پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ٦، شماره ١، بهار ١٤٠٠، صص٤٤-٦٤
نوع مقاله: پژوهشی

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت تردد: الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

مصطفی حاجی خانی[1]، جواد بهنامیان [2*]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ ارسال:۱۳۹۹/۰۵/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰

چکیده

هدف از حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، یافتن مسیری مناسب با در نظر گرفتن شرایط موجود در مسئله حمل‌ونقل است. در این مسئله، در نظر گرفتن شرایط مسیریابی با چند انبار به همراه اعمال محدودیت تردد برخی وسایل نقلیه در برخی مسیرها، شرایطی کاملاً واقعی و پیچیده را بوجود خواهد آورد. از طرفی در مواردی نیز لازم است با چندین بار ملاقات، تقاضای مشتریان تحویل داده شود. به این منظور در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن همزمان شرایط چند انباره بودن، امکان تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت تردد، شرایط مسئله مسیریابی تا حد زیادی به مسائل دنیای واقعی نزدیک گردد. در این مقاله، پس از ارائه یک مدل ریاضی، مسئله در ابعاد کوچک با استفاده از حل کننده سیمپلکس حل شده است. در ادامه و از آنجایی که مسئله مورد بررسی در دسته مسائل ***NP-Hard*** می‌باشد، برای حل آن در ابعاد بزرگتر، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیشنهاد گردیده است. در پایان نیز برای اعتبارسنجی و بررسی کیفیت الگوریتم پیشنهادی، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. نتایج محاسباتی حاصل نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر زمان و کیفیت حل دارای عملکرد مناسبی است.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره، محدودیت تردد، تحویل چندمرحله‌ای، جستجوی همسایگی متغیر

---

* نویسندهٔ مسؤول مقاله E-mail: Behnamian@basu.ac.ir

١- مقدمه

مسئله حمل‌ونقل و انتقال کالا از نقطه‌ای به نقطه دیگر از مسائل مهم در حوزه لجستیک و زنجیره تأمین می‌باشد. حمل‌ونقل از عوامل کلیدی در توسعه اقتصادی است که آثار اقتصادی آن را می‌توان در فعالیت‌های دیگر مانند صنایع سنگین، کشاورزی، گردشگری مشاهده کرد [١]. یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین مسائل درزمینه حمل‌ونقل، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه است که همواره برنامه‌ریزان با سرمایه‌گذاری، طرح‌ها و پروژه‌هایی را جهت توسعه و بهبود حمل‌ونقل مطرح می‌کنند. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌گردد که در آن تعدادی خودرو متمرکز در یک یا چند انبار بایستی به مجموعه‌ای از مشتریان مراجعه نموده و خدمتی را ارائه دهند و هر یک از مشتریان تقاضای معینی دارند. این مسئله می‌خواهد که با مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی به گونه‌ای عمل کند که هزینه‌های مربوطه مانند مسافت طی شده، زمان کل سفر و تعداد وسایل حمل‌ونقل کمینه گردد. این اهمیت ازآنجا ناشی می‌شود که تخصیص مطلوب وسایل به مسیرهای مختلف، ضمن کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل موجب کاهش نیاز به انبار و نگهداری کالا، تحویل به موقع کالا و افزایش رضایتمندی مشتریان می‌شود.

در این مقاله سه مفروض از دنیای واقعی با عنوان شرایط چند انباره بودن، تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت تردد، با مسئله مسیریابی وسایل نقلیه مورد بررسی قرار گرفته است. بسیاری از صنایع دارای چندین انبار یا کارخانه برای تولید هستند؛ مانند شرکت‌های لبنیاتی که در چند شهر مختلف محصول تولید می‌کنند و این کارخانه‌ها به صورت یکپارچه به مشتریان محصولات خود را تحویل می‌دهند. بعضی مواقع نیز لازم است برای تحویل محصول چند بار مشتری را ملاقات کرد؛ مانند تحویل بتن. در برخی از مسائل دنیای واقعی نیز محدودیت تردد برای وسیله نقلیه (مانند کامیون و تریلی‌ها که اجازه تردد از بعضی مسیرها را ندارند) وجود دارد. از این رو در تحقیق پیش رو، مسیریابی وسایل نقلیه با داشتن چند انبار، تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت تردد با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل مورد بررسی قرار گرفته است. این مسئله از جمله مسائل NP-Hard است. حل بهینه این مسائل در ابعاد بزرگ زمان‌بر است؛ لذا پس از مدل‌سازی مسئله و حل آن در ابعاد کوچک با سیمپلکس، از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر جهت حل آن در

ابعاد بزرگ استفاده شده و در نهایت نتایج حاصل در مقایسه با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در ادامه تحقیق و در بخش دوم، ادبیات موضوع بررسی شده است. در بخش سوم مدل ریاضی و پیچیدگی حل آن ارائه گردیده است. در بخش چهارم جزییات پیاده‌سازی الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر آورده شده است. در بخش پنجم نتایج محاسباتی و تحلیل‌های مرتبط بیان شده و در نهایت در بخش پایانی نتیجه‌گیری و مطالعات آتی بیان شده است.

۲- مرور ادبیات

براندو[۱] [۲] یک جستجوی محلی برای مسیریابی وسایل نقلیه باز (وسیله نقلیه در انتهای مسیر حتماً نباید به انبار برگردد) ارائه داده است. سوانه و همکاران[۲] [۳] یک مدل و راه‌حل ابتکاری برای مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار و کاهش ریسک تردد وسایل نقلیه ارائه دادند. کروپر و همکاران[۳] [٤] مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار که امکان بارگیری وسیله نقلیه در بین راه توسط یک انبار دیگر را دارد، توسعه دادند و با روش‌های فراابتکاری آن را حل کردند. مونتویا-تورس و همکاران[٤] [٥] یک مقاله مروری برای مسیریابی با چند انبار ارائه داده‌اند و مقالات دارای پنجره زمانی، تحویل چند مرحله‌ای، ناوگان ناهمگن و برداشت و تحویل را بررسی کردند. همچنین مقالات را به تک هدفه و چند هدفه تقسیم کرده‌اند. ری و همکاران[٥] [٦] یک مدل خطی برای مسئله چند انباره با تحویل چند مرحله‌ای ارائه دادند که مکان انبار و مسیر مناسب را بدست می‌آورد و برای حل مدل یک روش ابتکاری ارائه داده‌اند. لی و همکاران[٦] [٧] مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه در نگهداری ماشین‌آلات کشاورزی با داشتن چند انبار ارائه داده و با الگوریتم کرم شب‌تاب آن را حل کرده‌اند. تو و همکاران[٧] [٨] یک مدل دوسطحی چند انباره ارائه دادند که در مرحله اول مشتری‌ها به یک انبار اختصاص می‌یابند و در مرحله دوم مسیر وسیله نقلیه مشخص می‌شود. برای حل آن از روش شبیه‌سازی تبرید کمک گرفته است. بروت فلت و جانمین[٨] [٩] یک مدل سه سطحی بارگیری با تحویل چندمرحله‌ای ارائه داده‌اند. این مدل ترکیب مسیریابی، برداشت و تحویل است. برای حل یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد داده است که همزمان

مسیریابی و بارگیری وسیله نقلیه را بدست می‌آورد. کاسازا و همکاران[٩] [١٠] یک مدل برداشت و تحویل چندمرحله‌ای برای یک محصول تک کالایی ارائه دادند. در مدل پیشنهادی، برداشت و تحویل می‌تواند در چند مرحله انجام شود و برای حل از روش شاخه و قیمت استفاده شده است. گلسزینسکی و همکاران[١٠] [١١] مسئله مسیریابی با چند انبار و تحویل چندمرحله‌ای ارائه دادند و برای حل آن یک برنامه‌ریزی عدد صحیح برپایه روش ابتکاری توسعه داده‌اند که این روش خود ترکیبی از دو الگوریتم است. وانگ و همکاران[١١] [١٢] مدلی برای تحویل چندمرحله‌ای و چند انباره با حداقل زمان سرویس‌دهی ارائه داده‌اند و برای حل از روش ابتکاری استفاده شده است که می‌توان این روش را در مدیریت توزیع روزنامه و مسیریابی استفاده کرد. حسینی و حسنی [١٣] مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت تردد ارائه داده‌اند.

به تازگی صالحی سربیژن و بهنامیان [١٤] مدلی برای مسیریابی در تولید با دو هدف کاهش هزینه‌ها و ریسک تصادف در حمل‌ونقل، با در نظر گرفتن برونسپاری، چند محصولی و چند دوره‌ای پیشنهاد داده‌اند. از آنجایی که این مسئله NP-Hard می‌باشد، آن‌ها از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب برای حل مسئله بهره بردند.

مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که مطالعات زیادی بر روی مسائل مسیریابی وسایل نقلیه انجام گرفته است، اما بررسی همزمان حالت چند انباره با تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت تردد در تحقیقات پیشین وجود ندارد. نوآوری این تحقیق اضافه کردن سه شرط به مسئله است که لحاظ کردن این شرایط و محدودیت‌ها مسئله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرده است. درروش حل با توجه به پیچیدگی مسئله و عدم توانایی حل بهینه آن در ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر استفاده شده است.

٣- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در این تحقیق مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن چند انبار، تحویل چندمرحله‌ای و محدودیت ترافیک با هدف کمینه‌سازی هزینه وسیله نقلیه و هزینه مسافت طی شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. در اینجا فرض شده است که هر وسیله‌ای دارای هزینه ثابت و متغیر می‌باشد که در آن هزینه ثابت در صورت استفاده از وسیله لحاظ می‌شود و

هزینه متغیر وابسته به طول مسیر طی شده وسیله نقلیه لحاظ می‌گردد. همچنین فرض شده است که مسئله دارای چندین انبار بوده که این انبارها مشابه‌اند و مزیتی نسبت به یکدیگر ندارند. مسیرها دارای محدودیت ترافیک بوده، بدین معنی که از تعدادی از مسیرها بعضی خودروها نمی‌توانند حرکت کنند. این موضوع در دنیایی واقعی هم کاربرد دارد. برای مثال امکان تردد کامیون در بعضی مسیرها وجود ندارد. برای مسئله تعداد ناوگان محدودی در نظر گرفته شده که مدل مسئله به طور خودکار به میزان نیاز، از آنها استفاده خواهد کرد و در صورتی که از وسیله نقلیه استفاده نشود، هزینه ثابت در نظر گرفته نمی‌شود.

۱-۳- مفروضات مسئله

مفروضات مسئله مورد بررسی به شرح زیر است:

- هر مسیر از یک انبار شروع شده و به همان انبار ختم می‌شود.
- مشتریان می‌توانند بیش از یک‌بار ملاقات شوند و سرویس را در چند مرحله دریافت کنند.
- هر مسیر، مقادیر تحویلی از انبار را به مشتریان بازدید شده انتقال می‌دهد.
- مسئله فقط تحویل دارد و از مشتریان چیزی دریافت نمی‌شود.
- تعداد وسایل نقلیه در دسترس ثابت است و در صورت عدم کاربرد، هزینه صفر برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.
- مجموع تقاضای تحویلی مشتری‌ها که به یک وسیله نقلیه اختصاص می‌یابد، نباید از ظرفیت آن وسیله بیشتر شود.
- ظرفیت وسایل نقلیه ناهمگن است.
- مقدار تقاضای هر مشتری ثابت و معین است.
- وسایل نقلیه باید سفر خود را از یک انبار آغاز کنند و در پایان به همان انبار بازگردند (مسیر بسته).

مسئله به صورت مدل برنامه‌ریزی طی عدد صحیح مختلط فرموله شده است که در ادامه به شرح آن خواهیم پرداخت.

۲-۳- مدل ریاضی پیشنهادی

مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با داشتن چند انبار و تحویل چندمرحله‌ای با محدودیت تردد یا ترافیک بیان می‌شود. به منظور بیان مدل پیشنهادی، پارامترها اندیس‌ها و مجموعه‌های زیر تعریف می‌شود.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

M: مجموعه تمام گره‌های تقاضا (مشتریان)

N: مجموعه تمام گره‌های انبار

K: مجموعه تمام وسایل نقلیه در دسترس

R: مجموعه وسایل نقلیه که امکان حرکت در مسیر بین گره i و j را ندارند.

i: اندیس گره تقاضا بطوریکه $i=\{N+۱,N+۲,\dots, M\}$ می‌باشد و انبار در گره $i=\{۱،۲,\dots N\}$ قرار دارد.

j: اندیس گره تقاضا بطوریکه $j=\{N+۱,N+۲, \dots M\}$ می‌باشد.

k: اندیس وسیله نقلیه نوع K ام

پارامترها و متغیرها

C_k: هزینه متغیر هر واحد سفر با وسیله نقلیه نوع kام

b_k: هزینه ثابت وسیله نقلیه k ام

d_{ij}: فاصله میان دو گره i و j

de_i: تقاضای تحویلی به مشتری i

Q_k: ظرفیت وسیله نقلیه k ام

x_{ijk}: برابر است با یک، اگر وسیله نقلیه k ام، مسیر بین مشتری i و مشتری j را بپیماید و در غیر این صورت صفر است

y_{ik}: درصد تقاضای برآورده شده گره i توسط وسیله نقلیه k

U_i: متغیر آزاد در علامت

f_k: برابر است با یک اگر وسیله نقلیه k ام استفاده شده باشد و در غیر این صورت صفر است.

بر این اساس مدل مسئله به شرح زیر می‌باشد:

مصطفی حاجی خانی و همکار ـــ

تابع هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی هزینه ثابت و متغیر وسیله نقلیه است. رابطه (۲) و (۳) بیان می‌کنند که از هر وسیله نقلیه حداکثر یک‌بار استفاده شود و همچنین وسیله نقلیه از هر انباری که خارج شد به همان انبار باز گردد. رابطه (٤) برای پیوستگی مسیر است؛ بدین معنی که وسیله نقلیه وارد گره‌ای شد باید از آن خارج شود. رابطه (٥) و (٦) برای تحویل چندمرحله‌ای تقاضای مشتریان است. همچنین رابطه (٥) بیان می‌کند که مجموع درصد تقاضای برآورده شده گره i برابر یک شود و رابطه (٦) اگر تقاضای گره i ام توسط وسیله نقلیه k ام برآورده شد، آنگاه باید مسیر گره i ام به یکی از گره‌های دیگر توسط وسیله k ام محقق شود. رابطه (۷) محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه است. رابطه (۸) برای تعیین استفاده از

وسیله نقلیه است. رابطه (۹) مربوط به محدودیت ترافیک است به این معنی که برخی واسل نقلیه امکان تردد از برخی مسیرها را ندارند. رابطه (۱۰) مربوط به شکننده زیر تور است و روابط (۱۱) نیز وضعیت متغیرهای حالت را نشان می‌دهد.

۳-۳- پیچیدگی مسئله

این مسئله جزء مسائل NP-Hard است چراکه می‌توان آن را با کمک روش تقلیل به مسئله فروشنده دوره‌گرد تبدیل کرد [۱۵]. مسئله فروشنده دوره‌گرد جز مسائل سخت است.

۴- الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS)[۱۳] یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید است. این الگوریتم بر پایه تغییرات سیستماتیک ساختار همسایگی است. این الگوریتم بسیار ساده است و به تعداد پارامترهای تنظیم شده، نیاز کمتری دارد. بنابراین دست‌یابی به جواب‌هایی با کیفیت بالا در زمان قابل‌قبول، در کنار ساده بودن این روش، کارایی مناسب این الگوریتم را نشان می‌دهد.

۱- ۴- کلیات الگوریتم پیشنهادی

ایده اصلی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر استفاده از ساختار همسایگی‌های متفاوت در هنگام جستجو فضای جواب، برای کاستن از احتمال گیر افتادن در بهینه محلی است. استفاده از این ویژگی منحصر به فرد خصوصاً در زمانی که فضای جواب همگام با اندازه مسئله افزایش می‌یابد، احتمال به دام افتادن در بهینه محلی را کاهش خواهد داد. ساختار کلی این روش در زیر نشان داده شده است.

الگوریتم ۱. ساختار کلی روش جستجوی همسایگی متغیر

همسایگی‌های $N_I, I = ۱, \dots, I_{Max}$ را ایجاد کنید
۱. جواب اولیه X را بیابید.
۲. تا زمانی که شرایط توقف برقرار نشده، تکرار کنید:
۳. قرار دهید: $l \leftarrow ۱$

۴. تا زمانی که ۱ $\leq I_{Max}$ انجام دهید:
۵. بهترین جواب `X نسبت به k امین همسایگی X را بیابید
۶. جایگزین شدن یا نشدن
۷. اگر `$x$ از $x$ بهتر بود، یعنی $f(x`) < f(x)$ آنگاه:
۸. $X`X \leftarrow$
۹. $I \leftarrow$ ۱
۱۰. در غیر این صورت
۱۱. $I \leftarrow l+$۱
۱۲. پایان شرط
۱۳. پایان حلقه
۱۴. پایان حلقه
۱۵. جواب x را نمایش بده

همچنانکه ملاحظه می‌کنید اولین قدم در الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر تعریف ساختارهای همسایگی جهت تولید جواب همسایگی است. در الگوریتم *VNS* به صورت دائم همسایگی بزرگتری جستجو می‌شود. اگر در این جستجو جواب بهتری یافت شد، جستجو برای جواب جدید از ابتدا آغاز می‌شود.

۲-۴- روش نمایش جواب

به عنوان اولین گام در پیاده‌سازی الگوریتم، به عنوان روش نمایش جواب در این تحقیق از روش جایگشتی معرفی شده در [۱۶] استفاده شده است و مشتریان به صورت تصادفی به یکی از وسایل نقلیه تخصیص یافته‌اند. نمونه جایگشت تولید شده در شکل ۱ برای پنج مشتری و سه خودرو دیده می‌شود که در آن جایگشتی به طول $k+M$-۱ (مجموع مشتریان و وسایل منهای یک) ایجاد شده است.

۳	۷	۲	۴	۶	۱	۵
خودرو سوم	–	خودرو دوم		–	خودرو اول	

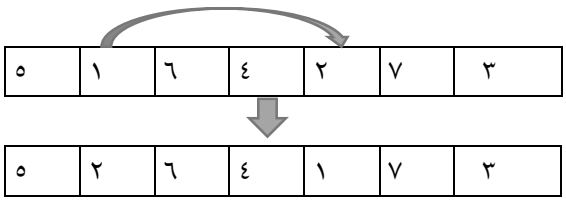
شکل ۱. روش نمایش جواب

در این شکل اعداد یک تا پنج مربوط به مشتری‌ها است و اعداد شش و هفت جداکننده هستند. با توجه به این مثال، می‌توان گفت که خودرو اول از انبار حرکت کرده، در ابتدا مشتری پنج را ملاقات می‌کند، سپس مشتری یک و به انبار باز می‌گردد. انتخاب انبار هم به صورت تصادفی است که یکی از انبارها برای شروع مسیر انتخاب می‌شود. به همین ترتیب خودرو دوم، ابتدا مشتری چهار و پس از آن مشتری دوم را ملاقات کرده و سپس به انبار برمی‌گردد. خودرو سوم هم فقط مشتری سه را ملاقات کرده و به انبار باز می‌گردد. سپس تورهای ایجاد شده بررسی می‌شوند و مقدار تابع هدف برای آن‌ها به دست می‌آید. بعضی از تورهایی که ایجاد می‌شود از جمله جواب‌های نشدنی هستند که با روش جریمه گذاری این جواب‌ها مشخص و از مجموعه جواب‌ها حذف می‌شوند. اما برای تولید جواب بعدی از این جواب‌های نشدنی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از این جواب‌ها با هدف کاستن از احتمال گیر افتادن در بهینه محلی انجام می‌شود.

۳-۴ - ساختارهای همسایگی

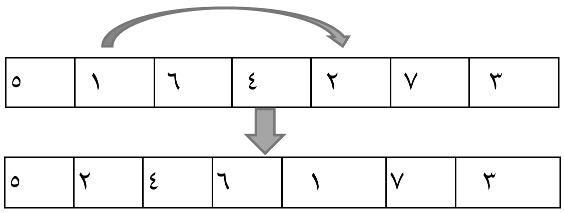
در این الگوریتم از سه عملگر حرکتی جهت ایجاد همسایگی استفاده شده است.

(۱) عملگر حرکتی اول تعویض است که دو عنصر A,B به صورت تصادفی از جایگشت انتخاب شده و جای آن‌ها تعویض می‌شوند.



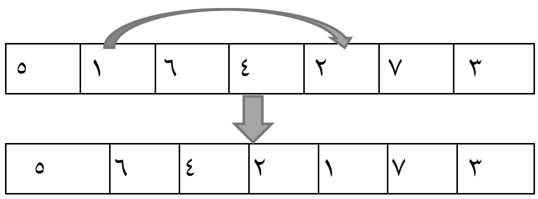
شکل ۲. نحوه عملکرد تعویض

(۲) عملگر دوم عملگر معکوس‌سازی است. در این عملگر به صورت تصادفی دو عنصر A,B انتخاب می‌شوند و ترتیب قرارگیری عناصر مابین جابجا می‌شود.



شکل ۳. نحوه عملکرد معکوس‌سازی

(۳) عملگر سوم عملگر انتقال است، در این عملگر دو عنصر A و B به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و عنصر A به خانه بعدی B $(B+1)$ منتقل می‌شود.



شکل ۴. نحوه عملکرد انتقال

لازم به ذکر است که شرط توقف الگوریتم تعداد تکرار در نظر گرفته شده است که مقدار آن به صورت تجربی انتخاب شده است و با رسیدن به آن الگوریتم متوقف و جواب‌ها نمایش داده می‌شود و بهترین آنها انتخاب می‌گردد.

۵- نتایج محاسباتی

هدف از این بخش اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی است. به این منظور در ابعاد کوچک مسئله از خروجی سیمپلکس استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله مورد بررسی و اینکه با بزرگ شدن ابعاد مسئله زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد، لذا برای حل زمان محدودیت حداکثر ۱۵۰۰ ثانیه در سیمپلکس در نظر گرفته شده است. مدل در ابعاد مختلف حل گردید و نتایج محاسباتی گزارش شده است. همچنین به منظور بررسی کارایی

جستجوی همسایگی متغیر در ابعاد بزرگتر مسائل، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی ملانوری و همکاران [۱۷] استفاده شده است. ملانوری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۸ برای حل یک مسئله حمل و نقل از روش شبیه‌سازی تبرید استفاده کرد.

روش شبیه‌سازی تبریدی مبتنی بر پدیده فیزیکی است که در آن فرآیند خنک کاری به صورت حرارت‌دهی و سردسازی آهسته یک ماده به منظور دستیابی به یک ساختار کریستالی سخت و محکم انجام می‌شود. این الگوریتم توانایی پذیرش جواب‌های با کیفیت بدتر را دارد. هدف از این کار، فرار از نقطه بهینه محلی و به تأخیر انداختن همگرایی زودرس است. فرآیند بهینه‌سازی این الگوریتم به این صورت است که از یک جواب تصادفی به عنوان جواب اولیه حرکت خود را آغاز می‌کند و دمای سیستم برابر دمای اولیه قرار دارد. در تکرار یک جواب، همسایه جواب فعلی به دست می‌آید. مقدار تابع هدف جواب $T=T.$ می‌گیرد. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی بود جایگزین می‌شود، در غیر این صورت الگوریتم آن جواب را با احتمال $exp\ -(\Delta E\ /\ T)$ به عنوان جواب فعلی جایگزین خواهد کرد. در این رابطه ΔE تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه است و T یک پارامتر دما است. در هر مرحله، چند حالت را در همسایگی حالت کنونی s در نظر می‌گیرد و به طور تصادفی تصمیم می‌گیرد که سیستم را از حالت s منتقل می‌کند یا در همین حالت باقی بماند. فرآیند جستجوی همسایگی ادامه می‌یابد تا زمانی که تعداد تکرارها به مقدار T جدید و از پیش تعیین شده برسد. پس از آنکه تکرارها به اندازه از پیش تعیین شده رسید، دمای سیستم کاهش می‌یابد. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که الگوریتم به معیار نهایی برسد [۱۸].

لازم به ذکر است که الگوریتم‌ها در نرم‌افزار *MATLAB-R۲۰۱۸b* اجرا شده است و در حل مدل از نرم‌افزار گمز و حل‌کننده سیمپلکس استفاده شده است. در اینجا از رایانه با پردازنده *Intel core i*۵ ،۲,۲۷ *GHz* و ٤ گیگابایت حافظه داخلی استفاده شده است.

۱-۵- تولید مثال‌های نمونه

اطلاعات مربوط به نمونه‌های تصادفی تولیدشده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ساختار مثال‌های تولید شده

مسئله	تعداد مشتری	تعداد وسیله نقلیه	تعداد انبار
۱	۳	۲	۲
۲	٤	۲	۲
۳	٤	۳	۲
٤	٥	٤	۲
٥	٦	٤	۲
٦	۷	۷	۲
۷	۷	٥	۳
۸	۹	۷	۲
۹	۹	۷	۳
۱۰	۱۱	۸	۲
۱۱	۱۲	۹	۳
۱۲	۱٥	۱۲	۳
۱۳	۱٦	۱۲	٤
۱٤	۱۸	۱٤	٤
۱٥	۱۷	۱۱	٥
۱٦	۱۹	۱۲	٥
۱۷	۲۱	۱۷	٥
۱۸	۲۱	۱۷	٦
۱۹	۲۲	۱۹	۷
۲۰	۲۹	۲۱	۱۱

در این جدول، ستون اول شماره مسئله، ستون دوم تعداد مشتری، ستون سوم تعداد وسیله نقلیه و ستون چهارم تعداد انبارها را نشان می‌دهد. همچنین تعداد تکرارها در در جدول ۲ اطلاعات مربوط به محدودیت تردد وسایل نقلیه در مسیرها آمده شده است.

جدول ٢. محدودیت تردد وسایل نقلیه

خودرو اول	خودرو دوم	نوع وسیله
٣-٢	٥-٤	محدودیت

٢-٥- نتایج عددی

نتایج حاصل از حل نمونه‌ها در جدول ٣ گزارش شده است. لازم به ذکر است که نتایج گزارش شده بر اساس میانگین حاصل از اجرای ١٠ مرتبه الگوریتم‌ها به ازای هر مثال می‌باشد.

جدول ٣. نتایج محاسباتی

مسئله	بهترین جواب سیپلکس	زمان اجرای سیپلکس (ثانیه)	بهترین جواب ***VNS***	زمان اجرای ***VNS*** (ثانیه)	درصد انحراف ***VNS***	بهترین جواب ***SA***	زمان اجرای ***SA*** (ثانیه)	درصد انحراف ***SA***
١	٩١١٢٧	٠,٠١٢	٩١١٢٧	٨/٩٧	٠	٩١١٢٧	٨/٥٤	٠
٢	٩٢٦١٨	٠/٩١	٩٢٦١٨	٩/٠٢	٠	٩٢٦١٨	٨/٢١	٠
٣	٨٠٥١٩	١/٢٥	٨٠٥١٩	٩/٨٥	٠	٨٠٥١٩	٨/١١	٠
٤	٢٠٤٦٤٠	٣/٢١	٢٠٥٩٩٢	٨/٨٨	٠/٦٦	٢٠٨١٥٧	٨/٤٩	١/٧١
٥	٢٠٩٥٦٩	٨/١٢	٢١٢٥٣٣	٩/٥١	١/٤١	٢١٢٩٣٣	٨/٧٨	١/٦٠
٦	٣٧١٧٣٩	٩٣/١	٣٧٧٦٤٠	١١/٥٧	١/٥٨	٣٧٨٥٣٧	٩/٠١	١/٨٢
٧	٢٤٥٣٦١	١٦٤	٢٥٢٠٤١	١١/٩	٢/٧٢	٢٥٣٥٣٧	٨/٩٧	٣/٣
٨	٣٥١٩٣٣	١٦٠	٣٦١١٥٤	١٢/٠١	٢/٦٢	٣٦٧١٥٤	١٠/٠٧	٤/٣٢
٩	٣١٥٠٦٧	٦١٧	٣٢٥١٠٨	١٣/٤١	٣/٠١	٣٣٠٧٣١	٩/٨٩	٤/٩٧
١٠	توقف حل	١٥٠٠	٤٠٠٣٧٨	١٣/٠٣	---	٤٠٣٧٠٩	١١/٥١	٠/٨٣
١١	---	---	٤٣٨٦٠٩	١٧/٢٢	---	٤٥٣٠١٥	١٤/٥٦	٣/٢٨
١٢	---	---	٥٢٧٦٤٦	٢٠/٢٢	---	٥٤٥٦٠٨	١٦/٨٧	٣/٤٠
١٣	---	---	٥٩٧٧٣٦	١٨/٥٨	---	٦١١٤٥١	١٣/٧٢	٢/٢٩
١٤	---	---	٧٠١١٤٢	١٩/٢٨	---	٧٢٨٥٤٧	١٥/٩٢	٣/٩

مسئله	بهترین جواب سیپلکس	زمان اجرای سیپلکس (ثانیه)	بهترین جواب ***VNS***	زمان اجرای ***VNS*** (ثانیه)	درصد انحراف ***VNS***	بهترین جواب ***SA***	زمان اجرای ***SA*** (ثانیه)	درصد انحراف ***SA***
۱۵	---	---	۵۹۲۸۱۶	۱۶/۷۱	---	۵۹۷۹۱۵	۱۳/۲۱	۰/۹۱
۱۶	---	---	۷۰۵۰۸۸	۱۷/۶۰	---	۷۲۷۴۴۹	۱۵/۷۲	۱/۷۲
۱۷	---	---	۱۰۴۲۹۸۸	۲۲/۱۱	---	۱۰۹۰۰۵۱	۱۹/۵۱	٤/۵۱
۱۸	---	---	۹۱۹۱۰۲	۲۱/۶۳	---	۶۲۶۳٤۵	۱۷/۳۹	۰/۷۸
۱۹	---	---	۱۱۷۶۶۷۹	۲۰/۰۱	---	۱۲۱۸۰۸۵	۱۹/۰۰	۳/۵۱
۲۰	---	---	۱۲۲۷۱۱۷	۲۵/۷۷	---	۱۲۳۷۲۸۳	۱۹/۶۳	۰/۸۲

در این جدول نحوه محاسبه درصد انحراف در رابطه زیر ارائه شده است.

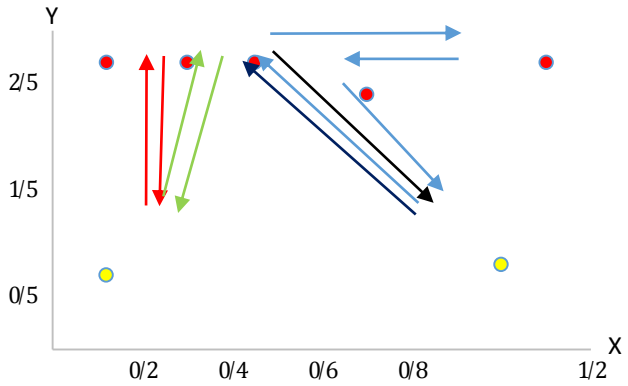
$$\text{درصد انحراف} = \frac{\text{بهترین جواب−جواب مورد نظر}}{\text{بهترین جواب}} \times ۱۰۰ \qquad (۱۲)$$

درصد انحراف‌های گزارش شده در مقایسه با بهترین جواب به دست‌آمده است که در ۱۰ مسئله اول با سیمپلکس در نرم‌افزار گمز حل شده است. در ادامه و بدلیل آنکه نرم افراز گمز قادر به حل مسائل ابعاد بزرگ در زمانی کمتر از ۱۵۰۰ ثانیه نبود، به همین علت در مابقی مثال‌ها بهترین جواب توسط الگوریتم جستجوی همسایگی استفاده شده است.

در جدول ٤ نیز زیر تورهای ایجادشده برای مسئله شماره ٤ ارائه شده است.

جدول ۴. تور ایجادشده مسئله ٤

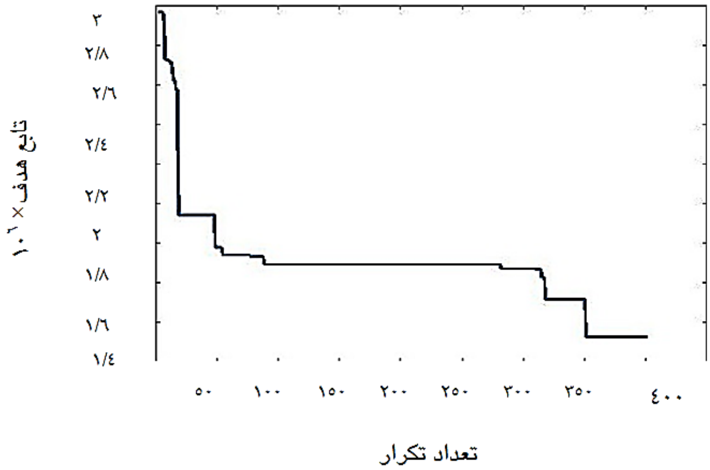
ابعاد مسئله (تعداد وسیله نقلیه* تعداد مشتری)	**تور ایجادشده در انبار شماره ۰ وسیله نقلیه – مقصد- مبدأ**	**تور ایجادشده در انبار شماره ۱ وسیله نقلیه – مقصد- مبدأ**
٥×٤	خودور اول – ٦-۰ و خودرو اول ۰ -٦	خودرو دوم – ۱ -۳ و خودرو دوم – ۳- ٥ و خودرو دوم – ٥ – ۲ و خودرو دوم – ۲ – ۱
	خودرو چهارم-۰-٦ و خودرو چهارم -٤-۰	خودرو سوم – ۱ – ۲ و خودرو سوم – ۲ -۱



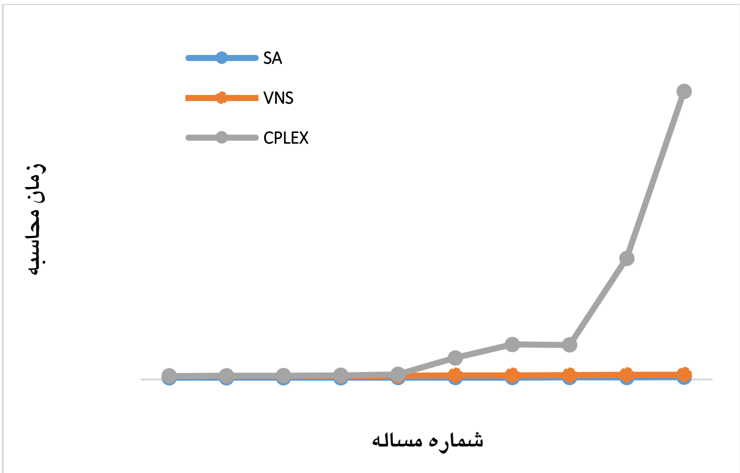
شکل ۵. گراف مسئله ٤

همان‌طور که درنتیجه به دست‌آمده مشاهده می‌شود، تقاضای مشتری شماره ۲ به علت تقاضای بالا در دو مرحله تأمین شده است. در شکل ٥ گراف مسئله ٤ رسم شده است.

شکل ٦ نیز نحوه همگرایی الگوریتم را برای مسئله شما ۱۹ را نشان می‌دهد. شکل ۷ زمان حل سه روش سیمپلکس و جستجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبرید را نشان می‌دهد.



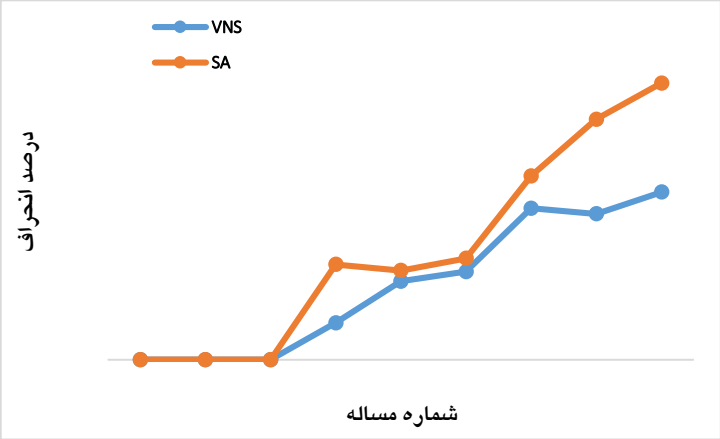
شکل ۶. نمودار همگرایی الگوریتم *VNS* برای مسئله ۱۹



شکل ۷. مقایسه زمان حل سه روش

همچنان که ملاحظه می‌شود زمان حل در سیمپلکس با بزرگ شدن اندازه مسئله به صورت نمایی رشد می‌کند. از آنجایی که یافتن جواب بهینه در ابعاد بزرگ در زمان معقول امکان‌پذیر نیست، لذا استفاده از روش‌های دیگری مانند ابتکاری و فراابتکاری برای حل این‌گونه مسائل توصیه می‌گردد.

شکل ۸ عملکرد دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و جستجوی همسایگی را مورد مقایسه قرار داده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در مقایسه دو الگوریتم درصد انحراف الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، کمتر از روش شبیه‌سازی تبرید است و در مابقی مثال‌ها نیز این درصد برای الگوریتم پیشنهادی صفر بوده و در نمودار ذکر نشده است.



شکل ۸. مقایسه عملکرد دو الگوریتم برحسب درصد انحراف

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در مقاله حاضر مسیریابی وسایل نقلیه با سه شرط از دنیای واقعی، شرایط چند انباره، تحویل چندمرحله‌ای با محدودیت تردد، مورد بررسی قرار گرفته است. با هدف حل مسئله، ابتدا مسئله مدل‌سازی شده و از سیمپلکس در نرم‌افزار گمز برای حل آن استفاده شده است. با توجه به آنکه زمان حل با بزرگ شدن ابعاد مسئله به شدت زیاد می‌شود، لذا از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر به این منظور استفاده شده است. در ادامه و به منظور اعتبارسنجی الگوریتم و ارزیابی کیفیت آن، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر توانسته در مقایسه با خروجی مدل جوابی نزدیک به بهینه را یافته و در ابعاد بزرگتر نیز در مقایسه با الگوریتم

شبیه‌سازی تبرید کیفیت مناسبی دارد. برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود مسئله از حالت تک‌هدفه به مسئله چندهدفه با در نظر گرفتن همزمان اهداف زیست محیطی، مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها در کنار معیارهای اقتصادی لحاظ شوند. جهت انطباق بیشتر مسئله با شرایط واقعی، همچنین می‌توان از پارامترهای غیرقطعی استفاده کرده و مسئله را در شرایط عدم قطعیت حل نمود. برای روش حل نیز استفاده از روش‌های جدید بر پایه ابتکاری-دقیق توصیه می‌گردد. تغییر در ماهیت مسئله مورد بررسی و در نظر گرفتن مباحث تولید در قالب مسیریابی تولید از دیگر پیشنهادات نویسندگان برای علاقمندان به این موضوع است. مسیریابی همکارانه چند شرکت حمل‌ونقلی در قالب مسیریابی رقابتی-مشارکتی با لحاظ کردن مفروضات مقاله جاری نیز از موضوعات جدید و قابل تأمل به شمار می‌آید که بررسی آن به محققین پیشنهاد می‌گردد.

۷- پی‌نوشت‌ها

١. Brandão
٢. Soeanu et al.
٣. Crevier et al.
٤. Montoya-Torres and et al
٥. Ray et al.
٦. Ma et al.
٧. Tu et al.
٨. Bortfeldt and Yi
٩. Casazza et al.
١٠. Gulczynski et al.
١١. Wang et al.
١٢. Variable neighborhood search
١٣. Tam and Keng

۸- منابع

[۱] Tavakkoli-Moghaddam R, Omidi-Rekavandi M, Ghodratnama A. (٢٠١٤) “Mathematical modeling for the forward and reverse logistics network design”, Management Research in Iran, ١٧, ٤, ٤٣-٦٣.

[۲] Brandão, J. (٢٠٢٠) "A memory-based iterated local search algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem", European Journal of Operational Research, ٢٨٤, ٥٥٩-٥٧١

[۳] Soeanu, A., Ray, S., Berger, J., Boukhtouta, A. and Debbabi, M. (٢٠٢٠) "Multi-depot vehicle routing problem with risk mitigation: Model and solution

algorithm", Expert Systems with Applications, ١٤٥, ١١٣٠٩٩.

[٤] Crevier, B. Jean-François, C. and Gilbert, L. (٢٠٠٧) "The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes", European journal of operational research, ١٧٦, ٢, ٧٥٦-٧٧٣.

[٥] Montoya-Torres, J. R., Franco, J. L., Isaza, S.N., Jimenez, H. F. and Herazo-Padilla, N. (٢٠١٥) "A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots", Computers & Industrial Engineering, ٧٩, ١١٥-١٢٩.

[٦] Ray, S., Soeanu, A., Berger, J. and Debbabi, M. (٢٠١٤) "The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: Model and solution algorithm", Knowledge-Based Systems, ٧١ ٢٣٨-٢٦٥.

[٧] Li, J., Li, T., Yu, Y., Zhang, Zh., M. Pardalos, P., Zhang, Y. and Ma, Y. (٢٠١٩) "Discrete firefly algorithm with compound neighborhoods for asymmetric multi-depot vehicle routing problem in the maintenance of farm machinery", Applied Soft Computing, ٨١, ١٠٥٤٦٠.

[٨] Tu, W., Fang, Zh., Li, Q., Shaw, Sh.-L. and Chen, B. (٢٠١٤) "A bi-level Voronoi diagram-based metaheuristic for a large-scale multi-depot vehicle routing problem", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, ٦١, ٨٤-٩٧.

[٩] Bortfeldt, A. and Junmin Y. (٢٠٢٠) "The split delivery vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints", European Journal of Operational Research, ٢٨٢, ٢, ٥٤٥-٥٥٨.

[١٠] Casazza, M., Alberto C. and Wolfler Calvo, R. (٢٠٢٠) "A route decomposition approach for the single commodity Split Pickup and split delivery vehicle routing problem", European Journal of Operational Research, in press, DOI: ١٠,١٠١٦/j.ejor.٢٠١٩,٠٧,٠١٥.

[١١] Gulczynski, D. Bruce, G. and Edward, W. (٢٠١١) "The multi-depot split delivery vehicle routing problem: An integer programming-based heuristic, new test problems, and computational results", Computers & Industrial Engineering, ٦١, ٣, ٧٩٤-٨٠٤.

[١٢] Wang, X., Golden, B., Wasil, E. and Zhang, R. (٢٠١٦). "The min–max split delivery multi-depot vehicle routing problem with minimum service time

requirement", Computers & Operations Research, ۷۱, ۱۱۰-۱۲٦.

[۱۳] Hosseini, S. and Hasani, A. (۲۰۱۸) “Modelling and solving the vehicle routing problem in distribution of a supply chain considering restriction on the movement of the vehicles”, Sharif Journal of Industrial Engineering & Management, ۳٤,۱(۱,۱), ۱٤۷-۱٥٥.

[۱٤] Salehi Sarbijan, M. and Behnamian, J. (۲۰۲۰) “Modeling and solving of bi-objective multi-product production routing problem with outsourcing and accident risk in transportation”, Modern Research in Decision Making, ٥, ۲, ۱۳۷-۱٦۳.

[۱٥] Behnamian, J. and Adabi, F. (۲۰۱۸). Competitive production routing problem: modeling, solving and valid inequalities”, Modern Research in Decision Making, ۲(۲), ٥٥-۷۹.

[۱٦] Tam, V. and Keng T. (۲۰۰٤) "Combining meta-heuristics to effectively solve the vehicle routing problems with time windows", Artificial Intelligence Review, ۲۱. ۲, ۸۷-۱۱۲.

[۱۷] Molanoori, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sabouhi, F. and Hajiaghaiee Keshteli, M. (۲۰۱۸) “A two-stage, multi-commodity, step fixed-charge transportation model solving by a simulated annealing algorithm”, Quarterly Journal of Transportation Engineering, ۱۰, ۲, ۳۹۹-٤۱۳.

[۱۸] Hasanpur H, Norng A. and Nabizadeh M. (۲۰۱٤) “Robust Project Scheduling Model with Resources Constraint and Solving It by Simulated Annealing Algorithm (Part of the Project Activities of Gas Condensate Refinery in Bandar Abbas)”, Management Research in Iran, ۱۸, ۱, ۱-۲٤.