوند. در مسائل مکان‌یابی- مسیریابی چندسطحی[۲]، کالا به‌صورت مستقیم از تسهیلات موجود به مشتریان ارسال نمی‌شود و وجود n مورد از تسهیلات واسطه در این بین سبب می‌شود که کالا

* نویسندۀ مسئول: تلفن: ۷۳۲۲۵۰۷۰، دورنگار: ۷۳۲۲۵۰۷۰ Email: motlagh@iust.ac.ir

ابتدا به واسطه‌ها ارسال شود و سپس از آنجا به مشتریان انتقال یابد. در هریک از سطوح این شبکه، وسایل نقلیه مختص آن سطح‌اند و مجاز به اجرای عملیات بین تسهیلات سطوح دیگر نیستند. شکل نمایی از مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی را با سه لایه نشان می‌دهد. به‌ترتیب در لایهٔ اول تسهیلات اولیه، در لایهٔ دوم تسهیلات ثانویه و در لایهٔ سوم مشتریان نهایی سیستم قرار دارند. این‌گونه مسائل، به مسائل مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی[۳] معروف‌اند.

ارائهٔ اولین مدل‌های مکان‌یابی- مسیریابی، در اواخر دههٔ ۱۹۷۰ و اوایل دههٔ ۱۹۸۰ با فعالیت‌های محققان متعددی مانند جاکوبسن و مادسن [۲]، آور و پیرسکالا [۳]، نامبیار و همکاران [۴]، لاپرته و همکاران [۵] و مادسن و همکاران [۶] آغاز شد. براساس شاخص‌های گوناگون می‌توان مسائل مکان‌یابی- مسیریابی را دسته‌بندی کرد. مرور انواع این دسته‌بندی‌ها به‌وسیلهٔ مین و همکاران [۷]، بالاکریشنان و همکاران [۸]، لاپرته و همکاران [۵] و برمن و همکاران [۹] صورت گرفت. نگی و سالهی [۱] مسائل این حوزه از ادبیات را براساس استاندارد یا غیراستانداردبودن ساختار طبقه‌بندی کردند [۱۰].

مقایسه و دسته‌بندی انواع روش‌های حل مسائل مکان‌یابی- مسیریابی، از زمان ارائهٔ دسته‌بندی نگی و سالهی به‌وسیلهٔ پرودهون و همکاران بررسی شد [۱۱]. درکسل و همکاران نیز دسته‌بندی جدیدی را براساس انواع مدل‌های ریاضی مکان‌یابی- مسیریابی ارائه کردند [۲۱].



شکل ۱. شمایی از مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی

مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی با شرایط گذاشت و برداشت به‌صورت هم‌زمان، برای اولین بار به‌وسیلهٔ کارائوگلان و همکاران [۳۱ و ۱۴] مطرح شد. مدل ریاضی این مسئله، براساس مدل جریان‌مبنا[۴] و به‌صورت برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط نوشته شد و با ترکیب روش شاخه و برش[۵] و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[۶] برای آن، یک حد بالا ارائه شد. کارائوگلان و همکاران [۵۱] مدل ریاضی همین مسئله را به‌صورت برنامهٔ ریاضی عدد صحیح مختلط براساس مدل گره‌مبنا[۷] ارائه دادند و با استفاده از یک روش ابتکاری دوفازی برمبنای SA کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده را با مقالهٔ قبلی خود مقایسه کردند. ریک و همکاران [۶۱] یک مدل مکان‌یابی- مسیریابی چندبه‌چند ساختند که در آن مشتریان، هم‌زمان تقاضای گذاشت و برداشت دارند. آن‌ها مسئلهٔ خود را در ابعاد کوچک با استفاده از روش دقیق و برای توسعهٔ آن در ابعاد بزرگ‌تر با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌کار گرفتند. ستینر و همکاران [۷۱] مدلی ریاضی برای مسئلهٔ چندبه‌چند معرفی کردند. مسئلهٔ آن‌ها شامل مکان‌یابی مراکز هاب[۸] و تخصیص هریک از مشتریان این شبکه به بیش از یک مرکز هاب است. وسایل نقلیه دارای محدودیت طول مسیر هستند. آن‌ها برای تسهیلات و وسایل نقلیه، هزینهٔ ثابت درنظر نگرفتند و برای حل مدل خود از یک روش فراابتکاری دومرحله‌ای استفاده کردند. کاماگرو و همکاران [۸۱] مدل مکان‌یابی- مسیریابی چندبه‌چند خود را با مفروضات مسئلهٔ ستینر ارائه دادند. تفاوت کار آن‌ها در این بود که هریک از مشتریان، تنها به یک مرکز هاب اختصاص می‌یافت و یک بار توسط وسیلهٔ نقلیه ملاقات می‌شد. در ضمن، مکان هریک از مشتریان را می‌توان مکانی بالقوه

برای احداث تسهیلات هاب به‌شمار آورد. همچنین آن‌ها برای حل مسئله، از روش تجزیهٔ بندرز استفاده کردند. واسنر و همکاران [۹۱] مدلی دوسطحی برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی با درنظرگرفتن محدودیت حداکثر طول مسیر برای وسایل نقلیه معرفی کردند. محدودیت بارگیری و تحویل نیز در مدل آن‌ها لحاظ شده است. در این پژوهش، حل مسئله با استفاده از یک الگوریتم دومرحله‌ای انجام گرفت. لین و همکاران [۲۰] مدل مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی خود را با درنظرگرفتن ظرفیت محدود برای تسهیلات موجود و محدودیت طول مسیر برای وسایل نقلیه ارائه دادند. آن‌ها برای حل مسئلهٔ خود، از ترکیب روش شبیه‌سازی تبرید و انشعاب و تحدید بهره گرفتند. آلومر و همکاران [۲۱] مدلی مبتنی‌بر برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی چندکالایی ارائه کردند که در آن، برای تسهیلات و وسایل نقلیهٔ چندگانه ظرفیتی محدود درنظر گرفته شده بود. ذگردی و نیکبخش [۲۲] مدلی برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی ارائه دادند. در مسئلهٔ آن‌ها، ظرفیت وسایل نقلیه و تسهیلات، محدود درنظر گرفته شد. آن‌ها برای حل مسئلهٔ خود، یک الگوریتم ابتکاری و یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی‌بر شبیه‌سازی تبرید ارائه کردند و با استفاده از این دو الگوریتم، به تشریح و مقایسهٔ نتایج حل‌شدهٔ مسائل نمونه پرداختند. انگویان و همکاران [۲۳] مدلی ریاضی بر پایهٔ مسیریابی سویه‌ای در حالت دوسطحی برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی معرفی کردند. در این مسئله، ظرفیت وسایل نقلیه محدود درنظر گرفته شد و روشی ابتکاری مبنای کار قرار گرفت. سجادی و همکاران [۲۴] با درنظرگرفتن تقاضای مشتریان در حالت احتمالی برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی به ارائهٔ یک مدل دوسطحی پرداختند. ظرفیت تسهیلات و وسایل نقلیه در مدل آن‌ها محدود درنظر گرفته شد. در مسئلهٔ آن‌ها هزینه‌های موجودی، نگهداری و کمبود نیز کمینه شد و برای حل این مسئله، از روش شبیه‌سازی تبرید بهره گرفته شد. حمیدی و همکاران [۲۵] یک مدل سه‌سطحی چندکالایی را برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی درنظر گرفتند. وسایل نقلیه در مسئلهٔ آن‌ها همگن و دارای ظرفیت معین است. آن‌ها برای حل مدل خود، از ترکیب روش‌های جست‌وجوی حریصانه و جست‌وجوی ممنوع استفاده کردند. ریک و همکاران [۲۶] با درنظرگرفتن شرایط گذاشت و برداشت، یک مدل مکان‌یابی- مسیریابی چندبه‌چند ایجاد کردند که در آن، مشتریان توانایی ارسال کالا به یکدیگر را داشته باشند. آن‌ها برای حل مسئلهٔ خود در ابعاد کوچک، از روش دقیق و در ابعاد بزرگ‌تر مسئله از الگوریتم ژنتیک کمک گرفتند. جیانگ و همکاران [۲۷] یک مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی با فرض احتمالی‌بودن تقاضای مشتریان ارائه کردند. ظرفیت وسایل نقلیه، محدود و ناوگان حمل‌ونقل در این مسئله، همگن درنظر گرفته شد. آن‌ها برای حل مسئلهٔ خود از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده کردند. قدسی و امیری [۲۸] یک مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی با شرایط گذاشت و برداشت ارائه کردند. مکان‌یابی تسهیلات در مسئلهٔ آن‌ها، در فضای پیوسته تعیین شود و ظرفیت تسهیلات در مسئلهٔ آن‌ها نامحدود درنظر گرفته شد. مدل ریاضی آن‌ها برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی بود و از یک روش جست‌وجوی همسایگی برای حل آن بهره بردند.

با توجه به مطالب فوق، ویژگی‌های مسئلهٔ مورد بررسی مطابق جدول ۱ است.

با توجه به توضیحات فوق، نوآوری‌های مقالهٔ پیش‌رو شامل موارد زیر است:

۱. توسعهٔ یک مدل ریاضی دوسطحی شامل انبارهای مرکزی، انبارهای میانی و مشتریان برای مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی؛
۲. درنظرگرفتن شرایط گذاشت و برداشت برای تقاضای مشتریان (انبارهای میانی و مشتریان نهایی) به‌صورت هم‌زمان؛
۳. ارائهٔ یک روش ترکیبی فراابتکاری مبتنی‌بر الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله.

در این مقاله، ابتدا به مرور ادبیات مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی و انواع مختلف آن پرداخته شد و سپس با شناسایی شکاف موجود در ادبیات این موضوع، مسئلهٔ پژوهش ارائه شد. در بخش بعدی، با معرفی علائم و اختصارات لازم، مدل ریاضی این پژوهش- که برمبنای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است- ارائه می‌شود. سپس

الگوریتم ترکیبی- که از ترکیب دو روش فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید است- معرفی می‌شود. بخش بعدی، به نتایج حاصل از حل مدل در ابعاد گوناگونی از مسائل نمونه و تحلیل حساسیت آن می‌پردازد و درنهایت، نتیجه‌گیری و زمینه‌های تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

جدول ۱. ویژگی‌های مسئلهٔ مورد بررسی در این مقاله

ردیف	شاخص LRP	ویژگی تحقیق
۱	تعداد لایهٔ تسهیلات	چندلایه‌ای
۲	ساختار خدمت‌دهی	گذاشت و برداشت
۳	تعداد تسهیلات	چندتسهیلی
۴	ناوگان وسایل نقلیه	همگن
۵	ظرفیت تسهیلات	محدود
۶	ظرفیت وسایل نقلیه	محدود
۷	طبیعت تقاضا	قطعی
۸	افق برنامه‌ریزی	تک‌دوره‌ای
۱۰	نوع تابع هدف	تک‌هدفه
۱۲	فضای جواب	گسسته
۱۳	روش حل	ترکیبی فراابتکاری

مدل ریاضی

گراف بدون جهت $G=(V,E)$ درنظر گرفته می‌شود؛ به‌طوری‌که مجموعه‌گره‌های این گراف شامل V مجموعهٔ تمامی گره‌های شبکه، V_O مجموعهٔ انبارهای مرکزی، V_R مجموعهٔ انبارهای میانی و V_C مجموعهٔ مشتریان است. همچنین $V_1=V_O\cup V_R$ مجموعهٔ گره‌های سطح اول و $V_2=V_R\cup V_C$ مجموعهٔ گره‌های سطح دوم شبکه است. مجموعهٔ تمامی یال‌های موجود در گراف شبکهٔ توزیع (E) شامل یال‌های بدون جهت و اتصال‌دهندهٔ مراکز توزیع مرکزی به مراکز توزیع میانی، مراکز توزیع میانی به مشتریان و مشتریان به یکدیگر است. سفر بین هردو گره به‌وسیلهٔ یک یال شبکه با یک هزینهٔ نامنفی- که در نامساوی $C_{ik}\le C_{ij}+C_{jk}$ صدق می‌کند- مشخص می‌شود. ظرفیت انبارهای میانی، محدود و ظرفیت انبار مرکزی نامحدود است. هر سطح شبکه، شامل وسایل نقلیهٔ مختص به خود است که همگن هستند و تعداد آن‌ها نامحدود درنظر گرفته می‌شود. هر مشتری، تقاضای گذاشت و برداشت کالا را دارد که هم‌زمان باید انجام پذیرد.

مفروضات مدل ریاضی مسئله به شرح زیر است:

- هر وسیلهٔ نقلیه در سطح اول، مسیر خود را از انبار مرکزی شروع می‌کند و با همان انبار به پایان می‌رساند؛
- هر وسیلهٔ نقلیه در سطح دوم، مسیر خود را از انبار میانی شروع می‌کند و با همان انبار به پایان می‌رساند؛
- هر وسیلهٔ نقلیه در سطح اول، فقط یک بار انبارهای میانی را ملاقات و به آن‌ها خدمت‌رسانی می‌کند؛
- هر وسیلهٔ نقلیه در سطح دوم، فقط یک بار هر مشتری را ملاقات و به وی خدمت‌رسانی می‌کند؛
- هریک از تقاضاهای گذاشتی و برداشتی مشتریان باید هم‌زمان برآورده شود و مجموع

تقاضای مشتریان یک مسیر، از ظرفیت وسیلهٔ نقلیه تجاوز نمی‌کند.

مجموعه‌ها و پارامترهای مسئله

I: مجموعهٔ مشتریان؛

O: مجموعهٔ انبارهای مرکزی؛

R: مجموعهٔ انبارهای کاندیدای میانی؛

CW_R: ظرفیت هریک از انبارهای میانی؛

d_i: میزان تقاضای گذاشت هریک از مشتریان؛

p_i: میزان تقاضای برداشتی هریک از مشتریان؛

CW_1: ظرفیت هریک از وسایل نقلیهٔ موجود سطح اول؛

CW_2: ظرفیت هریک از وسایل نقلیهٔ موجود در سطح دوم؛

FW_R: هزینهٔ ثابت راه‌اندازی هریک از انبارهای میانی؛

C_{ij}: هزینهٔ سفر بین هریک از انبارهای مرکزی و میانی و نیز انبارهای میانی و مشتریان؛

FC_i: هزینهٔ ثابت استفاده از هریک از وسایل نقلیهٔ سطح اول؛

FC_2: هزینهٔ ثابت استفاده از هریک از وسایل نقلیهٔ سطح دوم.

متغیرهای تصمیم مسئله

y_{ij}: متغیر صفر و یک، اگر سفر بین گره i و گره j توسط وسیلهٔ نقلیهٔ سطح اول صورت گیرد. $(\forall i, j \in V_1)$

x_{kl}: متغیر صفر و یک، اگر سفر بین گره k و گره l توسط وسیلهٔ نقلیهٔ سطح دوم صورت گیرد. $(\forall k, l \in V_2)$

O_R: متغیر صفر و یک، اگر انبار میانی R ام احداث شود. $(\forall R \in V_R)$

q_{ir}: متغیر صفر و یک، اگر مشتری i ام به انبار میانی R ام تعلق پیدا کند. $(\forall i \in V_C, \forall R \in V_R)$

U_R: مجموع تقاضای تحویلی مشتریان در انبار میانی R ام. $(\forall R \in V_R)$

V_R: مجموع تقاضای برداشتی مشتریان در انبار میانی R ام. $(\forall R \in V_R)$

Z_R: بار تحویلی وسیلهٔ نقلیهٔ سطح اول قبل از سرویس‌دهی به انبار میانی R ام. $(\forall R \in V_R)$

W_R: بار برداشتی وسیلهٔ نقلیهٔ سطح اول بعد از سرویس‌دهی به انبار میانی R ام. $(\forall R \in V_R)$

Z_i: کل بار تحویل‌داده‌شده توسط وسیلهٔ نقلیهٔ سطح دوم پیش از سرویس‌دهی به مشتری i ام. $(\forall i \in V_C)$

W_i: کل بار برداشتی توسط وسیلهٔ نقلیهٔ سطح دوم بعد از سرویس‌دهی به مشتری i ام. $(\forall i \in V_C)$

$$Min \sum_{i\in V_1}\sum_{j\in V_1} c_{ij}y_{ij} + \sum_{k\in V_2}\sum_{i\in V_2} c_{lm}x_{kl} + \sum_{R\in V_R} FC_1 y_{OR} + \sum_{R\in V_R} FW_R O_R + \sum_{R\in V_R}\sum_{i\in V_C} FC_2 x_{Ri} \quad (۱)$$

$$\sum_{j\in V_1} y_{jR} = O_R \qquad \forall R \in V_R \quad (۲)$$

$$\sum_{j\in V_1} y_{ji} = \sum_{j\in V_1} y_{ij} \qquad \forall i \in V_1 \quad (۳)$$

$$Z_j - Z_i + CV_1 y_{ij} \le CV_1 - U_R \qquad \forall i, j \in V_R, i \ne j \quad (۴)$$

$$U_R \le Z_R \qquad \forall R \in V_R \quad (۵)$$

$$Z_R \le CV_1 \qquad \forall R \in V_R \quad (۶)$$

$$U_R = \sum_{l\in V_C} q_{lR} d_l \qquad \forall R \in V_R \quad (۷)$$

$$\sum_{l\in V_C} q_{lR} d_l \le CW_R O_R \qquad \forall R \in V_R \quad (۸)$$

$$W_R - W_e + CV_1 y_{Re} \le CV_1 - U_e \qquad \forall R, e \in V_R, R \ne e \quad (۹)$$

$$V_R \le W_R \qquad \forall R \in V_R \quad (۱۰)$$

$$W_R \le CV_1 \qquad \forall R \in V_R \quad (۱۱)$$

$$Z_R + W_R - U_R \le CV_1 \qquad \forall R \in V_R \quad (۱۲)$$

$$V_R = \sum_{l\in V_C} q_{lR} U_l \qquad \forall R \in V_R \quad (۱۳)$$

$$\sum_{l\in V_C} q_{lR} p_l \le CW_R O_R \qquad \forall R \in V_R \quad (۱۴)$$

$$\sum_{l\in V_2} x_{kl} = 1 \qquad \forall k \in V_C \quad (۱۵)$$

$$\sum_{l\in V_2} x_{kl} - \sum_{l\in V_2} x_{lk} = 0 \qquad \forall k \in V_2 \quad (۱۶)$$

$$\sum_{R\in V_R} q_{lR} = 1 \qquad \forall i \in V_c \quad (۱۷)$$

$$x_{iR} \le q_{iR} \qquad \forall R \in V_R, \forall i \in V_c \quad (۱۸)$$

$$x_{Ri} \le q_{iR} \qquad \forall R \in V_R, \forall i \in V_c \quad (۱۹)$$

$$x_{ki} + q_{kR} + \sum_{e\in V_R, e\ne R} q_{ie} \le 2 \qquad \forall k, i \in V_c, k \ne i, \forall R \in V_R \quad (۲۰)$$

$$Z_i - Z_k + CV_2 x_{ki} + (CV_2 - d_k - d_i)x_{ki} \le CV_2 - d_k \qquad \forall k, i \in V_c, k \ne i \quad (۲۱)$$

$$W_i - W_k + CV_2 x_{ki} + (CV_2 - p_k - p_i)x_{ik} \le CV_2 - p_i \qquad \forall k, i \in V_c, k \ne i \quad (۲۲)$$

$$d_k + \sum_{i\in V_C, k\ne i} x_{ki} d_l \le Z_k \qquad \forall k \in V_C \quad (۲۳)$$

$$Z_k \le CV_2 - (CV_2 - d_k)\sum_{R\in V_R} x_{kR} \qquad \forall R \in V_R, \forall k \in V_c \quad (۲۴)$$

$$p_k + \sum_{i\in V_C, k\ne i} p_i x_{ik} \le W_k \qquad \forall k \in V_C \quad (۲۵)$$

$$W_k \le CV_2 - (CV_2 - p_k)\sum_{R \in V_R} x_{Rk} \qquad \forall k \in V_C \qquad (۲۶)$$

$$Z_k + W_k - d_k \le CV_2 \qquad \forall k \in V_C \qquad (۲۷)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in V_1 \qquad (۲۸)$$

$$q_{iR} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in V_R, \forall k \in V_C \qquad (۲۹)$$

$$O_R \in \{0,1\} \qquad \forall R \in V_R \qquad (۳۰)$$

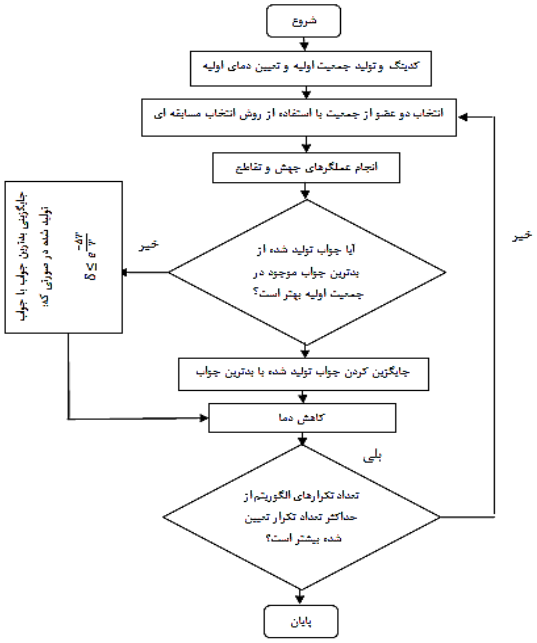
$$x_{ki} \in \{0,1\} \qquad \forall k, i \in V_2 \qquad (۳۱)$$

$$Z_i, W_i, Z_R, W_R, U_R, V_R \ge 0 \qquad \forall k \in V_R, \forall i \in V_C \qquad (۳۲)$$

در این مدل، تابع هدف به‌دنبال کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های ارسال کالا از انبارهای مرکزی به میانی، هزینه‌های ارسال کالا از انبارهای میانی به مشتریان، هزینه‌های ثابت احداث انبارهای میانی، هزینهٔ استفاده از وسایل نقلیهٔ بین انبارهای میانی و مشتریان و هزینهٔ استفاده از وسایل نقلیه بین انبارهای مرکزی و میانی است. با محدودیت (۲) هریک از انبارهای میانی درصورت استقرار یک بار ملاقات می‌شوند. محدودیت (۳) جریان‌های ورودی و خروجی به هر گره را در سطح اول نمایش می‌دهد. محدودیت (۴) حذف زیر دور را برای انبارهای میانی نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۵) و (۶) نشان‌دهندهٔ حد پایین و بالای ظرفیت وسایل نقلیهٔ سطح اول است. محدودیت (۷) مجموع تقاضاهای مشتریان تخصیص‌یافته به یک انبار میانی را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) نشانگر آن است که مجموع تقاضای تحویلی مشتریان یک انبار، از ظرفیت آن تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۹) نشان‌دهندهٔ حذف زیر دور برای انبارهای میانی و تضمین برآورده‌سازی تقاضای برداشتی هریک از انبارهای میانی است. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) حدود جریان تقاضای برداشتی از انبارهای میانی را نشان می‌دهند. محدودیت (۱۲) ظرفیت وسایل نقلیه را در سطح اول محدود می‌کند. محدودیت (۱۳) مجموع تقاضاهای برداشتی مشتریان تخصیص‌یافته به یک انبار میانی را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) نشانگر آن است که مجموع تقاضای برداشتی از مشتریان یک انبار میانی، از ظرفیت آن تجاوز نمی‌کند. مطابق محدودیت (۱۵)، هریک از مشتریان فقط یک بار ملاقات می‌شوند. محدودیت (۱۶) جریان‌های ورود و خروج به هر گره را در سطح دوم نشان می‌دهد. براساس محدودیت (۱۷)، به‌وسیلهٔ یکی از انبارهای میانی به هریک از مشتریان خدمت‌رسانی می‌شود. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۰) از ایجاد زیر دور در شبکه جلوگیری می‌کنند. محدودیت (۲۱) برقراری تقاضای تحویلی مشتریان و حذف مسیرهای غیرمجاز را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۲) نشانگر برقراری تقاضای برداشتی مشتریان و حذف مسیرهای غیرمجاز است. محدودیت‌های (۲۳) تا (۲۶) حدود متغیرهای جریان را در شبکه نشان می‌دهند. محدودیت (۲۷) نشانگر شرط برقراری ظرفیت وسیلهٔ نقلیه در سطح دوم است. محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۲) نشان‌دهندهٔ نوع متغیرهای تصمیم در مسئله هستند.

الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

با آنکه مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی در دستهٔ NP-hard قرار می‌گیرد، مسائل گسترش‌یافتهٔ آن از جمله مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی با گذاشت و برداشت هم‌زمان نیز جزء همین دسته هستند. برای حل این مشکل، روش‌های فراابتکاری پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق، برای حل مدل ریاضی، الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید ارائه شده است. نمودار کلی این الگوریتم، در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. نمودار الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

الگوریتم‌های ژنتیکی، درحقیقت تکنیک‌های جست‌وجوی تصادفی هستند که بر سازوکار طبیعی و قوانین ژنتیکی

ترکیب و جهش استوارند. در برخی از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به‌دلیل فضای گستردهٔ جواب و زمان محاسبهٔ بالا، استفاده از SA مؤثر واقع می‌شود. الگوریتم به‌کاررفته در این مقاله، مبتنی‌بر ترکیب دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید است. این الگوریتم در هر تکرار، از بین مجموع جواب‌های تولیدشده، تعدادی را انتخاب می‌کند، اما در پذیرش جواب همسایه، از رویکرد شبیه‌سازی تبرید بهره می‌گیرد.

نحوهٔ نمایش کروموزوم

جواب اولیه به‌صورت دو بخش و در یک ماتریس به ابعاد $1 * (n + m)$ به‌صورتی که در جدول ۲ نشان داده شده، قرار می‌گیرد. بخش آبی‌رنگ نشانگر انبارهای میانی است و بخش قرمزرنگ مشتریان شبکه را نشان می‌دهد. بخش مربوط به انبار میانی دارای اعداد ۰ تا m است؛ برای مثال، اگر انبار میانی یک عدد ۰ بگیرد، این انبار برای احداث انتخاب نشده است، اما اگر عدد بیشتر از ۰ بگیرد، به مفهوم بازبودن انبار میانی است و عددی که برای آن لحاظ شده، اندیس اولین مشتری را نشان می‌دهد که به آن انبار تخصیص می‌یابد. مشاهده می‌شود که انبار میانی یک غیرفعال است، اما انبارهای میانی دو و سه فعال‌اند.

جدول ۲. نحوهٔ تخصیص اولیهٔ جهت مسیریابی برای مشتریان

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۱	۸	۶	۲	۷	۹	۳	۱۰	۴	۸	۵	۱

اندیس اولین مشتری تخصیص‌یافته به انبار میانی دو، ۱ و اندیس اولین مشتری تخصیص‌یافته به انبار میانی سه، ۸ است؛ بنابراین، مشتریان با اندیس ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ به انبار میانی دو و مشتریان با اندیس ۸، ۹ و ۱۰ به انبار میانی سه اختصاص می‌یابند. جدول ۳ تقاضای گذاشت و برداشت را برای هر مشتری نشان می‌دهد.

جدول ۳. تقاضای گذاشت و برداشت هریک از مشتریان

مشتری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
گذاشت	۱۸	۱۳	۱۹	۱۵	۲۰	۱۱	۱۲	۱۱	۱۲	۱۵
برداشت	۱۲	۹	۱۱	۱۰	۱۵	۸	۹	۸	۹	۱۰

در این مرحله، با توجه به میزان تقاضای مشتریان و با فرض اینکه ظرفیت وسیلهٔ نقلیه ۵۰ باشد، به‌ترتیب تا زمانی‌که ظرفیت وسیلهٔ نقلیه تکمیل نشده باشد، تقاضاهای تخصیص‌یافته به انبار میانی دو را تأمین می‌کنیم. به‌عبارتی، تقاضای مشتریان ۶، ۲، ۷ و ۹ برابر است با ۱۱+۱۳+۱۲+۱۲=۴۸ که کمتر از ظرفیت وسیلهٔ نقلیه است، اما اگر بخواهیم تقاضای مشتری ۳ را نیز تأمین کنیم، ۴۸+۱۹=۶۷ بیشتر از ظرفیت وسیلهٔ نقلیه است. به همین سبب، وسیلهٔ نقلیهٔ دیگری برای تأمین تقاضای مشتریان ۳، ۱۰ و ۴ درنظر می‌گیریم. تقاضای این مشتریان ۱۹+۱۵+۱۵=۴۹ یعنی کمتر از ظرفیت وسیلهٔ نقلیه است؛ بنابراین، وسیلهٔ نقلیهٔ دوم نیاز مشتریان ۳ و ۱۰ و ۴ را برطرف می‌کند.

عملگر تقاطع

برای انجام‌دادن عمل تقاطع، از روش تقاطع یک‌نقطه‌ای استفاده شده است. در این عملگر، دو مسیر مربوط به دو وسیلهٔ نقلیه به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. برای بخش‌های اول و دوم کروموزوم، عمل تقاطع یک‌نقطه‌ای به‌صورت جداگانه به شکل جداول ۴ تا ۷ انجام می‌گیرد:

والد اول:

جدول ۴. والد اول در کروموزوم انتخابی

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۱	۸	۶	۲	۷	۹	۳	۱۰	۴	۸	۵	۱

والد دوم:

جدول ۵. والد دوم در کروموزوم انتخابی

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۳	۱	۶	۳	۶	۷	۲	۹	۴	۱	۸	۱۰	۵

فرزند اول:

جدول ۶. فرزند اول

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۱	۶	۶	۲	۷	۹	۳	۴	۱	۸	۱۰	۵

فرزند دوم:

جدول ۷. فرزند دوم

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۳	۱	۸	۶	۲	۷	۹	۳	۴	۱	۸	۱۰	۵

عملگر Swap

در هر بخش از کروموزوم، نقاط قرمز و سبز به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و جای آن‌ها با یکدیگر عوض شده است (مطابق جداول ۸ و ۹).

عملگر Reversion

در هردو بخش از کروموزوم، نقاط از انتها، به‌ترتیب از کمرنگ به پررنگ مرتب می‌شوند (مطابق جداول ۱۰ و ۱۱).

جدول ۸. نحوهٔ اعمال عملگر Swap

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	چ
۰	۱	۸	۶	۲	۷	۹	۳	۱۰	۴	۸	۵	۱

جدول ۹. جواب تولیدشده پس از اعمال عملگر Swap

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۸	۱	۶	۴	۷	۹	۳	۱۰	۲	۸	۵	۱

جدول ۱۰. نحوهٔ اعمال عملگر Revision

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۱	۸	۶	۲	۷	۹	۳	۱۰	۴	۸	۵	۱

جدول ۱۱. جواب تولیدشده پس از اعمال عملگر Revision

۱	۲	۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۸	۱	۰	۶	۲	۷	۹	۳	۵	۸	۴	۱۰	۱

مقایسهٔ جواب‌های تولیدی

پس از انجام‌گرفتن عملگرهای جهش و تقاطع و تولید جواب‌های جدید، هریک از این جواب‌ها با بدترین عضو موجود در جمعیت اولیه مقایسه می‌شود و درصورت بهتربودن، جایگزین بدترین جواب جمعیت می شود. در غیر این صورت، با احتمال زیر جواب جدید جایگزین بدترین جواب موجود در جمعیت می‌شود:

$$\delta \le e^{-\Delta/T}$$

$$\Delta = \frac{newsol.Cost - sol.Cost}{sol.Cost}$$

که در عبارت بالا $newsol.Cost$ مقدار تابع هدف، جواب جدید تولیدشده است. $sol.Cost$ مقدار تابع هدف بدترین جواب موجود در جمعیت و T نیز مقدار دما در آن تکرار است و درنهایت δ عددی است که به‌صورت تصادفی از توزیع یکنواخت در بازهٔ صفر و یک تولید شده است.

معیار توقف

معیاری که برای توقف الگوریتم درنظر گرفته شده است، حداکثر تعداد نسل‌هاست.

آزمایش‌های عددی

برای ارزیابی و مقایسهٔ الگوریتم‌های ارائه‌شده، از دو دسته مسئله در اندازهٔ نمونه‌های متوسط و بزرگ استفاده شده است.

نمونه مسائل ذکرشده با استفاده از نرم‌افزار متلب کد شده و. سپس روی یک کامپیوتر با مشخصات CPU Core i5 2.3 GHz و RAM 4G اجرا شده‌اند و نتایج در جدول‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. برای هریک از مسائل نمونه در ابعاد متوسط و بزرگ مقادیر پیشنهادی، پارامترهایی درنظر گرفته شده و با انجام‌دادن آزمایش‌های متعدد روی آن‌ها، مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم تنظیم شده است. مقادیر تنظیم‌شده مطابق جدول ۱۲ به‌دست آمده‌اند.

برای تحلیل کارایی الگوریتم فراابتکاری ارائه‌شده نیز چندین مثال در ابعاد کوچک تولید شده و نتایج به‌دست‌آمده با نرم‌افزار دقیق گمز[9] در جدول ۱۳ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده در الگوریتم فراابتکاری، یا دقیقاً منطبق بر نرم‌افزار دقیق‌اند یا اختلاف بسیار اندکی با نتایج این نرم‌افزار دارند.

جدول ۱۲. تنظیم پارامتر الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	نوع نمونه	مقادیر آزمایش‌شده	مقادیر انتخاب‌شده
جمعیت اولیه	متوسط	۹۰ و ۷۰ و ۵۰	۵۰
	بزرگ	۱۴۰ و ۱۲۰ و ۱۰۰	۱۲۰
حداکثر تکرار	متوسط	۱۵۰ و ۱۰۰ و ۵۰	۱۰۰
	بزرگ	۳۰۰ و ۲۰۰ و ۱۰۰	۳۰۰
نرخ تقاطع	متوسط	۰/۷ و ۰/۶ و ۰/۵	۰/۷
	بزرگ	۰/۷ و ۰/۶ و ۰/۵	۰/۶
نرخ جهش	متوسط	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۱	۰/۳
	بزرگ	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۱	۰/۳
دمای اولیه	متوسط	۱۵ و ۱۰ و ۵	۱۰
	بزرگ	۱۵ و ۱۰ و ۵	۱۰
نرخ کاهش دما	متوسط	۰/۹۹ و ۰/۹۵ و ۰/۹	۰/۹۹
	بزرگ	۰/۹۹ و ۰/۹۵ و ۰/۹	۰/۹۵

جدول ۱۳. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ نرم‌افزار دقیق و فراابتکاری

مثال	انبار مرکزی	انبار میانی	مشتریان	هزینه (Gams)	زمان	هزینه (فراابتکاری ترکیبی)	زمان
۱	۱	۳	۷	۱۱،۷۴۹	۳۰۲	۱۱،۷۸۶	۱۵
۲	۱	۴	۸	۱۲،۶۵۰	۳۹۱	۱۲،۶۵۰	۲۱
۳	۱	۳	۱۰	۱۲،۰۴۵	۴۲۲	۱۲،۱۱۱	۱۵
۴	۲	۴	۱۲	۱۴،۵۵۰	۳۹۸	۱۴،۶۰۳	۱۲
۵	۲	۵	۱۵	۱۷،۰۰۴	۶۸۲	۱۷،۰۰۴	۱۶

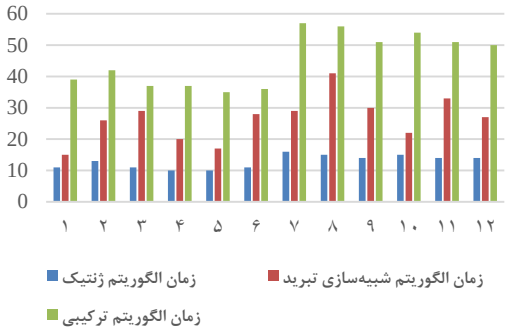
جدول ۱۴ نتایج حل مسائل نمونه را در ابعاد متوسط نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم ژنتیک در زمان حداکثر ۱۶ ثانیه به جواب دست می‌یابد؛ درحالی‌که این زمان برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ۴۱ ثانیه و برای الگوریتم ترکیبی حداکثر ۵۷ ثانیه است. از نظر کیفیت جواب‌ها مشاهده می‌شود که همواره بهترین جواب مربوط به الگوریتم ترکیبی بوده است و اختلاف آن با الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید با افزایش ابعاد مسئله بیشتر شده است. جزئیات محاسبات در جدول ۱۴ مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از حل مسائل نمونه در ابعاد بزرگ در جدول ۱۵ قابل‌مشاهده است. از نظر کیفیت جواب‌ها، باز هم مانند مسائل با اندازهٔ متوسط مشاهده می‌شود که همواره بهترین جواب، الگوریتم ترکیبی است و اختلاف آن با الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید با افزایش ابعاد مسئله بیشتر می‌شود. جزئیات محاسبات در جدول ۱۵ آمده است.

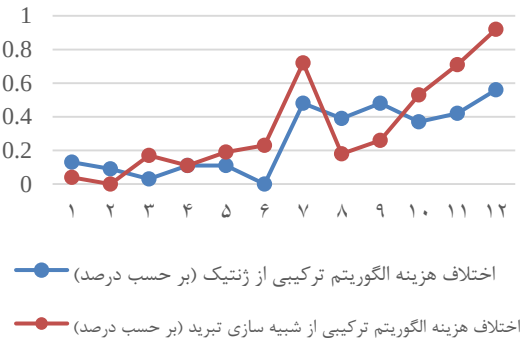
مقایسهٔ زمان‌های حل دو الگوریتم برای هریک از مسائل نمونهٔ متوسط و بزرگ و همچنین مقایسهٔ اختلاف هزینه‌های به‌دست‌آمده در شکل‌های ۳ تا ۷ آمده است. زمان حل الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید، کمتر از الگوریتم ترکیبی است، اما هردو در زمانی معقول قادر به یافتن جواب هستند. از نظر کیفیت جواب در اندازهٔ نمونهٔ ۲۰ مشتری، کیفیت جواب‌ها تقریباً برابر است. در مسائل با اندازهٔ بزرگ، اختلاف جواب‌های به‌دست‌آمده افزایش یافته است که نشانگر کارایی بیشتر الگوریتم ترکیبی برای این مسائل است. جزئیات مربوط در شکل‌های ۳ تا ۷ آمده است.

در این قسمت، به تحلیل حساسیت روی پارامترهای ظرفیت وسایل نقلیهٔ سطح اول و دوم و ظرفیت انبارهای

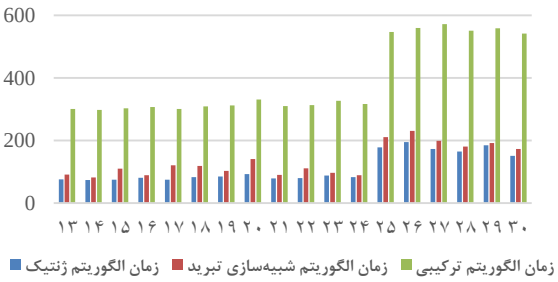
میانی پرداخته می‌شود (این تحلیل‌ها روی مثال ۱۴ صورت گرفته است). ابتدا با فرض ثابت‌بودن ظرفیت وسایل نقلیه، ظرفیت انبارهای میانی را بین ۲۰ درصد افزایش و کاهش می‌دهیم. به‌طور معمول مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت انبارهای میانی، هزینه‌های شبکه کاهش یافته است. در برخی نقاط نیز تغییر ظرفیت انبارهای میانی، هیچ‌گونه تأثیری بر هزینه‌های شبکه ندارد که نشان می‌دهد ظرفیت قبلی این انبارها پاسخگوی نیاز مشتریان بوده است. در حالت بعدی، تأثیر تغییر ظرفیت وسایل نقلیه را بر هزینه‌های شبکه مشاهده می‌کنیم. مشاهده می‌شود که شیب افزایش هزینه‌ها، از تغییر ظرفیت وسایل نقلیهٔ سطح دوم حساس‌تر است که ممکن است ناشی از تعداد بیشتر وسایل نقلیهٔ به‌کاررفته در این سطح باشد. این تغییر هزینه‌ها در شکل ۷ مقایسه شده است.



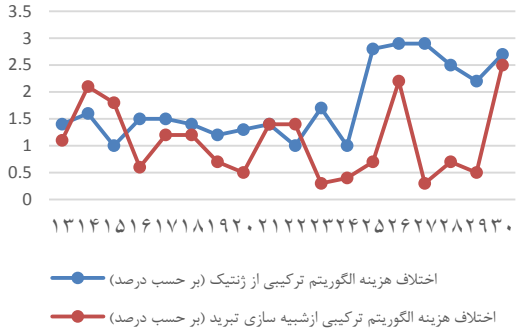
شکل ۳. نمودار مقایسهٔ زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی در اندازهٔ متوسط



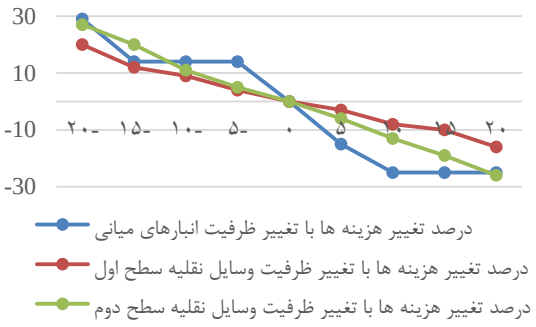
شکل ۴. نمودار اختلاف هزینهٔ الگوریتم‌های پیشنهادی در اندازهٔ متوسط



شکل ۵. نمودار مقایسهٔ زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی در اندازهٔ بزرگ



شکل ۶. نمودار اختلاف هزینهٔ الگوریتم‌های پیشنهادی در اندازهٔ بزرگ



شکل ۷. نمودار تغییر هزینه‌ها با تغییر ظرفیت تسهیلات شبکه

جدول ۱۴. نتایج محاسبات الگوریتم‌های پیشنهادی در اندازهٔ متوسط

شماره مسئله	انبار مرکزی	انبار میانی	مشتریان	بهترین جواب به‌دست‌آمده	الگوریتم ژنتیک (GA)			الگوریتم شبیه‌سازی تبرید(SA)			الگوریتم ترکیبی (GA-SA)		
					هزینه	زمان حل	Gap	هزینه	زمان حل	Gap	هزینه	زمان حل	Gap
۱	۱	۵	۲۰	۳۱،۹۲۷	۳۱،۹۶۹	۱۱	۰/۱۳	۳۱،۹۴۰	۱۵	۰/۰۴	۳۱،۹۲۷	۳۹	۰/۰
۲	۱	۵	۲۰	۲۶،۴۲۹	۲۶،۴۵۳	۱۳	۰/۰۹	۲۶،۴۲۹	۲۶	۰/۰۰	۲۶،۴۲۹	۴۲	۰/۰
۳	۱	۵	۲۰	۳۰،۶۰۰	۳۰،۶۱۰	۱۱	۰/۰۳	۳۰،۶۵۵	۲۹	۰/۱۷	۳۰،۶۰۰	۳۷	۰/۰
۴	۲	۵	۲۰	۲۸،۲۳۷	۲۸،۲۶۹	۱۰	۰/۱۱	۲۸،۲۹۰	۲۰	۰/۱۱	۲۸،۲۳۷	۳۷	۰/۰
۵	۲	۵	۲۰	۲۱،۴۸۹	۲۱،۵۱۴	۱۰	۰/۱۱	۲۱،۵۶۰	۱۷	۰/۱۹	۲۱،۴۸۹	۳۵	۰/۰
۶	۲	۵	۲۰	۳۰،۴۷۳	۳۰،۴۷۴	۱۱	۰/۰۰	۳۰،۵۴۶	۲۸	۰/۲۳	۳۰،۴۷۳	۳۶	۰/۰
میانگین	-	-	-	-	۲۸،۲۱۴	۱۱	۰/۰۸	۲۸،۲۳۶	۲۳	۰/۱۲	۲۸،۱۹۲	۳۷	۰/۰
۷	۱	۵	۵۰	۳۸،۹۲۰	۳۹،۱۰۸	۱۶	۰/۴۸	۳۹،۲۰۲	۲۹	۰/۷۲	۳۸،۹۲۰	۵۷	۰/۰
۸	۱	۵	۵۰	۴۵،۵۱۱	۴۵،۶۸۹	۱۵	۰/۳۹	۴۵،۵۹۱	۴۱	۰/۱۸	۴۵،۵۱۱	۵۶	۰/۰
۹	۱	۵	۵۰	۴۲،۳۲۹	۴۲،۵۳۳	۱۴	۰/۴۸	۴۲،۴۴۰	۳۰	۰/۲۶	۴۲،۳۲۹	۵۱	۰/۰
۱۰	۲	۵	۵۰	۴۰،۵۱۷	۴۰،۶۶۸	۱۵	۰/۳۷	۴۰،۷۳۳	۲۲	۰/۵۳	۴۰،۵۱۷	۵۴	۰/۰
۱۱	۲	۵	۵۰	۳۶،۹۵۷	۳۷،۱۱۱	۱۴	۰/۴۲	۳۷،۲۲۰	۳۳	۰/۷۱	۳۶،۹۵۷	۵۱	۰/۰
۱۲	۲	۵	۵۰	۳۵،۵۷۸	۳۵،۷۷۷	۱۴	۰/۵۶	۳۵،۹۰۶	۲۷	۰/۹۲	۳۵،۵۷۸	۵۰	۰/۰
میانگین	-	-	-	-	۴۰،۱۴۸	۱۵	۰/۴۵	۴۰،۱۸۲	۳۰	۰/۵۵	۳۹،۹۶۸	۵۳	۰/۰

جدول ۱۵. نتایج محاسبات الگوریتم‌های پیشنهادی در سایز بزرگ

شماره مسئله	انبار مرکزی	انبار میانی	مشتریان	بهترین جواب به‌دست‌آمده	الگوریتم ژنتیک (GA)			الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)			الگوریتم ترکیبی (GA-SA)		
					هزینه	زمان حل	Gap	هزینه	زمان حل	Gap	هزینه	زمان حل	Gap
۱۳	۱	۵	۱۰۰	**۵۵،۳۲۲**	۵۶،۱۰۰	۷۶	۱/۴	۵۵،۹۵۶	۹۱	۱/۱	۵۵،۳۲۲	۳۰۱	۰/۰
۱۴	۱	۵	۱۰۰	**۵۲،۰۴۰**	۵۲،۹۱۰	۷۴	۱/۶	۵۳،۱۲۱	۸۲	۲/۱	۵۲،۰۴۰	۲۹۸	۰/۰
۱۵	۱	۵	۱۰۰	**۴۸،۰۳۱**	۴۸،۵۵۹	۷۵	۱/۰	۴۸،۸۸۶	۱۱۰	۱/۸	۴۸،۰۳۱	۳۰۳	۰/۰
۱۶	۲	۵	۱۰۰	**۵۵،۱۰۱**	۵۵،۹۰۵	۸۱	۱/۵	۵۵،۴۳۰	۸۹	۰/۶	۵۵،۱۰۱	۳۰۷	۰/۰
۱۷	۲	۵	۱۰۰	**۴۶،۳۳۶**	۴۷،۰۱۰	۷۵	۱/۵	۴۶،۸۸۴	۱۲۱	۱/۲	۴۶،۳۳۶	۳۰۱	۰/۰
۱۸	۲	۵	۱۰۰	**۵۹،۲۸۸**	۶۰،۱۰۶	۸۳	۱/۴	۶۰،۰۰۳	۱۱۹	۱/۲	۵۹،۲۸۸	۳۰۹	۰/۰
میانگین	–	–	–	–	**۵۳،۴۳۱**	**۷۷**	**۱/۴**	**۵۳،۳۸۰**	**۱۰۲**	**۱/۳**	**۵۲،۶۸۷**	**۳۰۳**	**۰/۰**
۱۹	۱	۱۰	۱۰۰	**۷۴،۴۹۹**	۷۵،۳۸۳	۸۵	۱/۲	۷۵،۰۰۳	۱۰۳	۰/۷	۷۴،۴۹۹	۳۱۲	۰/۰
۲۰	۱	۱۰	۱۰۰	**۶۹،۴۵۰**	۷۰،۳۴۸	۹۳	۱/۳	۶۹،۷۷۹	۱۴۱	۰/۵	۶۹،۴۵۰	۳۳۱	۰/۰
۲۱	۱	۱۰	۱۰۰	**۶۰،۱۵۹**	۶۱،۰۴۲	۷۹	۱/۴	۶۰،۹۹۰	۹۰	۱/۴	۶۰،۱۵۹	۳۱۰	۰/۰
۲۲	۲	۱۰	۱۰۰	**۶۶،۰۴۵**	۶۶،۷۰۱	۸۰	۱/۰	۶۶،۹۹۳	۱۱۱	۱/۴	۶۶،۰۴۵	۳۱۳	۰/۰
۲۳	۲	۱۰	۱۰۰	**۷۲،۶۹۳**	۷۳،۹۴۰	۸۸	۱/۷	۷۲،۸۸۲	۹۷	۰/۳	۷۲،۶۹۳	۳۲۷	۰/۰
۲۴	۲	۱۰	۱۰۰	**۷۶،۹۲۲**	۷۷،۷۲۰	۸۳	۱/۰	۷۷،۲۲۷	۸۹	۰/۴	۷۶،۹۲۲	۳۱۷	۰/۰
میانگین	–	–	–	–	**۷۰،۸۵۵**	**۸۵**	**۱/۳**	**۷۱،۴۷۹**	**۱۰۵**	**۰/۸**	**۶۹،۹۶۱**	**۳۱۸**	**۰/۰**
۲۵	۱	۱۰	۲۰۰	**۱۰۰،۰۹۷**	۱۰۱،۹۰۷	۱۷۸	۲/۸	۱۰۰،۷۷۸	۲۱۱	۰/۷	۹۹،۰۹۷	۵۴۷	۰/۰
۲۶	۱	۱۰	۲۰۰	**۱۰۹،۳۰۷**	۱۱۲،۴۶۲	۱۹۵	۲/۹	۱۱۱،۷۴۶	۲۳۱	۲/۲	۱۰۹،۳۰۷	۵۶۰	۰/۰
۲۷	۱	۱۰	۲۰۰	**۱۰۵،۲۴۰**	۱۰۷،۳۰۹	۱۷۳	۲/۹	۱۰۵،۵۶۱	۱۹۹	۰/۳	۱۰۴،۲۴۰	۵۷۲	۰/۰
۲۸	۲	۱۰	۲۰۰	**۹۶،۳۵۱**	۹۸،۷۳۹	۱۶۵	۲/۵	۹۶،۹۹۸	۱۸۱	۰/۷	۹۶،۳۵۱	۵۵۱	۰/۰
۲۹	۲	۱۰	۲۰۰	**۱۰۱،۹۶۲**	۱۰۴،۲۵۵	۱۸۵	۲/۲	۱۰۲،۴۵۱	۱۹۲	۰/۵	۱۰۱،۹۶۲	۵۵۹	۰/۰
۳۰	۲	۱۰	۲۰۰	**۹۸،۵۸۳**	۱۰۰،۲۷۰	۱۵۱	۲/۷	۱۰۱،۰۰۶	۱۷۳	۲/۵	۹۷،۵۸۳	۵۴۲	۰/۰
میانگین	–	–	–	–	**۱۰۴،۱۵۷**	**۱۷۴**	**۱/۸۵**	**۱۰۳،۰۹۰**	**۱۹۸**	**۱/۱۵**	**۱۰۱،۴۲۳**	**۵۵۵**	**۰/۰**

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی دوسطحی با درنظرگرفتن ظرفیت و تعداد معین برای انبارهای مرکزی، انبارهای میانی و وسایل نقلیه درنظر گرفته شد. مشتریان در این سیستم، علاوه‌بر تقاضای دریافت کالا، تقاضای تحویل کالا به وسایل نقلیه را نیز دارند که این امر باید هم‌زمان صورت گیرد. برای این مسئله، از مدل‌سازی ریاضی عدد صحیح مختلط استفاده شد. به‌منظور حل این مدل، دو رویکرد بررسی شد. اولین رویکرد، استفاده از الگوریتم ژنتیک و دومی، استفاده از الگوریتم ترکیبی ژنتیک-

شبیه‌سازی تبرید بود. هردو الگوریتم، در زمانی معقول قادر به یافتن جواب برای این مسئله بودند، اما همواره الگوریتم ترکیبی، جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌کرد که با افزایش اندازهٔ مسئله‌های نمونه، این اختلاف افزایش می‌یافت. برخی از زمینه‌های پژوهش‌های آتی برای این تحقیق شامل موارد زیر است:

- استفاده از سایر رویکردهای ابتکاری یا فراابتکاری مانند ژنتیک، کلونی مورچگان و... به‌منظور بهبود هرچه بیشتر جواب و مقایسهٔ آن با روش پیشنهادی؛
- درنظرگرفتن انواع حالات مسئلهٔ مسیریابی با محدودیت گذاشت و برداشت برای مثال فرض برداشت انتخابی، یا درنظرگرفتن فرض برداشت در مسیر برگشت؛
- توسعهٔ مدل با استفاده از مدل‌های موجودی، درنظرگرفتن مسئلهٔ مکان‌یابی- مسیریابی سبز و فرض‌هایی مانند امکان تحویل چندبخشی کالا و... ؛
- درنظرگرفتن برخی دیگر از پارامترهای مسئله در حالت غیرقطعی مانند زمان سفر و زمان سرویس که با آن می‌توان مسئلهٔ مورد نظر را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر کرد.

مراجع

1. Nagy, G. and Salhi, S. (2007). "Location-routing: Issues, models and methods", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No.2, PP.649-672.
2. Jacobsen, S.K. and Madsen, O.B. (1980). "A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 5, No.6, PP.378-387.
3. Or, I. and Pierskalla, W.P. (1979). "A transportation location-allocation model for regional blood banking", *AIIE transactions*, Vol. 11, No.2, PP.86-95.
4. Nambiar, J.M., Gelders, L.F. and Van Wassenhove, L.N. (1981). "A large scale location-allocation problem in the natural rubber industry", *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, No.2, PP.183-189.
5. Laporte, G. and Nobert, Y. (1981). "An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location", *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, No.2, PP.224-226.
6. Madsen, O.B. (1983). "Methods for solving combined two level location-routing problems of realistic dimensions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 12, No.3, PP.295-301.
7. Min, H., V. Jayaraman, and R. (1988). "Srivastava, Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 108, No.1, PP.1-15.
8. Balakrishnan, A., Ward, J.E. and Wong, R.T. (1987). "Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects", *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, Vol. 7, No.) 1-2), PP.35-61.
9. Berman, O., Jaillet, P. and Simchi-Levi, D. (1995). "Location-routing problems with uncertainty", *Facility location: a survey of applications and methods*, Vol. 106, PP.427-452.
10. Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S. M. and Ignatius, J. (2017). "Adaptive large neighborhood search heuristic for pollution-routing problem with simultaneous pickup and delivery", *Soft Computing*, PP.1-15.
11. Prodhon, C. and Prins, C. (2014). "A survey of recent research on location-routing problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 238, No.1, PP.1-17.
12. Drexl, M. and Schneider, M. (2015). "A survey of variants and extensions of the location-routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 241, No.2, PP.283-308.
13. Karaoglan, I., Altiparmak, F., Kara, I. and Dengiz, B. (2011). "A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery", *European Journal of Operational Research*, Vol. 211, No.2, PP.318-332.

14. Hosseini-Motlagh, S. M., Majidi, S., Yaghoubi, S. and Jokar, A. (2017). "Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows", *RAIRO-Operations Research*.

15. Karaoglan, I., Altiparmak, F., Kara, I.and Dengiz, B. (2012). "The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach", *Omega*, Vol. 40, No.4, PP.465-477.

16. Rieck, J., Ehrenberg, C. and Zimmermann, J. (2014). "Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery", *European Journal of Operational Research*, Vol. 236, No.3, PP.863-878.

17. Çetiner, S., Sepil, C. and Süral, H. (2010). "Hubbing and routing in postal delivery systems", *Annals of Operations Research*, Vol. 181, No.1, PP.109-124.

18. de Camargo, R.S., de Miranda, G. and Løkketangen, A. (2013). "A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No.12, PP.7465-7480.

19. Wasner, M. and Zäpfel, G. (2004). "An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service", *International Journal of Production Economics*, Vol. 90, No.3, PP.403-419.

20. Vincent, F.Y., et al., (2010). "A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No.2, PP.288-299.

21. Alumur, S. and Kara, B.Y. (2007). "A new model for the hazardous waste location-routing problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No.5, PP.1406-1423.

22. Nikbakhsh, E. and Zegordi, S. (2010). "A heuristic algorithm and a lower bound for the two-echelon location-routing problem with soft time window constraints", *Scientia Iranica Transaction E: Industrial Engineering*, Vol. 17, No.1, PP.36-47.

23. Nguyen, V.-P., Prins, C. and Prodhon, C. (2012). "A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, No.1, PP.56-71.

24. Sajjadi, S. R. and Hossein Cheraghi, S. (2011). "Multi-products location–routing problem integrated with inventory under stochastic demand", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 7, No.4, PP.454-476.

25. M. Hamidi, K., Farahmand, S., Reza Sajjadi, and K. Nygard., (2012). "A hybrid GRASP-tabu search metaheuristic for a four-layer location-routing problem", *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 12, No.1, PP.267-287.

26. Rieck, J., Ehrenberg, C. and Zimmermann, J. (2014). "Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery", *European Journal of Operational Research*, Vol. 236, No.3, PP.863-878.

27. Jiang, S. and Ma, Z. (2009). "A Hybrid Genetic Algorithm for the Stochastic Dynamic Location-Routing-Inventory Problem in Closed-Loop Logistics System for Reusing End-of-Use Products", *International Conference on Transportation Engineering*.

28. Ghodsi, R. and Shamekhi Amiri, A. (2010). "A variable neighborhood search algorithm for continuous location routing problem with pickup and delivery", *Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation*, PP.193-203.

واژه‌های لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. Location-Routing Problem (LRP)
2. Multi Echelon Location-Routing Problem

3. Two-Echelon Location-Routing Problem (2E-LRP)
4. Flow Based
5. Branch and Cut (B&C)
6. Simulated Annealing (SA)
7. Node Based
8. Hub
9. GAMS