مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال یازدهم، شماره سوم (پیاپی ۴۲)، پاییز ۹۳، ص ص ۵۷-۳۵
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

مساله مسیریابی چندهدفه همراه با هزینه بارگیری و تخلیه و حل آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی پراکنده

سید مجید ابراهیمی[۱]، فرید خوش الحان[۲]، میثم براجعه[۳]، امید تهرانیان*[۴]

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشگاه تهران، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس بین المللی کیش دانشگاه تهران، گروه مهندسی صنایع، کیش، ایران

رسید مقاله: ۱۹ دی ۱۳۹۲

پذیرش مقاله: ۲۱ خرداد ۱۳۹۳

چکیده

مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP) یکی از مهمترین مسایل علمی در حوزه‌ی بهینه‌سازی ترکیبی است. بار وسیله‌ی نقلیه در VRP کلاسیک و انواع آن، در طی حمل و نقل ثابت به حساب می‌آید. از آنجایی‌که بار وسیله‌ی نقلیه در دنیای واقعی از یک مشتری به مشتری دیگر در مسیر حرکت فرق دارد؛ لذا مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، بدون توجه به اثر هزینه‌ی بارگیری، به مسیرهای غیربهینه منجر می‌شود. از طرف دیگر در مسایل مسیریابی، همواره ممکن است در نهایت با یک عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده و یا عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه مورد استفاده مواجه شویم که می‌تواند منجر به ایجاد نارضایتی در رانندگان و بی‌عدالتی در پرداخت دستمزد آن‌ها گردد. در این مقاله، از یک سو VRP با هزینه‌ی بارگیری و تخلیه بررسی شد و از سوی دیگر با توسعه‌ی دو تابع هدف، ایجاد توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه مورد استفاده و هم‌چنین ایجاد توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه را به‌طور توام مدنظر قرار دادیم. الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی چندهدفه را برای به‌دست آوردن جواب‌های بهینه چیره پیشنهاد می‌کنیم. محاسبات را روی ۲۰ مساله‌ی متنوع انجام دادیم. نتایج محاسبه‌ای نشان داد الگوریتم پیشنهادی برتر از سایر الگوریتم‌ها ازجمله MOPSO و MODE در بیشتر نمونه‌ها و هم‌چنین اکثر شاخص‌های کارایی است.

کلمات کلیدی: مساله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه، الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی چند هدفه، هزینه‌ی بارگذاری، عدم تعادل بار.

۱ مقدمه

زنجیره‌ی تامین به عنوان یک ساختار یکپارچه، تمامی فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد از مرحله‌ی

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: omid_tehranian@yahoo.com

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

تهیه ماده‌ی اولیه تا مرحله‌ی تحویل محصول را به مصرف‌کننده شامل می‌شود. هدف هر زنجیره‌ی تامین، افزایش سودآوری زنجیره‌ی از طریق کاهش هزینه‌ها و افزایش سطح خدمت‌دهی است. شبکه‌ی توزیع به عنوان یکی از عوامل اصلی ایجاد هزینه در زنجیره‌ی تامین، عملکرد زنجیره را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با این اوصاف، انتخاب یک شبکه‌ی توزیع مناسب و یکپارچه می‌تواند دستیابی به اهداف مختلف زنجیره‌ی تامین را تسهیل سازد. به علت قابل توجه بودن هزینه‌ی توزیع محصولات نسبت به هزینه‌ی تولید آن‌ها، صرفه جویی در آن به‌طور مستقیم روی قیمت تمام شده‌ی محصولات تاثیر دارد؛ بنابراین توجه به مسایل توزیع کالا و بخصوص بهبود کارایی، حمل و نقل آن اهمیت زیادی دارد و باعث صرفه‌جویی در قیمت تمام‌شده‌ی محصول می‌شود و برای شرکت‌های صنعتی و خدماتی قابلیت بیشتری را برای رقابت در برابر رقبای خود فراهم می‌سازد. ساده‌ترین شکل از مسایل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت است که برای اولین بار توسط دانتزیگ و رامسر [۱] ارایه گردید. در ادامه برای حل آن، کلارک و رایت [۲] یک الگوریتم ابتکاری به صورت حریص را که بهبودی برای روش دانتزیگ و رامسر بود، ارایه کردند. آن‌ها الگوریتم صرفه‌جویی را برای حل پیشنهاد دادند که مبنای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت. این مساله و نسخه‌های توسعه یافته‌ی آن، امروزه بسیار مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته، در بخش‌های زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه به مجموعه‌ای از موضوعات اطلاق می‌شود که در آن ناوگانی متشکل از چندین وسیله‌ی نقلیه از یک یا چند انبار به ارایه‌ی خدمات به مشتریان پراکنده در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند و این موضوع را به نحوی انجام می‌دهند که هزینه‌های انجام این کار به حداقل برسد. هر وسیله‌ی نقلیه با شروع از انبار مرکزی پس از ارایه‌ی خدمت به مشتریان به انبار باز می‌گردد. هر وسیله ظرفیت مشخصی دارد و همه‌ی مسیرهای مربوط از مبدا یا دپوی مرکزی شروع و به آن ختم می‌شود.

مسایل مسیریابی وسایل نقلیه ازجمله مسایل بسیار سخت است به طوری‌که یافتن جواب بهینه برای آن‌ها بسیار سخت و زمان‌بر است. به‌طور کلی برای حل مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، همانند مسایل دیگر بهینه‌سازی ترکیبی، روش‌های زیادی وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایبی است. در حالت کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته‌ی کلی الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم‌های دقیق با صرف زمان و هزینه‌ی بیشتری به جواب بهینه‌ی مساله دست می‌یابد به علاوه در این روش‌ها یا تمامی جواب‌های ممکن مورد بررسی قرار گرفته، سعی می شود از میان آن‌ها بهترین جواب به‌دست آید و یا اینکه جواب‌ها دسته‌بندی شده، در هر مرحله دسته‌ای از جواب‌ها به‌علت دلایل منطقی کنار گذاشته می‌شود. برای مثال از این نوع الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم شاخه و حد اشاره کرد [۳و۴]. در مقابل، الگوریتم‌های تقریبی در یک زمان اندک به جواب می‌رسد، هرچند که ممکن است جواب مربوطه متناسب با اندازه‌ی مساله، دارای دقت کمتری نسبت به جواب الگوریتم‌های دقیق باشد. این روش‌ها خود به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و ترکیبی دسته‌بندی می‌شود. روش‌های ابتکاری از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار نیست و جواب مساله در زمان اندک به‌دست می‌آید و تکرارکردن الگوریتم در به‌دست آوردن جواب‌های متفاوت، نقشی ندارد؛ اما این نوع از الگوریتم‌ها دارای راهکاری موثر برای فرار از نقطه‌ی بهینه‌ی محلی نیست و در بیشتر مواقع در بهینه‌های محلی

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

گیر می‌افتند [۵]. الگوریتم صرفه‌جویی و الگوریتم اصلاحی صرفه‌جویی، نمونه ای از این الگوریتم‌ها است [۵]. در روش‌های فراابتکاری که میزان اجرای الگوریتم بر خلاف روش‌های ابتکاری به تصمیم کاربر وابسته است، جواب‌ها تقریبا در یک زمان بیشتر از الگوریتم‌های ابتکاری و کمتر از روش‌های دقیق به‌دست می‌آید. معمولاً جواب‌های این روش‌ها از جواب‌های روش‌های ابتکاری بهتر است و اینگونه از الگوریتم‌ها از راهکارهایی استفاده می‌کنند که تا حد ممکن در بهینه‌های محلی گیر نیفتند؛ اما پارامترهای زیادی در این الگوریتم‌ها وجود دارد که باید کاربر و به‌صورت تجربی آن را به‌دست آورد. این حجم زیاد پارامترها سبب می شود که الگوریتم‌ها نتوانند در تکرارهای مشابه جواب‌های یکسانی را به‌دست آورند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اینگونه از الگوریتم‌ها دارای یک روال ثابت برای رسیدن به جواب نیستند، پارامترهای تصادفی نقش زیادی در این الگوریتم‌ها بازی می‌کنند. به عنوان نمونه‌ای از این الگوریتم‌ها می توان به مواردی چون الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جستجوی ممنوع، الگوریتم مورچگان، الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم پرندگان اشاره کرد [۶].

در الگوریتم‌های ترکیبی که ترکیبی از الگوریتم‌های تخمینی است، سعی شده که از مزایای هر کدام از الگوریتم‌ها به نحو خوبی استفاده شود. به‌طور مثال الگوریتم‌های ابتکاری دارای جواب نسبتاً خوبی نسبت به رو-ش‌های فراابتکاری نیستند؛ اما این جواب را در زمان اندک به‌دست می‌آورند. بنابراین می توان در الگوریتم‌های ترکیبی از این روش‌ها برای یافتن جواب‌های اولیه استفاده کرد که سبب می شود برای یافتن این جواب‌های خوب، زمان زیادی صرف نشود. از طرف دیگر می توان در بعضی از الگوریتم‌های ترکیبی از این روش‌ها برای بهبود جواب‌های اولیه استفاده کرد و بدین ترتیب جواب‌های بسیار خوبی در زمان کمتری نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری به‌دست آورد. برای نمونه می‌توان به الگوریتم‌های ترکیبی ژنتیک و پرندگان، جاروبی و ژنتیک و نزدیکترین همسایگی، جستجوی پراکنده و مورچگان، جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید، پرندگان و شبیه‌سازی تبرید اشاره کرد [۱۰-۷].

طبق بررسی‌های انجام شده توسط محققان، به‌کارگیری و ملاحظات مقدار بارگیری برای محاسبه‌ی هزینه در موضوعات مسیریابی وسایل نقلیه، به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال ژن هو و کائی [۱۱]، هزینه‌ی مصرف سوخت وسیله‌ی نقلیه را در نظر گرفته‌اند که خود تابعی از میزان بار وسیله نقلیه است. دورنر و همکاران [۱۲]، کمینه‌سازی هزینه‌ی سوخت را به‌طور جامع بررسی کرده‌اند. ایشان با تحلیل میزان مصرف سوخت در انواع وسایل نقلیه، تابع برآورد آن‌را به شکل تابع خطی استنتاج کرده‌اند. هم‌چنین یک الگوریتم ابتکاری نسبتا کارا برای حل مدل پیشنهادی توسعه داده‌اند. در تحقیق دیگری محققان ضمن ملاحظه‌ی هزینه‌های ثابت، هزینه‌های متغیر وسیله‌ی نقلیه را به عنوان تابعی از مقدار بار و مقدار مسافت طی شده در نظر گرفته‌اند و سپس یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر روش جستجوی پراکنده برای حل مدل پیشنهاد داده‌اند. تانگ و دوستان [۱۳]، یک الگوریتم جستجوی پراکنده برای موازنه‌ی بار کامیون‌ها را در موضوع مسیریابی وسیله‌ی نقلیه بدون در نظرگرفتن هزینه‌ی سفر توسعه داده‌اند. کریتیکوس و آیوانو [۱۴] موازنه‌ی بار وسایل نقلیه را همزمان با کاهش هزینه البته به صورت تک هدفه مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در مدل‌های کلی VRP و انواع آن، هزینه‌ی حمل شامل دو بخش هزینه‌ی ثابت و متغیر است. بخش ثابت،

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

هزینه اعزام وسیله‌ی نقلیه است که به حجم کالای بارگیری‌شده و فاصله‌ی طی‌شده برای رسیدن به مقصد بستگی ندارد؛ اما هزینه‌ی متغیر، متناسب با مجموع فاصله‌ی طی‌شده است. در مدل‌های کلی VRP، بار وسیله‌ی نقلیه را در کل مسیر ثابت به حساب می‌آورند؛ لذا در مدل‌های کلی VRP هزینه همراه با مقدار بار که به آن هزینه‌ی بارگیری می‌گوییم، ثابت است و در تابع هدف از آن صرف‌نظر کردیم؛ اما هنگامی که حمل کالا در شبکه‌ی توزیع برون‌سپاری می‌شود، میزان بار وسایل اهمیت پیدا می‌کند. هزینه‌ی مصرف سوخت بخش مهمی از هزینه‌ی بارگیری است که به خاطر مقدار بار وسیله‌ی نقلیه تغییر می‌کند. در دنیای واقعی و در فعالیت‌های توزیع، بار وسیله‌ی نقلیه از یک مشتری به مشتری دیگر در کل مسیر فرق دارد. بار وسیله‌ی نقلیه وقتی که وسیله‌ی نقلیه به تک تک مشتریان می‌رسد کم می‌شود و سرانجام معادل مقدار تقاضای مشتری آخر است [۱۳]. در واقع، وقتی کالاهایی که به نگهداری ویژه نیاز دارند حمل می‌کنیم، هزینه‌ی اضافی به آن تعلق می‌گیرد. این بخش هزینه تابع وزن بار است. در حقیقت، بار وسیله‌ی نقلیه یک نوع متغیر به حساب می‌آید که برای فرمول بندی مساله از آن استفاده می شود. متغیر بار هم در محدودیت‌ها و هم در تابع هدف دیده می‌شود [۱۳]؛ بنابراین در این مقاله هزینه‌ی حمل و نقل به صورت خطی وابسته به بار و مسافت طی شده در نظر گرفته شده است. به‌عبارت دیگر یکی از نوآوری های این مقاله این است که ما به مدل‌سازی جدید VRP می‌پردازیم و به هزینه‌ی بارگیری در تابع هدف موقع بهینه کردن مسیرهای وسیله‌ی نقلیه توجه می‌کنیم. در مدل‌سازی این مساله، بار وسیله‌ی نقلیه از یک مشتری به مشتری دیگر در طی سفر متغیر است؛ لذا هزینه‌ی بارگیری بخشی از هزینه حمل و نقل به حساب می‌آید.

از طرف دیگر بر اساس مشاهدات دنیای واقعی، حجم قابل توجهی از میزان درآمد توزیع‌کنندگان به میزان کالایی است که توزیع می‌کنند. به همین دلیل میزان کالایی که توزیع کنندگان حمل می‌کنند باید متوازن گردد تا رضایت رانندگان حداکثر شود؛ لذا براساس جنبه‌های شناسایی شده از مطالعات مروری VRP و نیز جنبه‌های جدید مشاهده‌شده از مسایل دنیای واقعی، ما در این مقاله به دنبال طراحی و حل مدلی برای مسیریابی وسایط نقلیه از طریق ایجاد توازن در توزیع کالا هستیم. یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله درنظرگرفتن دو تابع هدف "کمینه‌کردن عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده" و "کمینه‌کردن عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده" به‌طور همزمان است [۱۵].

بیشتر پژوهش های صورت گرفته در حوزه VRP بر روی بهینه‌سازی یک هدفه متمرکز می‌باشد، در حالی‌که بهینه‌سازی چند هدفه یکی از موضوعات جذاب در پژوهش‌های اخیر حوزه مسایل زنجیره‌ی تامین بوده است؛ زیرا فرصت‌های جدیدی برای تعریف مسایل نو و گسترش‌های مسایل مسیریابی از طریق اهداف چندگانه فراهم می‌کند. برخی از مسایل چندهدفه در VRP توسط روش‌هایی که اهداف را با هم ترکیب و به یک تابع هدف تبدیل می‌کند، مدل‌سازی و سپس حل شده است؛ اما اشکال این روش‌ها این است که تعیین دقیق وزن توابع مشکل است به ویژه زمانی‌که اطلاعات کافی و یا دانش مربوط به مسایل مسیریابی وسایل نقلیه‌ی بزرگ در دنیای واقعی وجود ندارد؛ بنابراین روش‌هایی که یک طیف وسیعی از جواب‌ها را ایجاد می‌کند مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها تبادل بین اهداف را در قالب سیاست پارتو به‌وجود می‌آورد [۱۶].

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

در بهینه‌سازی چندهدفه ممکن است اهداف در یک راستا بوده، یا ممکن است با یکدیگر متناقض باشد. از آنجا که تمام اهداف به یک اندازه مهم می‌باشد، هدف از بهینه‌سازی چندهدفه، پیداکردن جبهه‌ی بهینه پارتو است.

۲ مدل‌سازی ریاضی مساله

علی‌رغم اینکه مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی جزو مسایل سخت محسوب می‌شود، می‌تواند به‌صورت یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح نمایش داده شود. در این بخش، مدل ریاضی مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه همراه با هزینه‌ی بارگیری با درنظرگرفتن توازن فواصل سفر و بارهای تخصیص یافته ارایه می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به پیچیدگی مساله‌ی مورد بررسی، محتوای این بخش در سه زیربخش پارامترها و متغیرهای مساله، محدودیت‌های مساله و تابع هدف مساله به‌صورت تفکیک شده بیان شده است.

۲-۱ پارامترها و متغیرهای مساله

برای ارایه‌ی مدل مساله، از گراف $G=(V,A)$ استفاده می‌شود که در آن $V=\{0,1,2,3,....,N\}$ مجموعه‌ی گره‌ها و $A=\{(i,j)\mid i,j\in V \ and \ i\neq j\}$ مجموعه‌ی یال‌های موجود در آن است. در این مساله، هر یک از گره‌ها مانند i (به جزء گره 0 که نشان‌دهنده‌ی انبار است) نشان‌دهنده‌ی مشتری‌ها بوده، دارای مقدار تقاضای q_i است و کمتر از ظرفیت وسیله نقلیه می‌باشد. هم‌چنین به هر کمان موجود در A، فاصله d_{ij} متناظر شده است که در آن برای هر $0\leq i\leq N$ مقدار $d_{ii}=0$ است. از طرف دیگر ناوگان حمل و نقل شامل K وسیله‌ی نقلیه‌ی همگن در مبدا قرار گرفته است به‌طوری‌که هر وسیله‌ی نقلیه دارای ظرفیت Q است. در اینجا ما فرض می‌کنیم ماتریس D متقارن است و خاصیت نابرابری مثلثی برقرار است.

علامت‌گذاری‌هایی که در ساخت مدل در این مقاله استفاده کردیم عبارت است از:

جدول ۱. اندیس‌ها و پارامترها و متغیرها

N	تعداد مشتریان
K	تعداد وسایل نقلیه
Q	ظرفیت هر وسیله‌ی نقلیه
Cd	هزینه‌ی سفر هر واحد کالا در واحد فاصله (ضریب فاصله)
Cg	هزینه‌ی تحویل هر واحد وزنی محصول و هر واحد فاصله (ضریب بار)
CV	هزینه‌ی ثابت تخلیه وسیله‌ی نقلیه (ضریب وسیله‌ی نقلیه)
d_{ij}	فاصله گره i تا گره j
q_i	تقاضای مشتری i ام
X_{ijk}	متغیری باینری وقتی یک است که وسیله‌ی نقلیه K از یال (i,j) بگذرد در غیر این صورت صفر است
y_{ijk}	حجم بار وسیله‌ی نقلیه k در یال (i,j) یا مقدار محصول که توسط وسیله‌ی k بین مکان i ام به مکان j ام حمل می‌شود و عدد آن غیرمنفی است. مقدار آن کمتر از Q است اگر وسیله نقلیه K از i به j عبور کند، در غیر این صورت صفر است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

۲-۲ محدودیت‌های مساله

در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، انواع مختلفی از محدودیت‌ها کاربرد دارد. در این مساله هدف تعیین مجموعه‌ای از مسیرها و تخصیص آن‌ها به وسایل نقلیه‌ی موجود است به‌طوری‌که شرایط زیر برقرار باشد:

- تقاضای همه‌ی مشتریان برآورده شود.
- در سرویس‌دهی به مشتریان تنها از وسایل نقلیه‌ی موجود استفاده شود.
- تقاضای هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه و در یک ملاقات برآورده شود.
- هیچ کدام از تقاضاهای مشتریان نباید بیشتر از ظرفیت مجاز برای وسایل سرویس دهنده باشد. به عبارت دیگر برای هر $0 \le i \le N$ باید $q_i \le Q$ باشد.
- هیچ وسیله‌ی نقلیه‌ای در طول مسیر مجاز نیست که بیشتر از ظرفیت معین شده Q بارگذاری کند.
- همه‌ی وسایل نقلیه در ابتدا و انتهای الگوریتم باید در نقطه‌ی مبدا ۰ باشند.

روابط (۱) محدودیت‌های مساله را بیان می‌کند:

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N} q_j x_{ijk} \le Q \quad , \quad k \in \{1,2,....,k\} \tag{1}$$

$$\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=1}^{k} x_{ijk} = 1, \quad i \in \{1,2,....,N\} \tag{2}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{k=1}^{k} x_{ijk} = 1, \quad j \in \{1,2,....,N\} \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{0jk} \le 1, \quad k \in \{1,2,....,k\} \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{0jk} - \sum_{j=1}^{N} x_{j0k} = 0, \quad k \in \{1,2,....,k\} \tag{5}$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in S} x_{ijk} \le |S| - 1, \quad 2 \le S \le N, \quad k \in \{1,2,....,k\} \tag{6}$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ i\ne j}}^{N}\sum_{k=1}^{k} (x_{jik} y_{jik} - x_{ijk} y_{ijk}) = q_i, \quad i \in \{1,2,....,N\} \tag{7}$$

$$0 \le y_{ijk} \le Q.x_{ijk}, \quad i,j \in \{0,1,2,....,N\}, \quad k \in \{1,2,....,k\} \tag{8}$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad i,j \in \{0,1,2,....,N\}, \quad i \ne j, \ k \in \{1,2,....,k\} \tag{9}$$

رابطه‌ی (۱) بیانگر محدودیت ظرفیت و گنجایش وسیله‌ی نقلیه است.

روابط (۲) و (۳) بیانگر این است که هر گره فقط از یک وسیله‌ی نقلیه سرویس گرفته و هر وسیله نقلیه یک بار به هر مشتری رسیده است.

رابطه‌ی (۴) بیانگر این است که هر وسیله‌ی نقلیه در هر سفر بیشتر از یکبار به یک مشتری مراجعه نخواهد کرد.

رابطه‌ی (۵) بیانگر این است که وسایل نقلیه از انبار حرکت می‌کنند و به انبار بر می‌گردند.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

رابطه‌ی (۶) بیانگر محدودیت شکننده‌ی زیر تور است.

رابطه‌ی (۷) بیانگر رابطه‌ی منطقی بین تقاضای مشتری i و بار وسیله‌ی نقلیه (مقدار کالای حمل شده) در دو یال متصل به مشتری i است.

رابطه‌ی (۸) بیانگر این است که حجم بار وسیله‌ی نقلیه k در یال (i,j) یا مقدار محصول که توسط وسیله k بین مکان i ام به مکان jام حمل می‌شود کمتر از ظرفیت وسیله نقلیه است.

رابطه‌ی (۹) بیانگر نوع متغیرها است. متغیری باینری است وقتی یک است که وسیله‌ی نقلیه K از یال (i,j) بگذرد در غیر این صورت صفر است.

۲-۳ تابع هدف مساله

الف- تشکیل تابع هدف

همان‌طور که ذکر شد، هدف از این مقاله حل مساله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با در نظر گرفتن توازن حجم کار بین وسایل نقلیه می‌باشد؛ لذا تابع هدف مدل پیشنهادی از دو جزء تشکیل شده است که جزء اول به دنبال "کمینه کردن عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده" بوده، جزء دوم به دنبال "کمینه‌کردن عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه مورد استفاده" می‌باشد و به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این روابط نشان‌دهنده‌ی غیرخطی بودن مدل است.

$$\begin{aligned} Min\ \ DI &= Max\left[\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_{ij}x_{ijk}(c_d + c_g y_{ijk}) + c_v \sum_{j=1}^{N} x_{0jk}\right] \\ &-Min\left[\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_{ij}x_{ijk}(c_d + c_g y_{ijk}) + c_v \sum_{j=1}^{N} x_{0jk}\right], \quad k = 1,...,K \end{aligned} \tag{۱۰}$$

$$Min\ \ LI = Max\left[\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}q_j\right] - Min\left[\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}q_j\right], \quad k = 1,...,K \tag{۱۱}$$

تابع هدف اول شامل هزینه‌ی مسافت، هزینه‌ی بارگیری (بر اساس وزن کالا) و هزینه‌ی تخلیه است. تابع هدف دوم شامل بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه می‌باشد. تضاد بین دو تابع هدف به معنی بدتر شدن مقدار یک تابع هدف با بهبود تابع هدف دیگر است. همان‌طور که مشخص است تحقق هدف تابع اول که کمینه‌کردن عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده می‌باشد منجر به عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده خواهد شد، یعنی بهبود تابع هدف اول منجر به بدترشدن مقدار تابع هدف دوم خواهد شد و برعکس در صورتی‌که تابع هدف دوم در نظر گرفته شود و بخواهیم عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده را کمینه کنیم، این امر منجر به عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده خواهد شد.

با توجه به مطالب مذکور، به علت وجود تضاد بین دو تابع هدف در نظر گرفته شده، دستیابی به جواب یا

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

جواب‌های بهینه از طریق به کارگیری روش‌های متداول و کلاسیک بهینه‌سازی غیرممکن است؛ بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای حل مساله‌ی مورد نظر پیشنهاد می‌شود.

ب- خطی‌سازی تابع هدف

حل مدل‌های غیرخطی بسیار سخت‌تر از مدل‌های خطی است. به عبارت دیگر در ادبیات برنامه‌ریزی خطی برای مدل‌های خطی، روش‌های بسیار کاراتری توسعه یافته است؛ زیرا مدل‌های خطی محدب می‌باشد و حل آن‌ها نسبت به مدل‌های غیرخطی بسیار ساده‌تر است. از این رو تبدیل یک مدل غیرخطی به یک مدل خطی متناظر با آن می‌تواند گام موثری برای حل موضوع باشد. در اینجا سعی می‌شود با افزودن چند محدودیت، تابع هدف غیرخطی فوق‌الذکر به یک تابع هدف خطی تبدیل شود. در این‌راستا با توجه به اینکه تابع هدف دوم مساله اختلاف بین بیشترین و کمترین بار حمل شده در میان تمام وسایل نقلیه می‌باشد، بدین ترتیب می‌توان با تعریف دو محدودیت و دو متغیر جدید این تابع هدف را خطی‌سازی نمود. محدودیت اول برای محاسبه و به‌دست آوردن بیشترین بار حمل‌شده‌ی وسایل نقلیه است و محدودیت دوم برای محاسبه‌ی کمترین بار حمل‌شده‌ی وسایل نقلیه می‌باشد. هم‌چنین تابع هدف مزبور برابر حاصل اختلاف بین دو متغیر جدید تعریف شده است.

محدودیت اول:

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} q_j \le Q_{Max}, \quad \forall k = 1,2,...,K \qquad (12)$$

محدودیت دوم:

$$Q_{Min} \le \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} q_j, \quad \forall k = 1,..,K \qquad (13)$$

تابع هدف دوم پس از خطی‌سازی:

$$Min \;\; LI = \mathrm{Q}_{\max} - \mathrm{Q}_{\min} \qquad (14)$$

علامت متغیرها:

$$Q_{Min} \ge 0, \quad Q_{Max} \ge 0 \qquad (15)$$

۳ روش ارایه شده

۳-۱ بهینه‌سازی مسایل چندهدفه

در یک مساله‌ی بهینه‌سازی تک‌هدفه، معمولا یک جواب منحصر به فرد وجود دارد؛ ولی در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه، ممکن است توابع هدف با یکدیگر در تعارض باشد؛ بنابراین پیداکردن یک جواب بهینه به‌طوری‌که به‌صورت همزمان کلیه‌ی اهداف را بهینه کند، معمولا امکان‌پذیر نیست. همان‌طور که گفته شد یکی از روش‌های حل این‌گونه مسایل، ادغام‌کردن اهداف مختلف در یک تابع هدف است. در چنین مواردی جواب بهینه با استفاده از روش‌هایی مانند تابع مطلوبیت و یا مجموع موزون توابع هدف به‌دست می‌آید؛ لیکن در این روش‌ها، انتخاب اوزان مناسب برای توابع هدف و یا انتخاب یک تابع مطلوبیت مناسب یک چالش محسوب می‌شود.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

ازجمله روش‌های دیگر حل مسایل چندهدفه، روش‌هایی است که هدفش به‌دست آوردن جواب‌های بهینه پارتویی است که شامل جواب‌هایی است که توسط هیچ جواب دیگری از مجموعه جواب‌های امکان‌پذیر مساله چیره نمی‌شود. یک جواب چیره‌ناپذیر جوابی است که بهبود در یک تابع هدف آن منجر به بدترشدن حداقل یک تابع هدف دیگر می‌شود. با استفاده از چنین روش‌هایی و ارایه‌ی مجموعه جواب‌های چیره ناپذیر، این فرد تصمیم‌گیرنده است که با توجه به تبادل بین اهداف به انتخاب جواب مطلوب خود بپردازند. بنابراین هدف اصلی رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه، دسترسی هرچه بیشتر به نقاط (جواب‌های) بهینه‌ی سراسری یا پارتو است.

۳-۲ معرفی کلی الگوریتم جستجوی پراکنده

الگوریتم‌های تکاملی دسته‌ای مهم از الگوریتم‌های فراابتکاری است که تاکنون برای حل بسیاری از مسایل بهینه-سازی ترکیبی ارایه شده است. این الگوریتم‌ها با استفاده از فرایند تکامل طبیعی با یک جمعیت اولیه شروع و نسل به نسل با ارتقای جواب‌ها سعی می‌کنند که مناطق مهم ناحیه شدنی را مورد بررسی قرار داده، به جواب‌های خوب دست یابند. الگوریتم‌های تکاملی زیادی تاکنون برای حل مسایل بهینه‌سازی ارایه شده است که می‌توان به‌طور مثال به روش‌های ژنتیک، بهینه‌سازی گروهی ذرات، الگوریتم‌های فرهنگی و الگوریتم رقابتی فراگیر اشاره کرد. جستجوی پراکنده‌ی یک الگوریتم فراابتکاری جمعیت‌محور است که از مفهوم جمعیت در آن استفاده می‌شود. با این حال، جستجوی پراکنده به میزان زیادی از استفاده از مولفه‌های تصادفی خودداری نموده، عملگرهای رایج مورد استفاده در الگوریتم‌های تکاملی ازجمله تقاطع و جهش را ندارد.

اساس این روش، بر پایه‌ی جستجوی فضای جواب مساله از طریق یک روش هوشمند است. برخلاف روش‌های فراابتکاری دیگر مانند الگوریتم ژنتیک، از روشی صرفا تصادفی و در برخی موارد، بدون پشتوانه‌ی منطقی، اجتناب می‌ورزد. این الگوریتم، فضای حل مساله را از طریق تولید جواب (جواب‌های) بهتر، به‌وسیله‌ی ترکیب جواب‌های موجودی که دارای پتانسیل لازم جهت ترکیب است، جستجو می‌کند. به عبارت دیگر، در روش جستجوی پراکنده، روش‌های انتخاب جواب‌ها برای ادغام و ترکیب این جواب‌ها جهت دستیابی به جواب‌های بهتر و جستجوی فضای حل مساله، دارای الگوی مشخص و معینی است.

متدولوژی SS بسیار منعطف است و هر یک از المان‌های آن را می‌توان به روش‌ها و درجه‌های پیچیدگی گوناگونی اجرا کرد. SS به روشی سیستماتیک و بر اساس استفاده از یک جمعیت کوچک که مجموعه‌ی مرجع نامیده می‌شود، هر کدام از اعضای این جمعیت را برای ساختن جواب‌های جدید ترکیب می‌نماید. علاوه بر این با استفاده از یک روش جستجوی محلی امکان بهبود جواب‌های جدید تولید شده را فراهم می‌آورد. مجموعه‌ی مرجع از یک جمعیت اولیه‌ی مرکب از جواب‌های با کیفیت بالا و جواب‌های متمایز تشکیل می‌گردد. هم‌چنین جواب‌های به‌دست آمده از این مجموعه بر اساس روش‌های بهبود و جستجوی محلی به هنگام می‌گردد [۱۷].

از مجموعه‌ی مرجع برای ترکیب جواب‌ها با یکدیگر و ساختن جواب‌های دیگر استفاده می‌گردد. روش تولید مجموعه‌ی مرجع، انتخاب جواب‌های متمایز و با کیفیت خوب از جمعیت است. سپس هر جمعیتی از مجموعه‌ی مرجع به عنوان ورودی برای روش بهبود انتخاب می‌گردد و در آن جواب‌ها با یکدیگر ترکیب

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

می‌شود. نتایج روش بهبود، روی مجموعه‌ی مرجع و حتی جواب‌های جمعیت به هنگام‌سازی صورت می‌دهد. قالب‌بندی الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی پیشنهادی در این مقاله شامل شش روش زیر است [۱۷]:

ایجاد جمعیت اولیه یا روش ایجاد تنوع، روش بهبود، روش ایجاد مجموعه‌ی مرجع، روش تولید زیرمجموعه، روش ترکیب جواب، روش به هنگام‌سازی مجموعه‌ی مرجع.

جستجو با به کارگیری روش ایجاد تنوع برای تولید یک جمعیت اولیه شروع می‌شود، سپس زیرمجموعه‌ای از جمعیت اولیه به عنوان مجموعه‌ی مرجع اولیه انتخاب می گردد. تکامل مجموعه‌ی مرجع با به کارگیری چهار روش تولید زیر مجموعه، ترکیب جواب، بهبود و به هنگام‌سازی مجموعه‌ی مرجع انجام می‌شود. سه روش ایجاد تنوع، بهبود و ترکیب جواب، وابسته به نوع مساله است و باید بر اساس مساله‌ی مورد بررسی طراحی شود. با این وجود، بهره‌گیری از روش‌های ژنتیک در تنظیم مشخصه‌های خاص مساله بسیار مؤثر است. دو روش به‌هنگام-سازی مجموعه‌ی مرجع و تولید زیرمجموعه نیز معمولاً استاندارد ازپیش تعیین شده‌ای برای اجرا دارد. به علاوه، این الگوریتم زمانی که جمعیت در چند تکرار متوالی معین تغییری نکند، می‌تواند در مورد توقف الگوریتم تصمیم‌گیری کند.

۳-۳ روش نمایش جواب‌ها

در تمام الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌دلیل نیاز به حل شدنی در شروع کار، لازم است حل شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم که به این ساختار، نحوه‌ی نمایش جواب می‌گویند؛ لذا یکی از مهمترین موارد در الگوریتم جستجوی پراکنده، نحوه‌ی نمایش یا کدکردن جواب‌ها است. در این گام ساختار جواب‌های شدنی طوری معرفی می‌شود که با ساختار مساله هماهنگی لازم را داشته باشد. در مدل پیشنهادی ما، بر اساس ویژگی‌ها و خصوصیات مدل مساله، ساختاری برای نشان دادن جواب‌ها براساس ماتریسی از مشتریان و وسایل نقلیه طراحی کردیم. (شکل۱) ماتریس ما k سطر (تعداد وسایل نقلیه) و N ستون (تعداد مشتریان) کدگذاری شده است. هر عنصر ماتریس، اطلاعات مربوط به توالی ملاقات مشتری را نشان می‌دهد. بنابراین از روی جواب‌ها می‌توان مسیرها را به‌دست آورد. به‌طور مثال در شکل۱ که مربوط به ۱۰ مشتری و سه وسیله‌ی نقلیه است، می‌توان سه مسیر به شرح ۰−۱−۵−۷−۰ و ۰−۱۰−۹−۶−۸−۰ و ۰−۴−۳−۲−۰ به‌دست آورد که ۰ نشان دهنده انبار است.

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

شکل ۱. ماتریس نمایش جواب‌های مساله

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

۳-٤ روش تولید جواب‌های متنوع اولیه (جمعیت اولیه)

همان‌طور که می‌دانیم کیفیت جواب‌های نهایی به‌دست آمده از روش‌های فراابتکاری بستگی مستقیم به کیفیت جواب‌های اولیه‌ی تولید شده دارد. اولین گام در هر رویکرد فراابتکاری، تولید جواب یا جمعیت اولیه می‌باشد. جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود. مجموعه جواب‌های اولیه‌ی SS معمولاً یک مجموعه‌ی متنوع از جواب‌ها است. به‌عبارت دیگر هدف این روش، تولید مجموعه‌ای تصادفی از جواب‌های متمایز به اندازه‌ی npop است. روش‌های ابتکاری متعددی برای حل مساله‌ی مسیریابی ارایه شده است که می‌توانند برای ایجاد جمعیت اولیه استفاده شود. برای حفظ تنوع جمعیت ایجاد شده، الگوریتمی که در این مقاله برای تولید جمعیت اولیه مورد استفاده قرار گرفته، شامل مراحل زیر است:

۱. یک وسیله‌ی نقلیه را که هنوز استفاده نشده است انتخاب کنید.
۲. یک مشتری را به‌صورت تصادفی انتخاب و آن را به وسیله‌ی نقلیه انتخاب شده تخصیص دهید و این کار را تا زمانی که ظرفیت وسیله‌ی نقلیه تجاوز نکرده است، ادامه دهید. در صورت تکمیل ظرفیت وسیله‌ی نقلیه به قدم ۱ بازگردید.

با تکرار پروسه‌ی بالا (به تعداد npop بار) می‌توان مجموعه جواب آزمایشی npop را تولید کرد. در اینجا به دلیل رعایت محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه، همه‌ی جواب‌های تولید شده موجه است.

وقتی مسیرها تعیین شود، y_{ijk} که متغیر بار وسیله‌ی نقلیه است مشخص خواهد شد. لازم به ذکر است انتخاب تصادفی نقطه‌ی شروع می‌تواند باعث تقویت تنوع جواب ها شود.

۳-۵ روش بهبود جواب‌های اولیه‌ی تولید شده

در این قسمت، یک روش بهبود هنده بر روی هر یک از جواب‌های تولید شده در مرحله‌ی قبل در راستای افزایش کیفیت جواب‌ها اعمال می‌گردد. در این روش، یک جواب جدید را به یک یا چندین جواب بهتر (در همسایگی آن) در صورت وجود تبدیل می‌کنیم. این روش بر اساس جستجوی محلی و حرکات پایه‌ای شکل گرفته است.

در الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از جابه‌جایی و تعویض برای ایجاد همسایگی برای بهبود جواب‌ها به‌کار گرفته شده است.

۳-۵-۱ جستجوی محلی تعویض یا تغییر جفتی

این عملگر همانند عملگر جهش دو نقطه‌ای در الگوریتم ژنتیک است. بدین صورت که جواب آزمایشی جدید تولید شده به وسیله‌ی روش ایجاد تنوع، مکرراً با تغییر جفتی (تعویض دو مشتری در یک یا دو مسیر) بهبود می‌یابد. به عبارت دیگر در این روش، ابتدا دو مشتری (گره) در داخل یک تور انتخاب می‌شود، سپس ترتیب عبوری وسیله‌ی نقلیه در آن دو گره با یکدیگر تعویض می‌گردد. اگر این تعویض، هزینه‌ی تور را کاهش دهد، آن‌را انتخاب و در غیر این‌صورت، دو گره دیگر را انتخاب می‌کنیم و سپس مسیر آن‌ها را با یکدیگر تعویض

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

نماییم. این کار برای تمامی گره‌های موجود در تور انجام و هر تعویضی که بیشترین کاهش هزینه را داشت انتخاب می‌گردد.

۳-۵-۲ جستجوی محلی جابه‌جایی یا جاگذاری

در این عملگر هر کاراکتر یا ژن از موقعیت فعلی توالی مسیر حذف می‌شود و به موقعیت دیگر آن می‌رود. با به‌کارگیری عملگر جابه‌جایی، امکان جابه‌جایی محل قرارگیری یک مشتری در یک مسیر یا قرار گرفتن مشتری در محلی در مسیر دیگر وجود دارد.

هر جواب آزمایشی با جستجوهای محلی بیان شده در بالا به صورت جداگانه و همزمان جواب را بهبود می‌دهد. از بین تمام ترکیبات به وجود آمده از جستجوی محلی تعویض و جابه‌جایی، جوابی که بتواند جواب اصلی را مغلوب کند، جایگزین آن می‌شود.

در این تحقیق هر جستجوی محلی، جواب آزمایشی را با مکانیزم زیر بهبود می‌دهد:

۱. شروع
۲. برای ۱ تا تعداد تکرار جستجوی محلی
۳. از جستجوی محلی ذکر شده، روی جواب آزمایشی فعلی (a) استفاده کن.
۴. اگر جواب جدید (b) جواب فعلی (a) را مغلوب کند، جواب (b) باید جایگزین جواب فعلی (a) شود.
۵. اگر جواب فعلی (a) جواب جدید (b) را مغلوب کند، جواب فعلی (a) بدون تغییر باقی می‌ماند.
۶. اگر هیچ یک از جواب‌های a و b نتواند یکدیگر را مغلوب کند، جواب با فاصله‌ی ازدحام بزرگتر انتخاب می‌شود.
۷. پایان حلقه‌ی تکرار

همان‌طور که ذکر شد در این تحقیق از مفهوم فاصله‌ی ازدحام برای اندازه‌گیری مقدار چگالی هر جواب استفاده می شود. این مقدار برابر قدرمطلق فاصله‌ی مقدار هر هدف از دو جواب مجاور آن است.

۳-۶ روش ایجاد و به روزرسانی مجموعه‌ی مرجع

الگوریتم جستجوی پراکنده با ایجاد یک مجموعه‌ی مرجع اولیه‌ی Ref_Set با اندازه‌ی b شروع می‌شود. مجموعه‌ی مرجع معمولاً شامل b1 جواب از بهترین جواب‌های جمعیت P که به وسیله‌ی اندازه‌گیری مقدار هریک از توابع هدف به‌دست آمده است و b2 جواب از جواب‌های متمایز و متنوع جمعیت P تشکیل می‌شود. جواب‌های داخل مجموعه‌ی مرجع به ترتیب کیفیت آن‌ها مرتب می‌شود، به‌طوری‌که بهترین جواب‌ها در ابتدای لیست قرار می‌گیرد.

۳-۶-۱ ساخت مجموعه‌ی مرجع اولیه

برای ایجاد مجموعه‌ی مرجع برای بار اول، کل Refset از جواب‌های نامغلوب و با کیفیت خوب و نیز جواب‌های

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

با ماکزیمم فاصله‌ی ازدحام انتخاب می‌شود. زیرمجموعه‌ی Refset1 دارای b1 عضو از با کیفیت‌ترین جواب‌های بهبودیافته است. برای تشکیل مجموعه‌ی مرجع، ابتدا زیرمجموعه‌ی Refset1 تشکیل می‌گردد. بدین منظور از آرشیو پارتو، حداکثر b1 جواب غالب غیرتکراری که دارای بیشترین پراکندگی است، انتخاب و به زیر Refset1 اضافه می‌شود. اگر تعداد جواب‌های موجود در آرشیو کمتر از b1 باشد، بقیه‌ی مجموعه از بین بهترین جواب‌های موجود در جمعیت جواب‌ها، انتخاب خواهد شد. برای تشکیل زیرمجموعه‌ی Refset2 ، b2 جواب غیرتکراری از بین جواب‌های موجود که در Refset1 نیست و بیشترین فاصله‌ی اقلیدسی را با جواب‌های Refset1 دارد، انتخاب شده، به Refset2 وارد می‌شود. لازم به ذکر است که فاصله‌ی اقلیدسی، پراکندگی بین دو زیر مجموعه را تضمین می‌کند[۱۸].

۳-۶-۲ به روزکردن مجموعه‌ی مرجع

به روزکردن Reset از جواب‌های جدید تولید شده به‌وسیله‌ی روش ترکیب و روش بهبود شروع می‌شود. به‌عبارت دیگر بعد از عملیات ترکیب جواب‌ها و بهبود جواب‌ها بر روی جواب‌های مجموعه‌ی مرجع، مجموعه‌ی مرجع به‌هنگام می‌شود. پروسه‌ی استاتیکی را جهت به‌روزرسانی مجموعه‌ی مرجع انتخاب می‌کنیم. بدین صورت که بهترین جواب‌های آزمایشی بر حسب هر تابع هدف با جواب‌های قبلی Refset1 مقایسه می‌شوند. یعنی اگر جواب‌های آزمایشی تولید شده بهتر از جواب‌های فعلی Refset1 باشد، آنگاه Refset1 با جواب‌های جدید به هنگام می‌شود. باقیمانده‌ی جواب‌های Refset1 با جواب‌های آرشیو با بیشترین مقدار فاصله‌ی ازدحام پر می‌شود [۱۹].

۳-۷ روش تولید زیر مجموعه

روش تولید زیر مجموعه، پایه و اساس ساخت جواب‌های جدید در SS است. در این روش، زیر مجموعه‌ای از جواب‌های مجموعه‌ی مرجع برای تولید جواب‌های جدید، کاربرد دارد. با استفاده از این روش، زیر مجموعه‌هایی از جواب‌های مجموعه‌ی مرجع به‌منظور استفاده در روش ترکیب جواب‌ها و برای تولید جواب‌های جدید، تشکیل خواهد شد. جواب‌های حاصل از این فرآیند برای به روز رسانی مجموعه‌ی مرجع و نیز آرشیو پارتو استفاده می‌شود. این فرایند مشابه مکانیزم انتخاب در الگوریتم ژنتیک است. با این تفاوت که این فرایند در SS، قطعی است در حالی‌که در الگوریتم ژنتیک، مکانیزم انتخاب احتمالی است. به‌علاوه اندازه‌ی مجموعه‌ی مرجع در SS بسیار کوچک‌تر از اندازه‌ی جمعیت در الگوریتم ژنتیک است. ما در الگوریتم پیشنهادی خود از رایج‌ترین استراتژی موجود که زیر مجموعه‌های دو تایی (جفتی) از مجموعه‌ی مرجع است استفاده کردیم.

در این روش باید از تولید زیر مجموعه ای از جواب‌های تکراری خودداری کرد. آزمایشات نشان می دهد تولید ترکیبی از جواب‌های دو زیر مجموعه‌ی Refset1 و Refset2 از مجموعه‌ی مرجع همگرایی را ضعیف و تعداد نسل ها را افزایش می دهد.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

۳-۸ روش ترکیب زیر مجموعه های منتخب

از روش ترکیب جواب‌ها، برای تولید جواب‌های جدید با استفاده از زیر مجموعه‌ها استفاده می‌کنیم. ایده‌ی این استراتژی، پیدا کردن یک ترکیب خطی از جواب‌های مجموعه‌ی مرجع است؛ اما این ایده در مسایل بهینه‌یابی چندهدفه کارایی چندانی ندارد. پس در این تحقیق از یک عملگر به نام OX برای ترکیب جواب‌های موجود در زیر مجموعه‌ها استفاده شده است. این عملگر دو جواب از یک زیر مجموعه‌ی منتخب را با هم ترکیب و دو جواب جدید به‌دست می آورد. چگونگی پیاده سازی این عملگر در مثال زیر شرح داده شده است [۱۴].
فرض کنید زیر مجموعه شامل دو جواب زیر باشد:

trial solution 1 :	۱	۴	۷	۲	۳	۵	۹	۸	۶
trial solution 2 :	۳	۹	۵	۲	۴	۶	۱	۷	۸

دو نقطه‌ی تقاطع تصادفی انتخاب می‌شود. جواب‌های جدید از شیفت چرخشی کاراکترها به سمت راست، به‌طوری‌که همه کاراکترهای بعد از دومین نقطه‌ی تقاطع، در ابتدای جواب قرار گیرد، به‌دست می‌آید.

New trial solution 1 :	۹	۸	۶	۱	۴	۷	۲	۳	۵
New trial solution 2 :	۱	۷	۸	۳	۹	۵	۲	۴	۶

در هر یک از جواب‌های جدید به‌دست آمده، کاراکترهایی که بین نقاط تقاطع جواب اولیه‌ی دیگر است، حذف می شود. جواب‌های جدید به صورت زیر در می‌آید:

New trial solution 1 :	۹	۸	۱	۷	۳	۵
New trial solution 2 :	۱	۷	۸	۹	۴	۶

سپس جواب‌های نهایی از توالی کاراکترهای بین نقاط تقاطع جواب اولیه و کاراکترهای باقیمانده‌ی جواب جدید دیگر، ساخته می‌شود.

New trial solution 1 :	۹	۸	۱	۲	۴	۶	۷	۳	۵
New trial solution 2 :	۱	۷	۸	۲	۳	۵	۹	۴	۶

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

پس از ترکیب جواب‌های موجود در زیرمجموعه‌ها و ساختن جواب‌های جدید، جمعیت جدیدی از جواب‌ها از بین جواب‌های زیر مجموعه‌ها و جواب‌های ساخته شده با روش مرتب کردن جواب‌های غالب با درنظرگرفتن معیار پراکندگی ساخته خواهد شد.

۳-۹ شاخص های مقایسه

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه دو دسته شاخص وجود دارد: ۱) شاخص‌های همگرایی ۲) شاخص‌های پراکندگی. برخی از معیارهای دسته‌ی اول عبارت است از: معیار تعداد جواب‌های پارتوی به‌دست آمده (یا تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت شده)، معیار فاصله از جواب ایده‌آل، معیار پوشش مجموعه‌ها. معیارهای مربوط به دسته‌ی دوم عبارت است از: معیار فاصله‌گذاری، معیار تنوع، معیار بیشترین گسترش. در این مقاله برای انجام مقایسه، از شاخص‌های زیر که ترکیبی از شاخص‌های هر دو دسته‌ی اصلی می‌باشد، استفاده شده است. هم‌چنین معیار زمان اجرای الگوریتم برای مقایسه‌ی نیازمندی‌های محاسباتی در نظر گرفته شده است.

۳-۹-۱ معیار فاصله‌گذاری

این معیار که اسکات آن را ارایه کرد، یکنواختی توزیع جواب‌های مغلوب به‌دست آمده را در فضای جواب مورد آزمایش قرار می‌دهد. به‌عبارت دیگر این معیار میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌کند:

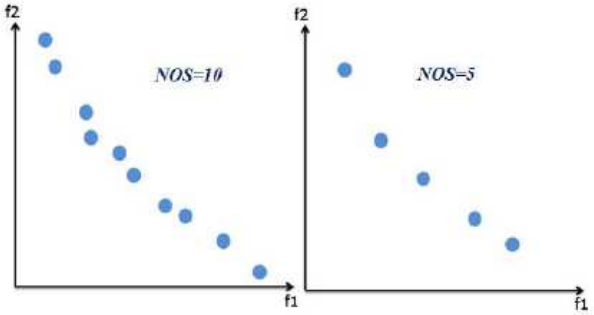
$$s = \sqrt{\frac{۱}{n-۱}\sum_{i=۱}^{n}(d_i - \bar{d})^۲} \qquad (۱۶)$$

که در آن d_i نشان‌دهنده‌ی فاصله اقلیدسی بین هر یک از جواب‌های مغلوب یافت شده نسبت به نزدیک‌ترین جواب غیرمغلوب موجود در مرز بهینه می‌باشد. به عبارت دیگر فاصله‌ی اندازه‌گیری شده برابر با کمترین مقدار مجموع قدرمطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین i امین جواب و جواب‌های واقع در مجموعه نامغلوب نهایی است.

۳-۹-۲ معیار تعداد جواب‌های پارتوی (غیر مغلوب) به‌دست آمده

مقدار معیار NOS یا شاخص کیفیت، نشان‌دهنده‌ی تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو است که در هرالگوریتم می‌توان یافت. بر اساس این شاخص، الگوریتمی از کیفیت بالاتر برخوردار است که بتواند به تعداد بیشتری از جواب‌های پارتو دسترسی پیدا کند.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]



شکل ۲. تعداد جواب‌های پارتو در مباحث چند هدفه

۳-۹-۳ معیار زمان اجرای الگوریتم

زمان اجرای الگوریتم را نیز به عنوان معیار ارزیابی کیفیت در نظر می‌گیریم.

۳-۹-٤ معیار تنوع یا پراکندگی

این شاخص، برای تعیین میزان پراکندگی جواب‌های غیرمغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه، استفاده می‌گردد و فرمول آن به صورت زیر است:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \max(\left\| x_i^{'} - y_i^{'} \right\|)} \qquad (۱۷)$$

در این رابطه $\left\| x_i^{'} - y_i^{'} \right\|$، فاصله‌ی اقلیدسی بین دو جواب غیرمغلوب مجاور $y_i^{'}$ و $x_i^{'}$ بر روی مرز بهینه است. این معیار هرچه بیشتر باشد دلیل آن است که جواب‌های یکسان کمتری وجود دارد و تنوع بیشتری در بین جواب‌ها به چشم می خورد.

٤ تجزیه و تحلیل پارامترها و نتایج محاسباتی

ما در این قسمت عملکرد الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی پیشنهادی را بررسی کردیم. برنامه الگوریتم پیشنهادی را در نرم‌افزار Matlab10 کدنویسی کردیم و همه‌ی اجراها را با کامپیوتر دو هسته‌ای با توانایی ۲/۳ گیگاهرتز با حافظه‌ی داخلی (RAM) ۲ گیگابایت در سیستم عملیات xp ویندوز میکروسافت انجام دادیم.

٤-۱ معرفی مسایل آزمایشی

ما در این مقاله از نمونه مسایل CVRP برای تست الگوریتم پیشنهادی استفاده کردیم. دریافت مسایل نمونه از مسیر زیر امکان‌پذیر است:

http://www.neo.lcc.uma.es/radi-aeb/webVRP/ problem_instances.html

این مساله‌های آزمایشی از اندازه‌ی ۳۲ مشتری تا اندازه‌ی ۱۹۹ مشتری به‌دست آمده است و ظرفیت وسیله‌ی نقلیه متفاوت است. اطلاعات مفصل این مسایل آزمایشی را در جدول ۲ مشاهده می‌کنید.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول ۲. معرفی مسایل آزمایشی

شماره	مساله نمونه	تعداد وسایل نقلیه	تعداد مشتریان	ظرفیت وسایل نقلیه
P1	P-n60-k15	۱۵	۵۹	۸۰
P2	P-n76-k5	۵	۷۵	۲۸۰
P3	P-n101-k4	۵	۱۰۰	۴۰۰
P4	P-n70-k10	۱۰	۶۹	۱۳۵
P5	P-n65-k10	۱۰	۶۴	۱۳۰
P6	E-n101-k8	۸	۱۰۰	۲۰۰
P7	E-n101-k14	۱۴	۱۰۰	۱۱۲
P8	E-n76-k14	۱۴	۷۵	۱۰۰
P9	E-n76-k10	۱۰	۷۵	۱۸۰
P10	E-n76-k8	۸	۷۵	۱۸۰
P11	E-n76-k7	۷	۷۵	۲۲۰
P12	E-n33-k4	۴	۳۲	۸۰۰۰
P13	M-n200-k17	۱۷	۱۹۹	۲۰۰
P14	M-n151-k12	۱۲	۱۵۰	۲۰۰
P15	M-n101-k10	۱۰	۱۰۰	۲۰۰
P16	M-n200-k19	۱۹	۱۹۹	۱۸۰
P17	M-n121-k7	۷	۱۲۰	۲۰۰
P18	F-n135-k7	۷	۱۳۴	۲۲۱۰
P19	F-n72-k4	۴	۷۱	۳۰۰۰۰
P20	F-n45-k4	۴	۴۴	۲۰۱۰

٤-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم‌های فراابتکاری معمولا روی پارامترهای خود حساس هستند و کیفیت جواب‌های ارایه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترهای آن بستگی دارد؛ لذا یکی از مهمترین مسایل در الگوریتم‌های فراابتکاری، تنظیم پارامترهای الگوریتم است. در این مقاله برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ارایه شده، ترکیب‌های مختلف متشکل از مقادیر متفاوت برای هر پارامتر بر روی یکی از مسایل آزمایشی به نام M-n200-k19 بررسی شد و سپس مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم انتخاب گردید. در این مقاله برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. برای روش MOSS، سه فاکتور تعداد جمعیت اولیه (npop)، تعداد اعضای مجموعه‌ی مرجع و تعداد تکرارها (max_it) در نظر گرفته شده است. نیز معیار تعداد جواب‌های پارتوی (غیرمغلوب) یافت شده به عنوان معیار پاسخ و هم‌چنین برای هر فاکتور دو سطح به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

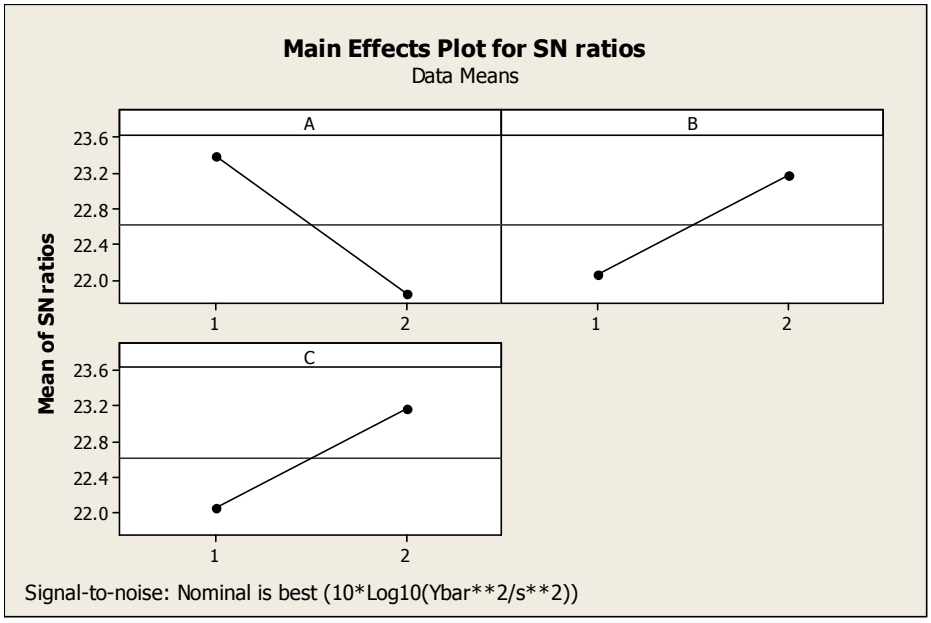
- تعداد جمعیت اولیه: ۸۰ و ۱۲۰
- تعداد اعضای مجموعه‌ی مرجع: ۱۰ و ۱۵
- تعداد تکرارها: ۲۰ و ۵۰

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

در روش تاگوچی از معیار (S/N) استفاده می‌شود. این معیار مقدار تغییرات رخ داده در متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. برای هر فاکتور، مقدار سطحی بهینه و مناسب است که مقدار معیار (S/N) آن بیشتر باشد. پس باتوجه به شکل بهترین مقادیر برای پارامترهای در نظر گرفته شده الگوریتم پیشنهادی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم MOSS

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	تعداد جمعیت اولیه	۸۰
۲	تعداد اعضای مجموعه مرجع	۱۵
۳	تعداد تکرارها	۵۰



شکل ۳. نرخ S/N برای ضرایب الگوریتم MOSS

از طرفی پارامترهای مدل در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ٤. پارامترهای مدل

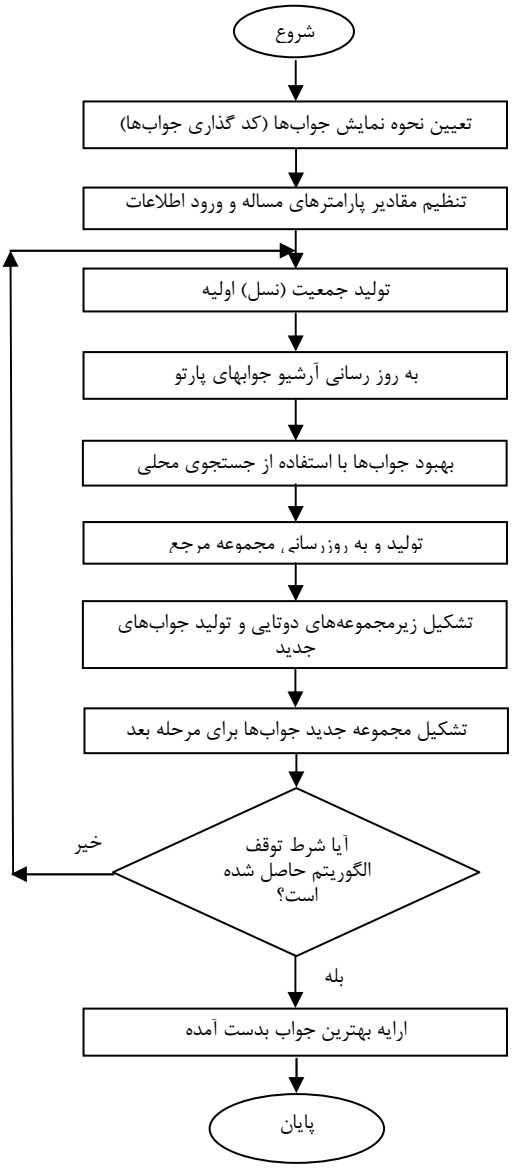
ردیف	پارامتر	مقدار
۱	Cd	۱/۵
۲	Cg	۰/۲
۳	Cv	۱۰۰

٤-۳ مقایسه‌ی کارایی الگوریتم پیشنهادی با برخی الگوریتم‌ها

در این قسمت برای بررسی قابلیت الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی چندهدفه‌ی پیشنهادی، نتایج محاسباتی ناشی از حل مدل در مسایل با ابعاد بزرگ نشان داده خواهد شد. برای نشان دادن کارایی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی،

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

نتایج حاصل از آنرا با دو الگوریتم MODE و MOPSO مقایسه کردیم. نتایج مقایسه را در جدول ۵ مشاهده می کنید.



شکل ٤. فلوچارت الگوریتم جستجوی پراکنده‌ی چندهدفه

٤-٤ تحلیل واریانس ارزیابی کیفیت الگوریتم‌ها

برای بررسی مطلوب‌تر الگوریتم‌ها، به مقایسه‌ی الگوریتم‌ها به کمک تحلیل‌های آماری نیاز است. در این قسمت از تکنیک آزمون فرض برابری میانگین دو جامعه‌ی دوطرفه استفاده شده است. به‌طوری‌که فرض صفر را برابری میانگین‌های معیار ارزیابی در دو الگوریتم با سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفتیم. اگر P-Value به‌دست آمده کوچک‌تر از ۰/۵ به‌دست آید، فرض صفر رد شده و نتیجه می‌گیریم تفاوت معناداری بین معیارهای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم وجود دارد و برعکس اگر P-Value به‌دست آمده بزرگتر از ۰/۵ به‌دست آید، فرض صفر

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

قبول شده و نتیجه می‌گیریم تفاوت معناداری بین معیارهای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم وجود ندارد. در اینجا پس از اینکه ۲۰ مثال ارایه شده در بخش‌های قبلی با الگوریتم‌های MOSS، MODE و MOPSO حل گردید، تحلیل واریانس به‌وسیله‌ی نرم‌افزار SPSS انجام شد و به اجرای آزمون‌های فرض مقایسه‌ی شاخص‌های تعداد جواب‌های پارتوی به‌دست آمده، تنوع و فاصله‌گذاری برای مقایسه‌ی نتایج MOSS و MODE و مقایسه‌ی نتایج MOSS و MOPSO اقدام کردیم که نتایج به شرح زیر می‌باشد:

الف- آزمون برابری میانگین برای دو روش MOSS و MODE

جدول ٦. آزمون برابری میانگین برای دو روش MOSS و MODE

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means	
		F	Sig.	Sig. (2-tailed)	Mean Difference
N_pareto	Equal variances assumed	۰/۶۶	۰/۴۴۲	۰/۰۱	۴/۰۵
	Equal variances not assumed			۰/۰۱	۴/۰۵
Spacing	Equal variances assumed	۰/۱۱۱	۰/۷۴۱	۰/۹۶۶	-۰/۰۰۵
	Equal variances not assumed			۰/۹۶۶	-۰/۰۰۵
Diversity	Equal variances assumed	۰/۰۳۲	۰/۸۵۹	۰/۸۹۲	۲۱/۸۴۹
	Equal variances not assumed			۰/۸۹۲	۲۱/۸۴۹

در جدول ۶، ستون پنجم نشان‌دهنده‌ی مقدار p-value می‌باشد. از طرفی برای هر یک از سه معیار، دو مقدار p-value محاسبه شده است. اولی زمانی استفاده می‌شود که انحراف معیار مورد نظر برای هر دو جامعه برابر باشد، در غیراین‌صورت باید از مقدار p-value دوم استفاده کرد. همان‌طور که از پنجم و ششم مشخص است در سطح اطمینان ۵ درصد، فرض برابری میانگین تنوع الگوریتم‌ها رد می‌شود؛ زیرا مقدار p-value برای این مقدار برابر ۰/۰۳۲ و کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. (انحراف معیار دو جامعه اختلاف فراوان با یکدیگر داشته در نتیجه از مقدار دوم استفاده شده است) هم‌چنین در سطح اطمینان ۵ درصد، فرض برابری میانگین تعداد جواب‌های پارتو و فاصله‌گذاری الگوریتم‌ها قبول می‌شود. حال با توجه به نتایج ستون پنجم و مقادیر p-value به‌دست آمده مشاهده می‌شود، در سطح اطمینان ۵ درصد اختلاف معناداری از نظر شاخص تعداد جواب‌های پارتو دو الگوریتم وجود دارد و هم‌چنین به عبارت دیگر در سطح اطمینان ۵ درصد اختلاف معناداری از نظر شاخص‌های فاصله‌گذاری و تنوع بین دو الگوریتم وجود ندارد. از طرفی باتوجه به اینکه در جدول اول میانگین تعداد جواب‌های پارتوی به‌دست آمده‌ی الگوریتم MOSS بیشتر از الگوریتم MODE است؛ پس در این معیار، الگوریتم MOSS نسبت به الگوریتم MODE ارجحیت دارد.

ب- آزمون برابری میانگین برای دو روش MOSS و MOPSO

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول ۷. آزمون برابری میانگین برای دو روش MOSS و MOPSO

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means	
		F	Sig.	Sig. (2-tailed)	Mean Difference
N_pareto	Equal variances assumed	۰/۶۴۹	۰/۴۲۵	۰/۰۷۳	۳/۱۵
	Equal variances not assumed			۰/۰۷۳	۳/۱۵
Spacing	Equal variances assumed	۰/۴۰۳	۰/۵۲۹	۰/۹۴۹	۰/۰۰۸۵۵
	Equal variances not assumed			۰/۹۴۹	۰/۰۰۸۵۵
Diversity	Equal variances assumed	۰/۴۴۲	۰/۵۱۰	۰/۷۰۹	۵۵/۷۳۸
	Equal variances not assumed	۰/۶۴۹	۰/۴۲۵	۰/۷۰۹	۵۵/۷۳۸

همان‌طور که از جدول ۷ مشخص می‌باشد در سطح اطمینان ۵ درصد، فرض برابری هر سه شاخص الگوریتم‌ها پذیرفته می‌شود؛ زیرا مقدار p-value برای هر یک، از ۰/۰۵ بیشتر است. (انحراف معیار دو جامعه اختلاف فراوان با یکدیگر نداشته در نتیجه از مقدار اول استفاده شده است). حال با توجه به نتایج ستون پنجم و مقادیر p-value به‌دست آمده مشاهده می‌شود، در سطح اطمینان ۵ درصد اختلاف معناداری از نظر هر سه شاخص بین دو الگوریتم وجود دارد. از طرفی باتوجه به اینکه در ستون ششم میانگین تعداد جواب‌های پارتو و تنوع به‌دست آمده‌ی الگوریتم MOSS بیشتر از الگوریتم MOPSO است؛ لذا در این دو معیار، الگوریتم MOSS نسبت به الگوریتم MOPSO ارجحیت دارد. برعکس در معیار فاصله گذاری، الگوریتم MOPSO نسبت به الگوریتم MOSS ارجحیت دارد.

۵ جمع بندی و پیشنهادات

در این مقاله، یک مدل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی دوهدفه شامل حداقل کردن عدم توازن در فواصل سفر وسایل نقلیه‌ی مورد استفاده بوده، هم‌چنین حداقل نمودن عدم توازن در بارهای تخصیص یافته به وسایل نقلیه مورد استفاده ارایه گردید. با توجه به هزینه‌ی بارگیری در تابع هدف به فرمول جدیدی از مساله مسیریابی وسیله‌ی نقلیه دست یافتیم و بار وسیله‌ی نقلیه برای هر مشتری در یک سفر را متغیر به حساب آوردیم. برای حل مدل ارایه شده یک الگوریتم بهبودیافته‌ی جستجوی پراکنده را ارایه دادیم. برای بررسی توانایی‌های الگوریتم مسایل مختلفی حل شد و نتایج را با نتایج حاصل از الگوریتم‌های MODE و MOPSO مقایسه کردیم. در مثال‌های نمونه، در اکثر شاخص‌ها مشخص شد الگوریتم پیشنهادی MOSS نسبت به الگوریتم‌های MODE و MOPSO دارای قابلیت بالاتری برای حل مسایل است. هرچند که در شاخص زمان، الگوریتم پیشنهادی دارای ارجحیت نیست.

در انتها برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود برای هرچه کاربردی تر شدن این موضوع، با استفاده از گسترش‌های VRP، ملاحظاتی مانند پنجره‌ی زمانی، چند دوره ای بودن، دریافت و تحویل همزمان و موارد مشابه به موضوع مسیریابی این تحقیق اضافه شود. هم‌چنین توسعه‌ی الگوریتم‌های بهبود دهنده برای این موضوع به کمک روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و حل این مساله با سایر روش‌های فراابتکاری برای مقایسه‌ی الگوریتم

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

پیشنهادی نیز می‌تواند موضوعات مناسبی پیش روی محققان باشد.

جدول ۵. مقایسه کارایی الگوریتم MOSS با دو الگوریتم MODE و MOPSO

شماره	مساله نمونه	شاخص فاصله‌گذاری (Spacing)			شاخص تعداد جواب‌های پارتو (غیر مغلوب)			شاخص تنوع یا پراکندگی		
		MODE	MOPSO	MOSS	MODE	MOPSO	MOSS	MODE	MOPSO	MOSS
P1	P-n60-k15	۰/۶۵	۰/۶	۱/۹۷	۱۵	۱۶	۱۲	۹۰/۷۷	۱۲۷/۸۷	۶۳۸/۲۸
P2	P-n76-k5	۱/۲۲	۰/۹۵۶	۱/۰۶	۸	۵	۱۲	۶۷/۸۸	۵۲/۵۸	۱۲۲/۸۲
P3	P-n101-k4	۰/۷۳	۰/۹۶	۱/۱۱	۱۱	۱۵	۱۵	۲۲۱/۱۶	۳۱۴/۸۹	۱۴۳/۱
P4	P-n70-k10	۱/۹۸	۱/۹۴	۱/۹۴	۹	۷	۱۴	۶۰۲/۳۹	۶۴۷/۵۲	۸۲۰/۱۶
P5	P-n65-k10	۰/۹۵	۱/۳۵	۰/۷	۸	۹	۱۱	۷۱/۴۳	۱۰۲/۴۹	۱۰۳/۶۷
P6	E-n101-k8	۱/۰۶	۰/۷۵	۰/۸۱	۹	۱۳	۱۵	۳۲۲/۰۴	۴۴۲/۵۴	۲۰۰/۶۹
P7	E-n101-k14	۰/۸۵	۱/۲۱	۰/۵۹	۹	۸	۱۲	۶۰/۸۳	۱۲۱/۷۷	۱۳۱/۶۴
P8	E-n76-k14	۰/۴۶	۰/۶۲	۱/۰۲	۷	۷	۱۸	۴۲/۵۵	۶۶	۹۸/۵۳
P9	E-n76-k10	۱/۱	۰/۸۷	۰/۶۳	۱۶	۱۹	۱۸	۲۵۴/۴۱	۳۰۵/۹۱	۲۸۱/۲۵
P10	E-n76-k8	۱/۱۸	۰/۹۴	۰/۸۵	۱۲	۱۹	۱۶	۲۳۵/۰۳	۴۴۳/۲۵	۱۰۸/۱۳
P11	E-n76-k7	۰/۹۸	۱/۹۷	۰/۸۶	۶	۷	۱۲	۲۶	۳۴۹/۲۶	۱۸۷/۶۷
P12	E-n33-k4	۰/۹۲	۰/۷۲۸	۰/۹۹	۱۴	۱۵	۱۲	۶۰۴/۰۴	۲۳۵/۲	۶۲۲/۰۶
P13	M-n200-k17	۰/۸۶	۰/۷۵	۱/۱۱	۱۰	۹	۱۳	۱۲۹/۶۵	۱۷۱/۰۶	۲۱۰/۹۳
P14	M-n151-k12	۰/۹۴	۰/۷۶۶	۰/۵۴	۹	۸	۱۶	۱۱۷/۵۵	۱۳۲/۸۲	۲۲۳/۵۲
P15	M-n101-k10	۰/۷۸	۰/۱۸	۰/۵۵	۴	۳	۴	۴۳/۵۵	۳۳/۳	۷۰/۸۴
P16	M-n200-k19	۱/۰۸	۰/۵۴	۰/۷۵	۱۰	۹	۱۲	۱۰۴/۷۱	۱۷۲/۴	۱۹۵/۴۶
P17	M-n121-k7	۰/۳۹	۰/۹۵	۰/۹	۶	۶	۷	۴۵/۸۸	۱۱۹/۸	۹۴/۰۱
P18	F-n135-k7	۰/۶۳	۰/۷۹۹	۱/۰۱	۱۳	۱۸	۳۲	۶۰۲/۵۷	۸۲۸/۶۱	۱۰۸۵/۰۲
P19	F-n72-k4	۱/۱۹	۱.۲۹	۰/۶۹	۱۶	۱۳	۱۶	۱۵۸۱/۹۶	۱۵۵۴/۹۳	۱۶۱۰/۲۶
P20	F-n45-k4	۱/۱۴	۰/۵۵	۰/۹۱	۱۵	۱۹	۲۱	۵۲۰/۱۴	۷۰۲/۱	۵۲۴/۷۸

منابع

[۵] دره میرکی، م.، (۱۳۹۱). الگوریتم ابتکاری جدید برای حل مساله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه. مجله‌ی تحقیق در عملیات درکاربردهای آن، ۹(۴)، ۷-۱.

[1] Dantzig, G. B., Ramser, J. H., (1959). The truck dispatching problem. Management Science, 6(1), 80–91.

[2] Clarke, G., Wright, J. W., (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research, 12(4), 568–581.

[3] Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., Vigo, D., (2007). Vehicle routing. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), Transportation, handbooks in operations research and management science, Amsterdam: Elsevier, 367–428.

[4] Cordeau, J. F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., Sormany, J. S., (2005). New heuristics for the vehicle routing problem. In A. Langevin & D. Riopel (Eds.), Logistics systems: Design and optimization, New York: Springer, 279–297.

[6] Alabas-Uslu, C., Dengiz, B., (2011). A self-adaptive local search algorithm for the classical vehicle routing problem. Expert Systems with Applications, 38(7), 8990–8998.

[7] Alba, E., Dorronso, B., (2006). Computing nine new best-so-far solutions for capacitated VRP with a cellular genetic algorithm. Information Processing Letters, 98(6), 225–230.

[8] Diaz. J.A., Fernandez. E., (2006). Hybrid Scatter Search and Path Relinking for the Capacitated p-Median Problem. European Journal of Operational Research, 169, 570-585.

[9] Cotta, C., (2006). Scatter Search with Path Reliking for Phylogenetic Inference. European Journal of Operational Research, 169, 520-539.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[10] Brando, J., (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. European Journal of Operational Research, 195(3), 716–728.
[11] Chu, C. W., (2005). A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. European Journal of Operational Research, 165(3), 657–667.
[12] Doerner, K. F., Hartl, R. F., Benkner, S., Lucka, M., (2006). Parallel cooperative Savings based Ant colony optimization – Multiple search and decomposition approaches. Parallel Processing Letters, 16, 351–369.
[13] Tang, J., Zhang, J., Pan, Z., (2010). A scatter search algorithm for solving vehicle routing problem with loading cost. Expert Systems with Applications, 37 4073–4083.
[14] Kirkpatrick, S., Gelatt, C., (1983). Optimisation by simulated annealing. Science, 20,671–680.
[15] Baños, R.,Ortega, J.,Gil, C., Márquez, A.,de Toro, F., (2013). A hybrid meta-heuristic for multi-objective vehicle routing problems with time windows, Computers & Industrial Engineering, 269–287.
[16] Corbern, A., Fernndez, E., Laguna, M., Marti, R., (2002). Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives. Journal of the Operational Research Society, 53(4), 427–435.
[17] Glover, F., (1998). A Template for Scatter Search and Path Relinking, Lecture Notes in Computer Science, J. K. Hao, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer and D.Snyers (Eds.), Springer, 13-54.
[18] Silva, C. G., Climaco, J., Figueira, J., (2006). A Scatter Search Method for bi-Criteria {0,1}-Knapsack Problems. European Journal of Operational Research, 169, 373–391.
[19] Beausoleil, R. P., (2006). Multiobjective Scatter Search Applied to Nonlinear Multiple Criteria Optimization", European Journal of Operational Research, 169(2), 426-449.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]