

مدلسازی ریاضی جدید برای مسیریابی وسایل نقلیه چنددپو در شرایط بلایای طبیعی و حل آن با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

ساویز ساعی*، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مهدی علینقیان، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sz_saei@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۳

چکیده

عملیات امدادسانی در شرایط بلایای طبیعی یکی از کاربردهای مسائل حمل‌ونقل است. در زمان وقوع یک بحران (مانند سیل یا زلزله) انتقال آسیب‌دیدگان به اماکن امدادی مانند بیمارستان‌ها و تخلیه محیط بحران‌زده از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین منظور در این مقاله، مدلسازی جدیدی برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چنددپو با تابع هدف کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیله نقلیه به دپوی بیمارستان ارائه شده است. در مسئله مورد بررسی وسایل نقلیه از دپوی استقرار اولیه به مناطق بحران‌زده حرکت می‌کنند و پس از حمل مجروحان، آنها را به دپوی بیمارستان می‌رسانند. در ادامه به منظور اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار لیتگو حل شده و سپس مسئله در ابعاد بزرگ با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه بهبود یافته حل شده است. سپس در پایان نتایج به دست آمده مقایسه و تجزیه و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه چنددپو، شرایط بلایای طبیعی، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

۱- مقدمه

محل حادثه می‌تواند به کاهش تلفات کمک شایانی کند. هدف از این مقاله ارائه مدل مسیریابی وسایل نقلیه در جهت کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیله نقلیه به دپوی بیمارستان است. در بخش ۲ پیشینه پژوهشی در حوزه مسائل مسیریابی در شرایط بحران بیان خواهد شد. در ادامه، در بخش ۳ تعریف مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط بلایای طبیعی ارائه شده و در بخش ۴ مدل پیشنهادی به تفصیل شرح داده می‌شود. سپس در بخش ۵ جزئیات الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۶، نتایج حل مسئله در ابعاد کوچک و بزرگ بررسی و مقایسه شده است. بخش ۷ به جمع‌بندی مطالب اختصاص دارد.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌شود که در آن ناوگانی متشکل از چندین وسیله نقلیه از یک یا چند قرارگاه به خدمت‌رسانی به مشتریان مستقر در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند. این کار به نحوی انجام می‌گیرد که هزینه‌های آن به حداقل برسد. هنگام وقوع حادثه چندین نقطه استقرار برای آمبولانس‌های امدادی در نظر گرفته می‌شود. آمبولانس‌ها از آن نقاط به سمت مراکز حادثه‌دیدة حرکت می‌کنند و با عرضه کمک‌های اولیه به مصدومان، آنها را به نزدیک‌ترین مرکز امدادی انتقال می‌دهند. از آنجا که ایران کشوری با بلایای طبیعی زیاد همچون سیل و زلزله است، توجه به نحوه امدادسانی و انتقال مصدومان از

۲- پیشینه تحقیق

از بین همه مسائل واقعی جدید، مسائل مسیریابی در شرایط بحران، از چالش برانگیزترین موارد است (Sheu, 2007). Altay and Green (2006) a,b مرور ادبیاتی در زمینه مدیریت عملیات بحران OR/MS ارائه کردند. آنها با توجه به فازبندی عملیات بحران نشان دادند که بیشتر تحقیقات اجراشده در فازهای قبل از وقوع بحران، کاهش ریسک و آمادگی صورت گرفته است.

به طور کلی دو فاز برای مواجهه با بحران در نظر گرفته می شود. در فاز اول یا فاز قبل از وقوع بحران، تمرکز بر مسائل استراتژیک همچون مکانیابی انبارهاست و فاز دوم، فاز پس از بحران یا فاز پاسخ، تمرکز بر دو فعالیت پشتیبانی لجستیکی و انتقال مصدومان است. بررسی تحقیقات نشان می دهد که در فاز پاسخ بیشتر تحقیقات در زمینه عملیات پشتیبانی صورت گرفته است (Caunhye et al., 2012).

حال به مرور ادبیات در زمینه فاز پاسخ پرداخته می شود. برکونه و همکاران به بررسی توزیع اقلام ضروری در بین حادثه دیدگان پرداختند. آنها، تمام محدودیت های وسیله نقلیه را لحاظ کردند و مراکز توزیع را در دسترس قرار دادند. همچنین فرض کردند که در هر مرکز توزیع، با توجه به ظرفیتشان کالا دریافت می کنند. سپس یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح برای مسئله حمل و نقل عملیات پاسخ پیشنهاد کردند و برای حل آن ابتدا روش شاخه و حد را با CPLEX برای مسائل کوچک به کار بردند. سپس برای مسائل بزرگ الگوریتم ژنتیک را پیشنهاد کردند و نشان دادند که سرعتش برای سیستم پشتیبانی تصمیم گیری کافی است و برنامه ریزی حمل و نقل برای مدیریت در شرایط اضطراری و بحرانی را فراهم می کند (Berkone et al., 2012). گیویو و همکاران کمینه سازی مجموع زمان رسیدن به حادثه دیدگان را به عنوان تابع هدف قرار دادند. آنها فرض کردند که به هر مشتری باید دقیقاً یکبار سرویس دهی شود و همچنین مجموع تقاضای پاسخ داده شده از ظرفیت وسیله نقلیه نباید بیشتر باشد. سپس مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را با ظرفیت تجمعی مدلسازی کردند و برای حل مسئله مطرح شده یک حد پایین از مدل و یک حد بالا از الگوریتم ممیتیک ارائه کردند (Ngueveu et al., 2010).

جوتشی و همکاران راهکاری برای اعزام و مسیریابی وسایل نقلیه اضطراری در محیط پس از بحران معرفی کردند

تا مسیرهای بهتری را برای انتقال مصدومان به مکان های بحران زده به بیمارستان ها ارائه کنند (Jotshi et al., 2009). حقانی و چانگ مدل چندمحصولی را بررسی کردند که دارای جریان شبکه ای با پنجره زمانی است. آنها با فرض انتقال از یک گره انبار به گره انبار دیگر با داشتن زودترین زمان تحویل محصولات و همچنین ظرفیت یال وابسته به زمان، کل هزینه حمل و نقل را کمینه سازی کردند و در ادامه با استفاده از روش های حل ابتکاری، مسئله را با سه گره، سه مبدأ و دو مقصد حل کردند (Haghani and Chang, 1996). بربروسوگلو و همکاران مسیریابی هلی کوپتر و ترکیب چندین محدودیت خاص را بررسی کردند. آنها با هدف کمینه سازی کل هزینه اختصاص دادن یک هلی کوپتر به پایگاه هوایی، هزینه اختصاص یک خلبان به هلی کوپتر یا پایگاه هوایی را در نظر گرفتند (Barbarosoglu et al., 2002).

اوزدمار و همکاران یک مسئله حمل و نقل چنددوره ای را در نظر گرفتند. در این مسئله وسایل نقلیه مجبور به بازگشت به دپو نیستند تا زمانی که برنامه ریزی مجدد برای امداد رسانی به تقاضاهای جدید صورت پذیرد. هدف آنها کمینه سازی تعداد تقاضای پوشش داده نشده در طول زمان است. سپس آنها مدل را چندین بار حل کردند تا امداد رسانی در بازه زمانی داده شده صورت گیرد (Ozdamar et al., 2004). شیو یک شبکه لجستیک اضطراری تشکیل شده از تأمین کنندگان امداد رسانی، مراکز توزیع امداد رسانی و نواحی بحران زده مدلسازی کرد (Sheu., 2007 a). سپس در یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری مسائلی از جمله روش های پیش بینی امداد رسانی در زمان های مختلف، گروه بندی نواحی بحران زده، تعیین اولویت بندی توزیع، گروه بندی براساس توزیع امداد رسانی و تأمین امداد رسانی دینامیک را بررسی کرد. زنگ و همکاران یک مدل توزیع - امداد رسانی چندهدفه با تابع هدف کمینه سازی هزینه کل و زمان سفر و بیشینه کردن حداقل پوشش تقاضا ارائه کردند (Tzeng et al., 2007). شبکه آنها شامل پنج گره مجموعه، هشت گره تقاضا و چهار دپوی انتقال است. چرن و همکاران یک شبکه توزیع - امداد رسانی را با چهار گره تأمین، چهار گره توزیع، هشت گره تقاضا با ایستگاه های سوخت در نظر گرفتند. آنها در مدل دو نوع تقاضا با یک موعد تحویل ارائه کردند. یک نوع تقاضا از نوع تقاضای ورودی به محیط حادثه دیده (غذا، آب، تدارکات پزشکی) و نوع دیگر از نوع

بلاایای طبیعی شامل چندین نقطه استقرار آمبولانس، چندین نقطه بحرانی و چندین مرکز امدادی است. وسایل نقلیه از دپوهای استقرار خارج می‌شوند و محیط‌های بحرانی را برای حمل مجروحان به دپوهای امداد و بیمارستان می‌رسانند. در این مسئله فرض شده است که هر وسیله نقلیه در کمترین زمان ممکن، بیشترین تعداد مصدومان را از محل حادثه به نزدیک‌ترین بیمارستان حمل کند. با توجه به این شرایط، تلاش برای رسیدن به هدف کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیله نقلیه به دپوی بیمارستان انجام می‌پذیرد. شکل ۱ نمونه‌ای از مسیر حرکت وسیله نقلیه برای حمل مجروحان زلزله زورقان و اهر به بیمارستان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نقاط مربع‌شکل محل استقرار آمبولانس‌ها را نشان می‌دهد که به سمت نقاط حادثه‌دیده (دایره) می‌روند تا مجروحان را به بیمارستان‌های تبریز (ستاره) برسانند. با وجود کاربردی بودن فرضیه شرایط بحرانی تا کنون توجه چندانی به این موضوع نشده است. در بخش بعدی مدلسازی با توجه به فرضیات مسئله در شرایط بحرانی پرداخته خواهد شد.

۴- مدل ریاضی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه

امدادی در شرایط بحرانی

در این قسمت ابتدا پارامترهای مسئله بیان می‌شود و سپس وجود چندین دپوی اولیه و مقصدهای مختلف، پارامترها، متغیرها و مدل ریاضی مسئله مسیریابی در شرایط بحران مطرح شده و در نهایت مدل ارائه شده خطی می‌شود.

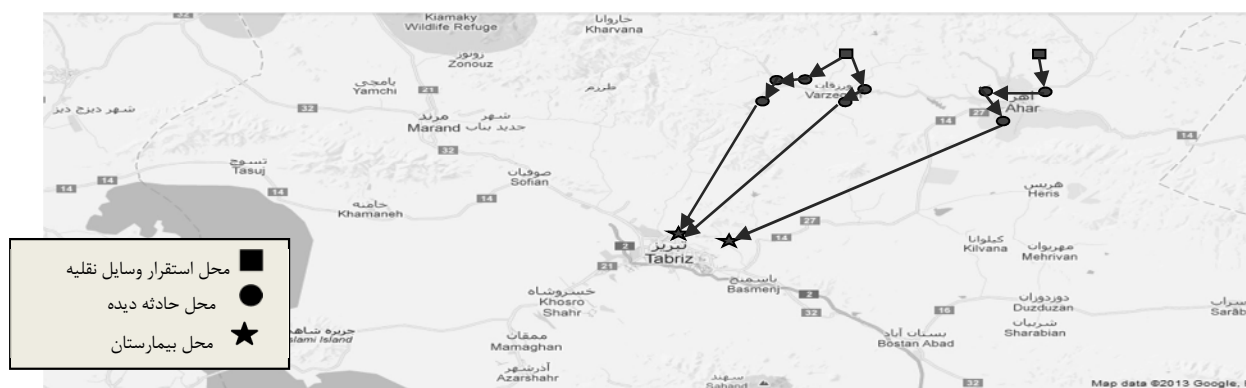
تقاضای خروجی از محیط حادثه‌دیده (مانند فوت‌شده، مجروح، سالم) در نظر گرفتند (Chern et al., 2004). کمپل شرایط اضطراری و بحرانی را بررسی کرد و نشان داد که در این شرایط توابع هدف کمینه‌سازی بیشینه زمان رسیدن و دیگری کمینه‌سازی متوسط زمان رسیدن از اهمیت بیشتری نسبت به تابع هدف هزینه برخوردار است (Campbell et al., 2004).

وقوع بلاایای طبیعی، اجتناب‌ناپذیر است، از این رو توجه به فاز پاسخ از دغدغه‌های اصلی مدیریت بحران است. همان‌طور که بیان شد، در ادبیات موضوع اشاره‌ای به مسیریابی وسایل نقلیه چنددپویی در شرایط بلاایای طبیعی نشده است. در این مقاله، مسیریابی وسایل نقلیه چنددپو در شرایط بلاایای طبیعی بررسی شده است. با توجه به شرایط بلاایای طبیعی، محدودیت‌های مدل از جمله زمان، تعداد وسایل نقلیه و ظرفیت وسایل نقلیه لحاظ شده است. سپس مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار لینگو حل شده و در پایان در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه انجام گرفته و نتایج آن بررسی شده است.

۳- تعریف مسئله مسیریابی وسایل نقلیه

چنددپو در شرایط بلاایای طبیعی

در هنگام وقوع حوادث طبیعی، استقرار وسایل نقلیه در اطراف محیط بحرانی برای انتقال مجروحان به مراکز امدادی از جمله کارهایی است که توسط ارگان‌های مختلف امداد رسانی صورت می‌پذیرد. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط



شکل ۱. مسیر حرکت وسیله نقلیه برای حمل مصدومان زلزله زورقان و اهر

$$\sum_{v=v_0}^{v_n} \sum_{i=N} x_{ii}^v = 0 \quad (13)$$

$$y_j^v = \sum_{i=N} x_{ij}^v \quad ; \quad \forall j \in \{N_2 \cup N_3\} \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \quad (14)$$

$$T_i \geq \sum_{j \in N_3} [y_i^v \times y_j^v \times (lat_j^v - at_i)] \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \quad (15)$$

$$y_j^v, x_{ij}^v = 0, 1 \quad ; \quad at_i, lat_j^v, T_i \geq 0 \quad ; \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \quad (16)$$

پیشنهادی هر یک از محدودیت‌های غیرخطی با ایجاد تغییراتی در ساختارش به مدل خطی تبدیل می‌شود. در ادامه روند ایجاد تبدیل مدل غیرخطی به مدل خطی شرح داده می‌شود. فرض کنید $Z = x_1 \times x_2$ که در آن x_1 یک متغیر باینری و x_2 یک متغیر پیوسته باشد. از این رو در صورتی که x_1 برابر یک باشد، مقدار متغیر Z برابر متغیر پیوسته x_2 می‌شود و در صورتی که متغیر x_1 برابر صفر باشد، مقدار متغیر Z برابر مقدار صفر می‌شود. برای خطی‌سازی آن سه محدودیت کمکی به کار گرفته می‌شود که به صورت زیر است [۱۴]:

$$\begin{aligned} Z &\leq x_2 \\ Z &\leq M \times x_1 \\ Z &\geq x_2 - M(1 - x_1) \end{aligned} \quad (17)$$

همچنین فرض کنید $Z = x_1 \times x_2$ که در آن x_1 و x_2 متغیر باینری باشد. از این رو در صورتی که هر دو متغیر باینری x_1 و x_2 برابر یک باشد، مقدار متغیر Z برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود. برای خطی‌سازی آن سه محدودیت کمکی به کار گرفته می‌شود که به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} Z &\leq x_1 \\ Z &\leq x_2 \\ Z &\geq x_1 + x_2 - 1 \end{aligned} \quad (18)$$

همان‌طور که بیان شد محدودیت‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۵ غیرخطی است. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ مربوط به محاسبه زمان شروع سرویس‌دهی به مناطق آسیب‌دیده است. غیرخطی بودن این محدودیت به دلیل ضرب شدن متغیر باینری x_{ij}^v در متغیر پیوسته at_i است که به ترتیب در محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ خطی شده است.

رابطه ۱ شامل کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیله نقلیه به دپوی بیمارستان است. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که وسایل نقلیه از دپوی استقرار خارج می‌شوند. محدودیت ۳ تضمین می‌کند که همه وسایل نقلیه از نقاط بحرانی به مراکز درمانی بروند. محدودیت ۴ تضمین می‌کند که همه وسایل نقلیه از هر گره نمی‌توانند وارد یکی از دپوهای استقرار شوند. محدودیت ۵ تضمین می‌کند که همه وسایل نقلیه از دپوی بیمارستان نمی‌توانند وارد یکی از گره‌ها شوند. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که در همه نقاط بحرانی، وسیله نقلیه می‌تواند به دپوی استقرار و نقطه بحرانی وارد شود. محدودیت ۷ تضمین می‌کند که اگر وسیله نقلیه‌ای وارد یکی از مناطق بحرانی شود، بتواند از آن خارج شود و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار می‌شود. محدودیت ۸ مربوط به حداکثر تعداد مصدومانی است که هر وسیله نقلیه می‌تواند با خود حمل کند. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که حداکثر زمان طی مسیر توسط هر وسیله نقلیه بیشتر از مقدار مشخصی نباشد. محدودیت ۱۰ نشان می‌دهد که زمان شروع به کار وسیله نقلیه در دپوی استقرار صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ۱۱ مربوط به زمان شروع سرویس‌دهی به نقاط حادثه‌دیده و محدودیت ۱۲ مربوط به محاسبه زمان رسیدن وسیله نقلیه به بیمارستان یا مکان‌های امدادی است. محدودیت ۱۳، از ایجاد حلقه جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ مربوط به محاسبه مدت زمان انتظار مجروحان تا رسیدن به بیمارستان است. محدودیت ۱۶ نیز بیانگر متغیرهای مسئله است.

۴-۳- خطی‌سازی مدل پیشنهادی

غیرخطی بودن مدل به دلیل وجود ضرب متغیر باینری در متغیر پیوسته و ضرب متغیر باینری در متغیر باینری در محدودیت‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۵ است. به منظور ساده‌سازی مدل

متغیر جایگزین شده

$$\rho_{ij} \rightarrow at_i \times x_{ij}^v$$

(۱۹)

$$t_i \quad ; \quad \forall i \in N \quad , \quad \forall j \in N$$

$$r \times \sum_{v_0}^{v_n} x_{ij}^v \quad ; \quad \forall i \in N \quad , \quad \forall j \in N$$

$$t_i - M \times \left(1 - \sum_{v=v_0}^{v_n} x_{ij}^v \right) \quad ; \quad \forall i \in N \quad , \quad \forall j \in N$$

$$\sum_N \rho_{ij} + \sum_{i \in N} \sum_{v=v_0}^{v_n} (t_i - t_{ij}) x_{ij}^v \quad ; \quad \forall j \in \{N_2 \cup N_3\}$$

در این محدودیت ρ_{ij} ، شرایط at_i را در صورتی فراهم می‌کند که متغیر $\sum_{v=v_0}^{v_n} x_{ij}^v$ برابر یک باشد و در غیر این صورت صفر است.

متغیر جایگزین شده

$$\beta_{ij}^v \rightarrow at_i \times x_{ij}^v$$

(۲۰)

$$\beta_{ij}^v \leq at_i \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0, \dots, v_n$$

$$\beta_{ij}^v \leq M \times x_{ij}^v \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0, \dots, v_n$$

$$\beta_{ij}^v \geq at_i - M \times (1 - x_{ij}^v) \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0, \dots, v_n$$

$$lat_j^v = \sum_{i \in N_2} \beta_{ij}^v + \sum_{i \in N_2} (t_i + t_{ij}) x_{ij}^v \quad ; \quad \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0, \dots, v_n$$

مرحله اول ضرب متغیر باینری y_i^v در متغیر باینری y_j^v خطی می‌شود که تبدیل خطی کردن آن از روی محدودیت ۱۸ در محدودیت ۲۲ صورت گرفته است. در ادامه متغیر باینری حاصل در متغیر پیوسته $(at_j - at_i)$ در نظر گرفته می‌شود که تبدیل خطی کردن آن با توجه به محدودیت ۱۷ در مرحله دوم به محدودیت ۲۳ و در مرحله سوم به محدودیت ۲۴ انجام می‌گیرد.

در این محدودیت β_{ij}^v ، شرایط at_i را در صورتی فراهم می‌کند که متغیر x_{ij}^v برابر یک باشد و در غیر این صورت صفر است.

همچنین غیرخطی بودن محدودیت ۱۵ به دلیل ضرب شدن متغیر باینری y_j^v و y_i^v در متغیر پیوسته $(at_j - at_i)$ است که با اعمال تغییراتی در متغیرها به محدودیت ۲۱ تبدیل می‌شود. سپس برای خطی‌سازی متغیرهای جایگزین شده محدودیت ۲۱ سه بار عملیات خطی‌سازی اعمال می‌شود. در

متغیر جایگزین شده

$$\theta_{ij}^v \rightarrow lat_j^v \times y_i^v \times y_j^v$$

$$\delta_{ij}^v \rightarrow at_i \times y_i^v \times y_j^v$$

$$T_i \geq \sum_{j \in N_3} [\theta_{ij}^v - \delta_{ij}^v] \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad v = v_0, \dots, v_n \quad (۲۱)$$

مرحله اول خطی‌سازی

$$z_{ij}^v \rightarrow y_i^v \times y_j^v$$

متغیر جایگزین شده

$$\begin{aligned} z_{ij}^v &\leq y_i^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n && (22) \\ z_{ij}^v &\leq y_j^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \\ z_{ij}^v &\geq y_i^v + y_j^v - 1 && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \end{aligned}$$

مرحله دوم خطی سازی

$$\begin{aligned} \delta_{ij}^v &\leq at_i && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n && (23) \\ \delta_{ij}^v &\leq M \times z_{ij}^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \\ \delta_{ij}^v &\geq at_i - M (1 - z_{ij}^v) && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \end{aligned}$$

در این محدودیت δ_{ij}^v ، شرایط at_i را در صورتی فراهم می‌کند که متغیر z_{ij}^v برابر یک باشد و در غیر این صورت صفر است.

مرحله سوم خطی سازی

$$\begin{aligned} \theta_{ij}^v &\leq lat_j^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n && (24) \\ \theta_{ij}^v &\leq M \times z_{ij}^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \\ \theta_{ij}^v &\geq lat_j^v - (1 - M) z_{ij}^v && ; \quad \forall i \in N_2, \quad \forall j \in N_3, \quad v = v_0, \dots, v_n \end{aligned}$$

باشد، مقادیر x_i, v_i, y_i در هر مرحله به صورت رابطه‌های ۲۵ و ۲۶ به روزرسانی می‌شوند:

ω ضریب اینرسی، $r_{1,j}$ و $r_{2,j}$ اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله $(0,1)$ و c_1 و c_2 اعداد ثابت‌اند که به ضرایب شتاب‌دهنده معروف‌اند و به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، موقعیت و سرعت ذرات در هر مؤلفه $(j=1,2,\dots,n)$ به صورت جداگانه به روزرسانی می‌شود. این سیستم به گسترده‌تر شدن و دور شدن جواب‌ها از یکدیگر تمایل دارد. برای جلوگیری از این امر و پدیده همگرایی پیش از موعد، باید از افزایش بی‌اندازه سرعت جلوگیری کرد؛ از این رو در زمان به روزرسانی برای مقدار سرعت در صورتی که اندازه سرعت به بیش از این مقدار تجاوز کند، از رابطه ۲۷ استفاده می‌شود. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه در شکل ۲ آورده شده است.

در این محدودیت θ_{ij}^v ، شرایط lat_j^v را در صورتی فراهم می‌کند که متغیر z_{ij}^v برابر یک باشد و در غیر این صورت صفر است.

از این رو محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۴ جایگزین محدودیت ۱۱، ۱۲ و ۱۵ می‌شود تا مدل خطی با نرم‌افزارهای حل قابل اجرا باشد.

۵- روش پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

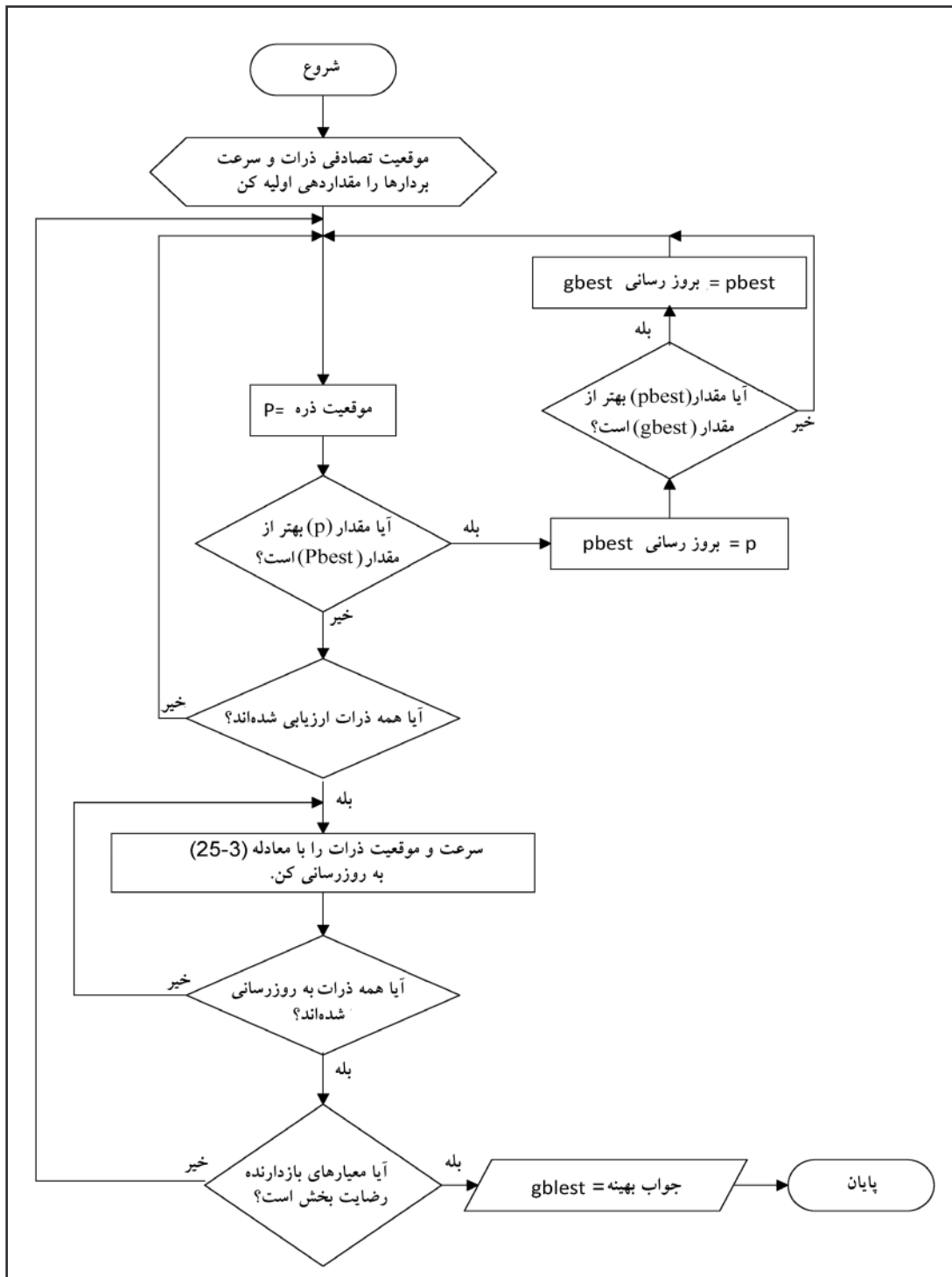
انبوه

روش بهینه‌سازی ذرات انبوه را جیمز کندی و راسل ابرهارت معرفی کردند (Eberhart and Shi, 1998). هر ذره در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات از بردارهای d بعدی x_i موقعیت فعلی ذره، v_i سرعت حرکت ذره و y_i بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده و \hat{y}_i بهترین موقعیت نسبت به ذرات مجاور تشکیل شده است. برای انبوه ذرات، حل مسئله مفهومی اجتماعی است که از رفتار تک‌تک ذرات و تعامل میان آنها به وجود می‌آید. با وجود این، اگر تابع برازندگی مسئله، تابع f

$$\begin{cases} v_{i,j}(t+1) = \omega(t) \times v_{i,j}(t) + r_{1,j}(t) \times c_1 \times (y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + r_{2,j}(t) \times c_2 \times (\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t) \end{cases} \quad (25)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} &\text{if } v_{id} > V_{\max} \quad \text{then } v_{id} = V_{\max} \\ &\text{else if } v_{id} < -V_{\max} \quad \text{then } v_{id} = -V_{\max} \end{aligned} \quad (27)$$



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

۱-۵- تعیین پارامترها

الگوریتم‌های فراابتکاری به‌طور معمول روی پارامترهای خود حساس‌اند و جواب‌های ارائه‌شده به‌شدت وابسته به این مقادیر است. به‌منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش سعی و خطا استفاده شد و با مقداردهی به پارامترها و حل سه مسئله نمونه و مقایسه نتایج حاصل، پارامترها مقداردهی شدند. در ادامه پارامترهای استفاده‌شده برای حل این مدل توضیح داده خواهند شد. در جدول ۱ مقادیر C_1, C_2 ضریب شتاب‌دهی و W ضریب اینرسی تعیین شده است.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم IPSO

تعداد ذره‌ها	۵۰
پارامتر C_1	۱/۴۹
پارامتر C_2	۱/۴۹
پارامتر W	۰/۷۲۹

صحيح خانه وسیله نقلیه تخصیص‌یافته به مشتری را نمایش می‌دهد و مقدار اعشاری، مربوط به اولویت عبور وسیله نقلیه از مشتریان است. شکل ۳ نحوه تفسیر یک رشته را نشان می‌دهد.

۳-۵- مقداردهی اولیه

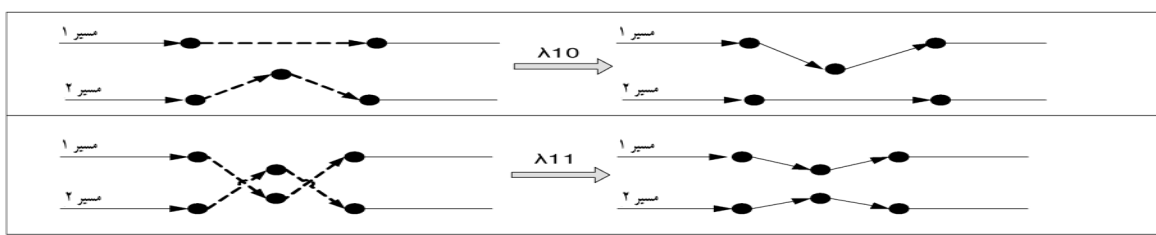
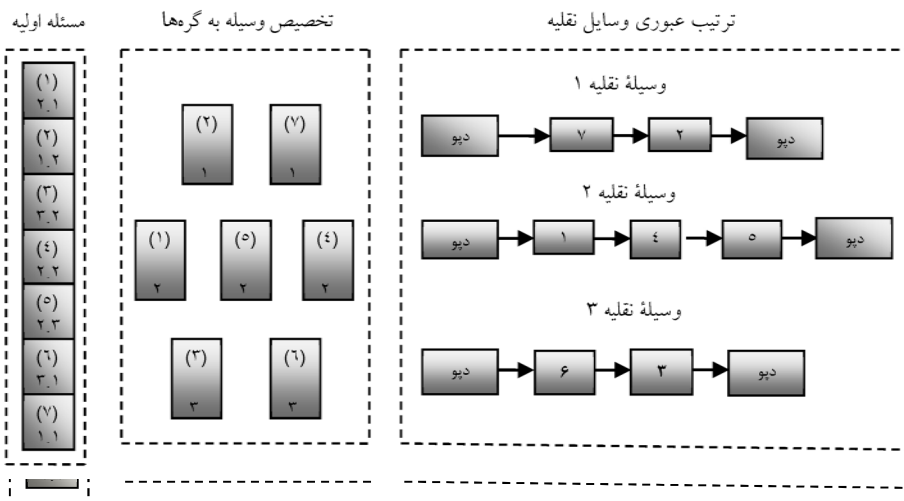
برای آنکه الگوریتم شروع به کار کند، از یک نقطه تصادفی جست‌وجو را آغاز کنید. برای ایجاد همسایگی در الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از اپراتورهای جست‌وجوی محلی تعویض λ ، روش تقاطع و روش جایگزینی به‌کارگرفته می‌شود که در زیربخش بعدی شرح داده خواهد شد.

۱-۳-۵- روش جست‌وجوی محلی

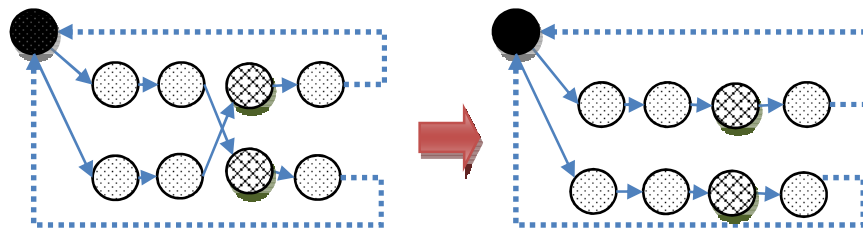
یکی از روش‌های محلی برای بهبود جواب‌ها، روش تعویض λ است که تعویض‌های λ_{01} ، λ_{11} نمونه‌ای از این نوع تعویض است [۱۷]. شکل ۴ به‌خوبی این تعویض‌ها را نشان می‌دهد. اپراتورهای λ_{10} و λ_{11} به‌دنبال بهبود جواب در همسایگی‌اند.

۲-۵- نمایش جواب

نحوه نمایش جواب‌ها به‌صورت یک رشته با تعداد خانه مساوی با تعداد مشتریان است و در هر خانه مقداری در بازه $[0, m+1-e]$ را در بر دارد که m تعداد وسایل نقلیه است. مقدار هر خانه مربوط به مشتری مرتبط با خانه است. مقدار عدد



شکل ۴. روش تعویض λ برای بهبود جواب‌ها

شکل ۵. روش 2-opt^*

این تغییر سبب صرفه‌جویی شود ذخیره کنید. الگوریتم را تا وقتی که تمامی زوج گره‌های داخل دو تور انتخاب نشده‌اند ادامه دهید (شکل ۵).

۵-۴- جهش‌ها

در این زیربخش جهش‌های مورد استفاده توضیح داده می‌شود.

جهش اول: یک مشتری به‌طور تصادفی انتخاب کنید (مشتری یک). سپس مشتری‌ای را که با مشتری انتخاب‌شده کمترین فاصله را دارد در نظر بگیرید و آن را به تور مشتری یک منتقل کنید که پس از آن قرار می‌گیرد.

جهش دوم: مراکز تورها را که برابر با میانگین مختصات محور افقی و عمودی مشتریان داخل تور است محاسبه کنید. سپس مشتری‌ای را که بیشترین فاصله را از مرکز تور دارد انتخاب کنید و به توری‌ای که با مرکز آن کمترین فاصله را دارد انتقال دهید.

۶- نتایج محاسباتی

مجموعه تست‌های کوردیو (Kennedy, 1997) از نمونه مسائل استاندارد است که برای حل مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با توابع هدف مختلف استفاده می‌شود. این مجموعه، شامل انواع مسائل مسیریابی وسایل نقلیه (دوره‌ای، چنددپویی و یک‌دپویی، پنجره زمانی و ترکیبات آنها) است که با توجه به مدل مورد بررسی نمونه مسائل مسیریابی وسایل نقلیه چنددپویی استفاده شده است. مسائل مسیریابی وسایل نقلیه چنددپویی کوردیو شامل ۳۳ مسئله است. این مسائل دارای اطلاعات تعداد وسایل نقلیه، تعداد مشتریان، تعداد دپوها و همچنین شامل تعداد ظرفیت وسایل نقلیه و مکان قرارگیری مشتریان (x_i, y_i) و تعداد تقاضای هر مشتری است. شایان ذکر

در فرایند روش تعویض λ گره‌ها را از یک مسیر به مسیر دیگر تعویض کنید. در اپراتور λ_{01} دو تور انتخاب کنید. سپس از یکی از تورها یک گره انتخاب کرده و به تور دیگر منتقل کنید. در اپراتور λ_{11} یک گره از تور اول و یک گره از تور دوم انتخاب کنید. سپس گره انتخاب‌شده از تور اول را به تور دوم و گره انتخاب‌شده از تور دوم را به تور اول تعویض کنید. این انتقال و تعویض‌ها را تا زمانی که هیچ گونه بهبودی در جواب صورت نپذیرد، ادامه دهید.

۵-۳-۲- تعویض گره در تور داخلی

روش جست‌وجوی محلی می‌تواند در تورهای مسئله استفاده شود. در این روش، ابتدا دو گره (مشتری) در داخل یک تور انتخاب کنید. سپس ترتیب عبوری وسیله نقلیه در آن دو گره (مشتری) را با یکدیگر تعویض کنید. اگر این تعویض هزینه تور را کاهش داد، تغییر را بپذیرید؛ در غیر این صورت دو گره دیگر را انتخاب کرده و سپس مسیر آنها را با یکدیگر تعویض کنید. این کار را برای تمامی گره‌های موجود در تور باید انجام دهید و هر تعویضی را که بیشترین کاهش هزینه را داشت انتخاب کنید.

۵-۳-۳- روش 2-opt^*

در روش ابتکاری 2-opt^* ابتدا دو تور به‌طور تصادفی انتخاب کنید. سپس در هر تور یک گره را طوری انتخاب کنید که فاصله این دو گره از یکدیگر از مقدار مشخص، ρ بیشتر نباشد. دلیل استفاده از این مقدار جلوگیری از انتخاب گره‌های با فاصله زیاد است که به ایجاد جست‌وجوی نامناسب منجر می‌شود. در ادامه تورها را از محل گره‌های انتخابی به دو بخش بشکنید. بخش اول تور اول و بخش دوم تور دوم یک تور جدید را تشکیل می‌دهند و همچنین بخش اول تور دوم و بخش دوم تور اول، تور دوم را تشکیل می‌دهند. در صورتی که

۸۰ درصد تقاضای مشتریان در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که محاسبه فاصله بین مشتریان به صورت فاصله اقلیدسی در نظر گرفته شده است. همچنین در این مسائل تعداد وسایل نقلیه با تعداد دپوها یکسان در نظر گرفته شد.

۶-۱-۱- مقایسه نتایج محاسباتی در ابعاد کوچک

بیشترین میانگین خطای محاسباتی برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای مسائل کوردیو، ۵ درصد است که مربوط به مسئله S04 است. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین خطا در نرم‌افزار Lingo برابر ۶۵ درصد برای مسئله S13 است؛ در حالی که میانگین خطا برای الگوریتم PSO ۲ درصد است. اختلاف میانگین خطای محاسباتی بین نرم‌افزار لینگو و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در مسائل کوردیو ۴ درصد است که نشان‌دهنده توانایی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی است. شکل ۶ میانگین خطای دو روش در ۱۶ مسئله تولید شده را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نرم‌افزار لینگو پس از یک ساعت حل قطع شده و نتایج گزارش شده است.

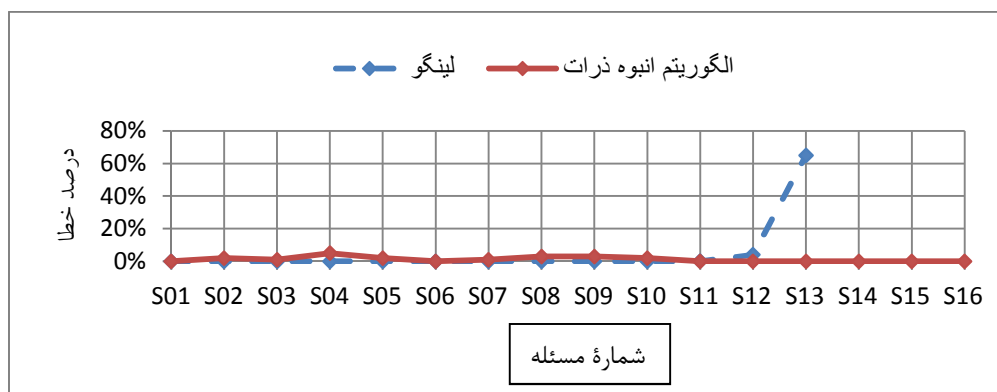
است که محاسبه فاصله بین مشتریان به صورت فاصله اقلیدسی در نظر گرفته شده است. همچنین در این مسائل تعداد وسایل نقلیه با تعداد دپوها یکسان در نظر گرفته شده است. برای نمونه، اگر ذکر شود که مسئله شامل چهار وسیله نقلیه است، تعداد دپوها نیز چهار تا است و در هر دپو چهار وسیله نقلیه و در نتیجه در مجموع شانزده وسیله داریم. در این بخش ۳۳ مسئله از نمونه مسائل کوردیو با ابعاد مختلف با الگوریتم فراابتکاری به کار گرفته شده است که برای اعتبارسنجی آن با اعمال تغییراتی ۱۶ مسئله ساخته شده و توسط نرم‌افزار لینگو بررسی شده است.

۶-۱-۱- نتایج محاسباتی در ابعاد کوچک

در این بخش شانزده نوع نمونه مسئله، با اعمال تغییرات در مسائل کوردیو، با ابعاد مختلف ساخته شده و با نرم‌افزار لینگو بررسی شده است. ساختار مسائل نمونه کوردیو تصحیح شده با ابعاد کوچک در جدول ۲ نشان داده شده است. در این ساختار، برای رسیدن به ابعاد کوچک، تعدادی از مشتریان حذف شده و همچنین ظرفیت وسیله نقلیه، با توجه به شاخص Tightness.

جدول ۲. نتایج محاسبه شده توسط الگوریتم PSO و نرم‌افزار لینگو برای نمونه مسائل کوچک

شماره مسئله	ساختار مسائل ساخته شده با ابعاد کوچک				نرم‌افزار لینگو			الگوریتم PSO		
	تعداد بیمارستان	تعداد وسیله نقلیه	تعداد نقاط بحران زده	تعداد دپو	تابع هدف بهینه	زمان	خطا (درصد)	کیفیت جواب	زمان ثبت	خطا (درصد)
S01	۲	۱	۴	۱	۳۳/۶	۰	۰/۰۰	۳۳/۶	۹/۲۰۳	۰/۰۰
S02	۱	۱	۵	۱	۷۶/۲۶	۲	۰/۰۰	۷۶/۶۷	۹/۲۰۹۸	۰/۰۲
S03	۲	۱	۵	۱	۸۱/۲۶	۷	۰/۰۰	۸۲/۱	۹/۳۳۴۵	۰/۰۱
S04	۲	۲	۴	۲	۱۱/۶۶	۱۲	۰/۰۰	۱۲/۲	۱۲/۸۸	۰/۰۵
S05	۲	۱	۶	۱	۸۹/۹	۵۶	۰/۰۰	۹۲/۱۴	۹/۷۹	۰/۰۲
S06	۲	۲	۵	۲	۱۶	۹۹	۰/۰۰	۱۶	۱۳/۳	۰/۰۰
S07	۲	۱	۷	۱	۱۱۰/۶	۴۳۸	۰/۰۰	۱۱۱/۸	۱۰/۴۲	۰/۰۱
S08	۲	۲	۶	۲	۲۶/۹	۷۵۳	۰/۰۰	۲۷/۸	۱۳/۳۳	۰/۰۳
S09	۲	۲	۷	۲	۵۸/۲	۳۶۰۰	۰/۰۰	۶۰/۱	۱۴/۰۶	۰/۰۳
S10	۲	۲	۸	۲	۷۳/۷	۳۶۰۰	۰/۰۰	۷۵/۱۴	۱۴/۳۳	۰/۰۲
S11	۳	۲	۹	۲	۲۵۹/۲	۳۶۰۰	۰/۱۰	۲۳۴/۷۸	۱۴/۶۱	۰/۰۰
S12	۳	۳	۹	۳	۳۲۴/۹	۳۶۰۰	۰/۰۴	۳۱۱/۱۸	۲۰/۶۷	۰/۰۰
S13	۳	۳	۱۲	۳	۲۳۵/۵۵	۳۶۰۰	۰/۶۵	۱۴۲/۴۲	۱۴/۵۷	۰/۰۰
S14	۱	۱	۱۲	۱	-	۳۶۰۰	-	۱۹۰/۷۱	۱۷/۹۱	۰/۰۰
S15	۱	۲	۱۲	۲	-	۳۶۰۰	-	۸۲/۴۲	۱۵/۵۸	۰/۰۰
S16	۱	۱	۱۵	۱	-	۳۶۰۰	-	۲۸/۲۸	۲۲/۰۳	۰/۰۰
میانگین					۱۰۷/۵	۱۸۸۵/۵۶	۰/۰۶	۹۸/۷۷	۱۳/۸۵	۰/۰۲



شکل ۶. میانگین درصد خطای محاسباتی الگوریتم PSO و نرم‌افزار لینگو در ابعاد کوچک نمونه مسائل کوردیو



شکل ۷. زمان حل الگوریتم PSO و نرم‌افزار لینگو در ابعاد کوچک نمونه مسائل کوردیو

کیفیت جواب و زمان حل توسط الگوریتم PSO و در ستون چهارم خطای محاسباتی آورده شده است. ستون‌های پنجم و ششم کیفیت جواب و زمان حل توسط الگوریتم IPSO و ستون هفتم خطای محاسباتی است.

۶-۲-۱- مقایسه نتایج محاسباتی در ابعاد بزرگ

میانگین خطای محاسباتی برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای مسائل کوردیو برابر ۲۰۰ درصد و برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته برای مسائل کوردیو برابر ۰.۲۶ درصد است. بر طبق نتایج به دست آمده عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهتر است، به طوری که اختلاف میانگین خطای محاسباتی بین دو الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته در مسائل کوردیو ۱/۷۴ درصد است. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب برای ۳۳ مسئله نشان‌دهنده میانگین کلی خطای محاسبه شده و زمان حل تمام مسائل کوردیو در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته است.

همچنین، زمان‌های حل الگوریتم‌های استفاده برای حل مدل پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر قابل قبول است، به طوری که حداکثر زمان حل با الگوریتم PSO در مسئله S16 است که ۲۲/۰۳ ثانیه است. نرم‌افزار لینگو برای مسائل کوچک مقیاس، در مدت زمان مناسبی جواب بهینه به دست می‌دهد؛ اما با بزرگ‌تر شدن این مسائل زمان رسیدن به جواب به صورت نمایی افزایش می‌یابد، به طوری که حتی با گذشت چند ساعت از اجرای برنامه در لینگو، این نرم‌افزار قادر به تولید جواب بهینه نیست. در این مسائل، پس از یک ساعت برنامه قطع و جواب ثبت شده است. شکل ۷ زمان حل الگوریتم PSO و نرم‌افزار لینگو برای ۱۶ مسئله تولید شده کوردیو را نشان می‌دهد.

۶-۲-۲- نتایج محاسباتی در ابعاد بزرگ

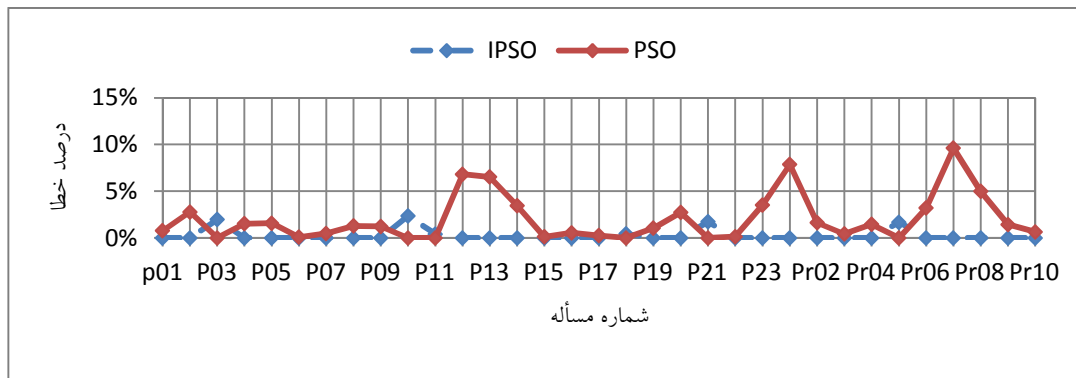
در این بخش ۳۳ نمونه از مسائل کوردیو مسیریابی وسایل نقلیه چنددپویی به کار گرفته و با الگوریتم PSO و IPSO بررسی شده است. جدول ۳ جواب‌های ارائه شده توسط PSO و IPSO برای ۳۳ مسئله کوردیو را نشان می‌دهد. در ستون اول این جدول نام مسئله و در ستون‌های دوم و سوم

جدول ۳. نتایج محاسبه کیفیت و زمان با تکرار ۱۰۰ توسط الگوریتم‌های PSO و IPSO برای ۳۳ مسئله کوردیو

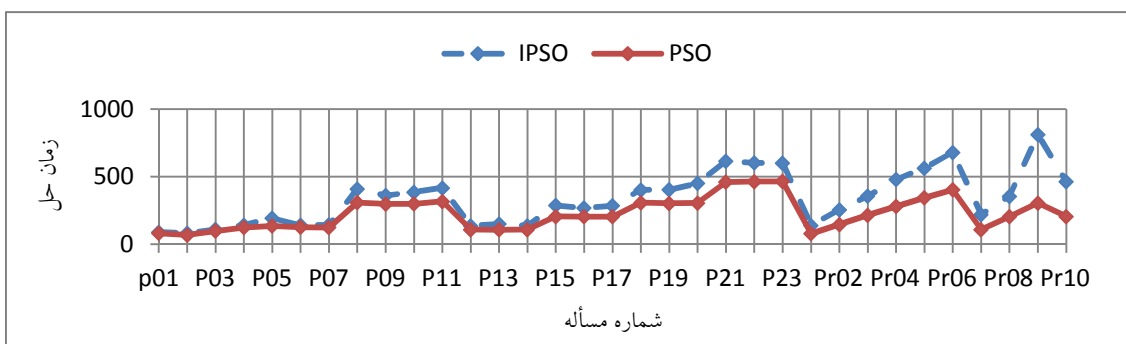
مشخصات ۳۳ مسئله کوردیو	PSO الگوریتم						IPSO الگوریتم			
	مسئله	تعداد دیو	تعداد نقاط بحرانی زده	تعداد وسیله نقلیه	کیفیت جواب	زمان حل	خطا	کیفیت جواب	زمان حل	خطا
P۰۱	۴	۵۰	۴	۷۸/۹۴	۸۱/۱۴	۰/۷۶	۷۵/۵۱	۸۹/۲۶	۰/۰۰	
P۰۲	۴	۵۰	۲	۱۱۳/۸۱	۶۸/۳۳	۲/۷۸	۱۱۰/۷۴	۸۱/۸۳	۰/۰۰	
P۰۳	۵	۷۵	۳	۱۱۱/۷۵	۹۷/۴۹	۰/۰۰	۱۱۳/۹۶	۱۰۹/۸۴	۱/۹۷	
P۰۴	۲	۱۰۰	۸	۱۵۲/۵۶	۱۲۳/۷۵	۱/۵۲	۱۵۰/۲۸	۱۴۱/۷۲	۰/۰۰	
P۰۵	۲	۱۰۰	۵	۱۸۷/۵۷	۱۳۵/۲۳	۱/۵۷	۱۸۴/۶۷	۱۹۲/۷۹	۰/۰۰	
P۰۶	۳	۱۰۰	۶	۱۳۱/۵۴	۱۲۶/۵۰	۰/۰۷	۱۳۱/۴۵	۱۴۰/۸۱	۰/۰۰	
P۰۷	۴	۱۰۰	۴	۱۵۰/۰۰	۱۲۳/۸۵	۰/۴۸	۱۴۹/۳	۱۴۲/۳۴	۰/۰۰	
P۰۸	۲	۲۴۹	۱۴	۵۸۷/۹۰	۳۰۸/۲۸	۱/۲۸	۵۸۰/۴۶	۴۰۹/۴۱	۰/۰۰	
P۰۹	۳	۲۴۹	۱۲	۵۲۳/۳۸	۲۹۷/۶۹	۱/۲۲	۵۱۷/۰۶	۳۶۰/۱۱	۰/۰۰	
P۱۰	۴	۲۴۹	۸	۵۵۷/۷۹	۲۹۹/۵۳	۰/۰۰	۵۷۰/۹۷	۳۸۵/۴۸	۲/۳۶	
P۱۱	۵	۲۴۹	۶	۵۸۹/۵۰	۳۱۶/۴۰	۰/۰۰	۵۹۱/۸۸	۴۱۶/۲۹	۰/۴۰	
P۱۲	۲	۸۰	۵	۳۶۷/۹۶	۱۰۸/۸۷	۶/۸۲	۳۴۴/۴۷	۱۳۷/۱۶	۰/۰۰	
P۱۳	۲	۸۰	۵	۳۷۲/۶۹	۱۰۷/۰۶	۶/۵۳	۳۴۹/۸۴	۱۴۹/۸۴	۰/۰۰	
P۱۴	۲	۸۰	۵	۳۷۵/۳۵	۱۰۸/۰۶	۳/۴۶	۳۶۲/۷۸	۱۳۷/۲۶	۰/۰۰	
P۱۵	۴	۱۶۰	۵	۵۸۳/۷۸	۲۰۵/۷۸	۰/۱۲	۵۸۳/۰۷	۲۸۷/۱۵	۰/۰۰	
P۱۶	۴	۱۶۰	۵	۵۸۵/۰۱	۲۰۴/۱۱	۰/۵۴	۵۸۱/۸۹	۲۶۸/۳۰	۰/۰۰	
P۱۷	۴	۱۶۰	۵	۵۶۷/۶۷	۲۰۳/۸۷	۰/۲۵	۵۶۶/۲۶	۲۸۴/۹۵	۰/۰۰	
P۱۸	۶	۲۴۰	۵	۷۵۳/۳۳	۳۰۷/۵۷	۰/۰۰	۷۵۶/۵۵	۴۰۲/۶۷	۰/۴۳	
P۱۹	۶	۲۴۰	۵	۷۶۹/۸۶	۳۰۲/۷۲	۱/۰۴	۷۶۱/۹۶	۴۰۳/۸۱	۰/۰۰	
P۲۰	۶	۲۴۰	۵	۷۷۹/۲۱	۳۰۵/۴۲	۲/۷۱	۷۵۸/۶۳	۴۵۰/۶۰	۰/۰۰	
P۲۱	۹	۳۶۰	۵	۱۰۰۰/۵۶	۴۵۹/۷۲	۰/۰۰	۱۰۱۷/۷۹	۶۱۵/۱۴	۱/۷۲	
P۲۲	۹	۳۶۰	۵	۹۶۷/۵۳	۴۶۳/۲۸	۰/۱۳	۹۶۶/۲۹	۶۰۱/۷۲	۰/۰۰	
P۲۳	۹	۳۶۰	۵	۱۰۵۵/۵۸	۴۶۵/۳۵	۳/۵۳	۱۰۱۹/۶	۶۰۱/۲۲	۰/۰۰	
Pr۰۱	۴	۴۸	۱	۳۶۳/۴۳	۷۹/۰۸	۷/۸۶	۳۳۶/۹۵	۱۳۹/۰۲	۰/۰۰	
Pr۰۲	۴	۹۶	۲	۳۶۴/۷۴	۱۴۶/۳۱	۱/۶۲	۳۵۸/۹۳	۲۵۵/۶۵	۰/۰۰	
Pr۰۳	۴	۱۴۴	۳	۵۰۲/۶۲	۲۱۵/۳۵	۰/۴۲	۵۰۰/۵۴	۳۵۶/۳۵	۰/۰۰	
Pr۰۴	۴	۱۹۲	۴	۴۷۲/۱۷	۲۸۰/۳۵	۱/۴۵	۴۶۵/۴۳	۴۷۸/۹۹	۰/۰۰	
Pr۰۵	۴	۲۴۰	۵	۴۵۶/۸۳	۳۴۴/۳۷	۰/۰۰	۴۶۴/۵۱	۵۶۳/۵۰	۱/۶۸	
Pr۰۶	۴	۲۸۸	۶	۵۰۹/۸۲	۴۰۳/۷۲	۳/۲۰	۴۹۴/۰۳	۶۷۸/۹۹	۰/۰۰	
Pr۰۷	۶	۷۲	۱	۴۲۵/۵۲	۱۰۸/۹۴	۹/۶۲	۳۸۸/۱۹	۲۲۰/۱۴	۰/۰۰	
Pr۰۸	۶	۱۴۴	۲	۴۵۷/۷۶	۲۰۴/۶۲	۴/۹۸	۴۳۶/۰۵	۳۵۴/۷۸	۰/۰۰	
Pr۰۹	۶	۲۱۶	۳	۴۷۷/۱۱	۳۰۴/۸۹	۱/۴۳	۴۷۰/۳۹	۸۱۱/۳۸	۰/۰۰	
Pr۱۰	۶	۲۸۸	۴	۲۰۸۹۶/۲۲	۴۰۷/۲۸	۰/۶۵	۴۵۰/۵۴	۶۹۹/۷۸	۰/۰۰	
میانگین				۴۸۰/۱۰	۲۲۷/۶۹	۲/۰۰	۴۷۳/۰۴	۳۳۷/۲۹	۰/۲۶	

که حداکثر زمان حل برای مسئله Pr09 است که الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته با زمان ۸۱۱/۳۸ ثانیه و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با زمان ۳۰۴/۸۹ آن را حل کرده است. با بررسی ۳۳ مسئله درمی‌یابیم که میانگین زمان حل الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با اختلاف ۱۰۹/۶ سریع‌تر از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته عمل می‌کند.

شایان ذکر است که بیشترین خطا برای الگوریتم PSO ۹/۶۲ درصد و متعلق به مسئله Pr07 است و بیشترین خطا برای الگوریتم IPSO ۲/۳۶ درصد و متعلق به مسئله P10 است. همان‌طور که در شکل ۴-۳ ملاحظه می‌شود، الگوریتم IPSO میانگین خطای کمتری نسبت به الگوریتم PSO دارد. همچنین، زمان‌های حل الگوریتم‌های استفاده‌شده برای حل مدل پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر قابل قبول است، به‌طوری



شکل ۸. میانگین خطای کلی محاسباتی الگوریتم‌های PSO و IPSO در ابعاد بزرگ نمونه مسائل کوردیو



شکل ۹. زمان حل الگوریتم‌های PSO و IPSO در ابعاد بزرگ نمونه مسائل کوردیو

۷- نتیجه‌گیری

محدودیت‌های امدادی در شرایط بلایای طبیعی با هدف کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیله نقلیه به دپوی بیمارستان در نظر گرفته شده است. در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی و حل مدل پیشنهادی نمونه مسائل مسیریابی وسیله نقلیه چنددپویی کوردیو در ابعاد کوچک با نرم‌افزار لینگو و در ابعاد بزرگ با دو الگوریتم فراابتکاری PSO و IPSO مقایسه و حل شده است. در پایان نشان داده شده است که کاربرد اپراتورهای جست‌وجوی محلی تعویض روش تقاطع و روش جایگزینی، ضمن افزایش زمان محاسبات، تأثیر معناداری بر کیفیت جواب‌ها داشته است.

در شرایط بلایای طبیعی، مانند وقوع سیل و زلزله، عدم امدادسانی به‌موقع، صدمات جانی جبران‌ناپذیری وارد کرده است؛ از این رو امدادهای بشردوستانه برای رساندن افراد مجروح از نقاط بحران‌زده به مراکز پزشکی ضروری و مهم به‌نظر می‌رسد. از این بین پیدا کردن مسیرهای مناسب، دغدغه ذهنی بسیاری از مدیران است. مسیریابی در شرایط بلایای طبیعی از جمله مسائلی است که فرض داشتن چندین دپو موجب کارآمد بودن عملیات امدادسانی می‌شود. در این مقاله، مسئله مسیریابی چنددپو در شرایط بلایای طبیعی با در نظر گرفتن چند نقطه استقرار و چند مرکز امداد بررسی شده است. برای رسیدن به غایت امید به بهبود مجروح، فرضیات

۸- منابع

- Research, 118-133.
- Ozdamar, L., Ekinci, E., & Kucukyazici. (2004). Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. *annals of Operations Research*, 217-245.
 - Tzeng, G., Cheng, H., & Huang, T. (2007). Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 673-686.
 - Chern, C., Chen, y., & Kung, L. (2010). A heuristic relief transportation planning algorithm for emergency supply chain management. *International Journal of Computer Mathematics*, 1638-1664.
 - Campbell, A., Vandebussche, D., & Hermann, W. (2008). Routing for Relief Efforts. *Transportation Science*, 127-145.
 - Chang, C., & Chang, C. (2000). A linearization method for mixed 0-1 polynomial programs. *Computers & Operations Research*, 1005-1016.
 - Glover, F., & Woolsey, E. (1974). Technical Note—Converting the 0-1 Polynomial Programming Problem to a 0-1 Linear Program. *Operation Research*, 180-182.
 - Eberhart, R., & Shi, Y. (1998). Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. *Evolutionary Programming VII Lecture Notes in Computer Science*, 611-616.
 - Osman, C. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operation Research* 41 , 421-451.
 - Kennedy, J. R. (1997). A discrete binary version of the particle swarm algorithm. *Systems, Man and Cybernetics* (pp. 4104-4108).
 - Sheu, J.B. (2007). Challenges of Emergency Logistics Management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 655-659.
 - Sheu.J.B. (2007). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent reliefdemand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 687-709.
 - Altay, N., & Green, W. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operation Research*, 475-493.
 - Berkone, D., Renaud, j., Rekik, M., & Ruiz, A. (2012). Transportation in disaster response operations. *Socio-Economic Planning Science*, 23-32.
 - Caunhye, A., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 4-13.
 - Ngueveu, S., Prins, C., & Wolfler Calvo, R. (2010). An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 1877-1885.
 - Jotshi, A., Gong, Q., & Batta, R. (2009). Dispatching and routing of emergency vehicles in disaster mitigation using data fusion. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1-24.
 - Haghani, A., & Chang Oh, S. (1996). Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 231-250.
 - Barbarosoglu, G., Ozdamar, L., & Cevik, A. (2002). An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operation*