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

ساویز ساعی*، دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکدهٔ مهندسی صنایع و سیستم‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مهدی علینقیان، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول:sz_saei@yahoo.com
دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۰- پذیرش: ۱۳۹٤/۰۲/۰۳

چکیده

عملیات امدادرسانی 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 تخلیهٔ محیط بحران‌زده از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین منظور در این مقاله، مدلسازی جدیدی برای مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیهٔ چنددپو با تابع هدف کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه به دپوی بیمارستان ارایه شده است. در مسئلهٔ 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 به‌منظور اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار لینگو حل شده و سپس مسئله در ابعاد بزرگ با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه بهبودیافته حل شده است. سپس در پایان نتایج به‌دست‌آمده مقایسه و تجزیه‌وتحلیل شده است.

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

۱- مقدمه

مسئلهٔ مسیریابی وسیلهٔ نقلیه (VRP) به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌شود که در آن ناوگانی متشکل از چندین وسیلهٔ نقلیه از یک یا چند قرارگاه به خدمت‌رسانی به مشتریان مستقر در نقاط مختلف جغرافیایی می‌پردازند. این کار به‌نحوی انجام می‌گیرد که هزینه‌های آن به حداقل برسد. هنگام وقوع حادثه چندین نقطهٔ استقرار برای آمبولانس‌های امدادی درنظر گرفته می‌شود. آمبولانس‌ها از آن نقاط به‌سمت مراکز حادثه‌دیده حرکت می‌کنند و با عرضهٔ 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 نحوهٔ امدادرسانی و انتقال مصدومان از محل حادثه می‌تواند به کاهش تلفات کمک شایانی کند. هدف از این مقاله ارایهٔ مدل مسیریابی وسایل نقلیه در جهت کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه به دپوی بیمارستان است. در بخش ۲ پیشینهٔ پژوهشی در حوزهٔ مسائل مسیریابی در شرایط بحران بیان خواهد شد. در ادامه، در بخش ۳ تعریف مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط بلایای طبیعی ارایه شده و در بخش ٤ مدل پیشنهادی به‌تفصیل شرح داده می‌شود. سپس در بخش ٥ جزئیات الگوریتم پیشنهادی ارایه می‌شود. در بخش ٦، نتایج حل مسئله در ابعاد کوچک و بزرگ بررسی و مقایسه شده است. بخش ۷ به جمع‌بندی مطالب اختصاص دارد.

---

* ـ نویسنده مسئول

۲- پیشینهٔ تحقیق

از بین همهٔ مسائل واقعی جدید، مسائل مسیریابی در شرایط بحران، از چالش‌برانگیزترین موارد است (Sheu, 2007 a,b). Altay and Green (2006) مرور ادبیاتی در زمینهٔ مدیریت عملیات بحران OR/MS ارایه 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.

به‌طور کلی دو فاز برای مواجهه با بحران در نظر گرفته می‌شود. 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 می‌دهد که در فاز پاسخ بیشتر تحقیقات در زمینهٔ عملیات پشتیبانی صورت گرفته است (Caunhye et al.,2012) .

حال به مرور ادبیات در زمینهٔ فاز پاسخ پرداخته می‌شود. برکونه و همکاران به بررسی توزیع اقلام ضروری در بین حادثه‌دیدگان پرداختند. آنها، تمام محدودیت‌های وسیلهٔ 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 می‌کنند. سپس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئلهٔ حمل‌ونقل عملیات پاسخ پیشنهاد کردند و برای حل آن ابتدا روش شاخه و حد را با CPLEX برای مسائل کوچک به‌کار بردند. سپس برای مسائل بزرگ الگوریتم ژنتیک را پیشنهاد کردند و نشان دادند که سرعتش برای سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری کافی است و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل برای مدیریت در شرایط اضطراری و بحرانی را فراهم می‌کند (Berkone *et al.*, 2012). گیوویو و همکاران کمینه‌سازی مجموع زمان رسیدن به حادثه‌دیدگان را به‌عنوان تابع هدف قرار دادند. آنها فرض کردند که به هر مشتری باید دقیقاً یکبار سرویس‌دهی شود و همچنین مجموع تقاضای پاسخ داده شده از ظرفیت وسیلهٔ نقلیه نباید بیشتر باشد. سپس مسئلهٔ مسیریابی وسیلهٔ نقلیه را با ظرفیت تجمعی مدلسازی کردند و برای حل مسئلهٔ مطرح‌شده یک حد پایین از مدل و یک حد بالا از الگوریتم ممتیک ارایه کردند (Ngueveu et al., 2010).

جوتشی و همکاران راهکاری برای اعزام و مسیریابی وسایل نقلیهٔ اضطراری در محیط پس از بحران معرفی کردند تا مسیرهای بهتری را برای انتقال مصدومان به مکان‌های بحران‌زده به بیمارستان‌ها ارایه کنند (Jotshi *et al.*, 2009). حقانی و چانگ مدل چندمحصولی را بررسی کردند که دارای جریان شبکه‌ای با پنجرهٔ 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 هزینهٔ حمل‌ونقل را کمینه‌سازی کردند و در ادامه با استفاده از روش‌های حل ابتکاری، مسئله را با سه گره، سه مبدأ و دو مقصد حل کردند (Haghani and Chang, 1996). بربروسوغلو و همکاران مسیریابی هلی‌کوپتر و ترکیب چندین محدودیت خاص را بررسی کردند. آنها با هدف کمینه‌سازی کل هزینهٔ اختصاص دادن یک هلی‌کوپتر به پایگاه هوایی، هزینهٔ اختصاص یک خلبان به هلی‌کوپتر یا پایگاه هوایی را درنظر گرفتند (Barbarosoglu et al., 2002).

اوزدمار و همکاران یک مسئلهٔ حمل‌ونقل چنددوره‌ای را درنظر گرفتند. در این مسئله وسایل نقلیه مجبور به بازگشت به دپو نیستند تا زمانی که برنامه‌ریزی مجدد برای امدادرسانی به تقاضاهای جدید صورت پذیرد. هدف آنها کمینه‌سازی تعداد تقاضای پوشش‌داده‌نشده در طول زمان است. سپس آنها مدل را چندین بار حل کردند تا امدادرسانی در بازهٔ زمانی داده‌شده صورت گیرد (Ozdamar et al., 2004). شیو یک شبکهٔ لجستیک اضطراری تشکیل‌شده از تأمین‌کنندگان امدادرسانی، مراکز توزیع امدادرسانی و نواحی بحران‌زده مدلسازی کرد (Sheu., 2007 a). سپس در یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مسائلی از جمله روش‌های پیش‌بینی امدادرسانی در زمان‌های مختلف، گروه‌بندی نواحی بحران‌زده، تعیین اولویت‌بندی توزیع، گروه‌بندی براساس توزیع امدادرسانی و تأمین امدادرسانی دینامیک را بررسی کرد. زنگ و همکاران یک مدل توزیع- امدادرسانی چندهدفه با تابع هدف کمینه‌سازی هزینهٔ کل و زمان سفر و بیشینه کردن حداقل پوشش تقاضا ارایه کردند (Tzeng et al., 2007). شبکهٔ آنها شامل پنج گره مجموعه، هشت گره تقاضا و چهار دپوی انتقال است. چرن و همکاران یک شبکهٔ توزیع- امدادرسانی را با چهار گره تأمین، چهار گره توزیع، هشت گره تقاضا با ایستگاه‌های سوخت درنظر گرفتند. آنها در مدل دو نوع تقاضا با یک موعد تحویل ارایه کردند. یک نوع تقاضا از نوع تقاضای ورودی به محیط حادثه‌دیده (غذا، آب، تدارکات پزشک) و نوع دیگر از نوع

تقاضای خروجی از محیط حادثه‌دیده (مانند فوت‌شده، مجروح، سالم) درنظر گرفتند (Chern *et al*., 2004). کمبل 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 بلایای طبیعی، اجتناب‌ناپذیر است، ازاین‌رو توجه به فاز پاسخ از دغدغه‌های اصلی مدیریت بحران است. همان‌طور که بیان شد، در ادبیات موضوع اشاره‌ای به مسیریابی وسایل نقلیهٔ چنددپویی در شرایط بلایای طبیعی نشده است. در این مقاله، مسیریابی وسایل نقلیهٔ چنددپو در شرایط بلایای طبیعی بررسی شده است. با توجه به شرایط بلایای طبیعی، محدودیت‌های مدل از جمله زمان، تعداد وسایل نقلیه و ظرفیت وسایل نقلیه لحاظ شده است. سپس مدل ارایه‌شده 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 مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیهٔ چنددپو در شرایط بلایای 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 امدادرسانی صورت می‌پذیرد. مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط بلایای طبیعی شامل چندین نقطهٔ استقرار آمبولانس، چندین نقطهٔ 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 وسیلهٔ 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 وسیلهٔ نقلیه به دپوی بیمارستان انجام می‌پذیرد. شکل۱ نمونه‌ای از مسیر حرکت وسیلهٔ نقلیه برای حمل مجروحان زلزلهٔ وزرقان و اهر به بیمارستان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نقاط مربع‌شکل محل استقرار آمبولانس‌ها را نشان می‌دهد که به‌سمت نقاط حادثه‌دیده (دایره) می‌روند تا مجروحان را به بیمارستان‌های تبریز (ستاره) برساند. با وجود کاربردی بودن فرضیهٔ 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 مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیهٔ 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 مسئلهٔ مسیریابی در شرایط بحران مطرح شده و در نهایت مدل ارایه‌شده خطی می‌شود.

شکل۱. مسیر حرکت وسیلهٔ نقلیه برای حمل مصدومان زلزلهٔ وزرقان و اهر

٤-١- علائم، پارامترها و متغیرهای مدل

پارامترهای مدل شامل موارد زیر است:

i, j: اندیس گره‌ها

v: اندیس وسایل نقلیه

N: تعداد کل گره‌هاست. $N = N_1 + N_2 + N_3$ که در آن N_1 تعداد نقاط استقرار اولیه وسایل نقلیهٔ امدادی؛ N_2 تعداد نقاط حادثه‌دیده؛ و N_3 تعداد نقاط مراکز امدادی را نشان می‌دهند. همچنین فرض می‌کنیم که هر یک از نقاط استقرار اولیه $N_1 = (0, \dots, n)$ شامل تعداد مشخصی وسیلهٔ نقلیه است که با $v = v_0, \dots, v_n$ مشخص می‌شود.

T_i: مدت زمان خدمت‌دهی اولیه به مصدومان در گره iام قبل از انتقال به درمانگاه؛

CT: حداکثر زمان ممکن که وسیلهٔ نقلیه می‌تواند طی مسیر کند؛

t_{ij}: فاصلهٔ زمانی بین دو گره i و j؛

t_i: مدت زمان خدمت‌دهی به گره i؛

k: ظرفیت وسایل امدادی؛

w_i: تعداد مصدومان گره i.

متغیرهای تصمیم

${x_{ij}}^v$: این متغیر وقتی مقدار یک می‌گیرد که مسیر $(i-j)$ توسط وسیلهٔ نقلیه v-اُم پیموده شود. در غیر این صورت مقدار *صفر* خواهد گرفت.

${y_i}^v$: این متغیر با مقدار یک در مدل نشان‌دهندهٔ سرویس‌دهی وسیلهٔ نقلیه v-اُم به مصدومان منطقهٔ حادثه‌دیدهٔ iام است؛

at_i: زمان رسیدن به گره i؛

${lat_i}^v$: زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه v-ام به گره i

٤-٢- مدل ریاضی مسئلهٔ مسیریابی وسایل نقلیهٔ امدادی در شرایط بحرانی

با درنظر گرفتن شرایط بحرانی برای وسایل نقلیهٔ امدادی مدل ریاضی ارایه‌شده به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min} \quad Z = \text{Max}\{{lat^v}_i\} \quad ; \quad \forall i \in N_3 \tag{۱}$$

s.t.

$$\sum_{j=N_2} {x_{ij}}^v = 1 \quad ; \quad \forall i \in N_1 \quad ; \forall \; v = v_i \tag{۲}$$

$$\sum_{i=N_2} \sum_{j=N_3} {x_{ij}}^v = 1 \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۳}$$

$$\sum_{i=N} \sum_{j=N_1} {x_{ij}}^v = 0 \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{٤}$$

$$\sum_{i=N_3} \sum_{j=N} {x_{ij}}^v = 0 \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۵}$$

$$\sum_{v=v_0}^{v_n} \sum_{i=\{N_1 \cup N_2\}} {x_{ij}}^v = 1 \quad ; \quad \forall j \in N_2 \tag{٦}$$

$$\sum_{i=\{N_1 \cup N_2\}}^{N} x_{ip}^v - \sum_{i=\{N_2 \cup N_3\}}^{N+1} x_{pi}^v = 0 \quad ; \quad v=v_0, \dots, v_n \quad ; \quad \forall p \in N_2 \tag{۷}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i \times x_{ij}^v \le k(v) \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۸}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (t_i + t_{ij}) x_{ij}^v \le CT(v) \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۹}$$

$$at_i = 0 \quad ; \quad \forall i \in N_1 \tag{۱۰}$$

$$at_j = \sum_{i=N} \sum_{v=v_0}^{v_n} at_i \times x_{ij}^v + \sum_{i=N} \sum_{v=v_0}^{v_n} (t_i + t_{ij}) x_{ij}^v \quad ; \quad \forall j \in N_2 \tag{۱۱}$$

$$lat_j{}^v = \sum_{i=N_2} \sum_{v=v_0}^{v_n} at_i \times x_{ij}^v + \sum_{i=N_2} \sum_{v=v_0}^{v_n} (t_i + t_{ij}) x_{ij}^v \quad ; \quad \forall j \in N_3 \tag{۱۲}$$

$$\sum_{v=v_0}^{v_n} \sum_{i=N} x_{ii}^{\ v} = 0 \tag{۱۳}$$

$$y_j^{\ v} = \sum_{i=N} x_{ij}^{\ v} \quad ; \quad \forall j \in \{N_2 \cup N_3\} \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۱٤}$$

$$T_i \ge \sum_{j \in N_3} \left[y_i^{\ v} \times y_j^{\ v} \times \left(lat_j^{\ v} - at_i \right) \right] \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad ; v = v_0, \dots, v_n \tag{۱۵}$$

$$y_j^{\ v}, x_{ij}^{\ v} = 0,1 \quad ; \quad at_i, lat_j^{\ v}, T_i \ge 0 \quad ; \quad i, j = 0,1,2,\dots,n \quad ; \quad v = v_0, \dots, v_n \tag{۱٦}$$

رابطهٔ ۱ شامل کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه به دپوی بیمارستان است. محدودیت ۲ تضمین می کند که وسایل نقلیه از دپوی استقرار خارج می‌شوند. محدودیت ۳ تضمین می‌کند که همهٔ وسایل نقلیه از نقاط بحرانی به مراکز درمانی بروند. محدودیت ٤ تضمین می‌کند که همهٔ وسایل نقلیه از هر گره نمی‌توانند وارد یکی از دپوهای استقرار شوند. محدودیت ۵ تضمین می‌کند که همهٔ وسایل نقلیه از دپوی بیمارستان نمی‌توانند وارد یکی از گره‌ها شوند. محدودیت ٦ تضمین می‌کند که در همهٔ نقاط بحرانی، وسیلهٔ نقلیه می‌تواند به دپوی استقرار و نقطهٔ بحرانی وارد شود. محدودیت ۷ تضمین می‌کند که اگر وسیلهٔ 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 وسیلهٔ نقلیه می‌تواند با خود حمل کند. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که حداکثر زمان طی مسیر توسط هر وسیلهٔ نقلیه بیشتر از مقدار مشخصی نباشد. محدودیت ۱۰ نشان می‌دهد که زمان شروع به کار وسیلهٔ نقلیه در دپوی استقرار صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ۱۱ مربوط به زمان شروع سرویس‌دهی به نقاط حادثه‌دیده و محدودیت ۱۲ مربوط به محاسبهٔ زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه به بیمارستان یا مکان‌های امدادی است. محدودیت ۱۳، از ایجاد حلقه جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های ۱٤ و ۱۵ مربوط به محاسبهٔ مدت زمان انتظار مجروحان تا رسیدن به بیمارستان است. محدودیت ۱٦ نیز بیانگر متغیرهای مسئله است.

٤-۳- خطی‌سازی مدل پیشنهادی

غیرخطی بودن مدل به‌دلیل وجود ضرب متغیر باینری در متغیر پیوسته و ضرب متغیر باینری در متغیر باینری در محدودیت‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۵ است. به‌منظور ساده‌سازی مدل 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. ازاین‌رو درصورتی که x_1 برابر یک باشد، مقدار متغیر Z برابر متغیر پیوستهٔ x_2 می‌شود و درصورتی که متغیر x_1 برابر صفر باشد، مقدار متغیر Z برابر مقدار صفر می‌شود. برای خطی‌سازی آن سه محدودیت کمکی به‌کار گرفته می‌شود که به‌صورت زیر است [۱٤]:

$$\begin{aligned} &Z \le x_2 \\ &Z \le M \times x_1 \\ &Z \ge x_2 - M\,(1 - x_1) \end{aligned} \tag{۱۷}$$

همچنین فرض کنید $Z = x_1 \times x_2$ که در آن x_1 و x_2 متغیر باینری باشد. از این‌رو درصورتی 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 به‌کار گرفته می‌شود که به‌صورت زیر است :

$$\begin{aligned} &Z \le x_1 \\ &Z \le x_2 \\ &Z \ge x_1 + x_2 - 1 \end{aligned} \tag{۱۸}$$

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

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

(۱۹)

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

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

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

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

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

(۲۰)

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

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

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

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

در این محدودیت $\beta_{ij}{}^{v}$، 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 به‌دلیل ضرب شدن متغیر باینری $y_j{}^{v}$ و $y_i{}^{v}$ در متغیر پیوسته $\left(at_j - at_i\right)$ است که با اعمال تغییراتی در متغیرها به محدودیت ۲۱ تبدیل می‌شود. سپس بـرای خـطی‌سازی متغیـرهای جـایگزین‌شدۀ محدودیت ۲۱ سه بار عملیات خطی‌سازی اعمال می‌شود. در مرحلۀ 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 $\left(at_j - at_i\right)$ درنظر گرفته می‌شود که تبدیل خطی کردن آن با توجه به محدودیت ۱۷ در مرحلۀ دوم به محدودیت ۲۳ و در مرحلۀ سوم به محدودیت ۲۴ انجام می‌گیرد.

متغیر جایگزین‌شده

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

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

(۲۱)

$$T_i \ge \sum_{j \in N_3} \left[\theta_{ij}{}^{v} - \delta_{ij}{}^{v}\right] \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , v = v_0, \dots, v_n$$

مرحلۀ اول خطی‌سازی

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

$$z_{ij}^{v} \le y_i^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad v = v_0,\dots,v_n$$
$$z_{ij}^{v} \le y_j^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad v = v_0,\dots,v_n$$
$$z_{ij}^{v} \ge y_i^{v} + y_j^{v} - 1 \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad v = v_0,\dots,v_n \qquad (۲۲)$$

مرحلهٔ دوم خطی‌سازی

$$\delta_{ij}^{v} \le at_i \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad ,\forall j \in N_3 \quad ,v = v_0,\dots,v_n$$
$$\delta_{ij}^{v} \le M \times z_{ij}^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad ,\forall j \in N_3 \quad ,v = v_0,\dots,v_n$$
$$\delta_{ij}^{v} \ge at_i - M\left(1 - z_{ij}^{v}\right) \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad ,\forall j \in N_3 \quad ,v = v_0,\dots,v_n \qquad (۲۳)$$

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.

مرحلهٔ سوم خطی‌سازی

$$\theta_{ij}^{v} \le lat_j^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0,\dots,v_n$$
$$\theta_{ij}^{v} \le M \times z_{ij}^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0,\dots,v_n$$
$$\theta_{ij}^{v} \ge lat_j^{v} - \left(1 - M\right) z_{ij}^{v} \quad ; \quad \forall i \in N_2 \quad , \quad \forall j \in N_3 \quad , \quad v = v_0,\dots,v_n \qquad (۲٤)$$

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.

ازاین‌رو محدودیت‌های ۱۹ تا ۲٤ جایگزین محدودیت ۱۱، ۱۲ و ۱۵ می‌شود تا مدل خطی با نرم‌افزارهای حل قابل اجرا باشد.

۵- روش پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

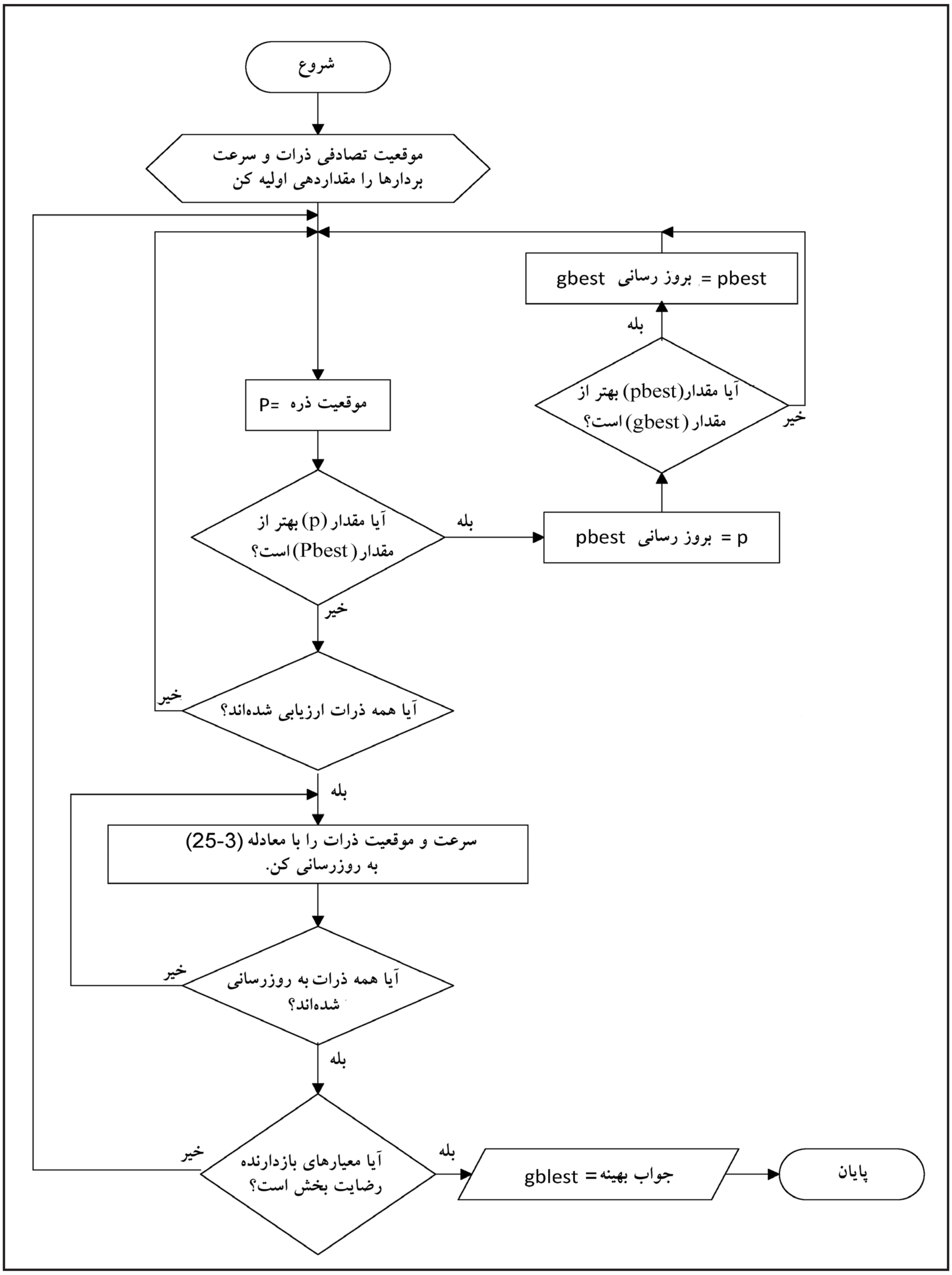
روش بهینه‌سازی ذرات انبوه را جیمز کندی و راسل ابرهارت معرفی کردند (Eberhart and Shi, 1998). هر ذره در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات از بردارهای d بعدی x_i موقعیت فعلی ذره، v_i سرعت حرکت ذره و y_i بهترین موقعیتی که ذره تا به‌حال تجربه کرده و $\hat{y}_i$ بهترین موقعیت نسبت به ذرات مجاور تشکیل شده است. برای انبوه ذرات، حل مسئله مفهومی اجتماعی است که از رفتار تک‌تک ذرات و تعامل میان آنها به‌وجود می‌آید. با وجود این، اگر تابع برازندگی مسئله، تابع f باشد، مقادیر x_i، v_i، y_i، $\hat{y}_i$ در هر مرحله به‌صورت رابطه‌های ۲۵ و ۲٦ به‌روزرسانی می‌شوند:

ω ضریب اینرسی، r_{1j} و r_{2j} اعداد تصادفی یکنواخت در فاصلهٔ (۰،۱) و c_1 و c_2 اعداد ثابت‌اند که به ضرایب شتاب‌دهنده معروف‌اند و به‌ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، موقعیت و سرعت ذرات در هر مؤلفه $(j=1,2,\dots,n)$ به‌صورت جداگانه به‌روزرسانی می‌شود. این سیستم به گسترده‌تر شدن و دور شدن جواب‌ها از یکدیگر تمایل دارد. برای جلوگیری از این امر و پدیدهٔ همگرایی پیش از موعد، باید از افزایش بی‌اندازهٔ سرعت جلوگیری کرد؛ ازاین‌رو در زمان به‌روزرسانی برای مقدار سرعت درصورتی که اندازهٔ سرعت به بیش از این مقدار تجاوز کند، از رابطهٔ ۲۷ استفاده می‌شود. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه در شکل ۲ آورده شده است.

$$\begin{cases} v_{i,j}(t+1) = \omega(t)\times v_{i,j}(t) + r_{1,j}(t)\times c_1 \times (y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + r_{2,j}(t)\times c_2 \times (\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t) \end{cases} \qquad (۲۵)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & if \quad f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & if \quad f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (۲۶)$$

$$\begin{aligned} & if\ v_{id} > V_{\max} \quad then \quad v_{id} = V_{\max} \\ & else \quad if\ v_{id} < -V_{\max} \quad then \quad v_{id} = V_{\max} \end{aligned} \quad (۲۷)$$



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

۵-۱- تعیین پارامترها

الگوریتم‌های فراابتکاری به‌طور معمول روی پارامترهای خود حساس‌اند و جواب‌های ارایه‌شده 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 مسئلهٔ نمونه و مقایسهٔ 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

۵-۲- نمایش جواب

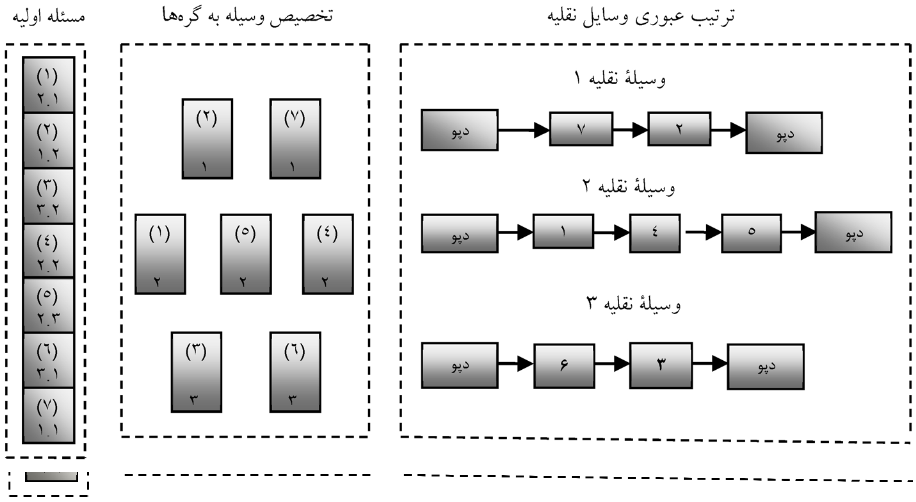
نحوهٔ نمایش جواب‌ها به‌صورت یک رشته با تعداد خانه مساوی با تعداد مشتریان است و در هر خانه مقداری در بازهٔ $(0,m+1-e]$ را در بر دارد که m تعداد وسایل نقلیه است. مقدار هر خانه مربوط به مشتری مرتبط با خانه است. مقدار عدد صحیح خانه وسیلهٔ نقلیهٔ تخصیص‌یافته به مشتری را نمایش می‌دهد و مقدار اعشاری، مربوط به اولویت عبور وسیلهٔ نقلیه از مشتریان است. شکل ۳ نحوهٔ تفسیر یک رشته را نشان می‌دهد.

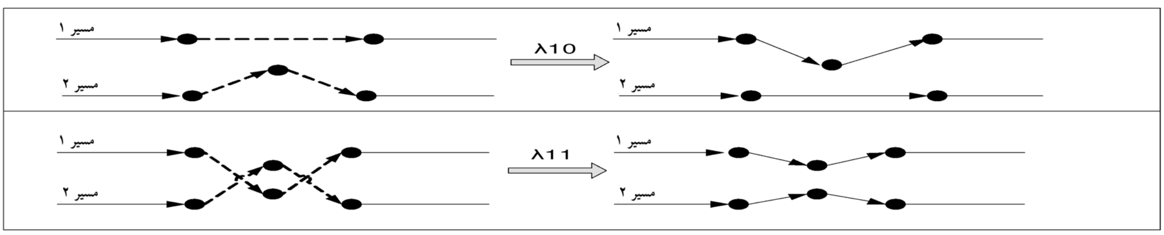
۵-۳- مقداردهی اولیه

برای آنکه الگوریتم شروع به کار کند، از یک نقطهٔ 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.

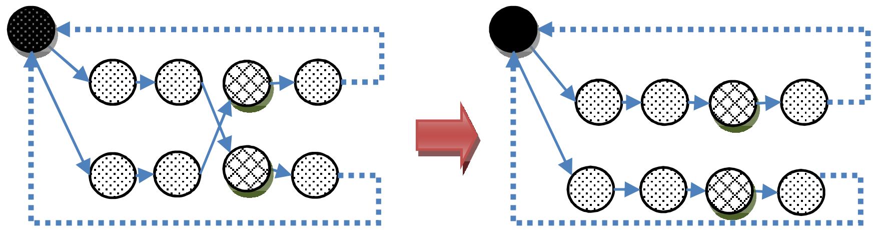
۵-۳-۱- روش جست‌وجوی محلی

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 ٤ به‌خوبی این تعویض‌ها را نشان می‌دهد. اپراتورهای λ_{10} و λ_{11} به‌دنبال بهبود جواب در همسایگی‌اند.





شکل٤. روش تعویضλ برای بهبود جواب‌ها



شکل ۵. روش 2-opt^*

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 وسیلهٔ نقلیه در آن دو گره (مشتری) را با یکدیگر تعویض کنید. اگر این تعویض هزینهٔ 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 فاصلهٔ این دو گره از یکدیگر از مقدار مشخص، ρ بیشتر نباشد. دلیل استفاده از این مقدار جلوگیری از انتخاب گره‌های با فاصلهٔ 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. درصورتی که این تغییر سبب صرفه‌جویی شود ذخیره کنید. الگوریتم را تا وقتی که تمامی زوج گره‌های داخل دو تور انتخاب نشده‌اند ادامه دهید (شکل ۵).

۵-٤- 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.

٦- 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، چندپویی و یک‌دپویی، پنجرهٔ زمانی و ترکیبات آنها) است که با توجه به مدل مورد بررسی نمونه مسائل مسیریابی وسایل نقلیهٔ چندپویی استفاده شده است. مسائل مسیریابی وسایل نقلیهٔ چندپویی 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,y) و تعداد تقاضای هر مشتری است. شایان ذکر

است که محاسبهٔ فاصلهٔ بین مشتریان به‌صورت فاصلهٔ اقلیدسی درنظر 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 وسیلهٔ نقلیه است، تعداد دپوها نیز چهار تا است و در هر دپو چهار وسیلهٔ نقلیه و در نتیجه در مجموع شانزده وسیله داریم. در این بخش ۳۳ مسئله از نمونه مسائل کوردیو با ابعاد مختلف با الگوریتم فراابتکاری به‌کار گرفته شده است که برای اعتبارسنجی آن با اعمال تغییراتی ۱٦ مسئله ساخته شده و توسط نرم‌افزار لینگو بررسی شده است.

٦-۱- نتایج محاسباتی در ابعاد کوچک

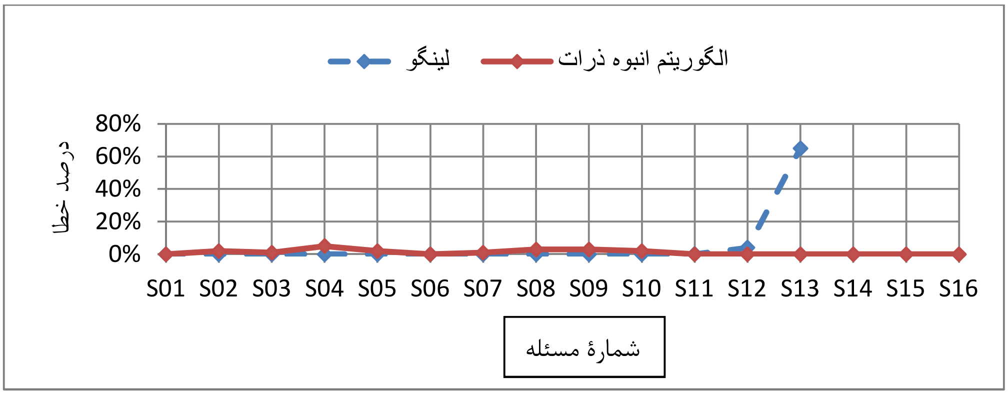
در این بخش شانزده نوع نمونه مسئله، با اعمال تغییرات در مسائل کوردیو، با ابعاد مختلف ساخته شده و با نرم‌افزار لینگو بررسی شده است. ساختار مسائل نمونهٔ کوردیو تصحیح‌شده با ابعاد کوچک در جدول ۲ نشان داده شده است. در این ساختار، برای رسیدن به ابعاد کوچک، تعدادی از مشتریان حذف شده و همچنین ظرفیت وسیلهٔ نقلیه، با توجه به شاخص Tightness، ۸۰ درصد تقاضای مشتریان درنظر گرفته شده است. شایان ذکر است که محاسبهٔ فاصلهٔ بین مشتریان به‌صورت فاصلهٔ اقلیدسی در نظر گرفته شده است. همچنین در این مسائل تعداد وسایل نقلیه با تعداد دپوها یکسان درنظر گرفته شد.

٦-۱-۱- مقایسهٔ نتایج محاسباتی در ابعاد کوچک

بیشترین میانگین خطای محاسباتی برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای مسائل کوردیو، ۵ درصد است که مربوط به مسئلهٔ S04 است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین خطا در نرم‌افزار Lingo برابر ٦۵ درصد برای مسئلهٔ S13 است؛ درحالی که میانگین خطا برای الگوریتم PSO ۲ درصد است. اختلاف میانگین خطای محاسباتی بین نرم‌افزار لینگو و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در مسائل کوردیو ٤ درصد است که نشان‌دهندهٔ توانایی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی است. شکل ٦ میانگین خطای دو روش در ۱٦ مسئلهٔ تولیدشده را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نرم‌افزار لینگو پس از یک ساعت حل قطع شده و نتایج گزارش شده است.

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

الگوریتمPSO			نرم‌افزار لینگو			ساختار مسائل ساخته‌شده با ابعاد کوچک				
خطا (درصد)	زمان ثبت	کیفیت جواب	خطا (درصد)	زمان	تابع هدف بهینه	تعداد دپو	تعداد نقاط بحران زده	تعداد وسیلهٔ نقلیه	تعداد بیمارستان	شمارهٔ مسئله
۰/۰۰	۹/۲۰۳	۳۳/٦	۰/۰۰	۰	۳۳/٦	۱	٤	۱	۲	S۰۱
۰/۰۲	۹/۲۰۹۸	٧٦/٦٧	۰/۰۰	۲	٧٦/۲٦	۱	۵	۱	۱	S۰۲
۰/۰۱	۹/۳۳٤۵	۸۲/۱	۰/۰۰	٧	۸۱/۲٦	۱	۵	۱	۲	S۰۳
۰/۰۵	۱۲/۸۸	۱۲/۲	۰/۰۰	۱۲	۱۱/٦٦	۲	٤	۲	۲	S۰٤
۰/۰۲	۹/٧۹	۹۲/۱٤	۰/۰۰	۵٦	۸۹/۹	۱	٦	۱	۲	S۰۵
۰/۰۰	۱۳/۳	۱٦	۰/۰۰	۹۹	۱٦	۲	۵	۲	۲	S۰٦
۰/۰۱	۱۰/٤۲	۱۱۱/۸	۰/۰۰	٤۳۸	۱۱۰/٦	۱	٧	۱	۲	S۰٧
۰/۰۳	۱۳/٧۳	۲٧/۸	۰/۰۰	٧۵۳	۲٦/۹	۲	٦	۲	۲	S۰۸
۰/۰۳	۱٤/۰٦	٦۰/۱	۰/۰۰	۳٦۰۰	۵۸/۲	۲	٧	۲	۲	S۰۹
۰/۰۲	۱٤/۳۳	٧۵/۱٤	۰/۰۰	۳٦۰۰	٧۳/٧	۲	۸	۲	۲	S۱۰
۰/۰۰	۱٤/٦۱	۲۳٤/٧۸	۰/۱۰	۳٦۰۰	۲۵۹/۲	۲	۹	۲	۳	S۱۱
۰/۰۰	۲۰/٦٧	۳۱۱/۱۸	۰/۰٤	۳٦۰۰	۳۲٤/۹	۳	۹	۳	۳	S۱۲
۰/۰۰	۱٤/۵٧	۱٤۲/٤۲	۰/٦۵	۳٦۰۰	۲۳۵/۵۵	۳	۱۲	۳	۳	S۱۳
۰/۰۰	۱٧/۹۱	۱۹۰/٧۱	–	۳٦۰۰	–	۱	۱۲	۱	۱	S۱٤
۰/۰۰	۱۵/۵۸	۸۲/٤۲	–	۳٦۰۰	–	۲	۱۲	۲	۱	S۱۵
۰/۰۰	۲۲/۰۳	۲۸/۲۸	–	۳٦۰۰	–	۱	۱۵	۱	۱	S۱٦
۰/۰۲	۱۳/۸۵	۹۸/٧٧	۰/۰٦	۱۸۸۵/۵٦	۱۰٧/۵					میانگین



شکل ٦. 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 نمونهٔ مسائل کوردیو

همچنین، زمان‌های حل الگوریتم‌های استفاده برای حل مدل پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر قابل قبول است، به‌طوری که حداکثر زمان حل با الگوریتم PSO در مسئلهٔ S16 است که ۲۲/۰۳ ثانیه است. نرم‌افزار لینگو برای مسائل کوچک‌مقیاس، در مدت زمان مناسبی جواب بهینه به‌دست می‌دهد؛ اما با بزرگ‌تر شدن این مسائل زمان رسیدن به جواب به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد، به‌طوری 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 ١٦ مسئلهٔ تولیدشدهٔ کوردیو را نشان می‌دهد.

٦-٢- نتایج محاسباتی در ابعاد بزرگ

در این بخش ۳۳ نوع نمونه از مسائل کوردیو مسیریابی وسایل نقلیهٔ چندپویی به‌کار گرفته و با الگوریتم PSO و IPSO بررسی شده است. جدول ۳ جواب‌های ارایه‌شده توسط PSO و IPSO برای ۳۳ مسئلهٔ کوردیو را نشان می‌دهد. در ستون اول این جدول نام مسئله و در ستون‌های دوم و سوم 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.

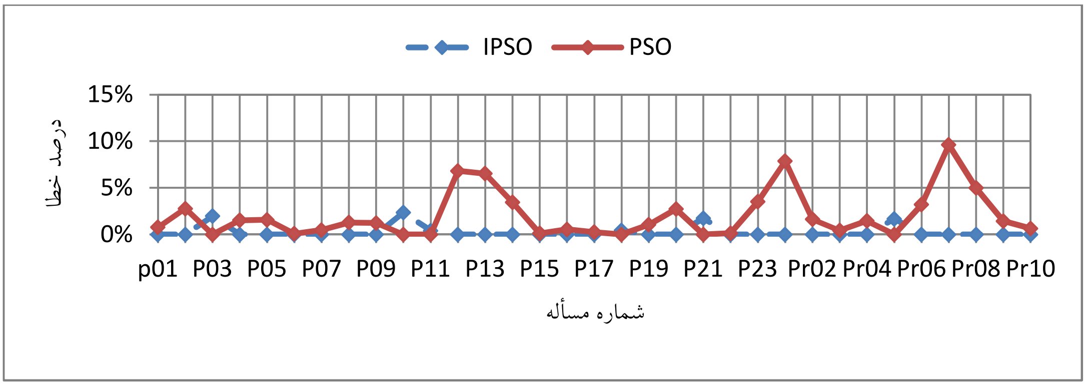
٦-٢-١- مقایسهٔ نتایج محاسباتی در ابعاد بزرگ

میانگین خطای محاسباتی برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای مسائل کوردیو برابر ۲.۰۰ درصد و برای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته برای مسائل کوردیو برابر ۰.۲٦ درصد است. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهتر است، به‌طوری که اختلاف میانگین خطای محاسباتی بین دو الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته در مسائل کوردیو ۱/۷٤ درصد است. شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب برای ۳۳ مسئله نشان‌دهندهٔ میانگین کلی خطای محاسبه‌شده و زمان حل تمام مسائل کوردیو در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته است.

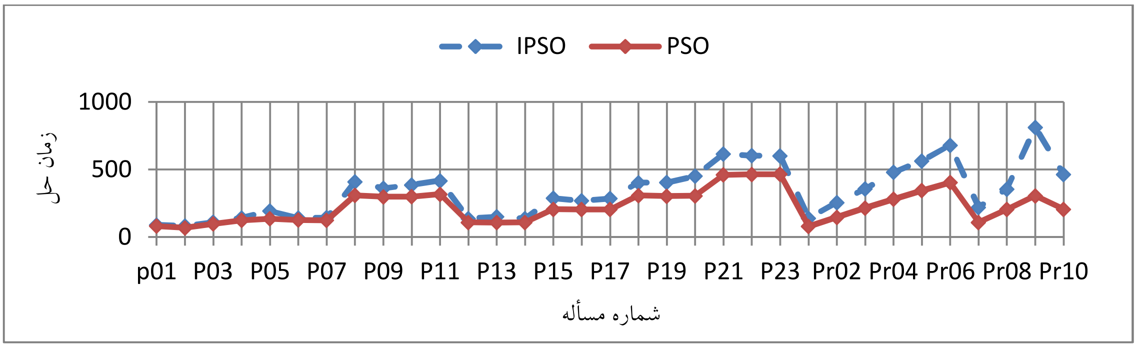
جدول ۳. نتایج محاسبهٔ کیفیت و زمان با تکرار ۱۰۰ توسط الگوریتم‌های IPSO و PSO برای ۳۳ مسئلهٔ کوردیو

مشخصات ۳۳ مسئلهٔ کوردیو				PSOالگوریتم			IPSO0الگوریتم		
مسئله	تعداد دپو	تعداد نقاط بحران‌زده	تعداد وسیلهٔ نقلیه	کیفیت جواب	زمان حل	خطا	کیفیت جواب	زمان حل	خطا
P٠١	٤	٥٠	٤	٧٨/٩٤	٨١/١٤	٠/٧٦	٧٥/٥١	٨٩/٢٦	٠/٠٠
P٠٢	٤	٥٠	٢	١١٣/٨١	٦٨/٣٣	٢/٧٨	١١٠/٧٤	٨١/٨٣	٠/٠٠
P٠٣	٥	٧٥	٣	١١١/٧٥	٩٧/٤٩	٠/٠٠	١١٣/٩٦	١٠٩/٨٤	١/٩٧
P٠٤	٢	١٠٠	٨	١٥٢/٥٦	١٢٣/٧٥	١/٥٢	١٥٠/٢٨	١٤١/٧٢	٠/٠٠
P٠٥	٢	١٠٠	٥	١٨٧/٥٧	١٣٥/٢٣	١/٥٧	١٨٤/٦٧	١٩٢/٧٩	٠/٠٠
P٠٦	٣	١٠٠	٦	١٣١/٥٤	١٢٦/٥٠	٠/٠٧	١٣١/٤٥	١٤٠/٨١	٠/٠٠
P٠٧	٤	١٠٠	٤	١٥٠/٠٠	١٢٣/٨٥	٠/٤٨	١٤٩/٣	١٤٢/٣٤	٠/٠٠
P٠٨	٢	٢٤٩	١٤	٥٨٧/٩٠	٣٠٨/٢٨	١/٢٨	٥٨٠/٤٦	٤٠٩/٤١	٠/٠٠
P٠٩	٣	٢٤٩	١٢	٥٢٣/٣٨	٢٩٧/٦٩	١/٢٢	٥١٧/٠٦	٣٦٠/١١	٠/٠٠
P١٠	٤	٢٤٩	٨	٥٥٧/٧٩	٢٩٩/٥٣	٠/٠٠	٥٧٠/٩٧	٣٨٥/٤٨	٢/٣٦
P١١	٥	٢٤٩	٦	٥٨٩/٥٠	٣١٦/٤٠	٠/٠٠	٥٩١/٨٨	٤١٦/٢٩	٠/٤٠
P١٢	٢	٨٠	٥	٣٦٧/٩٦	١٠٨/٨٧	٦/٨٢	٣٤٤/٤٧	١٣٧/١٦	٠/٠٠
P١٣	٢	٨٠	٥	٣٧٢/٦٩	١٠٧/٠٦	٦/٥٣	٣٤٩/٨٤	١٤٩/٨٤	٠/٠٠
P١٤	٢	٨٠	٥	٣٧٥/٣٥	١٠٨/٠٦	٣/٤٦	٣٦٢/٧٨	١٣٧/٢٦	٠/٠٠
P١٥	٤	١٦٠	٥	٥٨٣/٧٨	٢٠٥/٧٨	٠/١٢	٥٨٣/٠٧	٢٨٧/١٥	٠/٠٠
P١٦	٤	١٦٠	٥	٥٨٥/٠١	٢٠٤/١١	٠/٥٤	٥٨١/٨٩	٢٦٨/٣٠	٠/٠٠
P١٧	٤	١٦٠	٥	٥٦٧/٦٧	٢٠٣/٨٧	٠/٢٥	٥٦٦/٢٦	٢٨٤/٩٥	٠/٠٠
P١٨	٦	٢٤٠	٥	٧٥٣/٣٣	٣٠٧/٥٧	٠/٠٠	٧٥٦/٥٥	٤٠٢/٦٧	٠/٤٣
P١٩	٦	٢٤٠	٥	٧٦٩/٨٦	٣٠٢/٧٢	١/٠٤	٧٦١/٩٦	٤٠٣/٨١	٠/٠٠
P٢٠	٦	٢٤٠	٥	٧٧٩/٢١	٣٠٥/٤٢	٢/٧١	٧٥٨/٦٣	٤٥٠/٦٠	٠/٠٠
P٢١	٩	٣٦٠	٥	١٠٠٠/٥٦	٤٥٩/٧٢	٠/٠٠	١٠١٧/٧٩	٦١٥/١٤	١.٧٢
P٢٢	٩	٣٦٠	٥	٩٦٧/٥٣	٤٦٣/٢٨	٠/١٣	٩٦٦/٢٩	٦٠١/٧٢	٠/٠٠
P٢٣	٩	٣٦٠	٥	١٠٥٥/٥٨	٤٦٥/٣٥	٣/٥٣	١٠١٩/٦	٦٠١/٢٢	٠/٠٠
Pr٠١	٤	٤٨	١	٣٦٣/٤٣	٧٩/٠٨	٧/٨٦	٣٣٦/٩٥	١٣٩/٠٢	٠/٠٠
Pr٠٢	٤	٩٦	٢	٣٦٤/٧٤	١٤٦/٣١	١/٦٢	٣٥٨/٩٣	٢٥٥/٦٥	٠/٠٠
Pr٠٣	٤	١٤٤	٣	٥٠٢/٦٢	٢١٥/٣٥	٠/٤٢	٥٠٠/٥٤	٣٥٦/٣٥	٠/٠٠
Pr٠٤	٤	١٩٢	٤	٤٧٢/١٧	٢٨٠/٣٥	١/٤٥	٤٦٥/٤٣	٤٧٨/٩٩	٠/٠٠
Pr٠٥	٤	٢٤٠	٥	٤٥٦/٨٣	٣٤٤/٣٧	٠/٠٠	٤٦٤/٥١	٥٦٣/٥٠	١/٦٨
Pr٠٦	٤	٢٨٨	٦	٥٠٩/٨٢	٤٠٣/٧٢	٣/٢٠	٤٩٤/٠٣	٦٧٨/٩٩	٠/٠٠
Pr٠٧	٦	٧٢	١	٤٢٥/٥٢	١٠٨/٩٤	٩/٦٢	٣٨٨/١٩	٢٢٠/١٤	٠/٠٠
Pr٠٨	٦	١٤٤	٢	٤٥٧/٧٦	٢٠٤/٦٢	٤/٩٨	٤٣٦/٠٥	٣٥٤/٧٨	٠/٠٠
Pr٠٩	٦	٢١٦	٣	٤٧٧/١١	٣٠٤/٨٩	١/٤٣	٤٧٠/٣٩	٨١١/٣٨	٠/٠٠
Pr١٠	٦	٢٨٨	٤	٢٠٨٩٦/٢٢	٤٠٧/٢٨	٠/٦٥	٤٥٠/٥٤	٦٩٩/٧٨	٠/٠٠
میانگین				٤٨٠/١٠	٢٢٧/٦٩	٢/٠٠	٤٧٣/٠٤	٣٣٧/٢٩	٠/٢٦

شایان ذکر است که بیشترین خطا برای الگوریتم PSO ۹/٦۲ درصد و متعلق به مسئلهٔ Pr07 است و بیشترین خطا برای الگوریتم IPSO ۲/۳٦ درصد و متعلق به مسئلهٔ P10 است. همان‌طور که در شکل ٤-۳ 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 که حداکثر زمان حل برای مسئلهٔ Pr09 است که الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته با زمان ۸۱۱/۳۸ ثانیه و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با زمان ۳۰٤/۸۹ آن را حل کرده است. با بررسی ۳۳ مسئله درمی‌یابیم که میانگین زمان حل الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با اختلاف ۱۰۹/٦ سریع‌تر از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهبودیافته عمل می‌کند.



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



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

۷- نتیجه‌گیری

در شرایط بلایای طبیعی، مانند وقوع سیل و زلزله، عدم امدادرسانی به‌موقع، صدمات جانی جبران‌ناپذیری وارد کرده است؛ ازاین‌رو امدادهای بشردوستانه برای رساندن افراد مجروح از نقاط بحران‌زده به مراکز پزشکی ضروری و مهم به‌نظر می‌رسد. از این بین پیدا کردن مسیرهای مناسب، دغدغهٔ ذهنی بسیاری از مدیران است. مسیریابی در شرایط بلایای طبیعی از جمله مسائلی است که فرض داشتن چندین دپو موجب کارامد بودن عملیات امدادرسانی می‌شود. در این مقاله، مسئلهٔ مسیریابی چنددپو در شرایط بلایای طبیعی با درنظر گرفتن چند نقطهٔ استقرار و چند مرکز امداد بررسی شده است. برای رسیدن به غایت امید به بهبود مجروح، فرضیات محدودیت‌های امدادی در شرایط بلایای طبیعی با هدف کمینه‌سازی زودترین زمان رسیدن وسیلهٔ نقلیه به دپوی بیمارستان در نظر گرفته شده است. در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی و حل مدل پیشنهادی نمونه مسائل مسیریابی وسیلهٔ نقلیهٔ 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 λ روش تقاطع و روش جایگزینی، ضمن افزایش زمان محاسبات، تأثیر معناداری بر کیفیت جواب‌ها داشته است.

۸- منابع

- 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 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).