آینده‌پژوهی دفاعی، سال چهارم، شماره ۱۵، زمستان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

از صفحه ۶۱ تا صفحه ۸۴

برنامه‌ریزی اعتباری عدد صحیح فازی جهت مدل‌سازی و حل مسأله حمل و نقل و امداد بشردوستانه پس از بحران در شرایط فازی

ملیحه نیک‌سیرت*[1]

چکیده

در شرایط پس از بحران، یکی از مهمترین هدف‌های سازمان‌های حمل‌ونقل بشردوستانه حمل کالاهای ضروری در سریع‌ترین زمان ممکن به مکان حادثه است. بدین منظور باید تصمیماتی در زمینه تأمین سریع وسایل نقلیه موردنیاز و زمان‌بندی و مسیریابی آنها اتخاذ شود. مسأله حمل‌ونقل کمک‌های بشردوستانه در شرایط پس از بحران، به دلیل کمبود وسایل نقلیه، شرایط عدم قطعیت حاکم بر مسأله و تغییرات آنی و غیرقابل پیش‌بینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله مسأله تأمین، مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه به صورت یکپارچه و در شرایط عدم قطعیت با هدف رساندن کالاهای ضروری در پنجره زمانی مشخص به مکان‌های آسیب‌دیده با کمترین هزینه در نظر گرفته شده است. بر این اساس در این تحقیق، ابتدا منابع عدم قطعیت در مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه پس از بحران استخراج شده است که شامل عدم قطعیت در هزینه استفاده از وسیله نقلیه، زمان سفر و محدودیت‌های فازی است. سپس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته فازی برای مسأله پیشنهاد شده است که همزمان تابع هدف فازی، محدودیت‌های فازی و پارامترهای فازی را شامل می‌شود. جهت برخورد با عدم قطعیت و ارائه راهکاری که قادر به یافتن استراتژی‌های پایدار در مقابل تغییرات محیطی در شرایط پس از بحران باشد راهکار برنامه‌ریزی اعتباری فازی و رابطه اعتبار فازی پیشنهاد شده است. مدل نهایی مسأله در نرم‌افزار بهینه‌سازی AMPL پیاده‌سازی و نتایج محاسباتی در راستای ارزیابی مدل و راهکار پیشنهادی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی:

حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه، مسیریابی وسایل نقلیه، زمان‌بندی وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی،برنامه‌ریزی اعتباری فازی.

[1]. استادیار گروه علوم کامپیوتر دانشگاه صنعتی بیرجند

* نویسنده مسئول: Email: niksirat@birjandut.ac.ir

مقدمه

یکی از وظایف مهم سازمان‌های حمل‌ونقل بشردوستانه در شرایط وقوع و پس از بحران، بارگیری اقلام ضروری (به عنوان مثال کیت‌های کمک‌های اولیه، امکانات گرمایشی، غذا، دارو و آب و یا انتقال افراد آسیب‌دیده به بیمارستان‌ها) از انبارهای تعیین شده و تحویل آنها به افراد آسیب‌دیده در سریع‌ترین زمان ممکن و با کمترین هزینه است. در چنین شرایطی باید تصمیم‌گیری بهینه برای تأمین سریع وسایل نقلیه و برنامه‌ریزی آنها برای انجام سریع وظایف با هزینه کمتر انجام شود. بنابراین سازمان‌های حمل‌ونقل بشردوستانه باید تصمیماتی شامل تأمین سریع وسایل نقلیه موردنیاز و زمان‌بندی و مسیریابی بهینه آنها را اتخاذ نمایند. از طرفی اقلام ضروری باید در اسرع وقت و در موعد مقرر به مناطق آسیب‌دیده تحویل شود. بنابراین تصمیمات مربوط به بکارگیری، زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه باید سریعاً و به شکل بهینه گرفته شود (Bruni et al., 2018). علاوه بر این در شرایط بحران و بعد از آن، معمولاً اطلاعات دقیق و کافی از شرایط موجود وجود ندارد. به عنوان نمونه شرایط ترافیکی شبکه حمل‌ونقل مشابه قبل از بحران نیست و البته به دلیل تغییرات آنی، غیرقابل پیش‌بینی و اطلاعات در خصوص آن ناکافی و نادقیق است.

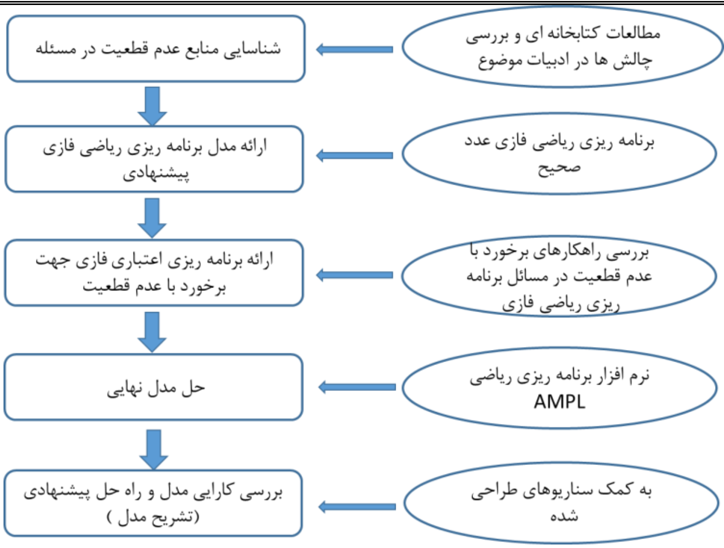
آینده‌پژوهی یکی از زمینه‌های قابل توجه در حمل‌ونقل و امداد در شرایط وقوع و پس از بحران است که کمک می‌کند تا امکانات موجود شناخته شود و در زمینه حمل آنها به نقاط آسیب‌دیده تدبیر و برنامه‌ریزی شود (بیگی و حسین‌زاده، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های آینده‌پژوهی مدل‌سازی است که یکی از حوزه‌های اصلی تحقیق در عملیات است و پیدایش آن به جنگ جهانی اول برمی‌گردد (طیبی و همکاران، ۱۳۹۶). دراین تحقیق نیز از ابزار مدل‌سازی ریاضی فازی برای مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت پس از بحران استفاده شده است. رویکردهای بهینه‌سازی در شرایط وقوع بحران و پس از آن برای تحلیل نتایج و اتخاذ تصمیم درست مفید است و نتایج حاصل از آن می‌تواند به افراد تصمیم‌گیرنده کمک کند (صبوحی و همکاران، ۱۳۹۵).

یکی از پارامترهای اساسی برای تصمیم‌گیری بهینه در این عملیات، پارامتر زمان سفر وسیله نقلیه است. پارامتر زمان سفر در حمل‌ونقل عمومی ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلف مانند حجم تقاضا و نحوه توزیع آنها در مسیرهای مختلف، نوع وسیله نقلیه و طراحی آن، رانندگان و عادات رانندگی آنها، مدیریت و عملیات حمل‌ونقل و همچنین طراحی شبکه تغییر کند. برای حمل‌ونقل ریلی که از خطوط انحصاری استفاده می‌کند، این تغییر زمان سفر کمتر اتفاق می‌افتد و بیشتر تحت تاثیر عملکرد دقیق سیستم حمل‌ونقل ریلی است. برعکس،

در سامانه اتوبوس‌رانی که خطوط انحصاری ندارند و با سایر روش‌های حمل‌ونقلی مانند حمل‌ونقل شخصی همراه می‌شوند، تغییر در شرایط ترافیکی، چراغ‌های راهنما و سایر عوامل می‌تواند زمان سفر را مانند حمل‌ونقل شخصی تحت تاثیر قرار دهد. عوامل داخلی شامل نوع و حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه، فرآیند دریافت کرایه، تعداد ایستگاه‌های اتوبوس در مسیر و ... می‌باشد (Gunawan, 2015). همچنین عوامل خارجی تاثیرگذار بر متغیر بودن زمان سفر، شرایط ترافیکی، شرایط منطقه سرویس‌دهی، مسیر، حجم تقاضا و ... است (Gunawan, 2015). عوامل تاثیرگذار در متغیر بودن زمان سفر و عدم قطعیت آن در شرایط پس از بحران به شدت افزایش می‌یابد. عواملی مانند شلوغی ترافیک، تصادفات غیرقابل پیش‌بینی، کمبود وسایل نقلیه و خرابی آنها، کمبود امکانات تعمیر و نگهداری، کمبود راننده، تقاضای نامشخص حمل‌ونقلی، خرابی جاده و زیرساخت‌های حمل‌ونقلی و ... تخمین زمان سفر دقیق را بسیار پیچیده کرده و عملاً اطلاع دقیقی از زمان سفر در دسترس نیست. به همین دلیل نیاز است راهکارهای عدم قطعیت جهت برخورد با پارامترهای نادقیق و داده‌های ناکافی مسأله در این شرایط در نظر گرفته شود.

علاوه بر این، برای جلوگیری از انجام فعالیت‌های تکراری در شرایط پس از بحران، یک سازمان مرکزی وظیفه جمع‌آوری اطلاعات (داده‌ها)، تصمیم‌گیری عملیاتی و هماهنگی منابع موجود را انجام می‌دهد. این سازمان واسط، سازمان‌های حمل‌ونقل بشردوستانه بین‌المللی و محلی را که تنها منابع موجود اقلام ضروری هستند برای پاسخگویی سریع به نیازهای مناطق آسیب‌دیده با یکدیگر هماهنگ می‌کند. همچنین در این شرایط تعداد وسیله نقلیه موجود و مدت زمان استفاده از آنها محدود است. سازمان مرکزی که وظیفه توزیع و حمل اقلام ضروری و زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه را بر عهده دارد، ناوگان حمل‌ونقلی را از یک ارائه‌دهنده خدمات حمل‌ونقلی برای مدت معین اجاره می‌کند. همچنین تعدادی انبار برای اقلام ضروری موجود است و فرض بر این است که هر تقاضا توسط نزدیکترین انبار تأمین می‌شود (Faiz et al., 2019).

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عد صحیح فازی برای مدل‌سازی مسأله حمل ونقل و امداد بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت پس از بحران پیشنهاد شده است. برای برخورد با شرایط عدم قطعیت از برنامه‌ریزی اعتباری فازی استفاده شده است. همچنین از نرم‌افزار بهینه‌سازی AMPL برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است. فرآیند انجام تحقیق در شکل (۱) خلاصه شده است.



شکل (۱) فرآیند انجام پژوهش

ساختار این مقاله به شرح زیر تدوین شده است. پس از مرور ادبیات موضوع، مبانی نظری تحقیق ارائه شده است. سپس روش‌شناسی تحقیق که شامل تعریف مسأله و ارائه مدل پیشنهادی و راهکار برنامه‌ریزی اعتباری فازی برای حل مدل فازی است، آمده است. در ادامه مدل مسأله با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی AMPL پیاده‌سازی شده است و برای ارزیابی کارایی مدل مثال‌هایی ارائه شده است. در انتها خلاصه مقاله و پیشنهاداتی برای کارهای آتی در بخش چهارم آمده است.

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

مبانی نظری

در این بخش مبانی نظری، مفاهیم مورد نیاز از تئوری فازی و برنامه‌ریزی اعتباری فازی که در بخش‌های بعدی مقاله موردنیاز است یادآوری شده است. این مفاهیم از مراجع رمیک[1]، ۲۰۰۶ و حسامیان و بهرامی، ۲۰۱۷ استخراج شده است.

فرض کنید X یک فضای توپولوژیک ناتهی باشد؛ یک زیرمجموعه فازی $\tilde{A}$ از X توسط تابع عضویت $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0,1]$ تعریف می‌شود.

تعریف ۱. برای $\alpha \in (۰,۱]$ مجموعه $[\tilde{A}]_\alpha$، α-برش نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

1. Ramik

$$[\tilde{A}]_\alpha = \left\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\right\} \quad (۱)$$

هر عضو $a \in [\tilde{A}]_\alpha$ یک سناریو با امکان بروز بیشتر از α است. α را می‌توان به عنوان سطح قطعیت در نظر گرفت؛ در این صورت α–برش شامل مجموعه نقاطی است که سطح قطعیت آنها بزرگتر یا مساوی α است. برای $\alpha \in (0,1]$ و عدد فازی $\tilde{a}$ نمادهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$(\tilde{a})_\alpha^L = \inf\left\{a \middle| a \in [\tilde{a}]_\alpha\right\} = \inf[\tilde{a}]_\alpha, \quad (۲)$$
$$(\tilde{a})_\alpha^R = \sup\left\{a \middle| a \in [\tilde{a}]_\alpha\right\} = \sup[\tilde{a}]_\alpha.$$

یکی از راهکارهای برخورد با پارامترها، تابع هدف و محدودیت‌های فازی در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی فازی، برنامه‌ریزی اعتباری فازی است که بر اساس رابطه اعتبار فازی که به صورتی ترکیبی از روابط امکان و لزوم فازی است، تعریف می‌شود. برای تشریح برنامه‌ریزی اعتباری فازی ابتدا روابط امکان و لزوم فازی تعریف شده است.

تعریف ۲. فرض کنید $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ دو عدد فازی باشند؛ روابط امکان و لزوم فازی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pos(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) = \sup\left\{\min(\mu_{\tilde{a}}(x), \mu_{\tilde{b}}(y)) \mid x \in \tilde{a}, y \in \tilde{b}, x \leq y\right\} \quad (۳)$$
$$Nec(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) = \inf\left\{\max(1-\mu_{\tilde{a}}(x), 1-\mu_{\tilde{b}}(y)) \mid x \in \tilde{A}, y \in \tilde{b}, x > y\right\}$$

در واقع این روابط دو توسیع مهم رابطه $\leq$ در اعداد حقیقی، برای مقاسیه اعداد فازی است. رمیک، ۲۰۰۶، قضیه مهم زیر را اثبات کرد.

قضیه ۱. فرض کنید $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ دو عدد فازی باشد. در این صورت:

- $Pos(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) \geq \alpha$ اگر و تنها اگر $(\tilde{a})_\alpha^L \leq (\tilde{b})_\alpha^R$،
- $Pos(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) < \alpha$ اگر و تنها اگر $(b)_\alpha^R < (a)_\alpha^L$،
- $Nec(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) \geq \alpha$ اگر و تنها اگر $(a)_{1-\alpha}^R \leq (b)_{1-\alpha}^L$.
- $Nec(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) < \alpha$ اگر و تنها اگر $(b)_{1-\alpha}^L < (a)_{1-\alpha}^R$.

تفسیر روابط دودویی $Pos(\tilde{a} \tilde{\leq} \tilde{b}) \geq \alpha$ برای اعداد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ به صورت زیر است. $\tilde{a}$ نسبت به رابطه امکان بهتر از $\tilde{b}$ با درجه قطعیت α نیست، اگر کوچکترین مقدار $[\tilde{a}]_\alpha$ کمتر یا مساوی بزرگترین مقدار $[\tilde{b}]_\alpha$ باشد که یک دیدگاه خوشبینانه برای مقایسه کمیت‌های

فازی می‌باشد. در این صورت سناریوهای a از $\tilde{a}$ و b از $\tilde{b}$ وجود دارد که $a \le b$. به طریق مشابه، رابطه $Nec(\tilde{a} \tilde{\le} \tilde{b}) \ge \alpha$ یک دیدگاه بدبینانه برای مقایسه اعداد فازی است. به منظور ارائه راهکاری که بتواند در مقابل ریسک رفتار خنثی داشته باشد از رابطه اعتباری فازی استفاده می‌کنیم که ترکیبی از روابط امکان و لزوم فازی است(Ghodratnama et al., 2012).

$$Cr(a \tilde{\le} b) = 0.5\{Pos(a \tilde{\le} b) + Nec(a \tilde{\le} b)\}. \quad (۴)$$

همچنین برای تعریف جواب بهینه در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی با تابع هدف فازی، یک رابطه اکید روی اعداد فازی به صورت زیر تعریف می‌شود(Ramik, 2007).

تعریف ۳. فرض کنید $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ دو عدد فازی باشد. α-رابطه اکید روی اعداد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ مرتبط با رابطه امکان فازی به شکل زیر تعریف می‌شود.

$Pos^*(a \tilde{\le} b) \ge \alpha$ اگر و تنها اگر $Pos(a \tilde{\le} b) \ge \alpha$ و $Pos(b \tilde{\le} a) < \alpha$.

رابطه $Pos^*(a \tilde{\le} b) \ge \alpha$ یک رابطه دودویی روی اعداد فازی است که بر اساس رابطه امکان فازی و در سطح قطعیت $\alpha \in (0,1]$ تعریف می‌شود. به طریق مشابه رابطه اکید فازی بر اساس رابطه لزوم تعریف می‌شود. برای ارزیابی رابطه‌های اکید فازی، قضیه مهم زیر اثبات شده است(Ramik, 2007).

قضیه ۲. فرض کنید $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ دو عدد فازی و $\alpha \in (0,1]$. در این صورت:

- $Pos^*(a \tilde{\le} b) \ge \alpha$ اگر و تنها اگر $\left(a\right)_{\alpha}^{R} < \left(b\right)_{\alpha}^{L}$،
- $Nec^*(a \tilde{\le} b) \ge \alpha$ اگر و تنها اگر $\left(a\right)_{1-\alpha}^{R} \le \left(b\right)_{1-\alpha}^{L}$ و $\left(a\right)_{1-\alpha}^{L} < \left(b\right)_{1-\alpha}^{R}$.

پیشینه‌های پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه حمل‌ونقل بشردوستانه در دهه گذشته انجام شده است که در آن مسأله حمل‌ونقل بشردوستانه به عنوان حالت خاصی از مسأله مسیریابی وسیله نقلیه که فرضیات واقع‌گرایانه‌ای از شرایط پس از بحران را در نظر می‌گیرد، مدل‌سازی شده است (Caunhye et. al., 2016). مرور کاملی بر مطالعات انجام شده در زمینه حمل‌ونقل بشردوستانه توسط گالیندو و بتا[1] (۲۰۱۳) انجام شده است. با توجه به تحقیقات فراوان روی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه، صرفاً تعدادی از مطالعات اخیر در زمینه مسأله موردنظر مقاله تشریح

[1]. Galindo & Batta

شده است. برونی[1] و همکاران (۲۰۱۸) یک الگوریتم ابتکاری حریصانه تکراری برای حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط پس از بحران پیشنهاد دادند که هدف آن شناسایی مسیرهای وسایل نقلیه است که منجر به حداکثر مطلوبیت شود. مطلوبیت بر اساس زمان تحویل در مکان های تقاضا محاسبه می‌شود. در مطالعه‌ای مرتبط‌تر شووارانی و ویزاری[2] (۲۰۱۸) مسأله حمل افراد آسیب‌دیده به مراکز درمانی را با هدف افزایش امکان زنده‌ماندن افراد آسیب‌دیده، مورد مطالعه قرار دادند که مشابه مسأله تولید مسیرهای وسایل نقلیه با محدودیت زمانی است. در این مقاله یک الگوریتم ژنتیکی برای حل مسأله پیشنهاد شد که عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم ژنتیک سنتی یا الگوریتم تخصیص نزدیکترین همسایگی داشت، اگرچه در این مطالعه هیچ مقایسه‌ای با الگوریتم‌های دقیق ارائه نشده بود. همچنین یک مسأله مسیریابی پویای تصادفی با هدف به حداقل رساندن زمان کل سفر در شرایط پس از بحران توسط مگفیرو و هانوکا[3] (۲۰۱۸) مطالعه شده است. در این مقاله یک الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده که توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر بهبود یافته است پیشنهاد شد که به نظر می‌رسد برای نمونه‌های کوچک و متوسط مسأله به خوبی عمل می‌کند. مسأله زمان‌بندی و مسیریابی ناوگان به صورت یکپارچه توسط لی[4] و همکاران (۲۰۰۷) بررسی شده است، که در آن نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح و راه حل ابتکاری برای مسأله پیشنهاد دادند. همچنین دستجرد و ارتوگرال[5] (۲۰۱۸) دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح کمان-محور و مسیر-محور برای مسأله مسیریابی و زمان‌بندی ناوگان در شرایط پس از بحران پیشنهاد کردند. نویسندگان همچنین از الگوریتم تولید ستون برای حل مسأله استفاده شده است.

[1]. Bruni
[2]. Shavarani & Vizvari
[3]. Maghfiroh & Hanaoka
[4]. Li
[5]. Dastjerd & Ertogral

جدول (۱) خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت توزیع کالاهای امدادی در شرایط عدم قطعیت پس از بحران

مولف	شرح مسأله	عدم قطعیت	مدل پیشنهادی	روش حل پیشنهاد شده
صالحی و همکاران (۲۰۱۷)	طراحی شبکه پخش خون بعد از زلزله	عدم قطعیت احتمالی در پارامتر تقاضا	چند دوره‌ای و احتمالی	استفاده از روش‌های دقیق و شبیه‌سازی مونت کارلو
مگفیرو و هانوکا (۲۰۱۸)	مسأله مسیریابی پویا در شرایط پس از بحران	عدم قطعیت احتمالی در تقاضا و مکان	برنامه‌ریزی عدد صحیح	الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده و جستجوی همسایگی متغیر
برونی و همکاران (۲۰۱۸)	مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط پس از بحران	عدم قطعیت در زمان سفر و خرابی تجهیزات	برنامه ریزی عدد صحیح	الگوریتم ابتکاری حریصانه
داگلاس و همکاران (۲۰۱۶)	توزیع موجودی در زنجیره تأمین امداد بحران	سناریوهای متفاوت برای تقاضا	دو سطحی	الگوریتم ابتکاری
کاودور و همکاران (۲۰۱۶)	تخصیص کالاهای امدادی به مناطق آسیب دیده	سناریوهای مختلف زمان وقوع حادثه و شرایط محیطی از جمله وجود ترافیک	دو سطحی	الگوریتم دقیق
محمدی و همکاران (۲۰۱۶)	توزیع کالاهای امدادی در شرایط زلزله	عدم قطعیت احتمالی در هزینه و زمان رخداد زلزله	چند هدفه و احتمالی	الگوریتم فراابتکاری اجتماع ذرات
ابوناصر و همکاران (۲۰۱۴)	حمل کالاهای امدادی	عدم قطعیت احتمالی در زمان و مکان	چند هدفه	الگوریتم های دقیق
شووارانی و ویزاری (۲۰۱۸)	حمل افراد آسیب‌دیده به مراکز درمانی	عدم قطعیت احتمالی در زنده ماندن افراد	مدل جریان شبکه	الگوریتم ژنتیک ترکیبی بهبود یافته

یکی از فرضیات رایج مطالعات قبلی در این مسأله، این است که وسایل نقلیه مورد نیاز به راحتی در دسترس است، که اغلب در شرایط واقعی اتفاق نمی‌افتد (Dastjerd & Ertogral, 2018). مراکز توزیع قادر به تأمین ناوگان اختصاصی و اعزام آنها بلافاصله پس از بحران نیستند؛ بلکه باید علاوه بر تصمیمات مربوط به زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه در مورد تهیه وسایل حمل‌ونقل هم تصمیم‌گیری کنند. علاوه بر این، تعداد وسایل نقلیه در شرایط پس از بحران محدود و هزینه بکارگیری آنها زیاد است. در این مطالعه مسأله بکارگیری، زمان‌بندی و مسیریابی وسایل نقلیه به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه امدادرسانی کالاهای ضروری در شرایط عدم قطعیت پس از بحران آمده است.

نتایج جدول (۱) نشان‌دهنده تعداد محدودی از مقالات است که عدم قطعیت در مسأله حمل‌ونقل بشردوستانه در شرایط پس از بحران را در نظر گرفته‌اند. اما چالش قابل‌توجه در مطالعات قبلی این است که در اکثر موارد، روش برخورد با عدم قطعیت، احتمالی و سناریو محور بوده است. به دلایل متعددی که در ادامه آمده است، روش احتمالی پاسخکو نیاز مسأله در شرایط واقعی نیست.

- در شرایط واقعی با متغیرها و توصیف‌های زبانی مانند ترافیک شلوغ، خرابی تجهیزات، تقاضای زیاد، آسیب شدید و ... مواجه هستیم که این توصیف‌های زبانی با روش‌های احتمالی قابل مدل‌سازی نیستند و باید از راهکارهای فازی برای این منظور استفاده کرد.
- به دلیل عدم وجود داده‌های تاریخی به ویژه در شرایط پس از بحران، یافتن توزیع درست پارامترهای دارای عدم قطعیت مشکل است. همچنین در نظر گرفتن سناریوهای مختلف در زمان حل مسأله، پیچیدگی مسأله را بسیار افزایش می‌دهد. به همین دلیل در تحقیقاتی که از روش احتمالی استفاده می‌شود، نمونه‌های عددی حل شده کوچک یا حداکثر متوسط هستند.
- در روش‌های احتمالی بکاررفته، سناریوها بر اساس شواهد و شرایط محتمل ساخته شده و جواب نیز بر اساس این سناریوها ارائه می‌شود. بنابراین این جواب ممکن است در عمل پاسخگوی تمام سناریوهای مسأله نباشد.

بر این اساس و با توجه به ضعف روش‌های احتمالی، در این مقاله برای برخورد با عدم قطعیت راهکار فازی پیشنهاد شده است. بر اساس مدل‌های قبلی که قطعی یا احتمالی بوده‌اند، مدلی با تابع هدف، محدودیت‌ها و پارامترهای فازی با توجه به شرایط واقعی حاکم بر مسأله

پیشنهاد شده است. سپس با استفاده از راهکار اعتباری فازی، روش جدیدی برای تبدیل محدودیت‌های فازی به غیرفازی و ارائه یک مدل تعاملی با توجه به سطوح قطعیت موردنظر کارفرما ارائه شده است. همچنین شرایط بهینگی جواب مسأله فازی، با استفاده از رابطه اعتبار فازی بدست آمده و اثبات شده است. دلیل استفاده از راهکار اعتباری فازی، درنظر گرفتن ریسک‌پذیری و یا ریسک‌گریزی کارفرما است که امکان استخراج جواب‌های پایدار برای مسأله را ایجاد می‌کند، که البته این امکان در مدل‌های احتمالی کمتر فراهم است یا اصلا فراهم نیست. همچنین، مدل تبدیل یافته مسأله با درنظر گرفتن پارامترهای فازی به شکل اعداد فازی مثلثی نیز استخراج شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در این بخش ابتدا مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی برای مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت پس از بحران پیشنهاد شده است و سپس راهکار برنامه‌ریزی اعتباری فازی جهت برخورد با عدم قطعیت در مدل مسأله پیشنهاد شده است.

مدل‌سازی مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه

در این مقاله مسأله بکارگیری، مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه در شرایط پس از بحران در نظر گرفته شده است. فرض شده است که هر وسیله نقلیه در هر زمان تقاضای یک نقطه حادثه‌دیده را برآورده می‌کند و سپس به قرارگاه برگشته و دوباره برای برآوردن تقاضای محل دیگر بارگیری می‌کند. تقاضای هر نقطه آسیب‌دیده توسط نزدیکترین قرارگاه به آن نقطه برآورده می‌شود که بویژه برای کالاهایی که طول عمر محدودی بیرون از قرارگاه دارند، ضروری است. مشکل دیگری که در شرایط پس از بحران باید در نظر گرفت، کمبود وسایل نقلیه برای حمل کالاهای ضروری است. در این شرایط تعدادی وسیله نقلیه برای مدت زمان محدودی اجاره می‌شود. کسری از هزینه دوره زمانی اجاره وسیله نقلیه که از آن وسیله استفاده نشده است توسط شرکت حمل‌ونقل برگشت داده می‌شود. سازمان‌های حمل‌ونقل بشردوستانه برای تحویل تقاضاها در زمان مشخص، با مسائلی به شرح زیر مواجه هستند.

- تصمیمات مربوط به بکارگیری وسایل نقلیه: تعداد وسایل نقلیه اجاره شده و مدت زمانی اجاره آنها،
- تصمیمات مربوط به زمان‌بندی وسایل نقلیه: زمان شروع و پایان سفر هر وسیله نقلیه،
- تصمیمات مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه: تعداد تقاضا و ترتیب سرویس‌دهی به آنها توسط هر وسیله نقلیه.

هدف مسأله، کمینه‌سازی هزینه عملیات با کم‌کردن تعداد وسایل نقلیه و زمان استفاده از آنها می‌باشد که حالت خاص از مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی[۱] است.

فرض کنید K وسیله نقلیه اجاره شده است. برای وسیله نقلیه $k \in K$، R_k دوره زمانی اجاره وسیله نقلیه و $\tilde{c}_k$ هزینه یک واحد زمانی استفاده از وسیله نقلیه است که به صورت یک پارامتر فازی در نظر گرفته شده است. p_k هزینه برگشت داده شده در صورت عدم استفاده از وسیله نقلیه است. همچنین مجموعه مکان‌های تقاضا با L نشان داده می‌شود، T_i زمان تحویل تقاضا و π_i زمان انجام تقاضای $i \in L$ است. برای مدل‌سازی مسأله مورد نظر مقاله یک شبکه با مجموعه گره‌های N و کمان‌های A در نظر گرفته شده است. $N = L \bigcup \{D,S\}$ که در آن D یک نود منبع فرضی و S یک نود مقصد فرضی است. $A = A_{po} \bigcup A_{dh} \bigcup A_{pi}$ که در آن:

$$A_{po} = \{(i,j) \mid i \in D, j \in L\}$$
$$A_{pi} = \{(i,j) \mid i \in L, j \in S\}$$
$$A_{dh} = \{(i,j) \mid i \in L, j \in L, T_i + \tilde{d}_{ij} + \pi_j \le T_j \le T_i + \tilde{d}_{ij} + \pi_j + \varepsilon\}$$

در روابط بالا $\tilde{d}_{ij}$ یک پارامتر فازی و نشان‌دهنده زمان لازم برای انتقال از مکان تقاضای $i \in L$ به $j \in L$ است و ε حداکثر زمان انتظار وسیله نقلیه بین دو سفر متوالی است. مجموعه A_{dh} به گونه‌ای تعریف شده است که برای هر $(i,j) \in A_{dh}$ امکان انجام سفر $j \in L$ بلافاصله بعد از سفر $i \in L$ باشد. همچنین متغیرهای مسأله به شکل زیر تعریف می‌شود:

- τ_k^s: زمان شروع سفر وسیله نقلیه k
- τ_k^f: زمان پایان سفر وسیله نقلیه k
- $Y_{ijk} \in \{0,1\}$: $Y_{ijk} = 1$ اگر $(i,j) \in A$ توسط $k \in K$ پیموده شود.

مدل ریاضی مسأله در ادامه آورده شده است. ساختار اصلی مدل در حالت غیرفازی توسط فائز[۲] و همکاران (۲۰۱۹) بررسی شده است.

$$Min\ \tilde{Z}(Y, \tau^s, \tau^f) = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_{po}} \left(Y_{ijk} R_k \tilde{c}_k (1-p_k) + (\tau_k^f - \tau_k^s) \tilde{c}_k p_k \right) \qquad (۵)$$

S.T.

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_{po} \cup A_{dh}} Y_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in L \qquad (۶)$$

[1]. Vehicle routing problem with time windows
[2]. Faiz

$$\sum_{(i,j)\in A_{po}\cup A_{dh}} Y_{ijk} - \sum_{(j,i)\in A_{pi}\cup A_{dh}} Y_{jik} = 0 \qquad \forall j\in L, k\in K \tag{۷}$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{po}} Y_{ijk} \le 1 \qquad \forall k\in K \tag{۸}$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{po}} Y_{ijk} - \sum_{(j,i)\in A_{pi}} Y_{jik} = 0 \qquad \forall j\in L, k\in K \tag{۹}$$

$$\tau_k^s \ge T_j - \pi_j - M(1-Y_{ijk}) \qquad \forall (i,j)\in A_{po}, k\in K \tag{۱۰}$$

$$\tau_k^s \le T_j - \pi_j + M(1-Y_{ijk}) \qquad \forall (i,j)\in A_{po}, k\in K \tag{۱۱}$$

$$\tau_k^f \ge T_i - M(1-Y_{ijk}) \qquad \forall (i,j)\in A_{pi}, k\in K \tag{۱۲}$$

$$\tau_k^f \le T_i + M(1-Y_{ijk}) \qquad \forall (i,j)\in A_{pi}, k\in K \tag{۱۳}$$

$$T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik}) \qquad (j,i)\in A_{dh}, k\in K \tag{۱۴}$$

$$T_i \tilde{\ge} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \qquad (j,i)\in A_{dh}, k\in K \tag{۱۵}$$

$$\tau_k^f - \tau_k^s \le R_k \sum_{(i,j)\in A_{po}} Y_{ijk} \qquad \forall k\in K \tag{۱۶}$$

$$Y_{ijk} \in \{0,1\} \qquad (i,j)\in A,\ k\in K \tag{۱۷}$$

$$\tau_k^f, \tau_k^s \ge 0 \qquad \forall k\in K$$

تابع هدف مسأله در رابطه (۵) و محدودیت‌ها در روابط (۶) تا (۱۷) تشریح شده است. تابع هدف هزینه عملیات را کمینه می‌کند. اگر وسیله نقلیه k برای دوره R_k بکار گرفته شود هزینه $R_k c_k$ باید پرداخت شود. اگر از این وسیله در زمان $(\tau_k^f - \tau_k^s)$ استفاده شود هزینه $(R_k - (\tau_k^f - \tau_k^s))p_k c_k$ برگشت داده می‌شود. رابطه (۶) بیان می‌کند که هر تقاضا باید دقیقاً یکبار توسط یک وسیله نقلیه برآورده شود. رابطه (۷)، محدودیت توازن جریان در شبکه است و بیانگر این است که وسیله نقلیه بعد از توزیع اقلام در محل تقاضا به مکان تقاضای دیگر یا به شرکتی که از آنجا اجاره شده است، اعزام می‌شود. روابط (۸) و (۹) نشان می‌دهند که مسیر هر وسیله نقلیه از D شروع و به S ختم می‌شود. روابط (۱۰) تا (۱۳) ارتباط بین متغیرهای τ_k^f، τ_k^s و Y_{ijk} را با استفاده از پارامتر M بزرگ بیان می‌کند. M یک عدد صحیح بزرگ است. اگر $Y_{ijk}=1$ رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) نتیجه می‌دهد که $\tau_k^s = T_j - \pi_j$ که در واقع زمان شروع سفر وسیله نقلیه k است. همچنین با برقراری رابطه $Y_{ijk}=1$، روابط

(۱۲) و (۱۳) نتیجه می‌دهند که $\tau_k^f = T_i$ که بیان‌کننده زمان پایان وسیله نقلیه k است. رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) بیان کننده ارتباط بین زمان تحویل تقاضاهای متوالی است. هر وسیله نقلیه مجاز است حداکثر ε واحد زمانی بین دو تقاضای متوالی منتظر بماند. با توجه به اینکه اطلاعات کافی و دقیق در مورد پارامترهای $\tilde{d}_{ji}$ وجود ندارد، این پارامترها به شکل فازی در نظر گرفته شده است. همچنین محدودیت‌هایی که در روابط (۱۴) و (۱۵) در نظر گرفته شده‌اند، محدودیت‌های فازی می‌باشند. رابطه (۱۶) بیان می‌کند که زمان استفاده از هر وسیله نقلیه باید از دوره اجاره آنها کمتر باشد که بیان‌کننده کمبود وسایل نقلیه در زمان پس از بحران است. محدودیت‌های نامنفی و دودویی بودن متغیرها در (۱۷) بیان شده است. با توجه به مدل مسأله، با یک مسأله برنامه‌ریزی ریاضی فازی با پارامترها، محدودیت‌ها و تابع هدف فازی مواجه هستیم. در ادامه از برنامه‌ریزی اعتباری فازی برای حل مسأله فازی موردنظر مقاله استفاده شده است.

برنامه‌ریزی اعتباری فازی

در این بخش ابتدا روشی برای تبدیل محدودیت‌های فازی به غیرفازی ارائه شده است. سپس شرایطی برای بدست‌آوردن جواب بهینه مسأله استخراج شده است. در انتها با در نظر گرفتن اعداد فازی مثلثی یک مدل ساده تبدیل‌یافته برای مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه استخراج شده است.

اگر $\alpha \in [0,1]$ درجه اعتبار فازی مطلوب کارفرما باشد، رابطه‌های فازی (۱۴) و (۱۵) با استفاده از برنامه‌ریزی اعتباری فازی به محدودیت‌های غیرفازی زیر تبدیل می‌شود.

$$Cr\left(T_i \tilde{\leq} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M\,(1-Y_{jik})\right) \geq \alpha \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \tag{۱۸}$$

$$Cr\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M\,(1-Y_{jik})\,\tilde{\leq} T_i\right) \geq \alpha \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \tag{۱۹}$$

در روابط بالا، $\alpha \in [0,1]$ درجه اعتبار فازی است که با توجه به نظر کارفرما تعیین می‌شود. با توجه به اینکه مسأله به شکل فازی مدل‌سازی شده است و درجه‌هایی از عدم قطعیت در نظر گرفته شده است، ممکن است در زمان اجرایی‌کردن جواب بدست آمده از مسأله، سناریوهای مختلفی پیش آید که با توجه به ذات غیرقطعی بودن مسأله، در هنگام حل مسأله غیرقابل پیش‌بینی است. هر چه مقدار α بیشتر باشد تعداد سناریوهای واقعی مسأله که جواب حاصل در آن صدق می‌کند بیشتر خواهد بود. بنابراین یک کارفرمای ریسک‌پذیر ممکن است مقادیر کمتر α و در مقابل یک کارفرمای ریسک‌گریز مقادیر بیشتر α را انتخاب می‌کند. در مقابل هر چه α کوچکتر باشد هزینه اجرای عملیات کاهش می‌یابد. پس در واقع کارفرما با انتخاب

مقادیر بیشتر برای α باید هزینه‌ای را پرداخت کند که در واقع هزینه بدست آوردن یک جواب پایدارتر برای مسأله است. بر این اساس می‌توان با استفاده از روش تعاملی، مطلوب‌ترین مقدار α را با نظر کارفرما مشخص کرد. معمولاً درجه اعتبار بزرگتر از ۰/۵ انتخاب می‌شود تا بتوان جواب‌های پایداری برای مسأله ایجاد کرد (Zhang et. al., 2012). این محدودیت‌ها با توجه به رابطه (۴) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$0.5\left\{Pos\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right) + Nec\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right)\right\} \ge \alpha$$

$$0.5\left\{Pos\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right) + Nec\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right)\right\} \ge \alpha \qquad (۲۰)$$

اگر فرض کنیم $Nec\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right) \ge \mu_{jik}$ و $Nec\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right) \ge \eta_{jik}$، در این صورت برای برقراری روابط (۲۰) کافیست روابط زیر برقرار باشد:

$$Pos\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right) \ge 2\alpha - \eta_{jik} \qquad (۲۱)$$

$$Pos\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right) \ge 2\alpha - \mu_{jik}$$

بنابراین روابط (۲۰) با محدودیت‌های غیرفازی زیر جایگزین می‌شود:

$$Nec\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right) \ge \mu_{jik} \qquad (۲۲)$$

$$Pos\left(T_i \tilde{\le} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik})\right) \ge 2\alpha - \mu_{jik}$$

$$Nec\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right) \ge \eta_{jik}$$

$$Pos\left(T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \tilde{\le} T_i\right) \ge 2\alpha - \eta_{jik}$$

با استفاده از قضیه (۱) محدودیت‌های بالا معادل محدودیت‌های زیر است.

$$T_i \le T_j + \left(\tilde{d}_{ji}\right)^L_{1-\mu_{jik}} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik}) \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \qquad (۲۳)$$

$$T_i \le T_j + \left(\tilde{d}_{ji}\right)^R_{2\alpha-\mu_{jik}} + \pi_i + \varepsilon + M(1-Y_{jik}) \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \qquad (۲۴)$$

$$T_j + \left(\tilde{d}_{ji}\right)^R_{1-\eta_{jik}} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \le T_i \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \qquad (۲۵)$$

$$T_j + \left(\tilde{d}_{ji}\right)^L_{2\alpha-\eta_{jik}} + \pi_i - M(1-Y_{jik}) \le T_i \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \qquad (۲۶)$$

$$0 \le \mu_{jik} \le 1, \quad 0 \le \eta_{jik} \le 1, \quad 0 \le 2\alpha - \mu_{jik} \le 1, \quad 0 \le 2\alpha - \mu_{jik} \le 1 \qquad (۲۷)$$

برای تبدیل تابع هدف مسأله به یک تابع هدف غیرفازی و حصول نتایج بهینگی قضیه مهم زیر ارائه می‌شود:

قضیه ۳. فرض کنید $\alpha \in [0,1]$ درجه مطلوبیت کارفرما باشد. برای $k \in K$ فرض کنید $\max\left(\left(c_k\right)_{\alpha}^{L},\left(c_k\right)_{1-\alpha}^{L}\right) \le c_k \le \min\left(\left(c_k\right)_{\alpha}^{R},\left(c_k\right)_{1-\alpha}^{R}\right)$، در این صورت جواب بهینه مسأله غیرفازی زیر، یک جواب بهینه مسأله فازی (۵)-(۱۷) در سطع قطعیت α برای محدودیت‌ها و تابع هدف فازی است.

$$Min\ Z(Y,\tau^s,\tau^f)=\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A_{po}}\left(Y_{ijk}R_kc_k(1-p_k)+(\tau_k^f-\tau_k^s)c_kp_k\right) \qquad (۲۸)$$

S.T.

روابط (۶)-(۱۳)

روابط (۲۳)-(۲۷) (۲۹)

روابط (۱۶)-(۱۷)

اثبات: فرض کنید (Y,τ^s,τ^f) جواب بهینه مسأله (۲۸)-(۲۹) باشد. از آنجایی که (Y,τ^s,τ^f) در روابط (۲۳)-(۲۷) و همچنین سایر محدودیت‌های مسأله (۵)-(۱۷) صدق می‌کند، (Y,τ^s,τ^f) یک جواب شدنی در سطح قطعیت α برای مسأله (۵)-(۱۷) است. فرض کنید (Y,τ^s,τ^f) جواب بهینه مسأله (۵)-(۱۷) نباشد. در این صورت جواب شدنی (Y',τ'^s,τ'^f) وجود دارد بطوریکه

$$Cr^*(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f)\tilde{\le}Z(Y,\tau^s,\tau^f))\ge\beta. \qquad (۳۰)$$

بنابراین باید حداقل یکی از دو رابطه زیر برقرار باشد.

$$Pos^*(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f)\tilde{\le}Z(Y,\tau^s,\tau^f))\ge\beta \qquad (۳۱)$$

یا

$$Nec^*(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f)\tilde{\le}Z(Y,\tau^s,\tau^f))\ge\beta. \qquad (۳۲)$$

فرض کنید $Pos^*(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f)\tilde{\le}Z(Y,\tau^s,\tau^f))\ge\beta$ در این صورت طبق قضیه (۲):

$$(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f))_{\beta}^{L}\le(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f))_{\beta}^{R}<(Z(Y,\tau^s,\tau^f))_{\beta}^{L}\le(Z(Y,\tau^s,\tau^f))_{\beta}^{R}. \qquad (۳۳)$$

از طرفی با توجه به اینکه $\max\left(\left(c_k\right)_{\beta}^{L},\left(c_k\right)_{1-\beta}^{L}\right)\le c_k\le\min\left(\left(c_k\right)_{\beta}^{R},\left(c_k\right)_{1-\beta}^{R}\right)$ داریم:

$$(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f))_{\beta}^{L}<Z(Y',\tau'^s,\tau'^f)\le(Z(Y',\tau'^s,\tau'^f))_{\beta}^{R} \qquad (۳۴)$$

و

$$(Z(Y,\tau^s,\tau^f))_\beta^L < Z(Y,\tau^s,\tau^f) \le (Z(Y,\tau^s,\tau^f))_\beta^R \quad (۳۵)$$

با ترکیب روابط بالا نتیجه می‌شود که $Z(Y',\tau'^s,\tau'^f) < Z(Y,\tau^s,\tau^f)$ که با فرض بهینه بودن (Y,τ^s,τ^f) برای مسأله (۲۸)-(۲۹) در تناقض است.

نتایج بالا یک روش کلی برای حل مسأله فازی (۵)-(۱۷) با استفاده از برش‌های فازی ارائه می‌دهد. با این وجود، بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که هیچ راهکار مشخصی برای انتخاب شکل اعداد فازی برای پارامترهای فازی در یک مسأله مشخص وجود ندارد. در مسائل تصمیم‌گیری که با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مدل‌سازی می‌شود به دلیل حفظ خطی بودن مسأله، اعداد فازی مثلثی یا فازی ذوزنقه‌ای انتخاب می‌شوند(Yadav & Yadav, 2016). به همین دلیل در این مقاله نیز پارامترهای فازی به شکل اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی شده‌اند. با تغییرات اندک می‌توان همین راهکار را برای اعداد فازی ذوزنقه‌ای نیز بکار گرفت. استفاده از برنامه‌ریزی اعتباری فازی برای تبدیل محدودیت‌های فازی به غیرفازی در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی که پارامترهای آن اعداد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای هستند توسط تعدادی از محققین مانند حسامیان و بهرامی[1] (۲۰۱۷) استفاده شده است.

قضیه ۴ (حسامیان و بهرامی، ۲۰۱۷). عدد فازی مثلثی $\tilde{\xi} = (\underline{\xi},\xi,\overline{\xi})$ با تابع عضویت

$$\mu_{\tilde{\xi}}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-\underline{\xi}}{\xi-\underline{\xi}} & \underline{\xi} \le x \le \xi \\ \dfrac{x-\overline{\xi}}{\xi-\overline{\xi}} & \xi \le x \le \overline{\xi} \\ 0 & o.w. \end{cases} \quad (۳۶)$$

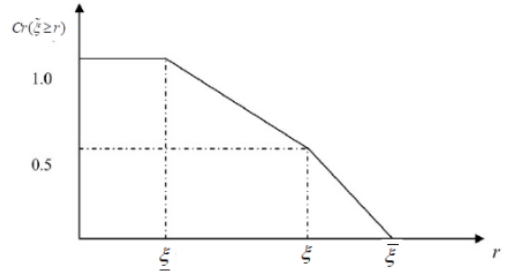
را در نظر بگیرید. رابطه امکان، لزوم و اعتبار فازی برای محدودیت فازی $\tilde{\xi} \tilde{\ge} r$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Pos(\tilde{\xi} \tilde{\ge} r) = \begin{cases} 1 & r \le \xi \\ \dfrac{r-\overline{\xi}}{\xi-\overline{\xi}} & \xi \le r \le \overline{\xi}, \\ 0 & r \ge \overline{\xi} \end{cases} \qquad Nec(\tilde{\xi} \tilde{\ge} r) = \begin{cases} 1 & r \le \underline{\xi} \\ \dfrac{r-\xi}{\underline{\xi}-\xi} & \underline{\xi} \le r \le \xi \\ 0 & r \ge \xi \end{cases} \quad (۳۷)$$

[1]. Hesamian & Bahrami

$$Cr(\tilde{\xi} \tilde{\geq} r) = \begin{cases} 1 & r \leq \underline{\xi} \\ \dfrac{2\xi - \underline{\xi} - r}{2(\xi - \underline{\xi})} & \underline{\xi} \leq r \leq \xi \\ \dfrac{r - \overline{\xi}}{2(\xi - \overline{\xi})} & \xi \leq r \leq \overline{\xi} \\ 0 & o.w. \end{cases} \qquad (۳۸)$$

همچنین شکل (۲)، مقادیر $Cr(\tilde{\xi} \tilde{\geq} r)$ را بر حسب مقادیر مختلف r نشان می‌دهد.



شکل (۲) مقادیر $Cr(\tilde{\xi} \geq r)$ بر حسب مقادیر مختلف r

بر اساس قوانین موجود در عملیات فازی، با فرض اینکه پارامترهای فازی مسأله اعداد فازی مثلثی هستند، عدد فازی $T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik})$ را می‌توان به شکل زیر نوشت.

$$T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik}) = (T_j + \underline{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik}), \qquad (۳۹)$$
$$T_j + d_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik}), T_j + \overline{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik}))$$

اگر این عدد فازی را به اختصار با $\tilde{\xi}_{jik} = (\underline{\xi}_{jik}, \xi_{jik}, \overline{\xi}_{jik})$ نشان دهیم، محدودیت (۱۴) با استفاده از رابطه اعتبار فازی به محدودیت زیر تبدیل می‌شود.

$$Cr(\tilde{\xi}_{jik} \tilde{\geq} T_i) \geq \alpha \qquad (۴۰)$$

بنابراین طبق رابطه (۳۹) و شکل (۲)، رابطه (۴۰) به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$\frac{2\xi_{jik} - \underline{\xi}_{jik} - T_i}{2(\xi_{jik} - \underline{\xi}_{jik})} \geq \alpha \quad \Rightarrow \quad 2(1-\alpha)\xi_{jik} + (2\alpha - 1)\underline{\xi}_{jik} \geq T_i \qquad (۴۱)$$

در نهایت با جایگذاری مقادیر $\underline{\xi}_{jik}$، ξ_{jik} و $\overline{\xi}_{jik}$ محدودیت (۴۰) به محدودیت غیرفازی زیر تبدیل می‌شود.

$$T_i \leq T_j + 2(1-\alpha)d_{ji} + (2\alpha - 1)\underline{d}_{ji} + \pi_i + \varepsilon + M(1 - Y_{jik}) \quad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \qquad (۴۲)$$

از طرف دیگر، $Cr(\tilde{\xi} \tilde{\leq} r) = 1 - Cr(\tilde{\xi} \tilde{\geq} r)$. بنابراین محدودیت فازی (۱۵) که با استفاده از رابطه اعتبار فازی به شکل

$$Cr\left(T_i \tilde{\geq} T_j + \tilde{d}_{ji} + \pi_i - M(1-Y_{jik})\right) = Cr\left(\tilde{\xi}_{jik} \tilde{\leq} T_i\right) \geq \alpha \quad (۴۳)$$

نوشته می‌شود را می‌توان به صورت

$$Cr\left(\tilde{\xi}_{jik} \tilde{\geq} T_i\right) \leq 1-\alpha \quad (۴۴)$$

بازنویسی کرد.

از آنجایی که $0.5 \leq (1-\alpha)$، با توجه به شکل (۱) و رابطه (۳۹)، محدودیت (۴۴) به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$T_i \geq T_j + \pi_i - M(1-Y_{jik}) + (2\alpha-1)\bar{d}_{ji} + 2(1-\alpha)d_{ji} \qquad (j,i) \in A_{dh}, k \in K \quad (۴۵)$$

مدل مسأله حمل‌ونقل بشردوستانه که در آن محدودیت‌های فازی (۱۴) و (۱۵) با محدودیت های غیرفازی (۴۲) و (۴۵) جایگزین شده است، توسط نرم‌افزار AMPL پیاده‌سازی و حل شده است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این بخش از نرم‌افزار AMPL[1] برای پیاده‌سازی مسأله موردنظر مقاله استفاده کرده‌ایم. نرم‌افزار برنامه‌ریزی ریاضی AMPL یک زبان برنامه‌ریزی ریاضی برای مدل‌سازی و حل مسائل برنامه‌ریزی ریاضی است. در ادامه جهت ارزیابی مدل و روش ارائه شده یک نمونه خاص از مسأله، با نرم افزار AMPL پیاده‌سازی و حل شده است. نمونه موردنظر از مرجع (فائز و همکاران، ۲۰۱۹) استخراج شده است و متناسب با مسأله مورد تحقیق مقاله فازی‌سازی شده است.

مثال: مسأله حمل‌ونقل بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت پس از بحران با ۱۰ مکان تقاضا و ۸ وسیله نقلیه را در نظر بگیرید. داده‌های مربوط به مکان‌های تقاضا و وسایل نقلیه در جدول (۲) و جدول (۳) آمده است. در این مثال هزینه‌های تابع هدف، غیرفازی در نظر گرفته شده است.

جدول (۲) داده‌های مربوط به مکان‌های تقاضا

مکان تقاضا	زمان تحویل	زمان انجام تقاضا	طول جغرافیایی (x_i)	عرض جغرافیایی (y_i)
۱	۳۲۹	۴۰	۳۸/۹۷	۷۶/۵
۲	۳۶۹	۴۰	۳۹/۱۵	۷۵/۵۱
۳	۴۶۰	۴۰	۳۸/۳	۷۶/۶۱
۴	۴۷۸	۴۰	۳۹/۳	۷۶/۶۱

[1]. A Mathematical Programming Language

مکان تقاضا	زمان تحویل	زمان انجام تقاضا	طول جغرافیایی (x_i)	عرض جغرافیایی (y_i)
۵	۵۲۸	۴۰	۳۸/۹	۷۷/۰۱
۶	۵۵۰	۴۰	۳۷/۵۳	۷۸/۴۷
۷	۵۷۸	۴۰	۳۶/۷۳	۷۶/۰۴
۸	۶۵۸	۴۰	۳۸/۲۲	۷۸/۲۶
۹	۷۲۳	۴۰	۳۸/۹۲	۷۷/۶۷
۱۰	۷۸۴	۴۰	۳۷/۶۵	۷۸/۱۸

جدول (۳) داده‌های مربوط به وسایل نقلیه

وسیله نقلیه (k)	زمان اجاره (R_k)	هزینه به ازای هر واحد زمانی (c_k)	درصد هزینه بازگشتی در صورت عدم استفاده (p_k)
۱	۳۶۰	۳/۴۷	۰/۲۵
۲	۳۶۰	۳/۴۷	۰/۲۵
۳	۷۲۰	۲/۱۹	۰/۲
۴	۷۲۰	۲/۱۹	۰/۲
۵	۳۶۰	۳/۴۷	۰/۲۵
۶	۳۶۰	۳/۴۷	۰/۲۵
۷	۷۲۰	۲/۱۹	۰/۲
۸	۷۲۰	۲/۱۹	۰/۲

مقادیر $\tilde{d}_{ij}$ با توجه به معادله زیر بر اساس فاصله دایره عظیمه بین دو نقطه و سرعت متوسط وسایل نقلیه محاسبه می‌شود(Faiz et al., 2019).

$$d_{ij}=6371\times 0.7\times a\cos\left(\cos\left(\frac{90-x_i}{57.29578}\right)\times\cos\left(\frac{90-x_j}{57.29578}\right)+\sin\left(\frac{90-x_i}{57.29578}\right)\times\sin\left(\frac{90-x_j}{57.29578}\right)\times\cos\left(\frac{y_i-y_j}{57.29578}\right)\right). \quad (۴۶)$$

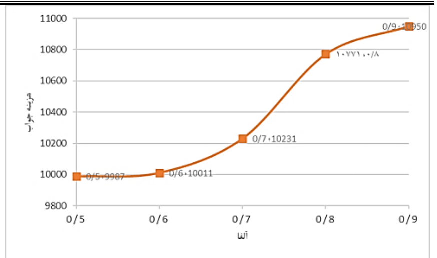
بر اساس رابطه (۴۶)، در این مقاله روشی برای تولید مقادیر پارامترهای فازی $\tilde{d}_{ij}=(\underline{d}_{ij},d_{ij},\bar{d}_{ij})$ به شرح زیر پیشنهاد شده است. به این ترتیب که $\underline{d}_{ij}$ عددی تصادفی در بازه $\left[d_{ij}-5,d_{ij}\right]$ و $\bar{d}_{ij}$ عددی تصادفی در بازه $\left[d_{ij},d_{ij}+5\right]$ انتخاب می‌شود. همچنین زمان انتظار وسیله نقلیه بین دو مکان تقاضا ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از حل مسأله برای $\alpha=0.8$ در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول (۴) مسیر وسایل نقلیه و زمان‌بندی آنها برای $\alpha=0.8$

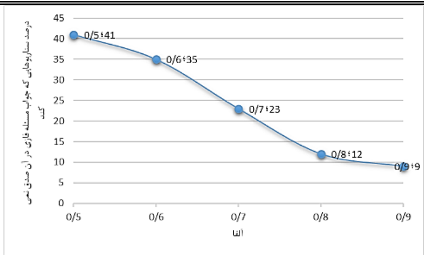
وسیله نقلیه	مکان تقاضای اول	مکان تقاضای دوم	مکان تقاضای سوم	زمان شروع سفر	زمان پایان سفر
۶	۲	۴	۸	۳۲۹	۶۵۸
۷	۱	۶	۹	۲۸۹	۷۲۳
۵	۷	۱۰	-	۵۳۸	۷۸۴
۲	۵	-	-	۴۸۸	۵۲۸
۳	۳	-	-	۴۲۰	۴۶۰

جدول بالا نشان می‌دهد که به عنوان مثال وسیله نقلیه شماره ۶ از قرارگاه در واحد زمانی ۳۲۹ شروع به حرکت کرده، به ترتیب تقاضاهای مکان‌های ۲، ۴ و ۸ را سرویس‌دهی می‌کند و در انتها در واحد زمانی ۶۵۸ به قرارگاه برمی‌گردد. هزینه کل اجاره وسایل نقلیه، سرویس‌دهی و مسیریابی برای مثال بالا برابر ۱۰۷۷۱/۵۴ واحد است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که برای سرویس‌دهی به مکان‌های تقاضا نیازی به استفاده از وسایل نقلیه ۱، ۴ و ۸ نیست.

در ادامه برای تحلیل پارامتر α از یک روش شبیه‌سازی استفاده شده است. به این منظور، مقدار این پارامتر در بازه $[0.5,1]$ با طول گام 0.1 تغییر داده شده است. برای هر مقدار پارامتر $\alpha\in[0.5,1]$، مقادیر پارامترهای فازی $\tilde{d_{ij}}=(\underline{d}_{ij},d_{ij},\overline{d}_{ij})$ با روشی که در بالا تشریح شد، تولید شده است و مقدار هزینه جواب بهینه مسأله با استفاده از روش برنامه‌ریزی اعتباری فازی بدست آمده است(مشابه آنچه برای $\alpha=0.8$ در جدول (۳) تشریح شد.). برای محاسبه میزان پایداری جواب برای مقادیر مختلف α، سناریوهای مختلفی برای مسأله تولید شده است. برای هر مقدار α، تعداد ۱۰۰ سناریو تولید شده است؛ برای تولید این سناریوها، مقادیر پارامترهای d_{ij} به صورت یک عدد تصادفی در بازه $[\underline{d}_{ij},\overline{d}_{ij}]$ انتخاب شده است و پارامترهای فازی $\tilde{d}_{ij}$ در مدل مسأله حمل ونقل و امداد بشردوستانه با مقادیر غیرفازی d_{ij} جایگزین شده است. جواب بدست آمده از روش اعتباری فازی در محدودیت‌های مسأله غیرفازی قرار داده شده است و درصد سناریوهایی که جواب حاصل از روش برنامه‌ریزی اعتباری فازی در محدودیت‌های مسأله غیرفازی صدق نمی‌کند محاسبه و گزارش شده است. شکل (۳) و شکل (۴) نتایج مربوطه را گزارش می‌کند.



شکل (۳) هزینه جواب با استفاده از روش برنامه ریزی اعتباری فازی بر حسب مقادیر مختلف α



شکل (۴) درصد سناریوهایی که جواب مسأله فازی در آن صدق نمی کند بر حسب مقادیر مختلف α

همانطور که شکل (۳) و شکل (۴) نشان می‌دهند با افزایش مقدار α، هزینه جواب بدست آمده از روش اعتباری فازی افزایش می‌یابد. در مقابل درصد سناریوهای شبیه‌سازی شده که جواب مسأله در آنها صدق نمی‌کند، کاهش می‌یابد و در نتیجه جواب پایدارتری برای مسأله بدست می‌آید که انطباق‌پذیری بیشتری با شرایط واقعی و عدم قطعیت ذاتی مسأله در هنگام اجرای جواب دارد. در واقع هزینه بیشتر جواب برای مقادیر بیشتر پارامتر α، هزینه‌ای است که کارفرما در مقابل بدست آوردن یک جواب پایدارتر پرداخت می‌کند. در شرایط واقعی کارفرما می‌تواند با توجه به اولویت مدنظر خود، یکی از معیارهای هزینه یا پایداری جواب را انتخاب کرده و مقدار مناسبی برای پارامتر α اتخاذ نماید.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه در شرایط عدم قطیت پس از بحران در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط ترافیکی، حوادث غیرقابل پیش بینی، خرابی جاده و ... پارامتر زمان سفر به صورت یک عدد فازی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در شرایط پس از بحران وسیله نقلیه کافی برای اجرای عملیات وجود ندارد، محدودیت‌های کمبود وسایل نقلیه نیز در نظر گرفته شده است. حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه در شرایط پس از بحران به صورت مسأله یکپارچه بکارگیری، مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه در شرایط عدم قطعیت تعریف و با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی مدل‌سازی شد. برای تبدیل مدل فازی مسأله به غیرفازی، از رابطه اعتبار فازی استفاده شد و درجه اعتبار فازی متناسب با ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز بودن کارفرما تعریف شد. مدل تبدیل یافته مسأله با استفاده از نرم‌افراز AMPL پیاده‌سازی و نتایج محاسباتی برای ارزیابی مدل و راهکار پیشنهادی مقاله ارائه شده است.

همچنین تحلیل‌هایی روی پارامتر α انجام شده است که می‌تواند برای انتخاب درست مقدار این پارامتر با توجه به معیارهای مدنظر کارفرما استفاده شود.

برای کارهای آتی چندین راهکار جهت گسترش مدل و راه حل مسأله حمل‌ونقل و امداد بشردوستانه پیشنهاد می‌شود. گسترش اول مربوط به درنظر گرفتن اولویت‌های دیگر مانند شدت آسیب‌دیدگی مناطق، تعداد بیشتر کودکان، زنان و افراد آسیب‌دیده و شدت نیاز به کالای مورد تقاضا علاوه بر زمان تحویل است. گسترش دوم مربوط به در نظر گرفتن منابع دیگر عدم قطعیت مانند عدم قطعیت در وجود راننده و وسیله نقلیه و عدم قطعیت در زمان تحویل تقاضا است. گسترش سوم، ارائه راهکارهای فراابتکاری مانند الگوریتم مورچگان و ژنتیک برای حل سریع مسأله در شرایطی که نیاز به یک جواب فوری برای مسأله است، می‌باشد.

منابع

- بیگی، سکینه. و حسین‌زاده، الهام. (۱۳۹۸). مدلسازی ریاضی مسأله مکانیابی- مسیریابی در شرایط بحرانی با در نظر گرفتن امنیت مسیر، *فصلنامه علمی آینده‌پژوهی دفاعی*، ۴ (۱۳): ۸۹-۱۱۰.
- صبوحی، فاطمه.، حیدری، مهدی. و بزرگی امیری، علی. (۱۳۹۶). ارائه مدل مسیریابی و زمان‌بندی جهت تخلیه اضطراری با در نظر گرفتن امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها، *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۲۸(۱): ۵۵-۶۷.
- طیبی، جواد.، کاظمی، محمدرضا. و هداوندی، اسماعیل. (۱۳۹۶). آینده‌پژوهی در سیستم‌های دفاعی با استفاده از رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور مکانیابی تسهیلات درمانی و تقسیم‌بندی مناطق، *فصلنامه علمی آینده‌پژوهی دفاعی*، ۲ (۷): ۷-۳۰.
- قاسمی، پیمان.، خلیلی دامغانی، کاوه.، حافظ الکتب، اشکان. و رئیسی، صدیق. (۱۳۹۷). ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه مکانیابی، تخصیص و توزیع کالاهای امدادی در شرایط عدم قطعیت، *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۶(۵۱): ۱۰۷-۱۴۴.

- Abounacer, R., Rekik, M. & Renaud, J. (2014). An exact solution approach for multi-objective location–transportation problem for disaster response, *Computers & Operations Research*, 41: 83-93.
- Bruni, M., Beraldi, P. & Khodaparasti, S. (2018). A fast heuristic for routing in post-disaster humanitarian relief logistics, *Transportation research procedia*, 30: 304-313.
- Caunhye, A.M., Zhang, Y., Li, M. & Nie, X. (2016). A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 90: 161-176.
- Dastjerd, N.K. & Ertogral, K. (2018). A Fix-and-optimize heuristic for the integrated fleet sizing and replenishment planning problem with predetermined delivery frequencies, *Computers & Industrial Engineering*, 127: 778-787.
- Dong, J.-Y. & Wan, S.-P. (2018). A new trapezoidal fuzzy linear programming method considering the acceptance degree of fuzzy constraints violated, *Knowledge-Based Systems*, 148: 100-114.
- Faiz, T., Vogiatzis, C. & Noor-E-Alam, Md. (2019). A Column Generation Algorithm for Vehicle Scheduling and Routing Problems, *Computers & Industrial Engineering*, 130: 222-236.
- Galindo, G. & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations Management, *European Journal of Operational Research*, 230 (2): 201-211.
- Ghodratnama, A., Torabi, S. A. & Tavakkoli-moghaddam, R. (2012). Credibility-based fuzzy programming models to solve the budget-constrained flexible flow line problem, *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 9 (6): 1-29.

- Gunawan, F. E. (2015). Empirical Assessment on Factors Affecting Travel Time of Bus Rapid Transit, *International Journal of Engineering and Technology,* 7 (1): 327-334.
- Hatami-Marbini, A., Agrell, P. J., Tavana, M. & Emrouznejad A. (2013). A Stepwise Fuzzy Linear Programming Model with Possibility and Necessity Relation, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 25: 81–93.
- Hesamian, G. & Bahrami, F. (2017). Credibility theory oriented preference index for ranking fuzzy numbers, *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 14 (6): 103-117.
- Li, F., Golden, B. & Wasil, E. (2007). The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results, *Computers & operations research*, 34 (10): 2918-2930.
- Li, H. & Gong, Z. (2011). Fuzzy Linear Programming with Possibility and Necessity Relation, *Fuzzy Information and Engineering*, 78: 305-311.
- Maghfiroh, M.F. & Hanaoka, S. (2018). Dynamic truck and trailer routing problem for last mile distribution in disaster response, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 8 (2): 252-278.
- Mohamadi, A. & Yaghoubi, S. (2017). A bi-objective stochastic model for emergency medical services network design with backup services for disasters under disruptions: An earthquake case study, *International Journal of Disaster Risk Reduction,* 23: 204-217.
- Ramik J. (2007). Optimal solutions in optimization problem with objective function depending on fuzzy parameters, *Fuzzy Sets and Systems*, 158 (17): 1873–1881.
- Ramik, J. (2006). Duality in fuzzy linear programming with possibility and necessity relations, *Fuzzy Sets and Systems*, 157 (10): 1283-1302.
- Shavarani, S.M. & Vizvari, B. (2018). Post-disaster transportation of seriously injured people to hospitals, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 8 (2): 227-251.
- Yadav, H. & Yadav, D. K. (2016). A method for generating membership function from numerical data, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 29 (5): 2227-2233.
- Zhang, Y.M., Huang, G.H., Lin, Q.G. & Lu, H.W. (2012). Integer fuzzy credibility constrained programming for power system management, *Energy*, 38 (1): 398–405.