یک روش ابتکاری برای یک مسئله‌ی دو هدفه حمل و نقل با کاربرد در مواقع بحران

رضا اشتهادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مجید سالاری، دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سمیه الهیاری، دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msalari@um.ac.ir
دریافت: 1395/09/18 – پذیرش: 1396/02/15

چکیده

بحران‌های ناشی از حوادث طبیعی به علت گستردگی حوزه‌ی اثر و ناگهانی بودن، شرایطی ایجاد می‌کنند که فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت را برای مدیران دشوار می‌سازند. در چنین مواقعی معمولاً به علت اتخاذ تصمیمات شتاب‌زده، بخش قابل توجهی از منابع سازمانی و ملّی به صورتی ناکارآمد به هدر رفته؛ اثربخشی و کارایی خدمات ارائه شده به شکل محسوسی کاهش می‌یابد. از این رو بهره‌گیری از روش‌هایی که توانایی ارائه‌ی راهکارهای بهینه در موضوعاتی مانند امدادرسانی به آسیب‌دیدگان و به طور خاص حمل و نقل کالاهای امدادی را داشته باشند، اهمیت ویژه‌ای دارد. مسئله‌ی ارائه شده در این مقاله به بیان مدلی با رویکرد سیاست بهینه برای امدادرسانی و با دو هدف 1) حداکثرسازی مجموع ارزش تقاضای تحویل داده شده به آسیب‌دیدگان و 2) حداقل‌سازی هزینه‌ی امدادرسانی (زمان یا مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه‌ی امدادی) می‌پردازد. از جمله فرضیات کاربردی این مسئله، عدم امکان امدادرسانی مستقیم به برخی از نقاط به علت در دسترس نبودن راه‌های ارتباطی می‌باشد؛ لذا تعدادی از نقاط با تحت پوشش قرار گرفتن توسط نقاط ملاقات‌شده، خدمت خود را دریافت می‌کنند. به منظور حل مسئله، یک الگوریتم ترکیبی با تلفیق روش‌های «جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی (ALNS)[1]» و «جستجوی محلی چند هدفه (MDLS)[2]» تحت نام ALNS×MDLS مطرح شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی کارایی روش ارائه شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: لجستیک، مدیریت بحران، ALNS، MDLS

1- مقدمه

ماهیت ناگهانیِ بحران‌های ناشی از حوادث طبیعی (زلزله، سیل، طوفان و...) و غیر طبیعی (جنگ، حوادث تروریستی و صنعتی، تصادفات جاده‌ای و ...) صدمات چشم‌گیری بر جان و مال انسان‌ها وارد کرده و منجر به بروز تهدیدات گوناگونی در حوزه‌های مختلف ملی و فراملی می‌شود. به طور میانگین سالیانه حدود 500 سانحه‌ی طبیعی و غیر طبیعی رخ می‌دهد که باعث مرگ 75000 نفر می‌شود و بر زندگی بیش از 200 میلیون نفر اثر می‌گذارد (Van Wassenhove 2005) و تنها در سال 2008، مجموعاً 240500 نفر، جان خود را در اثر این‌گونه حوادث از دست داده‌اند (Enz 2009). اجرای عملیات صحیح و تصمیم‌گیری سریع در هنگام وقوع بحران تحت عنوان مدیریت بحران، همواره مورد توجه دولت‌ها بوده است. مدیریت بحران شامل چهار مرحله (پیش‌گیری، آمادگی، پاسخ و بهبود) است که در طول چرخه عمر سانحه اتفاق می‌افتد (Altay and Green Iii 2006). لجستیک بحران (مهم‌ترین جنبه‌ی فاز پاسخ از مراحل چهارگانه‌ی مدیریت بحران)، مهم‌ترین نقش را در عملیات بشردوستانه ایفا می‌کند (Van Wassenhove 2005). با این حال، برنامه‌ریزی سیستماتیک لجستیک در حوزه‌ی بحران معمولاً نادیده گرفته می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به زلزله‌ی «هائیتی» در سال 2010 اشاره نمود که در نتیجه‌ی

فقدان کارشناس برنامه‌ریزی، فعالیت‌های امدادی به تأخیر افتاد و بسیاری از کمک‌ها تحویل داده نشد (Hake January 15, 2010).

عملیات مربوط به لجستیک بحران را می‌توان به دو دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی نمود: 1- عملیات قبل از وقوع حادثه مانند مکان‌یابی تسهیلات[3]لازم ((Jia et al. 2007) و (Dessouky et al. 2006)) و پیش جایگذاری موجودی‌ها[4] ((Rawls and Turnquist 2010) و (Rawls and Turnquist 2012))؛ 2- عملیات بعد از وقوع حادثه برای کنترل و تثبیت شرایطِ منطقه‌ی حادثه‌دیده مانند عملیات لجستیکی شاملِ توزیع کالاهای امدادی[5]و مسیریابی وسایل نقلیه ((Dessouky et al. 2006)، (Rawls and Turnquist 2010)، (Rawls and Turnquist 2012) و (Mete and Zabinsky 2010)) و حمل و نقل مجروحین[6] ((Barbarosoğlu et al. 2002) و (Yi and Kumar 2007)).

یک جزء اساسی و چالش برانگیز در هنگام وقوع بحران، توزیع خدمات و کالاهای امدادی در کمترین زمان ممکن به حادثه دیدگان است. با توجه به اهمیت بالای توزیع کالاهای حیاتی امدادی بین حادثه دیدگان، در این مقاله، بر لجستیک بحران تمرکز کرده و به ارائه‌ی مدلی جدید و کاربردی در رابطه با نحوه‌ی امدادرسانی به آسیب‌دیدگان یا به عبارتی مسیریابی وسایل نقلیه‌ی امدادی پس از وقوع بحران و حل آن می‌پردازیم.

به طور کلی«مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP)[7]» در حالت کلاسیک به دنبال مسیریابی تعدادی از وسایل نقلیه، از یک انبار برای ارسال کالاها و خدمات تحت قیودی مشخص (مانند ظرفیت انبارها یا وسایل نقلیه و محدودیت طول مسیرها)، با هدف کمینه کردن هزینه‌ها (همچون هزینه‌های مسیریابی، هزینه‌های ثابت و متغیر وسایل نقلیه) می‌باشد. تاکنون مقالات و کتب بسیاری وقف این مسئله شده‌اند. از آن جمله می‌توان به کتاب (Golden et al. 2008) و مقاله‌ی مروری جامع (Eksioglu et al. 2009)، اشاره نمود.

«مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با مسیرهای باز (OVRP)[8]» نوعی از مدل کلاسیک VRP است که بجای یافتن دورهای همیلتونی (مسیرهای بسته‌ای از گره‌های گراف)، به دنبال یافتن مسیرهای همیلتونی (مسیرهای بازی از گره‌های گراف) می‌باشد. با توجه به دانش ما، مرجع (Schrage 1981)، اولین مقاله‌ای است که به بررسی مسائل مسیریابی واقعی پرداخته و OVRP را مطرح نمود. روش‌های دقیق و ابتکاری متنوعی برای حل این مسئله مطرح شده‌اند؛ به عنوان مثال به مراجع (Pisinger and Ropke 2007)، (Li et al. 2007) و (Salari et al. 2010) اشاره می‌شود. از آنجایی که فرض در نظر گرفتن چند انبار به جای یک انبار در OVRP، کاربردی‌تر می‌باشد، «مسئله‌ی مسیریابی مسیرهای بازِ وسایل نقلیه از چندین انبار (MDOVRP)[9]» توسعه‌یافته است. به گونه‌ای که تنها دو مرجع (Tarantilis and Kiranoudis 2002) و (Liu et al. 2012) تاکنون وقف این مسئله شده‌اند.

از جمله کاربردهای دسته مسائل مسیریابی در شرایط اورژانسی می‌باشد. از دهه‌ی 1980 فعالیت در حوزه‌ی امور غیر منتظره و اضطراری با ارائه‌ی مدل مسیریابی در حوزه‌ی بحران توسط مرجع (Knott 1987)، شروع شده است. مرجع (Altay and Green Iii 2006)، به مرور تحقیقات OR/MS[10] در حوزه‌ی عملیات بحران پرداخته است. برای آگاهی بیشتر از کارهای انجام شده در حوزه لجستیک بحران به مقاله‌ی مروری (Caunhye et al. 2012)، مراجعه شود.

یکی از فرضیات پرکاربرد در مواقعِ بحران که منجر به پیچیده‌تر شدن مسئله نیز می‌شود، در نظرگرفتن پوشش در مسئله‌ی مسیریابی می‌باشد. گاهی به دلیل محدودیت‌های زمانی در ارسال کالاهای حیاتی امدادی و نیز عادلانه و کارامد بودن سیستم توزیع و همچنین تخریب راه‌های ارتباطی و یا محدودیت در تعداد و ظرفیت وسایل نقلیه امدادی موجود، ارسال مستقیم کالاها به کلیه‌ی نقاط تقاضا مقدور نبوده؛ لذا از مفهوم پوشش در مسئله‌ی مسیریابی استفاده می‌گردد. در این حالت امکان ملاقات کردن کلیه نقاط توسط وسیله‌ی نقلیه به طور مستقیم وجود ندارد؛ در نتیجه تقاضای نقاط به دو طریق مستقیم (ملاقات شدن با وسیله‌ی نقلیه) و غیر مستقیم (پوشش داده شدن با نقطه‌ی ملاقات شده)، تأمین می‌شود.

علی‌رغم کارهای بسیار بر روی هر یک از مسائل پوشش و مسیریابی به طور جداگانه در حوزه‌ی لجستیک بحران، تحقیقات بسیار کمی وقف ترکیب این مسائل شده است.

از جمله مسائلِ خانواده‌ی پوشش، می‌توان به «مسئله تور پوشش‌دهنده (CTP)[11]» (Gendreau et al. 1997) و «مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد پوشش‌دهنده[12] (CSP)» (Current and Schilling 1989) اشاره نمود که در آن‌ها فرض ملاقات شدن تمامی نقاط توسط وسایل نقلیه نادیده گرفته می‌شود.

CSP با توجه به گرافِ جهت‌دارِ داده شده‌ی $G = (N, A)$، به دنبال تعیین مسیر همیلتونی با حداقل هزینه‌ی تشکیل شده بر روی یک زیر مجموعه از نقاط متعلق به N است؛ به طوری که هر نقطه‌ی $i \in N$ که توسط وسیله‌ی نقلیه ملاقات نشده، در فاصله‌ی پوششیِ از پیش تعیین شده‌ی d_i، از یک نقطه‌ی ملاقات شده، قرار گیرد. در CTP که توسعه‌یافته‌ای از CSP نیز می‌باشد، مجموعه‌ی گره‌ها به دو زیرمجموعه N_1 و N_2 تقسیم می‌شود $(N = N_1 \cup N_2)$؛ N_1 مجموعه گره‌هایی است که باید پوشش داده شوند و N_2 نیز مجموعه گره‌هایی است که می‌توانند ملاقات شوند که در آن، مجموعه‌ی نقاطِ $T \subseteq N_1$، باید ملاقات شوند.

برای ذکر کاربردهایی از در نظر گرفتن پوشش در مسئله‌ی مسیریابی به مراجع ((Nolz et al. 2010)، (Hodgson et al. 1998)، (Doerner et al. 2007)، (FEMA 2008) و (Naji-Azimi et al. 2012)) اشاره می‌شود. به عنوان مثال، مرجع (Nolz et al. 2010)، به مدل‌سازی مسئله‌ی مسیریابی و جایابی سیستم‌های انتقال آب پرداخته است. ایستگاه‌های قابل حمل آب به جای انتقالِ مستقیم به افراد نیازمند، باید تنها به مناطق مرکزی ارسال شوند. این امر به صورت یک مسئله‌ی CTP با چند وسیله‌ی نقلیه (شامل مسیریابی و جایابی تانکرها) مدل‌سازی شده است؛ به طوری که در آن مسیرهایی برای جایابی تانکرها در نقاط قابل دسترس ساخته می‌شود. مراجع (Hodgson et al. 1998) و (Doerner et al. 2007)، نیز به مدل‌سازی مسائلِ CTP پرداخته‌اند. کاربرد مسئله آنها در واقع مسیریابی یک تجهیز قابل حمل بهداشتی است که در مکان‌های مختلف توقف می‌کند و افرادی که در مناطق اطراف هستند، برای ارضای نیازشان به آن مراجعه می‌کنند.

مرجع (Hodgson et al. 1998) برای خدمت‌رسانی به مراکز جمعیت، یک تابع هدف چند معیاره را برای 1- کمینه کردن مجموع زمان سفر 2- کمینه کردن تعداد ایستگاه‌های پوشش یافته توسط تور و 3- بیشینه کردن کل جمعیت بر روی تور در نظر می‌گیرد. در این مدل در تابع هدف، وزن معیار اول از وزن معیار دوم و نیز وزن معیار دوم از وزن معیار سوم بسیار بیشتر در نظر گرفته شده است. مرجع (Doerner et al. 2007) به ارائه‌ی یک برنامه‌ریزی خطی سه هدفه با اهداف 1) اثربخشی به کارگیری نیروی کار (با محاسبه‌ی نسبت زمان غیر مفید از لحاظ پزشکی) 2) میانگین در دسترس‌پذیری (با محاسبه‌ی میانگین مسافت طی شده توسط اعضای جمعیت، به طور پیاده تا نزدیکترین ایستگاه) و 3) پوشش (با محاسبه‌ی نسبت جمعیت ساکن و ناتوان در خدمت‌گیری از نزدیکترین ایستگاه در شعاعی کوچکتر از یک شعاع بیشنه‌ی مشخص) می‌پردازد.

مسئله‌ی CTP، در بسیاری از مسایل عملیاتی ارسالی آخرین مسیر[13]، قابل کاربرد است؛ چنانکه کالاها و خدمات اغلب به مناطق مرکزی که افراد نیازمند به آنجا مراجعه می‌کنند، ارسال می‌شوند. مثلاً در آمریکا پس از وقوع یک بحران، همان‌گونه که در راهنمای IS-26 در رابطه با اصولِ توزیع (FEMA 2008)، توضیح داده شده است؛ FEMA[14] به تعیین تعدادی از نقاطِ توزیعِ موقت می‌پردازد، به طوری که افراد نیازمند برای دریافت کالا به آنجا مراجعه کنند. یک مسئله‌ی CTP، را می‌توان برای جایابی اولیه‌ی این نقاطِ توزیعِ موقت و مسیریابی کالاهای مورد نیاز به کار برد.

در مرجع (Naji-Azimi et al. 2012)، نیز به مکان‌یابی مراکز توزیع ماهواره‌ای[15] و چگونگیِ تأمینِ موجودی آن‌ها از طریق انبار مرکزی برای مسیریابی کالاهای امدادی به مصدومین و افراد آسیب‌دیده می‌پردازد. از آنجایی که برای تیم‌های امدادی امکانِ بازدید از مکان‌های سکونت همه‌ی مصدومین میسر نمی‌باشد، این مسئله به صورت CTP فرموله شده است.

سیستم‌های توزیع عمومی در حالت کلاسیک، عموماً براساس اهداف اقتصادی و محدودیت‌های قطعی تعریف شده، به طوری که در آن‌ها باید تمام تقاضای مشتریان برآورده شوند و رایج‌ترین تابع هدفِ مدل‌های امدادی، یعنی حداقل کردن تقاضای پوشش داده نشده، در مدل‌های کلاسیک کاربرد چندانی ندارد. اغلب مدل‌های مسائلِ امدادی با توجه به محدودیت‌ها و اهداف متفاوت و سیاست‌های تساوی طلبی که در این مسایل وجود دارد، از ترکیبِ دو یا چند تابع هدف به طور همزمان استفاده می‌کنند. به عنوان مثال به مراجع (Nolz et al. 2010) و (Van Hentenryck et al. 2010) اشاره می‌شود.

در مرجع (Nolz et al. 2010)، نیز یک مسئله‌ی چند هدفه‌ی CTP (MOCTP)[16] مورد بررسی قرار گرفته است که در آن کمینه‌سازی سه هدف (به صورت دو مسئله دو هدفه با اهداف 1 و 2 و سپس اهداف 1 و 3) مورد نظر است: 1- ترکیبی از معیار کمینه- مجموع[17] جایابی تسهیلات (یعنی مجموع فواصل بین همه‌ی گره‌ها و فواصل هر گره تا نزدیک‌ترین تسهیل باز به آن گره) و معیار جایابی پوشش

بیشینه[18] (یعنی تعداد گره‌های ناتوان در دستیابی به یک تسهیل در یک حداکثر فاصله‌ی از پیش تعریف شده)، 2- طول کل تور و 3- دیرترین زمان رسیدن به یک گره. از جمله فرضیات این مسئله، در نظر گرفتن یک انبار مرکزی و یک مجموعه از وسایل نقلیه‌ی مشابه و امکان تأمین تقاضای هر گره تنها توسط یک وسیله‌ی نقلیه می‌باشند. در انتها نیز یک روش فراابتکاری با ترکیب 1- الگوریتم ژنتیک 2- جستجوی متغیر همسایگی[19] و 3- اتصال مجدد مسیر[20] پیشنهاد گردیده است.

در مرجع (Van Hentenryck et al. 2010)، یک مسئله‌ی چند هدفه برای مواقع بحران مطرح شده و برای حل آن به ارائه‌ی یک الگوریتم ترکیبی چند مرحله‌ای[21] پرداخته شده است. توابع هدف در نظر گرفته شده عبارتند از: 1- حداقل کردن هزینه سرمایه اولیه، 2- حداقل کردن حداکثر فاصله، 3- حداقل کردن مقدار تقاضاهای تأمین نشده و 4- حداقل کردن هزینه نگهداری. این مرجع با فرض تک کالایی، محدودیت بودجه، وجود یک انبار، در نظر گرفتن تقاضا، منابع و زمان سفر احتمالی با تعریف سناریوهای متفاوت حل شده است.

نوآوری پژوهش ما، تعیین برنامه‌ی عملیاتی امدادرسانی وسایل نقلیه در ترکیب مسئله‌ی MDOVRP و مسئله‌ی پوشش[22] می‌باشد که در آن، دو هدفِ 1) حداکثرسازی مجموع ارزش تقاضای تحویل داده شده به آسیب‌دیدگان و 2) حداقل سازی حداکثر هزینه‌ی امدادرسانی (زمان یا مسافت حمل هر یک از وسایل نقلیه‌ی امدادی)، در نظر گرفته شده است.

باقیمانده‌ی این مقاله، به صورت زیر سازماندهی می‌شود: در بخش 2، به معرفی و مدل‌سازی مسئله می‌پردازیم. در بخش 3، یک روش ابتکاری ترکیبی را برای حل مسئله ارائه می‌دهیم؛ در بخش 4 به توضیح روش تولید داده و نتایج محاسباتی می‌پردازیم. در نهایت بخش 5 نیز شامل جمع‌بندی و نتیجه-گیری می‌باشد.

2- پیشینه تحقیق

با توجه به گستره جغرافیاییِ حوادث طبیعی، اغلب اوقات نیاز به هر نوع کالا و ضرورت رسیدن آن در مناطق مختلف شهری و روستایی متفاوت است. این نکته به ویژه در کشورهای در حال توسعه و جهان سوم که رعایت استانداردهای شهری و عمرانی در سطح پایین‌تری قرار دارد، محسوس‌تر خواهد بود. به طور مثال، در صورت وقوع احتمالی زمین‌لرزه در شهر مشهد، به دلیل اختلاف شدید در شرایط فرهنگی، اقتصادی، عمرانی و حتی آب و هوایی در مناطق مختلف شهری و روستایی این شهر و نواحی همسایه که احتمالاً دچار آسیب شده باشند، نیاز به کالاهای مختلف امدادی و اهمیت هریک در نقاط گوناگون متفاوت خواهد بود. با توجه به این ضرورت و محدودیتِ امکانات در صورت وقوع سانحه به ویژه در 48 ساعت ابتدایی، ما در این مسئله به تعریف مفهومِ ارزشِ متغیرِ واحد کالا پرداخته و بر آنیم که به عنوان هدف اول مسئله، مجموع ارزش کسب شده را حداکثر کنیم. این ارزش می‌تواند شاخصی از ضرورت آن کالا در هر منطقه یا رضایت کسب شده‌ی آسیب‌دیدگان از دریافت آن کالا باشد. به عنوان مثال در حالی‌که یکی از اساسی‌ترین کالاهای امدادی آب آشامیدنی می‌باشد، ارزش آن در مناطق شهری و روستایی با توجه به میزان برخورداری از منابع آبی طبیعی، همچنین شرایط آب و هوایی، ترکیب سنی آسیب‌دیدگان و تراکم مصدومین متفاوت خواهد بود؛ از طرفی ضرورت داروهای امدادی و خدمات پزشکی نیز با توجه به شدت مصدومیت مجروحان مناطق مختلف، که خود می‌تواند تحت تأثیر میزان مقاومت ساختمان‌های آن منطقه باشد، متفاوت می‌باشد.

مسائل VRP در حالت کلی به دنبال تأمین تقاضا با هدف کمینه‌کردن «مجموع مسافت طی شده» می‌باشند، در حالی که در هنگام وقوع بحران یک جزء بحرانی و چالش برانگیز، توزیع خدمات و کالاهای امدادی در کمترین زمان ممکن به بیشترین تعدادِ حادثه دیدگان است. مرجع (Campbell et al. 2008)، با تمرکز بر روی زمان‌های امدادرسانی، نشان می‌دهد که انتخاب هدف بر نحوه‌ی توزیع کمک‌ها تأثیر می‌گذارد. در این مسئله با جایگزین کردن تابع هدف با کمینه‌کردن «دیرترین زمان تحویل» و کمینه کردن «مجموع زمان‌های امدادرسانی»، نویسنده نشان می‌دهد که سرعت خدمت‌رسانی در مقایسه با تابع هدف کمینه‌کردن «مجموع مسافت طی شده»، بیشتر است. در مراجع (Nolz et al. 2010) و (Van Hentenryck et al. 2010)، نیز دیرترین زمان رسیدن کالا و مجموعِ تقاضاهای تأمین نشده کمینه می‌شود. مسئله‌ی ما نیز به عنوان هدف دوم، به دنبال کمینه کردنِ حداکثر هزینه‌ی حمل و نقل (زمان یا مسافت حمل) هر یک از وسایل نقلیه است. این هدف در رعایت عدالت در زمان رسیدن کالاهای امدادی به نقاط آسیب‌دیده، مؤثر می‌باشد.

توزیع کالاهای امدادی (مانند آب، غذا، دارو و نیازهای حیاتی)، بلافاصله پس از وقوع بحران آغاز می‌شود. کالاهای مورد نیاز برای آسیب‌دیدگان در پناهگاه‌ها یا انبارهایی با مکان و موجودی مشخص برای هر کالا قرار داشته، یا از شهرها و حتی کشورهای دیگر به این مکان‌ها انتقال می‌یابند. در مسئله‌ی ما این مکان‌ها به عنوان انبارهایی با موجودی معین در نظر گرفته شده‌اند. در هر انبار تعدادی وسیله‌ی نقلیه با ظرفیت معین، موجود بوده که با شروع از انبارها، کالاهای امدادی را از انواع مختلف به نقاط حادثه دیده ارسال می‌کنند. اجناس امدادی می‌توانند انواع مختلفی از محصولات همچون آب، غذا، چادر، داروهای تخصصی و یا تجهیزات پزشکی باشند. برخی از مقالات در حوزه‌ی بحران ارسال چندین نوع کالا را در نظر می‌گیرند و تقاضا و برخی ویژگی‌های هر نوع محصول را به طور مجزا تعیین می‌کنند (به عنوان مثال (Naji-Azimi et al. 2012) و (Tzeng et al. 2007)). مسئله‌ی ما نیز به صورت چند کالایی با تقاضا و ضریب ارزش متفاوت برای هر نوع کالای هر نقطه و وزنِ واحدِ مشخص برای هر نوع کالا، فرموله شده است.

از آنجایی که تنها ارسال کالاها به نقاط تقاضا (مجموعه‌ای از افراد آسیب‌دیده) در زمان تعریف شده مهم است، بنابراین از زمان برگشتِ وسایل نقلیه به انبارها صرف نظر شده است (نوعی تعمیم‌یافته از OVRP).

در این بین گاهی به دلیل محدودیت‌های زمانی در ارسال کالاهای حیاتی امدادی و همچنین تخریب راه‌های ارتباطی و یا محدودیت در تعداد و ظرفیت وسایل نقلیه‌ی امدادی موجود، در عمل امکان امدادرسانی مستقیم، به تمامی نقاط تقاضا وجود ندارد؛ لذا در این مسئله، فرض کاربردی جدیدی در نظر گرفتیم که به دو طریق تقاضای نقاط تأمین می‌شود: 1- ملاقات 2- پوشش. در حالت اول، تعدادی از نقاط تقاضا توسط وسایل نقلیه‌ی امدادی به طور مستقیم ملاقات می‌شوند، برخی از آن‌ها تنها تقاضای خود را پاسخ می‌دهند و برخی دیگر به عنوان یک مرکز توزیع عمل کرده و علاوه بر تقاضای خود، تقاضای برخی نقاط دیگر را تأمین می‌کنند. در حالت دوم نیز، نقاط تقاضا توسط برخی از نقاطِ ملاقات شده (مراکز توزیع) پوشانده می‌شوند.

به منظور در نظر گرفتن شرایط بحرانیِ آسیب‌دیدگان با هدف کمینه کردن میزان هزینه‌ی حمل و نقل (زمان یا مسافت) که نقاط تقاضا برای رسیدن به مراکز توزیع طی می‌کنند، تابع ارزشی به صورت تدریجی لحاظ شده است؛ به طوری که با افزایش زمان سفرِ نقاطِ تقاضا به مراکزِ توزیع، ارزش کمتری برای تأمین نیازمندی آن‌ها، قائل می‌شود. در تابع ارزش (2-1)، برای هر نقطه‌ی تقاضا (i)، تا قبل از یک فاصله‌ی کمینه $(r_{min}(i))$ ارزش پوشش، یک و از این فاصله‌ی کمینه تا یک فاصله‌ی بیشینه‌ی مشخص $(r_{max}(i))$، ارزش پوشش به طور خطی بر حسب فاصله کاهش می‌یابد و پس از این فاصله‌ی بیشینه، ارزش پوشش، صفر می‌شود. فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی i و j با r_{ij} نمایش داده می‌شود. در این رابطه V مجموعه‌ی نقاط و b_{ij} ارزش تخصیص i به j می‌باشد.

$$b_{ij} = \begin{cases} 1; & r_{ij} \le r_{min}(i) \\ \frac{r_{max}(i)-r_{ij}}{r_{max}(i)-r_{min}(i)}; & r_{min}(i) < r_{ij} \le r_{max}(i) \\ 0; & r_{ij} > r_{max}(i) \end{cases} \quad \forall i, j \in V \qquad (1)$$

از طرفی به دلیل کمبود منابع یا موجودی در ساعات اولیه‌ی پس از وقوع بحران، فرض برآورده شدن تقاضای یک نقطه توسط وسایل نقلیه مختلف و یا حتی عدم تأمین تقاضای برخی از نقاط نیز لحاظ شده است.

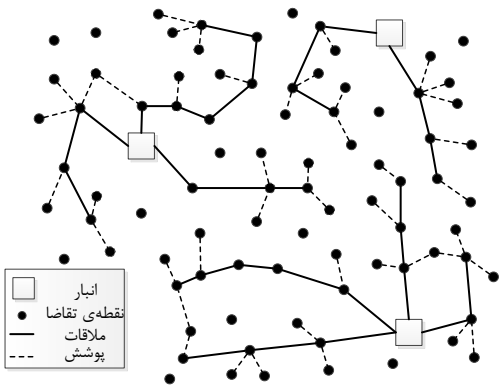
مسئله، یافتن بهترین نحوه‌ی ملاقات و پوشش نقاط تقاضا با دو هدف 1) حداکثرسازی مجموع ارزش تقاضای تحویل داده شده به آسیب‌دیدگان و 2) حداقل‌سازی حداکثر هزینه‌ی حمل و نقلِ (زمان یا مسافت حمل) هر یک از وسایل نقلیه، تحت شرایط زیر است:

- هر وسیله‌ی نقلیه باید حداکثر به یک مسیر تخصیص یابد.
- مسیرهای وسایل نقلیه به صورت باز در نظر گرفته می‌شوند.
- تقاضای هر مشتری از هر نوع کالا می‌تواند توسط چند وسیله‌ی نقلیه برآورده شده و یا بخشی از آن تأمین نگردد.
- نیاز تعدادی از نقاط تقاضا مستقیماً توسط وسایل نقلیه برآورده شده و تعدادی دیگر از نقاط توسط مراکز توزیع پوشش داده می‌شوند. تقاضای بخشی از نقاط نیز ممکن است، تأمین نشود.
- در هر مسیر، مجموع مقادیر تقاضاهای تحویل دادنی به نقاط تقاضای ملاقات شده روی آن مسیر و نیز نقاط تقاضای پوشش داده شده (توسط مراکز توزیع) روی

همان مسیر، نباید از ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ای که آن مسیر را طی می‌کند، تجاوز کند.

- به دلیل کمبود منابع، تمامی موجودی انبارها از هر نوع کالا باید بین نقاط تقاضا توزیع شود.

به عنوان مثال، شکل 1، شبکه‌ای شامل 3 انبار، 84 نقطه تقاضا و 9 وسیله‌ی نقلیه را نشان می‌دهد که 31 نقطه از آن‌ها توسط وسایل نقلیه ملاقات شده‌اند و 25 نقطه به عنوان مرکز توزیع، برخی از نقاط مجاور خود را می‌پوشانند. به تقاضای 12 نقطه نیز پاسخ داده نشده است.



شکل1. مثالی از مسئله‌ی مورد بررسی

حال شبکه‌ی $G = (V, A)$ را به صورت یک گراف کاملِ جهت‌دار در نظر بگیرید، به طوری که $V = V_1 \cup V_2$، که در آن مجموعه‌ی $V_1 = \{1, \dots, v_1\}$، مجموعه‌ی انبارها بوده و مجموعه‌ی $V_2 = \{1 + v_1, \dots, v_2\}$، نیز مجموعه‌ی نقاط تقاضا می‌باشد. مجموعه‌ی یال‌ها $A = \{(i,j) | i,j \in V\}$ بوده؛ به طوری که ماتریس هزینه‌ی سفر (زمان یا مسافت) $C = (c_{ij})$، روی A تعریف شده است که در آن c_{ij}، هزینه‌ی سفر بین دو نقطه‌ی i و j است که توسط وسیله‌ی نقلیه طی می‌شود. مجموعه‌ی کالاهای امدادی مورد نیاز آسیب‌دیدگان نیز $N = \{1, \dots, n_1\}$ است؛ به گونه‌ای که هر کالای نوع $n \in N$، وزن واحد β_n را داراست. مقدار نیاز هر نقطه‌ی تقاضای $i \in V_2$ و ارزش واحد آن، برای هر نوع کالای امدادی $n \in N$، به ترتیب برابر d_i^n و α_i^n می‌باشد.

مجموعه‌ی وسایل نقلیه $L = \{1, \dots, v\}$ می‌باشد؛ به طوری که هر کدام از وسایل $l \in L$ با ظرفیت مشخص VC_l، متعلق به یک انبار مشخصِ $k \in V_1$ با موجودیِ DC_k^n برای هر کالای نوع $n \in N$ است. وسایلِ مربوط به هر انبارِ $k \in V_1$ با مجموعه‌ی $L_k = \{1, \dots, l_k\}$ نشان داده می‌شوند.

2-1- مدل‌سازی

در ادامه یک مدل گره‌محور[۲۳] با تعداد محدودیت‌های از درجه‌ی چند جمله‌ای برای این مسئله ارائه می‌گردد که در آن متغیرهای تصمیم به شرح زیر می‌باشند:

x_{ijl}: اگر وسیله‌ی نقلیه $l \in L$ مستقیماً از نقطه $i \in V$ به نقطه $j \in V$ برود؛ مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

y_{ijl}^n: مقداری از تقاضای کالای $n \in N$امِ نقطه‌ی تقاضای $i \in V_2$ که توسط مرکز توزیع $j \in V_2$، با وسیله نقلیه‌ی $l \in L$، برآورده می‌شود.

u_{il}: مقدار تقاضایی که توسط وسیله نقلیه‌ی l، به نقطه‌ی تقاضای $i \in V_2$ و نقاط بعد از آن، (چه نقاط روی مسیر که بعد از i هستند و چه نقاطی که توسط نقطه‌ی i و نقاط بعد از آن پوشش داده می‌شوند)، باید تحویل داده شود.

در ادامه پس از ارائه‌ی مدل پیشنهادی به توضیحات قیود پرداخته می‌شود.

$$max\, z_1 = \sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L} \sum_{n \in N} b_{ij} \alpha_i^n y_{ijl}^n \quad (2)$$

$$min\, z_2 = max_{l \in L} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ijl} \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_{j \in V} x_{ijl} = \sum_{j \in V} x_{jil} \quad \forall i \in V, \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{j \in V_2} y_{ijl}^n \le d_i^n \quad \forall i \in V_2, \forall n \in N \quad (5)$$

$$y_{ijl}^n \le d_i^n b_{ij} \quad \forall i,j \in V_2, \forall l \in L, \forall n \in N \quad (6)$$

$$y_{ijl}^n \le d_i^n \sum_{m \in V} x_{mjl} \quad \forall i,j \in V_2, \forall l \in L, \forall n \in N \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L_k} \sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_2} y_{ijl}^n = DC_k^n \quad \forall k \in V_1, \forall n \in N \quad (8)$$

$$u_{il} - u_{jl} + VC_l x_{ijl} \le VC_l - \sum_{m \in V_2} \sum_n \beta_n y_{mjl}^n \quad \forall i,j \in V_2, i \ne j, \forall l \in L \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L} \sum_{n \in N} \beta_n y_{jil}^n \le u_{il} \le VC_l \sum_{n \in N} \beta_n y_{iil}^n \quad \forall i \in V_2, \forall l \in L \quad (10)$$

$$x_{ijl} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in V, \forall l \in L \quad (11)$$

$$y_{ijl}^n \ge 0 \quad \forall i,j \in V_2, \forall l \in L, \forall n \in N \quad (12)$$

تابع هدف (2) به دنبال حداکثر کردن مجموع ارزش تقاضای پوشش داده شده می‌باشد و هدف (3) نیز به دنبال حداقل کردن بیشترین طول مسیرِ مربوط به وسایل نقلیه است.

محدودیت (4) بیان می‌کند که تعداد یال‌های ورودی به هر نقطه $i \in V$، باید برابر با تعداد خروجی‌های آن باشد. محدودیت (5) نیز نشان می‌دهد که هر نقطه‌ی $i \in V_2$، حداکثر به اندازه‌ی نیاز خود از هر نوع کالای $n \in N$، از سایر نقاط، کالا دریافت کند. محدودیت (6) بیان می‌کند که تنها در صورتی نقطه‌ی $j \in V_2$ می‌تواند نقطه‌ی تقاضای $i \in V_2$ را پوشش دهد که ارزش تخصیص i به j (b_{ij})، مخالف صفر باشد. محدودیت (7) نشان می‌دهد که تنها در صورتی نقطه‌ی $j \in V_2$ می‌تواند نقطه‌ی تقاضای $i \in V_2$ را پوشش دهد که j توسط وسیله‌ی $l \in L$ ملاقات شده باشد. محدودیت (8) تضمین می‌کند که کل موجودیِ هر انبار بین نقاط تقاضا توزیع شود. محدودیت (9) برای از بین بردن زیر تورها و برقراری ظرفیت وسیله‌ی نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. قید (10) کران‌هایی را برای متغیرهای جریان ارائه می‌دهد. محدودیت‌های (11) و (12) نیز مربوط به تعریف متغیرهای تصمیم می‌باشد.

3- روش ابتکاری

در ALNS (معرفی شده توسط مرجع (Ropke and Pisinger 2006)) همسایگی‌ها توسط روش‌های ابتکاری ساده و سریع، جستجو می‌شوند؛ به طوری که در هر تکرار آن، یک الگوریتم برای تخریب جواب جاری و یک الگوریتم برای اصلاح آن با توجه به مکانیزم انتخاب چرخ رولت، انتخاب و اجرا می‌شود. این روش‌های ابتکاریِ مخرب و سازنده به ترتیب برای ایجاد پراکندگی و همگرایی جستجو به کار برده می‌شوند. نحوه انتخاب الگوریتم‌های مخرب و سازنده وابسته به عملکردشان در گذشته‌ی فرآیند جستجو می‌باشد. برای آگاهی بیشتر از کارایی این روش به مراجع (Pisinger and Ropke 2007) و (Azi et al. 2010) رجوع شود.

الگوریتم MDLS (معرفی شده توسط مرجع (Tricoire 2012)) با در دست داشتن یک مجموعه جواب غالب[۲۴]، طی فرآیندی تکراری به دنبال بهبود آن مجموعه با استفاده از جستجوی همسایگی‌ها با بکارگیری جستجوهای محلیِ تک‌هدفه می‌باشد. برای هر هدف k، جستجوهای محلیِ LS_k تعریف می‌شود؛ به طوری که جواب را با توجه به تابع هدف kام بهبود می‌دهد. هر تکرارِ این الگوریتم، شامل سه مرحله‌ی کلی می‌باشد: 1) انتخاب یک جواب، 2) تولید یک جواب جدید برای هر هدف یا جهت، با انجام جستجوی محلی بر روی جوابِ انتخابی برای هر جهت با حفظ شدنی بودن جواب و 3) قبول یا رد جواب‌های جدیدِ انتخابی.

برای حل مسئله از ساختار کلیِ الگوریتمِ ALNS استفاده شده است. به دلیل چند هدفه بودن مسئله از الگوریتم MDLS در بدنه‌ی ALNS استفاده شده است. حال به شرح جزئیات روش ابتکاری مسئله، تحت عنوانِ *ALNS×MDLS* می‌پردازیم. مجموعه الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده‌ی طول و ارزش $\Psi = \psi_{ld} \cup \psi_{ll} \cup \psi_{vd} \cup \psi_{vl}$ را در نظر بگیرید که در آن الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده‌ی طول به ترتیب با مجموعه‌های $\psi_{ld} = \{1, \dots, n_{ld}\}$ و $\psi_{ll} = \{n_{ld}+1, \dots, n_{ll}\}$ و الگوریتم‌های مخرب ارزش و بهبود دهنده‌ی ارزش به ترتیب با مجموعه‌های $\psi_{vd} = \{n_{ll}+1, \dots, n_{vd}\}$ و $\psi_{vl} = \{n_{vd}+1, \dots, n_{vl}\}$ نشان داده می‌شوند. وزن هر الگوریتمِ $i \in \Psi$ در تکرارِ $iter$، را با ω_i^{iter} نشان داده که در تکرار اول برابر با یک در نظر گرفته می‌شود $\left(\omega_i^0 = 1, \forall i \in \Psi\right)$. مجموعه جواب‌های غالب (پارتو) را نیز با Δ نشان می‌دهیم.

ساختار کلی الگوریتم *ALNS×MDLS* در شکل 2 ارائه شده است. ابتدا یک جواب شدنیِ اولیه‌ی Θ، توسط الگوریتم ساخت جواب اولیه (معرفی شده در بخش 1) ساخته می‌شود؛ سپس تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرارِ تعیین شده‌ی ξ، رویه‌ی زیر اجرا می‌شود: ابتدا یکی از جواب‌های پارتو به دست آمده $(\Lambda \epsilon \Delta)$ به صورت تصادفی انتخاب شده؛ سپس بر مبنای مکانیزم چرخ رولت و بر اساس وزنِ هر یک از الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده، یک الگوریتم مخرب طول $\left(k \in \psi_{ld}\right)$، یک بهبود دهنده‌ی طول $\left(l \in \psi_{ll}\right)$، یک الگوریتم مخرب ارزش $\left(m \in \psi_{vd}\right)$ و یک بهبود دهنده‌ی ارزش $\left(n \in \psi_{vl}\right)$ انتخاب می‌شوند. روی جواب انتخاب شده $\left(\Lambda \epsilon \Delta\right)$، ابتدا الگوریتم‌های منتخبِ مخربِ طول k و بهبود دهنده‌ی طول l اجرا می‌شوند. جواب حاصل با مجموعه جواب‌های پارتو $\left(\Delta\right)$ مقایسه شده و وزن الگوریتم‌های انتخابی (طبق رابطه (1)) و مجموعه جواب‌های پارتو بروز می‌شود. سپس روی همان جواب اولیه مشخص شده $\left(\Lambda \epsilon \Delta\right)$، الگوریتم‌های منتخبِ مخربِ ارزش m و بهبود دهنده‌ی ارزش n، اجرا می‌شوند. جواب حاصل با مجموعه جواب‌های پارتو $\left(\Delta\right)$، مقایسه شده و وزن الگوریتم‌های انتخابی (طبق رابطه (1)) و مجموعه‌ی جواب‌های پارتو بروز می‌شوند.

اگر جواب حاصل توسط تمام نقاط مغلوب شده و جزء

نقاط پارتو نباشد، امتیاز δ_1 به الگوریتم مخرب و جستجوی محلیِ انتخابی داده می‌شود. اگر جواب نقطه پارتو بوده و توسط هیچ جوابی مغلوب نشده باشد، اما هیچ یک از نقاط پارتوی مجموعه را نیز مغلوب نکند، امتیاز δ_2 به الگوریتم مخرب و جستجوی محلی انتخابی داده می‌شود. در نهایت اگر جواب به دست آمده حداقل یک نقطه پارتو از مجموعه نقاط را مغلوب کند، امتیاز δ_3 به الگوریتم مخرب و جستجوی محلی انتخابی داده می‌شود.

$$\omega_i^{iter} = (1-\eta) * \delta_j + \eta * \omega_i^{iter-1}, \forall i \in \Psi \ , j \in \{1,2,3\} \quad (13)$$

در این رابطه پارامترِ $\eta \in [0,1]$، فاکتور انعکاسی[25] نامیده می‌شود. این پارامتر سرعت الگوریتم ابتکاری را در واکنش نشان دادن به وزن هر روش مخرب و بهبود دهنده، کنترل می‌کند؛ به طوری که مقادیر بزرگتر این پارامتر نشان‌دهنده‌ی تأثیرپذیریِ بیشترِ الگوریتم از وزن آن در تکرارهای گذشته‌ی فرآیند حل و تأثیرپذیریِ کمترِ آن از نمره‌ی الگوریتم (δ_j) به دست آمده طیِ تکرارِ اخیر می‌باشد.

شکل 2. ساختار کلی روش ابتکاری *ALNS×MDLS*

ورودی برنامه:

ξ: تعداد تکرار حلقه کلی برنامه؛

η: فاکتور انعکاسی؛

δ_1: امتیاز الگوریتم در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو نباشد؛

δ_2: امتیاز الگوریتم در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو باشد، ولی هیچ نقطه پارتو قبلی را مغلوب نکند؛

δ_3: امتیاز الگوریتم در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو باشد و حداقل یک نقطه پارتو قبلی را مغلوب کند؛

خروجی برنامه:

Δ: مجموعه جواب‌های پارتو؛

$\Delta :=$ جواب الگوریتم ساخت جواب اولیه (Θ)؛

تعداد جواب‌های پارتو را برابر 1 قرار بده $(1 := |\Delta|)$؛

شمارنده را برابر 0 قرار بده $(iter := 0)$؛

وزن تمام الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده را برابر 1 قرار بده: $\omega_i^0 := 1, \ \forall i \in \Psi$؛

تا هنگامی‌که $iter$ کمتر از ξ است تکرار کن:

1. به شمارنده یک واحد اضافه کن $(iter := iter + 1)$؛
2. یکی از جواب‌های پارتو $\Lambda \epsilon \Delta$ را به تصادف انتخاب کرده و جواب فعلی را برابر آن قرار بده؛

به ازای تابع هدف i، $(i = z_1, z_2)$ دستورات زیر را انجام بده:

1. یک الگوریتم مخرب و یک الگوریتم بهبود دهنده در جهت تابع هدف i، بر اساس مکانیزم چرخ رولت و وزن هر الگوریتم در انتهای تکرار قبل $(\omega_i^{iter-1}, \forall i \in \Psi)$، انتخاب کن؛
2. جواب موقت را برابر Λ قرار بده؛
3. الگوریتم مخرب در جهت تابع هدف i را روی جواب موقت اجرا و حاصل را در جواب موقت بریز؛
4. الگوریتم بهبود دهنده در جهت تابع هدف i را روی جواب موقت اجرا و حاصل را در جواب موقت بریز؛
5. جواب موقت را با مجموعه‌ی Δ مقایسه و Δ را بروز کن؛
6. در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو نباشد، امتیاز الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده‌ی انتخابی را برابر δ_1؛ در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو باشد، ولی هیچ نقطه پارتو قبلی را مغلوب نکند، امتیاز این الگوریتم‌ها را برابر δ_2 و در صورتی که جواب حاصل نقطه پارتو باشد و حداقل یک نقطه پارتو قبلی را مغلوب کند، امتیاز این الگوریتم‌ها را برابر δ_3 قرار بده؛
7. وزن الگوریتم‌های مخرب و بهبود دهنده‌ی انتخابی را طبق رابطه (3-1) بروز کن؛

Δ را برگردان.

3-1- ساخت جواب اولیه

در ابتدا برای هر نوع کالای $n \in N$، نقاط بر اساس ارزش

واحد تقاضا (α_i^n) به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند. سپس از ابتدای لیست، به نقاط با بالاترین ارزش در هر نوع، به میزان حداکثر تقاضای آن (در صورت موجود بودن کالا از آن نوع)، کالا تخصیص داده می‌شود. در صورتی‌که دو نقطه دارای ارزش یکسان برای یک نوع کالا باشند، اولویت با نقطه‌ای است که در درجه‌ی اول، کالای نوع دیگری به آن تخصیص داده شده باشد و سپس نقطه‌ای که تقاضای بیشتری از آن نوع کالا داشته باشد. این فرآیند برای هر نوع کالای $n \in N$، تا اتمامِ کل موجودی انبارها ($\sum_{k\in V_1} DC_k^n$) ادامه می‌یابد. به عبارتی با تخصیص موجودی کالاها از هر نوع به تقاضای با ارزش‌ترین نقاط در آن نوع، به دنبال حداکثر کردن مجموعِ ارزش کسب شده هستیم.

در ادامه نقاطی که به آن‌ها حداقل یک نوع کالا تخصیص داده شده است (E)، به ترتیب اندیسِ نقاط در کم‌هزینه ترین جایگاه ممکن در مسیرهای موجود قرار می‌گیرند. کمترین افزایش طول در طولانی‌ترین مسیر ($\arg max_{l\in L} \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}x_{ijl}$) اولویت اول بوده و اولویت دوم کمترین افزایش طول ایجاد شده در مسیر مورد نظر می‌باشد. در این مرحله نقاط، تنها ملاقات می‌شوند.

در صورتی‌که به دلیل محدودیت موجودیِ انبار یا ظرفیتِ وسایل نقلیه، نقاطی (مانند $e \in E$) قابل افزودن به مسیرها نباشند، جواب به دست آمده نشدنی خواهد بود؛ بدین معنی که تمام موجودی انبارها توزیع نشده است. در صورت نشدنی بودن جواب، برای هر انباری که هنوز موجودی دارد، تمامی نقاطِ ملاقات شده توسط وسایل نقلیه‌ی مربوط به هر انبار به صورت تصادفی بررسی می‌شوند، هر نقطه‌ای که در هر نوع، تقاضای برآورده نشده داشته باشد، حداکثر به میزان موجودی انبار در آن نوع با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه، کالا دریافت می‌کند؛ حال اگر همچنان موجودی در انباری (مانند $k \in V_1$) باقی بود، برای آن انبار (k) هزینه‌ی افزایش طولِ هر نقطه‌ی تقاضا محاسبه شده؛ نقطه‌ای که در ابتدا کمترین طول را به طولانی‌ترین مسیر اضافه کند و در شرایط برابر، نقطه‌ای که حداقل افزایش طول مسیر را ایجاد کند، به بهترین مکان ممکن جایابی شده؛ تقاضای این نقطه‌ی منتخب از هر نوع کالا، حداکثر به میزان موجودی انبار k در آن نوع کالا، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه تخصیص داده می‌شود. این رویه تا زمانی که تمامیِ موجودی انبارها در هر نوع، توزیع شود، ادامه می‌یابد.

3-2- الگوریتم‌های مخرب

الگوریتم‌های مخرب برای دو هدف مسئله (روابط (2-2) و (2-3)) طراحی شده‌اند. در ادامه به تشریح چهار الگوریتم مخربِ بکار رفته در جهتِ هدف طول و چهار الگوریتم مخرب در جهتِ هدفِ ارزش می‌پردازیم.

3-2-1- الگوریتم‌های مخرب طول

مخرب طول 1:

در هر مرحله از این الگوریتم پس از تعیین طولانی‌ترین مسیر، نقطه‌ای را که حذفش از آن مسیر، بیشترین کاهش طول را نتیجه می‌دهد، از مسیر مورد نظر حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این فرآیند ζ بار تکرار می‌شود. برای هر انبار (مانند $k \in V_1$ به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، فرآیند 1 اجرا می‌شود؛ تا زمانی که کل موجودی انبارها در هر نوع، توزیع شود.

فرآیند 1: تمامی نقاطی که توسط وسایل انبار k، پوشش داده شده و یا ملاقات شده‌اند، به صورت تصادفی بررسی می‌شوند. بدین صورت که نقاطی که در هر نوع تقاضای تأمین نشده دارند، حداکثر به میزان موجودیِ انبار k، از آن نوع با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه، کالا دریافت می‌کنند. حال اگر همچنان موجودی در انبار بعدی (از نظر اندیس) باقی باشد، برای آن انبار، هزینه‌ی افزایش طولِ مسیرهای موجود به ازای افزودن هر نقطه‌ی تقاضا به بهترین مکان آن از نظر کمینه کردن هزینه محاسبه شده و نقطه‌ای که در ابتدا کمترین طول را به طولانی‌ترین مسیر اضافه کند و در شرایط برابر، نقطه‌ای که حداقل افزایش طول مسیر را ایجاد کند، در بهترین موقعیت ممکن جایابی شده و تقاضای این نقطه‌ی منتخب از هر نوع کالا و حداکثر به میزان موجودی انبار در آن نوع کالا، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله برآورده می‌شود.

مخرب طول 2:

گام اول این الگوریتم مشابه مخرب طول 1 بوده و تنها تفاوت آن در ساخت جواب شدنی پس از حذف نقاط از مسیرها می‌باشد که از فرآیند زیر برای شدنی کردن جواب استفاده می‌شود.

فرآیند 2: هزینه‌ی افزایش طولِ مسیرهای موجود به ازای افزودن هر نقطه‌ی تقاضا به بهترین مکان آن از نظر کمینه کردن

هزینه محاسبه شده؛ نقطه‌ای که در ابتدا کمترین طول را به طولانی‌ترین مسیر اضافه کند و در شرایطِ برابر، نقطه‌ای که حداقل افزایش طول مسیر را ایجاد کند، در بهترین موقعیت ممکن جایابی شده؛ تقاضای این نقطه‌ی انتخابی از هر نوع کالا، حداکثر به میزان موجودی انبارِ k در آن نوع کالا، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه تخصیص داده می‌شود. حال اگر همچنان موجودی در انبار بعدی (از نظر اندیس) باقی بود، برای آن انبار تمامی نقاطی که پوشش داده شده و یا ملاقات شده‌اند، به صورت تصادفی بررسی شده و نقاطی که در هر نوع تقاضای برآورده نشده دارند، حداکثر به میزان موجودی آن انبار در آن نوع کالا، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه، کالا دریافت می‌کنند.

مخرب طول 3: در هر مرحله از این الگوریتم پس از تعیین طولانی‌ترین مسیر، μ نقطه‌ای را که حذف شدنِ آن‌ها از آن مسیر، بیشترین کاهش طول را نتیجه می‌دهد، مشخص کرده و سپس به صورت تصادفی یکی را از مسیر مورد نظر حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم ζ بار تکرار می شود. حال برای هر انبار (مانند $k \in V_1$ به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، تا زمانی که کل موجودی انبارها در هر نوع توزیع شود، فرآیند 1 اجرا می‌شود.

مخرب طول 4: در هر مرحله از این الگوریتم پس از تعیین طولانی‌ترین مسیر، μ نقطه‌ای که حذف کردنشان از آن مسیر، بیشترین کاهش طول را نتیجه می‌دهد را مشخص کرده و سپس به صورت تصادفی یکی را از مسیر مورد نظر حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم ζ بار تکرار می‌شود. برای هر انبار (مانند $k \in V_1$ به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، تا زمانی که کل موجودی انبارها در هر نوع توزیع شود، فرآیند 2 اجرا می‌شود.

3-2-2- الگوریتم‌های مخرب ارزش

مخرب ارزش 1:

در هر مرحله از این الگوریتم نقطه‌ای که کمترین ارزش تقاضا $(\arg min_{i\in V_2} \sum_{j\in V_2} \sum_{l\in L} \sum_{n\in N} b_{ij}\alpha_i^n y_{ijl}^n)$ را ایجاد کرده است، از جوابِ جاری حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم به صورت تصادفی ζ بار تکرار می‌شود. حال برای هر انبار (بررسی به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، جهت دستیابی به یک جواب شدنی فرآیند 3 اجرا می‌شود.

فرآیند 3: حداکثر ارزش قابل کسبِ هر نقطه‌ی تخصیص‌یافته به آن انبار، محاسبه می‌شود. نقطه‌ای که بالاترین ارزش را دارا باشد، به بهترین جایگاه موجود در بین مسیرهای مربوط به آن انبار که در ابتدا حداقل افزایش طول در طولانی-ترین مسیر و در شرایط برابر حداقلِ افزایشِ طولِ مسیر را ایجاد کند، تخصیص داده می‌شود. در ادامه تقاضای نقطه‌ی انتخابی از هر نوع کالا، حداکثر به میزان موجودی آن انبار در آن نوع، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه پوشش داده می‌شود. این الگوریتم تا تخصیص تمام موجودی انبارها به نقاط تقاضا (شدنی شدن جواب) ادامه می‌یابد.

مخرب ارزش 2:

در هر مرحله از این الگوریتم نقطه‌ای که کمترین ارزش تقاضا را ایجاد کرده است، از جواب موجود حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم ζ بار تکرار می‌شود. حال برای هر انبار (بررسی به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، فرآیند 4 اجرا می‌شود.

فرآیند 4: حداکثر ارزش قابل کسبِ هر نقطه‌ی تخصیص‌یافته به آن انبار، محاسبه می‌شود. از بین μ نقطه‌ای که بالاترین ارزش را دارا باشند، یکی را به طور تصادفی انتخاب کرده و به بهترین جایگاه موجود در بین مسیرهای مربوط به آن انبار که در ابتدا حداقل افزایش طول در طولانی‌ترین مسیر و در شرایط برابر حداقلِ افزایشِ طول مسیر را ایجاد کند، تخصیص می‌دهیم و تقاضای نقطه از هر نوع کالا، حداکثر به میزان موجودی آن انبار در آن نوع، با رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه پوشش داده می‌شود. این الگوریتم تا تخصیص تمام موجودی انبارها به نقاط تقاضا (شدنی شدن جواب) ادامه می‌یابد.

مخرب ارزش 3:

در هر مرحله از این الگوریتم μ نقطه‌ای که کمترین ارزش تقاضا را در مسیرهای مختلف دارند، مشخص کرده و سپس یکی را به طور تصادفی حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم ζ بار تکرار می‌شود. حال برای هر انبار (بررسی به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، فرآیند 3 اجرا می‌شود.

مخرب ارزش 4:

در هر مرحله از این الگوریتم μ نقطه‌ای که کمترین

ارزش تقاضا را در جوابِ فعلی دارند، مشخص کرده و سپس یکی را به طور تصادفی حذف می‌کنیم و جواب را بروز می‌نماییم. این الگوریتم ζ بار تکرار می‌شود. حال برای هر انبار (بررسی به ترتیب اندیس) که موجودی تخصیص نیافته دارد، فرآیند 4 اجرا می‌شود.

3-3- الگوریتم‌های بهبود دهنده

در این بخش به شرح الگوریتم‌های بهبود دهنده برای دو تابع هدف مسئله می‌پردازیم. این الگوریتم‌ها، شاملِ چهار الگوریتمِ بهبود دهنده در جهتِ هدف طول و چهار الگوریتمِ بهبود دهنده در جهتِ هدفِ ارزش می‌باشند.

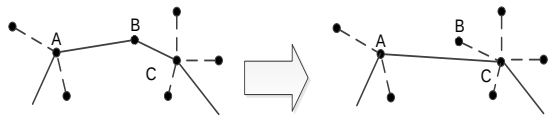
3-3- 1- جستجوهای محلی بهبود دهنده‌ی طول

تعویض نقاط در هر مسیر: در این الگوریتم نقاط ملاقات شده در هر مسیر، به ترتیب جایگاه نقاط در آن مسیر، باهم جابجا شده و در صورت ایجاد بهبود در طول آن مسیر تعویض می‌شوند. این چرخه برای تمام مسیرها و تا زمانی که ایجادِ بهبود کند، ادامه می‌یابد.

تعویض نقاط در دو مسیر مجزا: در این الگوریتم تعویض دو به دوی کلیه نقاط ملاقات شده متعلق به دو مسیر از یک انبار مورد بررسی قرار گرفته، در صورت ایجاد بهبود در مجموع طول‌های دو مسیر مورد نظر، تعویض انجام می‌گیرد. این فرآیند برای تمام انبارها (به ترتیب شماره‌ی انبار) و برای تمامی ترکیبات ممکن با انتخاب دو مسیر متعلق به آن انبار (به ترتیب شماره‌ی مسیرهای آن انبار) و سپس انتخاب نقاطِ هر یک از دو مسیرِ انتخابی (به ترتیب جایگاه نقاط ملاقات شده در آن دو مسیر)، اجرا می‌شود. این چرخه تا زمان ایجاد بهبود تکرار می‌شود.

پوشش یک نقطه‌ی ملاقات شده: در این الگوریتم کلیه‌ی نقاطِ ملاقات شده‌ی که نقطه‌ای را تحتِ پوشش قرار نداده‌اند، (مانند نقطه‌ی B در شکل 3) به ترتیبِ اندیس نقاط بررسی می‌شوند. در صورتی که در مسیری که نقطه‌ی مورد بررسی (B) قرار دارد، نقطه‌ای (در اینجا C) باشد که ملاقات شده و بیشترین مقدار ضریبِ پوشش را نسبت به B (b_{BC})، دارا باشد، B به C با حفظ شدنی بودنِ جواب تخصیص می‌یابد. در شکل 3 این عملیات با حذف یال‌های AB و BC و سپس تحت پوشش قرار گرفتن نقطه‌ی B توسط C انجام می‌گیرد.

این عمل به دلیل حذف یال‌های بین دو نقطه‌ی ملاقات شده منجر به نشدنی نمودن جواب می‌شود؛ لذا با پیاده‌سازی بهترین راه‌حل ممکن (در اینجا با استفاده از یال (AC)) جواب را شدنی می‌نماییم.



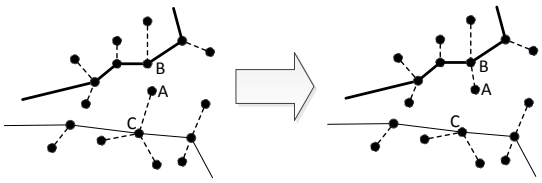
شکل 3. پوشش دادن یک نقطه‌ی ملاقات شده

جابه‌جایی نقاط موجود در جواب با نقاط خارج از جواب بر مبنای کاهش طول: در این الگوریتم به بررسیِ کلیه‌ی نقاطی که ملاقات شده و نقطه‌ی دیگری را تحت پوشش قرار نداده‌اند (مانند a)، می‌پردازیم. کلیه‌ی نقاطی که حداقل به میزان تقاضای پوشش داده شده‌ی نقطه‌ی مورد بررسی (a)، از هر نوع کالا، تقاضای پاسخ داده نشده داشته باشند، از نظر افزایشِ طولِ مسیر با نقطه‌ی a مقایسه می‌شوند. نقطه‌ای که بیشترین کاهش طول را بتواند ایجاد کند، جایگزین نقطه‌ی a در جایگاهِ نقطه‌ی اولیه می‌شود. در شرایطِ برابر از نظر طول، اولویت با نقطه‌ای است که حداکثرِ ارزش را ایجاد کند. این فرآیند برای تمام مسیرها (به ترتیب اندیس) و با انتخاب نقاطِ مسیرِ انتخابی (به ترتیب جایگاه نقاطِ ملاقات شده در آن مسیر)، اجرا می‌شود.

3-3- 2- جستجوهای محلی بهبود دهنده‌ی ارزش

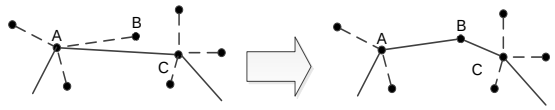
جابه‌جایی نقاط پوشش داده شده در هر مسیر: در این الگوریتم نقاط پوشش داده شده‌ی داخل هر مسیر (مانند A)، در صورت وجود به بهترین نقطه‌ی ملاقات شده در آن مسیر (مانند B) که بالاترین ضریبِ پوشش (b_{AB}) را داشته باشد، تخصیص داده می‌شوند. این چرخه برای تمام مسیرها در صورت ایجاد بهبود در تابع هدف اجرا می‌شود.

جابه‌جایی نقاط پوشش یافته بین دو مسیر مجزا: در این الگوریتم جابجایی کلیه‌ی نقاطِ پوشش داده شده (مانند A در شکل 4)، بین کلیه نقاط ملاقات شده‌ی متعلق به کلیه‌ی مسیرهای یک انبار مورد بررسی قرار گرفته، در صورت امکان و ایجاد بهبود، هر نقطه (A)، توسط نقطه ملاقات شده‌ای که بالاترین ضریب پوشش را دارد (B بجای C)، پوشانده می‌شود. این فرآیند برای تمام نقاط پوشش داده شده به ترتیبِ اندیس نقاط بررسی می‌شود.



شکل 4. جابه جایی نقاط پوشش داده شده بین دو مسیر مجزا باهم

ملاقات کردن یک نقطه‌ی پوشش یافته: در این الگوریتم کلیه‌ی نقاطِ پوشش داده شده (مانند B در شکل 5)، به ترتیبِ اندیس نقاط بررسی می‌شوند. در صورتی‌که ضریب پوشش بین نقطه مورد بررسی و نقطه‌ی پوشاننده آن (A)، یعنی b_{BA}، کمتر از یک مقدار تعریف شده باشد (λ)، نقطه‌ی مورد بررسی به بهترین موقعیتِ همان مسیر، در صورت ایجاد بهبود در تابع هدف افزوده می‌شود.



شکل 5. ملاقات کردن یک نقطه‌ی پوشش داده شده

جابه‌جایی نقاط موجود در جواب با نقاط خارج از جواب بر مبنای افزایش ارزش: در این الگوریتم کلیه نقاطی که بخشی از تقاضای آن‌ها پاسخ داده شده (مانند a)، به ترتیبِ اندیس نقاط، با در نظر گرفتن دو حالت زیر بررسی می‌شوند. 1- اگر a تحت پوشش قرار داشته باشد، کلیه‌ی نقاطی که بتوانند توسط نقطه‌ی پوشاننده‌ی نقطه‌ی a، تحت پوشش قرار گیرند و حداقل به میزان تقاضای پوشش داده شده‌ی نقطه‌ی a، از هر نوع کالا، تقاضای پاسخ داده نشده داشته باشند، از نظر ارزش با نقطه‌ی a مقایسه می‌شوند. نقطه‌ای که بالاترین ارزش را بتواند ایجاد کند، جایگزینِ نقطه‌ی a می‌شود. 2- اگر a ملاقات شده و نقطه‌ی دیگری را نپوشانده باشد، کلیه‌ی نقاطی که حداقل به میزان تقاضای پوشش داده شده‌ی نقطه‌ی مورد بررسی از هر نوع کالا، تقاضای پاسخ داده نشده داشته باشند، از نظر ارزش با نقطه‌ی a مقایسه می‌شوند. نقطه‌ای که بالاترین ارزش را ایجاد کند، جایگزینِ نقطه‌ی a در بهترین جایگاه مسیرِ مربوط به نقطه‌ی a، می‌شود؛ در شرایطِ برابر از نظر ارزش، اولویت با نقطه‌ای است که حداقلِ افزایشِ طول را در مسیر ایجاد کند.

4- نتایج محاسباتی

در این بخش ابتدا به تشریح چگونگی تولید داده می‌پردازیم. به‌منظور ارزیابی عملکردِ الگوریتم $ALNS\times MDLS$، چهار شاخص را معرفی کرده؛ نتایج حاصل از اجرای برنامه بر روی داده‌های مسئله برای پارامترهای مختلف ارائه شده و سپس به تحلیل جواب‌ها با بکارگیری این شاخص‌های چهارگانه پرداخته شده است.

4-1- طراحی داده

برای این مسئله مجموعاً 72 سری داده طراحی شده است که در آن تعداد نقاط $(|V|)$ بین 100 تا 200 نقطه، متغیر می‌باشد. داده‌ها بر حسب تعداد نقاط به سه دسته با اندازه‌ی 1) کوچک (24 داده شامل 100 نقطه)، 2) متوسط (24 داده شامل 150 نقطه) و 3) بزرگ (24 داده شامل 200 نقطه) تقسیم شده‌اند. ویژگی‌های عمده‌ی هر داده‌ی ورودی عبارتند از: 1) تعداد نقاط $(|V|)$، 2) تعداد انواع کالاها $(|N|)$، 3) شعاع پوشش کمینه‌ی نقاط (r_{min}) و شعاع پوشش بیشینه‌ی نقاط (r_{max})، 4) تعداد انبارها $(|V_2|)$ و 5) موجودی کالاها از هر نوع $\left(\sum_{k\in V_1} DC_k^n, \forall n \in N\right)$ که با استفاده از ضریب ρ که در ادامه تعریف می‌شود مشخص می‌گردد. هر ترکیب این پنج اندیس یک داده‌ی ورودی را تولید می‌کند (جدول 1). در هر یک از داده‌های ورودی برای تعداد انبارها و تعداد انواع کالاها، دو سطح $\{3$ و $2\}$ در نظر گرفته شده است. مختصات نقاط با استفاده از توزیع یکنواختِ $U(0,100)$، به دست آمده است. تقاضای هر نقطه تقاضا برای هر نوع کالا از توزیع یکنواختِ $U(4,8)$ حاصل شده است. ارزش هر واحد کالای نوع اول برای هر نقطه، با توزیع یکنواختِ $U(3,5)$، ارزش هر واحد کالای نوع دوم برای هر نقطه، با توزیع یکنواختِ $U(4,8)$ و ارزش هر واحد کالای نوع سوم برای هر نقطه، با توزیع یکنواختِ $U(6,10)$ تعیین شده است. وزن هر واحد کالای نوع اول 2 واحد، هر واحد کالای نوع دوم 4 واحد و هر واحد کالای نوع سوم 6 واحد در نظر گرفته شده است. برای شعاع پوشش اولیه (نهایی) دو حالت 2 (5) و 4 (10) تعریف شده است. ظرفیت وسایل نقلیه برای داده‌های 2 کالایی 400 واحد و برای داده‌های 3 کالایی 800 واحد در نظر گرفته شده است. سه سطح متفاوت برای میزان موجودی کل انبارها در نظر گرفته شده است. موجودی کل انبارها ρ برابرِ کل تقاضای موجود

برای هر کالا است که به صورت تصادفی بین انبارها پخش شده است (رابطه‌ی (14)). تعداد وسایل نقلیه‌ی مربوط به هر انبار با استفاده از رابطه‌ی (15) به دست می‌آید.

$$\sum_{k\in V_1} DC_k^n = \rho * \sum_{i\in V_2} d_i^n \qquad \forall n \in N, \rho \in .5\{0,0.6,0.7\} \qquad (14)$$

$$|L_k| = \left\lceil \frac{1.4 * \sum_{n\in N}(\beta_n * DC_k^n)}{VC_l} \right\rceil \qquad \forall k \in V_1 \qquad (15)$$

نحوه‌ی نام‌گذاری داده‌های ورودی به صورت InputRSTYZ می‌باشد که در آن R، S، T، Y و Z به ترتیب نمایانگر اندیس مربوط به تعداد نقاط، تعداد کالاها، شعاع پوشش

جدول 1. ویژگی‌های داده‌های تولید شده

نام پارامتر	$\lvert V\rvert$			$\lvert N\rvert$		$(r_{min}$ و $r_{max})$		$\lvert V_2\rvert$		ρ		
نام اندیس	0	1	2	0	1	0	1	0	1	0	1	2
مقدار پارامتر	100	150	200	2	3	(5 و 2)	(10 و 4)	2	3	0.5	0.6	0.7

کمینه و بیشینه‌ی نقاط تقاضا، تعداد انبارها و ضریب موجودی می‌باشند. به عنوان مثال داده‌ای با نام Input20101 دارای 200 نقطه، 2 نوع کالا، شعاع پوشش کمینه‌ی 4 و شعاع بیشینه‌ی پوشش 10، با 2 انبار و ضریب موجودی 0.6 است.

الگوریتمِ پیشنهادیِ *ALNS×MDLS* به زبان برنامه‌نویسی *C++* پیاده‌سازی شده و اجرای تمامی داده‌ها بر روی پردازنده‌ای با قدرت 2 .90 GHz و حافظه‌ی 3 .90 GB صورت گرفته است.

4-2- شاخص‌های ارزیابی

دو دسته شاخصِ اصلی به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه وجود دارد: ۱) شاخص‌های همگرایی و ۲) شاخص‌های پراکندگی. برای انجام مقایسه و تحلیل عملکرد الگوریتمِ پیشنهادیِ *ALNS×MDLS*، چهار شاخص به کار برده شده است: 1) معیار تعداد جواب پارتو، 2) معیار فاصله‌گذاری، 3) معیار بیشترین گسترش و 4) معیار زمان اجرای الگوریتم. معیار اول از دسته‌ی شاخص‌های مربوط به سنجش همگرایی جواب‌ها و معیارهای دوم و سوم از شاخص-های مربوط به سنجش پراکندگی جواب‌ها می‌باشند. حال به بیان تعریف شاخص‌های چهارگانه می‌پردازیم.

- **معیار تعداد جواب‌های پارتو (*NOS*)**[۲۶]

این معیار نمایانگرِ تعداد جواب‌های پارتو می‌باشد. مقادیر بزرگتر این شاخص نشان از کارایی روش حلِ مورد استفاده دارد(*Eckart Zitzler et al. 2000*).

- **معیار بیشترین گسترش (*D*)**[۲۷]

این معیار به محاسبه‌ی طولِ قطرِ مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب بکار می‌رود، می‌پردازد (*E. Zitzler 1999*). به طور مثال این معیار در حالت دو هدفه، برابر فاصله‌ی اقلیدسی بین دو جواب مرزی در فضای هدف می‌باشد. مطلوبیتِ این معیار برای مقادیر بزرگترِ آن، بیشتر است. رابطه (16) نحوه‌ی اندازه‌گیری این شاخص را برای یک مسئله‌ی κ هدفه نشان می‌دهد.

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^{\kappa}\left(max_{i\in\Delta} f_i^j - min_{i\in\Delta} f_i^j\right)^2} \qquad (16)$$

که در آن Δ مجموعه‌ی جواب‌های پارتو و f_i^j مقدار تابع هدف j ام نقطه‌ی پارتوِ $i\epsilon\Delta$ می‌باشد.

- **معیار فاصله‌گذاری (*S*)**[۲۸]

این معیار که توسط مرجع (*Schott 1995*) ارائه شده است، میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های متوالی را اندازه‌گیری می‌کند (با استفاده از رابطه (17)).

$$S = \sqrt{\frac{1}{|\Delta|-1}\sum_{i=1}^{|\Delta|}\left(d_i - \bar{d}\right)^2} \qquad (17)$$

در این رابطه d_i کمترین مقدار مجموع قدرمطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین $i\epsilon\Delta$ امین جواب و جواب‌های واقع در مجموعه‌ی نامغلوب نهایی $(t\epsilon\Delta)$ است و برای یک مسئله-ی κ هدفه از رابطه‌ی (18) حاصل می‌شود. $\bar{d}$ نیز میانگین مقادیر d_iها بوده و با استفاده از رابطه‌ی (19) محاسبه می‌شود.

$$d_i = min_{t\epsilon\Delta \,\&\, t\neq i}\left(\sum_{j=1}^{\kappa}\left|f_i^j - f_t^j\right|\right) \quad \forall i\epsilon\Delta \qquad (18)$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{|\Delta|}\frac{d_i}{|\Delta|} \qquad (19)$$

از طرفی معیار S را می‌توان انحراف معیار مقادیرِ d_i $(\forall i \epsilon \Delta)$ دانست. زمانی که جواب‌های پارتو به طور یکنواخت در کنار هم باشند، مقدار S نیز کوچک خواهد بود؛ لذا الگوریتمی با کیفیت‌تر خواهد بود که جواب‌های نامغلوبِ نهایی آن دارای مقدار شاخصِ فاصله‌گذاری کمتری باشند.

- **معیار زمان اجرای الگوریتم (T)**

این شاخص را نیز به عنوان معیار ارزیابی سرعت محاسباتی در نظر می‌گیریم.

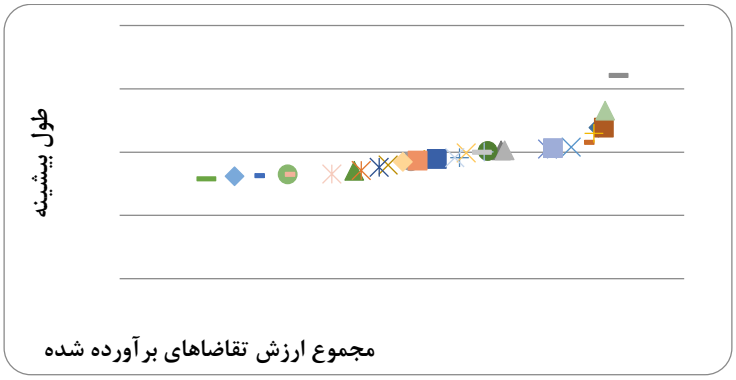
4-3- تحلیل حساسیت پارامترها

با توجه به تعریف مسئله و روش حلِ پیشنهادیِ *ALNS×MDLS* در فصل سوم، برای تعیین اثر تغییرات مقدار پارامترها بر شاخص‌های ارزیابی، الگوریتم بر اساس مقادیر مختلف پارامترها اجرا شده و نتایج حاصل بر اساس شاخص‌ها مقایسه شده است. پارامترهای الگوریتمِ *ALNS×MDLS* عبارتند از ξ، λ، ζ، η، $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ و μ (که در آن δها به دلیل وابستگی، همزمان مورد تحلیل قرار می‌گیرند). مقادیر مورد بررسی پارامترها در جدول 2 ذکر شده‌اند. جهت شناسایی محدوده‌های قابل قبول برای پارامترهای ورودی مسئله، آزمون-های اولیه بر روی تعدادی از داده‌های مسئله که به تصادف انتخاب شده‌اند، انجام گرفته است. با توجه به آزمون‌ها و تحلیل حساسیتِ انجام گرفتـه بر اساس نتایـج حاصـل از مقایـسه‌ی شاخص‌ها مقادیر پارامترها به صورت $\xi = 3000$، $\lambda = 0.7$، $\zeta = 4$، $\eta = 0.5$، $(\delta_1, \delta_2, \delta_3) = (0,5,15)$ و $\mu = 3$ انتخاب گردیده‌اند. تحلیل حساسیت بر روی پارامترها به صورت متوالی انجام شده است؛ بدین منظور به تغییرِ هر کدام از پارامترها به طور مجزا با ثابت نگه داشتنِ مقادیرِ سایر پارامترها با در نظر گرفتن ترتیب مشخص از پارامترها (یعنی ξ، λ، ζ، η، $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ و μ) پرداخته‌ایم.

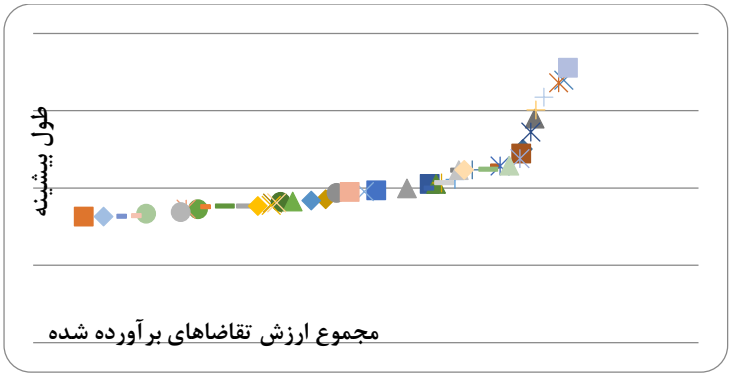
به عنوان مثال برای ملاحظه‌ی تغییر دو تابع هدف مسئله نسبت به یکدیگر برای مقادیر مذکورِ پارامترها به شکل‌های 6، 7 و 8 ارجاع می‌شود که به ترتیب با توجه به داده‌های Input00000، Input10000 و Input20000 ترسیم شده‌اند.

جدول 2. مقادیر مورد بررسی پارامترهای الگوریتم

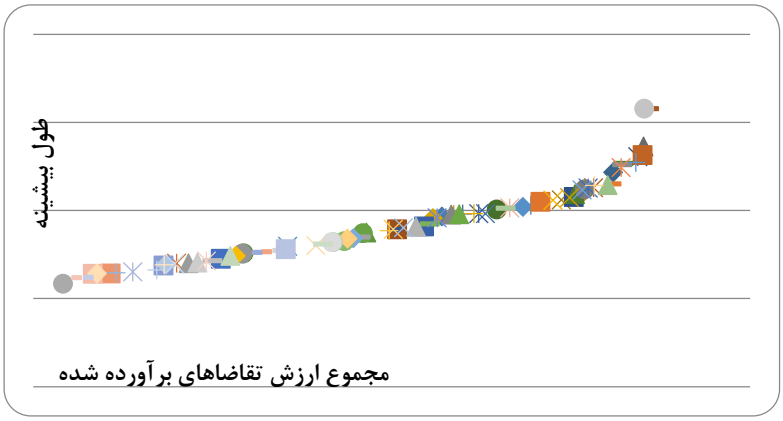
نام پارامتر	ξ	λ	ζ	η	$(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$	μ
مقادیر مورد بررسی	{100,300,1000,3000}	{0.4 ,0.7 ,1}	{2,4,6}	{0 .2 ,0.5 ,0.8}	{(0,2,4) ,(0,5,15) ,(0,10,50)}	{2,3,4}



شکل 6. مثالی از تأثیر دو تابع هدف مسئله نسبت به یکدیگر در داده‌ی Input00000



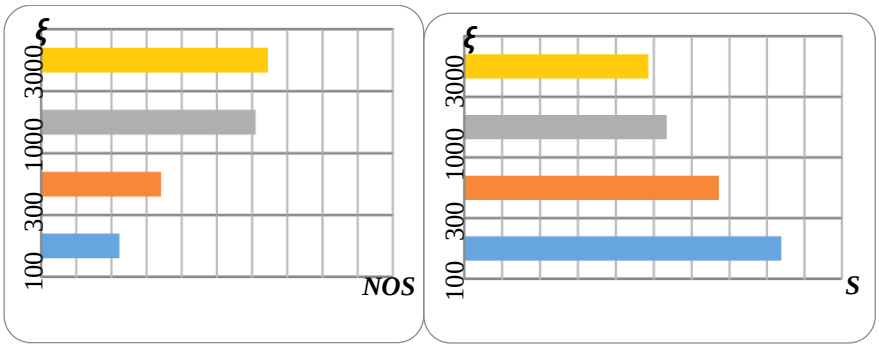
شکل 7. مثالی از تأثیر دو تابع هدف مسئله نسبت به یکدیگر در داده‌ی Input10000

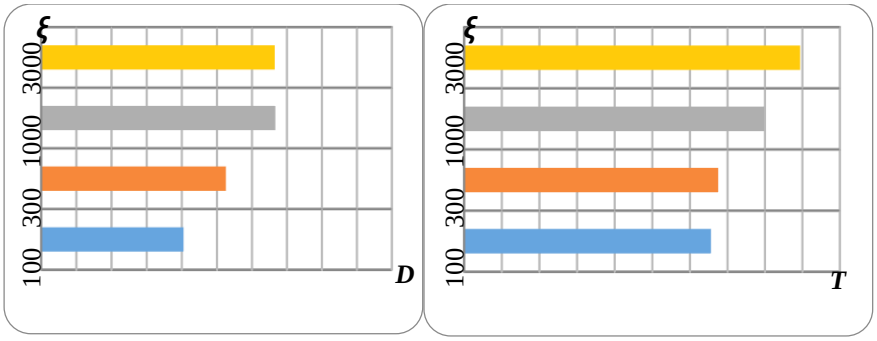


شکل 8. مثالی از تأثیر دو تابع هدف مسئله نسبت به یکدیگر در داده‌ی Input20000

- **پارامتر ξ**

همان‌طور که در ابتدای این بخش ذکر شد، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، آزمون‌هایی بر روی تمامی داده‌ها با تغییر مقدار پارامتر ξ، از بین مقادیرِ انتخابی $\{100,300,1000,3000\}$ انجام شده است. شکل 9 نتایج تحلیل حاصل از تأثیر پارامتر ξ را بر چهار شاخص معرفی شده نشان می‌دهد. در این نمودارها محور افقی مقدار میانگین معیارهای چهارگانه را بر روی 72 سری داده‌ی طراحی شده نشان می‌دهد. محور عمودی نیز بیانگرِ مقدار پارامتر مورد بررسی (در اینجا ξ) می‌باشد. همان‌طور که در شکل 9 نیز ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار پارامتر ξ، معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی بهبود می‌یابند، به طوری که NOS، D و T افزایش و معیار S کاهش می‌یابد و لذا کیفیتِ جواب بهبود می‌یابد. با توجه به اختلاف ناچیز جواب‌ها به ازای مقادیر 1000 و 3000 و برتری این دو مقدار نسبت به مقادیر 100 و 300، این پارامتر را بر روی 3000 تکرار تنظیم می‌کنیم.

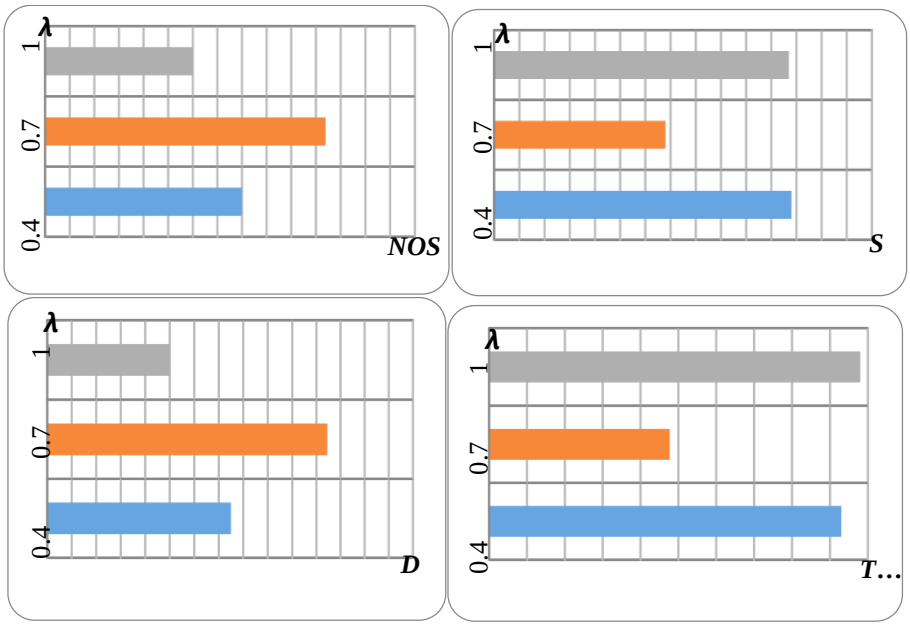




شکل 9. تأثیر تغییر پارامتر ξ بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

- **پارامتر λ**

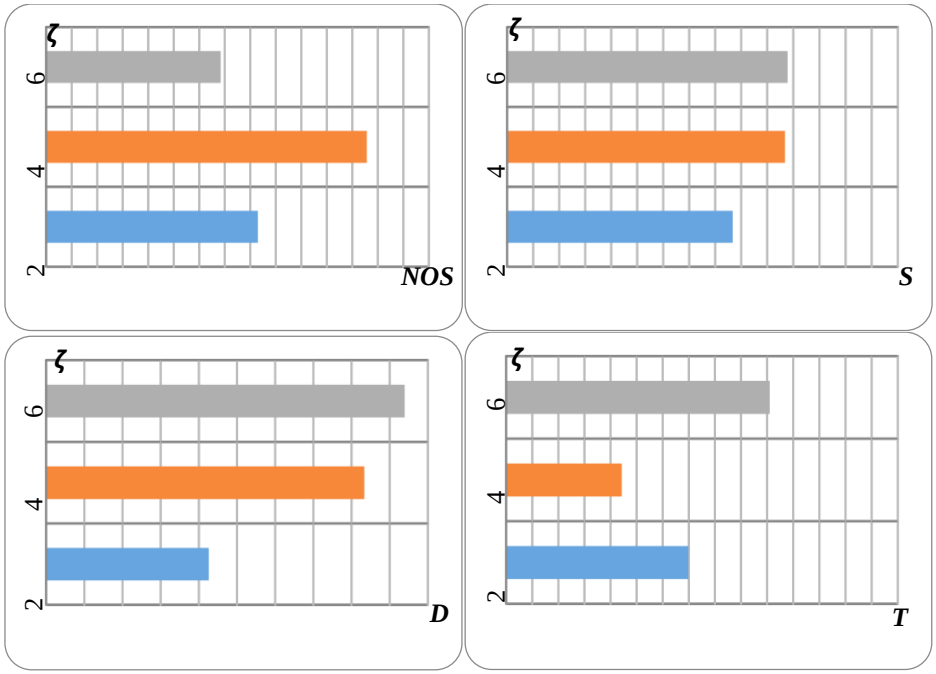
به منظور بررسی اثر پارامتر λ، مقادیر سایر پارامترهای مسئله را که در ابتدای این بخش ذکر شد، ثابت گرفته و با تغییر مقدار پارامتر λ از بین مقادیرِ انتخابی $\{1, 0.7, 0.4\}$ و ملاحظه‌ی نتایج (شکل 10)، در نظر گرفتن مقدار 0.7، برای این پارامتر مناسب به نظر می‌رسد.



شکل 10. تأثیر تغییر پارامتر λ بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

- **پارامتر ζ**

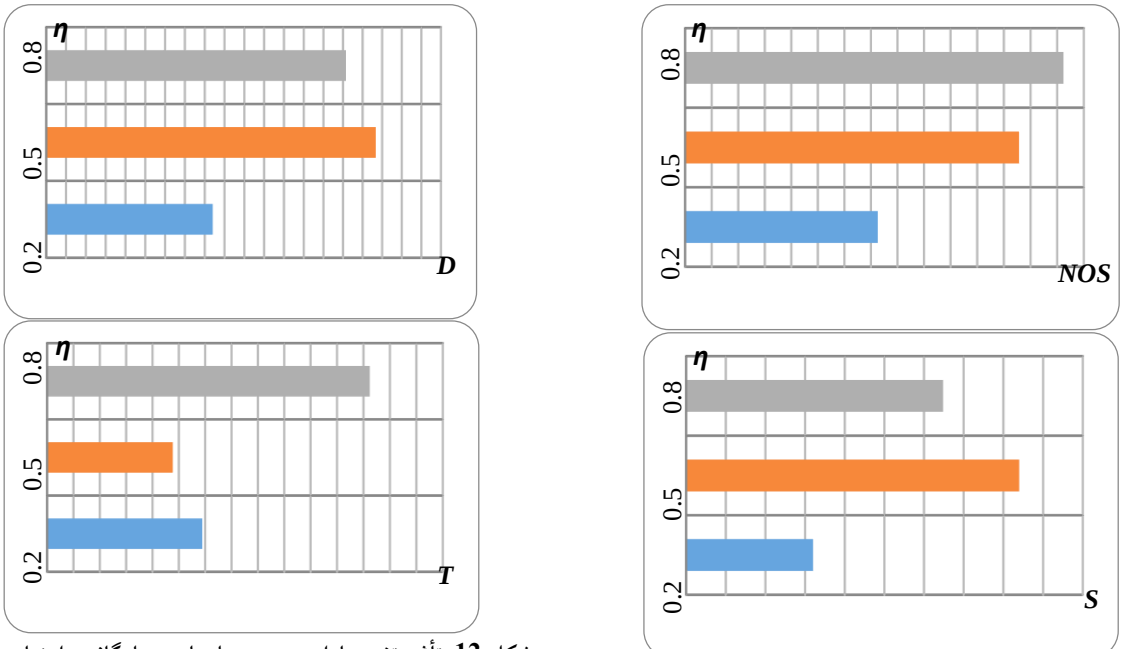
با توجه به شکل 11، با تغییر مقدار پارامتر ζ از بین مقادیرِ انتخابی $\{2,4,6\}$ و با ثابت در نظر گرفتن مقادیر سایر پارامترها روند بهبود محسوسی در معیارها مشاهده نمی‌شود؛ با صرف نظر از تغییر مقدار D و به دلیل اهمیت بیشتر NOS می‌توان مقدار این متغیر را بر روی عدد 4 تنظیم نمود.



شکل 11. تأثیر تغییر پارامتر ζ بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

- **پارامتر η**

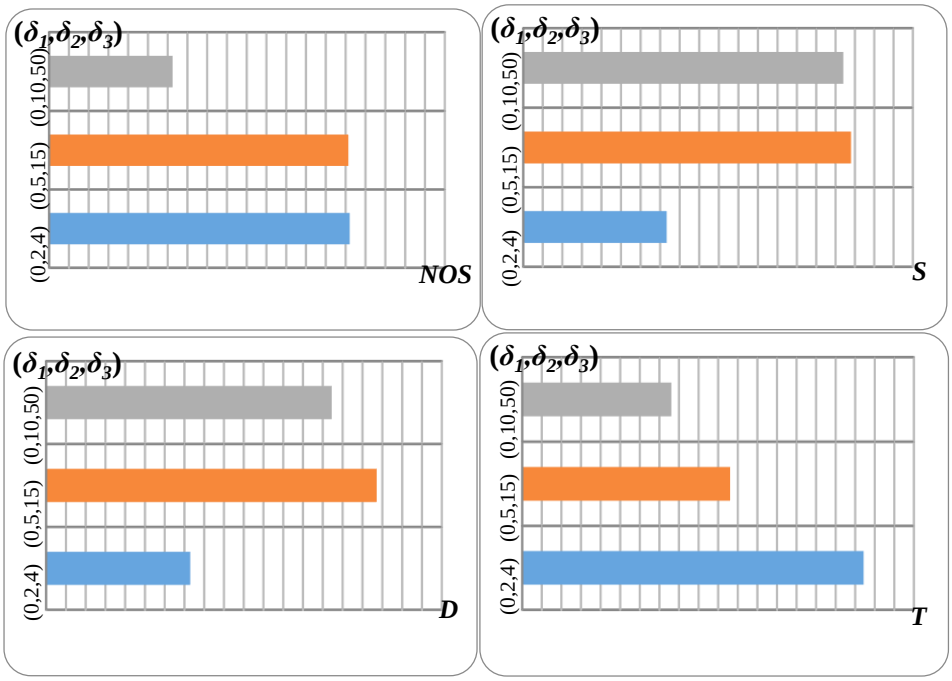
مقادیر بزرگتر این پارامتر به معنای تأثیرپذیریِ بیشترِ الگوریتم از گذشته‌ی فرآیند جستجو می‌باشد. به منظور بررسی اثر پارامتر η، با در نظر گرفتن مقادیرِ انتخابی $\{0.8, 0.5, 0.2\}$، تحلیل حساسیت آن در شکل 12 ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 12 قابل ملاحظه است، افزایش مقدار پارامتر η از مقدار 0.5 به 0.8 منجر به بهبود بسیار ناچیزِ معیارهای NOS و S شده و در مقابل معیارهای D و T را به میزان ناچیزی بدتر می‌کند. حد فاصل این دو مقدار می‌تواند برای این پارامتر مناسب باشد؛ بدین معنی که تأثیرپذیری بیشتر الگوریتم از گذشته‌ی فرآیند جستجو به بهبود جواب کمک می‌نماید. برای این پارامتر در الگوریتم پیشنهادی، مقدار 0.5 را تنظیم کرده‌ایم.



شکل 12. تأثیر تغییر پارامتر η بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

- **پارامترهای δ_1، δ_2 و δ_3**

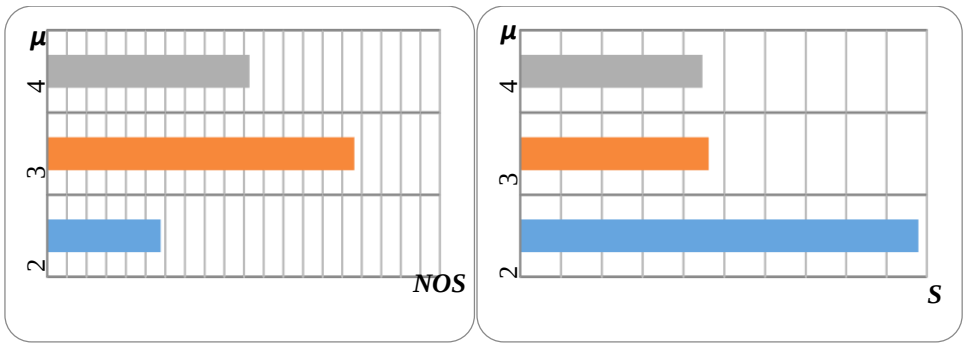
سه پارامتر δ_1، δ_2 و δ_3، به هم وابسته بوده، لذا به تحلیل همزمانِ این سه پارامتر می‌پردازیم. با ثابت گرفتن مقادیر سایر پارامترها که در ابتدای این بخش ذکر شد، الگوریتم پیشنهادی بر روی تمامی داده‌ها با تغییر مقدار پارامتر $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ از بین مقادیر (0,2,4)، (0,5,15) و (0,10,50) اجرا شده است. با ملاحظه‌ی شکل 13، مقدار (0,5,15) را برای پارامترهای $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ می‌توان تقریباً مناسب دید.

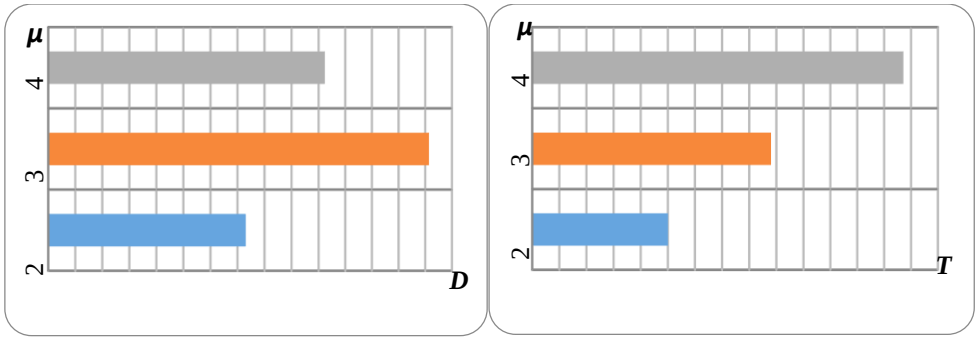


شکل 13. تأثیر تغییر پارامترهای $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

- **پارامتر μ**

پارامتر μ در راستای تصادفی شدن جواب‌های حاصل در مرحله‌ی تخریب و جلوگیری از ایجاد جواب‌های تکراری تعریف شده است. در نظر گرفتن مقدار 1، برای این پارامتر، به جای تصادفی بودن، منجر به قطعی شدن الگوریتم می‌شود. با اضافه شدن مقدار این پارامتر، زمان اجرای الگوریتم افزایش یافته و احتمال انتخاب جواب‌های با هزینه‌ی بالاتر بیشتر می‌گردد. با توجه به شکل 14 انتخاب مقدار 3 برای این پارامتر از بین مقادیر مورد بررسی $\{2,3,4\}$، می‌توان علاوه بر افزایش احتمال جواب‌های متنوع، جواب‌هایی با کیفیت بهتر و در زمان مناسب به دست آورد.





شکل 14. تأثیر تغییر پارامترهای $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ بر معیارهای چهارگانه‌ی ارزیابی

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلِ توسعه یافته‌ی MDOVRP را با در نظر گرفتن پوشش با کاربرد در مرحله‌ی پاسخ از مراحل چهارگانه‌ی مدیریت بحران، مورد بررسی قرار گرفته است، که در آن دو هدف 1) حداکثرسازی مجموع ارزش تقاضای تحویل داده شده به آسیب‌دیدگان و 2) حداقل سازی حداکثر هزینه‌ی حمل و نقل (زمان یا مسافت حمل) هر یک از وسایل نقلیه، در نظر گرفته شده است. یک مدل ریاضی گره‌محور و یک الگوریتم ترکیبیِ *ALNS×MDLS* برای به دست آوردن مرز پارتو، مطرح شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم چند هدفه‌ی *ALNS×MDLS* به تعریف شاخص‌های چهارگانه پرداخته و پس از طراحی 72 سری داده برای مسئله، تحلیل حساسیتِ پارامترهای مسئله با توجه به شاخص‌های چهارگانه بررسی شده است. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده، می‌توان به توسعه روش‌های حل جهت بهبود، مدل‌های احتمالی و فازی، بررسی توابع هدفِ بیشتر و نیز ترکیب تابع هدفِ ارزش با سایر توابع هدف رایج در مسائل بحران اشاره نمود.

6- پی‌نوشت‌ها

1- Adaptive large neighborhood search
2- Multi-directional local search
3- Facility location
4- Stock pre-positioning
5- Relief distribution
6- Casualty transportation
7- Vehicle routing problem
8- Open vehicle routing problem
9- Multi depot open vehicle routing problem
10- Operation research-Management system
11- Covering tour problem
12- Covering salesman problem
13- Last-mile delivery problem
14- Federal emergency management agency
15- Satellite distribution centers (SDCs)
16- Multi-objective covering tour problem
17- Mini-sum facility location
18- Maximal covering location
19- Variable neighborhood search
20- Path relinking
21- Multi-stage hybrid optimization algorithm
22- Covering
23- Node-based
24- Pareto set
25- Reaction factor
26- Number of pareto solution
27- Maximum spread or diversity
28- Spacing

7- مراجع

- Altay, Nezih and Green Iii, Walter G. (2006), "OR/MS research in disaster operations management", European Journal of Operational Research, 175 (1), pp.475-93.
- Azi, Nabila, Gendreau, Michel, and Potvin, Jean-Yves (2010), "An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple trips" (CIRRELT).
- Barbarosoğlu, Gülay, Özdamar, Linet, and Cevik, Ahmet (2002), "An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations", European Journal of Operational Research, 140 (1), pp.118-33.
- Campbell, Ann Melissa, Vandenbussche, Dieter, and Hermann, William (2008), "Routing for relief efforts", Transportation science, 42 (2), pp.127-45.
- Caunhye, Aakil M., Nie, Xiaofeng, and Pokharel, Shaligram (2012), "Optimization models in emergency logistics: A literature review", Socio-Economic Planning Sciences, 46 (1), pp.4-13.

- Li, Feiyue, Golden, Bruce, and Wasil, Edward (2007), “The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results”, Computers & Operations Research, No. 34 (10), pp. 2918-30.
- Liu, Ran, Jiang, Zhibin, and Geng, Na (2012), “A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem”, OR Spectrum, pp. 1-21.
- Mete, Huseyin Onur and Zabinsky, Zelda B (2010), “Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management”, International Journal of Production Economics, No. 126 (1), pp. 76-84.
-
- Naji-Azimi, Zara, et al. (2012), “A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid”, European Journal of Operational Research, No. 222 (3), pp. 596-605.
- Nolz, Pamela C, et al. (2010), “A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning”, Advances in multi-objective nature inspired computing (Springer), pp. 167-87.
- Pisinger, David and Ropke, Stefan (2007), “A general heuristic for vehicle routing problems”, Computers & Operations Research, No. 34 (8), pp. 2403-35.
- Rawls, Carmen G and Turnquist, Mark A (2010), “Pre-positioning of emergency supplies for disaster response”, Transportation research part B: Methodological, No. 44 (4), pp. 521-34.
- economics (2012), “Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster”, Socio-Economic Planning Sciences, No. 46 (1), pp. 46-54.
- Ropke, Stefan and Pisinger, David (2006), “An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows”, Transportation science, No. 40 (4), pp. 455-72.
- Salari, Majid, Toth, Paolo, and Tramontani, Andrea (2010), “An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem”, Computers & Operations Research, No. 37 (12), pp. 2106-20.
- Schott, Jason R (1995), “Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization”, (DTIC Document).
- Current, John R and Schilling, David A (1989), "The covering salesman problem", Transportation science, 23 (3), pp.208-13.
- Dessouky, Maged, et al. (2006), "Rapid distribution of medical supplies", Patient Flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery (Springer), pp.309-38.
- Doerner, Karl, Focke, Axel, and Gutjahr, Walter J (2007), “Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country”, European Journal of Operational Research, No. 179 (3), pp.1078-96.
- Eksioglu, Burak, Vural, Arif Volkan, and Reisman, Arnold (2009), “The vehicle routing problem: A taxonomic review”, Computers & Industrial Engineering, No. 57 (4), pp. 1472-83.
- Enz, R., Zimmerli., P., Schwarz., S., (2009), “natural catastrophes and man-made disasters in 2008”, Sigma, 2.
- Federal Emergency Management Agency (2008), "IS-26 guide to points of distribution(PODs)".
- Gendreau, Michel, Laporte, Gilbert, and Semet, Frédéric (1997) “The covering tour problem”, Operations Research, No. 45 (4), pp. 568-76.
- Golden, Bruce L, Raghavan, Subramanian, and Wasil, Edward A (2008), "The vehicle routing problem [electronic resource]": latest advances and new challenges (43: Springer).
- Hake, T. (2012), “Haiti earthquake relief efforts hampered by logistics problems”, <http://www.examiner.com/natural-disasters-innational/Haitiearthquakereliefefortshamperedbylogisticsproblems >.
- Hodgson, M John, Laporte, Gilbert, and Semet, Frédéric (1998), “A Covering Tour Model for Planning Mobile Health Care Facilities in SuhumDistrict, Ghama”, Journal of Regional Science, No. 38 (4), pp. 621-38.
- Jia, Hongzhong, Ordóñez, Fernando, and Dessouky, Maged (2007), “A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies”, IIE transactions, Np. 39 (1), pp. 41-55.
- Knott, Roger (1987), “The logistics of bulk relief supplies”, Disasters, No. 11 (2), pp. 113-15.

- Schrage, Linus (1981), “Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems”, Networks, No. 11 (2), pp. 229-32.

- Tarantilis, CD and Kiranoudis, CT (2002), “Distribution of fresh meat”, Journal of Food Engineering, No. 51 (1), pp. 85-91.

- Tricoire, Fabien (2012) “Multi-directional local search”, Computers & Operations Research, No. 39 (12), pp. 3089-101.

- Tzeng, Gwo-Hshiung, Cheng, Hsin-Jung, and Huang, Tsung Dow (2007), “Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, No. 43 (6), pp. 673-86.

- Van Hentenryck, Pascal, Bent, Russell, and Coffrin, Carleton (2010), “Strategic planning for disaster recovery with stochastic last mile distribution”, Integration of AI and OR techniques in constraint programming for combinatorial optimization problems (Springer), pp. 318-33.

- Van Wassenhove, Luk N (2005), “Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear†”, Journal of the Operational Research Society, No. 57 (5), pp. 475-89.

- Yi, Wei and Kumar, Arun (2007), “Ant colony optimization for disaster relief operations”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, No. 43 (6), pp. 660-72.

- Zitzler, E. (1999), “Evolutionary Algorithms for multi-objective optimization: method and applications”, P.h.D Thesis, dissertation ETH No. 13398 (Swaziland Federal Institute of Technology Zorikh).

- Zitzler, Eckart, Deb, Kalyanmoy, and Thiele, Lothar (2000), “Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results”, Evolutionary computation, No. 8 (2), pp. 173-95.

[1]Adaptive large neighborhood search
[2] Multi-directional local search
[1] Facility location
[2] Stock pre-positioning
[3] Relief distribution
[4] Casualty transportation
[7] Vehicle routing problem
[8] Open vehicle routing problem
[7] Multi depot open vehicle routing problem
[8] Operation research-Management system
[11] Covering tour problem
[2] Covering salesman problem
[13]Last-mile delivery problem
[14] Federal emergency management agency
[15] Satellite distribution centers (SDCs)
[16] Multi-objective covering tour problem
[17] Mini-sum facility location
[18] Maximal covering location
[19] Variable neighborhood search
[20] Path relinking
[21] Multi-stage hybrid optimization algorithm
[22] Covering
[23] Node-based
[24] Pareto set
[25] Reaction factor
[26] Number of pareto solution
[27] Maximum spread or diversity
[28] Spacing