

مدلسازی و حل مساله مکانیابی - تخصیص - مسیریابی باز با تحویل چند بخشی، تحت عدم قطعیت در تقاضا و رضایت مشتری در شرایط بحران

مقاله علمی-پژوهشی

*اسفندیار عطائی (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Esataei@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۴۸۴-۴۶۳

چکیده

راه حل‌های مؤثر برای مسئله مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی باز برای توزیع امداد در زمان وقوع بحران، هم برای شرکت‌های لجستیک و هم برای ادارات دولتی، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند. بنابراین پاسخگویی سریع به نیازها و ارسال اقلام مورد نیاز به مناطق آسیب دیده به دلیل غیرقطع بودن شدت بحران و تعداد مناطق آسیب دیده، اولویت بسیار بالایی دارد. این پژوهش به بررسی مدل‌سازی چندهدفه مکانیابی-تخصیص و مسیریابی باز در توزیع امداد با تحویل چند بخشی پس از زلزله در منطقه ۱ شهرستان تهران می‌پردازد. هدف، تعیین بهینه مکان‌های استقرار مراکز امدادی، مسیریابی و تخصیص بهینه ناوگان امدادسانی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای امداد، زمان رسیدن به نقاط هدف، و ظرفیت ناوگان امدادی، پنجره زمانی و رضایت مشتری در شرایط بعد از زلزله است. در این مقاله یک مدل چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها، زمان پاسخگویی و افزایش رضایت مشتری در نظر گرفته شده است. با توجه به NP -Hard بودن این مسئله، مدل ریاضی پیشنهادی از روش محدودیت اسیلون توسط نرم افزار $Cplex10.1$ برای نمونه مسائل در اندازه‌های کوچک و متوسط، اجر و دو الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب ($NSGA-II$) و گرگ خاکستری چند هدفه ($MOGWO$) برای ابعاد بزرگ استفاده شده و عملکرد آن‌ها بر اساس بهبود جواب‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج گویای کارایی الگوریتم‌های ($NSGA-II$) و ($MOGWO$) و برتری الگوریتم $NSGA-II$ نسبت به الگوریتم $MOGWO$ می‌باشد، به این معنا که در اغلب نمونه مسائل، الگوریتم $NSGA-II$ در زمان کوتاه‌تر جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهند در نظر گرفتن فرض تحویل چندبخشی تقاضای مشتریان منجر به کاهش هزینه‌ی نهایی می‌شود و با افزایش تقاضا تعداد مراکز توزیع تاسیس شده افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی، مکانیابی، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب، رضایت مشتری، پنجره زمانی

۱- مقدمه

و پاسخ‌گویی به نیازهای اولیه و حیاتی آسیب‌دیدگان را با دشواری‌های جدی مواجه سازد. در این وضعیت، دسترسی سریع، مستمر و قابل اتکا به اقلام اساسی و امدادی، اهمیت بسیار زیادی در کاهش تلفات انسانی و بهبود شرایط زندگی افراد آسیب‌دیده دارد. از مهم‌ترین چالش‌های موجود در این حوزه، طراحی شبکه‌های لجستیکی کارآمدی است که بتوانند منابع مورد نیاز را در

مدیریت لجستیک در زمان وقوع زلزله به یکی از چالش‌های اساسی کشورهای مختلف جهان تبدیل شده است. در چنین شرایطی، مدیریت زنجیره تأمین بحران نقشی تعیین‌کننده در کاهش پیامدهای نامطلوب این رویدادها و تسریع روند بازسازی ایفا می‌کند. بروز بحران‌های طبیعی و غیرمترقبه، از جمله زلزله، سیل و همه‌گیری‌ها، می‌تواند فرایند تأمین و توزیع کالا و خدمات را به شدت مختل کند

از سوی دیگر، در بسیاری از موقعیت‌های واقعی، امکان استفاده از ناوگان حمل‌ونقل بسته یا برگشت‌پذیر وجود ندارد؛ به عبارت دیگر، وسایل نقلیه پس از انجام مأموریت و تحویل اقلام، به مبدأ باز نمی‌گردند. همچنین در بسیاری از سازمان‌ها و شرکت‌ها، ناوگان موردنیاز برای تأمین تقاضای مشتریان از طریق اجاره تأمین می‌شود و این وسایل نقلیه پس از پایان عملیات، بازگشتی به مرکز اولیه ندارند. افزون بر این، مدیران همواره با این پرسش مواجه‌اند که آیا پاسخ‌گویی کامل به تقاضای هر مشتری در یک نوبت سودمندتر است یا آنکه تحویل تقاضا در چند بخش می‌تواند نتایج بهتری به همراه داشته باشد (Jafari and Sadeghi Sarvestani, 2014). با وجود اهمیت این موضوع، بسیاری از مدل‌های موجود فرض می‌کنند که تمام مراکز توزیع در طول بحران فعال و در دسترس باقی می‌مانند؛ درحالی‌که این فرض، به‌ویژه در شرایط واقعی پس از بحران، لزوماً برقرار نیست. به همین دلیل، مدل‌های مکانیابی-مسیریابی باز که امکان تصمیم‌گیری درباره فعال یا غیرفعال بودن مراکز توزیع را فراهم می‌کنند، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند.

همچنین، در شرایطی که حجم اقلام امدادی موردنیاز از ظرفیت وسایل نقلیه فراتر رود، در نظر گرفتن تحویل چندبخشی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه و کاهش آثار ناشی از عدم قطعیت مطرح شود. در این حالت، هر منطقه آسیب‌دیده این امکان را خواهد داشت که بیش از یک‌بار خدمت دریافت کند (Jafari and Sadeghi Sarvestani, 2014). این ویژگی، به‌ویژه در محیط‌های بحرانی که تقاضا نوسان‌پذیر و منابع محدود است، می‌تواند عملکرد سیستم توزیع را بهبود بخشد.

مسئله مورد بررسی در این پژوهش با هدف هماهنگ‌سازی حمل‌ونقل اقلام امدادی از مراکز توزیع به مناطق آسیب‌دیده تدوین شده است. در این مطالعه، آب معدنی آشامیدنی و کیسه‌خواب به‌عنوان دو کالای حیاتی و ضروری در شرایط پس از زلزله در نظر گرفته شده‌اند و مقدار اقلام توزیعی نیز بر اساس نیاز روزانه افراد آسیب‌دیده تعیین می‌شود. فرایند مسئله به این صورت تعریف می‌شود که ابتدا تأمین از طریق مراکز توزیع انتخاب‌شده آغاز شده و اقلام بر روی وسایل نقلیه برنامه‌ریزی‌شده بارگیری می‌شوند. سپس اقلام به مناطق آسیب‌دیده‌ای که به مسیرهای مختلف تخصیص یافته‌اند ارسال می‌گردند. در صورتی که تقاضای یک

کوتاه‌ترین زمان ممکن و با رعایت عدالت توزیعی به دست آسیب‌دیدگان برسانند. در هنگام وقوع زلزله، توزیع فوری اقلام ضروری یکی از عوامل کلیدی در کاهش خسارت‌ها و تلفات به شمار می‌رود؛ از این رو، کانون اصلی عملیات امدادرسانی پس از زلزله بر سازمان‌دهی صحیح این فرایند متمرکز است. با توجه به محدود بودن زمان، بودجه و سایر منابع، تصمیم‌گیرندگان حوزه لجستیک اضطراری ناگزیرند در زمینه تخصیص بهینه این منابع، تصمیماتی کارآمد ونجیده اتخاذ کنند (Sun et al., 2020).

یکی از مراحل مهم در مدیریت بحران، مرحله پاسخ‌گویی است که در آن اقداماتی نظیر توزیع اقلام امدادی و تخلیه مصدومان و قربانیان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Noham and Tzur, 2018). در این مرحله، مجروحان باید از محل حادثه به مراکز درمانی موقتی که در منطقه ایجاد شده‌اند، منتقل شوند. از این رو، تعیین مکان مناسب برای استقرار این مراکز درمانی موقت، یکی از تصمیمات مهم در فرایند امدادرسانی محسوب می‌شود. افزون بر این، با توجه به اهمیت زمان در عملیات امدادی، انتخاب مسیرهای مناسب برای رساندن خدمات به افراد آسیب‌دیده نیز ضرورتی انکارناپذیر دارد (Davoodi and Goli, 2019).

یکی از مهم‌ترین رویکردهای مطرح در مدیریت زنجیره تأمین بحران، استفاده از مدل‌های مکانیابی-مسیریابی است؛ مدلهایی که به‌طور هم‌زمان درباره محل استقرار مراکز توزیع و نحوه مسیریابی وسایل نقلیه تصمیم‌گیری می‌کنند (Bozorgi-Amiri & Khorshi, 2016). این دسته از مدل‌ها می‌توانند با یکپارچه‌سازی تصمیمات مکانی و عملیاتی، کارایی شبکه توزیع امداد را افزایش دهند.

با وجود این، مدل‌های کلاسیک مکانیابی-مسیریابی (LRP) اغلب بر پایه فرض قطعیت در پارامترهایی همچون تقاضا، زمان سفر و دسترسی به منابع طراحی می‌شوند. این در حالی است که در شرایط پس از بحران، عدم قطعیت در تقاضا، به دلیل تخریب زیرساخت‌ها، جابه‌جایی جمعیت و تغییرات سریع نیازها و نیز عدم قطعیت در زمان سفر به سبب آسیب‌دیدگی راه‌ها، تراکم ترافیک و محدودیت‌های عبور و مرور به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نتیجه، اتکا به مدل‌های قطعی در چنین شرایطی ممکن است به کاهش کارایی سیستم توزیع و اتخاذ تصمیمات غیربهینه منجر شود (Chang, Chiang and Chang, 2024).

برای اب اشامیدنی ارائه می دهد. مدل پیشنهادی، از طریق ارائه یک چارچوب جامع تصمیم‌گیری، می‌تواند سازمان‌های امداد رسانی و مدیران بحران را در مکان‌یابی بهینه مراکز توزیع و طراحی مسیرهای کارآمد ناوگان، متناسب با محدودیت‌ها و شرایط عدم قطعیت محیط بحران، یاری دهد.

۲- پیشنهاد تحقیق

روند فزاینده وقوع بلایای طبیعی نظیر زلزله، طوفان و سیل در دهه‌های اخیر، تهدیدی جدی برای سلامت، جان و دارایی‌های جوامع بشری به شمار می‌رود و تأثیرات مخرب پایداری بر فعالیت‌های زیستی و تولیدی بر جای گذاشته است. این وضعیت، پژوهشگران را بر آن داشته تا مدل‌های ریاضی گوناگونی را برای مدیریت بهینه زنجیره تأمین در شرایط بحران توسعه دهند. عیدی و دهنوی (Eydi and Dehnavi, 2025) در پژوهشی یک مدل ریاضی جدید برای مسئله مکان‌یابی مسیر یابی چندهدفه ارائه دادند که در آن، علاوه بر تصمیم‌های هم‌زمان مکان‌یابی انبارها و مسیر یابی وسایل نقلیه، انتخاب بین خرید یا اجاره ناوگان نیز لحاظ شده است. مدل با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی نظیر ظرفیت وسایل نقلیه و انبارها و حداکثر زمان مجاز فعالیت ناوگان، دو هدف کمینه‌سازی هزینه‌های انبارداری و حمل‌ونقل و بیشینه‌سازی سطح خدمت به مشتری را دنبال می‌کند. برای حل مدل، از روش دقیق در نرم‌افزار GAMS و نیز دو الگوریتم فراابتکاری مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم انبوه ذرات چند هدفه (MOPSO) استفاده کرده اند. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که رویکردهای فراابتکاری پیشنهادی در حل نمونه‌های بزرگ مقیاس کارایی مناسبی داشته و می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های واقع‌بینانه لجستیک و زنجیره تأمین مورد استفاده قرار گیرند.

دیابت، جبارزاده و خسروجردی (Diabat, Jabbarzadeh and Khosrojerdi, 2019) مدلی یکپارچه برای مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه کردند که هدف آن هماهنگ‌سازی عملیات لجستیک و تخلیه اضطراری بود. این پژوهش که در قالب یک مدل جریان شبکه چندکالایی عدد صحیح مختلط (MILP) ارائه شد، به دنبال کاهش تأخیر در ارائه خدمات پزشکی با استفاده از ناوگان ناهمگن بود.

منطقه از ظرفیت وسایل نقلیه فراتر رود، تحویل چندبخشی ضروری خواهد بود. همچنین وسایل نقلیه پس از تخلیه بار، تا زمان دریافت مأموریت بعدی در نقطه پایانی باقی می‌مانند و به مرکز باز نمی‌گردند. بر همین اساس، اهداف اصلی مسئله عبارت‌اند از: (۱) انتخاب زیرمجموعه‌ای بهینه از مراکز توزیع برای فعال‌سازی، (۲) تخصیص مناطق آسیب‌دیده و وسایل نقلیه به مراکز توزیع، (۳) برنامه‌ریزی مسیرها با در نظر گرفتن ظرفیت وسایل نقلیه و امکان تحویل چندبخشی.

در مسئله مکان‌یابی-مسیریابی باز (OLRP)، امکان بهره‌گیری از انواع مختلف وسایل نقلیه با ظرفیت‌ها و سرعت‌های متفاوت وجود دارد. به همین دلیل، در این مقاله از ناوگان ناهمگن شامل وسایل نقلیه با ظرفیت و سرعت متفاوت استفاده شده است. همچنین برای کالای آب، پنجره زمانی در نظر گرفته می‌شود تا توزیع این قلم حیاتی با حساسیت زمانی بیشتری انجام گیرد. افزون بر این، شرایط بحرانی معمولاً با سطوح بالایی از عدم قطعیت همراه‌اند؛ به‌گونه‌ای که تقاضا، زمان سفر و وضعیت زیرساخت‌ها را نمی‌توان به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد. نادیده گرفتن چنین عدم قطعیت‌هایی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های غیربهینه و کاهش کارایی زنجیره تأمین منجر شود. از سوی دیگر، در بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های مربوط به مکان‌یابی و مسیر یابی در زنجیره تأمین، فرض بر این بوده است که تسهیلات، سالم و در دسترس‌اند؛ حال آنکه در صورت بروز اختلال، ساختار زنجیره تغییر می‌کند و شبکه‌های موجود ممکن است دیگر کارایی لازم را نداشته باشند. بنابراین، زنجیره‌های تأمین باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در زمان وقوع اختلال نیز کارآمد باقی بمانند. از جمله مصادیق اختلال می‌توان به از دسترس خارج شدن تسهیلات توزیع، انبارها، مراکز تولید، یا بروز اختلال در حمل‌ونقل ناشی از رویدادهای طبیعی و انسانی اشاره کرد. چنین اختلالاتی می‌تواند پیامدهایی نظیر افزایش هزینه‌های از دست‌رفته، کاهش سهم بازار و تحمیل جریمه‌های قراردادی را برای زنجیره تأمین به دنبال داشته باشند.

با توجه به موارد فوق، این مقاله، یک مدل چند هدفه مکان‌یابی-تخصیص و مسیر یابی باز با تحویل چندبخشی برای شرایط بعد از زلزله برای توزیع امداد با هدف کاهش هزینه، کمینه‌سازی بیشینه زمان مسیر و افزایش رضایت مندی مشتری در مناطق آسیب دیده با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفر و پنجره زمانی

VRP و مسئله زمان‌بندی با بارانداز متقاطع و پنجره‌های زمانی در یک زنجیره تأمین چهارسطحی در نظر گرفتند. همچنین مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با بارانداز متقاطع معکوس را مدنظر قرار داده و یک مدل ریاضی برای به حداقل رساندن هزینه‌های جابجایی محصولات در یک شبکه زنجیره تأمین چهار سطحی؛ شامل تأمین‌کنندگان، بارانداز متقاطع، مشتریان و فروشگاه‌ها را توسعه دادند. و یک روش ریاضی مبتنی بر الگوریتم جستجوی همسایگی معرفی کردند.

بیگی و حسین زاده (Beigi and Hosseinzadeh, 2019) بر شاخص امنیت مسیر در شرایط بحران تمرکز کردند. هدف تحقیق آن‌ها ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای تعیین دقیق مکان اردوگاه‌ها و مسیر بهینه حرکت وسایل امدادی بین نقاط حادثه‌دیده و محل‌های اسکان بود. آن‌ها عدم قطعیت فازی را در متغیرهایی همچون زمان حمل و نقل، مقدار تقاضا، زمان خدمت‌رسانی و پنجره‌های زمانی وارد کردند. روش حل پیشنهادی آن‌ها به این صورت بود که ابتدا مجموع زمان‌های رسیدن به اردوگاه‌ها در شرایط بدبینانه را محاسبه کرده و از آن به‌عنوان کران بالا در مدلی با هدف کمینه‌سازی هزینه مورد انتظار آسیب‌های وارده به افراد و ناوگان استفاده کردند.

ماغفرو و هانائوکا (Maghfiroh and Hanaoka, 2020) در پژوهشی، چند مد حمل و نقل را برای توزیع امداد در شرایط پس از وقوع بحران با استفاده از یک زنجیره سه سطحی شامل: (۱) گره‌های تأمین، (۲) مناطق عملیاتی لجستیک و (۳) مناطق آسیب‌دیده ارائه نمودند، همچنین سفرهای متعدد برای عملیات پاسخگویی به بحران را در نظر گرفتند. این مدل، مکان مناطق عملیاتی لجستیک، روش‌های حمل و نقل مورد استفاده و میزان کالاهای امدادی اختصاص داده شده برای هر روش حمل و نقل را تعیین می‌کند. علاوه بر این، این مدل مراحل مختلف عوامل اضطراری پاسخ، مانند شرایط شبکه و زیرساخت‌ها، و همچنین دسترسی به تدارکات و روش‌های حمل و نقل را در نظر می‌گیرد. هیلدبرانت و توماس (Hildebrandt and Thomas, 2023) یک تغییر الگو در خدمات لجستیک شهری انجام دادند؛ با توجه به اینکه تقاضا برای خدمات جابجایی و تحویل در لحظه و بلادرنگ افزایش می‌یابد. این امر چالش‌های جدیدی را برای ارائه‌دهندگان خدمات لجستیک ایجاد می‌کند، بنابراین برای این چالش، مساله مسیریابی پویای تصادفی وسیله نقلیه را ارائه نمودند. و با توجه به پویایی و عدم قطعیت آینده، روش یادگیری تقویتی را که ابزاری امیدوارکننده برای ارزیابی اقدامات فوق است، مطرح کردند.

گل محمدی و ماهوتچی (Gol Mohammadi and Mahotchi, 2017) یک مدل یکپارچه تصادفی را برای طراحی شبکه امداد رسانی شهر تهران پیشنهاد دادند. تصمیمات این مدل در

عطائی و همکاران (Ataei et al., 2020) یک مدل یکپارچه مکانیابی-مسیریابی و موجودی تسهیلات امدادی با چند مد حمل و نقل و تور پوششی در زمان قبل و بعد از بحران را ارائه نمودند. و اهداف این مقاله شامل (۱) بیشینه کردن احتمال عبور موفق از مسیرها با افزایش قابلیت اطمینان مسیرها، (۲) کمینه کردن هزینه‌های امدادی قبل و بعد از وقوع بحران با در نظر گرفتن پنجره‌زمانی، (۳) کمینه کردن بیشینه تقاضای پوشش داده نشده برای کالاهای امدادی برای تمامی مراکز در سناریوها و حالات ممکن بود. همچنین در نظر گرفتن حالت عدم قطعیت سناریویی به‌همراه عدم قطعیت مسیر و تقاضا، چند کالایی بودن، چند مد حمل و نقل و تور پوششی از جمله نوآوری‌های این پژوهش بشمار می‌آید.

یکی از چالش‌های کلیدی در مسائل دنیای واقعی، بازگشت ناوگان به مرکز توزیع است. جعفری و صادقی سروستانی (Jafari and Sadeghi Sarvestani, 2014) یک مدل مکانیابی-مسیریابی باز را ارائه نمودند. در این پژوهش به منظور نزدیک کردن مساله مکانیابی-مسیریابی کلاسیک به شرایط دنیای واقعی و پاسخگویی به چالشی که مدیرانی که همواره با آن مواجه هستند، مساله مکانیابی باز با تحویل چند بخشی را ارائه کردند. و بدلیل NP-Hard بودن مساله از دو الگوریتم انجماد تدریجی و جسجوی ممنوع استفاده کردند و نتایج برتری الگوریتم انجماد تدریجی نسبت به الگوریتم جسجوی ممنوع می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در نظر گرفتن فرض تحویل چند بخشی تقاضای مشتریان منجر به کاهش هزینه نهایی می‌شود.

نوآوری این پژوهش در نظر گرفتن تحویل چند بخشی تقاضای مشتریان به صورت برنامه ریزی خطی اعداد مختلط برای مسائل مکانیابی-مسیریابی باز می‌باشد.

ایمانی، کریمی و دیرانلو (Imani, Karimi and Deiranlou, 2024) یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی چند دپویی (MDLRP) را تحت شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی کردند و با استفاده از تحویل چند بخشی، تعادلی میان «کمینه‌سازی هزینه» و «توازن مسافت» ایجاد کردند. خروجی این تحقیق با بهره‌گیری از روش محدودیت ایپسیلون، راهکارهای استواری را برای مدیریت تقاضا و هزینه‌های متغیر ارائه می‌دهد که نسبت به رویکردهای قطعی، کاهش هزینه چشمگیری را به همراه دارد.

شاخص رضایت مشتری نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است؛ چنانچه گونوان و همکاران (Gonawan et al., 2022) در یک پژوهشی رضایت مشتری را برای توسعه یک

پرداختند. بیشینه کردن احتمال عبور موفق از مسیرها، کمینه کردن هزینه‌های امدادی و کمینه سازی مازاد و کمبود پرسنل امدادی انتقالی به مناطق آسیب دیده از جمله اهداف این پژوهش می‌باشد. مدل ریاضی پیشنهادی با رویکرد محدودیت اپسیلون توسعه یافته و با استفاده از نرم افزار گمز برای مطالعه موردی منطقه ۱۱ تهران حل گردیده است. در نظر گرفتن انواع مجروحین شامل مجروحان سرپایی و مجروحان شدید، همچنین بی‌خانمان‌ها و پرسنل امداد بصورت همزمان و مدل‌سازی ریاضی سه هدفه، چندکالایی، چند وسیله‌ای با ملاحظات عدم قطعیت بصورت سناریویی از جمله نوآوری‌های این پژوهش بشمار می‌رود.

خورسی دامغانی و همکاران (, Khorsii Damghani et al., 2021) در پژوهشی تحت عنوان مدل بهینه سازی استوار پویا برای مساله مسیریابی-زمانبندی در لجستیک بشردوستانه و حل آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری گروه‌بندی، دوتا از اصلی‌ترین تصمیمات لجستیکی در زمان وقوع بحران، یعنی مسیریابی و زمانبندی وسایل نقلیه برای توزیع منابع به نقاط آسیب دیده را مورد توجه قرار داده‌اند. برای این منظور یک مدل برنامه ریزی ریاضی پویا، چند کالایی، چند انبار و چند سفره، تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده‌اند که همزمان چندین ویژگی مهم مسائل دنیای واقعی را دربر می‌گیرد. برای ارزیابی درست‌نمایی و کارایی مدل ارائه شده، مطالعه موردی از کلانشهر تهران ارائه شده است.

یافته‌ها، کاربردی بودن مدل بیان شده را برای حل مسائل واقعی نشان می‌دهند. پاراگویا و اسیه (Paragoya and Asih) یک مدل توسعه‌یافته از مسئله مکان‌یابی مسیریابی با تحویل چند بخشی چند انباره ارائه دادند که علاوه بر تصمیم‌های مکان‌یابی و مسیریابی، ویژگی‌های وسایل نقلیه چندانباری، تحویل چند بخشی، پنجره‌های زمانی و مراکز توزیع با ظرفیت محدود را نیز لحاظ کردند. مدل به‌صورت چندهدفه فرموله شده و اهداف آن کمینه‌سازی هزینه کل و بیشینه‌سازی سطح خدمت است. برای حل مسئله از الگوریتم NSGA-II استفاده شده و نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد تحویل چند بخشی در شرایطی مانند نزدیکی گره‌ها و وجود پنجره‌های زمانی با انعطاف‌پذیری بیشتر می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد.

حبیبی، پایدار و اسدی (Habibi, Paydar and Asadi- Gangraj, 2018) یک مدل سه‌هدفه را طراحی کردند که اهداف آن شامل کمینه‌سازی هزینه کل، کمینه‌سازی زمان سفر و بیشینه‌سازی حداقل سطح برآورده‌سازی تقاضا (عدالت در توزیع) بود. نتایج این مدل در یک مطالعه عملی مورد بررسی و تایید قرار گرفت. اکان و ایکی جی (Okan and Ekici, 2018) مدلی برای مکانیابی تسهیلات در بحران‌های ناگهانی توسعه دادند که در آن تعداد و مکان مراکز توزیع تعیین می‌شود. این مدل «حداکثر

دو سطح اتخاذ می‌شود: سطح اول شامل مکان‌یابی انبارهای منطقه‌ای و تعیین موجودی ذخیره احتیاطی، و سطح دوم شامل طراحی شبکه توزیع و جریان کالاها است. هدف این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره امداد است که با استفاده از داده‌های واقعی و سناریوسازی زلزله تهران و خسارت‌های احتمالی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) با هدف ارتقای راندمان امداد، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و چندهدفه برای مسئله مکانیابی-موجودی-مسیریابی (LIRP) ارائه دادند که بر پایه قابلیت اطمینان چندگانه تحت عدم قطعیت استوار است. آن‌ها سه نوع عدم قطعیت (تقاضا، عرضه و زمان) و دو نوع قابلیت اطمینان (تسهیلات و جاده‌ها) را در نظر گرفتند. عواملی همچون تخفیف خرید عمده، بودجه پیش از فاجعه، چند مد حمل‌ونقل و محدودیت‌های ظرفیت در این مدل یکپارچه دیده شده است. حل مدل با الگوریتم NSGA-II انجام شد و مطالعه موردی زلزله سیچوان نشان داد که افزایش بودجه قبل از بحران و تعداد هلیکوپترها می‌تواند به‌طور معناداری هزینه‌ها و زمان توزیع را کاهش دهد.

چنگ و همکاران (Cheng et al., 2018) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای مکان‌یابی مراکز توزیع، اندازه ناوگان و مسیریابی بهینه وسایل نقلیه ارائه دادند که به‌طور خاص برای رسیدگی به شرایط ترافیک در شبکه‌های جاده‌ای آسیب‌دیده از بحران طراحی شده است. آن‌ها از یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل این مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده کردند.

وانگ و نی (Wang and Nie, 2022) برای مقابله با مساله تغییرات پویا در عرضه کالا و تقاضای مناطق آسیب دیده در دوره‌های مختلف پس از بحران، یک مدل مکان‌یابی-موجودی چند دوره‌ای برای لجستیک اضطراری پیشنهاد دادند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2018) برای کمک به بهبود سطح خدمات لجستیکی از راهکارهای حمل و نقل جانبی استفاده کردند تا اقلام امدادی پس از وقوع بحران برای آسیب دیدگان قابل دسترس‌تر باشد.

حسینی مطلق و سامانی (Hosseini-Motlagh and Samani, 2020) نسبت به مدل‌سازی تعیین مکان هاب‌های امدادی با اولویت مطالبات مصدومین حوادث جاده‌ای پرداخته‌اند و زمان را بصورت فازی در نظر گرفته و از روش‌های حل دقیق و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGA-II) برای حل مدل استفاده نموده‌اند.

بایگان و همکاران (Bayghan et al., 2024) در پژوهشی به مکانیابی، مسیریابی و توزیع کالاهای امدادی در شرایط وقوع زلزله

۳- مدلسازی ریاضی

در این بخش از دو رویکرد مدلسازی استفاده شده است. نخست، فرمول‌بندی سه شاخصه LRP که توسط پرل و دسکین (Perl and Daskin, 1985) ارائه شده بود، توسعه داده شده است. دوم، با الهام از مدل‌های ارائه شده توسط هانسن و همکاران (Hansen et al, 1994)، از اندیس‌ها، متغیرها و پارامترهای مرتبط برای مدلسازی مساله OLRP استفاده شده است.

مفروضات اصلی مساله به شرح ذیل می‌باشد.

- تقاضای منطقه آسیب دیده مشخص نیست.
- تعداد مناطق آسیب‌دیده و مراکز توزیع پیشنهادی از قبل مشخص است.
- اطلاعات مربوط به مسیرهای ارتباطی موجود، شامل فاصله و حداکثر سرعت مجاز مشخص است.
- احتمال موفقیت در عبور از مسیرهای موجود نیز معلوم فرض می‌شود.
- هر وسیله نقلیه مجاز است در هر مأموریت حمل، انواع مختلف اقلام امدادی را بارگیری نماید و همزمان، چند نوع کالای امدادی می‌تواند در یک خودرو بارگذاری شود.
- تنها مناطقی از زلزله که با وسایل نقلیه از طریق شبکه حمل‌ونقل فعلی قابل دسترسی باشند، در نظر گرفته می‌شوند و مناطقی که نیازمند بالگرد یا سایر وسایل حمل‌ونقل ویژه باشند، از مدل حذف می‌شوند.
- خودروها از مرکز توزیع شروع به حرکت می‌کنند و در پایان به مرکز باز نمی‌گردند.
- برای آب، دوره زمانی مشخصی در نظر گرفته شده است و پس از آن زمان قابل استفاده نیست.

پوشش» که تصمیمات موجودی را نیز در بر می‌گیرد، با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه و ظرفیت، هدف خود را بر بیشینه‌سازی پوشش تقاضا استوار کرده است. آزمایش‌های محاسباتی آن‌ها کارایی مدل را در زمینه زمان پاسخ‌گویی و رضایت مشتری نشان داد.

رضانیان و بهبودی (Ramezani and Behboodi, 2017) یک مدل مکانیابی مرکز استوار را برای استقرار مراکز امدادی پیشنهاد دادند. در این پژوهش، زمان سفر بین مناطق آسیب‌دیده و مراکز به‌جای توزیع‌های احتمالی، به‌صورت بازه‌های ثابت و غیرقطعی در نظر گرفته شد. هدف اصلی مدل، کمینه‌سازی حداکثر زمان سفر میان مراکز و مناطق حادثه‌دیده بود که از طریق یک الگوریتم ابتکاری در یک مطالعه موردی واقعی حل و ارزیابی شد. باتوجه به مطالعه مرور ادبیات نوآوری‌های مقاله به شرح ادامه می‌باشد.

- طراحی یک مدل ریاضی برای مسیریابی باز وسایل نقلیه با تحویل چند بخشی و تخصیص مناطق آسیب‌دیده و خودروها به مراکز توزیع

- در نظر گرفتن پنجره زمانی برای آب جهت امدادسانی

- در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه

- ظرفیت هر یال بر حسب تعداد وسیله‌های عبوری از آن تعیین می‌شوند و ایجاد اختلال در مسیر به معنی کم شدن ظرفیت هر یال برای تعداد وسایل عبوری از آن می‌باشد.

- در نظر گرفتن حالت عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفر

- فرموله کردن مسئله با فرض چند کالایی

- در نظر گرفتن افزایش رضایت مشتری (افراد آسیب دیده)

- ارائه یک مطالعه موردی واقعی جهت بررسی دقت و صحت مدل پیشنهادی

با توجه به مفروضات مطرح شده، اندیس‌های مدل عبارتند از:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

L مجموعه کالاهای امدادی

K مجموعه وسایل نقلیه

M مجموعه مراکز توزیع

N مجموعه مناطق آسیب‌دیده

i, j اندیس نمایش گره‌ها $\{N \cup M\}$

$i, j \in V$

$l \in L$ اندیس اقلام امدادی

$k \in K$ اندیس وسایل نقلیه

$b \in B$ خودروها

پارامترها

k	تعداد وسایل نقلیه
m	تعداد مراکز توزیع کاندید
n	تعداد مناطق آسیب دیده
d_{ij}	فاصله بین گره‌های i و j و $(i, j) \in E$ و $\{(i, j), i, j \in V, i \neq j\}$
D_{il}	میزان تقاضای کالای نوع l در منطقه آسیب دیده i
r_{ij}	احتمال موفقیت عبور از مسیر ارتباطی (i, j)
v_{ij}	حداکثر سرعت مجاز در مسیر ارتباطی (i, j)
R_j	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع j
UV_l	حجم واحد کالای امدادی نوع l
c_k	هزینه حمل هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه k
v_k	سرعت نرمال وسیله نقلیه k
G_{jik}	کل ظرفیت استفاده شده وسیله نقلیه k از مرکز توزیع j به نقطه آسیب دیده i
Q_l	میزان کالای نوع l قابل دسترسی در شبکه حمل و نقل
L_k	ظرفیت بارگیری وسیله نقلیه k
q_{ijkl}	مقدار کالای امدادی نوع l که توسط وسیله نقلیه k از گره i به گره j حمل می‌شود.
$[e_i, b_i]$	پنجره زمانی مجاز دریافت آب معدنی در گره i
T	حداکثر زمان مصرف (فساد) آب
t_{jk}	زمان شروع وسیله نقلیه k از گره j
t_{ik}	زمان شروع وسیله نقلیه k از گره i
M	عدد بزرگی است.
d_i	درجه خروجی گره i و j نمایانگر تعداد خودروهاست.

متغیرها

z_{ik}	اگر گره i در مسیر وسیله نقلیه k باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر.
u_{jil}	مقدار کالای نوع l منتقل شده از مرکز توزیع j به منطقه آسیب‌دیده i
x_{ijk}	وقتی وسیله نقلیه k از گره i به گره j برود برابر ۱ و در غیر این صورت صفر.
w_j	اگر مرکز توزیع j انتخاب شود برابر ۱ و در غیر این صورت صفر.
q_{ijkl}	مقدار کالای امدادی نوع l که توسط وسیله نقلیه k از مرکز توزیع j به منطقه آسیب‌دیده i تحویل داده می‌شود.
y_{il}	مقدار تقاضای ارضا نشده از نوع کالای l در منطقه آسیب‌دیده i در انتهای عملیات.
VF_{ik}	اگر آخرین منطقه سرویس‌دهی شده توسط وسیله نقلیه k منطقه آسیب‌دیده i باشد برابر ۱ و در غیر این صورت صفر.

تابع اهداف

$$\min f_3 = \sum_{j \in M} R_j W_j + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_k d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\min f_1 = \max \left(\sum_{(i,j) \in E} \frac{d_{ij} x_{ijk}}{\min(v_{ij}, v_k)}, k \in K \right) \quad (2)$$

$$\max f_2 = \sum \min \left\{ \frac{\sum_j q_{ijlk}}{D_{il}} \right\} \quad (3)$$

محدودیت‌ها

$$y_{il} = D_{jl} - \sum_{k \in K} q_{jlk} \geq 0 \quad \forall i \in N, l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{j \in M} q_{ijlk} \leq D_{il} \quad \forall k \in K, l \in L \quad (5)$$

$$z_{ik} \leq x_{ijk} \quad \forall i \in V, (i,j) \in E, k \in K \quad (6)$$

$$z_{ik} \leq VF_{ik} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} VF_{ik} = 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in E} x_{jik} - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ -1 \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} VF_{ik} = 1, i \in N \\ z_{ik} = 1, i \in N, \forall k \in K \\ \text{در غیر اینصورت} \end{array} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} q_{jlk} z_{ik} \leq Q_l \quad \forall l \in L \quad (10)$$

$$w_j \leq x_{ijk} \quad \forall j \in M, (i,j) \in E, k \in K \quad (11)$$

$$w_j \leq z_{ik} \quad \forall j \in M, k \in K \quad (12)$$

$$q_{ilk} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E, k \in K, l \in L \quad (13)$$

$$w_j \in (0,1) \quad \forall j \in M \quad (14)$$

$$x_{ijk} \in (0,1) \quad \forall i \in N, k \in N \quad (15)$$

$$z_{ik} \in (0,1) \quad \forall i \in N, k \in K \quad (16)$$

$$VF_{ik} \in (0,1) \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i,j \in N} x_{ijk} \leq \sum_{i \in N} d_i - k \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j:(j,i) \in E} q_{jilk} - \sum_{k \in K} \sum_{j:(i,j) \in E} q_{ijlk} + y_{il} = D_{il} \quad \forall i \in N, l \in L \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{j:(j,i) \in E} q_{ijlk} \leq Q_l \quad \forall j \in M, l \in L \quad (20)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in E} \sum_{k \in K} x_{jik} = \sum_{j:(i,j) \in E} \sum_{k \in K} x_{ijk} + \sum_{k \in K} VF_{ik}, \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} \sum_{k \in K} x_{ijk} = k \quad \forall j \in M \quad (22)$$

$$\sum_{l \in L} q_{ijkl} UV_l \leq L_k \quad \forall (i,j) \in E, k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{jik} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E, l \in L, k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} \sum_{k \in K} x_{jik} \geq 1 \quad \forall i \in N \quad (25)$$

$$\sum_{j \in M} x_{jik} \leq 1 \quad \forall i \in N, k \in N \quad (26)$$

$$q_{ijkl} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E, l \in L, k \in K \quad (27)$$

$$t_{ik} \geq t_{jk} + \frac{d_{ij}}{v_k} - M(1 - x_{jik}) \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall k \in K \quad (28)$$

$$e_i \leq t_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (29)$$

$$q_{ilk} = \sum_{j:(j,i) \in E} q_{jilk} = \sum_{j:(i,j) \in E} q_{ijlk} \quad \forall i, j, k \quad (30)$$

$$q_{ijlk} \leq M \cdot x_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (31)$$

محدودیت (۶) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه فقط در صورتی از یک یال عبور می‌کند که نقطه مبدا آن گره را پوشش دهد. محدودیت (۷) الزام بازدید وسیله نقلیه از گره پایانی مشخص شده را بیان می‌کند. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه فقط در یک گره توقف نهایی دارد. محدودیت (۹)، محدودیت موازنه جریان است به این معنا است که مسیر هر وسیله نقلیه در ابتدای سفر از مرکز توزیع شروع شده و پس از پوشش گره‌های موردنظر در نقطه‌ای خاتمه پیدا می‌کند. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که مجموع میزان توزیع اقلام امدادی به مناطق آسیب‌دیده نباید از موجودی کل فراتر رود. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) به این معنا است که فقط مراکز توزیع فعال شده حق سرویس‌دهی دارند. محدودیت (۱۳) نامنفی بودن متغیر جریان تخصیص کالاها را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۷) بیانگر باینری بودن متغیرهای تصمیم هستند. محدودیت (۱۸) از تشکیل هرگونه زیرتور چرخه‌ای که از مراکز توزیع جدا شده، جلوگیری می‌کند. یعنی، هیچ چرخه‌ای از گره‌های مناطق آسیب‌دیده نمی‌تواند مستقل از مرکز توزیع شکل بگیرد و در نتیجه، همه مسیرها به شبکه مراکز توزیع متصل خواهند بود. در مدل مسیریابی مکانی باز (OLRP) همراه با تحویل چند بخشی، محدودیت حذف زیرتوراهمیت زیادی داشته و هدف آن

در واقع این تحقیق شامل ۳ هدف می‌باشد، که هدف (۱) کل هزینه توزیع از قبیل هزینه ثابت تأسیس مراکز توزیع و هزینه پیمایش وسیله نقلیه را کمینه می‌کند. هدف (۲) در صدد کمینه‌سازی بیشینه زمان مسیر طی شده توسط هر وسیله نقلیه می‌باشد. این هدف تضمین می‌کند که توزیع امداد به تمام مناطق آسیب‌دیده در کوتاهترین بازه زمانی ممکن انجام گیرد و هیچ منطقه‌ای با تأخیر غیرمنطقی مواجه نشود. این شاخص برای تصمیم‌گیران عملیاتی کلیدی است تا بهینه‌ترین تخصیص خودرو و مسیر را انتخاب کنند. زمان طی شده توسط وسیله نقلیه k در هر کمان (i, j) به فاصله d_{ij} ، بیشینه سرعت مجاز در آن مسیر v_{ij} و سرعت نرمال وسیله نقلیه v_k بستگی دارد. هدف (۳) رضایت‌مندی در نقاط تقاضا را از طریق حداکثرسازی مجموع کمترین درصد پوشش در نقاط تقاضا، بیشینه می‌نماید. این رابطه امکان تحلیل، اولویت‌بندی و ردیابی تأثیر تصمیمات مکان‌یابی (انتخاب مرکز توزیع)، تخصیص خودرو و نوع وسیله نقلیه را بر میزان رضایت‌مندی هر منطقه آسیب‌دیده فراهم می‌کند. محدودیت (۴) به این معنا است که مقدار کالای امدادی تخصیص داده شده به هر گره نباید بیش از تقاضای آن باشد. و نامنفی بودن آن را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) از ارسال کالاهای اضافی به نقاط تقاضا جلوگیری می‌کند.

نقلیه می باشد.

۴- رویکردهای حل

در این بخش، به حل مدل ریاضی توسط الگوریتم های فراابتکاری ژنتیک مرتب سازی نامغلوب (NAGA-II) و گرگ خاکستری چند هدفه (MOGW) پرداخته و نتایج این الگوریتم ها با روش دقیق محدودیت اسپیلون مقایسه می شود.

۴-۱- رویکرد محدودیت اسپیلون

روش محدودیت اسپیلون یکی از روش های دقیق حل برنامه ریزی چندهدفه بوده که بر برخی از مشکلات تحذب روش مجموع وزنی که پایه ای ترین روش حل این گونه مسائل است، غلبه می کند. این روش شامل بهینه نمودن یک تابع هدف اصلی (F_p) و بیان اهداف دیگر در فرم محدودیت های نامساوی هست (Mavrotas, 2009).

$$\begin{aligned} \min_{x \in \Omega} F_p(x) & \quad (32) \\ \text{subject to } F_i(x) & \leq \varepsilon_i \quad i \\ & = 1, \dots, m \quad i \neq p \end{aligned}$$

این روش قادر به شناسایی تعدادی از راه حل های غیر تحتانی در یک مرز غیر محذب بوده که با استفاده از روش مجموع وزنی قابل حصول نیست.

۴-۲- رویکرد ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب

الگوریتم ژنتیک که شاخه ای از محاسبات تکاملی به شمار می رود، نخستین بار توسط هالند (۱۹۷۵) معرفی گردید. این رویکرد، یک متدولوژی جستجوی تصادفی اما هدف مند است که منطق عملکردی خود را از ساختار بیولوژیکی ژن ها و کروموزوم ها الهام می گیرد. الگوریتم های بهینه سازی هوشمند در مواجهه با مسائل چندهدفه، عموماً سازوکار مشابهی را دنبال می کنند؛ به این معنا که برخلاف روش های سنتی، مسئله را بدون تبدیل به حالتی تک هدفه و در شکل اصلی خود حل می نمایند (Deb et al., 2002). فرایند حل در این الگوریتم ها مستلزم به کارگیری مؤلفه های خاصی است که یکی از حیاتی ترین آن ها، استفاده از یک «بایگانی»

جلوگیری از تشکیل چرخه های منفصل از مراکز توزیع است که به شبکه اصلی متصل نیستند. اگر درجه خروجی از گره i را d_i فرض کنیم بر اساس تحقیق درور و همکاران (Dror et al, 1994) داریم: $d_i = \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} \quad (i \in N)$ محدودیت (۱۹)، معادله تعادل جریان بار در مناطق آسیب دیده هستند و تضمین می کنند که مجموع مقدار اقلام امدادی توزیع شده I در گره i از مقدار تقاضای آن گره فراتر نرود. محدودیت (۲۰)، بقای جریان در مراکز توزیع می باشد و بیانگر آن هست که مجموع مقدار کالای امدادی توزیع شده I توسط تمامی وسایل نقلیه از تمامی مراکز توزیع، از میزان اقلام موجود در مرکز توزیع تجاوز نکند. محدودیت های (۲۱) و (۲۲) نیز به ترتیب به توازن جریان وسایل نقلیه اعزام شده در مناطق آسیب دیده و مراکز توزیع اشاره دارند. محدودیت (۲۳) حجم کل اقلام بارگیری شده توسط وسیله نقلیه k را به گونه ای تعریف می کند که از ظرفیت وسیله تجاوز نکند. محدودیت (۲۴) نشان می دهد که هر وسیله نقلیه فقط می تواند از یک مرکز توزیع (DC) مسیر خود را آغاز کند. محدودیت (۲۵) به این معناست که هر منطقه آسیب دیده باید حداقل یک بار توسط یکی از وسایل نقلیه بازدید و خدمت رسانی شود. محدودیت (۲۶) نشان می دهد که هر وسیله نقلیه می تواند هر منطقه آسیب دیده را حداکثر یک بار، در طول کل سفر خود، سرویس دهد؛ و این موضوع منجر به حذف حلقه (زیرتور) در مسیر هر وسیله می شود. همچنین، محدودیت (۲۷) بیانگر نامنفی بودن میزان کالای توزیع شده توسط هر وسیله نقلیه است. محدودیت (۲۸) و (۲۹) مربوط به پنجره زمانی آب معدنی می باشد. در مدل های لجستیک امداد و به ویژه OLRP، منظور از پنجره زمانی همیشه حداکثر بازه مجاز برای رسیدن کالا به نقطه تقاضا است (Tzeng et al, 2007). و طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی (WHO)، آب آشامیدنی باید در ۲۴ ساعت اول پس از بحران به افراد آسیب دیده برسد. محدودیت (۳۰) بیانگر قانون بقای جریان در شبکه توزیع اقلام امدادی است. و تضمین می کند که کالا بدون منشا وارد یک گره نمی شود، و کالایی که وارد می شود یا به گره دیگری منتقل می شود و یا جوابگوی نیاز منطقه است. این معادله به مدل فرصت می دهد که ترکیب بهینه ای از تحویل چندبخشی را بررسی کند و موجب می شود مدل شبکه حمل و نقل واقعی را در نظر بگیرد. محدودیت (۳۱) مربوط به مقدار کالای حمل شده و تخصیص آن به وسیله

دارد و چنانچه ناحیه آسیب دیده گره i کالاهای مورد نیاز خود را از مرکز توزیع J دریافت کند، درایه مربوط به آن از این سطر مقدار یک می گیرد. در سطر دوم این ماتریس هم J ستون وجود دارد و چنانچه مرکز توزیع در گره J تاسیس شده باشد، J امین درایه از این سطر مقدار یک را به خود می گیرد. در سطر سوم K ستون وجود دارد و چنانچه وسیله نقلیه k استفاده شود، k امین درایه از این سطر مقدار یک می گیرد. سطر چهارم ماتریس I^*J^*K ستون دارد و درایه ijk از این سطر زمانی برابر با یک است که مسیر بین گره i تا j توسط وسیله نقلیه k ام پیموده شود. لازم به توضیح است که برای عملگر تقاطع در الگوریتم ژنتیک از عملگر تقاطع دو نقطه ای و برای عملگر جهش از عملگر جهش یک نقطه ای استفاده شده است.

یا «آرشیو» جهت ذخیره سازی پاسخ های موجه (نامغلوب) یافت شده است. با این حال، به دلیل محدودیت های حافظه محاسباتی، امکان گسترش نامحدود این آرشیو وجود ندارد؛ لذا تعبیه یک مکانیسم کنترلی برای مدیریت ظرفیت آرشیو ضروری است. از ترکیب این دو قابلیت (مدیریت آرشیو و کنترل ظرفیت) با توانمندی های جستجو، یک الگوریتم بهینه سازی هوشمند و کارآمد شکل می گیرد.

نحوه نمایش جواب

مطابق شکل (۱) در الگوریتم ژنتیک، برای نمایش جوابی شدنی از ماتریسی با 4 سطر استفاده شده که کلیه درایه های آن عدد صفر و یک هستند. در این شکل، در سطر اول ماتریس، J^*I ستون وجود

$j_1 i_1$	$j_1 i_2$	$j_1 i_3$	...	$j_1 i_l$	$j_2 i_1$	$j_2 i_2$	$j_2 i_3$	...	$j_2 i_l$	$j_j i_1$	...	$j_j i_l$
j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	...	...	...	...	...	...	j_{j-1}	j_j
k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	...	...	...	...	...	...	k_{k-1}	k_k
$j_1 i_1 k_1$	$j_1 i_1 k_2$	...	$j_1 i_1 k_k$	...	$j_1 i_2 k_k$	...	$j_1 i_3 k_k$	...	...	$j_j i_1 k_1$	...	$j_j i_1 k_k$

شکل ۱. نحوه نمایش جواب الگوریتم (NAGA-II)

۴-۳- الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) الگوریتمی فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که بر اساس ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ ها در زمان شکار است. الگوریتم گرگ خاکستری مبتنی بر جمعیت و دارای فرایندی ساده در تنظیمات است و قابلیت راحت تعمیم با مسائل با ابعاد بزرگ را داراست. در پیاده سازی این الگوریتم چهار نوع گرگ های خاکستری مانند آلفا، بتا، دلتا و گاما برای شبیه سازی سلسله مراتب رهبری استفاده شده است که با سه گام اصلی شکار شامل جستجو برای طعمه، محاصره و حمله به طعمه اجرا می شود. و ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ های خاکستری به صورت زیر می باشد.

گرگ های خاکستری در راس زنجیره غذایی هستند و زندگی اجتماعی دارند. تعداد هر گله ۵ تا ۱۲ راس می باشد و در هر گله چهار رتبه اصلی به شرح زیر وجود دارد. -گرگ های رهبر که گروه آلفا نامیده می شوند و می توانند مذکر یا مونث باشند.

-گرگ های بتا که به گرگ های آلفا در فرایند تصمیم گیری کمک می کنند و مستعد انتخاب شدن به جای آنها هستند.
-گرگ های دلتا که پایین تر از گرگ های بتا بوده و شامل گرگ های پیر، شکارچی ها و گرگ های مراقبت از نوزادان هستند.
-گرگ های امگا که پایین ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب و دارای کمترین حق نسبت به بقیه اعضای گروه هستند که در فرایند تصمیم گیری مشارکتی نداشته و بعد از همه غذا می خورند.
فرایند شکار گرگ های خاکستری شامل سه فاز اصلی (۱) مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن (۲) نزدیک شدن، احاطه کردن به دور شکار و گراه کردن آن تا زمانی که از ادامه حرکت باز بماند. (۳) حمله به شکار، می باشد.
الگوریتم گرگ خاکستری شامل پارامترهای $\omega, \gamma, \beta, \alpha$ می باشد. برای مدل کردن رفتار شکار گرگ ها به صورت ریاضی از روابط زیر استفاده می شود.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (33)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\delta, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\beta \quad (37)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (38)$$

بطور خلاصه، فرایند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی در الگوریتم (GWO) آغاز می‌شود. گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا احتمال شکار در طول دوره تکرار را برآورد می‌کنند. هر جواب پیشنهادی فاصله خود در طول دوره تکرار را برآورد می‌کند.

پارامتر a از ۲ به صفر کاهش پیدا می‌کند تا روند شناسایی را تقویت کند و به طعمه حمله نماید. مطابق شکل (۲) وقتی $|A| > 1$ باشد، جواب‌های نامزد شده واگرا می‌شوند و زمانی که $|A| < 1$ باشد، جواب‌ها همگرا می‌شوند.

که t نشان دهنده تکرار جریان، A و C ضرایب بردار، \vec{X}_p بردار جایگاه شکار و \vec{X} بردار جایگاه گرگ‌های خاکستری است. بردارهای A و C از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (34)$$

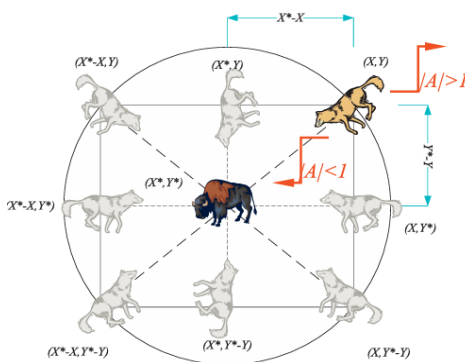
$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (35)$$

درایه های \vec{a} به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد و \vec{r}_1 و \vec{r}_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0,1]$ هستند.

در نهایت، پروژه شکار و تغییر جایگاه‌های گرگ‌ها برای رسیدن به شکار در نقطه بهینه به طریق روابط زیر مدل سازی می‌شود.

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}| \quad (36)$$

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}|$$



شکل ۲. مکانیسم به روزرسانی موقعیت عامل‌های جستجو و تأثیرات A بر آن (Mirjalili et al., 2016).

-جواب جدید حداقل یکی از اعضای آرشیو را مغلوب می‌کند. در این صورت پاسخ‌های مغلوب شده از آرشیو حذف شده و جواب جدید به آرشیو افزوده می‌شود.

-اگر جواب جدید و جواب‌های موجود در آرشیو هیچ کدام موفق به غلبه بر دیگری نشوند، جواب جدید وارد آرشیو می‌شود.

-اگر ظرفیت آرشیو تکمیل باشد، فضای جواب تمامی جواب‌ها دوباره بررسی شده و جواب با بیشترین فاصله ازدحامی حذف می‌شود. این کار باعث می‌شود گوناگونی جواب‌های جنبه پارتوی نهایی افزایش می‌یابد.

شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چند هدفه در شکل (۳) ارائه شده است (Mirjalili et al., 2016).

جهت تشکیل مرز پارتوی الگوریتم MOGWO آرشیوی از پاسخ‌ها تشکیل می‌شود. این آرشیو عهده دار نگهداری پاسخ‌های پارتوی نامغلوب است. بنابراین آرشیو همواره تعداد مشخصی از پاسخ‌های پارتو را نگهداری کرده و در مواقع لزوم آنها را با جواب‌های بهتر جایگزین می‌کند. در طول اجرای الگوریتم جواب‌های نامغلوب تولید شده با پاسخ‌های موجود در آرشیو مقایسه می‌شوند.

در این صورت یکی از حالت‌های زیر اتفاق می‌افتد.

-پاسخ جدید توسط حداقل یکی از اعضای آرشیو مغلوب می‌شود. در این حالت جواب جدید اجازه ورود به آرشیو را نخواهد یافت.

```

Initialize the grey wolf population  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Initialize a, A, and C
Calculate the objective values for each search agent
Find the non-dominated solutions and initialize the archive with them  $X_\alpha = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
Exclude alpha from the archive temporarily to avoid selecting the same leader  $X_\beta = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
Exclude beta from the archive temporarily to avoid selecting the same leader  $X_\delta = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
Add back alpha and beta to the archive
t=1;
while (t < Max number of iterations)
    for each search agent
        Update the position of the current search agent by equations (3.5)-(3.11)
    end for
    Update a, A, and C
    Calculate the objective values of all search agents
    Find the non-dominated solutions
    Update the archive with respect to the obtained non-dominated solutions
    If the archive is full
        Run the grid mechanism to omit one of the current archive members
        Add the new solution to the archive
    end if
    If any of the new added solutions to the archive is located outside the hypercubes
        Update the grids to cover the new solution(s)
    end if
     $X_\alpha = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
    Exclude alpha from the archive temporarily to avoid selecting the same leader  $X_\beta = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
    Exclude beta from the archive temporarily to avoid selecting the same leader  $X_\delta = \text{SelectLeader}(\text{archive})$ 
    Add back alpha and beta to the archive
    t=t+1
end while
return archive

```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چند هدفه

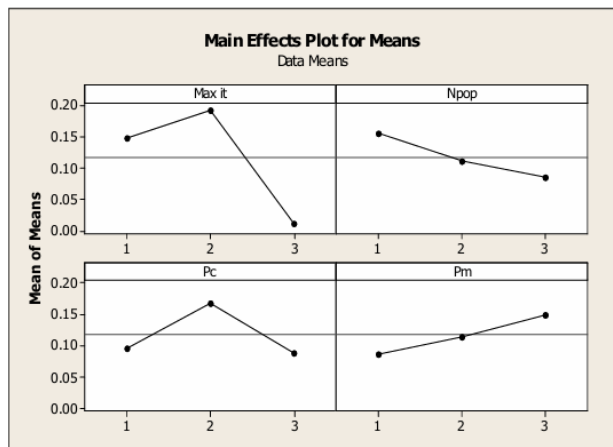
تنظیم پارامتر الگوریتم فراابتکاری با روش تاگوچی

ها را انجام داده و با هدف پیدا کردن بهترین ترکیب پارامترها، آزمایش‌ها تحلیل می‌شود. برای هر فاکتور سه سطح مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

در روش تاگوچی، ابتدا باید فاکتورهای مناسب را شناسایی و سپس سطوح هر یک از فاکتورها را انتخاب و در ادامه باید طرح آزمایش مناسب را برای این فاکتورهای کنترل مشخص شود. سپس آزمایش

جدول ۱. سطوح پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای NSGA-II به روش تاگوچی

پارامتر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
حداکثر تعداد تکرار	Max it	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
تعداد جمعیت	Npop	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
نرخ ترکیب	Pc	۰,۴	۰,۶	۰,۸
نرخ جهش	Pm	۰,۴	۰,۶	۰,۸



شکل ۵. نمودار متوسط میانگین ها در الگوریتم NSGA-II

۵- مطالعه موردی

شهر تهران از نظر زمین لرزه جزء مناطق پر زیان (۸ تا ۱۰ درجه مرکالی) به‌شمار می‌آید. در این پژوهش مدل پیشنهادی، برای شهر تهران منطقه ۱ امتحان می‌گردد. علت انتخاب این منطقه حساس بودن آن از لحاظ تراکم جمعیت، وجود بسیاری از مدارس و سازمان های دولتی و ... می‌باشد. از جمله وجود گسل شمال تهران، که توان وقوع زلزله‌های مخرب تا ۷/۴ ریشتر به گزارش پژوهشکده زلزله را دارد و در صورت فعال شدن تلفات بسیار زیادی را به دنبال خواهد داشت.

گسل شمال تهران، با حدود ۹۰ کیلومتر طول، در حاشیه دامنه جنوبی البرز، از ناحیه روستای کن و امامزاده داوود در شمال غرب تهران آغاز شده، در امتداد شرقی با عبور از نواحی ولنجک، اوین، زعفرانیه، نیاوران و دارآباد تا منطق لشکرک و حتی شمال شرق جاده فشم و اطراف رودخانه جاجرود گسترده می‌شود (Ataei, Sadeghian and Hamed, 2020).

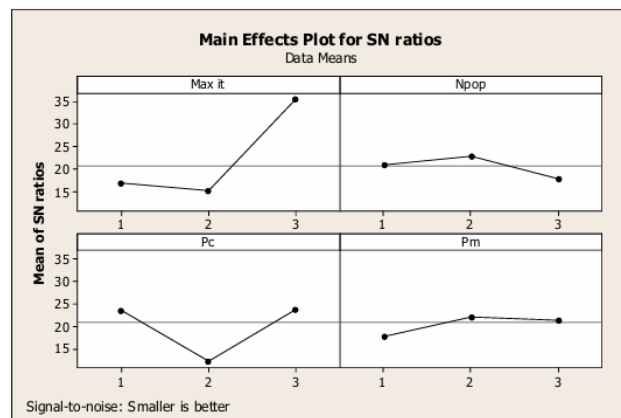
از آنجا که ساختار بافت‌های فرسوده شهری ناپایدار می‌باشد و این بافت‌ها آسیب‌پذیری بیشتری در برابر حوادث طبیعی دارند، فرض کرده‌ایم که این بافت‌ها، مناطق آسیب‌دیده و نقاط تقاضا را تشکیل می‌دهند. این مناطق در جدول (۳) آمده‌اند. جدول (۴) مجموعه نقاط بالقوه برای احداث مراکز توزیع کالاهای امدادی و جدول (۵) هزینه احداث مراکز توزیع را نشان می‌دهد.

مطابق جدول (۲) با مقایسه حداقل و حداکثر مقادیر بدست آمده در الگوریتم NSGA-II برای شاخص SN، تاثیر قابل توجه پارامتر حداکثر تعداد تکرار در بهبود فرایند حل الگوریتم مشهود است. پارامترهای نرخ ترکیب، تعداد جمعیت و نرخ جهش به ترتیب در رتبه های بعدی تاثیر گذار قرار دارند.

جدول ۲. نتایج تحلیل تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

سطح	Max it	Npop	Pc	Pm
۱	۰,۱۴۵۲۶	۰,۱۵۳۱۵	۰,۰۹۲۱۲	۰,۰۸۵۲۳
۲	۰,۱۸۹۹۵	۰,۱۱۰۲۰	۰,۱۷۰۱۰	۰,۱۰۹۱۲
۳	۰,۰۱۰۲۹	۰,۰۷۹۵۶	۰,۰۸۹۵۰	۰,۱۴۵۵۰
تفاوت	۰,۱۷۹۶۶	۰,۰۷۳۵۹	۰,۰۸۰۶	۰,۰۶۰۲۷
رتبه	۱	۳	۲	۴

شکل های (۴) و (۵) به ترتیب نمودار متوسط نسبت S/N و متوسط میانگین را برای الگوریتم NSGA-II نشان می‌دهد. بیشترین مقدار شاخص SN، ملاک انتخاب مقادیر پارامترها می‌باشد. مطابق شکل ۵، در صورتیکه حداکثر تعداد تکرار در سطح ۲، تعداد جمعیت در سطح ۱، نرخ ترکیب در سطح ۲ و نرخ جهش در سطح ۳ قرار بگیرد، الگوریتم NSGA-II بیشترین کارایی را خواهد داشت.



شکل ۴. نمودار متوسط نسبت S/N در الگوریتم NSGA-II

جدول ۳. مجموعه مکان‌های آسیب دیده

مناطق آسیب دیده	ناحیه	ردیف	مناطق آسیب دیده	ناحیه	ردیف
کاشانک	۵	d ₁₂	پاسداران	۱	d ₁
اقدسیه		d ₁₃	کامرانیه		d ₂
باغ فردوس	۷	d ₁₄	سعدآباد	۲	d ₃
تجریش		d ₁₅	ولنجک		d ₄
قیطریه		d ₁₆	درکه		d ₅
اندرزگو	۸	d ₁₇	گلابدره	۳	d ₆
اراج	۹	d ₁₈	دربند		d ₇
ازگل		d ₁₉	جماران	۴	d ₈
		جمشیدیه	d ₉		
		حصارک	d ₁₀		
		دزاشیب	d ₁₁		

جدول ۴. مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع امداد

ردیف	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
نام ناحیه	۱	۲	۳	۳	۴	۵	۷	۸	۹	۹
مراکز توزیع	فرمانیه	ولنجک	باغشاطر	گلابدره	جماران	آجودانیه	تجریش	اقدسیه	اراج	ازگل

جدول ۵. هزینه‌های مربوط به تاسیس مراکز توزیع امداد

مراکز توزیع	اندازه	هزینه احداث ($10^3 \$$)
J_1	کوچک	۳۰۰
J_2	متوسط	۳۵۰
J_3	بزرگ	۴۲۰

۶- نتایج محاسباتی

ابعاد مسئله زمان حل در دقیق به شدت و بصورت نمایی افزایش می‌یابد، این در حالی است که سرعت زمان حل در الگوریتم‌های ژنتیک نامغلوب کمتر می‌باشد، شکل (۶) این مورد را نشان می‌دهد. همچنین درصد خطای محاسبه در الگوریتم ژنتیک نامغلوب بسیار کم می‌باشد. بنابراین می‌توان به رویکرد حل پیشنهادی جهت حل مسئله برای مطالعه موردی اعتماد کرد.

جدول (۶) نتایج مقایسه رویکرد حل دقیق با الگوریتم‌های ژنتیک نامغلوب و گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد مسئله در ابعاد کوچک و متوسط با یکدیگر مقایسه شده است. هر چه مسئله از ابعاد کوچک به متوسط پیش می‌رود تعداد مراکز توزیع و مراکز آسیب‌دیده بیشتر می‌گردد. باتوجه به سه هدفه بودن مدل پیشنهادی، مقادیر نقاط پارتوی سه هدف بترتیب نشان داده شده است. میانگین زمان‌های حل بیانگر آن است که با افزایش

فاصله از نقطه ایده‌آل (MID)

باشد کیفیت جواب‌ها بهتر خواهد بود. با توجه به مطالب گفته شده نحوه محاسبه عملکرد مجموعه جواب‌های پارتو بصورت رابطه (۳۹) خواهد بود (Tavana et al., 2018).

این معیار سنجشی از نزدیکی جواب‌های پارتو به نقطه ایده‌آل ($f1-Best$ و $f2-Best$) ارائه می‌کند. هرچه مقدار این فاصله کمتر

جدول ۶. مقایسه حل دقیق و الگوریتم های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و گرگ خاکستری

ژنتیک مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)				گرگ خاکستری چند هدفه (MOGWO)				روش حل دقیق (ES)				شماره مسئله	ابعاد
زمان (s)	تابع ۳ (h)	تابع ۲ (h)	تابع ۱ (h)	زمان (s)	تابع ۳ (h)	تابع ۲ (h)	تابع ۱ (h)	زمان (s)	تابع ۳ (h)	تابع ۲ (h)	تابع ۱ (h)		
۱۰	۱۴۵	۱/۵۲	۲۰۰/۱/۲	۱۰	۱۴۶/۵	۱/۵۲	۲۲۵/۶	۱۰	۱۴۵/۵	۱/۵۲	۲۲۵/۶	۱	کوچک
۵	۱۵۷/۱	۱/۴۹	۲۰۰/۵/۸	۷	۱۵۹/۷	۱/۵۱	۲۳۹/۳	۳۳	۱۵۶/۵	۱/۴۷	۲۳۹/۲	۲	
۱۳	۱۶۰/۵	۱/۴۰	۲۰۳/۰/۳	۲۰	۱۶۸/۴	۱/۴۵	۲۶۸/۵	۶۸	۱۶۰/۸	۱/۴۱	۲۶۷/۰	۳	
۲۰	۱۷۹/۲	۱/۲۶	۲۰۵/۵/۰	۲۶	۱۸۳/۵	۱/۲۸	۲۹۱/۶	۱۲۳	۱۸۸/۱	۱/۲۶	۲۹۱/۰	۴	
۲۵	۲۰۰/۲	۰/۹۸	۴۰۷/۱/۲	۳۲	۲۰۱/۹	۱/۰۲	۵۶۵/۶	۴۵۲	۱۹۵/۸	۰/۹۵	۵۶۵/۲۰	۵	
۳۱	۱۹۷/۳	۰/۹۳	۵۹۹/۱/۶	۳۸	۱۹۷/۶	۰/۹۳	۵۹۹/۵	۸۰۲	۱۹۷/۳	۰/۹۳	۵۵۹/۰/۹	۶	متوسط
۳۵	۲۰۰/۱	۰/۹۹	۶۱۳/۸/۱	۴۱	۲۰۰/۹	۱/۰۱	۶۱۴/۵	۱۵۰۳	۱۹۹/۵	۰/۹۸	۶۱۳/۵/۵	۷	
۳۹	۲۱۲/۰/۰	۰/۸۹	۷۵۴/۵/۲	۴۹	۲۱۳/۵	۰/۹۱	۷۵۵/۶	۳۲۳۵	۲۱۰/۵	۰/۸۹	۷۵۳/۵/۵	۸	
۴۳	۲۲۰/۵	۰/۸۳	۸۱۲/۵/۲	۵۱	۲۲۱/۱	۰/۸۷	۸۱۴۰/۶	۵۱۲۳	۲۱۹/۹	۰/۷۵	۸۱۲۳/۷	۹	
۵۵	۲۲۷/۳	۰/۶۴	۹۱۱/۷/۲	۶۳	۲۲۹/۰	۰/۶۲	۹۱۲/۹	۸۶۱۲	۲۲۵/۸	۰/۵۹	۹۱۱۳/۲	۱۰	
۲۷,۶				۳۳,۷				۱۹۹۶					میانگین

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{3i} - f_3^{best}}{f_{3,total}^{max} - f_{3,total}^{min}}\right)^2}}{n} \quad (39)$$

مناسب الگوریتم را نشان می‌دهد و رابطه (۴۰) این رابطه را نشان می‌دهد (Tavana et al., 2018).

جدول (۷) نتایج ۲۰ نقطه پارتو را برای مطالعه موردی نشان می‌دهد. همانطور که در جدول نشان داده شده است میانگین فاصله از نقطه ایده آل برابر ۴/۳۰ می‌باشد. همچنین میانگین مقدار فاصله گذاری برابر ۰/۰۳۸ می‌باشد. مقادیر حاصله بیانگر عملکرد مناسب مدل پیشنهادی هست.

در شکل (۷) نیز مقادیر پارتوی حاصله نیز، حل را نشان می‌دهد. باتوجه به سه هدفه بودن مدل پیشنهادی این شکل بصورت سه بعدی نمایش داده شده است.

در این رابطه که n تعداد جواب‌های غیر مغلوب بدست آمده‌است و منظور از f_{ki} مقدار k امین تابع هدف در بردار جواب پارتو نام است.

فاصله گذاری (SM)

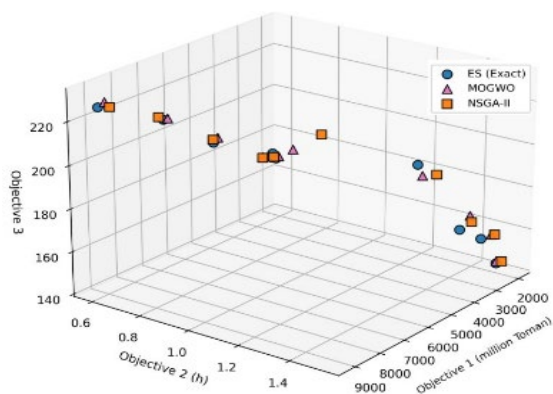
این معیار یکنواختی پهنای مجموعه جواب‌های نامغلوب را تعیین می‌نماید. که در آن d_i فاصله اقلیدسی بین جواب‌های پشت سرهم در مجموعه جواب‌های نامغلوب بدست آمده می‌باشد و \bar{d} متوسط این فاصله‌ها می‌باشد. بدیهی است کمینه بودن این معیار عملکرد

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |d_i - \bar{d}|}{(n-1)\bar{d}}$$

جدول ۷. مقادیر متوسط شاخص‌های عملکردی در مطالعه موردی برای سه الگوریتم

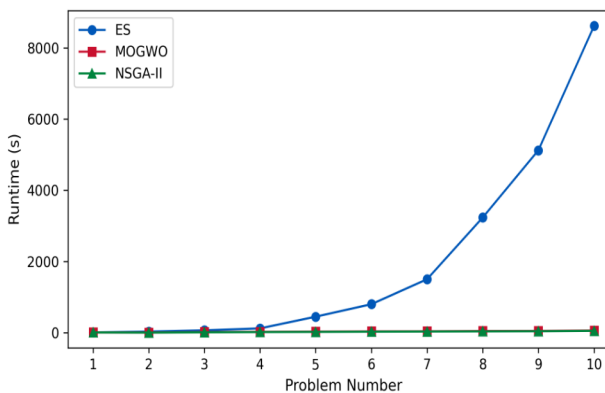
SM			MID			شاخص
NSGA-II	MOGWO	ES	NSGA-II	MOGWO	ES	مساله/روش
۰/۹۷	۱/۰۱	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۷۳	۱
۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۷۹	۱/۱۲	۰/۸۸	۰/۹۵	۲
۱/۱۱	۱/۱۷	۰/۹۵	۱/۲۱	۰/۹۵	۰/۹۹	۳
۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۹۸	۱/۱۵	۰/۸۹	۱/۲۸	۴
۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۱۱	۱/۳۳	۱/۱۳	۰/۹۶	۵
۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۲۶	۱/۳۰	۱/۱۰	۱/۳۲	۶
۰/۹۲	۰/۹۸	۱/۲۵	۱/۴۲	۱/۲۵	۱/۳۵	۷
۱/۸۳	۱/۹۵	۱/۳۲	۱/۶۳	۱/۴۵	۱/۱۲	۸
۲/۲۵	۲/۳۲	۱/۳۸	۱/۷۲	۱/۴۸	۱/۳۶	۹
۲/۵۸	۲/۷۱	۱/۴۲	۱/۸۲	۱/۵۲	۱/۳۹	۱۰

داشته در نظر گرفته شده و نتایج آن برای سناریوی سوم گزارش شده است.



۷. نمایش نقاط پارتو در مطالعه موردی

باتوجه به نظر خبرگان از بین اهداف تعیین شده در مقاله، رضایت افراد آسیب‌دیده مهم‌تر تشخیص داده شده است. بنابراین از بین نقاط پارتو، نقطه‌ای که بیشترین مقدار رضایت فرد آسیب‌دیده را



شکل ۶. زمان اجرای روش‌های حل پیشنهادی

۷- نتیجه گیری

این مقاله یک مدل مکانیابی، تخصیص و مسیریابی باز چند هدفه با تحویل چند بخشی برای توزیع امداد با عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفر و رضایت مشتری در شرایط بحران ارائه می‌کند. نوآوری‌های اصلی مقاله شامل در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان سفر، وجود چند وسیله نقلیه و چند مرکز توزیع، قابلیت تحویل چند بخشی و همچنین رضایت افراد آسیب دیده به صورت یکپارچه می‌باشد که همگی برای افزایش دقت و انعطاف‌پذیری عملیات امدادرسانی پس از بحران ضروری هستند.

نتایج محاسباتی مقاله نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است مجموعه‌ای از نقاط پارتو معتبر را تولید کند و از نظر شاخص‌های ارزیابی عملکرد، نتایج مناسبی به دست آورد. به ویژه، شاخص‌های کیفیت جبهه پارتو و زمان محاسباتی نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی از نظر کارایی، توان رقابت با روش دقیق را ندارند، ولی در مسائل بزرگ‌تر برتری محسوس دارند.

همچنین بر اساس نظر خبرگان، رضایت افراد آسیب‌دیده به‌عنوان مهم‌ترین هدف تصمیم‌گیری تعیین شده و در نتیجه، راه‌حلی که بیشترین میزان رضایت را فراهم می‌کند برای سناریوی سوم انتخاب شده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل نه تنها از نظر ریاضی قابل اتکاست، بلکه از منظر انسانی و مدیریتی نیز با اولویت‌های واقعی عملیات امدادی هم‌راستا می‌باشد.

در مجموع، مقاله نشان می‌دهد که استفاده از مدل چندهدفه پیشنهادی می‌تواند به بهبود تخصیص منابع، کاهش زمان واکنش، و افزایش اثربخشی امدادرسانی پس از بحران منجر شود و ابزاری مناسب برای تصمیم‌گیری در محیط‌های ناپایدار و پرریسک باشد.

برای مطالعات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

-گسترش مدل به حالت چند دوره‌ای برای در نظر گرفتن امدادرسانی در بازه‌های زمانی مختلف.

-در نظر گرفتن خرابی یا انسداد مسیرها در اثر پس‌لرزه‌ها، سیلاب یا موانع فیزیکی.

-مدلسازی اولویت افراد آسیب‌دیده بر اساس شدت آسیب، سن، یا موقعیت جغرافیایی.

-ترکیب تصمیمات مکان‌یابی با مدیریت موجودی امدادی در مراکز توزیع.

۸- مراجع

-بایگان، بهروز، مهربان، احمد، یوسفی نژاد عطاری، مهدی و دوستی دیلمی، محمد جعفر (۱۴۰۳). مدل سازی مساله مکان یابی- مسیریابی لجستیک امدادی با در نظر گرفتن انواع افراد تحت شرایط عدم قطعیت. *فصلنامه مدیریت زنجیره تامین*، دوره ۲۶، شماره ۸۲، ۵۵-۶۶.

-بیگی، سکینه، و حسین‌زاده، الهام. (۱۳۹۸). یک مدلسازی ریاضی مکانیابی- مسیریابی در شرایط بحرانی با در نظر گرفتن امنیت مسیر. *آینده پژوهی دفاهی*، دوره ۴، شماره ۱۳، ۸۹-۱۱۰.

-جعفری، عزیزالله و صادقی سروستانی، آیلین (۱۳۹۳). مدلسازی مساله مکانیابی- مسیریابی باز با تحویل چند بخشی و حل آن با استفاده از الگوریتم انجماد تدریجی. *پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، دوره ۱، شماره ۳، ۶۱-۷۷.

-خورسی دامغانی، ملیحه، چهارسوقی، سید کمال، حسین زاده کاشان، علی، و بزرگی امیری، علی (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه‌سازی استوار پویا برای مساله مسیریابی-زمانبندی در لجستیک بشردوستانه و حل آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری گروه‌بندی (مطالعه موردی: زلزله تهران). *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، دوره ۱۲، شماره ۴، ۸۵۳-۸۳۳.

-عطائی، اسفندیار، صادقیان، رامین و حامدی، مریم (۱۳۹۹). ارائه یک مدل چندهدفه یکپارچه برای مکانیابی- مسیریابی و موجودی تسهیلات امدادی با در نظر گرفتن چند مد حمل و نقل و تور پوششی. *پژوهشنامه حمل و نقل*، دوره ۲، شماره ۶۳، ۶۳-۴۹.

-گل محمدی، سجاد، و ماهوتچی، مسعود (۱۳۹۶). توسعه یک مدل تصادفی برای ایجاد یک شبکه امدادرسانی پس از بلایای طبیعی (مطالعه موردی: زلزله احتمالی در شهر تهران). *نشریه تخصصی مهندسی صنایع*، دوره ۵۱، شماره ۱۱، ۴۳۳-۴۱۷.

-Bozorgi-Amiri, A., & Khorsi, M. (2016). A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, 1633-1648.

-Cheng, C., Qi, M., Zhang, Y., and Rousseau, L. (2018). A two-stage robust approach for the reliable logistics network design problem.

- Hosseini-Motlagh, S.M., Ghatreh-Samani, M.R. and Cheraghi, S., (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 70, Article 100725.
- Imani, A., Karimi, H., & Deiranlou, M. (2024). The bi-objective multi-depot split delivery location routing problems under uncertain conditions. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 11, Article 2322512.
- Maghfiroh, M. and Hanaoka, S., (2020). Multi-modal relief distribution model for disaster response operations. *Progress in Disaster Science*, Vol.6, 1-12.
- Mavrotas, G., (2009). Effective implementation of the constraint method in multi-objective mathematical programming problems”, *Applied mathematics and computation*, Vol. 213, 455465.
- Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., & Coelho, L. D. S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, Vol.47, 106-119.
- Noham R., and Tzur M., (2018). Designing humanitarian supply chains by incorporating actual post-disaster decisions. *European Journal of Operational Research*, Vol. 265, No. 3, 1064-1077.
- Okan, Ö. and Ekici, A., (2018). Managing platelet supply through improved routing of blood collection vehicles. *Computers & Operations Research*, Vol. 98, 113-126.
- Perl, J., Daskin, M.S., (1985). A warehouse location–routing problem. *Transp. Res. B 19B*, 381–396.
- Parayoga, R. and Asih, A.M.S., (2022). Multi-objective Multi-Compartment Split Delivery Location Routing Problem with Time Windows. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*.
doi:10.1109/IEEM55944.2022.9989684
- Ramezani, R. and Behboodi, Z., (2017). Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 104, 69-82.
- Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 111, 185–202.
- Chang, K. H., Chiang, Y. C., and Chang, T. Y. (2024). Simultaneous location and vehicle fleet sizing of relief goods distribution centers and vehicle routing for post-disaster logistics. *Computers & Operations Research*, Vol. 161, Article 106404.
- Diabat, A., Jabbarzadeh, A. and Khosrojerdi, A., (2019). A perishable product supply chain network design problem with reliability and disruption considerations. *International Journal of Production Economics*, Vol. 212, 125-138.
- Davoodi, S.M.R. and Goli, A., (2019). An integrated disaster relief model based on covering tour using hybrid Benders decomposition and variable neighborhood search: Application in the Iranian context. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 130, 370-380.
- Dror, M., Laporte, G., Trudeau, P., (1994). Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Appl. Math*, Vol.50, 239–254.
- Davoodi, S.M.R. and Goli, A., (2019). An integrated disaster relief model based on covering tour using hybrid Benders decomposition and variable neighborhood search: Application in the Iranian context. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 130, 370-380.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGAI. *IEEE Transactions of Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, 182-197.
- Gunawan, A., Widjaja A.T., Vansteenwegen P., and Yu V.F., (2022). Two-phase Matheuristic for the vehicle routing problem with reverse cross-docking. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Vol.9, 915-945.
- Hansen, P.H., Hegedahl, B., Hjortkjaer, S., Obel, B., (1994). A heuristic solution to the warehouse location–routing problem. *Eur. J. Oper. Res*, Vol.76, 111–127.
- Hildebrandt, F.D., Thomas, B.W., Ulmer, M.W., (2023). Opportunities for reinforcement learning in stochastic dynamic vehicle routing. *Computers & Operations Research*, Vol.150, 60-71.
- Habibi, M., Paydar, M.M. and Asadi Gangraj, E., (2018). Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 55, 583-599.

Part E: Logistics and Transportation Review, Elsevier, Vol. 43(6), 673-686.

-Wang, Q., and Nie, X. (2022). A stochastic programming model for emergency supply planning considering transportation network mitigation and traffic congestion. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 79, 11-19.

-Wang, Y., Dong, Z. S., and Hu, S. (2021). A stochastic repositioning model for distribution of disaster supplies considering lateral transshipment. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 74, 9-30.

-Zhang, L., Yuan, N., Wang, J., Jizhao, L., (2025). Research on location-inventory-routing optimization of emergency logistics based on multiple reliability under uncertainty. Vol. 200, 8-26.

-Sun, C., Cheng, C., Wang, C., and Hsiao, P. (2020). Dynamic floating stations model for emergency medical services with a consideration of traffic data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol,9, No,6, 336-345.

-Eydi, A., and Dehnavi, Z. (2025). Multi-objective location-routing problem with decision-making about buying or renting vehicle. *Journal of Industrial and Management Optimization*, Vol. 21, 6044–6083.

-Tavana, M., Abtahi, A.R, Di Caprio, D., Hashemi, R. and Yousefi-Zenouz, R., (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 64, 21-37.

-Tzeng, G.H., Cheng, H.J., Huang, T.D., (2007). Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research*

Modeling and Solving the Open Location-Allocation-Routing Problem with Split Delivery under Demand Uncertainty and Customer Satisfaction in Crisis Conditions

*Esfandiyar Ataei, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering,
Payame Noor University, Tehran, Iran.*

E-mail: Esataei@pnu.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Effective solutions for the open location-allocation-routing problem in relief distribution during crises are of great importance for both logistics companies and governmental agencies. Therefore, rapid response to needs and the delivery of required items to affected areas are of very high priority due to the uncertainty in the severity of the crisis and the number of affected regions. This research investigates the multi-objective modeling of open location-allocation-routing in relief distribution with split deliveries after an earthquake in District 1 of Tehran County. The aim is to optimally determine the locations of relief centers, routing, and optimal allocation of the relief fleet, considering uncertainty in relief demand, arrival time to target points, relief fleet capacity, time windows and customer satisfaction in post-earthquake conditions. In this paper, a multi-objective model is considered with the objectives of minimizing costs, response time and increasing customer satisfaction. Given the NP-hard nature of this problem, the proposed mathematical model was implemented using the e-constraint method with CPLEX 10.1 software for small and medium sized instances, and two algorithms the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) and the Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO) were used for large-scale instances and their performance was compared with each other based on solution improvement. The results indicate the efficiency of the NSGA-II and MOGWO algorithms and the superiority of the NSGA-II algorithm over the MOGWO algorithm, meaning that in most test problems, the NSGA-II algorithm provides better solutions in a shorter time. The results also show that considering the assumption of split delivery of customer demands leads to a reduction in the final cost, and with an increase in demand, the number of established distribution centers increases.

Keywords: Routing, Location, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, Customer Satisfaction, Time Window