

# ارائه‌ی مدل یک پارچه‌ی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص همزمان برای عملیات امداد و نجات در فاز پاسخ به فاجعه

فاطمه صوحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مه‌دی حدیری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

علی بزرگی امیری\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)  
دوره‌ی ۳۳-۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۱۰۷-۱۱۵

هر ساله به‌منظور کاهش تلفات و خسارات حاصل از وقوع فجایع، عملیات امدادی مختلفی باید انجام گیرد. برای تحقق این اهداف، یک مدل جدید برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط از تصمیمات مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص همزمان برای عملیات تخلیه‌ی افراد سالم به پناهگاه‌ها و تأمین اقلام امدادی مورد نیاز بازماندگان ارائه شده است. در این مدل امکان خدمت‌دهی به بازماندگان در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی تخلیه و امکان خدمت گرفتن از هر تأمین‌کننده توسط چندین وسیله‌ی توزیع در نظر گرفته شده است. همچنین محدودیت ظرفیت وسایل امدادی و ظرفیت پناهگاه‌ها لحاظ شده است.

هدف این مقاله کاهش کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کننده‌ها با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، یک مثال عددی با روش دقیق حل شده و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت‌های مختلف گزارش شده است.

واژگان کلیدی: تخلیه، تخصیص، مسیریابی و زمان‌بندی، امداد رسانی.

## ۱. مقدمه

افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها با هدف کمینه کردن حداکثر زمان اتمام کارها ارائه داد که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل چند دوره‌ی، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده است.<sup>[۱]</sup>

آبدلگاواد و آبدلگاوادی در سال ۲۰۱۱ یک مدل دو سطحی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص برای عملیات تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها با هدف کمینه‌سازی زمان حمل و نقل و زمان رسیدن وسایل ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده و امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک دوره‌ی، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند.<sup>[۲]</sup>

حامدی و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبارهای اقلام امدادی به پناهگاه‌ها با هدف کمینه کردن کل زمان خدمت‌دهی و هزینه عدم قابلیت اطمینان ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک دوره‌ی، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند.<sup>[۳]</sup>

وقوع حوادث غیرمترقبه و سوانح طبیعی، معمولاً با خسارات جانی و مالی زیادی همراه بوده است. پس از وقوع فاجعه یکی از مهم‌ترین اقدامات حیاتی، تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها و تأمین اقلام امدادی برای آن‌ها است. تصمیمات مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص در مراحل امداد رسانی به‌عنوان حوزه‌ی جدیدی در تحقیقات شناخته می‌شوند و در ادبیات کمتر به بررسی همزمان این مسائل مخصوصاً در فاز پاسخ به فاجعه پرداخته شده است. در ادامه مطالعات انجام شده در این زمینه بیان شده‌اند.

انگیوایوو و همکاران در سال ۲۰۱۰، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه کردن کل زمان رسیدن وسایل ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱]</sup>

بیش در سال ۲۰۱۱، یک مدل دو سطحی مسیریابی و تخصیص برای تخلیه‌ی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۶/۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۳۹۵/۲/۶

ریوریو و لاپورته در سال ۲۰۱۲، یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه کردن کل زمان رسیدن وسایل ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۵]</sup>

وهلگمیوس و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه‌کردن کل زمان رسیدن وسایل و کل تعداد وسایل ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسئله‌ها به شکل چنددوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۶]</sup>

وکس و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی برای عملیات جست‌وجو و نجات در نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه‌کردن کل زمان حمل و نقل ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک واحد امداد و نجات در نظر گرفته شده است و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۷]</sup>

گان و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۸]</sup>

کی و فنگ در سال ۲۰۱۳، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه‌کردن کل زمان رسیدن وسایل ارايه دادند که در آن امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده را فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته‌اند و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۹]</sup>

ازسویدان و سیاهیگلو در سال ۲۰۱۳، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه‌کردن کل زمان رسیدن وسایل ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۰]</sup>

لی و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک مدل سه‌سطحی زمان‌بندی برای انجام عملیات درمانی در بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال و تقسیم منابع به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، با هدف کمینه‌کردن کل هزینه‌ی دیرکرد کارها ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال در نظر گرفته شده است و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی، با ظرفیت نامحدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۱]</sup>

لی و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک مدل سه‌سطحی زمان‌بندی برای توزیع تجهیزات پزشکی به بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال و با هدف کمینه‌کردن کل هزینه‌ی دیرکرد کارها ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال در نظر گرفته و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی، با ظرفیت محدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

پرامیودیتا و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل دوسطحی مسیریابی، مکان‌یابی و تخصیص برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده به دپوهای جمع‌آوری آوار با هدف کمینه کردن کل هزینه‌ی راه‌اندازی و هزینه‌ی حمل و نقل ارايه دادند که

امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله و امکان خدمت گرفتن از هر دپو توسط چندین وسیله، در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک‌دوره‌ی، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۳]</sup>

ازدومارو و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده با هدف پیشینه‌کردن دسترسی به راه‌ها و کمینه‌کردن حداکثر زمان اتمام کارها ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده و مسئله را به شکل چنددوره‌ی، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۴]</sup>

گان و همکاران نیز در سال ۲۰۱۴، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسئله را به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۵]</sup>

وکس و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی برای عملیات جست‌وجو و نجات در نقاط حادثه‌دیده با هدف کمینه‌کردن کل زمان حمل و نقل ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک واحد امداد و نجات در نظر گرفته شده و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۶]</sup>

کنهی و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از انبارها به نقاط حادثه‌دیده، با هدف کمینه‌کردن کل هزینه‌ی راه‌اندازی، هزینه‌ی حمل و نقل و هزینه‌ی عدم برآورد تقاضا ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده و مسئله‌ها به شکل تک‌دوره‌ی، غیر قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۷]</sup>

تالاریکو و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک مدل تک‌سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای انتقال مصدومان از مناطق حادثه‌دیده به بیمارستان‌ها با هدف کمینه‌کردن زمان اتمام کارها ارايه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر منطقه‌ی آسیب‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده و مسئله را به شکل تک‌دوره‌ی، غیر قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند.<sup>[۱۸]</sup>

در نوشتار حاضر یک مدل جدید یک‌پارچه‌ی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص همزمان برای عملیات تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها و توزیع اقلام امدادی برای آن‌ها معرفی شده است. در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله و انبار چندگانه برای شروع حرکت وسایل تخلیه در نظر گرفته شده است. در فرایند توزیع اقلام امدادی امکان خدمت گرفتن از هر تأمین‌کننده توسط چندین وسیله و انبار چندگانه<sup>۱</sup> برای شروع حرکت وسایل توزیع<sup>۲</sup> اقلام امدادی معرفی شده است.

برای این که مسئله به مسئله‌ی دنیای واقعی نزدیک‌تر شود محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل امدادی، محدودیت ظرفیت پناهگاه‌ها و محدودیت پنجره‌های زمانی برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کننده‌ها ارايه شده است.

در ادامه، بخش دوم به تشریح مسئله اختصاص یافته و در بخش سوم به مدل‌سازی ریاضی مسئله، معرفی مثال عددی خواهیم پرداخت. نتایج حل مدل در بخش چهارم، نتایج تحلیل حساسیت در بخش پنجم، و نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی در بخش ششم ارايه شده است.

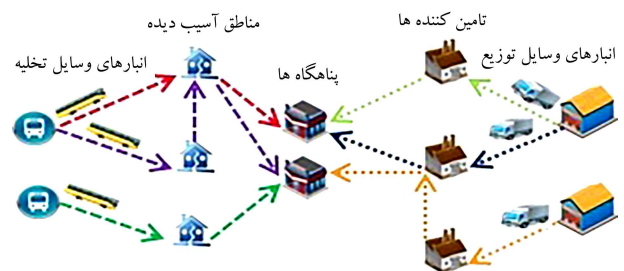
## ۲. تشریح مسئله

پس از وقوع فاجعه، از جمله مهم ترین اقدامات حیاتی در فاز پاسخ گویی، تخلیه ی افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه ها و تأمین نیازهای اساسی آن هاست. با توجه به بافت هر منطقه و شدت وقوع فاجعه، تعداد افرادی که در هر منطقه ی حادثه دیده زنده می مانند و نیاز به خدمات درمانی ندارند متفاوت است و به دلیل تهدید زیرساخت ها در مناطق آسیب دیده، عملیات تخلیه ی افراد باید در کم ترین زمان ممکن انجام شود.

شبکه ی نشان داده شده در شکل ۱ بیانگر تخلیه ی اضطراری افراد سالم به پناهگاه ها و تأمین نیازهای اساسی آن ها در ساعات اولیه ی وقوع فاجعه است. انتقال افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه ها بدین صورت است که هر وسیله ی امدادی مانند اتوبوس، مینی بوس، ماشین های سواری و... از انبار وسایل حرکت خود را آغاز کرده و سپس با توجه به ظرفیت وسیله، ظرفیت پناهگاه ها و پنجره های زمانی مرتبط با نقاط حادثه دیده و پناهگاه ها، بهترین مسیر را برای انتقال افراد سالم از مناطق آسیب دیده به یکی از پناهگاه ها انتخاب می کند. بنابراین امکان ارائه ی خدمات به هر منطقه ی حادثه دیده توسط چندین وسیله ی حمل و نقل امکان پذیر است. انتقال اقلام امدادی از مراکز مدیریت بحران به پناهگاه ها بدین صورت است که هر وسیله ی امدادی مانند کامیون، تریلی و... از انبار وسایل حرکت خود را آغاز کرده و سپس با در نظر گرفتن ظرفیت وسیله ی حمل و نقل، میزان موجودی اقلام در مراکز تأمین، میزان احتیاجات پناهگاه ها و پنجره های زمانی رسیدن کالاها به پناهگاه ها، به بارگیری اقلام امدادی از تأمین کننده ها پرداخته و بهترین مسیر را برای انتقال این کالاها به یکی از پناهگاه ها انتخاب می کند. بنابراین امکان خدمت گرفتن از هر تأمین کننده توسط چندین وسیله ی حمل و نقل امکان پذیر است.

با توجه به شبکه ی معرفی شده، عمده فرضیات مسئله عبارت اند از:

۱. تعداد و مکان انبارهای وسایل تخلیه، نقاط حادثه دیده، پناهگاه ها، تأمین کننده ها و انبارهای وسایل توزیع شناخته شده است.
۲. مقدار تقاضای نقاط حادثه دیده و عرضی تأمین کننده ها، شناخته شده است.
۳. پنجره ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه دیده و پناهگاه ها در فرایند تخلیه ی افراد سالم در نظر گرفته شده است.
۴. پنجره ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به تأمین کننده ها و پناهگاه ها در فرایند توزیع اقلام امدادی در نظر گرفته شده است.
۵. امکان ارائه ی خدمات به هر نقطه ی حادثه دیده توسط چندین وسیله در فرایند تخلیه ی افراد سالم در نظر گرفته شده است.
۶. امکان خدمت گرفتن از هر تأمین کننده توسط چندین وسیله در فرایند توزیع اقلام امدادی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شبکه ی تخلیه ی اضطراری و تأمین اقلام امدادی.

۷. در فرایند تخلیه ی افراد سالم چندین وسیله ی ناهمگن و با ظرفیت محدود در نظر گرفته شده است.
۸. در فرایند توزیع اقلام امدادی، چندین وسیله ی ناهمگن و با ظرفیت محدود در نظر گرفته شده است.
۹. در فرایند تخلیه ی افراد سالم هر وسیله، در صورت اعزام، از انباری که در آن مستقر است حرکت خود را شروع می کند اما پایان حرکت آن نامشخص و فقط یکی از پناهگاه ها در نظر گرفته شده است.
۱۰. در فرایند توزیع اقلام امدادی هر وسیله، در صورت اعزام، از انباری که در آن مستقر است حرکت خود را شروع می کند اما پایان حرکت آن نامشخص و فقط یکی از پناهگاه ها در نظر گرفته شده است.
۱۱. زمان های حمل و نقل بین تمام نقاط شبکه شناخته شده و به صورت متقارن بوده است و از رابطه ی نامساوی مثلثی پیروی می کند.
۱۲. کل تقاضای تمام نقاط حادثه دیده با کل عرضی تمام تأمین کننده ها مساوی در نظر گرفته شده است و کمبود موجودی مجاز نیست.
۱۳. هر واحد قلم امدادی شامل چندین نوع محصول است که برای برآورده کردن نیاز هر فرد سالم استفاده می شود.
۱۴. ظرفیت پناهگاه ها محدود در نظر گرفته شده است.
۱۵. در عملیات تخلیه ی افراد سالم و توزیع اقلام امدادی، مسیر حرکت هر وسیله ی امدادی، مسیر باز در نظر گرفته شده است و لازم نیست وسیله از پناهگاه به انبار محل استقرارش برگردد.

با ارائه ی یک مدل ریاضی جدید به تعیین همزمان مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی پرداخته شده، که هدفش کاهش کل زمان رسیدن وسایل تخلیه به نقاط حادثه دیده و پناهگاه ها، و کمینه کردن زمان رسیدن وسایل توزیع اقلام امدادی به تأمین کننده ها و پناهگاه هاست.

## ۳. مدل سازی ریاضی

در این بخش مسئله ی تشریح شده در قسمت قبل را به صورت ریاضی مدل سازی می کنیم:

### ۱.۳. مجموعه ها

$E$ : مجموعه ی نقاط حادثه دیده؛

$S$ : مجموعه ی پناهگاه ها؛

$V$ : مجموعه ی وسایل در فرایند تخلیه ی افراد سالم؛

$D$ : مجموعه ی انبار وسایل در فرایند تخلیه ی افراد سالم؛

$D(v)$ : محل استقرار مجموعه ی وسایل در فرایند تخلیه ی افراد سالم؛

$N$ : مجموعه ی کل نقاط در فرایند تخلیه ی افراد سالم (اجتماع سه مجموعه ی  $D(v)$ ،  $E$  و  $S$ )؛

$E'$ : مجموعه ی تأمین کننده ها؛

$V'$ : مجموعه ی وسایل در فرایند توزیع اقلام امدادی؛

$D'$ : مجموعه ی انبار وسایل در فرایند توزیع اقلام امدادی؛

$D'(v')$ : محل استقرار مجموعه ی وسایل در فرایند توزیع اقلام امدادی؛

$N'$ : مجموعه‌ی کل نقاط در فرایند توزیع اقلام امدادی (اجتماع سه مجموعه‌ی  $D'(v')$ ,  $E'$  و  $S$ ).

### ۲.۳. اندیس‌ها

$i, j$ : مجموعه‌ی اندیس گره‌ها در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم؛  
 $i', j'$ : مجموعه‌ی اندیس گره‌ها در فرایند توزیع اقلام امدادی؛  
 $v$ : مجموعه‌ی اندیس وسایل در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم؛  
 $v'$ : مجموعه‌ی اندیس وسایل در فرایند توزیع اقلام امدادی.

### ۳.۳. پارامترها

$c_{ij}$ : زمان حمل و نقل از گره‌ی  $i \in N$  به گره‌ی  $j \in N$ ؛  
 $c_{i'j'}$ : زمان حمل و نقل از گره‌ی  $i' \in N'$  به گره‌ی  $j' \in N'$ ؛  
 $d_i$ : مقدار تقاضای نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی  $i \in N$ ؛  
 $d_{i'}$ : مقدار عرضه‌ی تأمین‌کننده‌ی  $i' \in N'$ ؛  
 $Cap_i$ : ظرفیت پناهگاه  $i \in S$  برای تخلیه‌ی افراد سالم؛  
 $Cap_{i'}$ : ظرفیت پناهگاه  $i' \in S$  برای توزیع اقلام امدادی؛  
 $b_i$ : حداکثر زمان رسیدن وسایل تخلیه به گره‌ی  $i \in E \cup S$ ؛  
 $b_{i'}$ : حداکثر زمان رسیدن وسایل توزیع به گره‌ی  $i' \in E' \cup S$ ؛  
 $Cap_v$ : ظرفیت وسیله‌ی  $v \in V$ ؛  
 $Cap_{v'}$ : ظرفیت وسیله‌ی  $v' \in V'$ ؛  
 $Dt_i$ : زمان ارائه‌ی خدمت در گره‌ی  $i \in E \cup S$ ؛  
 $Dt_{i'}$ : زمان ارائه‌ی خدمت در گره‌ی  $i' \in E' \cup S$ ؛  
 $M_{b_i g}$ : مقدار خیلی بزرگ؛  
 $\alpha$ : ضریب اهمیت؛  
 $\beta$ : حداقل زمان شروع حرکت وسایل توزیع اقلام امدادی بعد از شروع فرایند تخلیه‌ی افراد سالم.

### ۴.۳. متغیرها

$X_{vij}$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v \in V$  از گره‌ی  $i \in N$  به گره‌ی  $j \in N$  حرکت کند، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Y_{vi}$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v \in V$  به گره‌ی  $i \in E \cup S$  تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Z_v$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v \in V$  اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Q_{vi}$ : تعداد افرادی که در نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی  $i \in E$  سوار وسیله‌ی  $v \in V$  می‌شوند یا تعداد افرادی که از وسیله‌ی  $v \in V$  در پناهگاه  $i \in S$  پیاده می‌شوند؛  
 $T_{vi}$ : زمان رسیدن وسیله‌ی  $v \in V$  به گره‌ی  $i \in N$ ؛  
 $X_{v'i'j'}$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v' \in V'$  از گره‌ی  $i' \in N'$  به گره‌ی  $j' \in N'$  حرکت کند، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Y_{v'i'}$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v' \in V'$  به گره‌ی  $i' \in E' \cup S$  تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Z_{v'}$ : برابر ۱ است اگر وسیله‌ی  $v' \in V'$  اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است؛  
 $Q_{v'i'}$ : تعداد اقلامی که از تأمین‌کننده‌ی  $i' \in E'$  توسط وسیله‌ی  $v' \in V'$  بارگیری

می‌شود یا تعداد اقلامی که توسط وسیله‌ی  $v' \in V'$  در پناهگاه  $i' \in S$  تخلیه می‌شود.

### ۵.۳. تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\text{Min } \alpha \sum_{v \in V} \sum_{i \in E \cup S} T_{vi} + \sum_{v' \in V'} \sum_{i' \in E' \cup S} T_{v'i'} \quad (۱)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in D(v)} X_{vij} = Z_v \quad \forall v \in V \quad (۲)$$

$$\sum_{j' \in E'} \sum_{i' \in D'(v')} X_{v'i'j'} = Z_{v'} \quad \forall v' \in V' \quad (۳)$$

$$\sum_{i \in D(v) \cup E} X_{vij} = \sum_{i \in E \cup S} X_{vji} \quad \forall j \in E, \quad \forall v \in V \quad (۴)$$

$$\sum_{i' \in D'(v') \cup E'} X_{v'i'j'} = \sum_{i' \in E' \cup S} X_{v'ji'} \quad \forall j' \in E', \quad \forall v' \in V' \quad (۵)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} = d_i \quad \forall i \in E \quad (۶)$$

$$\sum_{v' \in V'} Q_{v'i'} = d_{i'} \quad \forall i' \in E' \quad (۷)$$

$$\sum_{i \in E} Q_{vi} \leq Cap_v Z_v \quad \forall v \in V \quad (۸)$$

$$\sum_{i' \in E'} Q_{v'i'} \leq Cap_{v'} Z_{v'} \quad \forall v' \in V' \quad (۹)$$

$$Cap_v Y_{vi} \geq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \quad \forall v \in V \quad (۱۰)$$

$$Y_{vi} \leq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \quad \forall v \in V \quad (۱۱)$$

$$Cap_{v'} Y_{v'i'} \geq Q_{v'i'} \quad \forall i' \in E' \cup S, \quad \forall v' \in V' \quad (۱۲)$$

$$Y_{v'i'} \leq Q_{v'i'} \quad \forall i' \in E' \cup S, \quad \forall v' \in V' \quad (۱۳)$$

$$\sum_{j \in E \cup D(v)} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in E, \quad \forall v \in V \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j' \in E' \cup D'(v')} X_{v'ji'} = Y_{v'i'} \quad \forall i' \in E', \quad \forall v' \in V' \quad (۱۵)$$

$$\sum_{j \in E} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in S, \quad \forall v \in V \quad (۱۶)$$

$$\sum_{j' \in E'} X_{v'ji'} = Y_{v'i'} \quad \forall i' \in S, \quad \forall v' \in V' \quad (۱۷)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} \leq Cap_i \quad \forall i \in S \quad (۱۸)$$

$$\sum_{v' \in V'} Q_{v'i'} \leq Cap_{i'} \quad \forall i' \in S \quad (۱۹)$$

$$\sum_{i \in S} Q_{vi} = \sum_{i \in E} Q_{vi} \quad \forall v \in V \quad (۲۰)$$

$$\sum_{i' \in S} Q_{v'i'} = \sum_{i' \in E'} Q_{v'i'} \quad \forall v' \in V' \quad (۲۱)$$

$$\sum_{v \in V} Z_v \leq V \quad (۲۲)$$

است. محدودیت ۷ بیانگر توزیع تمام اقلام موجود هر تأمین‌کننده است. محدودیت ۸ بیان‌کننده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم است. محدودیت ۹ نشان‌دهنده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله در فرایند توزیع اقلام امدادی است. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین دو متغیر  $Q_{vi}$  و  $Y_{vi}$  در هر منطقه‌ی آسیب‌دیده و هر پناهگاه است که در محدودیت ۱۰ زمانی که  $Q_{vi}$  مقدار بزرگتر از صفر می‌گیرد سبب می‌شود که  $Y_{vi}$  مقدار ۱ را اختیار کند و در محدودیت ۱۱ زمانی که  $Q_{vi}$  مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود  $Y_{vi}$  مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین دو متغیر  $Q_{v'i'}$  و  $Y_{v'i'}$  برای هر تأمین‌کننده و هر پناهگاه است که در محدودیت ۱۲ زمانی که  $Q_{v'i'}$  مقدار بزرگتر از صفر می‌گیرد سبب می‌شود که  $Y_{v'i'}$  مقدار ۱ را اختیار کند و در محدودیت ۱۳ زمانی که  $Q_{v'i'}$  مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود  $Y_{v'i'}$  مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت ۱۴ بیان‌کننده‌ی این است که اگر وسیله‌ی بی به یک منطقه‌ی حادثه‌دیده اختصاص یابد قبل از آن منطقه، فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک منطقه‌ی حادثه‌دیده دیگری وجود دارد. محدودیت ۱۵ نشان‌دهنده‌ی این است که اگر وسیله‌ی بی به یک تأمین‌کننده اختصاص یابد قبل از آن تأمین‌کننده، فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک تأمین‌کننده دیگری وجود دارد. محدودیت ۱۶ بیانگر این است که در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم، اگر وسیله‌ی بی به یک پناهگاه اختصاص یابد قبل از آن پناهگاه فقط یک منطقه‌ی حادثه‌دیده قرار گرفته است. محدودیت ۱۷ بیانگر آن است که در فرایند توزیع اقلام امدادی، اگر وسیله‌ی بی به یک پناهگاه اختصاص یابد قبل از آن پناهگاه فقط یک تأمین‌کننده قرار گرفته است. محدودیت ۱۸ نشان‌دهنده‌ی حداکثر ظرفیت هر پناهگاه برای اسکان افراد سالم است. محدودیت ۱۹ نشان‌دهنده‌ی حداکثر ظرفیت هر پناهگاه برای تخصیص اقلام امدادی است. محدودیت ۲۰ بیان می‌دارد که تعداد افرادی که از مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف به هر وسیله‌ی امدادی اختصاص می‌یابد تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت ۲۱ بیان می‌دارد که تعداد اقلامی که از تأمین‌کننده‌های مختلف به هر وسیله‌ی امدادی اختصاص می‌یابند تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت ۲۲ نشان‌دهنده‌ی حداکثر تعداد وسایل امدادی در دسترس، در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم است. محدودیت ۲۳ بیان‌کننده‌ی بیشترین تعداد وسایل امدادی در دسترس، در فرایند توزیع اقلام امدادی است. محدودیت ۲۴ بیانگر آن است که در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم، زمان شروع حرکت هر وسیله از انباری که در آن مستقر شده است، صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت ۲۵ نشان‌دهنده‌ی این است که در فرایند توزیع اقلام امدادی، زمان شروع حرکت هر وسیله از انباری که در آن مستقر شده است، حداقل  $\gamma$  واحد زمانی بعد از شروع فرایند تخلیه‌ی افراد در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم، زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده و هر پناهگاه را به ترتیب نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۲۸ و ۲۹ در فرایند توزیع اقلام امدادی، زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر تأمین‌کننده و هر پناهگاه را به ترتیب نشان می‌دهند. محدودیت ۳۰ بیانگر پنجره‌ی زمانی رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم است. محدودیت ۳۱ نشان‌دهنده‌ی پنجره‌ی زمانی رسیدن وسایل امدادی به تأمین‌کننده‌ها و پناهگاه‌ها در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم است. محدودیت ۳۲ از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم جلوگیری می‌کند. محدودیت ۳۳ از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه در فرایند توزیع اقلام امدادی جلوگیری می‌کند. محدودیت ۳۴ بیانگر آن است که در هر پناهگاه به تعداد افراد سالم اقلام امدادی موجود است. محدودیت‌های ۳۵ تا ۴۴ نشان‌دهنده‌ی نوع متغیرهاست.

$$\sum_{v' \in V'} Z_{v'} \leq V' \quad (23)$$

$$T_{vi} = 0 \quad \forall i \in D(v), \quad \forall v \in V \quad (24)$$

$$T_{v'i'} \geq \beta \sum_{j' \in E'} X_{v'i'j'} \quad \forall i' \in D'(v') \quad \forall v' \in V' \quad (25)$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - Mbig(\lambda - X_{vij}) \leq T_{vj} \quad \forall j \in E, \quad \forall v \in V, \quad \forall i \in D(v) \cup E \quad (26)$$

$$(T_{v'i'} + Dt_{i'} + c_{ij'}) - Mbig(\lambda - X_{v'ij'}) \leq T_{vj'} \quad \forall j' \in S, \quad \forall v' \in V, \quad \forall i' \in E \quad (27)$$

$$(T_{v'i'} + Dt_{i'} + c_{i'j'}) - Mbig(\lambda - X_{v'i'j'}) \leq T_{v'j'} \quad \forall j' \in E', \quad \forall v' \in V', \quad \forall i' \in D'(v') \cup E' \quad (28)$$

$$(T_{v'i'} + Dt_{i'} + c_{i'j'}) - Mbig(\lambda - X_{v'i'j'}) \leq T_{v'j'} \quad \forall j' \in S, \quad \forall v' \in V', \quad \forall i' \in E' \quad (29)$$

$$T_{vi} \leq b_i \quad \forall v \in V, \quad \forall i \in E \cup S \quad (30)$$

$$T_{v'i'} \leq b_{i'} \quad \forall v' \in V', \quad \forall i' \in E' \cup S \quad (31)$$

$$X_{vii} = 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall v \in V \quad (32)$$

$$X_{v'i'i'} = 0 \quad \forall i' \in N', \quad \forall v' \in V' \quad (33)$$

$$\sum_{v' \in V'} Q_{v'i'} = \sum_{v \in V} Q_{vi} \quad \forall i = i' \in S \quad (34)$$

$$X_{vij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in N, \quad \forall v \in V \quad (35)$$

$$Y_{vi} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E \cup S, \quad \forall v \in V \quad (36)$$

$$Z_v \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V \quad (37)$$

$$Q_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in E \cup S, \quad \forall v \in V \quad (38)$$

$$T_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall v \in V \quad (39)$$

$$X_{v'i'j'} \in \{0, 1\} \quad \forall i' \in N', \quad \forall j' \in N', \quad \forall v' \in V' \quad (40)$$

$$Y_{v'i'} \in \{0, 1\} \quad \forall i' \in E' \cup S, \quad \forall v' \in V' \quad (41)$$

$$Z_{v'} \in \{0, 1\} \quad \forall v' \in V' \quad (42)$$

$$Q_{v'i'} \geq 0 \quad \forall i' \in E' \cup S, \quad \forall v' \in V' \quad (43)$$

$$T_{v'i'} \geq 0 \quad \forall i' \in N', \quad \forall v' \in V' \quad (44)$$

تابع هدف ۱ بیان‌کننده‌ی کل زمان رسیدن وسایل تخلیه‌ی افراد به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها و وسایل توزیع اقلام به تأمین‌کننده‌ها و پناهگاه‌هاست. محدودیت ۲ بیان می‌دارد که در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم، اگر وسیله‌ی بی اعزام شود، آن وسیله از انباری که در آن مستقر شده است به سمت یکی از نقاط حادثه‌دیده شروع به حرکت می‌کند. محدودیت ۳ نشانگر آن است که در فرایند توزیع اقلام امدادی، اگر وسیله‌ی بی اعزام شود، آن وسیله از انباری که در آن مستقر شده است به سمت یکی از تأمین‌کننده‌ها شروع به حرکت می‌کند. محدودیت ۴ نشان‌دهنده‌ی محدودیت حفاظت جریان در نقاط حادثه‌دیده، در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم است. محدودیت ۵ نشانگر محدودیت حفاظت جریان برای تأمین‌کننده‌ها، در فرایند توزیع اقلام امدادی است. محدودیت ۶ بیانگر تخلیه‌ی تمام افراد هر منطقه‌ی آسیب‌دیده از محل حادثه

#### ۴. مثال عددی

در این بخش با توجه به جدید بودن ویژگی‌های مطرح شده برای مدل پیشنهادی برای حوزه‌ی عملیات امداد رسانی در فاز پاسخ به فاجعه، با طرح یک مثال عددی و حل آن به بررسی کارایی و کاربردی بودن مدل ارائه شده پرداخته می‌شود.

#### ۱.۴. شرح مثال

فرض کنید شبکه‌ی بی‌شامل دوازده گره است که گره‌های ۱ و ۲ به‌عنوان پناهگاه‌ها و در قسمت فرایند تخلیه‌ی افراد سالم، گره‌های ۳ الی ۶ به‌عنوان مناطق حادثه‌دیده و گره‌های ۷ و ۸ به‌عنوان انبارهای وسایل تخلیه در نظر گرفته شده‌اند. در قسمت فرایند توزیع اقلام امدادی، گره‌های ۹ و ۱۰ به‌عنوان تأمین‌کننده‌ها و گره‌های ۱۱ و ۱۲ به‌عنوان انبارهای وسایل توزیع معرفی شده‌اند. حداکثر شش وسیله برای تخلیه‌ی افراد سالم و حداکثر سه وسیله برای توزیع اقلام امدادی وجود دارد. اهمیت عملیات تخلیه‌ی افراد سالم نسبت به عملیات توزیع اقلام امدادی سه برابر در نظر گرفته شده، و زمان شروع حرکت وسایل توزیع اقلام امدادی ۴۵ دقیقه بعد از شروع عملیات تخلیه‌ی افراد معرفی شده است. در جداول ۱ تا ۵ اطلاعات مورد نیاز برای مثال معرفی شده ارائه شده است.

#### ۲.۴. نتایج

مسئله‌ی انتخابی با استفاده از نرم‌افزار ۲۳۰.۰ GAMS و سالور CPLEX بر روی رایانه‌ی با مشخصات Intel Core i۷۴۷۰۲ MQ ۲٫۲۰ GHz up to ۳٫۲۰ GHz and ۶ GB RAM DDR۳ under Win Seven اجرا شد. زمان حل این مثال با نرم‌افزار GAMS معادل ۳٫۲۵ ثانیه بوده و مقدار کل تابع هدف برابر ۱۴۶۵ دقیقه به دست آمده است. نتایج حاصل از حل مسئله در جداول ۶ و ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۱. زمان‌های حمل و نقل در فرایند تخلیه‌ی افراد (دقیقه).

گره‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	-	۳۵	۱۰	۲۰	۲۰	۲۵	۳۰	۱۵
۲	۳۵	-	۴۰	۳۵	۲۰	۴۰	۳۰	۱۰
۳	۱۰	۴۰	-	۱۰	۲۵	۲۰	۲۰	۱۰
۴	۲۰	۳۵	۱۰	-	۱۵	۲۵	۱۰	۲۰
۵	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵	-	۲۵	۱۰	۳۰
۶	۲۵	۴۰	۲۰	۲۵	۲۵	-	۱۵	۳۰
۷	۳۰	۳۰	۳۰	۱۰	۱۰	۱۵	-	۲۰
۸	۱۵	۱۰	۱۰	۲۰	۲۰	۳۰	۲۰	-

جدول ۲. اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه در فرایند تخلیه‌ی افراد.

گره‌ها	مقدار تقاضا (نفر)	ظرفیت (نفر)	پنجره زمانی (دقیقه)	زمان ارائه‌ی خدمت (دقیقه)
۱	-	۶۰	۹۰	۱۰
۲	-	۶۰	۹۰	۱۰
۳	۳۰	-	۶۰	۱۰
۴	۲۰	-	۶۰	۱۰
۵	۳۰	-	۶۰	۱۰
۶	۲۰	-	۶۰	۱۰

جدول ۳. اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه در فرایند توزیع اقلام.

گره‌ها	مقدار عرضه (کالا)	ظرفیت (کالا)	پنجره زمانی (دقیقه)	زمان ارائه‌ی خدمت (دقیقه)
۱	-	۶۰	۱۵۰	۲۰
۲	-	۶۰	۱۵۰	۲۰
۹	۶۰	-	۱۲۰	۲۰
۱۰	۴۰	-	۱۲۰	۲۰

جدول ۴. زمان‌های حمل و نقل در فرایند توزیع اقلام (دقیقه).

گره‌ها	۱	۲	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	-	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۲۵
۲	۱۰	-	۲۵	۳۰	۳۵	۱۵
۹	۱۵	۲۵	-	۳۰	۲۰	۲۰
۱۰	۲۰	۳۰	۳۰	-	۱۰	۳۰
۱۱	۲۵	۲۵	۳۵	۲۰	-	۳۰
۱۲	۲۵	۱۵	۲۰	۳۰	۳۰	-

جدول ۵. نحوه‌ی استقرار وسایل در فرایند تخلیه‌ی افراد و توزیع اقلام.

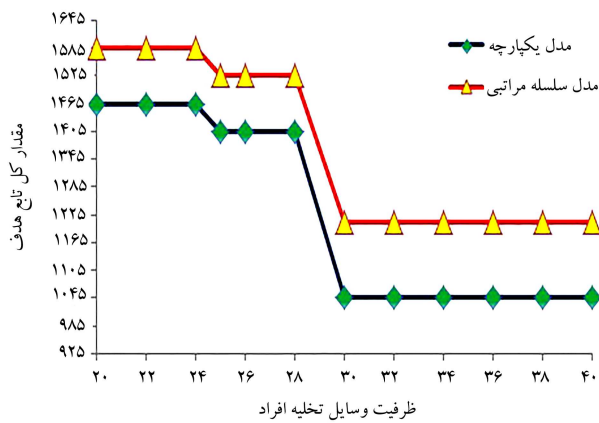
وسایل تخلیه	محل استقرار وسایل در انبارهای وسایل تخلیه	ظرفیت وسایل	وسایل توزیع	محل استقرار وسایل در انبارهای وسایل توزیع	ظرفیت وسایل
۱	۷	۲۴	۱	۱۲	۴۰
۲	۷	۲۰	۲	۱۲	۵۰
۳	۷	۲۴			
۴	۸	۲۴			
۵	۸	۲۰	۳	۱۱	۵۰
۶	۸	۲۴			

جدول ۶. نتایج حاصل از حل مدل در قسمت فرایند تخلیه‌ی افراد.

وسيله	مسیر	تعداد افرادی که در هر مسیر زمان رسیدن به سوار یا پیاده می‌شوند (نفر)	هر گره (دقیقه)
۱	۷-۶-۲	۱۰-۱۰	۶۵-۱۵
۲	۷-۳-۱	۶-۶	۴۰-۲۰
۳	۷-۳-۱	۲۴-۲۴	۴۰-۲۰
۴	۸-۶-۱	۲۰-۲۰	۵۰-۱۵
۵	۸-۴-۲	۲۰-۲۰	۵۵-۱۰
۶	۸-۵-۲	۲۰-۲۰	۴۰-۱۰

جدول ۷. نتایج حاصل از حل مدل در قسمت فرایند توزیع اقلام.

وسيله	مسیر	تعداد اقلامی که در هر مسیر بارگیری یا تخلیه می‌شوند	هر گره (دقیقه)
۲	۱-۹-۱۲	۵۰-۵۰	۱۰۰-۶۵-۴۵
۳	۲-۱۰-۱۱	۵۰-۵۰	۱۰۵-۵۵-۴۵



شکل ۳. نمودار تحلیل حساسیت مدل برای تغییر ظرفیت وسایل تخلیه.

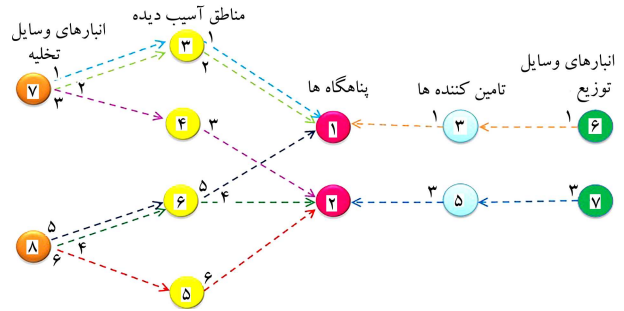
### ۱.۵. اثر ظرفیت وسایل تخلیه بر روی زمان ارائه خدمات

ظرفیت وسایل تخلیه افراد روی تصمیم‌گیری‌های مدیریت فاجعه تأثیرگذار است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود کل زمان ارائه خدمات به بازماندگان در فاز پاسخ به فاجعه به‌ازای تغییر ظرفیت وسایل تخلیه افراد تغییر می‌کند. در مدل یک‌پارچه اگر وسایل به‌گونه‌ی انتخاب شوند که ظرفیت هرکدام از آن‌ها ۲۰ نفر باشد مانند مینی‌بوس و... کل زمان رسیدن وسایل به مناطق آسیب‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کننده‌ها ۱۴۶۵ دقیقه است، ولی اگر از وسایلی بهتر با ظرفیت ۲۵ نفر استفاده شود کل زمان ارائه خدمات ۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد و با صرف هزینه و بهره‌گیری از امکانات بهتر و استفاده از وسایلی مانند اتوبوس و... با ظرفیت بیشتر از ۳۰ نفر برای تخلیه افراد سالم کل زمان سرویس‌دهی ۴۲۰ دقیقه کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود که اگر مدل به‌صورت یک‌پارچه حل شود مقدار کل تابع هدف به‌ازای هر ظرفیتی از وسایل تخلیه افراد کم‌تر از کل مقدار تابع هدف مدل سلسله‌مراتبی است که بیان می‌دارد مدل یک‌پارچه بهتر از مدل سلسله‌مراتبی عمل می‌کند. با انتخاب مجموعه‌ی وسایل تخلیه ناهمگن با ظرفیت بیشتر یا مساوی ۳۰ نفر حداقل زمان برای خدمت‌دهی به دست می‌آید.

### ۲.۵. اثر ظرفیت پناهگاه‌ها بر زمان ارائه خدمات

یکی از تصمیمات کلیدی قبل از وقوع فاجعه، تعیین مکان‌های امن با ظرفیت مناسب برای امدادسانی بازماندگان در فاز پاسخ به فاجعه است که ظرفیت پناهگاه‌ها روی زمان تخلیه افراد به پناهگاه‌ها و توزیع اقلام امدادی برای آن‌ها تأثیرگذار است. چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کنندگان با افزایش ظرفیت پناهگاه‌ها کاهش می‌یابد به‌گونه‌ی که در مدل یک‌پارچه با افزایش ظرفیت پناهگاه‌ها از ۶۰ نفر به ۱۰۰ نفر، کل زمان ارائه خدمات ۱۰۰ دقیقه کاهش یافته و ظرفیت‌های بیشتر از آن روی مقدار کل تابع هدف تأثیری ندارد. در مدل سلسله‌مراتبی با افزایش ظرفیت پناهگاه‌ها از ۶۰ نفر به ۸۰ نفر، کل زمان سرویس‌دهی به افراد سالم، ۴۰ دقیقه کاهش یافته و ظرفیت‌های بیشتر از این مقدار، بر روی تابع هدف اثری ندارد.

چنان‌که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود مقدار کل تابع هدف مدل یک‌پارچه به‌ازای هر ظرفیتی از پناهگاه‌ها کم‌تر از کل مقدار تابع هدف مدل سلسله‌مراتبی است و این بیان می‌دارد که مدل یک‌پارچه بهتر از مدل سلسله‌مراتبی عمل می‌کند.



شکل ۲. نتایج حل مدل به‌صورت گرافیکی.

در جدول ۶ مسیر حرکت هر وسیله تخلیه افراد، تعداد افرادی که در هر منطقه حادثه‌دیده سوار وسیله و در پناهگاه مربوطه پیاده می‌شوند و زمان رسیدن وسیله امدادی به هر یک از مناطق آسیب‌دیده و پناهگاهی که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، وسیله امدادی ۱ از انبار ۷ حرکت خود را آغاز کرده و سپس در منطقه حادثه‌دیده ۶ تعداد ۱۰ نفر را پس از گذشت ۱۵ دقیقه از لحظه شروع حرکت سوار کرده و در نهایت پس از گذشت ۶۵ دقیقه به پناهگاه ۲ می‌رسد و ۱۰ نفر را در این پناهگاه پیاده می‌کند.

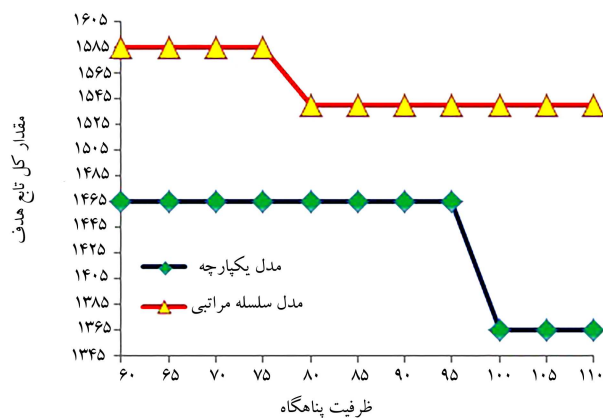
در جدول ۷ مسیر حرکت هر وسیله توزیع اقلام امدادی، تعداد کالاهایی که از هر تأمین‌کننده بارگیری و در پناهگاه مربوطه تخلیه می‌شوند و زمان رسیدن وسیله امدادی به هر یک از تأمین‌کننده‌ها و پناهگاهی که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، وسیله امدادی ۳ پس از گذشت ۴۵ دقیقه از شروع عملیات تخلیه، از انبار ۱۱ حرکت خود را آغاز کرده و سپس از تأمین‌کننده ۱۰ تعداد ۵۰ قلم امدادی را پس از گذشت ۵۵ دقیقه از لحظه شروع حرکت، بارگیری نموده و در نهایت پس از گذشت ۱۰۵ دقیقه به پناهگاه ۲ می‌رسد و ۵۰ قلم امدادی را در این پناهگاه تخلیه می‌کند.

در شکل ۲ مسیر حرکت هر وسیله امدادی به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. اعداد روی کمان‌ها در فرایند تخلیه افراد سالم و توزیع اقلام امدادی بیان‌گر شماره وسیله امدادی است، که از محل استقرارش حرکت خود را آغاز کرده است. به‌عنوان نمونه، در فرایند تخلیه افراد سالم، وسیله ۵ از انبار ۸ حرکت خود را آغاز نموده و سپس بعد از سوار کردن افراد از منطقه آسیب‌دیده ۴ به پناهگاه ۲ می‌رود. در فرایند توزیع اقلام، به‌عنوان نمونه وسیله ۲ از انبار ۱۲ حرکت خود را شروع کرده و سپس بعد از بارگیری اقلام از تأمین‌کننده ۹ به پناهگاه ۱ می‌رود.

## ۵. تحلیل حساسیت

چنان‌که در قسمت‌های قبل بیان شد، فرضیاتی مانند یک‌پارچه بودن مدل، ظرفیت محدود وسایل امدادی، ظرفیت پناهگاه‌ها، انبارهای چندگانه برای شروع حرکت وسایل امدادی و... به‌عنوان نوآوری در نظر گرفته شد که این عوامل بر روی زمان ارائه خدمات در فاز پاسخ به فاجعه اثر می‌گذارند. بنابراین در ادامه دو تحلیل حساسیت روی ظرفیت وسایل تخلیه افراد و ظرفیت پناهگاه‌ها با در نظر گرفتن مدل در دو حالت، یک‌پارچه و سلسله‌مراتبی انجام می‌گیرد. در حالت سلسله‌مراتبی بدین صورت عمل می‌شود که ابتدا قسمت فرایند تخلیه افراد مستقل از قسمت توزیع اقلام امدادی حل می‌شود و نتایج خروجی حاصل از آن به‌عنوان پارامترهای ورودی برای فرایند توزیع اقلام در نظر گرفته شده و سپس به حل قسمت توزیع اقلام امدادی پرداخته می‌شود.

به پناهگاه‌ها و توزیع اقلام امدادی مورد نیاز آن‌ها در زمان وقوع فاجعه ارائه شد. نوآوری این مقاله نسبت به مطالعات پیشین، در نظر گرفتن یک شبکه‌ی جدید و یک پارچه‌ی چهارسطحی شامل انبار چندگانه برای وسایل تخلیه، مناطق آسیب‌دیده، پناهگاه‌ها، تأمین‌کننده‌ها و انبار چندگانه برای وسایل توزیع است. در فرایند تخلیه‌ی افراد سالم امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله و انبار چندگانه برای شروع حرکت وسایل ناهمگن تخلیه در نظر گرفته شده است. در فرایند توزیع اقلام امدادی امکان خدمت گرفتن از هر تأمین‌کننده توسط چندین وسیله و انبار چندگانه برای شروع حرکت وسایل ناهمگن توزیع اقلام امدادی معرفی شده است. برای این که مسئله به مسئله‌ی دنیای واقعی نزدیک‌تر شود محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل امدادی، محدودیت ظرفیت پناهگاه‌ها و محدودیت پنجره‌های زمانی برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کننده‌ها لحاظ شده تا بتوان فاجعه را بهتر مدیریت کرد. هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده، پناهگاه‌ها و تأمین‌کننده‌ها است. در ادامه به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا، حل و تحلیل حساسیت شد. برای تحقیقات آتی، توسعه‌ی مدل در حالت چنددوره‌ی، توسعه‌ی مدل در حالت چندمحصولی و استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ را می‌توان پیشنهاد داد.



شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت مدل برای تغییر ظرفیت پناهگاه‌ها.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مدل جدید برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص همزمان برای عملیات تخلیه‌ی افراد سالم

## پانوشته‌ها

- multiple depots
- split delivery

## منابع (References)

- Ngueveu, S.U., Prins, C. and Calvo, R. W. "An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, **37**, pp. 1877-1885 (2010).
- Bish, D.R. "Planning for a bus-based evacuation", *OR Spectrum*, **33**, pp. 629-654 (2011).
- Abdelgawad, H. and Abdulhai, B. "Large-scale evacuation using subway and bus transit: Approach and application in city of Toronto", *Journal of Transportation Engineering*, **138**, pp. 1215-1232 (2011).
- Hamedi, M., Haghani, A. and Yang, S. "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: Model and heuristic", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **54**, pp. 1205-1219 (2012).
- Ribeiro, G.M. and Laporte, G. "An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, **39**, pp. 728-735 (2012).
- Wohlgemuth, S., Oloruntoba, R. and Clausen, U. "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief", *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**, pp. 261-271 (2012).
- Wex, F., Schryen, G. and Neumann, D. "Operational emergency response under informational uncertainty: A fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units", *Proceedings of the 9th International IS-CRAM Conference*, Vancouver, Canada (April 2012).
- Gan, X., Wang, Y., Yu, Y. and Niu, B. "An emergency vehicle scheduling problem with time utility based on particle swarm optimization", in *Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Computing Theories and Technology*, pp. 614-623 (2013).
- Ke, L. and Feng, Z. "A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, **40**, pp. 633-638 (2013).
- Ozsoydan, F.B. and Sipahioglu, A. "Heuristic solution approaches for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Optimization*, **62**, pp. 1321-1340 (2013).
- Lee, K., Lei, L., Pinedo, M. and Wang, S. "Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations", *International Journal of Production Research*, **51**, pp. 7071-7090 (2013).
- Lee, K., Lei, L. and Dong, H. "A solvable case of emergency supply chain scheduling problem with multi-stage lead times", *Journal of Supply Chain and Operations Management*, **11**, p. 30-45 (2013).
- Pramudita, A., Taniguchi, E. and Qureshi, A.G. "Location and routing problems of debris collection operation after disasters with realistic case study", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **125**, pp. 445-458 (2014).
- Özdamar, L., Aksu, D.T. and Ergünes, B. "Coordinating debris cleanup operations in post disaster road net-



- works”, *Socio-Economic Planning Sciences*, **48**, pp. 249-262 (2014).
15. Gan, X., Wang, Y., Kuang, J., Yu, Y. and Niu, B. “Emergency vehicle scheduling problem with time utility in disasters” *Mathematical Problems in Engineering*, **2015**, pp. 1-7 (2014).
  16. Wex, F., Schryen, G., Feuerriegel, S. and Neumann, D. “Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units”, *European Journal of Operational Research*, **235**, pp. 697-708 (2014).
  17. Caunhye, A.M., Zhang, Y., Li, M. and Nie, X. “A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **90**, pp. 161-176 (2016).
  18. Talarico, L., Meisel, F. and Sörensen, K. “Ambulance routing for disaster response with patient groups”, *Computers & Operations Research*, **56**, pp. 120-133 (2015).