

مدلسازی مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی و حل آن با استفاده از الگوریتم انجماد تدریجی

عزیزالله جعفری^{۱*}، آیلین صادقی سروسستانی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

۲. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

خلاصه

از چالش‌انگیزترین مسائل موجود در مدیریت زنجیره‌ی تأمین مسئله مکانیابی-مسیریابی می‌باشد. در واقعیت بسیاری از شرکت‌ها برای تأمین تقاضای مشتریانشان، وسایل نقلیه مورد نیاز خود را کرایه می‌کنند بنابراین این وسایل نقلیه پس از اتمام کار به این شرکت‌ها باز نمی‌گردند. از طرفی مدیران همواره با این مسئله مواجه هستند که تأمین تقاضای هر مشتری در یک نوبت سود بیشتری را نتیجه می‌دهد یا تحویل تقاضای آنان در چند بخش منجر به افزایش سود می‌شود. بنابراین در این مقاله برای پاسخ به این چالش و نزدیکتر شدن به دنیای واقعی، مسئله جدیدی در ادبیات این حوزه به نام مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی مدلسازی و با توجه به NP-Hard بودن آن، برای حل مسئله از دو الگوریتم جستجوی ممنوع و انجماد تدریجی استفاده شده است. مدل ریاضی حاصل توسط نرم‌افزار CPLEX10.1 برای نمونه مسائل در اندازه‌های کوچک اجرا و برای اجرای بهتر روش‌های حل پیشنهادی، یک الگوریتم ابتکاری برای تولید جواب اولیه مناسب معرفی گردیده است. در انتها پس از تولید مثال‌های آزمایشی جدید و تنظیم پارامتر الگوریتم‌های پیشنهادی با کمک طراحی آزمایشات، نتایج عددی حاصل از حل مدل به‌طور دقیق و با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی تحلیل شده است. نتایج گویای کارایی این دو الگوریتم و برتری الگوریتم انجماد تدریجی نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوع می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان منجر به کاهش هزینه‌ی نهایی می‌شود، به ویژه اگر واریانس تقاضای مشتریان کوچک و میانگین آنها بین نصف و سه چهارم ظرفیت وسایل نقلیه باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۲/۹/۲۵

پذیرش ۱۳۹۳/۳/۱۱

کلمات کلیدی:

مدیریت زنجیره تأمین

مسئله مکانیابی - مسیریابی

باز با تحویل چندبخشی

جستجوی ممنوع

آنیل شبیه‌سازی

طراحی آزمایشات

می‌شوند. بررسی مجزای این دو مسئله، افزایش هزینه‌ها و مدت زمان برنامه‌ریزی را نتیجه می‌دهند. لذا مسئله مکانیابی-مسیریابی^۵ با هدف مشخص نمودن همزمان تصمیمات مربوط به مکانیابی و مسیریابی در طراحی شبکه‌های توزیع زنجیره تأمین مطرح می‌شود [۱]. این مسئله بدین‌صورت تعریف می‌شود که تعدادی نقاط کاندید با مختصات مشخص برای استقرار مراکز توزیع وجود دارد. مکان و میزان تقاضای هر مشتری نیز مشخص است. هر مشتری به یک مرکز

۱- مقدمه

مکانیابی مراکز توزیع^۲ و مسیریابی وسایل نقلیه^۳ از چالش‌انگیزترین مسائل موجود در مدیریت زنجیره تأمین^۴ محسوب می‌شوند. این دو مسئله معمولاً در دو فاز جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و حل

* نویسنده مسئول. عزیزالله جعفری

تلفن: ۰۹۱۲۱۳۰۴۶۵۴؛ پست الکترونیکی: jafari@usc.ac.ir

2. Facility location problem
3. Vehicle routing problem
4. Supply chain management

و برداشت کالا به‌طور همزمان را ترکیب و برای تولید مثال‌های آزمایشی مقاله‌ی خود استفاده کردند. زرنندی و همکاران [۸] برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی در حالتی که زمان سفر بین هر دو مکان، فازی در نظر گرفته می‌شود الگوریتم انجماد تدریجی را به‌کار بردند. آن‌ها برای تولید مثال‌های آزمایشی مناسب با ساختار مسئله‌ی خود از نمونه مسائل شناخته‌شده در حوزه‌ی LRP استفاده کردند. سپس زمان‌های سفر را به‌صورت فازی تولید و به این مثال‌ها اضافه کردند. گلعداری و همکاران [۹] الگوریتم ترکیبی آنیل شبیه‌سازی شده -عملگر جهش را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی فازی با ظرفیت‌های محدود به‌کار بردند. غفاری‌نص و همکاران [۱۰] برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی با در نظر گرفتن تقاضای مشتریان به‌صورت فازی از ترکیب الگوریتم انجماد تدریجی و یک الگوریتم ابتکاری موجود در ادبیات استفاده کردند. آن‌ها برای تولید مثال‌های آزمایشی متناسب با ساختار مسئله‌ی خود، تقاضاهای مشتریان را به‌صورت فازی تولید و جایگزین تقاضای مشتریان در نمونه مسائل شناخته شده در ادبیات مسئله مکانیابی-مسیریابی کردند. زرنندی و همکاران [۱۱] برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی با در نظر گرفتن تقاضای مشتریان و پنجره‌ی زمانی به‌صورت فازی از ترکیب الگوریتم انجماد تدریجی و الگوریتم ابتکاری استفاده کردند. آن‌ها الگوریتم ابتکاری را برای تولید اعداد فازی و جواب اولیه بکار گرفتند. در ادبیات این حوزه نگلی و صالحی [۱۲] و مین و همکاران [۱۳] به مرور ادبیات مقالات موجود در حوزه‌ی مسئله مکانیابی مسیریابی پرداخته‌اند، که به‌عنوان مرجع نیز در این حوزه شناخته می‌شوند.

یکی از فرضیات کاربردی دیگری که در ادبیات مسئله مکانیابی-مسیریابی مطرح شده است، فرض باز بودن تورها می‌باشد. با در نظر گرفتن این فرض مسئله جدید مکانیابی-مسیریابی باز^۱ در این حوزه مطرح می‌شود. مسئله مکانیابی-مسیریابی باز مانند مسئله مکانیابی-مسیریابی کلاسیک می‌باشد با این تفاوت که در این مسئله وسایل نقلیه پس از خدمت‌رسانی به آخرین مشتری به انبار باز نمی‌گردند. به‌عبارت دیگر تورها در این مسئله باز هستند. مسئله موردنظر، در بردارنده‌ی دو زیرمسئله‌ی مکانیابی مراکز توزیع و مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز^۲ می‌باشد [۱۴]. در دنیای واقعی بسیاری از شرکت‌ها با این مسئله مواجه هستند. این شرکت‌ها یا ناوگان وسیله نقلیه ندارند و یا تعداد وسایل نقلیه آن‌ها برای برآورده کردن تقاضاهای مشتریانشان کافی نیست، بنابراین این شرکت‌ها برای توزیع کالای خود، وسایل نقلیه مورد نیاز خود را از یک شرکت حمل و نقل کرایه می‌کنند، از آن‌جا که ناوگان مربوطه اجاره‌ای می‌باشد این ناوگان فقط وظیفه دارد که مأموریت خدمت‌رسانی به مشتریان را انجام دهند و دیگر احتیاج نیست که بعد از اتمام عملیات به شرکت برگردند [۱۵]. مسئله مکانیابی-مسیریابی باز از مسائل نوظهور در ادبیات به‌شمار می‌آید. اولین مطالعه در این موضوع به تحقیق هوانگو

توزیع با ظرفیت محدود تخصیص یافته تا کالای مورد نیاز او تأمین گردد. کالای مورد نیاز مشتریان توسط وسایل نقلیه‌ی همگن با ظرفیت‌های محدود تأمین می‌گردد. هر وسیله‌ی نقلیه تنها به یک مرکز توزیع تخصیص می‌یابد. هر تور که از یک مرکز توزیع شروع و پس از چند مشتری با همان مرکز توزیع خاتمه می‌یابد، به یک وسیله نقلیه اختصاص می‌یابد. هزینه ثابتی برای استقرار هر مرکز توزیع در مکان کاندید و برای استفاده از وسیله نقلیه‌ی هر انبار در تابع هدف وجود دارد. همچنین هزینه مسیریابی نیز در تابع هدف لحاظ می‌شود. هدف این مسئله تعیین تعداد مراکز توزیع مستقر شده در نقاط کاندید و مسیره‌های تخصیص یافته به هر مرکز توزیع است به‌گونه‌ای که مقدار تابع هدف کمینه شده و فرضیات زیر تأمین گردد: تقاضای تمامی مشتریان برآورده شود، تقاضای هر مشتری تنها از یک مرکز توزیع که ظرفیت محدود دارد، تأمین گردد. هر مشتری تنها یک‌بار و تنها توسط یک وسیله نقلیه و به طور کامل سرویس‌دهی شود، مجموع میزان تقاضای تمامی مشتریانی که در یک تور قرار دارند، باید کمتر و یا مساوی ظرفیت وسیله تخصیص یافته به آن تور باشد و هر مسیر از یک مرکز توزیع شروع و به همان مرکز ختم شود [۲]. پیدایش مسئله مکانیابی-مسیریابی با فرضیات صحیح به اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ مربوط می‌شود [۳]. به‌دلیل NP-Hard بودن این مسئله استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفتند [۴]. تازن و بارک [۵] الگوریتم جستجوی ممنوع دو فازی را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی در حالتی که مراکز توزیع ظرفیت نامحدود دارند، به‌کار بردند. این الگوریتم به‌صورت متناوب در حین حل مسئله، اطلاعات بین دو فاز مکانیابی مرکز توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه را تبادل می‌کند. پرینز و همکارانش [۶] روش لاگرانژین ریلکسیشن را با الگوریتم جستجوی ممنوع ترکیب نموده تا روش دو فازی تکرار شونده دیگری را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی توسعه دهند. یو و همکارانش [۲] نیز برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی با ظرفیت‌های محدود، الگوریتم انجماد تدریجی را بکار بردند. آن‌ها از مثال‌های آزمایشی کلاسیک موجود در ادبیات مسئله مکانیابی-مسیریابی برای حل و اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی خود استفاده کردند. نتایج برتری الگوریتم انجماد تدریجی شبیه‌سازی پیشنهادی را نسبت به سایر الگوریتم‌های ارائه شده مطرح در ادبیات نشان دادند. علاوه بر ارائه‌ی روش‌های حل جدید، فرضیات جدیدی برگرفته از دنیای واقعی برای مسئله مکانیابی-مسیریابی در نظر گرفته شده است. در ادامه به چندین تحقیق اشاره می‌شود. کاروگن و همکارانش [۷] ترکیب الگوریتم دقیق شاخه و کران و الگوریتم انجماد تدریجی را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی با در نظر گرفتن فرض تحویل و برداشت کالا به‌صورت همزمان به‌کار بردند. از آن‌جا که مثال‌های آزمایشی متناسب با ساختار این مسئله در ادبیات موجود نبود، آن‌ها نمونه مثال‌های آزمایشی موجود در حوزه مسئله مکانیابی-مسیریابی و حوزه‌ی مسیریابی وسایل نقلیه در حالت تحویل

1. Open location routing problem
2. Open vehicle routing problem

تحقیق اشاره می‌شود. گولس‌زینسکی و همکارانش [۲۰] برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه چند انباره فرض چندبخشی تحویل تقاضا را در نظر گرفتند. آن‌ها برای این مسئله مدل و نمونه مثال‌های جدیدی ارائه دادند. آرشتی و همکاران [۱۸] در مقاله خود به صورت تجربی در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا را برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه بررسی کردند و نشان دادند هرگاه میانگین تقاضای مشتریان بین نصف و سه چهارم ظرفیت وسایل نقلیه و واریانس آن‌ها کوچک باشد در نظر گرفتن این فرض سود بیشتری را برای شرکت به وجود می‌آورد. اخیراً بروتو و همکارانش [۲۱] الگوریتم جستجوی تصادفی گرانول را برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا به کار گرفتند. بنابراین در نظر گرفتن این فرض نیز هر چند در دنیای واقعی کاربرد دارد، پاسخگوی سؤال مدیران است و بسیار در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه که زیرمسئله‌ی مسئله مکانیابی مسیریابی می‌باشد، مطرح شده است اما در ادبیات مسئله مکانیابی مسیریابی به آن توجه کمی شده است.

در این مقاله به منظور نزدیک‌تر کردن مسئله مکانیابی-مسیریابی کلاسیک به شرایط دنیای واقعی و پاسخگویی به چالشی که مدیرانی که همواره با آن مواجه هستند، مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی مدلسازی شده است. از آنجا که دو فرض موجود در این مسئله هر دو کاربردی و نوظهور در ادبیات مسئله مکانیابی مسیریابی محسوب می‌شوند و از طرفی این مسئله NP-Hard است و تا به حال در ادبیات دیده نشده، دو الگوریتم انجماد تدریجی و جستجوی ممنوع که از کاراترین الگوریتم‌های شناخته شده در نزدیک‌ترین حوزه‌ها به این مسئله است را برای حل مسئله این تحقیق توسعه می‌دهیم. ساختار مطالبی که عنوان خواهند شد، بدین صورت است: در بخش آتی، شکل کلی مسئله، تشریح و یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی اعداد مختلط ارائه می‌گردد. در بخش سوم مقاله، جزئیات مربوط به دو الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله تشریح می‌شود. در بخش چهارم به منظور سنجش صحت و کارایی مدل ریاضی ارائه شده و الگوریتم‌های فراابتکاری، تعدادی مثال عددی جدید مطابق با ساختار مسئله ارائه و به ترتیب توسط نرم‌افزار CPLEX10.1 و MATLAB حل می‌گردند. جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در بخش آخر مقاله ارائه می‌شوند.

۲- تعریف مسئله و ارائه مدل ریاضی

مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی مانند مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی کلاسیک می‌باشد با این تفاوت که وسایل نقلیه پس از پایان خدمت‌رسانی به مشتریان به انبار باز نمی‌گردند و تقاضای هر مشتری می‌تواند توسط بیش از یک وسیله نقلیه تأمین شود. در حقیقت فرض بسته بودن تورها و تحویل یکجای تقاضای هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه نغض می‌شود. برای ارائه یک مدل ریاضی مجزا برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل

ایکس‌یومی [۱۶] مربوط می‌شود. آن‌ها برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز مدل ریاضی ارائه کردند و با توجه به NP-Hard بودن این مسئله برای حل آن از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. پس از این مقاله، یو و لین [۱۷] الگوریتم انجماد تدریجی را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی باز به کار بردند. آن‌ها برای این مسئله، مدل ریاضی مسئله مکانیابی-مسیریابی کلاسیک را پیشنهاد دادند و بیان کردند که با حذف مسافت آخرین مشتری به انبار برای هر تور می‌توان به جواب بهینه مسئله مکانیابی-مسیریابی باز دست یافت. یو و همکاران [۱۷] نیز برای این مسئله مدل ریاضی ارائه و برای حلش از الگوریتم دو مرحله‌ای بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده کردند. بنابراین هر چند این فرض تحقیق را بیشتر به مسئله مکانیابی-مسیریابی در دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند اما تعداد کمی از مطالعات به آن پرداخته شده است و همان‌طور که از مقالات پیدا است، جزء فرضیات جدید در این حوزه شناخته می‌شود.

از دیگر فرضیاتی که در ادبیات مسئله مکانیابی-مسیریابی مطرح می‌شود، فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان است. این فرض مسئله جدیدی را به نام مسئله مکانیابی-مسیریابی با تحویل چندبخشی تقاضا در ادبیات این حوزه به وجود می‌آورد. در این مسئله برخلاف مسئله مکانیابی-مسیریابی، تقاضای هر مشتری می‌تواند در چند نوبت و توسط چند وسیله نقلیه تأمین شود. در دنیای واقعی نیز بسیاری از مدیران شرکت‌ها با این مسئله مواجه هستند که تأمین تقاضای هر مشتری تنها توسط یک وسیله نقلیه و در یک نوبت سود بیشتری را نتیجه می‌دهد یا تحویل تقاضای هر مشتری در چند بخش و توسط چند وسیله نقلیه منجر افزایش سود می‌شود [۱۸]. وون [۱۹] در پایان‌نامه‌ی خود الگوریتم جستجوی ممنوع دو فازی را برای حل مسئله مکانیابی-مسیریابی با تحویل چندبخشی تقاضا با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی^۲ ارائه کرد. در فاز اول این الگوریتم مکانیابی مراکز توزیع و در فاز دوم مسیریابی وسایل نقلیه انجام می‌شود. همچنین آن‌ها برای این مسئله، نمونه مسائل جدیدی تولید کردند و نشان دادند که اگر میانگین تقاضای مشتریان کمی بیشتر از نصف ظرفیت وسایل نقلیه باشد در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان برای مسئله مکانیابی-مسیریابی با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی^۳ کاهش هزینه‌ی بیشتری را سبب می‌شود. هرچند که در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا در مسئله مکانیابی-مسیریابی تنها و برای اولین بار در این پایان‌نامه بوده است، اما آن‌ها برای این مسئله مدلی ارائه نکردند. لازم به ذکر است که این فرض در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه که زیر مسئله‌ی مسئله مکانیابی-مسیریابی بسیار در نظر گرفته شده است و یکی از فرضیات کاربردی این مسئله به‌شمار می‌رود. در ادامه به چندین

1. Split delivery location routing problem
2. Location routing problem with time window and spilt delivery
3. Location routing problem with time window

$$\min z = \sum_{i \in I} o_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq m+1}} Fx_{ijk} \\ \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} \geq 1 \quad \forall j \in J, j \neq m+1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0 \quad (3)$$

$$\forall k \in K, \forall i \in V, V \neq m+1 \\ \sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq m+1}} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq J, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij} \quad (6)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \\ \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq m+1}} d_i f_{ij} \leq W_i y_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in J, i \neq m+1, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \neq m+1}} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in I, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} x_{m+1,jk} = 0 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} d_i \geq s_{ik} \quad (11)$$

$$\forall k \in K, i \in J, i \neq m+1 \\ \sum_{k \in K} s_{ik} = d_i \quad \forall i \in J, i \neq m+1 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in J} s_{ik} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} + \sum_{j \in V} x_{jik} \leq 2s_{ik} \quad (14)$$

$$\forall i \in J, i \neq m+1, \forall k \in K \\ f_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in V \quad (15)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (16)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (18)$$

$$\text{در این مدل ریاضی، تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌های باز کردن انبار و هزینه‌های مسیر که شامل هزینه سفر و هزینه‌های ثابت استفاده از وسیله نقلیه است، کمینه می‌نماید. رابطه (۲) تضمین می‌نمایند که هر مشتری می‌تواند توسط بیش از یک وسیله نقلیه خدمت‌رسانی شود. فرض مربوط به چندبخشی بودن تقاضای مشتریان در این محدودیت به خوبی نشان داده می‌شود. روابط (۳) و (۴) تداوم و پیوستگی مسیر را تضمین می‌نمایند و بیان می‌کنند که هر وسیله‌ی نقلیه و هر مشتری تنها به یک انبار تعلق دارد. رابطه (۵)$$

چندبخشی نیاز به یک گره (مشتری) مجازی است که در هر تور وسیله نقلیه پس از خدمت‌رسانی به آخرین مشتری به این گره مجازی برود. از آنجا که تقاضا و فاصله‌ی این گره تا هر یک از گره‌های دیگر صفر در نظر گرفته می‌شود، عملاً فاصله‌ی آخرین مشتری تا مشتری مجازی در نظر گرفته نمی‌شود. با در نظر گرفتن این گره مجازی مدلسازی مسئله مورد نظر ساده‌تر انجام خواهد شد. لازم به ذکر است که مدل ریاضی این مسئله توسعه یافته مدل ریاضی کلاسیک مسئله مکانیابی- مسیریابی است که پرینز و همکارانش [۶] در مقاله خود ارائه کردند. پارامترهای این مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$I = \{1, \dots, n\}$: مجموعه مکان‌های کاندید برای استقرار انبار.

$J = \{n+1, \dots, m, m+1\}$: مجموعه $m+1$ تایی از مشتریان که لازم است تقاضای آن‌ها تأمین شود که مشتری $m+1$ مشتری مجازی می‌باشد.

$V = \{I\} + \{J\}$: مجموعه تمامی نقاط کاندید برای انبار و مشتریان.

K : حداکثر وسایل نقلیه یکسان در دسترس برای تأمین تقاضای مشتریان

C_{ij} : هزینه سفر از مکان i به مکان j (فاصله‌ی اقلیدسی بین مکان i تا مکان j را برابر هزینه سفر از مکان i به مکان j در نظر می‌گیریم).

F_i : هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه برای انبار i ام.

o_i : هزینه ثابت استقرار انبار در مکان کاندید i ام (هزینه‌ی باز کردن هر انبار).

d_j : میزان تقاضای مورد نیاز مشتری j ام.

Q : میزان ظرفیت هر یک از وسایل نقلیه.

W_i : میزان ظرفیت انبار i ام.

متغیرهای تصمیم این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

x_{ijk} : اگر وسیله نقلیه K ام از مکان i به مکان j برود برابر ۱، در غیر این صورت برابر ۰ می‌باشد.

y_i : اگر در مکان i ام انباری مستقر شود برابر ۱، در غیر این صورت برابر ۰ می‌باشد.

f_{ij} : اگر مشتری j ام به انبار i ام تخصیص یابد مقدار ۱، در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.

s_{ik} : میزان تقاضای تأمین شده گره i ام توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی K ام که مقداری مثبت و صحیح است. لازم به ذکر است که در این مدل K به تعداد مشتریان در نظر گرفته می‌شود.

مدل ریاضی مسئله مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک بیان شده است و به صورت زیر ارائه می‌شود:

به شمار می‌آید. همچنین این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های کارای مکانیابی-مسیریابی باز نیز به‌شمار می‌آید [۱۴]، بنابراین این الگوریتم را نیز برای حل مسئله‌ی موردنظر در این مقاله توسعه می‌دهیم. در ادامه، الگوریتم‌های پیشنهادی انجماد تدریجی و جستجوی ممنوع و جزییات مربوط به این دو الگوریتم که برای حل مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی توسعه داده شده‌اند، توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- شرح الگوریتم انجماد تدریجی پیشنهادی

الگوریتم انجماد تدریجی یک روش تصادفی است که از مکانیزم آماری برای یافتن جواب بهینه مسائل استفاده می‌کند. این الگوریتم از یک جواب اولیه شروع کرده، یک جواب همسایگی برای جواب حاضر پیدا می‌کند و در مسائل کمینه‌سازی در صورت کاهش تابع هدف به آن همسایگی می‌رود. حتی اگر حرکتی باعث افزایش مقدار تابع هدف شود، این حرکت نیز به شرط احتمالی پذیرفته می‌شود که در آن $P = \exp\left(\frac{-c}{t}\right) > r$ پذیرفته می‌شود که در آن c میزان تغییر تابع هدف و t دمای حال و r یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. الگوریتم انجماد تدریجی از دو حلقه تشکیل می‌شود که یک حلقه دما را از دمای اولیه تا دمای نهایی کاهش می‌دهد و حلقه دوم تعداد تکرار را در هر دما مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که الگوریتم انجماد تدریجی شامل چهار پارامتر دمای نهایی، دمای اولیه، ضریب کاهش دما و تعداد تکرار در هر دما می‌باشد [۲۲]. در ادامه هر یک از مراحل الگوریتم پیشنهادی انجماد تدریجی برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی به تفصیل بیان می‌شود:

نحوه‌ی نمایش جواب: برای نمایش راه حل‌ها، نحوه‌ی نمایشی که یو و همکاران [۲] برای مسئله مکانیابی-مسیریابی پیشنهاد کردند را برای مسئله موردنظر توسعه می‌دهیم. یک راه‌حل شامل جایگشتی از n انبار که توسط مجموعه‌ی $\{1, 2, \dots, n\}$ مشخص شده، m مشتری که به وسیله‌ی مجموعه‌ی $\{n+1, n+2, \dots, n+m\}$ مشخص شده است و N صفر ساختگی می‌باشد. مشتری مجازی را با شماره‌ی $n+1$ نشان می‌دهیم. پارامتر N همان جزء صحیح $\sum d_i / Q$ می‌باشد که d_i تقاضای مشتری i ام و Q ظرفیت وسیله نقلیه می‌باشند. تورها در این رشته جواب به‌جز صفرهای ساختگی با استفاده از محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه نیز خاتمه می‌یابند. رشته زیر یک نمونه از جواب را برای دو انبار و پنج مشتری با تقاضاهای ۱۵، ۱۰، ۱۵، ۵، ۱۵ نشان می‌دهد. شکل (۱) نحوه‌ی نمایش این رشته را نشان می‌دهد. ظرفیت وسایل نقلیه و انبارها به ترتیب ۳۰ و ۱۲۰ می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده می‌شود انبار شماره دو بسته و انبار دیگر باز می‌باشد. یک وسیله‌ی نقلیه از انبار شماره یک شروع به حرکت و تقاضای مشتری‌های شماره هفت و شش را به‌طور کامل تأمین می‌کند. از آن‌جا که ظرفیت وسایل نقلیه محدود است، این وسیله تنها می‌تواند به مقدار ده واحد از تقاضای مشتری شماره

محدودیت حذف زیرتور را نشان می‌دهد. رابطه (۶) تضمین می‌نماید که اگر مشتری به‌وسیله توری به انباری متصل بود (تمام و یا بخشی از تقاضایش توسط انباری تأمین می‌شد)، آن مشتری به آن انبار تخصیص داده شود. رابطه (۷) محدودیت ظرفیت انبارها را مطرح می‌نماید. به این معنا که هر انبار بیش از ظرفیتش نمی‌تواند تقاضای مشتری را تأمین کند. رابطه (۸) تضمین می‌کند که آخرین مشتری (به جز مشتری مجازی) به انبار باز نمی‌گردد. این رابطه به وضوح فرض باز بودن تورها را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که وسایل نقلیه پس از خدمت‌رسانی به مشتریان به انبار باز نمی‌گردند. رابطه (۹) بیان می‌کند که انبارها با هم رابطه‌ای ندارند. بدین معنا که کالاها بین انبارها تبادل نمی‌شوند. رابطه (۱۰) بیان می‌کند که مشتری مجازی به مشتری‌های دیگر مسیری ایجاد نمی‌شود. رابطه (۱۱) بیان می‌کند بخشی از تقاضای مشتری که توسط یک وسیله‌ی نقلیه تأمین می‌شود حداکثر به میزان تقاضای آن مشتری می‌باشد. رابطه (۱۲) بیان می‌کند مجموع تقاضای تأمین شده در هر بخش برابر کل تقاضای آن مشتری می‌باشد. به عبارت دیگر این محدودیت تضمین می‌کند که کل تقاضای هر مشتری تأمین شود. رابطه (۱۳) محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه را تأمین می‌کند. رابطه (۱۴) تضمین می‌کند که تنها وسایل نقلیه‌ای که مشتری را ملاقات کردند می‌توانند تمام و یا بخشی از تقاضای مشتری را تأمین کنند. این رابطه از تأمین تقاضای مشتریان توسط وسایل نقلیه‌ای که مشتری مربوطه را ملاقات نمی‌کنند جلوگیری می‌کند. روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) نشان دهنده‌ی این است که متغیرهای تصمیم مسئله متغیرهای صفر و یک می‌باشند و رابطه‌ی (۱۸) نشان می‌دهد که این متغیر مقادیر مثبت می‌گیرند.

۳- روش‌های حل پیشنهادی

از آن‌جا که دو مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی با تحویل چندبخشی تقاضا با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی و مسئله مکانیابی-مسیریابی باز از نزدیک‌ترین مسائل موجود در ادبیات به مسئله مورد بحث این مقاله می‌باشند، انتظار می‌رود که با توسعه‌ی کاراترین الگوریتم‌های شناخته شده در این دو حوزه بتوان به جواب‌های مناسبی برای مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی تقاضا دست یافت. تنها الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی با تحویل چندبخشی تقاضا با در نظر گرفتن پنجره‌ی زمانی الگوریتم جستجوی ممنوع دو فازی می‌باشد [۱۹]. با توجه به این‌که در مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی، مکانیابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه با هم در نظر گرفته می‌شوند و الگوریتم‌های دو فازی محدودیت‌های خاص خود را برای یافتن جواب بهینه دارند [۲]، در این مقاله، الگوریتم جستجوی ممنوع را به‌صورت یکپارچه برای حل مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی توسعه می‌دهیم. الگوریتم انجماد تدریجی ارائه شده توسط یو و همکارانش [۲] از کاراترین الگوریتم‌های شناخته شده در مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی

مشتری تخصیص نیافته‌ای از گام ۲ باقی مانده است به گام ۱ برگردید و از ابتدا گام ۱ را انجام دهید و در غیر این صورت به گام ۲ بروید.

همسایگی: در این الگوریتم به صورت تصادفی از سه ساختار همسایگی جایگذاری، جابه‌جایی و تعویض دوتایی استفاده می‌کنیم و حرکت‌هایی که منجر به نقض محدودیت ظرفیت انبار می‌شوند را در نظر نمی‌گیریم. در حرکت جایگذاری، i امین عدد از رشته اعداد جواب X به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و بلافاصله قبل از z امین عدد از رشته اعداد جواب X که آن هم تصادفی انتخاب شده قرار می‌گیرد. در حرکت جابه‌جایی، i امین و z امین عدد از رشته اعداد جواب به صورت تصادفی انتخاب شده، مکان آن‌ها در رشته اعداد جواب با یکدیگر جابه‌جا می‌شود. حرکت تعویض دوتایی که معمولاً در مسائل مسیریابی وسایل نقلیه کاربرد دارد، به منظور بهبود و اصلاح مسیرهای موجود به کار می‌رود. در این حرکت دو مشتری که به یک مرکز توزیع تخصیص یافته‌اند به صورت تصادفی انتخاب شده و اعداد موجود بین این دو مشتری در رشته اعداد جواب به صورت معکوس (اعداد از راست به چپ از چپ به راست) نوشته می‌شود.

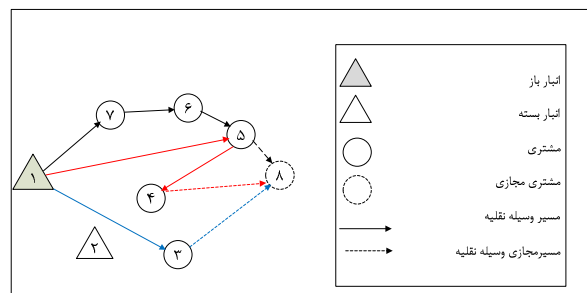
شرط توقف: شرط توقف در نظر گرفته شده در این الگوریتم رسیدن به دمای نهایی می‌باشد.

۳-۲- شرح الگوریتم جستجوی ممنوع پیشنهادی

الگوریتم جستجوی ممنوع را می‌توان به عنوان یک استراتژی جستجوی محلی در نظر گرفت. این جستجو شامل حرکت از یک راه‌حل به راه‌حل دیگری در همسایگی او مطابق با بعضی از قواعد تعریف شده می‌باشد. اساس نامگذاری این روش، استفاده آن از لیستی به نام لیست ممنوع می‌باشد. این لیست برای جلوگیری از افتادن الگوریتم، در بهینه محلی طراحی شده است. مراحل این الگوریتم در ادامه شرح داده شده است: الگوریتم جستجوی ممنوع با یک راه‌حل اولیه شروع می‌شود. سپس، مقدار تابع هدف مسئله برای راه‌حل اولیه در نظر گرفته شده، محاسبه می‌گردد. نقطه اولیه به عنوان راه‌حل جاری نیز مد نظر قرار می‌گیرد. در هر مرحله الگوریتم، کلیه همسایه‌های راه‌حل جاری مورد بررسی قرار می‌گیرند و در بین همسایه‌ها بهترین همسایه انتخاب می‌گردد. پس از انتخاب بهترین همسایه، حرکت به آن راه‌حل با لیست ممنوع مقایسه می‌گردد. در صورتی که این حرکت جزو لیست ممنوع باشد، بار دیگر به جستجوی همسایگی می‌پردازد و در صورتی که حرکت ممنوع نباشد، الگوریتم نقطه جدید به عنوان راه‌حل جاری در نظر گرفته می‌شود. در طول الگوریتم، همواره بهترین جواب ذخیره می‌گردد. در ابتدا اولین نقطه، به عنوان بهترین جواب در نظر گرفته می‌شود و هر زمان که حرکتی انجام می‌گردد، جواب جدید با بهترین جوابی که تا آن لحظه به دست آمده است، مقایسه می‌گردد. در صورتی که راه‌حل جدید راه‌حل بهتری باشد، راه‌حل جدید به عنوان بهترین راه‌حل ذخیره

پنج را برآورده کند. در این تور مشتری شماره پنج آخرین مکانی است که وسیله‌ی نقلیه به آن‌جا می‌رود. انبار شماره یک به منظور تأمین کامل تقاضای مشتری شماره پنج، وسیله نقلیه دیگری را کرایه، پنج واحد باقیمانده از تقاضای این مشتری را تأمین و سپس تقاضای مشتری شماره چهار را برآورده می‌کند. انبار شماره یک نیز دارای تور سومی است که تقاضای مشتری شماره سه را تأمین می‌کند. صفر اول مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه و دو صفر دیگر صفرهای ساختگی می‌باشند که به‌طور تصادفی در این مکان‌ها قرار گرفته‌اند.

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۷ | ۶ | ۵ | ۰ | ۴ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|



شکل (۱): نمایش نمونه‌ای از جواب برای SDOLRP

تولید جواب اولیه: در این قسمت برای داشتن جواب اولیه مناسب با ساختار مسئله الگوریتم ابتکاری حریصانه موجود در مقاله‌ی یو و لین [۱۴] و الگوریتم ابتکاری نزدیک‌ترین همسایگی موجود در مقاله براندائو [۲۳]، با هم ترکیب و الگوریتم جدیدی برای مسئله موردنظر ارائه می‌شود. گام‌های این الگوریتم ابتکاری جدید برای تولید جواب مناسب برای مسئله به شرح زیر می‌باشد: گام ۱: مجموعه U را به گونه‌ای تعریف نمایید که کلیه مراکز توزیع استقرار نیافته و همچنین مراکز توزیعی که ظرفیت باقی مانده آن‌ها بزرگتر و یا مساوی کم‌ترین تقاضا میان مشتریان تخصیص نیافته می‌باشد، را شامل شود. برای هر مرکز توزیع i در مجموعه U ، متغیر $cc(i)$ را تعریف نمایید. برای هر مرکز توزیع مذکور متغیر $cc(i)$ آن را به گونه‌ای تعریف نمایید که شامل مشتریانی شود که کمترین فاصله را به آن مرکز از میان مراکز توزیع موجود داشته باشد. گام ۲: از مجموعه U ، مرکز توزیعی را انتخاب نمایید که بیشترین مقدار $cc(i)$ داشته باشد. اگر برابری در $cc(i)$ وجود داشت، مرکز توزیعی را انتخاب نمایید که ظرفیت بالاتری دارد. از میان مشتریان موجود در متغیر $cc(i)$ مرکز توزیع انتخاب شده، مشتری را که آن به مرکز توزیع نزدیک‌تر است را انتخاب و به آن مرکز توزیع تخصیص و از $cc(i)$ حذف کنید. سپس از میان مشتریان موجود در متغیر $cc(i)$ مشتری را که به مشتری تخصیص یافته قبل نزدیک‌تر است انتخاب و به همان مرکز توزیع تخصیص دهید. این روند را تا جایی ادامه دهید که ظرفیت مرکز توزیع توانایی تأمین تقاضای آن‌ها را داشته باشد. در آخر این مرکز توزیع را از U حذف کنید. گام ۳: اگر

ساختاری که توسط فو و همکاران [۲۴] ارائه دادند استفاده می‌کنیم. سه ساختار همسایگی استفاده شده به شرح زیر است: تخصیص دوباره: دو گره را به صورت تصادفی انتخاب کنید، گره اول را حذف و قبل از گره دوم قرار دهید

$$(013567098075) \rightarrow (015670980375)$$

تعویض: دو گره را به صورت تصادفی انتخاب کنید، جای این دو گره را با هم عوض کنید.

$$(013567098075) \rightarrow (017567098035)$$

دو نقطه: دو گره را به صورت تصادفی انتخاب کنید، گره‌های مابین این دو را به صورت معکوس بنویسید.

$$(013567098075) \rightarrow (010765398075)$$

احتمال انتخاب هر یک از ساختارهای همسایگی یکسان در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم، پس از ایجاد تمام همسایگی‌های جواب جاری، جواب‌هایی را که محدودیت ظرفیت انبار را نقض می‌کنند حذف کرده و در نظر گرفته نمی‌شوند و مابقی در لیست کاندیدا ذخیره می‌شوند.

لیست ممنوع: همان‌طور که توضیح داده شد الگوریتم جستجوی ممنوع مجموعه‌ای از حرکت‌هایی را که به تازگی گذر شده است را به عنوان حرکت ممنوع در نظر می‌گیرد و بدین شکل از مشکل افتادن در بهینه‌ی محلی جلوگیری می‌شود. به عبارت دیگر هر حرکت خوب در بین همسایگی‌ها تا چند مرحله ممنوع خواهد بود. لازم به ذکر است که دوره ممنوعیت هر حرکت باید محدود و کم باشد. در این تحقیق اندازه این مجموعه ضریب کوچکی از لیست کاندیدا است.

سطح آرمانی: براساس تعریف متداول برای سطح آرمانی، حرکت ممنوعی که منجر به جوابی بهتر از بهترین جواب یافت شده شود، یعنی سطح آرمانی را ارضاء کند، از لیست ممنوعیت خارج می‌شود.

شرط توقف: شرط توقف در نظر گرفته شده در این الگوریتم رسیدن به تعدادی حرکت متوالی بدون بهبود در بهترین نقطه است. به این معنا که اگر در جواب الگوریتم بعد از انجام تعداد تکرار مشخصی بهبودی حاصل نشد، متوقف می‌شود. لازم به ذکر است که نحوه نمایش جواب برای این الگوریتم مانند نحوه نمایش جواب برای الگوریتم انجماد تدریجی ارائه شده برای مسئله مورد نظر می‌باشد که در بخش [۳-۱] قبل توضیح داده شد.

۳-۳- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

در این مقاله با استفاده از ترکیب دو روش سعی و خطا و طراحی آزمایشات [۲۵]، پارامترهای دو الگوریتم انجماد تدریجی و جستجوی ممنوع ارائه شده، تنظیم می‌شوند.

تنظیم پارامترهای الگوریتم انجماد تدریجی: الگوریتم انجماد تدریجی شبیه‌سازی پیشنهادی، دارای چهار پارامتر دمای اولیه (T)، ضریب کاهش دما (α)، تعداد تکرار در هر دما (m) و دمای نهایی (T_f) است. برای هر یک از این عوامل با روش سعی و خطا سه سطح تعریف می‌شود که اطلاعات مربوط به سطوح هر عامل در

می‌گردد و در غیر این صورت، بهترین راه‌حل تغییری نمی‌کند. بعد از هر حرکت، شرط توقف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که شرط توقف برآورده شود، الگوریتم پایان یافته و نتایج آن گزارش می‌شود. بعد از هر حرکت، مشخصه حرکت جدید وارد لیست ممنوع می‌گردد و سپس لیست ممنوع بهنگام می‌گردد. مدت زمان ماندن در لیست ممنوع و نحوه بهنگام‌سازی آن از ابتدا باید تعریف گردد. بر اساس این قاعده، در زمان انتقال یک حرکت به لیست ممنوع، ممکن است یک یا چند حرکت قدیمی از لیست ممنوع حذف گردد. در ادامه هر یک از مراحل الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوع برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی به تفصیل بیان می‌شود:

تولید جواب اولیه: برای تولید جواب اولیه‌ی الگوریتم جستجوی ممنوع الگوریتم ابتکاری دورترین اول^۱ که یکی الگوریتم‌های ابتکاری شناخته شده در حوزه‌ی مسیریابی باز وسیله نقلیه می‌باشد و توسط فو و همکاران [۲۴] ارائه شده است با الگوریتم ابتکاری حریمانه که یو و همکاران [۲] برای مسئله مکانیابی-مسیریابی به کار بردند، ترکیب تا کارایی لازم برای تولید جواب اولیه‌ی مناسب برای مسئله مورد نظر این مقاله به دست آورده شود. گام‌های این الگوریتم ابتکاری به شرح زیر می‌باشد:

گام ۱: مجموعه U را به گونه‌ای تعریف نمایید که کلیه مراکز توزیع استقرار نیافته و همچنین مراکز توزیعی که ظرفیت باقی مانده آن‌ها بزرگ‌تر و یا مساوی کم‌ترین تقاضا میان مشتریان تخصیص نیافته می‌باشد، را شامل شود. برای هر مرکز توزیع i در مجموعه U ، متغیر $cc(i)$ را تعریف نمایید. برای هر مرکز توزیع مذکور متغیر $cc(i)$ آن را به گونه‌ای تعریف نمایید که شامل مشتریانی شود که کمترین فاصله را به آن مرکز از میان مراکز توزیع موجود داشته باشد.

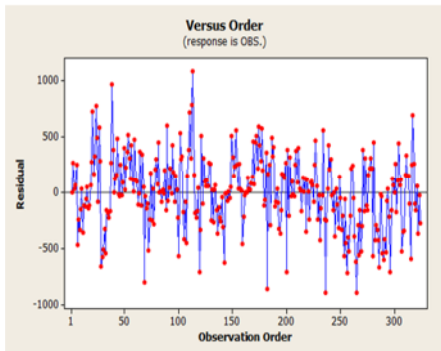
گام ۲: از مجموعه U ، مرکز توزیعی را انتخاب نمایید که بیشترین مقدار $cc(i)$ داشته باشد. اگر برابری در $cc(i)$ وجود داشت، مرکز توزیعی را انتخاب نمایید که ظرفیت بالاتری دارد. از میان مشتریان موجود در متغیر $cc(i)$ مرکز توزیع انتخاب شده، مشتری را که از آن مرکز توزیع دورتر است را انتخاب و به مرکز توزیع تخصیص و از $cc(i)$ حذف کنید. سپس از میان مشتریان موجود در متغیر $cc(i)$ مشتری را که به مشتری تخصیص یافته قبل نزدیک‌تر است انتخاب و به همان مرکز توزیع تخصیص دهید. این روند را تا جایی ادامه دهید که ظرفیت مرکز توزیع توانایی تأمین تقاضای آن‌ها را داشته باشد. و در آخر این مرکز توزیع را از U حذف کنید. گام ۳: اگر مشتری تخصیص نیافته‌ای از گام ۲ باقی مانده است به گام ۱ برگردید و از ابتدا گام ۱ را انجام دهید و در غیر این صورت به گام ۲ بروید.

همسایگی: برای ایجاد همسایگی به صورت تصادفی از بین سه

جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به سطوح پارامترهای الگوریتم SA

| پارامترها | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ |
|-----------|-------|-------|-------|
| T | ۹۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ |
| α | ۰.۸۵ | ۰.۹ | ۰.۹۸ |
| m | ۴۰۰۰ | ۴۵۰۰ | ۵۰۰۰ |
| T_f | ۰.۰۰۵ | ۰.۰۱ | ۰.۰۱۵ |



شکل (۴): بررسی فرض همگونی واریانس‌های مشاهدات حاصل از اجرای الگوریتم SA

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده می‌شود می‌توان فرض استقلال مشاهدات را پذیرفت چرا که نمودار تمایلی به سمت مثبت یا منفی ندارد. بنابراین با برقرار بودن این سه فرض می‌توان به معتبر بودن مشاهدات و تعداد حجم نمونه پی برد. در ادامه جدول آنالیز واریانس به دست آمده توسط نرم‌افزار MINITAB16 در جدول (۲): آنالیز واریانس مربوط به الگوریتم SA نشان داده شده است.

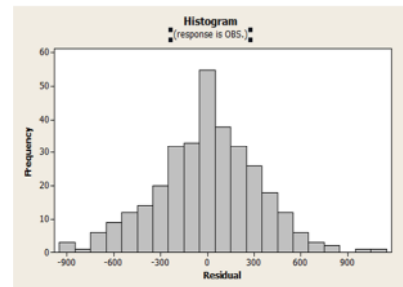
با توجه به جدول (۲): آنالیز واریانس مربوط به الگوریتم SA مقدار احتمال خطای نوع اول برابر با ۰.۰۵، و مقادیر P -value، دمایی، نهایی، دمایی اولیه، ضریب کاهش دما، تعداد تکرار در هر دما، تأثیر همزمان (متقابل) دمایی اولیه و دمایی نهایی در کیفیت جواب الگوریتم SA مؤثر است.

جدول (۲): آنالیز واریانس مربوط به الگوریتم SA

| P | مجموع مربعات | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|-------|--------------|------------|------------------------|
| ۰ | ۱۱۵۵۶۷۰۸ | ۲ | T_f |
| ۰ | ۵۴۹۷۸۹۰۷ | ۲ | T |
| ۰ | ۵۱۸۲۵۵۲۸ | ۲ | α |
| ۰ | ۲۶۶۱۴۹۶۶ | ۲ | m |
| ۰ | ۶۶۴۱۵۵۰ | ۴ | $T_f * T$ |
| ۰.۲۲۲ | ۸۱۴۸۷۸ | ۴ | $T_f * \alpha$ |
| ۰.۴۳۵ | ۵۳۸۷۸۸ | ۴ | $T_f * m$ |
| ۰.۰۷۶ | ۱۲۱۳۷۸۹ | ۴ | $T * \alpha$ |
| ۰.۶۶۷ | ۳۳۶۳۷۱ | ۴ | $T * m$ |
| ۰.۵۷۵ | ۴۱۱۲۷۶ | ۴ | $\alpha * m$ |
| ۰.۱۲۱ | ۱۸۳۱۲۶۹ | ۸ | $T_f * T * \alpha$ |
| ۰.۸۹۷ | ۴۹۶۵۳۹ | ۸ | $T_f * T * m$ |
| ۰.۰۷۸ | ۲۰۳۷۳۸۹ | ۸ | $T_f * \alpha * m$ |
| ۰.۹۷۵ | ۳۰۷۶۰۲ | ۸ | $T * \alpha * m$ |
| ۰.۹۸۹ | ۸۳۰۳۸۱ | ۱۶ | $T_f * T * m * \alpha$ |

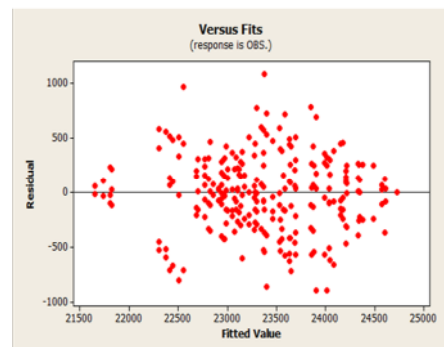
در شکل (۵): نمودار اثرات اصلی برای الگوریتم SA نمودار اثرات اصلی بر جواب الگوریتم SA نشان داده می‌شود. همان‌طور که در

با توجه به جدول (۱)، 3^4 حالت در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم انجماد تدریجی برای هر یک از حالات، چهار بار در نرم‌افزار MATLAB R2010b برای مسئله Christofides69-100x10 اجرا شده است. برای بررسی معتبر بودن تعداد حجم نمونه، سه فرض نرمال بودن داده‌ها، استقلال مشاهدات و همگونی واریانس‌ها بررسی شده است. شکل (۲)، شکل (۳) و شکل (۴) به ترتیب معتبر بودن این سه فرض را نشان می‌دهند.



شکل (۲): بررسی فرض نرمال بودن مشاهدات حاصل از اجرای الگوریتم SA

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده می‌شود نمی‌توان فرض نرمال بودن داده‌ها را رد کرد چرا که این نمودار مانند نمونه‌ای از توزیع نرمال است که صفر مرکز آن می‌باشد.



شکل (۳): بررسی فرض ثابت بودن واریانس‌های مشاهدات حاصل از اجرای الگوریتم SA

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده می‌شود نمی‌توان فرض ثابت بودن واریانس‌ها را رد کرد چرا که این نمودار از هیچ الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند.

مسائل کوچک، جواب نهایی تغییری نمی‌یابد و همچنین زمان رسیدن به جواب نهایی برای ترکیب‌های مختلف سطوح تفاوت چشم‌گیری با یکدیگر ندارند، آزمایشات روی مسائل متوسط و بزرگ (به‌طور مثال Christofides69-50x5، Daskin95-150x10 و Christofides69-100x10) انجام شده است که برای نمونه تنها یکی از مسائل (Christofides69-100x10) در این مقاله آورده شد.

اثرات اصلی برای الگوریتم TS (شکل ۶): نمودار

اثرات اصلی برای الگوریتم TS

جدول (۳): اطلاعات مربوط به سطوح پارامترهای الگوریتم TS

| پارامترها | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ |
|-----------|-------|-------|-------|
| IT | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ |
| TL | ۰.۳ | ۰.۴ | ۰.۵ |

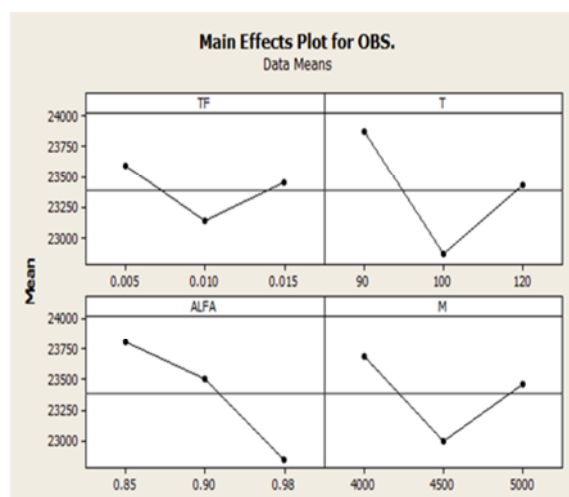
جدول (۴): آنالیز واریانس مربوط به الگوریتم TS

| P | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|---|----------------|--------------|------------|--------------|
| ۰ | ۱۳۵۳۵۷۲۷ | ۲۷۰۷۱۴۵۴ | ۲ | IT |
| ۰ | ۱۶۸۸۱۹۲ | ۳۳۷۶۳۸۳ | ۲ | TL |
| ۰ | ۵۷۸۲۵۱ | ۲۳۱۳۰۰۳ | ۴ | IT * TL |
| | ۴۹۱۰۷ | ۲۲۰۹۸۲۰ | ۴۵ | خطا |
| | | ۳۴۹۷۰۶۶۱ | ۵۳ | کل |

۴- محاسبات عددی

از آن‌جا که برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی نمونه مثال‌های آزمایشی در ادبیات موجود نیست و با توجه به روش متداول تولید نمونه مثال‌های آزمایشی در این حوزه در شرایطی که فرضیات جدیدی برای مسئله در نظر گرفته می‌شود، در این تحقیق از مثال‌های آزمایشی بارتو [۲۶] که یکی از نمونه مثال‌های آزمایشی کلاسیک در ادبیات مسئله مکانیابی-مسیریابی است استفاده و سپس با استفاده از مفاهیم موجود در مقاله‌ی آرشتی و همکاران [۱۸] که یکی از مقالات برجسته در حوزه‌ی مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل چندبخشی به‌شمار می‌آید، تقاضای مربوط به هر مثال تولید و جایگزین تقاضای مثال‌های آزمایشی مسئله مکانیابی-مسیریابی شده است. مثال آزمایشی بارتو [۲۶] شامل ۱۸ نمونه با ابعاد کوچک، بزرگ و متوسط است که از ادبیات جمع آوری شده است. در این مجموعه از نمونه‌ها تعداد مشتریان بین ۸ و ۳۱۸ و تعداد انبارها بین ۲ و ۱۵ متغیر است. در این مثال‌ها ظرفیت انبارها محدود فرض شده است. هیچ هزینه‌ای در ارتباط با استفاده از وسیله نقلیه در نظر گرفته نشده است. نام هر مثال از چهار جزء تشکیل شده که به-ترتیب بیانگر نام شخصی که آن مثال را تولید کرده، سال تولید مثال، تعداد مشتریان و تعداد انبار می‌باشد (برای مثال تعداد مشتریان X تعداد انبار- سال تولید- نام شخص). یو و لین [۱۴] از مثال آزمایشی

شکل (۵): نمودار اثرات اصلی برای الگوریتم SA نشان داده می‌شود با افزایش دمای نهایی از ۰.۰۵ تا ۰.۰۱ جواب حاصل از الگوریتم کاهش یافته است. افزایش این دما همواره موجب بهبود جواب الگوریتم نمی‌شود. چرا که با افزایش این دما از ۰.۰۱ تا ۰.۰۱۵ کیفیت الگوریتم کاهش می‌یابد. بنابراین بهترین مقدار برای دمای نهایی ۰.۰۱ می‌باشد به‌طریق مشابه بهترین مقدار برای پارامترهای دمای اولیه، ضریب کاهش دما و تعداد تکرار در هر دما به ترتیب ۱۰۰، ۰.۹۰ و ۴۵۰۰ می‌باشد.



شکل (۵): نمودار اثرات اصلی برای الگوریتم SA

تنظیم پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع: الگوریتم جستجوی ممنوع ارائه شده دارای دو پارامتر تعداد حرکت‌های متوالی بدون بهبود در بهترین نقطه (IT) و دوره‌ی ممنوع (TL) می‌باشد. برای هر یک از این عوامل با روش سعی و خطا سه سطح تعریف می‌کنیم که اطلاعات مربوط به سطوح هر عامل در جدول (۳): اطلاعات مربوط به سطوح پارامترهای الگوریتم TS نشان داده می‌شود. با توجه به جدول (۳): اطلاعات مربوط به سطوح پارامترهای الگوریتم TS 3² حالت را باید در نظر گرفت. الگوریتم جستجوی ممنوع را برای هر یک از حالات، شش بار در نرم‌افزار MATLAB R2010b اجرا می‌کنیم. از آن‌جا که سه فرض نرمال بودن، ثابت بودن واریانس و استقلال مشاهدات برقرار است می‌توان به معیار بودن مشاهدات و تعداد حجم نمونه پی برد. در ادامه جدول آنالیز واریانس، نمودار اثرات اصلی به‌دست آمده توسط نرم‌افزار MINITAB16 به ترتیب در

جدول (۴) و شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به جدول آنالیز واریانس و نمودار اثرات اصلی و متقابل به این نتیجه می‌رسیم که اگر پارامتر تعداد حرکت‌های متوالی بدون بهبود در بهترین نقطه و دوره‌ی ممنوع به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۰.۴ باشد الگوریتم جستجوی ممنوع ارائه شده دارای کیفیت بالایی خواهد بود. از آن‌جا که با تغییر سطوح پارامترهای دو الگوریتم در

ستون دوم جدول (۵): تاثیر واریانس بر مسئله نمونه‌ی Per183-12x2 نشان دهنده‌ی جواب بهینه (دقیق) برای مسئله‌ی مکانیابی- مسیریابی باز و ستون سوم و چهارم این جدول نشان دهنده‌ی زمان (ثانیه) و جواب بهینه (دقیق) برای مسئله‌ی مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی می‌باشند که با استفاده از نرم-افزار CPLEX10.1 حل شده است.

جدول (۶): مقایسه‌ی الگوریتم SA و روش دقیق برای مسائل با ابعاد کوچک

| نام نمونه مسئله | SA | | Exact | |
|------------------|-------|---------|-------|-----------|
| | هزینه | زمان حل | هزینه | زمان حل |
| Srivastava86-8x2 | ۳۸۵۱ | ۱۵.۷۸ | ۳۸۵۱ | ۱۰.۹۳۱.۹۵ |
| Per183-12x2 | ۱۷۱۹ | ۲۱.۳۱ | ۱۷۱۹ | ۳۲۰۲۱.۱۶ |
| Gaskell67-21x5 | ۴۲۹۵ | ۳۸.۴۸ | ۴۲۹۵ | ۱۹۲۶۰۰.۸۱ |
| Gaskell67-22x5 | ۷۷۲۹ | ۳۴.۰۹ | ۷۷۲۹ | ۱۹۴۸۰۰.۷۶ |
| Gaskell67-29x5 | ۹۷۰۲ | ۴۲.۵۲ | - | - |

ستون پنجم جدول تفاوت مقادیر ستون دوم و چهارم می‌باشد که بیانگر مقدار سود به دست آمده از در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا برای مسئله‌ی مکانیابی- مسیریابی باز می‌باشد. همان‌طور که در این ستون نشان داده شده است با افزایش واریانس، سود به دست آمده کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر کوچک بودن واریانس تقاضا باعث افزایش سود به دست آمده از در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا برای مسئله‌ی مکانیابی- مسیریابی باز می‌باشد. بنابراین در همه‌ی نمونه مثال‌های آزمایشی بارتو میانگین تقاضا بین نصف و سه چهارم ظرفیت وسیله نقلیه و واریانس تقاضا متناسب با میانگین، کوچک در نظر گرفته شده است. برای تولید تقاضای مشتریان با میانگین و واریانس معلوم از روش موجود در پیوست مقاله‌ی آرشتی و همکاران [۱۸] استفاده شده است. از آن‌جا که تقاضای مشتریان برای این نمونه مثال‌ها تغییر کرده است ظرفیت مراکز توزیع که مرتبط با تقاضاها هستند نیز تغییر می‌یابد. ظرفیت هر مرکز توزیع از ضرب یک عدد تصادفی در بازه‌ی (0.5 و 1.5) در مجموع کل تقاضای مشتریان تعیین شده است.

دو الگوریتم انجماد تدریجی و جستجوی ممنوع در نرم‌افزار MATLAB R2010b کدنویسی و بر روی یک رایانه قابل حمل وایو با دو پردازنده با قدرت ۲.۲ مگاهرتز و ۲.۳۸ مگابایت حافظه تصادفی برای مثال‌های آزمایشی، اجرا شده است. با توجه به NP-Hard بودن مسئله مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی تقاضا، برای مثال‌های آزمایشی با ابعاد کوچک نتایج حاصل از دو الگوریتم انجماد تدریجی و جستجوی ممنوع با جواب حاصل از حل مدل در نرم‌افزار CPLEX10.1 (جواب بهینه) به منظور بررسی کارایی این دو

بارتو [۲۶] بدون اعمال تغییرات برای حل مسئله مکانیابی- مسیریابی باز استفاده کردند. یکی از مهم‌ترین اهداف مسائلی که فرض باز بودن تورها در آن‌ها در نظر گرفته می‌شود کاهش هزینه‌های ثابت کرایه وسایل نقلیه است [۱۵]. اما در این مثال آزمایشی این هزینه‌ها صفر در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین برای داشتن مثال‌های آزمایشی متناسب با ساختار مسئله مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی هزینه‌ی ثابت استفاده از وسایل نقلیه را برای هر انبار تقریباً برابر نصف هزینه‌ی باز شدن آن انبار در نظر می‌گیریم. آرشتی و همکاران [۱۸] در مقاله خود به صورت تجربی نشان دادند هرگاه میانگین تقاضای مشتریان بین نصف و سه چهارم ظرفیت وسایل نقلیه و واریانس آن‌ها کوچک باشد در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی بیشترین سود را برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه نتیجه می‌دهد. از آن‌جا که مسئله مسیریابی وسیله نقلیه یکی از زیر مسائل مسئله مکانیابی- مسیریابی می‌باشد می‌توان گفت که اگر تقاضای مشتریان دارای این دو ویژگی باشد در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی بیشترین سود را برای مسئله مکانیابی- مسیریابی نتیجه می‌دهد. وون [۱۹] ویژگی اول را برای مسئله مکانیابی- مسیریابی با تحویل چندبخشی به صورت تجربی بررسی کرد و به همان نتیجه رسید. از آن‌جا که فرض باز بودن تورها فرضی است که به ویژگی‌های مقداری تقاضای مشتریان (میانگین و واریانس) مربوط نمی‌شود پس می‌توان از این ویژگی برای تولید مثال‌های عددی مسئله مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی استفاده کرد. اما باید به صورت تجربی ویژگی دوم را بررسی کرد. به این منظور واریانس تقاضای مشتریان برای نمونه مثال‌های آزمایشی با ابعاد کوچک در چهار سطح ۰.۳۶، ۱۹۶، ۶۲۵ و ۱۹۶۰ در نظر گرفته و تأثیر واریانس تقاضا بر سود به دست آمده از در نظر گرفتن مسئله به دو صورت مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چندبخشی و مکانیابی- مسیریابی باز بررسی شده است. جدول (۵): تاثیر واریانس بر مسئله نمونه‌ی Per183-12x2 این تأثیر را برای یک نمونه از مثال‌های آزمایشی بارتو در سال ۲۰۰۴ (Per183-12x2) نشان می‌دهد جزئیات مربوط به مکان انبارها و مشتریان مربوط به این مثال آزمایشی در سایت http://sweet.us.pt/_iscf143 موجود می‌باشد. در این مثال ظرفیت مراکز توزیع و وسایل نقلیه به ترتیب ۵۰۰ و ۱۴۰، هزینه‌ی باز شدن انبار اول و دوم ۱۰۰، هزینه‌ی استفاده از وسایل نقلیه برای مراکز ۵۰ و میانگین تقاضای مشتریان ۷۵ می‌باشد.

جدول (۵): تاثیر واریانس بر مسئله نمونه‌ی Per183-12x2

| سود | هزینه | SDOLRP | | هزینه | ولاریانس |
|-----|-------|----------|-------|-------|----------|
| | | زمان حل | هزینه | | |
| ۲۸۴ | ۱۷۰۷ | ۳۱۵۷۰.۹۸ | ۱۹۹۱ | ۰ | ۰ |
| ۱۲۰ | ۱۷۴۲ | ۳۳۱۰۳.۲۳ | ۱۸۶۲ | ۳۶ | ۳۶ |
| ۴۴ | ۱۶۰۵ | ۳۶۱۰۳.۲۳ | ۱۶۴۹ | ۱۹۶ | ۱۹۶ |
| ۲۰ | ۱۶۰۴ | ۳۱۵۷۰.۹۸ | ۱۶۲۴ | ۶۲۵ | ۶۲۵ |

الگوریتم به ترتیب در جدول (۶) و جدول (۷) مقایسه شده است.

جدول (۷): مقایسه‌ی بین جواب الگوریتم TS و جواب بهینه برای مسائل با ابعاد کوچک

| نام نمونه مسئله | TS | | Exact | |
|-------------------|---------|-------|-----------|-------|
| | زمان حل | هزینه | زمان حل | هزینه |
| Srivastava 86-8x2 | ۱۹.۱۱ | ۳۸۵۱ | ۱۰.۹۳۱.۹۵ | ۳۸۵۱ |
| Per183-12x2 | ۲۴.۳۵ | ۱۷۱۹ | ۳۲۰۲۱.۱۶ | ۱۷۱۹ |
| Gaskell67-21x5 | ۳۹.۰۵ | ۴۳۵۱ | ۱۹۲۶۰۰.۸۱ | ۴۲۹۵ |
| Gaskell67-22x5 | ۳۹.۱۴ | ۷۷۲۹ | ۱۹۴۸۰۰.۷۶ | ۷۷۲۹ |
| Gaskell67-29x5 | ۴۴.۲۸ | ۹۷۰۲ | - | - |

ستون دوم این جداول نشان‌دهنده‌ی نتایج محاسباتی حاصل از یک بار اجرای الگوریتم جستجوی ممنوع و انجماد تدریجی برای حل مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی می‌باشد. همان‌طور که در این دو جدول مشخص است در مسائل کوچک مقادیر به دست آمده برای دو الگوریتم دقیقاً برابر مقادیر بهینه‌ی حاصل شده از نرم افزار CPLEX10.1 می‌باشد که در ستون چهارم گزارش شده است. بنابراین می‌توان این دو الگوریتم را برای ابعاد کوچک مسئله کارا دانست. ستون سوم این جدول زمان حل (ثانیه) این دو الگوریتم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در ستون چهارم جدول (۶) و جدول (۷) نشان داده شده است، زمان حل مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی با نرم افزار CPLEX10.1 زیاد است، به گونه‌ای که زمان حل مسئله با ۵ انبار و ۲۲ مشتری تقریباً ۵۳ ساعت می‌باشد. در ادامه عملکرد این دو الگوریتم برای ابعاد بزرگ مسئله بررسی شده است. در جدول (۸) عملکرد این دو الگوریتم مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این به منظور بررسی تأثیر در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضا برای مکانیابی-مسیریابی باز جواب حاصل از این الگوریتم‌ها با جواب حاصل از الگوریتم ابتکاری که برای حل مکانیابی-مسیریابی باز به کار گرفته شده، مقایسه شده است. ستون دوم جدول (۸) جواب حاصل از یک بار اجرای الگوریتم ابتکاری یو و لین [۱۴] برای مکانیابی-مسیریابی باز را نشان می‌دهند. با توجه به میانگین و واریانس تقاضای مشتریان، هر مشتری در مکانیابی-مسیریابی باز تنها به یک مسیر تخصیص داده می‌شود. به عبارت دیگر احتمال تشکیل تور با این شرایط در این مسئله بسیار کم می‌باشد. بنابراین این الگوریتم ابتکاری حریصانه توسط جواب‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه را برای این نمونه مثال‌ها تولید می‌کند. ستون‌های سوم و پنجم در جدول (۸) به ترتیب جواب حاصل از اجرای یکبار الگوریتم جستجوی ممنوع و انجماد تدریجی را نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی این دو ستون ملاحظه می‌شود که این دو الگوریتم برای نمونه‌های با ابعاد کوچک

کارایی تقریباً یکسانی دارند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که الگوریتم جستجوی ممنوع تنها در سه نمونه از ۱۸ نمونه جواب بهتری از الگوریتم انجماد تدریجی ارائه کرده است. یکی از عللی که می‌تواند عملکرد الگوریتم انجماد تدریجی را نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوع در این مسئله بهبود داشته باشد نحوه‌ی تولید جواب اولیه آنها است. در الگوریتم انجماد تدریجی اولویت با قرار دادن مشتریان نزدیک‌تر به هر انبار در ابتدای تور است و مابقی مشتریان باید به مشتری تخصیص داده شده در مرحله قبل نزدیک باشند، در حالی که در الگوریتم جستجوی ممنوع اولویت با قرار دادن مشتری دورتر از هر انبار در انتهای تور است و مابقی مشتریان باید به مشتری تخصیص داده شده در مرحله قبل نزدیک باشند. بنابراین در الگوریتم جستجوی ممنوع ممکن است در ابتدای تور مشتری قرار بگیرد که از انبار دور باشد. بنابراین جواب اولیه الگوریتم انجماد تدریجی بیشتر به فرض باز بودن تورها پرداخته و به نزدیکی تمام گره‌ها توجه کرده است. لذا به الگوریتم کمک کرده است که به جواب‌های بهتری دست یابد. با مقایسه‌ی این دو ستون و ستون دوم دیده می‌شود که در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی برای مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز سبب کاهش هزینه‌ی نهایی می‌شود چرا که برای تمام نمونه مثال‌ها هزینه‌ی نهایی مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی از مسئله‌ی مکانیابی-مسیریابی باز کم‌تر شده است. از طرفی با مشاهده‌ی ستون چهارم و ششم این جدول مشخص می‌شود که زمان حل الگوریتم جستجوی ممنوع پیشنهادی از الگوریتم انجماد تدریجی ارائه شده برای این مسئله بیشتر است و این بدان علت است که الگوریتم جستجوی ممنوع تعداد همسایگی‌های بیشتری را در مقایسه با الگوریتم انجماد تدریجی بررسی می‌کند. بنابراین الگوریتم انجماد تدریجی پیشنهادی از الگوریتم جستجوی ممنوع ارائه شده برای مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی به‌ویژه برای ابعاد بزرگ مسئله کارا تر می‌باشد به این معنا که در زمان کوتاه‌تر، اغلب جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این مقاله برای اولین بار مدل ریاضی مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان به صورت برنامه‌ریزی خطی اعداد مختلط مدلسازی گردید. در واقعیت بسیاری از شرکت‌ها برای تأمین تقاضای مشتریان، وسایل نقلیه مورد نیاز خود را کرایه می‌کنند بنابراین این وسایل نقلیه پس از اتمام کار به این شرکت باز نمی‌گردند. از طرفی مدیر شرکت‌ها همواره با این مسئله مواجه هستند که تأمین تقاضای هر مشتری در یک نوبت سود بیشتری را نتیجه می‌دهد یا تحویل تقاضای آنان در چند بخش منجر به افزایش سود می‌شود. بنابراین در این مقاله مسئله مکانیابی-مسیریابی باز با تحویل چندبخشی، که یکی از چالش‌انگیزترین مسائل موجود در مدیریت زنجیره‌ی تأمین

الگوریتم انجماد تدریجی نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوع است. به این معنا که در اغلب نمونه مسائل، الگوریتم انجماد تدریجی در زمان کوتاه‌تر جواب‌های بهتری را به‌ویژه برای ابعاد بزرگ مسئله ارائه داد. همچنین نتایج نشان دادند که در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان برای مسئله مکانیابی- مسیریابی باز باعث کاهش هزینه‌ی نهایی (افزایش سود) می‌شود و این کاهش هزینه به کمترین مقدار خود می‌رسد اگر واریانس تقاضای مشتریان کوچک و میانگین آن‌ها بین نصف و سه چهارم ظرفیت وسایل نقلیه باشد. در نظر گرفتن تقاضا و یا محدودیت پنجره‌ی زمانی به دو صورت احتمالی و یا فازی، در نظر گرفتن ناوگان وسایل نقلیه به صورت ناهمگن و ارائه‌ی سایر روش‌های فراابتکاری جدید و موفق مانند الگوریتم الکترومغناطیس-مانند یکی از مطلوب‌ترین زمینه‌های تحقیقات می‌باشند.

می‌باشد، با هدف هر چه نزدیک‌تر شدن به شرایط دنیای واقعی مطرح گردید. از آن‌جا که این مسئله NP-Hard می‌باشد، برای حل آن دو الگوریتم جستجوی ممنوع و انجماد تدریجی که از کاراترین الگوریتم‌های شناخته شده در نزدیکترین حوزه‌ها به مسئله مورد بحث می‌باشند، توسعه داده شدند.

پس از تولید مثال‌های آزمایشی جدید به روش متداول در ادبیات این حوزه و با توجه به خاصیت میانگین و واریانس تقاضای مشتریان، نتایج عددی حاصل از حل مدل توسط نرم‌افزار CPLEX10.1 برای ابعاد کوچک مسئله و جواب‌های حاصل از اجرای دو الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوع و انجماد تدریجی برای تمامی نمونه مثال‌ها تحلیل شدند. نتایج گویای کارایی این دو الگوریتم است چرا که جواب حاصل از این دو الگوریتم برای نمونه مثال‌های آزمایشی با ابعاد کوچک دقیقاً با مقادیر بهینه‌ی حاصل شده از نرم‌افزار CPLEX10.1 برابر شد. علاوه بر این نتایج نشان دهنده‌ی برتری

جدول (۸): مقایسه‌ی جواب‌های دو الگوریتم TS و SA و الگوریتم ابتکاری حریرانه

| نام نمونه مسئله | OLRP(heuristic) | SDOLRP(TS) | | SDOLRP(SA) | |
|-----------------------|-----------------|------------|---------|------------|---------|
| | هزینه | هزینه | زمان حل | هزینه | زمان حل |
| Srivastava86-8x2 | ۳۹۷۴ | ۳۸۵۱ | ۱۹.۱۱ | ۳۸۵۱ | ۱۵.۷۸ |
| Perl83-12x2 | ۱۹۹۱ | ۱۷۱۹ | ۲۴.۳۵ | ۱۷۱۹ | ۲۱.۳۱ |
| Gaskell67-21x5 | ۵۲۵۸ | ۴۲۵۱ | ۳۹.۰۵ | ۴۲۹۵ | ۳۸.۴۸ |
| Gaskell67-22x5 | ۸۰۵۱ | ۷۷۲۹ | ۳۹.۱۴ | ۷۷۲۹ | ۳۴.۰۹ |
| Gaskell67-29x5 | ۱۰۴۰۷ | ۹۷۰۲ | ۴۴.۲۸ | ۹۷۰۲ | ۴۲.۵۲ |
| Gaskell67-32x5 | ۱۰۵۶۵ | ۱۰۰۳۶ | ۶۰.۰۱ | ۹۹۹۶ | ۵۸.۵۶ |
| Gaskell67-36x5 | ۹۷۴۰ | ۹۲۵۲ | ۶۶.۲۹ | ۹۱۴۳ | ۴۵.۳۳ |
| Min92-27x5 | ۵۴۵۱۵ | ۵۳۴۲۸ | ۵۲.۵۴ | ۵۳۴۲۸ | ۴۸.۶۵ |
| Min92-134x8 | ۲۹۹۷۸۸ | ۲۹۹۶۳۱ | ۵۳۶ | ۲۹۸۳۷۳ | ۴۲۰.۵۹ |
| Christofides69-50x5 | ۱۱۴۸۷ | ۱۰۷۰۰ | ۶۲.۶۶ | ۱۰۲۰۰ | ۵۰.۰۳ |
| Christofides69-75x10 | ۲۹۲۰۸ | ۲۸۵۰۸ | ۲۹۸.۱۸ | ۲۸۵۰۸ | ۲۹۰.۳۱ |
| Christofides69-100x10 | ۲۴۸۵۰ | ۲۳۱۲۰ | ۳۴۴.۳۳ | ۲۱۶۳۰ | ۳۱۴.۸۷ |
| Daskin95-88x8 | ۲۷۹۵۹ | ۲۴۳۰۷۸ | ۲۹۸.۹۷ | ۲۴۲۲۱.۶ | ۲۸۲.۵۰ |
| Daskin95-150x10 | ۱۰۰۶۲۹۲۹ | ۱۰۰۴۸۲۱۹ | ۱۰۱۰.۰۵ | ۱۰۰۴۸۸۹۴ | ۹۸۶.۵۱ |
| Or76-117x14 | ۴۵۵۷۴۴.۲ | ۴۳۹۵۱۰.۲ | ۸۹۵.۹۳ | ۴۳۸۵۶۲.۲ | ۸۷۰.۰۶ |
| Perl83-55x15 | ۱۵۴۷۹ | ۱۴۱۰۴ | ۲۰۱.۰۰ | ۱۳۷۰۱ | ۱۹۰.۳۲ |
| Perl83-85x7 | ۳۲۹۰۹ | ۲۸۲۰۹ | ۳۱۷.۴۲ | ۲۸۵۰۹ | ۳۰۰.۳۵ |
| Perl83-318x4 | ۴۳۱۲۶۷۷۹ | ۴۲۹۸۰۲۲۴ | ۶۸۹۲.۸۷ | ۴۲۹۷۴۷۲۴ | ۶۶۰۰.۵۴ |

family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems, *Transportation Science*, 22: 161–172.

- [5] Tuzun, D., Burke, L. I. (1999). A two-phase tabu search approach to the location routing problem, *European Journal of Operational Research*, 116:87–99.
- [6] Prins, C., Prodhon, C., Soriano, P., Wolfler-Calvo, R. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-ganular tabu search heuristic, *Transportation Science*, 41: 470–483.
- [7] Karaoglan, I., Altıparmak, F., Kara, I., Dengiz, B. (2011). A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery, *European Journal of Operational Research*, 211: 318–332.
- [8] Zarandi, M. F., Hemmati, A. and Davari, S. (2011), The

مراجع

- [1] Duhamel, C., Lacomme, P., Prins, C., Prodhon, C. (2010). A GRASP*ELS approach for the capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 37: 1912–1923.
- [2] Yu, V.F., Lin, S.W., Lee, W., Ting C.J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location-routing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 58: 288–299.
- [3] Min, H., Jayaraman, V., Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions, *European Journal of Operational Research*, 108: 1–15.
- [4] Laporte, G., Nobert, Y., Taillefer, S. (1988). Solving a

- of the Chinese Institute of Transportation, Tainan, Taiwan.
- [18] Archetti, C., Savelsbergh, M.W.P., Speranza, M.G., (2008). To split or not to split: That is the question. *Transportation Research Part E*, 44: 114-123
- [19] Wun, S.G. (2008). Heuristic of location-routing problems with split delivery. Master Thesis, Industrial Engineering and Management, Chinese.
- [20] Gulczynski, D., Golden, B., Wasil, E. (2011). The multi-depot split delivery vehicle routing problem: An integer programming-based heuristic, new test problems, and computational results, *Computers and Industrial Engineering*, 61: 794-804.
- [21] Barbetto, L., Garcia, S., Nogales, F.J. (2013). A randomized granular tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem, *Annals of Operations Research*.
- [۲۲] فتاحی، پرویز (۱۳۸۸). الگوریتم‌های فراابتکاری، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ویرایش اول.
- [23] Brandao, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, 157: 552-564.
- [24] Fu, Z., Eglese, R., Li, L. (2005). A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem, *Journal of the Operational Research Society*, 56: 267-274.
- [۲۵] جمشیدیان، احمدرضا، نوری‌زاده، مهدی (۱۳۸۵). طرح و تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها با نرم‌افزار Minitab 14، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ویرایش ۲.
- [26] Barreto, S. S. (2004). *Análise e Modelização de Problemas de localização-distribuição [Analysis and modelling of location-routing problems]*, Ph.D. Thesis, University of Aveiro, Aveiro, Portugal.
- multi-depot capacitated location-routing problem with fuzzy travel times, *Expert Systems with Applications*, 38: 10075-10084.
- [9] Golozari F, Jafari A., Amiri M. (2013). Application of a hybrid simulated annealing-mutation operator to solve fuzzy capacitated location-routing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67: 1791-1807.
- [10] Ghafari-Nasab N, Ahari S G., Ghazanfari M. (2013). A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands, *Scientia Iranica*, 20: 919-930.
- [11] Zarandi MHF, Hemmati A, Davari S, Turksen, I.B., (2013). Capacitated location routing problem with time windows under uncertainty, *Knowledge-Based Systems*, 37: 480-489.
- [12] Nagy, G., Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods, *European Journal of Operational Research*, 177: 649-672.
- [13] Min, H., Jayaraman, V., Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 108: 1- 15.
- [14] Yu, V.F., Lin SY. (2012). A Simulated Annealing Heuristic for the Open Location Routing Problem, *International Conference on Innovation and Management*, Republic of Palau.
- [15] Sariklis D., Powell, S., A heuristic method for the open vehicle routing Problem, *Journal of the Operational Research Society*, 51: 564-573.
- [16] Hanguang Q., Xumei Z. (2006). Research on Open Location Routing Problem Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. *China Mechanical Engineering*, 22: 2359-2361.
- [17] Yu V.F., Wu C.C, Liu CH. A particle swarm optimization algorithm for the open location routing problem, *International Conference and Annual Meeting*



Modeling the split delivery open location routing problem and solving it by simulated annealing

A. Jafari*, A. Sadeghi Sarvestani

Department of industrial engineering, University of science and culture, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 December 2013

Accepted 1 June 2014

Keywords:

Supply chain management
Split delivery open location-routing
problem
Tabu search
Simulation annealing
Design of experiment.

ABSTRACT

Location-routing problem is one of the most challenging problems in supply chain management. In real world, many companies hire vehicles for servicing demands of customers, so these vehicles do not return to these companies after ending services. On the other hand, managers are constantly faced with the problem of whether serving each customer's demand by one vehicle will result in higher benefits or delivering their demands by more than one vehicle will lead to increased profits. Therefore, in response to this challenge and in order to get closer to the real world, a new problem which is called split delivery open location-routing problem is modeled in this study. Since the problem is a NP-Hard, Tabu search and simulated annealing algorithms are used for solving it. The mathematical model is run by cplex10.1 software for the small size instances. In addition, in order to improve the proposed solution algorithms, a heuristic algorithm for generating suitable initial solution is presented. Finally, after generating the new experimental instances and tuning parameters of the proposed algorithms, the numerical results of the problem solving by cplex10.1 software and the suggested algorithm are analyzed. The results show the efficiency of the two algorithms and superiority of simulated annealing algorithm over tabu search algorithm. The results also indicate that considering the assumption of split delivery lead to final cost reduction, especially when the demand variance is relatively small and the mean is greater than half the vehicle capacity and less than three quarters of the vehicle capacity.

* Corresponding author. Azizollah Jafari
Tel.: 021-44214725; E-mail addresses: jafari@usc.ac.ir