حل مسأله مسیریابی وسائط نقلیه ناهمگن چندقرارگاهی با پنجره زمانی توسط الگوریتم تکامل دیفرانسیلی چند هدفه: مطالعه موردی

شقایق مسعودی (مسئول مکاتبات)، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

حسن جوانشیر، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده مهندسی صنایع، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و گروه پژوهشی بهینه سازی مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: shaqayeq.masoudi@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۱۰

چکیده:

مسأله مسیریابی وسائط نقلیه چندقرارگاهی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و وسائط نقلیه متفاوت[1] یکی از انواع مسایل مسیریابی وسائط نقلیه[2] است. وسائط نقلیه دارای ظرفیتهای متفاوتی هستند و به قرارگاه‌های متفاوتی تخصیص داده می‌شوند. بنابراین، این مسأله شامل طراحی یک مجموعه از مسیرهایی است که در آن وسائط نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت از یک قرارگاه شروع به حرکت می‌کنند، به مجموعه‌ای از مشتریان که دارای تقاضای معینی هستند سرویس‌دهی کرده و در نهایت به همان قرارگاه باز می‌گردند. بیشتر مسایلی که در این زمینه مطرح شده‌اند، مربوط به مسایل تک هدفه با هدف کمینه کردن هزینه هستند، اما پیچیدگی‌های مسایل واقعی عموما کاربرد مسایل تک هدفه را به چالش می‌کشد. از این رو در این مقاله برای انطباق مسایل با دنیای واقعی، در ابتدا یک مدل چند هدفه ارائه می‌گردد که در آن علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های کل، عدم توازن حجم کاری بر حسب مسافت طی شده توسط وسائط نقلیه، همچنین بار قابل حمل آنها نیز مد نظر قرار گرفته است و از آنجایی که این مسأله جزءِ مسائل NP-hard است، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری الزامی‌است، به همین منظور برای حل مدل ارائه شده، روش فراابتکاری تکامل دیفرانسیلی چند هدفه[3] پیشنهاد شد و برای نشان دادن کارآیی الگوریتم پیشنهادی، جوابهای به دست آمده در ابعاد کوچک با جوابهای به دست آمده از روش محدودیت اپسیلون[4] مقایسه شد. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند که درصد خطای توابع هدف نسبت به روش دقیق در تمامی‌مسایل حل شده کمتر از ۳,۲٪ است که نشانگر کارآیی روش پیشنهادی است و در نهایت به بررسی این موضوع در یک شرکت پخش روغن نباتی پرداخته شده است که نتایج حاصل، نشان دهنده کاهش قابل توجه هزینه‌های آن شرکت است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسائط نقلیه، پنجره زمانی، چند قرارگاهی، محدودیت اپسیلون، الگوریتم MODE

۱. مقدمه

مسأله VRP و انواع مختلف آن یک حوزه مطالعاتی مهم در صنعت لجستیک، حمل و نقل و زنجیره تأمین است. صنعت لجستیک و بخصوص توزیع کالا به دلیل ارتباط با تصمیمات موجودی، تولید و همچنین هزینه‌های تحویل کالا به مشتری به عنوان نقطه عطفی در فعالیت‌های تجاری محسوب می‌شود. این مسایل از جمله مسایل بهینه سازی ترکیبی هستند که با شاخه‌های ریاضی، اقتصاد، علوم رایانه و تحقیق در عملیات مرتبط‌اند [Banos et al. 2013]. این مسأله در حالت‌های متنوعی که جنبه‌های متفاوتی از دنیای واقعی را بیان می‌کند، قابل بررسی است که دو نوع بسیار مهم و کاربردی از این مسایل؛ مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی سخت[۵] و مسیریابی وسائط نقلیه چندقرارگاهی با در نظر گرفتن وسائط نقلیه متفاوت[۶] است. مسأله VRPTW که به عنوان یکی از مهم‌ترین مسایل بهینه سازی است، شامل تعیین مجموعه‌ای از مسیرها توسط یک ناوگان وسائط نقلیه یکسان برای سرویس دهی به مشتریانی است که تقاضای آنها از قبل معین است و در یک پنجره زمانی خدمت دریافت می‌کنند که این پنجره زمانی دارای زودترین و دیرترین زمان سرویس دهی به مشتری است اما MDHVRP یکی از انواع مسایلی است که در آن وسائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوتی هستند و به مرکز توزیع یا قرارگاه‌های متفاوتی تخصیص داده می‌شوند. بنابراین، این مسأله شامل طراحی یک مجموعه از مسیرهایی است که در آن وسائط نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت از یک قرارگاه شروع به حرکت می‌کنند، به مجموعه‌ای از مشتریان که دارای تقاضای معینی هستند سرویس می‌دهند و در نهایت به همان قرارگاه بازمی‌گردند.دنتزیگ و رامسر [Dantzig and Ramser, 1959] برای اولین بار مسأله مسیریابی را در قالب یک مسأله مرکزی در حوزه حمل و نقل، توزیع و تدارکات مطرح کردند و برای حل این مسأله یک مدلسازی و الگوریتم ریاضی ارائه کردند. سپس کلارک و رایت [Clarke and Wright, 1964] به منظور حل این مسأله، رویکرد ابتکاری الگوریتم صرفه جویی را پیشنهاد کردند که به عنوان بهترین روش تولید مسیر شناخته شد و مبنای بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفت. در ادامه تنجیاه، نیگارد و ژوئل [Tavakkoli-Moghaddam, et al. 2011] برای مسأله VRPTW در حالت محدود بودن طول مدت سفر از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند که این الگوریتم از دو قسمت تشکیل شده بود؛ قسمت اول مربوط به تخصیص مشتری‌ها به وسائط نقلیه است که در این قسمت از الگوریتم ژنتیک بهره بردند و در قسمت دوم از یک روش بهینه سازی محلی مسیرها استفاده کردند.همچنین برای الگوریتم‌های تخمینی که جوابهای تقریبی ارائه می‌کنند نیز تلاش‌های زیادی انجام گرفت و بعد از اثبات NP-Hard بودن این مسایل توسط لنسترا و رینوی [Lenstra and Rinnooy, 1981]، فعالیت برای یافتن الگوریتم‌های ابتکاری شدت بیشتری گرفت و از طرفی با پیشرفت‌هایی که در حل این‌گونه مسایل به وجود آمد و با در نظر گرفتن فرضیات و محدودیت‌های بیشتر و پیچیده‌تر در مسایل مسیریابی، روشهای فراابتکاری مانند؛ الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوع، سیستم بهینه سازی مورچگان و شبیه سازی تبرید توسعه داده شد. همچنین با گذشت زمان، مسأله MDVRP به دلیل انطباق با دنیای واقعی به شدت مورد توجه محققان قرار گرفت. گیوسا، تانیسینی و ویرا [Giosa, Tanisini and Viera, 2002] مسأله MDVRP را مورد کندوکاو قرار دادند در این مقاله، شش الگوریتم ابتکاری را برای تخصیص مشتریان به انبارها طراحی و مقایسه کردند که در عین حال از همین روشهای ابتکاری برای هر انبار نیز استفاده شده است. ناجی و سالحی [Nagy and Salhi, 2005] تعدادی روش ابتکاری برای مسایل تک قرارگاهی با تجمیع و توزیع ارائه کردند که این روشها برای مسایل چندقرارگاهی نیز قابل توسعه بودند. توکلی مقدم، صفایی و قنادپور [Tavakkoli-Moghaddam, Safaei and Gholipour, 2006] مسأله مسیریابی با طول مسیرهای مستقل را مطرح کردند که هدف این مسأله کمینه کردن هزینه ناوگان وسایط نقلیه ناهمگن و حداکثر استفاده از ظرفیت وسایط نقلیه است.

آنها برای حل این مسأله یک برنامه ریزی عدد صحیح را ارائه کردند و از روش ابتکاری نزدیک ترین همسایگی برای به دست آوردن حل اولیه استفاده کردند، سپس با استفاده از شبیه سازی تبرید حل اولیه را برای مسائل با سایز بزرگ توسعه دادند. بائه و همکاران [Bae et al. 2007] مسأله MDVRP با پنجره زمانی را درنظر گرفتند و برای حل این مسأله، یک الگوریتم ژنتیک بهبود یافته ارائه کردند. آنها برای یافتن جواب اولیه برای این الگوریتم از سه روش ابتکاری بهره جستند تا هزینه‌های تدارکات را با رعایت بازه زمانی تحویل کالا و ظرفیت وسائط نقلیه کمینه کنند. چن، ایچسوئه و چانگ [Chen, Hsueh and Chang, 2009] یک مدل ریاضی غیرخطی پیشنهاد کردند که زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره زمانی را برای محصولات غذایی فاسدشدنی در نظر می‌گرفت، هدف مدل آنها بیشینه کردن کل سود انتظاری بود. آنها در مدل ارائه شده خود، تقاضای خرده فروشان را احتمالی فرض کردند. میرابی، فاطمی‌قمی‌و جولای [Mirabi, Fatemi Gomi and Jolai, 2010] مسأله MDVRP را در نظر گرفتند و در این مسأله علاوه بر مسیریابی و زمان‌بندی، مسأله گروه بندی را هم مطرح کردند. آنها برای حل مدل ارائه شده خود یک روش ابتکاری ترکیبی احتمالی کارا که ترکیبی از روشهای سازنده و تکنیک‌های بهبود دهنده بود ارائه دادند که این روش ابتکاری یکی از بهترین روشهای ابتکاری موجود است. بتینلی، سیسیلی و ریقینی [Bettinelli, Ceselli and Righini, 2010] این مسأله را با در نظر گرفتن پنجره زمانی و وسائط نقلیه متفاوت مطرح کردند. آنها با استفاده از الگوریتم انشعاب، برش و هزینه یک رویکرد دقیق برای حل این مسأله ارائه نمودند.

قصیری و قنادپور [Ghoseiri and Ghannadpour, 2010] یک مدل ریاضی جدید برای مسأله VRPTW با اهداف چندگانه مطرح کردند که در این مدل تصمیم گیرنده سطوح مختلفی را برای اهداف و آرمانهای آن در نظر می‌گیرد و در تلاش است تا انحراف از این آرمانها را کمینه مقدار کند. آنها برای مدلسازی این مدل چند هدفه از برنامه‌ریزی آرمانی و برای حل آن از یک الگوریتم ژنتیک کارآمد استفاده کردند. دامون، گلدن و واسیل [Damon, Golden and Wasil, 2011] مسأله VRP با تحویل‌های انشعابی را مطرح کردند و برای اولین بار برای حل این مسأله یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مبتنی بر روشهای ابتکاری ارائه کردند. آنها مدل خود را روی۳۰ مورد بررسی کردند تا کاهش مسافت سفر به دست آمده با تحویل‌های انشعابی مبتنی بر یک انبار و انبارهای چندگانه را بررسی کنند.فاضل زرندی، همتی و داوری از الگوریتم شبیه سازی آنیلینگ برای مسأله مسیریابی- مکانیابی با زمانهای فازی استفاده کردند [Fazel Zarandi, Hemmati and Davari, 2011]، در ادامه قنادپور، نوری و توکلی مقدم [Ghannadpour, Noori and Tavakkoli-Moghaddam, 2014] یک مسأله مسیریابی- زمان‌بندی وسیله نقلیه چند هدفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در درخواست و اولویت مشتریها را مطرح کردند. آنها برای ارائه مدل خود، از مدل مسیریابی با هدف جلب رضایت مشتریان با توجه به پنجره زمانی که از پیش تعریف شده بود به عنوان یک مدل چند هدفی استفاده کردند که در آن به دنبال کمینه کردن تعداد وسائط نقلیه، مسافت پیموده شده، زمان انتظار تحمیل شده به وسائط نقلیه و همچنین بیشینه کردن سطح رضایت مشتریان بودند. ایشان برای حل مدل ارائه شده از جستجوی تکاملی و مفاهیم بهینگی پارتو استفاده کردند. همچنین نوری و قنادپور یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسأله MDVRP با پنجره زمانی پیشنهاد کردند [Noori and Ghannadpour, 2012]. کریتیکوس و یووانا [Kritikos and Ioannou, 2013] مدل جدیدی برای مسأله VRPTW با در نظر گرفتن وسائط نقلیه متفاوت ارائه کردند و از طریق روش ابتکاری درج اقدام به حل آن کردند.بیشتر مسایلی که در این زمینه مطرح شده‌اند، مربوط به مسایل تک هدفه با هدف کمینه کردن هزینه هستند، اما پیچیدگی‌های مسایل واقعی عموما کاربرد مسایل تک هدفه را به چالش می‌کشد. از این رو در این مقاله، نوع جدیدی از

این مسایل که ترکیبی از سه حالت فوق است، ارائه شده و برای اینکه مسأله ذکر شده با شرایط دنیای واقعی سازگاری بیشتری داشته باشد، محدودیت‌هایی از جمله ظرفیت متفاوت برای وسائط نقلیه، امکان سفارش چندین محصول برای مشتریها، حجم محدود برای هر یک از قرارگاه‌ها و وسائط نقلیه و غیره در نظر گرفته شده است که این امر، مدل را به شرایط واقعی نزدیک تر خواهد کرد.

از این رو، در این مقاله برای انطباق مسایل با دنیای واقعی، مدلی برای مسأله بیان شده ارائه می‌گردد که در آن علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های کل، عدم توازن حجم کاری نیز از دو دیدگاه؛ عدم توازن در فواصل سفر[۷] و عدم توازن بار وسائط نقلیه[۸] نیز مد نظر قرار گرفته که با توجه به دانش نویسندگان مقاله، تا کنون مورد توجه واقع نشده است و از آنجایی که این مسأله جزء مسایل NP-hard محسوب می‌شود، از این رو برای حل این مسأله، الگوریتم MODE ارائه شده است و به منظور اعتبارسنجی مدل و الگوریتم پیشنهادی، مسایلی به صورت نمونه و با ابعاد مختلف حل و نتایج، مورد تحلیل قرار گرفته است.

در نهایت به عنوان نمونه موردی، نتایج اجرای این مدل در یک شرکت بخش روغن نباتی در شهر تهران ارائه خواهد شد.

۲. مدل ریاضی پیشنهادی

همان طور که گفته شد، بیشتر مسایل مطرح شده در زمینه مسیریابی، از انواع مسایل تک هدفه هستند که معمولا به دنبال کمینه کردن هزینه و مسافت سفر هستند، در حالی که اغلب شرکتهای بزرگ چند قرارگاه دارند و یک ناوگان وسائط نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت را مدیریت می‌کنند. از این رو، در این قسمت با توجه به مرور ادبیاتی که شرح آن در بخش قبل ارائه شد، جهت انطباق با مسایل روزمره، مدلی برای مسأله مطرح شده ارائه می‌گردد که در آن علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های کل، توازن حجم کاری نیز در نظر گرفته شده است و همچنین برای اینکه مسأله یاد شده با شرایط دنیای واقعی سازگاری بیشتری داشته باشد، محدودیت‌های کاربردی برای مدل در نظر گرفته شده است. چندین قرارگاه برای تحویل کالا به مشتریان در نظر گرفته شده که تعداد و مکان قرارگاه‌ها از قبل مشخص است. مشتریان امکان سفارش کالاهای متفاوتی را دارند، تقاضای مشتری‌ها و همچنین زمان لازم برای طی یک مسیر نیز از قبل مشخص است، همچنین هر مشتری تنها یکبار و فقط توسط یک وسیله نقلیه در بازه زمانی خاص خود و توسط وسائط نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت خدمت دریافت می‌کند.

۲-۱ اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل

I : مجموعه تمام قرارگاه‌ها $\{i|i=1,2,\ldots,m\}$

J : مجموعه تمام مشتریان $\{j|j=m+1,m+2,\ldots,n+m\}$

K : مجموعه تمام وسائط نقلیه موجود $\{k|k=1,2,\ldots,K\}$

R : مجموعه تمام مسیرهای موجود برای وسائط نقلیه $\{r|r=1,2,\ldots,R\}$

P : مجموعه تمام کالاهای قابل توزیع $\{p|p=1,2,\ldots,P\}$

i : اندیس قرارگاه ($i \in I$ ،m)

j : اندیس مشتری ($j \in J$ ،n)

k : اندیس وسیله نقلیه ($k \in K$)

r : اندیس مسیر ($r \in R$)

p : اندیس کالا ($p \in P$)

۲-۲ پارامترهای ورودی مدل

Vol_p : حجم هر قلم کالای p

Cap_i : حداکثر ظرفیت قرارگاه i

T_j : مدت زمان تخلیه بار مشتری j

d_{ij} : مسافت پیموده شده از گره i تا گره j

vc_i : هزینه متغیر هر واحد خروجی قرارگاه i

fc_{ij} : هزینه ثابت ارسال تقاضاها از قرارگاه i به مشتری j

M : یک عدد به دلخواه بزرگ ($M > \infty$)

Q_k : ظرفیت وسیله نقلیه k به واحد حجم

dem_{jp} : تقاضای مشتری j برای کالای p

t_{ijk} : زمان سفر از گره i به گره j توسط وسیله نقلیه k

t_{ik} : زمان اتمام جمع آوری کالاها توسط وسیله k در قرارگاه i

P_k هزینه حمل و نقل یک واحد بار توسط وسیله نقلیه: k

a_j حد پایین پنجره زمانی سخت:

b_j حد بالای پنجره زمانی سخت:

۲-۳ متغیرهای تصمیم گیری مدل

x_{ijkr} $\begin{cases} 1 & \text{اگر وسیله نقلیه k در مسیر r بلافاصله از نقطه I به نقطه j برود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

$z_{\bar{y}}$ $\begin{cases} 1 & \text{اگر مشتری } j \text{ به قرارگاه } i \text{ تخصیص داده شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

S_{jk} : زمان شروع سرویس‌دهی مشتری j توسط وسیله نقلیه k (اگر وسیله نقلیه k مشتری j را ملاقات نکند، S_{jk} بی معنی است)

Y_{ir} : متغیر کمکی برای حذف زیرتورهای مسیر r

D^{max} : متغیر کمکی به منظور خطی کردن تابع هدف دوم (حداکثر مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه k)

D^{min} : متغیر کمکی به منظور خطی کردن تابع هدف دوم (حداقل مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه k)

L^{max} : متغیر کمکی به منظور خطی کردن تابع هدف سوم (حداکثر مقدار بار حمل شده توسط وسیله نقلیه k)

L^{min} : متغیر کمکی به منظور خطی کردن تابع هدف سوم (حداقل مقدار بار حمل شده توسط وسیله نقلیه k)

۲-۴ مدلسازی

مدل فوق یک مدل سه هدفه است که تابع هدف اول به حداقل کردن کل هزینه‌ها اختصاص دارد، تابع هدف دوم به حداقل کردن عدم تعادل در فواصل سفر توسط وسائط نقلیه می‌پردازد و تابع هدف سوم نیز به حداقل کردن عدم تعادل بار وسائط نقلیه مورد استفاده می‌پردازد. توابع هدف دوم و سوم غیرخطی هستند که به منظور تبدیل این توابع غیرخطی به حالت خطی از تعدادی متغیر کمکی استفاده می‌نماییم و در نهایت توابع هدف خطی در روابط (۴) و (۵) نشان داده می‌شوند. محدودیت‌های (۶) و(۷) سبب می‌شوند تا هر گره فقط توسط یک وسیله نقلیه سرویس دریافت کند. محدودیت (۸) بیان می‌کند که حجم کل کالاهایی که در هر مسیر به یک وسیله نقلیه اختصاص میابند، نباید از حجم وسیله نقلیه بیشتر باشد. محدودیت (۹) سبب ایجاد حلقه می‌شود، یعنی هر وسیله نقلیه از هر انباری که شروع به حرکت می‌کند، باید مجددا به

$$\text{Min } Z_1 = \left(\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{j\in(I\cup J)} \sum_{k\in K} \sum_{r\in R} P_k \cdot d_j \cdot x_{ijkr} \right) + \left(\sum_{i\in I} \sum_{j\in J} \left(\sum_{p\in P} (\boldsymbol{v}_i \cdot dem_p) + \pounds_j \right) \times z_j \right) \quad (۱)$$

$$\text{Min } Z_2 : DI = \max \left(\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{j\in(I\cup J)} \sum_{r\in R} d_{\bar{y}} . x_{ijkr} \right) - \min \left(\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{j\in(I\cup J)} \sum_{r\in R} d_j . x_{ijkr} \right) \quad (۲)$$

$$\text{Min } Z_3 : \boldsymbol{L}^{I} = \max \left(\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{j\in(I\cup J)}^{m+n} \sum_{p\in P} \sum_{r\in R} dem_{jp} . x_{ijkr} \right) - \min \left(\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{j\in(I\cup J)} \sum_{p\in P} \sum_{r\in R} dem_p . x_{ijkr} \right) \quad (۳)$$

$$\text{Min } Z_2 : \boldsymbol{D} = D^{\max} - D^{\min} \quad (۴)$$

$$\text{Min } Z_3 : \boldsymbol{L} = L^{\max} - L^{\min} \quad (۵)$$

s.t.

$$\sum_{i\in(I\cup J)} \sum_{k\in K} \sum_{r\in R} x_{ijkr} = 1 \qquad \forall j \in J \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in(I\cup J)} \sum_{k\in K} \sum_{r\in R} x_{ijkr} = 1 \qquad \forall i \in J \quad (۷)$$

$$\left(\sum_{j\in J} \sum_{p\in P} (Vol_p . dem_p) \right) \times \left(\sum_{i\in(I\cup J)} x_{ijkr} \right) \le Q_k \qquad \forall k \in K, \forall r \in R \quad (۸)$$

$$\sum_{i\in(I\cup J)} x_{ijkr} - \sum_{j\in(I\cup J)} x_{jikr} = 0 \qquad \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۹)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} x_{ijkr} \le K \qquad (۱۰)$$

$$-z_{ij} + \sum_{y\in(I\cup J)} (x_{iykr} + x_{yjkr}) \le 1 \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{p\in P} dem_{jp} \cdot z_j \le Cap_i \qquad \forall i \in I \qquad (۱۲)$$

$$S_{ik} + t_{ijk} + T_j - M \cdot (1 - x_{ijkr}) \le S_{jk} \qquad \forall i, j \in J, \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۱۳)$$

$$t_{ik} + t_{ijk} - M \cdot (1 - x_{ijkr}) \le S_{jk} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۱۴)$$

$$a_j \le S_{jk} \le b_j \qquad \forall j \in J, \forall k \in K \qquad (۱۵)$$

$$Y_{ir} - Y_{jr} + N \cdot x_{ijkr} \le N - 1 \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n}\sum_{j=1}^{m+n}\sum_{r=1}^{R} d_{ij} \cdot x_{ijkr} \le D^{\max} \qquad \forall k \in K \qquad (۱۷)$$

$$D^{\min} \le \sum_{i=1}^{m+n}\sum_{j=1}^{m+n}\sum_{r=1}^{R} d_{ij} \cdot x_{ijkr} \qquad \forall k \in K \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n}\sum_{j=1}^{m+n}\sum_{p=1}^{P}\sum_{r=1}^{R} dem_{jp} \cdot x_{ijkr} \le L^{\max} \qquad \forall k \in K \qquad (۱۹)$$

$$L^{\min} \le \sum_{i=1}^{m+n}\sum_{j=1}^{m+n}\sum_{p=1}^{P}\sum_{r=1}^{R} dem_{jp} \cdot x_{ijkr} \qquad \forall k \in K \qquad (۲۰)$$

$$x_{ijkr} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall r \in R \qquad (۲۱)$$

$z_{ij} \in \{0,1\}$ عدد صحیح و $\forall i \in I, \forall j \in J$ (۲۲)

$$Y_{ir} \ge 0 \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \qquad (۲۳)$$

$$S_{jk}, D^{\max}, D^{\min}, L^{\max}, L^{\min} \ge 0 \qquad \forall j \in J, \forall k \in K \qquad (۲۴)$$

همان انبار برگردد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که تعداد وسائط نقلیه خروجی از انبار باید از تعداد کل وسائط نقلیه در دسترس کمتر باشد. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مشتری می‌تواند به یک قرارگاه اختصاص یابد، اگر و تنها اگر بین مشتری j و قرارگاه i مسیری وجود داشته باشد. محدودیت (۱۲) اطمینان می‌دهد که تا حداکثر کالایی که از هر قرارگاه خارج می‌شود از ظرفیت آن قرارگاه تجاوز نکند. محدودیت (۱۳) باعث می‌شود تا زمان رسیدن به هر مشتری، زودتر از زمان رسیدن به مشتری قبلی به علاوه زمان تخلیه بار و طی مسیر تا رسیدن به مشتری فعلی نباشد. محدودیت (۱۴) مانند محدودیت بالا است، با این تفاوت که فقط در حالت خاصی که گره اول مد نظر است مطرح می‌شود و زمان اتمام جمع‌آوری و آماده سازی کالاهای درخواستی وسیله نقلیه k در قرارگاه i را نیز در نظر می‌گیرد. محدودیت (۱۵) نشان دهنده پنجره زمانی سخت است. محدودیت (۱۶) مربوط به حذف زیرتورها است. محدودیت‌های (۱۷) الی (۲۰) به منظور تبدیل توابع غیرخطی به حالت خطی به مدل اضافه می‌شوند. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) بیانگر این نکته هستند که متغیرهای تصمیم باید باینری باشند. محدودیت (۲۳) بیانگر این است که متغیر کمکی که برای حذف زیرتورهای مسیر r تعریف می‌شود باید عدد صحیح باشد و در نهایت محدودیت (۲۴) نیز بیان کننده علامت متغیرهای تصمیم‌گیری است.

۳. روش فراابتکاری حل مسأله

الگوریتم DE که اولین بار توسط استورن و پرایس معرفی گردید [Storn and Price, 1996]، همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی با جمعیتی از افراد سروکار دارد که این افراد در فضای ژنتیک همان کروموزوم‌ها و در فضای حل مسأله، مقادیر برداری جواب هستند. ایده اصلی این الگوریتم بر اساس تولید بردارهای پارامتر تصادفی است که از تفاضل بردارها برای تغییر در جمعیت جوابها استفاده می‌کند و جهت غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک یعنی فقدان جستجوی محلی ارائه شده است. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های ژنتیکی و الگوریتم DE در عملگر انتخاب آنها است. مزیت این الگوریتم مربوط به عملگر انتخاب آن است، در این الگوریتم همه جوابها دارای شانس مساوی جهت انتخاب شدن به عنوان یکی از والدین هستند.

۳-۱ عملگر جهش

عملگر جهش در الگوریتم DE نقش ایجاد تنوع در جمعیت را برعهده دارد که موجب بهبود عملکرد DE در رسیدن به جواب بهینه خواهد شد. وقتی جمعیت اولیه تولید گردید، DE نسل اول را جهش داده و جمعیتی به تعداد جمعیت نسل اولیه تولید می‌کند. در واقع جهش تفاضلی نسبتی از تفاضل دو بردار جواب (بردار اول و دوم) را به یک بردار پایه (بردار سوم) اضافه می‌کند. رابطه زیر نحوه جهش را در الگوریتم نشان می‌دهد :

$$V_i = X_{r1}^{(G)} + F \cdot (X_{r2}^{(G)} - X_{r3}^{(G)}) \; r1 \neq r2 \neq r3 \qquad (۲۵)$$

فاکتور جهش در DE که همان F است، عددی بین صفر و یک است که نسبت سهم بردار تفاضلی در تولید نسل جدید را کنترل می‌کند. در رابطه (۲۵)، $X_{r1}^{(G)}$ $X_{r1}^{(G)}$ بردار والد اصلی است که به صورت تصادفی از میان NP بردار موجود در جمعیت اصلی انتخاب می‌شود، $X_{r2}^{(G)}$ $X_{r2}^{(G)}$ و $X_{r3}^{(G)}$ $X_{r3}^{(G)}$ دو بردار تصادفی دیگر هستند که اساس بردار تفاضل را تشکیل می‌دهند. با تشکیل جمعیت موقت، عملیات جهش به پایان می‌رسد. پارامتر جهش F، یک پارامتر قابل تنظیم است که از ابتدای الگوریتم ثابت باقی می‌ماند که در این مقاله برای کدنویسی الگوریتم، استراتژی DE/rand/1/bin در نظر گرفته شده است.

۳-۲ عملگر جابجایی

عملگر جابجایی در DE به منظور ایجاد جمعیت فرزند از جمعیت آزمایشی به کار می‌رود، جابجایی بکار گرفته شود در این الگوریتم از نوع بینم است. جابجایی بینم یک سری آزمایش‌های مستقل

برنولی است که طی آن جمعیت فرزند از جمعیت آزمایشی به‌وجود می‌آید. عملیات جابجایی در واقع تنوع جمعیت را که پس از عملیات جهش به وجود آمده‌است کنترل می‌کند که مطابق با رابطه زیر اعضا جمعیت فرزند، U، به صورت احتمالی انتخاب می‌شوند [Gnani et al. 2003].

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{if} \quad rand_j[0,1] < CR \quad j = k \\ x_{i,j}^{(G)} & \text{Otherwise} \end{cases} \qquad (۲۶)$$

$$j = 1,2,...,N$$

در رابطه فوق $u_{i,j}$ $u_{i,j}$، jامین عضو از بردار فرزند i ام خواهد بود، $v_{i,j}$ $v_{i,j}$، jامین عضو از بردار آزمایشی i ام و $x_{i,j}^{(G)}$ نیز jامین عضو از بردار هدف i ام است و $rand_j[0,1]$ $rand_j[0,1]$ عددی تصادفی در بازه [۰و۱] و CR پارامتر ثابت جابجایی است.

۳-۳ عملگر انتخاب

طبق این رابطه در حالت اول، بردار فرزند جای بردار والد را می‌گیرد، در حالت دوم خود بردار والد به مرحله بعد منتقل می‌شود و در حالت سوم، هر دو عضو مجموعه می‌شوند، یعنی هیچ جوابی حذف نمی‌شود. ممکن است در عملیات انتخاب حالت سوم رخ داده و تعداد جمعیت افزایش یابد که به این منظور از مفهوم فاصله ازدحامی‌استفاده شده و جوابها با فاصله ازدحام بیشتر به مرحله بعد منتقل می‌شوند.

$$X_i^{(G+1)} = \begin{cases} U_i & \text{if } U_i \text{ dominates } x_i^{(G)} \\ x_i^{(G)} & \text{if } x_i^{(G)} \text{ dominates } U_i \\ U_i \quad \text{Add to end of population} & \text{if else} \end{cases}$$

۳-۴ شبه کد الگوریتم MODE

شبه کد الگوریتم تکامل دیفرانسیلی چند هدفه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است [Khaled Ahsan, Kirley and Buyyan, 2009] که در این مقاله، بحث فاصله ازدحامی‌در شبه کد مرجع اصلی در نظر گرفته شده است.

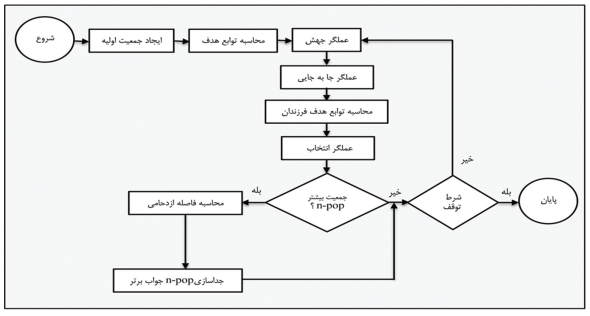
شبه کد الگوریتم MODE

```
Define population P with popSize number of individual.
P={P1<mat,SS>,P2<mat,SS>,...,PpopSize<mat,SS>}
Evaluate the initial population P of random individuals.
While stopping criterion not met do
   for all i such that 0≤i≤ popSize do
      C<mat,SS>=Modified Creat(Pi<mat,SS>)
      Evaluate Candidate
      if Candidate C<mat,SS> dominates Parent Pi<mat,SS> then
         Candidate replaces the Parent
      else if parent Pi<mat,SS> dominates Candidate C<mat,SS> then
         Parent replace the Candidate
      else
         Add Candidate C<mat,SS> to the population
         popSize ⇐ popSize + 1
      end if
   end for
   If the population exceed popSize, truncate it.
   Crowding Distance (CD) enumerate individuals in P
end while
```

شکل ۱. شبه کد الگوریتم تکامل دیفرانسیلی چندهدفه

۳-۵ فرآیند الگوریتم MODE

مراحل مربوط به الگوریتم پیشنهادی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.

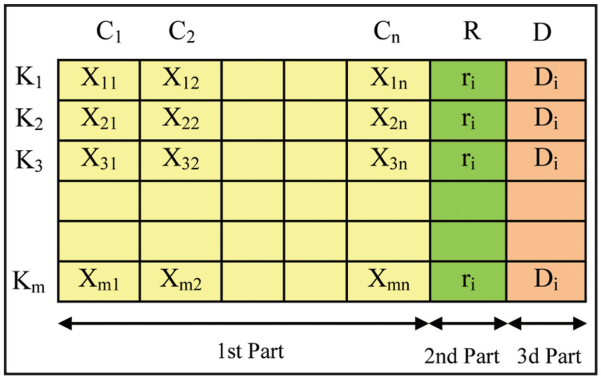


شکل ۲. فرآیند الگوریتم تکامل دیفرانسیلی چندهدفه

۳-۶ شیوه نمایش جوابها

در این بخش، شیوه نمایش جوابها مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این مقاله به منظور نمایش جوابها ابتدا یک کروموزوم به صورت یک ماتریس با m سطر و $n+۲$ ستون تعریف می‌شود که علت این نوع نحوه کدگذاری کاهش ابعاد مسأله بوده و از طرفی ارائه کدگذاری را کوتاه، موثر و آسان‌تر خواهد کرد که کروموزوم تعریف شده در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. سطرها و ستونها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- سطرها : وسایط نقلیه
- n ستون اول : توالی سفر (تخصیص مشتریان به قرارگاه‌ها)
- ستون $n+۱$: مسیر
- ستون $n+۲$: قرارگاه



شکل ۳. نحوه نمایش جواب‌ها

۳-۷ تعیین پارامترها

الگوریتم‌های فراابتکاری معمولاروی پارامترهای خود حساس هستند و جوابهای ارائه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترهای آنها بستگی دارند. در این بخش پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل این روش فراابتکاری توضیح داده خواهد شد. ازاین رو پارامترهای الگوریتم به صورت تجربی پس از دفعات متوالی زیاد اجرای الگوریتم (از روش آزمایش و خطا) تنظیم شده‌اند که جمعیت اولیه، ضریب جابجایی و ضریب جهشی به ترتیب ۶۰، ۰,۶ و ۰,۷۵ در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج محاسباتی

در این قسمت عملکرد الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از این رو برای اثبات کارآمدی الگوریتم پیشنهادی، دو نمونه مسأله یکی در ابعاد کوچک و دیگری در ابعاد بزرگ طراحی شده است. در نمونه اول دسته‌ای از مسایل نمونه کوچک به وسیله الگوریتم پیشنهادی حل شده و جوابهای حاصل با جوابهای حاصل از روش دقیق ε-constraint مقایسه خواهد شد که هدف از انجام این آزمایش بررسی توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی به منظور یافتن جوابهای بهینه در مقایسه با حل مدل توسط روش دقیق است. در نمونه دوم عملکرد الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در حل مسایل بزرگ و با ابعاد واقعی بررسی می‌گردد که هدف از این آزمایش بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی برای حل مسایل در ابعاد بزرگ و دنیای واقعی است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسایل با ابعاد کوچک و بزرگ از توزیع احتمال یکنواخت استفاده شده است و مفروضاتی برای الگوریتم‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده که به این شرح هستند؛ میزان تقاضای مشتری‌ها از توزیع یکنواخت در بازه (۶-۳) کارتن پیروی می‌کند، مدت زمان تخلیه بار نزد مشتری در بازه (۲- ۰,۵) ساعت، زمان جمع‌آوری کالاهای درخواستی در قرارگاه در بازه (۳- ۰,۵) ساعت، مسافت بین گره‌ها در بازه (۱۴۰-۴۰) کیلومتر، هزینه حمل و نقل یک واحد بار توسط وسیله نقلیه در بازه (۳۰۰-۱۰۰)، هزنیه متغیر هر واحد خروجی از قرارگاه در بازه (۱۵۰-۵۰) و هزینه ثابت نیز در بازه (۱۵۰۰ -۸۰۰) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که از میان پارامترهای بالا، فقط پارامتر تعداد مشتری‌ها، قرارگاه‌ها، وسائط نقلیه و کالاها به طور دستی وارد برنامه شدند و مسایل نمونه به ازای هر یک از پارامترها به تعداد ۱۰ بار اجرا شده و در نهایت بهترین مقدار انتخاب گردیده است.

۴-۱ بررسی الگوریتم ارائه شده در مسایل نمونه کوچک

در این قسمت به منظور نشان دادن کارآیی الگوریتم پیشنهادی، هشت مسأله نمونه در ابعاد کوچک تولید شد. ابعاد مسایل با $(I\times J\times K\times P)$ نشان داده شده است که I تعداد قرارگاه‌ها، J تعداد مشتریان، K تعداد وسائط نقلیه و P تعداد اقلام کالا است. نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها با نتایج حاصل از روش دقیق مقایسه شد. در روش دقیق تعداد چهار شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شد و در مجموع حداکثر ۱۶ نقطه پارتویی برای هر مسأله تولید شد، ولی به دلیل NP-Hard بودن مسأله، روش حل دقیق قابلیت حل مدل در ابعاد بزرگ را ندارد، به همین منظور در ادامه به حل آن مسأله در ابعاد بزرگ پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از مقایسه روشهای ε-constraint و MODE در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. به منظور ارزیابی خطای نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم‌های

پیشنهادی[9](RG) به ازای هر تابع هدف، ابتدا بهترین نتیجه به دست آمده[10](BR) از الگوریتم‌ها در نظر گرفته شد و سپس بهترین جواب هر یک از الگوریتم‌ها[11] (RA) مقایسه شد که این موضوع دررابطه زیر نشان داده شده است.

$$RG = \frac{BR - RA}{BR} \times 100 \quad (۲۸)$$

با توجه به جدول شماره ۱ می‌توان پی برد که بررسی زمان حل مسایل در روش دقیق با روش فراابتکاری پیشنهادی، نشان از افزایش بسیار زیاد زمان حل در مقایسه با روش ε-constraint داشته است. به طور متوسط زمان حل مسایل توسط روش دقیق برابر با ۱۰۷۵٫۷۵ ثانیه است، در حالی که این مقدار برای روش‌فراابتکاری ۱۹٫۶۷ ثانیه است و همچنین مقدار خطای به دست آمده در تمامی‌موارد کمتر از ۳/۲٪ است که این امر نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی است.

۴-۲ بررسی الگوریتم ارائه شده در مسایل نمونه بزرگ

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در ابعاد بزرگ نیز ۵۶ مجموعه جواب در نظر گرفته شده است که به دلیل محدودیت فضا، ۲۴ مورد در جدول شماره ۲ که ابعاد هر یک از این مسایل را نیز نشان می‌دهد، ارائه شده است. نتایج حاصل از روش MODE در این جدول نشان داده شده که دو ستون اول از سمت چپ مربوط به مشخصات مسأله است، چهار ستون بعدی مربوط به زمان و شاخص‌های مقایسه برای ۵۰ بار تکرار الگوریتم است و ستون‌های بعدی نیز همین مشخصات را برای ۲۰۰ و ۵۰۰ بار تکرار الگوریتم نشان می‌دهد. از طرفی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه بسیار پیچیده‌تر از الگوریتم‌های تک هدفه است و یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جوابهای حاصل از الگوریتم‌های ارائه شده کافی باشد. از این رو در این مقاله، برای بررسی کیفیت جوابهای حاصل از الگوریتم در ابعاد بزرگ، از سه شاخص مقایسه[12] تعداد جوابهای غیرمغلوب یافت شده[13] (NPS)، گوناگونی (DM) و فاصله[15] (SM) استفاده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول شماره ۲ می‌توان گفت که ۱) تعداد جوابهای پارتوی به دست آمده با ۵۰۰ تکرار بیشتر از تعداد جوابهای پارتوی به دست آمده با ۵۰ و ۲۰۰ تکرار است، ۲) با توجه به شاخص پراکندگی، الگوریتم در ۵۰۰ تکرار نسبت به تکرارهای ۵۰ و ۲۰۰ تکرار عملکرد بهتری دارد، ۳) از نظر میانگین شاخص فاصله نیز الگوریتم در ۵۰۰ تکرار نسبت به تکرارهای ۵۰ و ۲۰۰ تکرار، عملکرد بهتری دارد، و ۴) همچنین در مورد زمان حل نیز، با افزایش تکرارها به مراتب زمان حل نیز افزایش می‌یابد، به طوری که میانگین زمان حل برای ۵۰۰ تکرار برابر ۱۱۷٫۷۳ ثانیه خواهد بود و این در حالی است که میانگین زمان حل برای تکرارهای ۵۰ و ۲۰۰ برابر ۱۱٫۸۶ و ۴۶٫۳۵ ثانیه است.

جدول ۱. مقایسه نتایج محاسباتی روش‌های ε-constraint و MODE برای حل مسایل با ابعاد کوچک

ردیف	ابعاد مسأله (I×J×K×P)	ε-constraint				MODE				خطای MODE (٪)		
		هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	زمان حل	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	زمان حل	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳
۱	۲×۵×۲×۲	۹۹۲۷۱	۴۴۰	۴۸	۶۰	۹۹۲۷۱	۴۴۰	۴۸	۱۷٫۳۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
۲	۲×۵×۲×۳	۷۰۰۰۱٫۴	۳۹۴	۶۶٫۲	۴۱	۷۰۰۰۱٫۴	۳۹۴	۶۶٫۲	۱۷٫۲۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
۳	۲×۵×۳×۳	۷۷۲۵۲٫۸	۳۸۴	۶۸٫۴	۷۳۰	۷۹۷۲۷٫۸	۳۹۹	۶۸	۱۹٫۱۹	۳٫۲۰	۳٫۹۱	۰٫۶۸
۴	۳×۵×۳×۲	۵۳۰۴۰	۴۱۵	۴۲	۱۹۴۲	۵۴۶۳۰	۴۳۰	۴۲	۱۵٫۱۸	۳٫۰۰	۳٫۶۱	۰٫۰۰
۵	۳×۵×۳×۳	۷۷۲۰۶٫۷	۳۷۶	۷۰٫۸	۱۶۱۲	۸۰۶۶۹٫۲	۴۰۱	۷۱٫۱	۱۷٫۰۱	۴٫۴۸	۶٫۶۵	۰٫۴۲
۶	۴×۵×۲×۳	۷۱۶۹۶	۴۰۰	۶۵	۱۱۶۰	۷۴۵۹۶	۴۰۳	۶۵	۱۸٫۹۴	۴٫۰۴	۰٫۷۵	۰٫۰۰
۷	۴×۵×۳×۲	۷۰۶۱۳	۳۹۳	۴۲	۲۹۳۷	۷۶۳۱۱	۴۳۰	۴۲٫۴	۲۵٫۹۴	۸٫۰۷	۹٫۴۱	۰٫۹۵
۸	۴×۵×۳×۳	۷۲۳۵۵٫۶	۳۸۰	۶۶٫۳	۱۱۶۸	۷۴۰۹۹٫۶	۳۸۲	۶۶٫۳	۲۶٫۶۲	۲٫۲۶	۰٫۵۳	۰٫۰۰
	میانگین	۷۳۹۲۹٫۵	۳۹۷٫۷	۵۸٫۵۹	۱۲۰۶٫۲۵	۷۶۱۶۳٫۲۵	۴۰۹٫۸	۵۸٫۶۲	۱۹٫۶۷	۲٫۸۸	۳٫۱۱	۰٫۲۶

۵. مطالعه موردی

در این مقاله، به منظور نشان دادن کارآیی روش معرفی شده، برنامه‌ریزی و مسیریابی وسائط نقلیه یک شرکت پخش روغن نباتی در شهر تهران، مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی توانایی مدل ارائه شده در بهبود مسایل در دنیای واقعی و همچنین توانایی الگوریتم‌های حل پیشنهادی، مشتری‌ها و مسیرهای دسترسی وسائط نقلیه به آنها در یک روز کاری مورد بررسی قرار گرفت که در این روز به مشتریان پنج منطقه توسط دو نوع وسیله نقلیه متفاوت؛ هیوندای (۵ تن) و ایسوزو (۶ تن) در بازه زمانی ۰۰ : ۸ تا ۰۰ : ۱۴ سرویس دهی انجام می‌شود. همچنین تمامی‌رانندگان و صاحبان وسائط نقلیه با شرکت در طرف قرارداد بوده‌اند و علاوه بر حقوق ثابت در ازای تعداد کالایی که به مشتری‌ها تحویل می‌دهند دستمزد دریافت می‌کنند.

در وضعیت قبل از اجرای مدل، طول مسیرهای طی شده برای تمام وسائط نقلیه موجود، در مجموع برابر ۱۰۴ کیلومتر به دست آمد. در ادامه به منظور نشان دادن کارآیی مدل ارائه شده به مقایسه وضعیت بهینه به دست آمده از روشهای پیشنهادی با وضعیت موجود پرداخته خواهد شد. سه تا از بهترین جوابهای پارتو به دست آمده توسط الگوریتم در جدول شماره ۳ نشان داده شده است و در ادامه به صورت جداگانه به تحلیل هر یک پرداخته می‌شود. با توجه به این جدول می‌توان پی برد که جواب پارتوی اول به دنبال این است که تقاضای داده شده (بار حمل شده توسط وسائط نقلیه) یکسان باشد، پس در نتیجه مشتری‌ها را طوری به قرارگاه‌ها تخصیص می‌دهد که توازن بار ایجاد شود. همچنین با توجه به اینکه کمترین مقدار تابع

جدول ۲. مقایسه نتایج محاسباتی الگوریتم MODE برای حل مسایل با ابعاد بزرگ

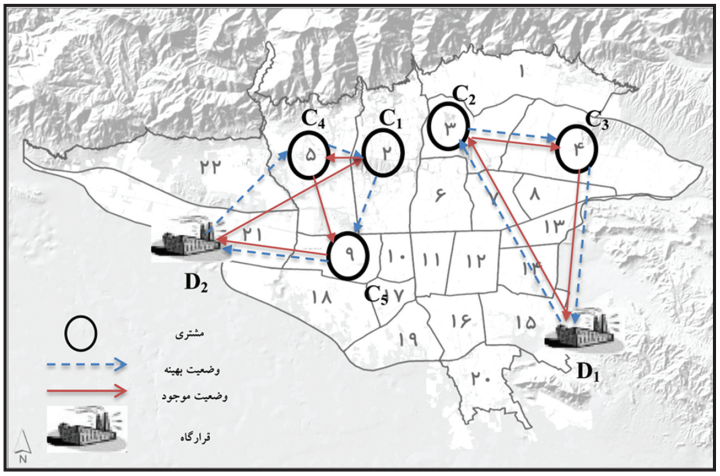
ردیف	ابعاد مسأله (I×J×K×P)	MODE با ۵۰ تکرار				MODE با ۲۰۰ تکرار				MODE با ۵۰۰ تکرار			
		زمان حل	NPS	DM	SM	زمان حل	NPS	DM	SM	زمان حل	NPS	DM	SM
۱	۵×۱۵×۸×۵	۹٫۸۹	۲۰	۱۵۷۶٫۱۱	۰٫۹۵	۳۶٫۵۵	۲۶	۱۷۷۱٫۳۶	۱٫۰۴۲	۹۳٫۰۴	۲۲	۱۴۹۰٫۴۸	۰٫۸۳
۲	۵×۱۵×۸×۱۰	۹٫۸۶	۲۱	۱۸۷۷٫۷۳	۰٫۷۷	۳۵٫۹۷	۲۱	۱۶۳۳٫۱۶	۰٫۹۴	۹۰٫۸۲	۲۵	۱۵۶۷٫۷۱	۰٫۶۶
۳	۵×۱۵×۱۰×۵	۱۰٫۲۲	۲۰	۱۴۲۴٫۸۷	۰٫۸۵	۳۸٫۷۷	۲۳	۱۶۵۷٫۴۲	۰٫۹۹	۹۲٫۷۷	۲۱	۹۳۲٫۷۵	۰٫۷۱
۴	۵×۱۵×۱۰×۱۰	۹٫۴۷	۲۱	۱۶۱۵٫۹۳	۱٫۰۹	۳۵٫۸۷	۲۴	۱۸۶۶٫۲۷	۰٫۸۲	۸۹٫۲۹	۳۱	۱۵۹۵٫۹۴	۰٫۷۵
۵	۱۰×۱۵×۸×۵	۱۱٫۱	۲۴	۲۳۵۶٫۴۵	۰٫۷۸	۴۲٫۰۲	۲۶	۱۹۲۵٫۹۱	۰٫۷۶	۱۱۲٫۹۹	۲۷	۳۰۳۶٫۳۸	۰٫۷۴
۶	۱۰×۱۵×۸×۱۰	۱۰٫۴۶	۲۴	۲۰۳۹٫۰۴۵	۱٫۰۱	۴۲٫۹۷	۲۷	۲۰۲۹٫۸۱	۰٫۸۲	۱۱۵٫۶	۳۴	۳۱۵۳٫۱۷	۰٫۶۵
۷	۱۰×۱۵×۱۰×۵	۱۱٫۵۹	۲۱	۱۵۸۴٫۴۶	۰٫۸	۴۴٫۳	۲۹	۱۹۳۵٫۴۴	۰٫۹	۱۱۶٫۳	۳۰	۲۹۷۳٫۳	۰٫۹
۸	۱۰×۱۵×۱۰×۱۰	۱۰٫۸۳	۱۸	۱۶۵۸٫۶۵	۰٫۸۷	۴۳٫۹۷	۲۶	۲۸۳۰٫۳۸	۱٫۱۵	۱۰۹٫۵۶	۳۱	۳۱۷۵٫۸۵	۰٫۸۲
۹	۵×۲۵×۸×۵	۱۰٫۱۶	۱۸	۲۱۰۱٫۲۲	۰٫۸۹	۳۸٫۶۷	۲۰	۱۹۳۸٫۹۷	۰٫۸	۹۵٫۵۹	۱۸	۱۵۲۶٫۸۲	۰٫۹
۱۰	۵×۲۵×۸×۱۰	۱۰٫۷۶	۱۶	۱۴۴۱٫۶	۰٫۸۵	۴۲٫۷۵	۲۸	۲۲۱۹٫۱۱	۰٫۶۲	۹۸٫۷۹	۲۳	۲۱۱۱٫۶۳	۰٫۹۹
۱۱	۵×۲۵×۱۰×۵	۱۰٫۷	۲۶	۲۰۸۵٫۳۶	۰٫۶۲	۴۴٫۹	۲۶	۲۱۳۲٫۴۴	۰٫۸۷	۱۱۲٫۴۷	۱۹	۱۸۷۹٫۴۸	۰٫۵۴
۱۲	۵×۲۵×۱۰×۱۰	۱۱٫۱۴	۲۰	۲۶۶۰٫۵۵۴	۱٫۰۴	۴۲٫۰۵	۲۶	۲۷۴۵٫۶	۰٫۷۹	۱۰۴٫۲	۱۶	۱۸۴۴٫۳	۱٫۰۸
۱۳	۱۰×۲۵×۸×۵	۱۲٫۹۱	۲۱	۲۷۹۰٫۶۹	۰٫۸۶	۵۰٫۸۴	۲۶	۲۹۹۶٫۳۵	۰٫۷۹	۱۳۵٫۳۵	۱۸	۱۸۰۴٫۳۸	۰٫۶۸
۱۴	۱۰×۲۵×۸×۱۰	۱۱٫۶۳	۱۹	۲۱۷۸٫۵۶	۰٫۷۳	۵۰٫۹۲	۲۵	۲۴۵۲٫۲۷	۰٫۹۱	۱۲۵٫۳۹	۳۵	۴۰۸۵٫۹۵	۰٫۸۵
۱۵	۱۰×۲۵×۱۰×۵	۱۲٫۳۱	۲۰	۲۴۸۳٫۸۵	۰٫۶۹	۴۹٫۴۰	۲۲	۲۸۶۰٫۳۹	۰٫۷۷	۱۲۶٫۱۲	۳۰	۴۱۵۳٫۲۷	۰٫۵۶
۱۶	۱۰×۲۵×۱۰×۱۰	۱۲٫۰۵	۱۹	۲۰۵۲٫۰۶۶	۰٫۷۲	۴۸٫۶۴	۲۵	۲۴۱۵٫۲۶	۰٫۹۹	۱۲۴٫۲۱	۴۳	۴۵۵۸٫۶۵	۰٫۸۳
۱۷	۵×۴۰×۸×۵	۱۲٫۴۱	۲۳	۲۷۷۷٫۷۶	۰٫۸۴	۴۶٫۸۵	۲۳	۲۳۶۹٫۰۲	۰٫۵۸	۱۱۵٫۸۵	۲۴	۲۵۴۹٫۸۲	۰٫۸۱
۱۸	۵×۴۰×۸×۱۰	۱۲٫۵۶	۱۹	۲۸۸۹٫۵۸	۰٫۸۵	۵۲٫۳۲	۲۶	۳۲۲۲٫۰۲	۰٫۵۹	۱۳۱٫۷۹	۲۷	۲۷۶۰٫۲۳	۰٫۷۹
۱۹	۵×۴۰×۱۰×۵	۱۲٫۳۵	۱۹	۲۶۹۷٫۶۲	۰٫۷۸	۴۷٫۰۷	۲۱	۲۱۴۸٫۱۷	۰٫۹۱	۱۲۰٫۴۷	۲۳	۲۳۹۴٫۱۹	۰٫۸۲
۲۰	۵×۴۰×۱۰×۱۰	۱۲٫۹	۲۲	۲۶۲۴٫۴۴	۰٫۹۲	۴۷٫۶۳	۱۷	۲۱۷۶٫۲۳	۰٫۷۵	۱۱۹٫۴	۱۳	۱۸۱۸٫۹۳	۰٫۶۶
۲۱	۱۰×۴۰×۸×۵	۱۵٫۰۴	۲۳	۴۰۷۸٫۴۴	۰٫۹۲	۶۰٫۸۶	۳۳	۴۴۵۷٫۲۷	۰٫۹۷	۱۴۶٫۹۴	۵۰	۴۲۱۴٫۵۱۴	۰٫۸۵
۲۲	۱۰×۴۰×۸×۱۰	۱۴٫۲۱	۲۱	۳۸۰۳٫۱۰۱	۰٫۶۸	۵۷٫۱۵	۲۷	۵۳۱۴٫۷۶	۰٫۵۸	۱۴۲٫۷۹	۴۲	۵۴۹۶٫۸۸	۰٫۹۲
۲۳	۱۰×۴۰×۱۰×۵	۱۵٫۹۱	۱۷	۳۰۱۶٫۱۸	۰٫۹	۵۷	۲۹	۴۸۷۰٫۷۵	۰٫۸۵	۱۵۵٫۰۵۶	۳۳	۴۴۹۰٫۸۸	۰٫۷۶
۲۴	۱۰×۴۰×۱۰×۱۰	۱۴٫۲۱	۲۱	۳۵۴۸٫۴۸	۱٫۰۴	۵۴٫۸۴	۲۷	۵۲۲۴٫۱۶	۰٫۸۷	۱۵۰٫۶۴	۳۱	۴۸۵۲٫۶۳	۰٫۸۵
	میانگین	**۱۱٫۸۶**	**۲۰٫۵۴**	**۲۳۹۰٫۱۱**	**۰٫۸۵**	**۴۶٫۳۵**	**۲۵٫۱۲**	**۲۷۱۶٫۳**	**۰٫۸۴**	**۱۱۷٫۷۳**	**۲۷٫۷**	**۲۸۵۲٫۸**	**۰٫۷۹**

هدف اول (کمینه کردن هزینه کل) در جواب پارتوی دوم رخ داده است، پس در نتیجه مسیرها طوری انتخاب شده است که کمترین هزینه محاسبه شود و در نهایت جواب پارتوی سوم نیز به دنبال این است که وسائط نقلیه مسافت یکسانی را طی کنند، در نتیجه طوری برنامه‌ریزی شده است که وسائط نقلیه انتخاب شده، مسافت تقریبا یکسانی را بپیمایند که با توجه به توضیحات داده شده می‌توان به این نتیجه رسید که در مواردی که شرکت به دنبال کمینه کردن هزینه‌های کل باشد و این هدف برایش اولویت داشته باشد باید توالی مسیر به دست آمده از جواب پارتوی دوم را انتخاب کند، در صورتی که توازن مسیر برای شرکت اهمیت بیشتری داشته باشد، توالی مسیر به دست آمده از جواب پارتوی سوم باید انتخاب شود و همچنین در صورت بالاتر بودن اولویت توازن بار، بهتر است توالی مسیر جواب پارتوی اول توسط شرکت انتخاب شود.

همان طور که در شکل شماره ۴ نیز مشاهده می‌شود، وسیله نقلیه دوم حرکت خود را از قرارگاه اول شروع می‌کند و پس از سرویس دهی به مشتریان منطقه ۳ و ۴ توسط مسیر سوم، دوباره به همان قرارگاه اول باز می‌گردد و وسیله نقلیه چهارم نیز از قرارگاه دوم شروع به حرکت می‌کند و پس از سرویس دهی به مشتریان مناطق ۵، ۲ و ۹ به همان قرارگاه باز می‌گردد. حال با مقایسه حالت بهینه با وضعیت موجود، می‌توان به این نتیجه رسید که با انتخاب توالی مسیر به دست آمده از حالت دوم، درست است که توازن بار حمل شده توسط وسائط نقلیه و همچنین توازن مسیر ممکن است ثابت باقی بماند یا مقداری از مطلوبیت خود را از دست دهد، ولی از طرفی باعث کاهش مسافت از ۱۰۴ به ۹۵ کیلومتر گردیده که نشان دهنده بهبود قابل توجه ۹ درصدی در طول مسیر ایجاد شده برای وسائط نقلیه، پس از اجرای مدل است. بنابراین این توالی مسیر می‌تواند به عنوان بهترین توالی انتخابی از طرف شرکت باشد.

جدول ۳. جواب‌های پارتوی به دست آمده

ردیف	وسیله نقلیه	مسیر بهینه	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف۳
۱	K_3 K_4	$R_2 : D_1\text{-}C_3\text{-}C_1\text{-}D_1$ $R_2 : D_2\text{-}C_5\text{-}C_2\text{-}C_4\text{-}D_2$	۷۹۱۰۰	۴۴	۱۴۰
۲	K_2 K_4	$R_3 : D_1\text{-}C_2\text{-}C_3\text{-}D_1$ $R_2 : D_2\text{-}C_4\text{-}C_1\text{-}C_5\text{-}D_2$	۷۶۳۰۰	۳۷	۱۵۰
۳	K_1 K_3	$R_3 : D_1\text{-}C_3\text{-}C_5\text{-}D_1$ $R_2 : D_2\text{-}C_1\text{-}C_2\text{-}C_4\text{-}D_2$	۷۸۴۰۰	۳۶	۱۵۰



شکل ۴. مقایسه وضعیت موجود و بهینه

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور انطباق با مسایل روزمره، مدلی برای مسأله ناهمگن مسیریابی چند قرارگاهی با در نظر گرفتن پنجره زمانی ارائه شد که در آن علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های کل، توازن حجم کاری (عدم توازن مسیر/ عدم توازن بار) وسائط نقلیه نیز در نظر گرفته شده است و برای اینکه مسأله بیان شده با شرایط دنیای واقعی سازگاری بیشتری داشته باشد، محدودیت‌هایی از جمله ظرفیت متفاوت برای وسائط نقلیه، امکان سفارش چندین محصول برای مشتریان، حجم محدود برای هر یک از قرارگاه‌ها و وسائط نقلیه نیز در نظر گرفته شده است. همچنین اهمیت تعیین توالی مسیر بهینه از دیگر اهداف این پژوهش بود. از آنجا که مسأله مسیریابی وسائط نقلیه ارائه شده در این پایان نامه از جمله مسایل NP-hard است وحل مدل توسط روشهای سنتی بهینه سازی غیر ممکن است و یا نیازمند صرف زمان زیادی خواهد بود، بنابراین برای حل مدل پیشنهادی الگوریتم تکامل دیفرانسیلی ارائه گردید و مشخص شد که درصد خطای تابع هدف نسبت به روش دقیق در تمامی‌مسایل حل شده، کمتر از ۳/۲٪ است که کارآیی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی کیفیت جوابهای حاصل از روش MODE در ابعاد بزرگ از سه شاخص؛ تعداد جوابهای پارتو، گوناگونی و فاصله استفاده شد که بررسی زمان حل مسایل، نشان از افزایش بسیار زیاد زمان حل مسایل توسط روش دقیق داشته و در نهایت نیز کارآیی روش پیشنهادی در یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفت که بکارگیری این روش در شرکت روغن نباتی نینا سبب شد که بهبود قابل توجهی به میزان ۹ درصد در مسافت پیموده شده توسط تمام وسائط نقلیه ایجاد گردد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1- Multi-Depot Routing Problem with Time Windows and heterogeneous Vehicles (MDHVRPTW)

2- Vehicle Routing Problem (VRP)

3- Differential Evolution (DE)

4- ϵ-constraint Method

5-VRP with Hard Time Window (VRPHTW)

6- Multi-Depot VRP with heterogeneous Vehicles (MDHVRP)

7- Distance Imbalance (DI)

8- Load Imbalance (LI)

9- Relative Gap (RG)

10- Best Result (BR)

11- Result of each Algorithm (RA)

12- Comparison Metrics

13- Number of Pareto Solutions (NPS)

14- Diversification Metric (DM)

15- Spacing Metric (SM)

۸ .مراجع

- Bae, T. S., Hwang, H. S., Cho, G. S. and Goan, M. J. (2007) "Integrated GA-VRP solver for multi-depot system", Computers & Industrial Engineering, Vol. 53, No. 2, pp. 233-240.

- Baños, R., Ortega, J., Gil, C, Márquez, A. L. and de Toro, F. (2013) "A hybrid meta-heuristic for multi-objective vehicle routing problems with time windows", Computers & Industrial, Engineering, Vol. 65, No. 2, pp. 286-296.

- Bettinelli, A., Ceselli, A. and Righini, G. (2010) "A

- Ghannadpour, S. F., Noori, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014) "A multi-objective vehicle routing and scheduling problem with uncertainty in customers' request and priority", Journal of Combinatorial Optimization, Accepted for publication, Vol. 28, No. 2, pp. 414-466

- Giosa, I. D., Tansini, I. L.and Viera, I. C. (2002) "New assignment algorithms for multi-depot vehicle routing problem". Journal of Operational Research Society, Vol. 53, No. 9, pp. 977-984.

- Ghoseiri, K. and Ghannadpour, S. F. (2010) "Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 10, No. 4, pp. 1096-1107.

- Gulczynski, D., Golden, G. and Wasil, E. (2011) "The multi-depot split delivery vehicle routing problem: An integer programming-based heuristic, new test problems and computational results", Computers & Industrial Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 794-804.

- Khaled Ahsan Talukder, A. K. Kirley M. and, Buyya, M. B. (2009) "Multiobjective differential evolution for scheduling workflow applications on global grids", Concurrency and Computation: Practice and Experience, Vol. 21, No. 13, pp. 1742-1756.

branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows". Transportation Research - Part C, Vol. 19, No. 5, pp. 723-740.

- Chen, H .K., Hsueh, C. F. and Chang, M. S. (2009) "Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products". Computers & Operations Research, Vol. 36, pp. 2311-2319.

- Clarke, G. and Wright, J. W. (1964) "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points". Operations Research, Vol. 12, pp. 568–589.

- Dantzig, G. and Ramser, J. H. (1959) "The truck dispatching problem", Management Science, Vol. 6, pp. 80-91.

- Fazel Zarandi, M. H., Hemmati, A. and Davari, S. (2011) "The multi-depot capacitated location- routing problem with fuzzy travel times". Expert Systems with Applications Vol. 38, pp. 10075–10084.

- Gnoni, M. G., Lavagnilio, R. Mossa, G., Mommolo, G. and Leva, A. D. (2003) "Production of a multisite manufacturing system by hybrid modeling: A case study from the automotive industry", International Journal of Production Economics, Vol. 5, pp. 251-262.

- Kritikos, M. N. and Ioannou, G. (2013) “The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows”. Int. J. Production Economics, Vol. 144, No. 1, pp. 68-75.

- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1981) “Complexity of vehicle and scheduling problem”, Networks, Vol. 11, pp. 221–227.

- Mirabi, M., FatemiGhomi, S. M. t. and Jolai, F. (2010) “Efficient stochastic hybrid heuristics for the multi-depot vehicle routing problem”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26, No. 6, pp. 564–569.

- Nagy, G. and Salhi, S. (2005) “Heuristic algorithms for the single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries”, European Journal of Operational Research, Vol. 162, No. 1, pp. 126-141.

- Noori, S. and Ghannadpour, S. F. (2012) “High-level relay hybrid metaheuristic method for Multi-depot Vehicle routing problem with time windows”, Journal of Math. Model Algor., Vol. 11, pp. 159–179.tt

- Storn, R. and Price, K.V. (1996) “Minimizing the real functions of the ICEC’96 contest by differentian evolution”. IEEE International Contrence on Evolutionary Computation,Vol. 14, pp. 824 844.

-Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N. and Gholipour, Y. (2006) “A hybrid simulated annealing for capacitated vehicle routing problems with the independent route length”, Applied Mathematics and Computation, Vol. 176, pp. 445–454.

– توکلی مقدم، ر.، نوروزی، ن.، سلامت بخش، ع.ر.، علینقیان، م.، (۱۳۹۰)، "مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایجاد توازن در توزیع کالاها با استفاده از الگوریتم بهبود یافته بهینه سازی انبوه ذرات"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هشتم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۰، ص. ۳۷۵-۳۶۳.

– توکلی مقدم، ر.، علینقیان، م.، نوروزی، ن.، سلامت بخش، ع. ر. (۱۳۹۱) "حل یک مدل جدید برای مسأله مسیریابی وسائط نقلیه با در گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره ۳، بهار ۱۳۹۰، ص. ۲۳۷-۲۲۳.