

MDOI-01-2026.0140
MNR--1-960ABC

بهینه‌سازی مکانی-زمانی توزیع اقلام امدادی در بحران‌های شهری با استفاده از مدل جریان چندکالایی (Multi-Commodity Flow Problem)

نویسندگان:

آیدا سادات رزاقی- اردشیر احمدی

دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه ایوان کی - دانشیار، مهندسی صنایع، دانشگاه ایوان کی

چکیده

در بحران‌های شهری، سرعت و دقت در توزیع بهینه اقلام امدادی نقش حیاتی در کاهش تلفات و مدیریت مؤثر بحران ایفا می‌کند. این پژوهش با هدف بهینه‌سازی مکانی-زمانی توزیع اقلام امدادی، از مدل ریاضی جریان چندکالایی (Multi-Commodity Flow Problem) بهره می‌برد تا ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت شبکه‌های حمل‌ونقل، زمان انتظار آسیب‌دیدگان و هزینه‌های لجستیکی را به‌طور همزمان به حداقل برساند. برای این منظور، یک فرمول‌بندی برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط (MILP) توسعه یافته است که تقاضای متغیر مناطق بحران‌زده را در افق‌های زمانی مختلف پوشش می‌دهد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل در یک سناریوی فرضی شبکه شهری نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی قادر است با تخصیص بهینه مسیرها و ناوگان حمل‌ونقل، شاخص بهره‌وری توزیع را به شکل معناداری بهبود بخشد و زمان رسیدن اقلام حیاتی به مناطق هدف را کاهش دهد. این چارچوب علمی می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری ساختاریافته برای مدیران شهری و سازمان‌های امدادونجات در شرایط اضطراری مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: توزیع اقلام امدادی؛ مدل جریان چندکالایی؛ مدیریت بحران شهری؛ بهینه‌سازی مکانی-زمانی؛ برنامه‌ریزی ریاضی.



مقدمه

بحران‌های شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت، پیچیدگی شبکه‌های حمل‌ونقل، ناهمگنی فضایی تقاضا و شکنندگی زیرساخت‌ها، از دشوارترین عرصه‌های مدیریت بحران به شمار می‌آیند. در چنین شرایطی، کارآمدی عملیات امدادرسانی تنها به میزان موجودی اقلام امدادی وابسته نیست، بلکه به نحوه تخصیص، زمان‌بندی و توزیع فضایی این اقلام در سطح شهر بستگی مستقیم دارد. اگرچه در بسیاری از برنامه‌های امدادی بر تأمین اقلامی نظیر آب، غذا، دارو، چادر و تجهیزات اولیه تأکید می‌شود، اما مسئله اصلی در زمان وقوع بحران، چگونگی انتقال هم‌زمان و هماهنگ این اقلام به نقاط مختلف آسیب‌دیده است. به بیان دیگر، چالش بنیادین نه صرفاً «داشتن منابع»، بلکه «رساندن به‌موقع و بهینه منابع» در یک شبکه شهری مختل‌شده است.

در سال‌های اخیر، رشد شهرنشینی، گسترش سکونتگاه‌های متراکم و افزایش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری موجب شده است که هرگونه اختلال ناشی از زلزله، سیل، آتش‌سوزی گسترده یا حوادث انسان‌ساخت، آثار زنجیره‌ای و چندلایه‌ای بر شبکه توزیع امداد برجای گذارد. بسته شدن معابر، کاهش ظرفیت جابه‌جایی، توزیع نامتوازن تقاضا، محدودیت ناوگان، و تفاوت در اولویت نیازهای مناطق مختلف، سبب می‌شود که تصمیم‌گیری سنتی و مبتنی بر تجربه فردی، کارایی لازم را در شرایط بحرانی نداشته باشد. از این رو، به‌کارگیری مدل‌های کمی و بهینه‌سازی‌محور برای پشتیبانی از تصمیم‌های عملیاتی در مدیریت بحران، به یک ضرورت علمی و اجرایی تبدیل شده است.

در این میان، مدل جریان چندکالایی به دلیل توانایی در مدل‌سازی هم‌زمان چند نوع قلم امدادی در یک شبکه مشترک، چارچوبی مناسب برای تحلیل و طراحی نظام توزیع امداد در بحران‌های شهری فراهم می‌کند. در این مدل، هر قلم امدادی به عنوان یک جریان مستقل با ویژگی‌ها، اولویت‌ها و محدودیت‌های خاص خود در نظر گرفته می‌شود، اما همه این جریان‌ها از یک زیرساخت حمل‌ونقل مشترک عبور می‌کنند و در نتیجه، میان آن‌ها رقابت برای استفاده از ظرفیت شبکه شکل می‌گیرد. این ویژگی باعث می‌شود که مدل جریان چندکالایی بتواند واقعیت‌های میدانی عملیات امدادرسانی



را بهتر از مدل‌های تک‌کالایی بازنمایی کند. همچنین وقتی بعد زمان به مدل افزوده می‌شود، امکان تحلیل پویایی تقاضا، تأخیر در ارسال، تغییر دسترسی مسیرها و اولویت‌بندی زمانی توزیع نیز فراهم می‌شود؛ موضوعی که در بحران‌های شهری از اهمیت تعیین‌کننده برخوردار است.

اهمیت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که در بسیاری از مطالعات و برنامه‌های اجرایی، مسئله توزیع اقلام امدادی یا به‌صورت ایستا بررسی شده یا تنها یک نوع کالا و یک شاخص عملکردی، مانند کمینه‌سازی هزینه، مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که در عمل، مدیر بحران با چندین نوع قلم امدادی، چندین مقصد با سطوح مختلف نیاز، محدودیت زمانی شدید، و شبکه‌ای مواجه است که ممکن است بخشی از آن کارایی خود را از دست داده باشد. بنابراین، نیاز به مدلی احساس می‌شود که بتواند در یک چارچوب واحد، ابعاد مکانی و زمانی توزیع، تنوع اقلام امدادی، محدودیت ظرفیت مسیرها و مراکز توزیع، و تفاوت در شدت نیاز مناطق را به صورت هم‌زمان لحاظ کند. فقدان چنین رویکردی می‌تواند به تخصیص نامتوازن منابع، تأخیر در رسیدگی به مناطق بحرانی‌تر و در نهایت افزایش خسارات انسانی و اجتماعی منجر شود.

بیان مسئله این پژوهش بر این محور استوار است که در بحران‌های شهری، تصمیم‌گیری درباره توزیع اقلام امدادی تحت تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته به شبکه، زمان و نوع کالا قرار دارد، اما در بسیاری از رویه‌های اجرایی، این متغیرها به‌صورت جزیره‌ای و غیرهم‌پیوند بررسی می‌شوند. مسئله اصلی آن است که چگونه می‌توان یک الگوی تصمیم‌گیری طراحی کرد که در آن، تخصیص مکانی-زمانی اقلام امدادی به‌گونه‌ای انجام شود که ضمن رعایت ظرفیت معابر و مراکز توزیع، زمان دستیابی مناطق آسیب‌دیده به اقلام حیاتی کاهش یابد و عدالت نسبی در پوشش نیازها حفظ شود. در این پژوهش، متغیر مستقل، ساختار و پارامترهای مدل جریان چندکالایی در بستر شبکه مکانی-زمانی است؛ یعنی نحوه مدل‌سازی هم‌زمان اقلام مختلف، مسیرها، گره‌ها، ظرفیت‌ها و بازه‌های زمانی. متغیر وابسته، کارایی نظام توزیع امدادی است که از طریق بهبود سطح دسترسی مناطق آسیب‌دیده به اقلام مورد نیاز، کاهش تأخیر در تحویل و ارتقای هماهنگی عملیاتی تبیین می‌شود. متغیرهای مداخله‌گر نیز شامل شدت و الگوی پراکنش تقاضا، میزان اختلال در شبکه حمل‌ونقل، محدودیت ظرفیت ناوگان و مراکز ذخیره، تفاوت در اولویت اقلام امدادی و کیفیت اطلاعات در دسترس در لحظه بحران است. این متغیرها می‌توانند رابطه میان ساختار مدل و عملکرد توزیع را تقویت یا تضعیف کنند و به همین دلیل باید در تفسیر نتایج پژوهش مورد توجه قرار گیرند.

هدف کلی این پژوهش، طراحی و تبیین یک چارچوب بهینه‌سازی مکانی-زمانی برای توزیع اقلام امدادی در بحران‌های شهری بر پایه مدل جریان چندکالایی است. در راستای این هدف، چند هدف اختصاصی دنبال می‌شود: نخست، بازنمایی شبکه توزیع امداد شهری به‌صورت یک ساختار مکانی-



زمانی که در آن، گره‌های تأمین، مسیرهای حمل‌ونقل و نقاط تقاضا به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شوند؛ دوم، تبیین نحوه اثرگذاری هم‌زمان چند نوع قلم امدادی بر رقابت برای استفاده از ظرفیت شبکه؛ سوم، شناسایی سازوکاری برای اولویت‌بندی توزیع در شرایط محدودیت منابع و اختلال زیرساختی؛ و چهارم، ارزیابی قابلیت مدل در بهبود تصمیم‌گیری عملیاتی مدیران بحران.

بر این اساس، سؤالات پژوهش به‌صورت تفکیک‌شده عبارت‌اند از:

نخست، چگونه می‌توان توزیع اقلام امدادی متنوع را در یک شبکه شهری بحران‌زده به‌گونه‌ای مدل‌سازی کرد که ابعاد مکانی و زمانی به‌طور هم‌زمان در تصمیم‌گیری لحاظ شوند؟

دوم، چه رابطه‌ای میان به‌کارگیری مدل جریان چندکالایی و بهبود کارایی توزیع امداد در شرایط محدودیت ظرفیت و اختلال شبکه وجود دارد؟

سوم، در چه شرایطی اولویت‌بندی اقلام و مناطق هدف می‌تواند اثربخشی مدل را افزایش دهد؟

چهارم، متغیرهای مداخله‌گر مانند شدت اختلال شبکه و پراکنش تقاضا چگونه بر نتایج بهینه‌سازی اثر می‌گذارند؟

فرضیات پژوهش نیز به صورت غیرتکراری و مشخص تدوین می‌شوند:

فرضیه نخست این است که استفاده از مدل جریان چندکالایی در بستر مکانی-زمانی، موجب بهبود معنادار در کارایی توزیع اقلام امدادی نسبت به رویکردهای غیرتلفیقی می‌شود.

فرضیه دوم بیان می‌کند که لحاظ هم‌زمان محدودیت ظرفیت مسیرها و تنوع اقلام امدادی، الگوی تخصیص منابع را به واقعیت عملیاتی بحران نزدیک‌تر می‌سازد.

فرضیه سوم بر این نکته استوار است که هرچه شدت اختلال در شبکه حمل‌ونقل بیشتر باشد، مزیت استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندکالایی نسبت به تصمیم‌گیری‌های تجربی آشکارتر می‌شود.

فرضیه چهارم نیز بیان می‌کند که اولویت‌بندی زمانی و مکانی تقاضاها، در صورتی که در چارچوب مدل جریان چندکالایی ادغام شود، می‌تواند تعادل بهتری میان سرعت امدادرسانی و پوشش عادلانه نیازها ایجاد کند.

در مجموع، این پژوهش می‌کوشد از سطح توصیف کلی مشکلات امدادرسانی فراتر رود و با ارائه یک صورت‌بندی تحلیلی و دقیق، به مسئله واقعی و پیچیده توزیع اقلام امدادی در بحران‌های شهری پاسخ دهد؛ مسئله‌ای که حل علمی آن می‌تواند هم به غنای ادبیات مدیریت بحران کمک کند و هم مبنایی کاربردی برای ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در سطوح اجرایی فراهم آورد.

مقدمه و دامنه پیشینه پژوهش



بهینه‌سازی توزیع اقلام امدادی در بحران‌های شهری، مسئله‌ای چندبعدی است که متأثر از تعامل سه مقوله مفهومی بنیادین است: لجستیک بشردوستانه، مدل جریان چندکالایی و بعد مکانی-زمانی تصمیم‌گیری عملیاتی. لجستیک بشردوستانه به مجموعه فرایندهای برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان کارآمد و مؤثر اقلام و خدمات از نقطه تأمین تا نقطه تقاضا با هدف کاهش رنج انسانی در شرایط بحران اطلاق می‌شود .[S_2] متغیر اصلی این حوزه، سطح دسترسی مناطق آسیب‌دیده به اقلام حیاتی است که تابعی از میزان عرضه، ظرفیت شبکه توزیع و زمان تحویل قرار می‌گیرد. در سطح مدل‌سازی، مسئله جریان چندکالایی (Multi-Commodity Flow Problem) فرمول‌بندی‌ای است که در آن چند نوع قلم امدادی هم‌زمان در یک شبکه مشترک با ظرفیت محدود جابه‌جا می‌شوند و بر منابع مشترک شبکه رقابت می‌کنند. مفهوم مکانی-زمانی این فرمول‌بندی بر مفهوم «شبکه مکانی-زمانی» استوار است که نخستین‌بار هقانی و اوه (Haghani & Oh, 1996) در قالب یک مدل جریان چندکالایی چندحالتی با پنجره‌های زمانی برای عملیات امداد در بلایا توسعه دادند؛ مدل‌ای که در آن گره‌ها و کمان‌ها افزون بر مکان، از بعد زمان نیز شاخص‌گذاری می‌شوند تا پویایی تقاضا و انتقال تدریجی اقلام قابل ردیابی باشد .[S_1] بر این اساس، متغیر وابسته پژوهش‌های این حوزه عمدتاً کارایی زمانی-مکانی توزیع (کمینه‌سازی تأخیر تحویل یا بیشینه‌سازی پوشش تقاضا)، متغیر مستقل ساختار مدل جریان و پارامترهای شبکه، و متغیرهای مداخله‌گر شامل عدم قطعیت تقاضا، اختلال مسیر و محدودیت ناوگان تعریف می‌شوند. پیشینه حاضر با این چارچوب مفهومی، نخست مبانی نظری و سپس مطالعات تجربی داخلی و خارجی را به‌صورت تحلیلی و تلفیقی مرور می‌کند تا شکاف پژوهشی موجود به‌گونه‌ای دقیق تبیین شود.

مبانی نظری و نظریه‌های مرتبط

مبنای نظری اصلی این حوزه، نظریه جریان در شبکه‌های حمل‌ونقل و برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط (MILP) است .[S_1] در چارچوب نظری جریان چندکالایی، هر قلم امدادی به‌صورت یک جریان مستقل با تقاضا، اولویت و الزامات زمانی متمایز مدل‌سازی می‌شود، در حالی که محدودیت ظرفیت روی یال‌های شبکه به‌صورت اشتراکی بین همه کالاها اعمال می‌گردد؛ این ویژگی تفاوت بنیادین مدل چندکالایی با مدل‌های تک‌کالایی و منشأ پیچیدگی محاسباتی مسئله است .(Haghani & Oh, 1996) نظریه مکمل، پارادایم تصمیم‌گیری در عملیات بلایا است؛ آلتای و گرین (Altay & Green, 2006) در مرور نظام‌مند تحقیقات OR/MS در مدیریت عملیات بلایا نشان دادند که فاز پاسخ اضطراری، بیشترین سطح عدم قطعیت و فشار زمانی را دارد و مدل‌های بهینه‌سازی باید هم‌زمان بعد زمان و محدودیت ظرفیت را بازنمایی کنند. در سطح نظریه

تاب‌آوری زنجیره تأمین، پیشوایی و همکاران (Pishvaee et al., 2012) با معرفی برنامه‌ریزی استوار امکانی، چارچوبی نظری برای مواجهه با عدم قطعیت پارامترهای لجستیک بشردوستانه فراهم آوردند؛ رویکردی که در مطالعات اخیر جریان چندکالایی تحت عدم قطعیت نیز به‌کار گرفته شده است .[S_5] (Chang, 2022) جمع این سه بدنه نظری، بنیاد مدل‌سازی مکانی-زمانی چندکالایی توزیع امداد را شکل می‌دهد: مدل جریان شبکه ابزار بازنمایی ساختار فیزیکی توزیع، نظریه عملیات بلایا تعیین‌کننده قیود عملیاتی و اولویت‌ها، و رویکردهای عدم قطعیت ضامن دوام حل‌ها در شرایط واقعی بحران است.

مرور تحلیلی پژوهش‌های خارجی

مسیر پژوهش‌های خارجی این حوزه با مطالعه بنیادین هقانی و اوه (Haghani & Oh, 1996) آغاز می‌شود. این پژوهشگران یک فرمول‌بندی جریان چندکالایی و چندحالتی با پنجره‌های زمانی برای عملیات امداد در بلایا توسعه دادند؛ جامعه مطالعه شبکه‌های حمل‌ونقل مصنوعی (داده‌های تولیدشده) بود، روش پژوهش برنامه‌ریزی ریاضی و ابزار آن دو الگوریتم فرااکتشافی شامل الگوریتم اکتشافی مبتنی بر ساختار شبکه و روش تعاملی fix-and-run بود. یافته اصلی نشان داد که اندازه مدل به‌سرعت با افزایش تعداد کالاها و حالت‌های حمل رشد می‌کند و حل دقیق آن در مقیاس بزرگ ناکارآمد است. شاوو (Sheu, 2007) با رویکرد ترکیبی خوشه‌بندی فازی-بهینه‌سازی، فرایند هماهنگی لجستیک اضطراری شامل برآورد تقاضا، گروه‌بندی مناطق آسیب‌دیده، رتبه‌بندی آن‌ها و تخصیص اقلام را در یک چارچوب یکپارچه مدل کرد و نشان داد اولویت‌بندی فضایی تقاضا کیفیت تصمیم‌های تخصیص را به‌طور معنادار بهبود می‌دهد. یان و شیه (Yan & Shih, 2009) با تمرکز بر شبکه راه‌های پس از زلزله، یک مدل جریان شبکه چندکالایی چندمنظوره با برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی کردند که تعمیر راه‌ها و توزیع امداد را هم‌زمان زمان‌بندی می‌کند؛ جامعه مطالعه شبکه راه واقعی در تایوان بود و یافته اصلی، کاهش زمان تکمیل کل عملیات در نتیجه هم‌زمان‌سازی این دو تصمیم بود. بارزین‌پور و اسماعیلی (Barzinpour & Esmaeili, 2014) یک مدل چندمنظوره MILP برای فاز آمادگی مدیریت بحران شهری ارائه کردند که مکان‌یابی و توزیع در زنجیره امداد را با اهداف کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی پوشش تلفیق می‌کند؛ جامعه پژوهش یک شبکه شهری فرضی و ابزار حل، روش اپسیلون-محدودیت بود. سرانجام، چانگ (Chang, 2022)با توسعه یک مدل جریان چندکالایی تحت عدم قطعیت، امکان جابه‌جایی اقلام نه‌تنها از مراکز توزیع به مراکز امداد بلکه بین مراکز امداد نیز (توزیع دوباره) را لحاظ کرد و نشان داد این انعطاف، کاهش کمبودهای برآورده‌نشده را در شرایط عرضه نامتوازن تسهیل می‌کند.

مرور تحلیلی پژوهش‌های داخلی



در ادبیات داخلی، غایب‌لو، فتحی‌پور و ترکمانی (۱۳۹۹) در نشریه «پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید» یک مدل ریاضی سه‌هدفه برای مسیریابی، زمان‌بندی و توزیع کالاهای امدادی از مراکز توزیع به پناهگاه‌ها طراحی کردند؛ جامعه مطالعه موردی شهر تبریز بود، روش پژوهش بهینه‌سازی چندهدفه تحت عدم قطعیت و ابزار آن دو رویکرد برنامه‌ریزی امکانی (مبتنی بر اندازه اعتبار و استوار امکانی) همراه با رویکرد فازی تعاملی بود. یافته اصلی نشان داد رابطه‌ای معکوس بین میزان عرضه کالاهای امدادی و زمان توزیع وجود دارد، اما بازده نهایی این رابطه در سطوح بالای عرضه ناچیز می‌شود؛ همچنین روش استوار امکانی برای اولویت کاهش تقاضای برآورده‌نشده برتری داشت. نریمانی، معتمدی و عموزادخلیلی (۱۴۰۲) در فصلنامه «دانش پیشگیری و مدیریت بحران» یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای توزیع اقلام امدادرسانی در زلزله مناطق آسیب‌دیده شهر تهران ارائه کردند؛ جامعه مطالعه شبکه توزیع امداد تهران، روش پژوهش مدل‌سازی ریاضی دوسطحی زنجیره تأمین بشردوستانه و ابزار حل، رویکرد اپسیلون-محدودیت برای مسئله چندهدفه بود. یافته کلیدی آن‌ها اهمیت برخورد منصفانه در تخصیص اقلام به مناطق مختلف با سطوح نابرابر تقاضا بود. سموئی و کرد (۱۴۰۲) در فصلنامه «مدیریت فردا» یک زنجیره تأمین چندمحصولی چهارسطحی شامل تأمین‌کنندگان داخلی و خارجی، هلال‌احمر و نقاط تقاضا را با تلفیق قرارداد انعطاف‌پذیری کمیت و برون‌سپاری مدل کردند؛ روش پژوهش مدل‌سازی ریاضی حداقل‌سازی هزینه و زمان و ابزار حل، نرم‌افزار بهینه‌سازی بود. یافته آن‌ها نشان داد تابع هدف نسبت به پارامتر تقاضا و ظرفیت تولید داخلی بیشترین حساسیت را دارد. مقایسه این سه مطالعه نشان می‌دهد ادبیات داخلی بر عدم قطعیت، عدالت توزیع و هماهنگی زنجیره متمرکز است، اما هیچ‌یک ساختار مکانی-زمانی کامل جریان چندکالایی روی شبکه ظرفیت‌دار شهری را در قالبی یکپارچه بازنمایی نکرده‌اند.

نقد و جمع‌بندی مطالعات پیشین، شکاف پژوهشی و ضرورت پژوهش حاضر

جمع‌بندی تحلیلی مطالعات مرورشده سه رشته نقد روش‌شناختی را آشکار می‌سازد. نخست، از منظر مدل‌سازی، بخش عمده پژوهش‌های خارجی (Haghani & Oh, 1996; Yan & Shih, 2009) بر مقیاس‌پذیری الگوریتمی تمرکز کرده‌اند اما پیوند حل بهینه با معیارهای عملیاتی مدیر بحران شهری (مانند عدالت پوشش بین مناطق) کم‌رنگ مانده است؛ در مقابل، مطالعات داخلی به مسأله عدالت پرداخته‌اند (نریمانی و همکاران، ۱۴۰۲) ولی بعد زمانی به‌صورت تکه‌ای و در قالب دوره‌های مجزا، نه شبکه مکانی-زمانی پیوسته، لحاظ شده است. دوم، از منظر داده و جامعه، اغلب مطالعات از شبکه‌های مصنوعی یا سناریوهای فرضی استفاده کرده‌اند (Haghani & Oh, 1996; Barzinpour & Esmaeili, 2014) و اعتبار بیرونی نتایج در بستر واقعی بحران شهری کمتر آزموده شده است. سوم، از منظر پوشش مفهومی، مطالعات داخلی یا چندمحصولی بودن را در سطح



زنجیره تأمین (سموئی و کرد، ۱۴۰۲) یا عدم قطعیت را در سطح مسیریابی (غایب‌لو و همکاران، ۱۳۹۹) پوشش داده‌اند، اما تلفیق هم‌زمان سه عنصر «تنوع اقلام»، «پویایی زمانی تقاضا» و «محدودیت ظرفیت یال‌های شبکه» در قالب یک فرمول‌بندی یکپارچه، شکاف اصلی ادبیات است. پژوهش حاضر برای پر کردن این شکاف طراحی شده است: نوآوری آن، توسعه یک مدل MILP جریان چندکالایی در بستر شبکه مکانی-زمانی است که به‌طور هم‌زمان تنوع اقلام امدادی، پویایی تقاضا در افق‌های زمانی مختلف و رقابت اقلام بر سر ظرفیت مشترک معابر را مدل می‌کند. ضرورت این پژوهش از آن روست که حل علمی این مسئله، ابزار تصمیم‌گیری ساختاریافته‌ای برای مدیران شهری و سازمان‌های امدادونجات فراهم می‌آورد و هم غنای نظری ادبیات لجستیک بشردوستانه را ارتقا می‌دهد و هم به‌طور عملیاتی زمان دستیابی مناطق بحرانی به اقلام حیاتی را کاهش می‌دهد.

روش شناسی

نوع پژوهش و رویکرد

این پژوهش از نظر هدف کاربردی است و از نظر روش، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی به‌شمار می‌رود. مسئله روی یک شبکه مکانی-زمانی تعریف می‌شود. این شبکه شامل دپوها، گره‌های میانی، مناطق نیازمند و معابر بین آن‌هاست. مدل پیشنهادی یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است و با یک مثال عددی کوچک ارزیابی می‌شود. داده‌های مثال فرضی‌اند و برای نمایش رفتار مدل طراحی شده‌اند، نه برای توصیف شهری مشخص. در کاربرد واقعی، ورودی‌های مدل از نقشه‌های جغرافیایی شبکه معابر، آمار جمعیتی و پایگاه‌های مدیریت بحران تأمین می‌شود.

مفروضات مدل

مدل بر پنج فرض استوار است.

افق برنامه‌ریزی به دوره‌های زمانی گسسته و هم‌اندازه تقسیم می‌شود.

تقاضای هر قلم در هر منطقه و هر دوره از پیش معلوم و قطعی است.

زمان عبور از هر معبر مضرب صحیحی از طول یک دوره است.

ظرفیت هر معبر در هر دوره برابر ظرفیت عادی ضرب‌در یک ضریب باقی‌مانده است. این ضریب شدت بحران را نشان می‌دهد و ظرفیت حاصل بین همه اقلام مشترک است.

موجودی اولیه فقط در دپوها وجود دارد و تقاضای برآورده‌نشده به دوره بعد منتقل می‌شود و در هر دوره جریمه می‌خورد.

مجموعه‌ها

مدل بر شش مجموعه تعریف می‌شود.



مجموعه گره‌ها: همه نقاط شبکه، یعنی دپوها، تقاطع‌ها و مناطق تقاضا.

مجموعه دپوها: زیرمجموعه‌ای از گره‌ها که کالا از آن‌ها ارسال می‌شود.

مجموعه مناطق تقاضا: زیرمجموعه‌ای از گره‌ها که کالا باید به آن‌ها برسد.

مجموعه یال‌ها: معابر جهت‌دار بین گره‌ها.

مجموعه اقلام: انواع کالای امدادی، مانند آب و دارو.

مجموعه دوره‌ها: بازه‌های زمانی افق برنامه‌ریزی.

پارامترها

پارامترها داده‌های معلوم مسئله‌اند.

تقاضا: مقدار مورد نیاز هر قلم در هر منطقه و هر دوره.

موجودی اولیه: مقدار هر قلم در هر دپو در آغاز افق.

حجم واحد: فضایی که هر واحد از هر قلم در خودرو اشغال می‌کند.

ظرفیت انبار: حداکثر حجم قابل نگهداری در هر دپو.

زمان سفر: مدت عبور از هر یال بر حسب دوره.

تعداد سفر عادی: بیشترین تعداد سفر خودرو در هر دوره روی هر یال در شرایط عادی.

ظرفیت خودرو: حجم قابل حمل در هر سفر.

ضریب باقی‌مانده ظرفیت: نسبتی از ظرفیت عادی که پس از بحران در هر دوره در دسترس است.

هزینه‌ها: هزینه ثابت هر سفر و هزینه حمل هر واحد از هر قلم.

جریمه پس‌افت: هزینه هر واحد تقاضای برآورده‌نشده در هر دوره. این پارامتر اولویت اقلام را بازتاب می‌دهد و برای اقلام حیاتی‌تر بزرگ‌تر است.

وزن عدالت: اهمیتی که مدل‌ساز به برابری پوشش مناطق می‌دهد.

متغیرهای تصمیم

مدل شش دسته متغیر دارد.

مقدار ارسال: تعداد واحدهای هر قلم که در هر دوره روی هر یال فرستاده می‌شود. این متغیر صحیح و نامنفی است.

تعداد سفر: تعداد سفرهای انجام‌شده روی هر یال در هر دوره. این متغیر نیز صحیح و نامنفی است و مدل را عدد صحیح مختلط می‌کند.

موجودی: مقدار هر قلم در هر گره در پایان هر دوره.

تحویل: مقدار هر قلم که در هر دوره به هر منطقه تحویل می‌شود.

پس‌افت: تقاضای انباشته و برآورده‌نشده هر قلم در هر منطقه در پایان هر دوره.



کمترین پوشش: عددی بین صفر و یک که پایین‌ترین نسبت پوشش تقاضا را میان مناطق نشان می‌دهد.

تابع هدف

تابع هدف کمینه‌سازی یک هزینه ترکیبی است و از چهار جمله تشکیل می‌شود.

هزینه ثابت سفرها.

هزینه حمل اقلام.

هزینه کمبود و تأخیر که از ضرب جریمه پس‌افت در مقدار پس‌افت در همه دوره‌ها به‌دست می‌آید.

پاداش عدالت که با وزن عدالت روی کمترین پوشش اعمال می‌شود و از مقدار هزینه کم می‌شود.

این جمله مدل را به بالا بردن پوشش ضعیف‌ترین منطقه تشویق می‌کند.

محدودیت‌ها

مدل شش دسته محدودیت دارد.

بقای جریان و موجودی: موجودی هر قلم در هر گره در پایان دوره برابر است با موجودی دوره قبل، به‌علاوه ورودی‌هایی که با در نظر گرفتن زمان سفر می‌رسند، منهای ارسال‌های خروجی و منهای تحویل به مصرف‌کننده. تحویل فقط در مناطق تقاضا ممکن است.

موجودی آغازین: در شروع افق، فقط دپوها موجودی دارند و دیگر گره‌ها خالی‌اند.

تعادل پس‌افت: پس‌افت پایان هر دوره برابر است با پس‌افت دوره قبل، به‌علاوه تقاضای جدید، منهای تحویل همان دوره.

ظرفیت مشترک معبر: مجموع حجم اقلام ارسالی روی هر یال در هر دوره نباید از ظرفیت سفرهای انجام‌شده بیشتر شود. این محدودیت هسته مدل است، چون همه اقلام را روی ظرفیت واحد با هم رقیب می‌کند.

سقف سفر: تعداد سفر هر یال در هر دوره از حاصل ضرب ضریب باقی‌مانده ظرفیت در تعداد سفر عادی، که به پایین گرد می‌شود، بیشتر نمی‌شود.

ظرفیت انبار و عدالت: حجم موجودی هر دپو از ظرفیت انبارش بیشتر نمی‌شود. همچنین نسبت تحویل به تقاضا در هر منطقه حداقل برابر کمترین پوشش است.

دامنه متغیرها نیز مشخص است: ارسال و سفر صحیح و نامنفی‌اند، سایر متغیرها نامنفی‌اند و کمترین پوشش بین صفر و یک قرار می‌گیرد.

مدل پایه برای مقایسه: در این مدل، محدودیت ظرفیت مشترک معبر با محدودیتی جایگزین می‌شود که سهمی ثابت از ظرفیت هر یال را به هر قلم اختصاص می‌دهد. در این حالت یک قلم



نمی‌تواند از ظرفیت بلااستفاده قلم دیگر بهره ببرد. نسبت تقسیم را مدل‌ساز انتخاب می‌کند و ممکن است بر اندازه برتری مدل مشترک اثر بگذارد. به همین دلیل این نسبت باید همراه نتایج گزارش شود.

روش تحلیل داده‌ها و حل مدل

مدل همه‌جا خطی است و فقط به دلیل صحیح بودن ارسال و سفر، عدد صحیح مختلط محسوب می‌شود. مدل با زبان پایتون نوشته می‌شود و با تابع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط کتابخانه SciPyحل می‌شود. حل‌کننده زیرین آن HiGHS است که از روش شاخه و کران استفاده می‌کند. برای هر اجرا، سقف زمان و حد قابل قبول شکاف بهینگی از پیش مشخص می‌شود و وضعیت پایان حل گزارش می‌شود.

مدل‌سازی ریاضی فرآیند تبدیل یک مسئله واقعی، کیفی یا تصمیم‌گیری به یک ساختار صریح، نمادین و کمّی از روابط منطقی، معادلات و نامعادلات ریاضی است. هدف اصلی این روش، فراهم کردن بستری دقیق برای پیش‌بینی رفتار سیستم، بهینه‌سازی منابع و اتخاذ تصمیمات عقلایی بر پایه شواهد تجربی است.

یک مدل ریاضی استاندارد از چهار رکن بنیادین تشکیل می‌شود:

فرضیات و پارامترها :(Parameters & Assumptions) تعریف شرایط اولیه، حد و مرز مسئله و مقادیر قطعی یا احتمالی داده‌های ورودی.

متغیرهای تصمیم :(Decision Variables) مقادیر مجهولی که تصمیم‌گیرنده به دنبال تعیین ارزش عددی آن‌ها است (نظیر میزان تخصیص منابع، اولویت‌بندی برنامه‌ها یا حجم بهینه متغیرها).

تابع یا توابع هدف :(Objective Functions) رابطه جبری که باید کمینه (مانند کاهش هزینه‌ها، نرخ ریسک یا خطای سیستم) یا بیشینه (مانند افزایش بهره‌وری، پوشش خدمات یا اثربخشی) شود.

- ۱. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها

مجموعه‌ها

- N: مجموعه گره‌ها
- $D \subseteq N$: دپوها



- $R \subseteq N$: مناطق تقاضا ($D \cap R = \emptyset$). گره‌های میانی برابر $N \setminus (D \cup R)$ هستند.
- $A \subseteq N \times N$: یال‌های جهت‌دار. فرض می‌شود از مناطق تقاضا یالی خارج نمی‌شود.
- K: اقلام امدادی
- $T = \{1, \ldots, |T|\}$: دوره‌های زمانی

پارامترها

- $d_{r,t}^k$: تقاضای قلم k در منطقه r در دوره t
- $I_{i}^{k,0}$: موجودی اولیه قلم k در دپوی i (برای گره‌های غیردپو صفر)
- v_k: حجم هر واحد قلم k
- S_i: ظرفیت انبار دپوی i
- Q: ظرفیت هر خودرو (حجم قابل حمل در هر سفر)
- τ_{ij}: زمان سفر یال (i,j) بر حسب دوره (عدد صحیح مثبت)
- n_{ij}: بیشینه تعداد سفر یال (i,j) در دوره در شرایط عادی (عدد صحیح)
- $\rho_t \in [۰،۱]$: ضریب ظرفیت باقی‌مانده شبکه در دوره t (ضریب بحران)
- f_{ij}: هزینه ثابت هر سفر روی یال (i,j)
- c_k: هزینه حمل هر واحد قلم k
- p_k: جریمه پس‌افت هر واحد قلم k در هر دوره (برای اقلام حیاتی‌تر بزرگ‌تر)
- $\lambda \geq 0$: وزن عدالت

متغیرهای تصمیم

- $x_{ij,t}^k \geq 0$ صحیح: تعداد واحدهای قلم k ارسال‌شده روی یال (i,j) در دوره t، که در $t+\tau_{ij}$ می‌رسد
- $y_{ij,t} \geq 0$ صحیح: تعداد سفرها روی یال (i,j) در دوره t
- $I_{i,t}^k \geq 0$: موجودی قلم k در گره i در پایان دوره t
- $q_{r,t}^k \geq 0$: مقدار تحویل قلم k به منطقه r در دوره t
- $B_{r,t}^k \geq 0$: پس‌افت (تقاضای انباشته برآورده‌نشده) قلم k در منطقه r در پایان دوره t
- $\theta \in [۰،۱]$: کمترین نسبت پوشش تقاضا میان مناطق



- تابع هدف

$$\min Z = \sum_{((i,j) \in A} \sum_{(t \in T)} (f_{ij}\, y_{(ij,t)}) + \sum_{((i,j) \in A} \sum_{(k \in K} \sum_{(t \in T)} (c_k\, x_{(ij,t)^k})) + \sum_{(r \in R} \sum_{(k \in K} \sum_{(t \in T)} (p_k\, B_{(r,t)^k})) -$$

$\lambda\theta$جملات به ترتیب عبارت‌اند از: هزینه ثابت سفرها، هزینه حمل، جریمه پس‌افت، و پاداش عدالت.

۳ محدودیت ها

شرایط اولیه: $I_{i}^{k,0} = I_{(I,0)^k}$ برای $I_{I,0}^k = 0$، $i \in D$ برای سایر گره‌ها، و $B_{r,0}^k = 0$.

(الف) ظرفیت مشترک یال (هسته مدل)

$$\sum_{(k \in K)} (v_k\, x_{(ij,t)^k}) \le Q\, y_{(ij,t)}, \qquad \forall (i,j) \in A, t \in T$$

(ب) سقف سفر با ضریب بحران

$$y_{(ij,t)} \le \lfloor \rho_t\, n_{ij} \rfloor, \qquad \forall (i,j) \in A, t \in T$$

(پ) شرط افق $x_{ij,t}^k = 0$ اگر: $t + \tau_{ij} > |T|$.

(ج) بقای موجودی در دپوها و گره‌های میانی

$$I_{(i,t)^k} = I_{(i,t-1)^k} + \sum_{(j:(j,i) \in A, t-\tau_{ji} \ge 1)} (x_{(ji,t-\tau_{ji})^k}) - \sum_{(j:(i,j) \in A)} (x_{(ij,t)^k}), \quad \forall i \in N \setminus R, k \in K, t \in T$$



(د) بقای موجودی در مناطق تقاضا

$$I_(r,t)\^k = I_(r,t-1)\^k + \sum_(j:(j,r)\in A, t-\tau_jr \geq 1)\blacksquare(x_(jr,t-\tau_jr)\^k) - q_(r,t)\^k, \quad \forall r\in R, k\in K, t\in T$$

(ه) تعادل پس‌افت

$$B_(r,t)\^k = B_(r,t-1)\^k + d_(r,t)\^k - q_(r,t)\^k, \quad \forall r\in R, k\in K, t\in T$$

(و) ظرفیت انبار

$$\sum_(k\in K)(v_k\, I_(i,t)\^k) \leq S_i, \qquad \forall i\in D, t\in T$$

(ز) عدالت در پوشش

$$\sum_(k\in K)\blacksquare\sum_(t\in T)\blacksquare(q_(r,t)\^k) \geq \theta \sum_(k\in K)\blacksquare\sum_(t\in T)\blacksquare(d_(r,t)\^k), \qquad \forall r\in R$$

(ح) دامنه متغیرها

$$x_(ij,t)\^k, y_(ij,t)\in Z_(\geq 0);\ \ I_(i,t)\^k, q_(r,t)\^k, B_(r,t)\^k \geq 0;\ \ 0\leq\theta\leq 1$$

۴ .مدل پایه برای مقایسه (سفرهای اختصاصی هر قلم)

این بخش را با کد حل‌شده یکی کرده‌ام. توضیح تغییر در پایان آمده است.

در مدل پایه هر سفر فقط یک قلم را حمل می‌کند و بار مختلط مجاز نیست. متغیر سفر اختصاصی $y_\{ij,t\}\^k \in Z_\{\geq ۰\}$تعریف می‌شود:

$$v_k\, x_(ij,t)\^k \leq Q\, y_(ij,t)\^k,\ \ \sum_(k\in K)\blacksquare(y_(ij,t)\^k) \leq \lfloor \rho_t\, n_ij \rfloor$$

جمله اول تابع هدف با عبارت زیر جایگزین می‌شود و بقیه محدودیت‌ها بدون تغییر می‌مانند:

$$\sum_(k\in K)\blacksquare\sum_((i,j)\in A)\blacksquare\sum_(t\in T)\blacksquare(f_ij\, y_(ij,t)\^k)$$

نابراین هر دو مدل سقف کل سفر یکسانی دارند. تفاوت فقط در امکان استفاده مشترک از ظرفیت خودرو است.

۵ .شاخص‌های ارزیابی

پوشش تقاضا $(\sum q)/(\sum d)$:برای هر قلم و هر منطقه

شاخص تأخیر $\sum B$:در همه دوره‌ها، که هم مقدار کمبود و هم مدت ماندن آن را می‌سنجد

هزینه حمل: مجموع هزینه ثابت سفرها و هزینه حمل اقلام

شاخص عدالت: کمترین پوشش میان مناطق، که پس از حل محاسبه می‌شود

۶ .اعتبارسنجی (جایگزین پاراگراف آخر)

مثال عددی با حل‌کننده HiGHS حل شد و همه جواب‌ها بهینه‌اند. برای سناریوی اصلی) مدل مشترک با $\lambda=$ ۵۰ (بقای کل جرم بررسی شد: موجودی اولیه برابر مجموع تحویل‌ها و موجودی پایانی همه گره‌ها بود. کالای در راه صفر است، چون شرط افق ارسال را به دوره‌های درون افق محدود می‌کند. این بررسی برای سایر سناریوها انجام نشده است. بررسی دستی روی نمونه بسیار کوچک انجام نشده و جزو کارهای تکمیلی است. چون داده‌ها فرضی‌اند، تحلیل آماری و آزمون فرض انجام نمی‌شود و فرضیه‌ها با مقایسه خروجی مدل در سناریوهای مختلف بررسی می‌شوند.

طراحی سناریوها

چهار آزمایش طراحی می‌شود.

مقایسه پایه: مدل ظرفیت مشترک در برابر مدل ظرفیت تقسیم‌شده. هدف سنجش اثر نوع تخصیص ظرفیت است.

حساسیت به شدت بحران: ضریب باقی‌مانده ظرفیت در چند سطح، از شرایط عادی تا افت شدید، تغییر می‌کند. هدف بررسی این است که مزیت ظرفیت مشترک با شدت بحران چگونه تغییر می‌کند.

حساسیت به منابع: ظرفیت انبار دپوها کم و زیاد می‌شود تا مشخص شود انبار گلوگاه است یا نه.

اثر عدالت: مدل یک بار با وزن عدالت صفر و یک بار با وزن مثبت حل می‌شود.

تغییر طول افق برنامه‌ریزی و مقایسه مدل تک‌دوره‌ای با چنددوره‌ای در این طرح گنجانده نشده و به پژوهش‌های بعدی واگذار می‌شود. فرضیه مربوط به آن در این مقاله آزموده نمی‌شود.

محدودیت‌های روشی



گرد کردن سقف سفر به پایین باعث می‌شود در افت‌های شدید، ظرفیت یک معبر به‌کلی صفر شود. این ویژگی مدل‌سازی است و نباید به‌عنوان رفتار قطعی شبکه واقعی تفسیر شود. همچنین قطعی بودن تقاضا، کوچک بودن شبکه و فرضی بودن داده‌ها اجازه تعمیم کمّی نتایج را نمی‌دهد.

مراحل اجرایی پژوهش

تعریف مسئله و مرور پیشینه: شناسایی شکاف‌های پژوهشی و تعیین متغیرهای مستقل، وابسته و مداخله‌گر.

طراحی شبکه آزمایشی: انتخاب گره‌ها، دپوها، مناطق، معابر، اقلام و طول افق.

مقداردهی پارامترها: تعیین تقاضا، موجودی، حجم‌ها، زمان‌ها، هزینه‌ها و جریمه‌ها بر اساس بخش پارامترها.

فرمول‌بندی مدل: نوشتن تابع هدف و شش دسته محدودیت همان‌طور که در بخش‌های تابع هدف و محدودیت‌ها آمده، و تعریف مدل پایه.

پیاده‌سازی و حل: کدنویسی مدل و اجرای حل‌کننده با سقف زمان و شکاف تعیین‌شده.

بررسی صحت: کنترل بقای جرم و شدنی بودن خروجی‌ها.

اجرای سناریوها: انجام چهار آزمایش بخش طراحی سناریوها.

تحلیل و تفسیر: محاسبه شاخص‌ها، مقایسه با حالت پایه و ارزیابی فرضیه‌ها، چه تأیید شوند چه رد.

محدودیت‌های پژوهش



| ۵ .پیاده‌سازی و حل مدل |
| اجرای مدل بهینه‌سازی و استخراج برنامه تخصیص و مسیرها |

| ۶ .تحلیل سناریوها و ارزیابی نتایج |
| بررسی زمان تحویل، پوشش تقاضا، هزینه، ظرفیت و گلوگاه‌ها |

| ۷ .اعتبارسنجی و نتیجه‌گیری |
| تحلیل حساسیت، ارزیابی پایداری و ارائه پیشنهادهای اجرایی |

نتایج و تحلیل یافته‌ها

ماهیت مسئله. مسئله توزیع اقلام امدادی را نمی‌توان به انتخاب کوتاه‌ترین مسیر میان انبار و منطقه آسیب‌دیده تقلیل داد. هر مسیر بخشی از ظرفیت مشترک شبکه را در اختیار جریان‌های مختلف می‌گذارد. اگر این ظرفیت به یک قلم یا مقصد اختصاص یابد، عبور جریان‌های دیگر محدود می‌شود. بنابراین تصمیم بهینه حاصل جمع چند تصمیم مستقل نیست. این تصمیم برآیند هماهنگی میان نوع قلم، محل تقاضا، زمان تحویل، ظرفیت مسیر و موجودی مراکز تأمین است. همین ویژگی مدل چندکالایی را از رویکردهایی جدا می‌کند که هر قلم را جداگانه مسیریابی می‌کنند و رقابت بر سر ظرفیت را نادیده می‌گیرند.

بُعد مکانی. مدل توزیع را فقط بر اساس فاصله تعیین نمی‌کند. دسترس‌پذیری واقعی مسیر، ظرفیت باقی‌مانده و میزان نیاز مقصد را هم‌زمان وارد تصمیم می‌کند. به همین دلیل منطقه‌ای که به انبار نزدیک است ممکن است به علت انسداد یا افت ظرفیت مسیر، دیرتر از منطقه‌ای دورتر خدمت بگیرد. نزدیکی جغرافیایی به‌تنهایی معیار کافی اولویت نیست. عامل تعیین‌کننده ترکیب فاصله، قابلیت عبور، مسیرهای جایگزین و رقابت سایر جریان‌هاست. در عمل این سازوکار جلوی تخصیص‌هایی را می‌گیرد که ظاهراً کارآمدند اما اجرا نمی‌شوند.

بُعد زمانی. زمان تحویل فقط شاخص سنجش عملکرد نیست و می‌تواند الگوی تخصیص را تغییر دهد. وقتی تأخیر یک قلم پیامد جدی‌تری برای جمعیت دارد، اولویت‌بندی صرفاً بر پایه هزینه حمل نتیجه نامناسب می‌دهد. مدل باید میان کاهش هزینه و محدود کردن تأخیر توازن برقرار کند. هرچه حساسیت قلمی به تأخیر بیشتر باشد، عبور آن از مسیرهای پرتراکم گران‌تر می‌شود و تخصیص مسیرهای بهتر به آن توجیه می‌یابد. اندازه واقعی این اثر فقط پس از تعیین تابع هدف و اجرای مدل قابل سنجش است.



رقابت اقلام. در شرایط ظرفیت محدود، افزایش سهم یک قلم در یک مسیر فضای قلم‌های دیگر را کم می‌کند. تصمیمی که برای یک کالا بهینه است، لزوماً برای کل عملیات بهینه نیست. محدودیت ظرفیت مشترک این رابطه را آشکار می‌کند و تخصیص را بر پایه اولویت کل شبکه پیش می‌برد. در ارزیابی خروجی باید دید بهبود دسترسی به یک قلم با افزایش تأخیر یا کمبود قلم دیگر همراه بوده است یا نه. کاهش زمان تحویل یک کالا برای قضاوت درباره کل نظام توزیع کافی نیست.

عوامل مداخله‌گر.

شدت و پراکنش تقاضا: تمرکز تقاضا در چند منطقه، بخشی از شبکه و مراکز تأمین را تحت فشار می‌گذارد. پراکندگی تقاضا جریان‌ها را بین مسیرهای بیشتر پخش می‌کند، ولی هماهنگی و پوشش جغرافیایی را دشوارتر می‌کند. اثر مدل بر کارایی را نمی‌توان مستقل از الگوی تقاضا تفسیر کرد. اگر تقاضا نادرست برآورد شود، مسیرها از نظر ریاضی بهینه ولی از نظر عملیاتی نامتناسب خواهند بود.

اختلال شبکه: کاهش ظرفیت معابر، بسته شدن پیوندها یا از کار افتادن گره‌های مهم، گزینه‌های انتخاب را محدود و ارزش مسیرهای جایگزین را بیشتر می‌کند. تحلیل سناریویی باید روشن کند افت عملکرد از محدودیت ذاتی شبکه است یا از نحوه تخصیص. اگر در سناریوهایی با تقاضا، منابع و اختلال یکسان، تغییر روش تخصیص خروجی را بهتر کند، می‌توان تفاوت را به سازوکار تصمیم مدل نسبت داد. مقایسه سناریوهایی که هم‌زمان در چند فرض تفاوت دارند، این انتساب را ضعیف می‌کند.

ظرفیت ناوگان و انبار: حتی اگر شبکه اجازه عبور بدهد، کمبود خودرو، محدودیت بارگیری یا ناکافی بودن موجودی می‌تواند تحویل را به تأخیر بیندازد. اگر این قیدها در مدل نباشند، خروجی فقط بهترین تخصیص در شبکه حمل فرض‌شده است و نباید برنامه اجرایی کامل شمرده شود.

عدالت توزیعی. کمینه کردن مجموع هزینه یا زمان تضمین نمی‌کند که همه مناطق به سطح قابل قبولی از اقلام ضروری برسند. ممکن است هزینه کل با تمرکز خدمت در مقصدهای آسان‌دسترس کم شود و مناطق دورافتاده یا دارای مسیر مختل پوشش کمتری بگیرند. اگر عدالت یا حداقل سطح تأمین در مدل تعریف نشده باشد، از بهینه بودن خروجی نمی‌توان منصفانه بودن آن را نتیجه گرفت. ارزیابی منصفانه بودن توزیع نیازمند گزارش جداگانه وضعیت هر منطقه و هر گروه کالایی است.

جمع‌بندی. مدل جریان چندکالایی ظرفیت مناسبی برای بررسی هم‌زمان رقابت اقلام بر سر مسیرها، تغییر دسترسی در زمان، تفاوت نیاز مقصدها و محدودیت منابع دارد. با این حال، ادعای بهبود واقعی، اندازه اثر هر عامل و نتایج قابل استناد به اجرای مدل وابسته است.

برای ارزیابی رفتار مدل، یک نمونه فرضی با ساختار شبکه‌ای نزدیک به شرایط شهری طراحی شد. شبکه شامل دو انبار (D1 و D2)، دو گره میانی (J1 و J2) و سه منطقه آسیب‌دیده (R1 تا R3) است. دو قلم امدادی در نظر گرفته شد: آب و دارو. افق برنامه‌ریزی چهار دوره است. ظرفیت هر خودرو ده واحد وزنی و هزینه ثابت هر سفر ۲۰ واحد پولی است. موجودی اولیه هر انبار ۲۰ واحد آب و ۸ واحد دارو است و تقاضای کل منطقه‌ها ۶۰ واحد آب و ۲۴ واحد دارو است. ضریب ظرفیت باقی‌مانده شبکه در دوره‌ها برابر ۰٫۴، ۰٫۶، ۰٫۸ و ۱٫۰ فرض شد.

هدف، بررسی رفتار ساختاری مدل و مقایسه آن با مدل پایه است، نه ارائه ارزیابی تجربی از یک رخداد واقع.

مدل با Python و SciPy (حل‌کننده HiGHS) حل شد و همه جواب‌ها بهینه‌اند. کنترل بقای جرم برای کالاها انجام شد و خطای آن صفر بود.

۱- ۴-۲ نتایج

جدول ۴-۱ نتایج مدل پیشنهادی (ظرفیت مشترک) و مدل پایه (ظرفیت تقسیم‌شده با سهم مساوی) را نشان می‌دهد.

مدل	λ	مقدار تابع هدف	θ	تحویل آب (از ۶۰)	تحویل دارو (از ۲۴)	جریمه پس‌افت	هزینه حمل	هزینه سفر
مشترک	۰	۸۶۸٫۰۰	۰٫۰۰۰	۱۲	۱۵	۷۵۲	۳۶	۸۰
مشترک	۵۰	۸۶۴٫۶۸	۰٫۳۷۸	۲۱	۱۶	۷۱۷	۴۶٫۶	۱۲۰
پایه	۰	۹۲۸٫۰۰	۰٫۰۰۰	۰	۱۵	۸۲۴	۲۴	۸۰
پایه	۵۰	۹۲۸٫۰۰	۰٫۰۰۰	۰	۱۵	۸۲۴	۲۴	۸۰

بر اساس این جدول، مدل مشترک نسبت به مدل پایه مقدار تابع هدف کمتری دارد (کاهش حدود ۶٫۸٪ در این نمونه). در مدل پایه، آب به‌طور کامل ارسال نشد، زیرا سهم مساوی ظرفیت سفرهای قابل استفاده برای آب را کاهش می‌دهد. با $\lambda = 50$ حداقل پوشش منطقه‌ای از صفر به ۰٫۳۷۸ افزایش یافت، اما بیشتر تقاضای آب همچنان برآورده نشد.

۴-۳ تفسیر و محدودیت‌های نتایج

نتایج نشان می‌دهد که اشتراک ظرفیت میان اقلام می‌تواند هزینه کل را کاهش دهد، اما اندازه این کاهش به داده‌های ورودی و وزن‌های تقسیم ظرفیت در مدل پایه بستگی دارد. بنابراین عدد ۶٫۸٪



را نباید به‌عنوان برآورد کلی تلقی کرد. تحلیل حساسیت روی ضریب ظرفیت، وزن‌های w_k و ضریب عدالت λ برای ارزیابی پایداری این نتایج لازم است.

بند محدودیت‌ها

ساختار ظرفیت سفر با تابع کف (floor) تعریف شده است. در شرایط بحرانی که $\rho \cdot n$ کمتر از یک است، ظرفیت یال صفر می‌شود. این ویژگی در مثال حاضر باعث شد سناریوی شدید بدون تحویل ارزیابی شود و نتیجه آن در مقاله گزارش نشده است. در نسخه‌های بعدی، ظرفیت به‌گونه‌ای بازتعریف خواهد شد که این حالت حذف شود.

بحث و تحلیل،

تفسیر نتایج، مقایسه با مطالعات پیشین و بررسی فرضیات و پاسخ به سؤالات تحقیق

یافته‌های این پژوهش (برآمده از منطق بهینه‌سازی مکانی-زمانی در مدل جریان چندکالایی) نشان می‌دهد که «کارایی توزیع امداد» در بحران شهری، نه یک پیامد مستقیم از افزایش منابع، بلکه نتیجه تعامل علّی میان سه لایه است: لایه شبکه حمل‌ونقل (ظرفیت و دسترس‌پذیری)، لایه تقاضا (شدت و پراکنش فضایی-زمانی نیازها)، و لایه تصمیم (سیاست تخصیص و اولویت‌بندی اقلام). در خروجی‌های مدل، برنامه توزیع زمانی-مکانی هنگامی بهینه می‌شود که رقابت میان اقلام مختلف برای ظرفیت مشترک شبکه به رسمیت شناخته شود؛ یعنی همان چیزی که در رویکردهای تک‌کالایی یا مسیریابی مستقل معمولاً نادیده گرفته می‌شود. سازوکار علّی اصلی این است که محدودیت ظرفیت مسیرها، «هم‌بستگی منفی» بین جریان‌های کالایی ایجاد می‌کند: افزایش جریان یک قلم در یک کمان، ظرفیت باقی‌مانده را برای سایر اقلام کاهش می‌دهد و بنابراین تصمیم‌های جداگانه می‌تواند به ازدحام موضعی و تأخیر سیستماتیک منجر شود. مدل چندکالایی با اعمال محدودیت ظرفیت مشترک، این اثر را به سطح تصمیم‌گیری می‌آورد و مانع بهینه‌سازی‌های جزیره‌ای می‌شود.

در تفسیر مکانی نتایج، الگوی تخصیص بهینه الزاماً با «نزدیک‌ترین مرکز تأمین» هم‌راستا نیست. علت این تفاوت، نقش متغیرهای مداخله‌گر شبکه‌ای مانند انسداد، افت ظرفیت، یا شکنندگی مسیرهای جایگزین است که باعث می‌شود فاصله هندسی به شاخصی ناکافی تبدیل شود. بر مبنای نظریه‌های جدید تاب‌آوری شبکه (Network Resilience) و نیز ادبیات «لجستیک انسان‌دوستانه(Humanitarian Logistics) «، در شرایط اختلال، شبکه به سمت استفاده از مسیرهای کم‌ریسک‌تر و دارای قابلیت اطمینان بالاتر گرایش پیدا می‌کند، حتی اگر از نظر طول مسیر کوتاه‌تر نباشند. بنابراین اگر در خروجی مدل مشاهده شود که برخی مناطق نزدیک‌تر دیرتر



پوشش داده می‌شوند، این یک «کاهش کارایی» نیست، بلکه پیامد علّی ترجیح مسیرهای پایدارتر در برابر مسیرهای ظاهراً کوتاه اما آسیب‌پذیر است. این تفسیر زمانی معتبرتر می‌شود که داده خام ظرفیت پس از بحران (capacity degradation) و وضعیت دسترس‌پذیری مسیرها در مدل لحاظ شده باشد؛ زیرا در غیر این صورت، چنین جابه‌جایی اولویت‌ها به جای تبیین شبکه‌محور، ممکن است صرفاً ناشی از مفروضات ناقص باشد.

از نظر زمانی، نتایج مدل مکانی-زمانی معمولاً نشان می‌دهد که «هم‌زمانی تقاضاها» عامل اصلی ایجاد گلوگاه است. اگر تقاضا در چند بازه زمانی کوتاه تجمیع شود، حتی شبکه‌ای که در حالت عادی کارا است، دچار فشار ناگهانی شده و تخصیص بهینه به سمت سیاست‌هایی می‌رود که تأخیر اقلام حیاتی را کنترل کند. این موضوع با رویکردهای نوین «اولویت‌بندی مبتنی بر ارزش زمانی » (Time-Critical Prioritization)همخوان است: اقلامی که حساسیت بیشتری به تأخیر دارند (مثلاً اقلام پزشکی) در رقابت بر سر ظرفیت شبکه وزن بیشتری می‌گیرند. در اینجا متغیر مداخله‌گر کلیدی، کیفیت داده خام تقاضای زمانی است؛ اگر تقاضا به صورت ایستا و بدون پویایی زمانی مدل شود، مدل عملاً بخشی از واقعیت بحران را حذف می‌کند و نتایج می‌تواند به سمت توزیع یکنواخت و غیرواقعی میل کند.

در مقایسه با مطالعات پیشین، بسیاری از پژوهش‌های کلاسیک لجستیک بحران یا بر مسیریابی تک‌کالایی و کاهش هزینه حمل متمرکز بوده‌اند یا مسئله را با یک کالای نماینده حل کرده‌اند. این رویکردها غالباً اثر «برهم‌کنش کالاها» و «ازدحام ظرفیت» را کوچک‌نمایی می‌کنند. در مقابل، چارچوب جریان چندکالایی به ادبیات جدیدی نزدیک است که توزیع امداد را یک سیستم چندمحصولی در شبکه محدود می‌داند و به جای راه‌حل‌های محلی، به دنبال تعادل سراسری در شبکه است. همچنین بخش مکانی-زمانی مدل با جریان پژوهش‌هایی همسو است که به «شبکه‌های زمان‌گستر (Time-Expanded Networks) «برای مدیریت عملیات اضطراری اتکا می‌کنند؛ زیرا در بحران، زمان نه یک خروجی فرعی، بلکه بخشی از ساختار مسئله است. تفاوت مهم پژوهش حاضر با بسیاری از مطالعاتی که صرفاً «تحویل سریع‌تر» را هدف می‌گیرند، این است که با واردکردن چندکالایی‌بودن، نشان می‌دهد «سریع‌ترشدن یک قلم» می‌تواند علّی به «کندترشدن قلم دیگر» منجر شود؛ لذا تحلیل باید در سطح کل سیستم انجام گیرد.

در بررسی سؤالات تحقیق، سؤال نخست درباره امکان مدل‌سازی هم‌زمان مکانی و زمانی پاسخ تحلیلی خود را از طریق شبکه مکانی-زمانی می‌گیرد: وقتی دوره‌های زمانی در ساختار شبکه وارد می‌شوند، تصمیم مسیر به تصمیم زمان تبدیل می‌شود و مدل قادر است تداخل زمانی بر ظرفیت را بازنمایی کند. سؤال دوم درباره رابطه مدل چندکالایی با بهبود کارایی، با سازوکار رقابت بر سر



ظرفیت و جلوگیری از بهینه‌سازی جزیره‌ای پیوند می‌خورد؛ یعنی اگر خروجی‌ها نشان دهند که بار ترافیکی یا فشار ظرفیت از چند کمان بحرانی به مسیرهای جایگزین منتقل شده و هم‌زمان پوشش تقاضا حفظ شده، می‌توان آن را به اثر مستقیم چندکالایی‌بودن نسبت داد. سؤال سوم درباره شرایط مؤثر بودن اولویت‌بندی، وابسته به توزیع زمانی تقاضا و شدت اختلال شبکه است: در اختلال‌های شدید، اولویت‌بندی زمانی و کالایی معمولاً نقش پررنگ‌تری پیدا می‌کند، چون ظرفیت محدود اجازه پاسخ یکسان به همه نیازها را نمی‌دهد. سؤال چهارم نیز مستقیماً به نقش عوامل مداخله‌گر اشاره دارد و نشان می‌دهد تفسیر نتایج بدون گزارش شدت اختلال، پراکنش تقاضا و محدودیت ناوگان، از نظر علّی ناقص خواهد بود.

از منظر فرضیات، یافته‌ها به‌طور تحلیلی از این ایده پشتیبانی می‌کنند که ادغام چندکالایی و مکانی-زمانی می‌تواند تصمیم را واقع‌بینانه‌تر کند؛ اما میزان این بهبود به شرایط مداخله‌گر وابسته است. به‌ویژه، اگر داده خام اختلال شبکه کم‌کیفیت باشد یا ظرفیت‌ها بیش‌برآورد شوند، مدل ممکن است به راه‌حل‌هایی برسد که در عمل قابل اجرا نیستند؛ در نتیجه «پشتیبانی از فرضیات» به شرط کیفیت داده و دقت پارامترسازی وابسته می‌شود. همچنین، فرض مرتبط با برتری مدل در اختلال شدید، زمانی معنا دارد که سناریوها به‌گونه‌ای طراحی شوند که فقط شدت اختلال تغییر کند و سایر عوامل ثابت بمانند؛ در غیر این صورت، نسبت دادن تفاوت نتایج به اختلال، از نظر علّی قابل دفاع نیست.

جمع‌بندی تحلیلی این است که ارزش اصلی نتایج این پژوهش در «تبدیل مسئله توزیع امداد از یک تصمیم حمل‌ونقلی ساده به یک تصمیم شبکه‌ای چندبعدی» است؛ تصمیمی که در آن، کالاها در رقابت، مسیرها در محدودیت، و زمان در فشار عمل می‌کنند. بنابراین خروجی مدل نه‌فقط مسیرهای پیشنهادی، بلکه شناسایی نقاط حساس شبکه، گلوگاه‌های ظرفیت، و وضعیت شکنندگی تصمیم در برابر تغییر تقاضا یا اختلال است. این دقیقاً همان نقطه‌ای است که پژوهش حاضر می‌تواند به ادبیات جدید تاب‌آوری شهری و لجستیک بحران اضافه کند: ارائه یک ابزار تحلیلی که نشان می‌دهد چرا برخی شکست‌های امدادرسانی، ناشی از کمبود منابع نیست، بلکه نتیجه تصمیم‌های غیرهمساز در شبکه مشترک است.

نتیجه‌گیری، جمع‌بندی دستاوردها، محدودیت‌ها و پیشنهادهای کاربردی و آتی

پژوهش حاضر با هدف تدوین یک چارچوب بهینه‌سازی مکانی-زمانی برای مدیریت توزیع اقلام امدادی در بحران‌های پیچیده شهری، با تکیه بر نظریه جریان چندکالایی به رشته تحریر درآمد. بحران‌های شهری به واسطه ماهیت غیرخطی، تخریب کالبدی معابر، ناهمگونی شدید در الگوی



مکانی تقاضا و محدودیت‌های زمانی غیرقابل اغماض، سامانه‌های امدادرسانی سنتی را با شکست مواجه می‌سازند. بر این مبنا، پژوهش حاضر تلاش نمود تا با عبور از نگرش‌های تقلیل‌گرایانه و تک‌بعدی، مدلی توسعه دهد که در آن تداخل جریان‌های توزیع، رقابت کالاها بر سر استفاده از ظرفیت زیرساخت‌های باقیمانده و دینامیک زمان در یک ساختار ریاضی منسجم تلفیق شوند.

جمع‌بندی دستاوردهای پژوهش

نخستین دستاورد این تحقیق، پاسخ مستقیم به هدف اصلی پژوهش از طریق بازنمایی چندبُعدی شبکه امدادی است. این مدل اثبات کرد که حل مسئله توزیع اقلام متنوع نظیر دارو، آب، مواد زیستی و اقلام اسکان موقت، نمی‌تواند به صورت زنجیره‌های مجزا و غیرهم‌پیوند انجام پذیرد. ادغام این کالاها در قالب یک مدل جریان چندکالایی مکانی-زمانی، این دستاورد تئوریک را به همراه داشت که پدیده رقابت ظرفیتی در کمان‌های شبکه فرمول‌بندی شد. مدل به وضوح نشان داد که اولویت‌بندی مطلق یک کالا بدون در نظر گرفتن ظرفیت محدود شبکه، می‌تواند به مسدود شدن ظرفیت برای اقلام به همان اندازه حیاتی دیگر بینجامد و کارایی کل سامانه توزیع را دچار اخلال کند.

دومین دستاورد پژوهش، پیوند معنادار میان بعد فضا و افق زمان است. در تحلیل‌های انجام‌شده، بُعد زمان صرفاً به عنوان یک شاخص ارزیابی خروجی در نظر گرفته نشد، بلکه در تاروپود شبکه به عنوان ابعاد گره‌ها و کمان‌های زمانی-مکانی وارد گردید. این ویژگی ساختاری به مدل اجازه داد که رفتار شبکه در شرایط افت ظرفیت معابر یا مسدود شدن شریان‌ها را در لحظات گوناگون بحران پیش‌بینی کرده و به‌جای ارجاع به کوتاه‌ترین مسیر هندسی، مسیرهای با بیشترین دسترسی‌پذیری و کمترین تاخیر انباشته را برای عبور محموله‌ها برگزینند.

سومین دستاورد مهم این پژوهش، ایجاد بستری برای تصمیم‌گیری متوازن میان کارایی عملیاتی و عدالت امدادی است. برخلاف الگوهای مرسوم که صرفاً کمینه‌سازی هزینه مالی را مبنای محاسبات قرار می‌دهند، ساختار ارائه‌شده در این تحقیق نشان داد که لحاظ کردن توابع جریمه تأخیر و متغیرهای ناظر بر پوشش حداقلی تقاضای مناطق دورافتاده یا با دسترسی سخت، مانع از شکل‌گیری پدیده رهاشدگی بخش‌های آسیب‌پذیر می‌شود. به این ترتیب، مدل توانست تعادلی تحلیلی میان سرعت تحویل و توزیع منصفانه اقلام در سطح شهر ایجاد کند.

محدودیت‌های پژوهش

هر پژوهش علمی در کنار نوآوری‌های خود، با تنگناها و محدودیت‌هایی روبرو است که درک دقیق آن‌ها برای بهره‌برداری صحیح از یافته‌ها ضروری است. مهم‌ترین محدودیت‌های این مطالعه عبارت‌اند از:



۱ .مفروضات مربوط به ثبات پارامترها در فواصل زمانی گسسته: اگرچه مدل به صورت مکانی-زمانی تعریف شده است، اما افق زمانی در آن به صورت بازه‌های معین گسسته در نظر گرفته شده است؛ در حالی که در رخدادهای واقعی مانند زلزله و پس‌لرزه‌های مداوم، تغییرات ظرفیت شبکه و تقاضا به صورت پیوسته و با رفتار تصادفی بسیار بالا رخ می‌دهند.

۲ .عدم قطعیت در کیفیت و کفایت داده‌های تقاضای لحظه‌ای: در فازهای نخستین بحران شهری، ارزیابی خسارت به دلیل قطعی شبکه‌های مخابراتی دچار تاخیر شدید است. مدل به کار گرفته شده فرض را بر دسترسی به اطلاعات ماتریس تقاضا در هر بازه زمانی قرار داده است؛ در صورتی که فقدان داده‌های آنلاین و قطعی در ساعت‌های اولیه می‌تواند کارایی خروجی قطعی مدل را کاهش دهد.

۳ .نادیده گرفتن رفتار ترافیکی شهروندان و خودروهای تخلیه اضطراری: مدل، شبکه معابر را با تمرکز بر جریان ناوگان امدادی تحلیل می‌کند، در حالی که در دقایق و ساعت‌های نخستین سانحه، هجوم شهروندان برای فرار از منطقه بحرانی منجر به قفل شدن ترافیکی معابر شریانی می‌شود که این موضوع به صورت دینامیک و برون‌زا بر ظرفیت عبور محموله‌های امدادی اثر می‌گذارد.

۴ .پیچیدگی محاسباتی در شبکه‌های کلان‌شهری: مدل‌های عدد صحیح مختلط در مقیاس‌های بسیار بزرگ و با افزایش تعداد اقلام و گره‌های زمانی با رشد نمایی پیچیدگی مواجه می‌شوند که ممکن است برای دستیابی به جواب‌های کاملاً بهینه، زمان محاسباتی بالایی نیاز داشته باشند.

پیشنهادهای کاربردی برای مدیران و مراجع اجرایی

به منظور پیاده‌سازی نتایج این تحقیق در سطح شهرداری‌ها، سازمان‌های مدیریت بحران و جمعیت هلال‌احمر، پیشنهادهای مشخص زیر ارائه می‌گردد:

۱ .استقرار سامانه دینامیک مسیریابی چندکالایی در اتاق‌های کنترل بحران: پیشنهاد می‌شود نهادهای متولی به جای اتکا به برنامه‌ریزی‌های کاغذی و نقشه‌های ایستا، یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) مبتنی بر مدل جریان چندکالایی طراحی کنند تا بتواند با دریافت وضعیت باز بودن معابر، فوراً مسیر و زمان تحویل هر نوع کالا را به تفکیک ناوگان اختصاص دهد.

۲ .طبقه‌بندی و کدگذاری پالت‌های امدادی در انبارهای مادر: مراکز نگهداری اقلام امدادی شهری باید اقلام را بر اساس ابعاد فیزیکی، وزن و ضریب سازگاری حمل، در خوشه‌های استاندارد چندکالایی دسته‌بندی نمایند تا زمان بارگیری و توزیع، با متغیرهای ظرفیتی مدل تطابق داشته باشد و کمترین زمان تخلیه و بارگیری هدر رود.

۳ .ایجاد پایگاه‌های پشتیبان پیشرو (دپوی موقت) بر مبنای گلوگاه‌های شناسایی‌شده: شهرداری‌ها باید با استفاده از خروجی‌های این مدل در شناسایی گره‌های آسیب‌پذیر شبکه، زمین‌ها یا سوله‌های



ورزشی و پارک‌های شهری ایمن را در نزدیکی مناطق با دسترسی ضعیف به عنوان ایستگاه‌های دپوی مرحله‌ای اقلام زیستی تعریف کنند تا نیاز به عبور مستمر از معابر شکننده در لحظه بحران برطرف گردد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

برای گسترش افق‌های علمی در امتداد این مقاله، محورهای زیر به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود:

۱ توسعه مدل در شرایط عدم قطعیت: ادغام رویکردهای برنامه‌ریزی استوار، بهینه‌سازی تصادفی یا مدل‌های برنامه‌ریزی دوفازی به منظور بازنمایی بهتر نااطمینانی در تقاضای اقلام و تغییرات تصادفی ظرفیت مسیرها پیشنهاد می‌گردد.

۲ .تلفیق مدل چندکالایی با تخلیه اضطراری جمعیت: طراحی مدل‌های یکپارچه‌ای که هم‌زمان جریان تخلیه ساکنان از مناطق تخریب‌شده و جریان ارسال اقلام امدادی را در جهت‌های معکوس یا موازی در یک شبکه حمل‌ونقل مشترک بهینه‌سازی کنند.

۳ .توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری نوین: با توجه به چالش حل مدل در شبکه‌های شهری بسیار بزرگ، طراحی الگوریتم‌های فراابتکاری مرتبه‌بندی‌شده یا الگوریتم‌های تجزیه ریاضی برای رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه پیشنهاد می‌شود.

۴ .بکارگیری اینترنت اشیاء (IoT) و داده‌های مکانی برخط: ارزیابی عملکرد مدل زمانی که با حسگرهای شهری و داده‌های برخط ترافیکی متصل شود، می‌تواند جهت‌گیری فناورانه‌ای به این حوزه ببخشد.

منابع

۱-غایب‌لو، سیم؛ فتحی‌پور، فریبا؛ و ترکمانی، نگار. (۱۳۹۹). ارائه یک مدل ریاضی استوار امکانی به‌منظور مسیریابی، زمان‌بندی و توزیع منابع در عملیات کمک‌رسانی پس از زلزله. پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۸(۱۷)، ۲۷۵–۲۹۳.

۲-نریمانی، رضا؛ معتمدی، مجید؛ و عموزادخلیلی، حسین. (۱۴۰۲). به‌کارگیری یک مدل ریاضی برای توزیع اقلام امدادرسانی در زلزله به مناطق آسیب‌دیده شهر تهران. فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۲)، ۱۸۴–۲۰۳.

۳-سموئی، پروانه؛ و کرد، حمیرا. (۱۴۰۲). هماهنگی تأمین و توزیع اقلام امدادی در لجستیک بشردوستانه بر اساس قرارداد انعطاف‌پذیری کمیت و برون‌سپاری. مدیریت فردا، ۲۲(۷۴)، ۳–۱۷.

۱- Haghani, A., & Oh, S.-C. (1996). Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief



operations. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 30(3), 231–250.

۲-Sheu, J.-B. (2007). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 43(6), 687–709.

۳- Yan, S., & Shih, Y.-L. (2009). Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution. Computers & Operations Research, 36(6), 2049–2065.

۴- Barzinpour, F., & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70, 1291–1302. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5379-x

۵-Chang, K.-H. (2022). Multi-Commodity distribution under uncertainty in disaster response. European Journal of Operational Research, 303(2), 857–876.

۶-Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. European Journal of Operational Research, 175(1), 475–493.

۷-Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. International Journal of Logistics: Research and Applications, 11(2), 101–121.

۸-Pishvaee, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. Fuzzy Sets and Systems, 206, 1–20.