طراحی یک مدل حمل و نقل در حوزه‌ی بحران: مدل‌سازی و حل ابتکاری

سمیه الهیاری[1*]، مجید سالاری[2]، مجتبی طالبیان شریف[3]، رضا اشتهادی[4]

دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۵/۹

چکیده

بحران‌های طبیعی (مانند زلزله، سیل، طوفان) به‌دلیل ماهیت غیرمترقبه بودنشان، خسارات سنگین و جبران‌ناپذیری را به ملت‌ها وارد می‌کنند. با بروز شرایط بحرانی و در نتیجه کاهش توانمندی‌ها به‌دلیل آسیب‌دیدگی زیرساخت‌ها، تقاضا برای کالاها و خدمات لجستیکی افزایش می‌یابد. فرآیندهایی که در هنگام امدادرسانی پس از وقوع یک بحران به انجام می‌رسند، لازم است به‌نحوی برنامه‌ریزی شوند تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن پاسخ‌گوی نیاز آسیب‌دیدگان باشند. در این بین نحوه‌ی توزیع کالاها و خدمات امدادی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

مدل معرفی شده در این مقاله به ارائه‌ی سیاستی جدید و کاربردی برای توزیع کالاهای مورد نیاز آسیب‌دیدگان با شروع از چند انبار مرکزی می‌پردازد. از آنجایی که در عمل امکان امدادرسانی مستقیم، به تک‌تک آسیب‌دیدگان وجود ندارد؛ در این مسئله، فرض کاربردی و جدیدی را به‌منظور تسریع در امدادرسانی در نظر گرفتیم که به دو طریق تقاضای نقاط تأمین می‌شود: یا نقاطِ تقاضا مستقیماً توسط وسایل نقلیه ملاقات می‌شوند یا توسط نقاطِ ملاقات شده، پوشش داده می‌شوند. هدف نهایی در این مسئله حداقل‌سازی زمان امدادرسانی (مجموع زمان‌های سفر وسیله‌ی نقلیه و زمان طی مسیرِ آسیب‌دیدگان به‌طور پیاده تا نقاط ملاقات شده) است. مدل ارائه شده بر روی مجموعه‌ای از داده‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است. به‌علت محدودیت روش دقیق در پاسخ‌دهی در زمان معقول با کیفیت مناسب، روشی ابتکاری ارائه شده است که به حل مسئله در زمانی بسیار کوتاه و با کیفیتی خوب پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: حمل و نقل، مدیریت بحران، مسیریابی وسایل نقلیه‌ی ظرفیت‌دار، پوشش، روش حل دقیق و ابتکاری.

۱- مقدمه

یک زنجیره تأمین (SC) به جریان منابع (مواد، اطلاعات و خدمات) از تأمین‌کنندگان مواد خام تا مشتریان پایانی اشاره دارد و شامل نهادها و فرآیندهایی می‌شود که منابع را ایجاد و به مصرف‌کنندگان تحویل می‌دهند. بهبود کیفیت خدمت‌رسانی و کاهش هزینه‌های عملیات لجستیکی که مهم‌ترین مقوله در مدیریت زنجیره تأمین (SCM) می‌باشد؛ به‌طور چشم‌گیری به کیفیت نحوه‌ی طراحی شبکه‌ی توزیع وابسته است و برای ارضای نیازمندی‌های مشتریان، از نقطه‌ی مبدأ تا مصرف، وظیفه‌ی برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل مؤثر جریان و انبارش منابع را به‌عهده دارد.

ما در این مقاله به کاربرد لجستیک در بحران‌های ناشی از حوادث طبیعی تمرکز می‌کنیم، به‌گونه‌ای که در ادامه شرح داده می‌شود.

بحران‌های طبیعی و غیرطبیعی، پیشینه‌ای به درازای عمر زمین دارند. به‌دلیل ماهیت غیر مترقبه بودن این حوادث، تلفات چشم‌گیری بر جان و مال انسان‌ها وارد شده و گستره‌های شهری را همواره با تجربه‌ی تلخی از بروز این‌گونه

۱*- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: so.allahyari@gmail.com ، نشانی: مشهد، خیابان نخریسی، چمن۳۱، بنی هاشم ۱۴، پلاک ۷۶

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، پست‌الکترونیکی: msalari@um.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، پست‌الکترونیکی: mtsharif.86@gmail.com

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، پست‌الکترونیکی: reza_eshtehadi@yahoo.com

بلایا مواجه نموده است، لذا به‌عنوان مانعی برای توسعه‌ی پایدار شهرها، مورد توجه گسترده‌ی دولت‌ها به‌شمار می‌روند.

لزوم اتخاذ سریع تصمیم‌ها و اجرای عملیات، دانشی تحت عنوان مدیریت بحران را به‌وجود آورده است. این دانش به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که جهت کاهش اثرات این حوادث و کاهش آسیب‌پذیری، قبل، حین و بعد از بحران انجام می‌شود. فعالیت‌های مرتبط در این حوزه در چهار فاز طبقه‌بندی می‌شوند.

- ***پیش‌گیری***[1]: کلیه اقداماتی که موجب پیش‌گیری از وقوع بحران‌ها و سبب جلوگیری از آثار مخرب بحران در جامعه می‌شود.

- ***آمادگی***[2]: کلیه اقداماتی که دولت و مردم را قادر به عکس‌العمل سریع، به موقع و کارا در موقع بروز حادثه می‌نماید.

- ***پاسخگویی***[3]: شامل ارائه خدمات اضطراری به دنبال وقوع حادثه با هدف حفاظت از منابع مختلف جامعه یا سازمان در جلوگیری از گسترش خسارات می‌باشد.

- ***بازسازی***[4]: مجموعه اقدامات لازم برای بازگرداندن شرایط یک جامعه یا سازمان آسیب دیده پس از بحران به شرایط عادی با توجه به کلیه ضوابط ایمنی فاز بازسازی را تشکیل می‌دهند.

اتخاذ تصمیمات صحیح و انجام اقدامات مناسب و به‌هنگام در هر فاز، منجر به کاهش خسارات احتمالی در زمان وقوع حادثه و کاهش آسیب‌پذیری جامعه خواهد شد.

با بروز شرایط بحرانی و در نتیجه کاهش توانمندی‌ها به دلیل آسیب‌دیدگی زیرساخت‌ها، تقاضا برای کالاها و خدمات لجستیکی افزایش می‌یابد، لذا توجه جوامع علمی طی ده سال اخیر در مورد لجستیک امدادی افزایش یافته است. لجستیک بحران به‌عنوان محور اصلی فعالیت‌های امدادی و یکی از زیرسیستم‌های حیاتی مدیریت بحران (مهم‌ترین جنبه‌ی فاز پاسخ) محسوب شده و شامل فعالیت‌های تدارک، نگهداری و تعمیرات تجهیزات و ماشین‌آلات، برنامه‌ریزی برای توزیع کالاهای امدادی و حمل‌ونقل مجروحین است.

با توجه به اهمیت عملیات لجستیکی در هنگام وقوع حوادث و تأثیری که طراحی یک شبکه‌ی توزیع مناسب روی کاهش زمان امدادرسانی به آسیب دیدگان و هزینه‌های حمل و نقل می‌گذارد؛ ما در این مقاله به‌طور خاص به ارائه‌ی مدلی کاربردی و جدید برای مسیریابی وسیله نقلیه‌ی امدادی و توزیع کالاها امدادی در هنگام وقوع حوادث طبیعی می‌پردازیم، که در آن‌ها کاهش صدمات و تلفات، بسیار حیاتی است.

مقاله‌ی اکسیو گلا[5] و همکاران به بررسی جامع «مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه[6] (VRP)» پرداخته است. VRP در حیطه‌ی بحران از عملیات بعد از وقوع حادثه بوده و به‌طور کلی با مسیریابی وسایل نقلیه امدادی برای خدمت‌رسانی به آسیب‌دیدگان، از انبارهایی با مکان‌های از پیش تعیین شده با هدف کمینه کردن زمان خدمت‌رسانی و دیرترین زمان رسیدن کالاها، کمینه کردن هزینه‌ها (هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های ثابت و متغیر وسایل نقلیه، هزینه‌ی جریمه‌ی تقاضاهای از دست رفته) و بیشینه کردن ضریب اطمینان سفر و تحت محدودیت‌هایی همچون ظرفیت وسایل نقلیه و انبارها، طول مسیرها، حداکثر زمان رسیدن به مشتریان و... سرو کار دارد[۱].

مسئله‌ی ما نوعی تعمیم‌یافته از VRP و به‌طور خاص‌تر نوعی از «مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار با چندین انبار[7] (MDCVRP)»، به همراه ترکیب آن با «مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد پوشش‌دهنده[8] (CSP)»، می‌باشد که موجب در نظر گرفتن شرایط واقعی‌تر در هنگام بحران می‌شود.

در MDCVRP چندین انبار با وسایل نقلیه‌ی ظرفیت‌دار وجود دارد که از هر انبار شروع به حرکت می‌کنند و به همان انبار بر می‌گردند.

در CSP نیز به دنبال تعیین حداقل هزینه‌ی مسیر از یک زیر مجموعه از نقاط هستیم به‌طوری که هر نقطه‌ای که توسط وسیله‌ی نقلیه ملاقات نمی‌شود، در فاصله‌ی پوششی از پیش تعیین شده از یک نقطه‌ی موجود روی مسیر، قرار گیرد. CSP برای اولین بار توسط کرنت[9] معرفی و مدل‌سازی شد و برای حل آن روشی ابتکاری با سه گام ارائه گردید[۲]. برای آگاهی از برخی مقالات در این زمینه به مقاله گلدن[10] مراجعه کنید[۳].

1- Mitigation
2- Preparedness
3- Response
4- Recovery

5- Eksiogla
6- Vehicle Routing Problem
7- Multi Depot Capacitated Vehicle Routing Problem
8- Covering Salesman Problem
9- Current
10- Golden

مسائل VRP در سال‌های اخیر پیچیده‌تر شده و برای کاربردهای دنیای واقعی طراحی شده‌اند. در این بین می‌توان به کاربرد این مدل‌ها در شرایط اورژانسی اشاره نمود. در سال ۱۹۸۰، نات[1] با ارائه‌ی مدل مسیریابی در حوزه‌ی بحران، زمینه‌ساز شروع حمل و نقل برای امداد رسانی در هنگام وقوع حوادثِ طبیعی شد[۴]. روز به روز توجه مجامع علمی به بحث لجستیک و مسیریابی در حوزه‌ی بحران افزوده می‌شود، به‌طوری که مقاله‌ی دلاتوره[2] و همکاران به بررسی کارهای انجام شده تا سال ۲۰۱۱ در حوزه‌ی مسیریابی بحران می‌پردازد[۵].

روش‌های تحقیق در عملیات کاربردی گسترده برای مدل‌سازی عملیات لجستیکی دارند، به‌طوری که مقاله کانهی[3] و همکاران مدل‌های بهینه‌سازی به‌کار رفته در حوزه‌ی لجستیک اضطراری را مورد بررسی قرار می‌دهد[۶].

همان‌طور که بیان گردید فعالیت‌های مربوط به لجستیک بحران را می‌توان به دو دسته‌ی عملیات قبل از وقوع حادثه (مکان‌یابی تسهیلات[4] لازم [۷] و [۸] و پیش جایگذاری موجودی[5] [۹] و [۱۰]) و عملیات بعد از وقوع حادثه برای کنترل و تثبیت شرایطِ منطقه‌ی حادثه‌دیده (عملیات لجستیکی مانند توزیع کالاهای امدادی[6] و مسیریابی وسایل نقلیه [۸] و [۱۱] و حمل و نقل مجروحین[7] [۱۲] و [۱۳]) تقسیم نمود.

مقاله دسوکی[8] [۸] به ارائه‌ی مدل جایابی- توزیع یکپارچه در هنگام بحران برای هماهنگی حمل و نقل و عملیاتِ تخلیه می‌پردازد. در این مقاله، هدف بهینه کردن هزینه‌های عملیاتی انبارها و زمان کل حمل و نقل می‌باشد.

مرجع [۱۱] یک روش بهینه‌سازی احتمالی دو مرحله‌ای برای انتخاب مکان‌های انبارش و تعیین سطح موجودی انبارها و نحوه‌ی توزیع داروهای مورد نیاز بحران‌زدگان مطرح کرده است. هدف مرحله‌ی اول، کمینه کردن مجموع هزینه‌های عملیاتی انبارها و هدف مرحله دوم کمینه کردن کل زمان حمل و نقل و مجموع تقاضاهای تأمین نشده می‌باشد.

با توجه به بررسی نویسندگان مقاله، مدلی که مسائل مرتبط مذکور را به‌صورتی که قبلاً تشریح گردید به شکلی کاربردی ترکیب و یکپارچه کند، وجود ندارد. ما در این مقاله به دنبال توسعه‌ی چنین مدلی هستیم.

ادامه‌ی این مقاله به‌صورت زیر سازماندهی می‌شود: در بخش۲، معرفی و مدل‌سازی مسئله ارائه می‌شود. در بخش ۳، به توسعه‌ی رویکرد ابتکاری جهت حل مسئله پرداخته شده است. در بخش ۴، ابتدا نحوه‌ی تولید داده، را بیان شده و سپس نتایج محاسباتی را به‌منظور ارزیابی روش ابتکاری و مقایسه‌ی آن با حل به روش دقیق، ارائه شده است. در نهایت بخش ۵، شامل نتیجه‌گیری و جمع‌بندی می‌باشد.

۲- معرفی و مدل‌سازی

در این قسمت ابتدا به تعریف مسئله پرداخته و سپس برای حل دقیق آن به مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و حل آن با CPLEX 12.3 می‌پردازیم.

۲-۱- معرفی

این مقاله به دنبال تعیین برنامه‌ی عملیاتی و نحوه‌ی امدادرسانی به آسیب‌دیدگان، با هدف پوشش کامل تقاضا و نیز کمینه کردن زمان حمل و نقل می‌باشد. نقاط تقاضا را به‌صورت مجموعه‌ای از آسیب‌دیدگان در نظر گرفته شده است.

به‌دلیل محدودیت‌های زمانی در ارسال کالاهای حیاتی امدادی و نیز عادلانه و کارامد بودن سیستم توزیع و همچنین محدودیت در تعداد و ظرفیت وسایل نقلیه امدادی موجود، فرضی جدید و سازگار با شرایط واقعی در نظر گرفته شده است؛ به این صورت که امکان ملاقات کردن کلیه نقاط توسط وسیله‌ی نقلیه به‌طور مستقیم وجود نداشته؛ لذا به دو طریق تقاضای نقاط تأمین می‌شود:

۱- ملاقات ۲- پوشش.

در حالت اول، تعدادی از نقاط تقاضا توسط وسایل نقلیه‌ی امدادی به‌طور مستقیم ملاقات می‌شوند، برخی از آنها تنها تقاضای خود را پاسخ می‌دهند و برخی دیگر به‌عنوان یک مرکز توزیع موقت عمل کرده و علاوه بر تقاضای خود، تقاضای برخی نقاط دیگر را که ملاقات نشده و در فاصله‌ی پوشش آن مرکز توزیع قرار گرفته‌اند، پوشش می‌دهند.

در حالت دوم نیز، نقاط تقاضا توسط برخی از نقاطِ ملاقات شده (با سفر به‌طور پیاده به نقاط ملاقات شده) پوشانده می‌شوند و در نتیجه برای نزدیکی بیشتر مسئله به شرایط واقعی، برای پاسخ به تقاضای این نقاط (در حالت

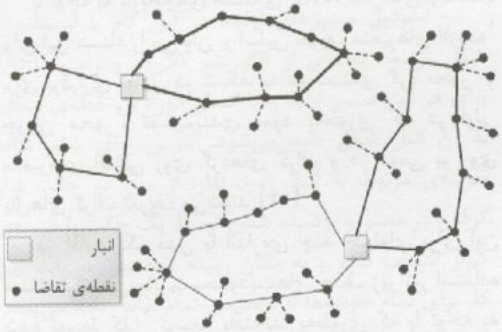
1- Knott
2- Delatorre
3- Caunhye
4- Facility Location
5- Stock Pre-Positioning
6- Relief Distribution
7- Casualty Transportation
8- Dessoky

دوم) تابع هزینه‌ای به‌صورت تدریجی در نظر گرفته شده است؛ به‌طوری که تا یک فاصله‌ی پوششِ اولیه از نقاطِ تقاضا، هزینه‌ی پوشش، صفر و از این فاصله تا یک فاصله‌ی بیشینه‌ی قابل قبول برای پوشش، هزینه‌ی پوشش، تابعی پله‌ای بر حسب فاصله است و پس از این شعاع بیشینه، هزینه‌ی پوشش، بینهایت می‌شود. به عبارتی با افزایش زمان سفر نقاط تقاضا به مراکز توزیع موقت، تأمین نیازمندی آنها مستلزمِ هزینه‌ی بیشتری می‌شود.

مسئله تعیین مسیرهای وسایل نقلیه با هدف تأمین تقاضای کلیه نقاط تقاضا تحت شرایط زیر است به‌طوری که مجموع هزینه‌ی حمل (زمان سفر یا مسافت طی شده) کمینه شود.

- هر وسیله‌ی نقلیه باید حداکثر به یک مسیر تخصیص یابد.
- نقطه شروع و پایان حرکت یک وسیله نقلیه باید انباری مربوط به آن وسیله باشد.
- تقاضای هر مشتری تنها توسط یک وسیله‌ی نقلیه برآورده می‌شود.
- بخشی از نقاط مستقیماً توسط وسایل نقلیه ملاقات شده و نقاط باقیمانده نیز توسط مراکز توزیع موقت پوشش داده می‌شوند.
- در هر مسیر، مجموع مقادیر تقاضاهای تحویل دادنی به نقاط تقاضای ملاقات شده روی آن مسیر و نیز نقاط تقاضای پوشش داده شده توسط نقاط ملاقات شده‌ی (یا همان مراکز توزیع موقت) روی همان مسیر، نباید از ظرفیت وسیله‌ی نقلیه‌ای که آن مسیر را طی می‌کند، تجاوز کند.
- کلیه‌ی تقاضاهای تخصیص داده شده به هر انبار مرکزی در تمامی مسیرهای متعلق به آن نباید از ظرفیت آن انبار تجاوز کند.

به‌عنوان مثال، شکل (۱، شبکه‌ای شامل ۲ انبار مرکزی، ۷۴ نقطه تقاضا و ۴ وسیله‌ی نقلیه را نشان می‌دهد که ۳۰ نقطه از آن‌ها بر روی مسیر قرار دارند و ۲۵ تا از آن‌ها به‌عنوان مرکز توزیع موقت، برخی از نقاط مجاور خود را می‌پوشانند.



شکل (۱): مثالی از شبکه‌ی مورد بررسی

حال شبکه‌ی $G = (N, A)$ را به‌صورت یک گراف کامل جهت‌دار در نظر بگیرید، به‌طوری که $N = N_C \cup N_D$، در آن N_C مجموعه‌ی نقاط تقاضا می‌باشد و هر نقطه‌ی تقاضای $i \in N_C$، تقاضای تحویل‌دادنی $(d_i > 0)$ داشته و N_D مجموعه‌ی انبارهای مرکزی می‌باشد؛ $A = \{(i,j)|i,j \in N\}$ نیز مجموعه‌ی یال‌ها می‌باشد؛ دو ماتریس زمان سفر $C = (c_{ij})$ و $C' = (c'_{ij})$، روی A تعریف شده است که در آن C زمان سفر (یا مسافت) در مسیرهایی است که توسط وسیله‌ی نقلیه طی می‌شوند و C' زمان سفری (یا مسافتی) است که نقاط تقاضا به‌طور پیاده برای تأمین تقاضای خود تا مرکز توزیع مجاورشان در حرکتند و طبیعتاً هزینه‌ای بیشتر از اولی را برای پوشش تقاضای خود متحمل می‌شوند.

از نقطه نظر استراتژیک تعداد کل وسایل نقلیه محدود بوده و به تعداد p می‌باشد و هر کدام از این وسایل با ظرفیت مشخص CV_{p_k} متعلق به یک انبار مشخص $k \in N_D$ با ظرفیت CD_k است. وسایل نقلیه برای تأمین تقاضای مشتریان از انبارهای مرکزی شروع به حرکت کرده و پس از ملاقات کردنِ تعدادی از نقاط به انبارهای مرکزی برمی‌گردند.

۲-۲- مدل‌سازی

مدل‌های VRP بر اساس تعداد محدودیت‌ها به دو دسته‌ی مدل‌های با اندازه‌ی نمایی[1] و مدل‌های با اندازه‌ی چند جمله‌ای[2]، تقسیم‌بندی می‌شوند، به‌طوری که در اولی تعداد محدودیت‌ها بر اساس تعداد گره‌های گراف، رشد نمایی و در دومی رشد چند جمله‌ای دارد.

1- Exponential-size formulation
2- Polynomial-size formulation

با توجه به تاریخچه‌ی مسئله‌ی VRP، مدل‌های ارائه‌شده برای این مسئله را می‌توان بر اساس تعریف متغیرهای افزوده[1] برای برقراری تعادل در شبکه، به دو دسته‌ی گره محور[2] و جریان محور[3]، تقسیم‌بندی نمود به‌طوری که در اولی متغیرهای اضافی روی گره‌های گراف و در دومی بر روی یال‌های گراف تعریف می‌شوند [۱۴].

در ادامه یک مدل با اندازه‌ی چند جمله‌ای برای این مسئله ارائه می‌نماییم. محدودیت‌های حذف زیر تور استفاده شده توسط کارا[4] توسعه یافته‌اند؛ به‌طوری که با توجه به تاریخچه‌ی محدودیت‌های زیر تور، تأثیر قابل توجهی در کاهش زمان حل دارند[۱۴] و [۱۵].

حال قبل از ارائه‌ی مدل برنامه‌ریزی خطی، متغیرهای تصمیم در ادامه معرفی می‌شود.

x_{ijP_k}: اگر وسیله نقلیه p که متعلق به انبار k است، مستقیماً از نقطه‌ی $i \in N$ به نقطه‌ی $j \in N$ برود، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

w_{ijP_k}: اگر تقاضای نقطه تقاضای $i \in N_C$ توسط مرکز توزیع $j \in N_C$ (که ملاقات شده است)، با وسیله نقلیه‌ی p که متعلق به انبار k است، تأمین شود؛ مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

u_{ijP_k}: مقدار تقاضای تحویل دادنی به نقاط تقاضای بعد از نقطه‌ی $i \in N$، (چه نقاط روی مسیر که بعد از i هستند و چه نقاطی که توسط نقاطِ بعد از نقطه‌ی i پوشش داده می‌شوند)، توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی p که متعلق به انبار k است، از طریق یال (i,j) ارسال می‌شود.

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

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌ی حمل (زمان سفر یا مسافت طی شده) را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) بیان می‌کند که تعداد یال‌های ورودی به هر نقطه $i \in N$، باید با تعداد خروجی‌های آن برابر باشد. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که تقاضای کلیه نقاط تأمین می‌گردد؛ بدین صورت که هر نقطه تقاضا باید یا به خودش (در صورتی که مستقیماً توسط وسیله‌ی نقلیه ملاقات شود) یا به نقطه تقاضای دیگر که آن نقطه به‌طور مستقیم توسط وسیله‌ی نقلیه

$$\min z = \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{P_k} c_{ij}x_{ijp_k} + \sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_c} c'_{ij}w_{ij} \quad (۱)$$

$$\sum_{j\in N} x_{ijp_k} = \sum_{j\in N} x_{jip_k} \qquad \forall i \in N, \forall P_k \quad (۲)$$

$$\sum_{P_k}\sum_{j\in N_c} w_{ijp_k} = 1 \qquad \forall i \in N_c \quad (۳)$$

$$\sum_{\substack{l\in N,\\ l\neq i}} a_{ij}x_{jlp_k} \geq w_{ijp_k} \qquad \forall i,j \in N_c, \forall P_k \quad (۴)$$

$$\sum_{j\in N} x_{ijp_k} \leq w_{iip_k} \qquad \forall i \in N_c, \forall P_k \quad (۵)$$

$$\sum_{j\in N} x_{ijp_k} \leq 1 \qquad \forall i \in N, \forall P_k \quad (۶)$$

$$\sum_{P}\sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_c} d_i w_{ijp_k} \leq CD_k \qquad \forall k \in N_D \quad (۷)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{\substack{m\in N_D,\\ m\neq k}} x_{imP_k} = 0 \qquad \forall P_k \quad (۸)$$

$$\sum_{j\in N} u_{jip_k} - \sum_{j\in N} u_{ijp_k} = \sum_{j\in N_c} d_j w_{jip_k} \qquad \forall i \in N_c, \forall P_k \quad (۹)$$

$$\sum_{j\in N_c} u_{kjp_k} = \sum_{i\in N_c}\sum_{j\in N_c} d_i w_{ijp_k} \qquad \forall P_k \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i\in N_c} u_{ikp_k} = 0 \qquad \forall P_k \quad (۱۱)$$

$$u_{ijp_k} \leq (CV_{p_k} - d_i)x_{ijp_k} \qquad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall P_k \quad (۱۲)$$

$$d_j x_{ijp_k} \leq u_{ijp_k} \qquad \forall i \in N, \forall j \in N_c, \forall P_k \quad (۱۳)$$

$$x_{ijP_k} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in N, \forall P_k \quad (۱۴)$$

$$w_{ijP_k} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in N_c, \forall P_k \quad (۱۵)$$

1- Additional Variable
2- Node-based
3- Flow-based
4- Kara

ملاقات می‌شود، تخصیص یابد. محدودیت (۴) نشان می‌دهد که اگر $i \in N_c$ بخواهد توسط $j \in N_c$ (که توسط وسیله‌ی نقلیه ملاقات می‌شود)، پوشش داده شود؛ باید در شعاع پوشش j قرار داشته باشد. محدودیت (۵) بیان می‌کند که اگر قرار باشد $i \in N_c$ ملاقات شود باید تقاضایش به خودش تخصیص یابد (یعنی $w_{ii} = 1$). محدودیت (۶) بیان می‌کند که از هر نقطه‌ی تقاضای $i \in N_{c1} \cup N_D$ در هر مسیر حداکثر یک یال خروجی موجود می‌باشد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که کل بار تحویل‌دادنی هر انبار از ظرفیت آن انبار افزایش نیابد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که هر وسیله‌ی نقلیه باید به انباری که از آن خارج شده است، برگردد.

محدودیت (۹)، قید توازن جریان است و برای حذف زیرتورها نیز به کار می‌رود. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که کل بار ارسالی هر وسیله‌ی نقلیه (در هر مسیر) از هر انبار باید برابر با تقاضای نقاط تخصیص‌یافته به آن وسیله (نقاط تقاضای ملاقات شده یا پوشش داده شده توسط مسیر) باشد. محدودیت (۱۱) ضمانت می‌کند که هیچ تقاضای تحویل‌دادنی به هر انبار مرکزی نباید تحویل داده شود. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) نیز حدود متغیرهای جریان می‌باشند. محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) نیز محدودیت‌های صفر و یک هستند.

۳- روش ابتکاری

برای حل این مسئله در ابعاد بزرگ، یک روش ابتکاری پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی دارای دو بخش ساخت جواب اولیه[1] و جستجوی محلی[2] می‌باشد.

۳-۱- ساخت جواب اولیه

- خوشه‌بندی (تخصیص نقاط تقاضا به انبارها): ابتدا هر نقطه به نزدیک‌ترین انبار تخصیص داده می‌شود. در صورتی که ظرفیت انباری پاسخگو نباشد، برای تمام نقاط تخصیص داده شده جریمه تخصیص به انبار مجاز بعدی محاسبه می‌شود. سپس تا زمانی که تقاضای نقاط هر خوشه از کل ظرفیت انبار بیشتر نشده است، به ترتیب مشتریان با کمترین جریمه را از خوشه خارج کرده و به انبار جدید تخصیص داده می‌شود.

- تشکیل مسیرهای اولیه: در این گام با استفاده از شکلِ توسعه یافته‌ای از الگوریتم کلارک و رایت[3] [۱۶]، برای هر انبار مسیر اولیه را با اتصال دورترین نقطه‌ی ممکن به آن انبار شکل داده می‌شود.. سپس برای سایر نقاط خوشه‌ی مربوط به انبار مورد نظر، از بین دو حالت قرار گرفتن در مسیر و پوشیده شدن توسط یک حالت با هزینه‌ی کم‌تر انتخاب شده و به مکان بهینه تخصیص می‌یابد. این کار برای تمام خوشه‌ها تا تخصیص تمام نقاط ادامه می‌یابد.

لازم به ذکر است که الگوریتم فوق قادر است تا مسیرهای اضافه را نیز حذف کند.

۳-۲- جستجوی محلی

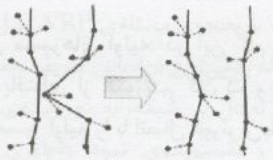
با در اختیار داشتن جوابِ اولیه از جستجوهای محلی که در ادامه مطرح شده‌اند، برای بهبود جواب استفاده می‌شود.

۳-۲-۱- *ادغام مسیر*: در این الگوریتم تمام نقاط (ملاقات شده و تحت پوشش) متعلق به یک مسیر را از جایگاه اولیه‌ی خود خارج کرده و مجدداً به ترتیب به جواب اضافه می‌شود. این نقاط بر اساس اینکه در چه حالتی افزایش هزینه‌ی کمتری دارند، می‌توانند به داخل مسیرها افزوده شده یا تحت پوشش نقاط موجود بر روی مسیر قرار گیرند.

۳-۲-۲- *بازآرایی*: در این روش علاوه بر تمامی نقاط تحت پوشش، برخی از نقاط ملاقات شده‌ی یک مسیر مشخص از مکان اولیه‌ی خود جدا می‌شوند. نحوه‌ی انتخاب نقاط ملاقات شده به این صورت است که ابتدا عددی تصادفی بین عدد یک تا تعداد نقاط موجود بر روی آن مسیر تولید می‌گردد. مقدار بدست آمده در حقیقت بیانگر تعداد نقاط کاندید برای جداسازی از آن مسیر خاص هستند. سپس این تعداد نقطه از مسیر مورد نظر به‌صورت تصادفی بیرون کشیده می‌شوند. در نهایت تمامی نقاط جدا شده به ترتیب در بهترین موقعیت ممکن (ملاقات شده یا تحت پوشش) قرار می‌گیرند.

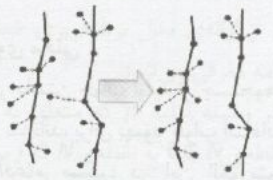
۳-۲-۳- *جداسازی- افزودن*: در این روش هر یک از نقاط ملاقات شده به ترتیب به همراه نقاط تحت پوشش خود از مسیرها بیرون کشیده می‌شوند. آنگاه امکان وارد کردن این نقطه به مکان بهتری در یک مسیر دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل (۲)).

1- Initial Solution
2- Local Search
3- Clarke and Wright



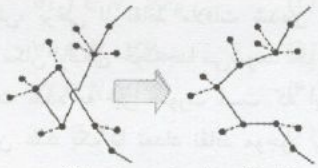
شکل (۲): مثالی از جداسازی- افزودن

۳-۲-۴- ***جداسازی- افزودن نقاط تحت پوشش:*** این امکان وجود دارد که با تخصیص دادن برخی از نقاط پوشیده شده به نقطه‌ای دیگر در جواب نهایی بهبود حاصل شود. این روش وضعیت مطرح شده را مورد بررسی قرار می‌دهد (شکل (۳).



شکل (۳): مثالی از جداسازی- افزودن نقاط تحت پوشش

۳-۲-۵- ***تعویض داخل مسیر:*** الگوریتم بهبود دهنده‌ی دیگری که برای این مسئله در نظر گرفته شده است میزان صرفه جویی حاصل از تعویض مکان تمامی زوج نقاط موجود بر روی یک مسیر را به همراه نقاط تحت پوشش را محاسبه کرده و بهترین تغییر ممکن را اعمال می‌کند (شکل (۴).

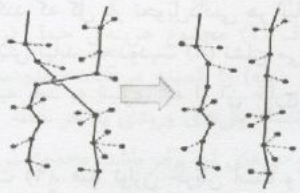


شکل (۴): مثالی از تعویض داخل مسیر

۳-۲-۶- ***تعویض:*** رویکرد مورد استفاده در این روش مشابه گام قبلی است با این تفاوت که انتخاب زوج نقاط محدود به یک مسیر نبوده و از کل فضای جواب صورت می‌گیرد (شکل (۵).

شکل (۵): مثالی از تعویض

۳-۲-۷- ***تعویض مسیرها:*** آخرین الگوریتم استفاده شده به تعویض بخش‌هایی از مسیرهای مختلف متعلق به یک انبار مشترک با یکدیگر می‌پردازد. فرآیند کار به این نحو است که با در نظر گرفتن یک نقطه‌ی دلخواه بر روی هر یک از زوج مسیر انتخابی و تقسیم هر کدام از آن مسیرها به دو قطعه، حالت‌های مختلف اتصال چهار قطعه‌ی به دست آمده از این دو مسیر به یکدیگر بررسی می‌شوند (شکل (۶).



شکل (۶): مثالی از تعویض مسیرها

۴- نتایج محاسباتی

به‌منظور ارزیابی مدل، سه دسته داده‌ی ۲۰ تایی (در مجموع ۶۰ داده) در قالب سه اندازه‌ی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ تایی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف به‌طور تصادفی تولید شده‌اند. مسئله به‌صورت دقیق به کمک CPLEX 12.3 بدون تغییر تنظیمات پیش‌فرض با محدودیت زمانی دو ساعت حل شده است.

جدول (۱) برای روش دقیق به ترتیب بهترین کران بالای ارائه شده توسط نرم‌افزار، زمان حل و درصد اختلاف کران بالا و پایین به دست آمده را نمایش می‌دهد. در بخش مربوط به روش ابتکاری این جدول، علاوه بر مقدار تابع هدف به دست آمده و زمان حل، درصد اختلاف بین کران بالای روش دقیق و تابع هدف روش ابتکاری نوشته شده است. ستون آخر این جدول نیز تعداد داده‌هایی که در آن روش ابتکاری جواب بهتری نسبت به روش دقیق بدست آورده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش بعد مسئله توانایی روش دقیق در بدست آوردن جوابی با کیفیت مناسب و زمانی معقول به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی به‌دلیل ماهیت مسئله لازم است تا جواب مناسب در زمانی اندک به دست آید که روش ابتکاری از این جهت بسیار موفق عمل کرده است.

جدول (۱): مقایسه‌ی نتایج حل به روش دقیق و ابتکاری

تعداد بهبود	روش ابتکاری				روش دقیق			تعداد نقاط
	درصد اختلاف با جواب دقیق	زمان (ثانیه)	تابع هدف		درصد اختلاف تا بهینگی	زمان (ثانیه)	تابع هدف	
۳	۰/۸۱	۰/۰۱۷	۴۳۶/۱		۴/۰۵	۶۰۸۵	۴۳۲/۴۱	۲۰
۱۰	۰/۱۱	۰/۰۲۵	۴۹۴/۰۳		۹/۴۸	۷۲۰۰	۴۹۳/۵۴	۲۵
۵	۱/۲۶	۰/۰۳۲	۵۶۶/۱۸		۱۴/۰۹	۷۲۰۰	۵۵۹/۷۴	۳۰
۶	۰/۷۳	۰/۰۲۵			۹/۲۱	۶۸۲۸/۷۱		میانگین

۵- نتیجه و جمع‌بندی

این مقاله به معرفی مدلی برای مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه در گام پاسخ بحران می‌پردازد که در آن فرضیات متعددی هم‌چون ظرفیت انبار، ظرفیت وسایل‌نقلیه و پوشش تدریجی در نظر گرفته شده است تا مدلی را با شرایط واقعی‌تر ارائه دهد.

مدل مذکور بر روی مجموعه‌ای از داده‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌دلیل محدودیت روش دقیق برای ارائه‌ی جوابی در زمان معقول و با کیفیت مناسب، رویکردی ابتکاری برای این مسئله در نظر گرفته شد تا جواب‌هایی با کیفیت بهتر به دست آیند.

منابع

[1] Eksioglu, B.,Vural, A.V.,Reisman A., "***The vehicle routing problem: a taxonomic review***", Computers and Industrial Engineering, No.57, pp. 1472–1483, 2008.

[2] Current, JR., Schilling, DA., "***The covering salesman problem***", Transportation Science, No. 23(3), pp. 208-213, 1989.

[3] Golden, B., Naji-Azimi, Z., Raghavan, S., Salari, M., Toth, P., "***The generalized covering salesman problem***", INFORMS Journal on Computing, doi:10. 1287/ijoc.1110.0480, 2011.

[4] Knott, R., "***The logistics of bulk relief supplies Disasters***", No. 11(2), pp. 113-115, 1987.

[5] De la Torre, L.E., Dolinskaya, I.S., Smilowitz, K.R., "***Disaster relief routing: Integrating research and practice***", Socio-Economic Planning Sciences, No. 46(1), pp. 88-97, 2012.

[6] Caunhye, A.M., Nie, X., Pokharel, S., "***Optimization models in emergency logistics: A literature review***", Socio-Economic Planning Sciences, No. 46, pp. 4-13, 2012.

[7] Jia H, Ordóñez F, Dessouky M. ***A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies***. IIE Transactions 2005;39(1): 41e55.

[8] Dessouky, M., Ordóñez, F., Jia, H., Shen, Z., "***Rapid distribution of medical supplies***", In: Hall R, editor. Delay management in health care systems. New York: Springer, pp. 309-338, 2006.

[9] Rawls, C. G., Turnquist, M.A., "***Pre-positioning of emergency supplies for disaster response***", Transportation Research Part B: Methodological, No. 44(4), pp. 521-534, 2010.

[10] Rawls, C.G., Turnquist, M.A., "***Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster***", Socio-Economic Planning Sciences, No. 46(1), pp. 46-54, 2012.

[11] Mete, H., Zabinsky, Z.,"***Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management***", International Journal of Production Economics, No.126(1), 76 - 84, 2010.

[12] Barbaroso_glu, G., Özdamar, L., Çevik, A.,"***An interactive approach for hierarchicalanalysis of helicopter logistics in disaster relief operations***", European Journalof Operational Research, No.140(1), 118 - 33, 2002.

[13] Yi, W., Kumar, A.,"***Ant colony optimization for disaster relief operations***", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, No. 43(6), 660 – 672, 2007.

[14] Kara, I.,"***Two ındexed polynomial size formulations for vehicle routing problems***", Technical report, 2008/01, Baskent University, Ankara/Turkey 2008.

[15] Kara, I., Laporte, G., Bektas, T., "***A note on the lifted Miller–Tucker–Zemlinsubtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem***", European Journal of Operational Research, No. 158, pp. 793-795, 2004.

[16] Prins, C., Prodhon, C., Wolfler-Calvo, R., ***Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking***", 4OR, NO. 4, pp. 221-238, 2006.