استراتژی مسیریابی و زمان‌بندی بهینه‌ی وسایل امدادی برای تخلیه‌ی افراد سالم در شرایط بحران

فاطمه صبوحی

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

sabouhi@ind.iust.ac.ir

مهدی حیدری (نویسنده مسئول)

استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

Mheydari@iust.ac.ir

علی بزرگی امیری

دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

.Alibozorgi@ut.ac.ir

چکیده

هر ساله وقوع بلایای طبیعی مانند زلزله، سونامی، طوفان و .. سبب بی‌خانمان شدن هزاران نفر، ایجاد خسارت‌های قابل توجه اجتماعی، اقتصادی و حتی باعث مرگ تعداد زیادی از افراد می‌شود. پس از وقوع فاجعه یکی از مهم‌ترین اقدامات حیاتی، تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسیریابی و زمان-بندی وسایل امدادی ارائه شده است. که امکان خدمت‌دهی به افراد سالم در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله، امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله، وجود چندین مرکز بحران، محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل، محدودیت ظرفیت پناهگاه‌ها و محدودیت پنجره‌های زمانی برای رسیدن وسایل به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده و به هر پناهگاه در نظر گرفته شده است. در این مدل ریاضی، هدف کمینه‌سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است.

کلیدواژه:

مسیریابی، زمان‌بندی، پناهگاه، فاجعه، امدادرسانی

مقدمه

بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل، طوفان، آتش‌فشان و ... هر ساله آسیب-های جدی به زیر ساخت‌ها وارد نموده و باعث تهدید جان انسان‌ها می-شوند که به منظور کاهش تلفات و خسارات اقتصادی در زمان وقوع چنین فجایعی، عملیات امدادی مختلفی باید انجام گیرند که از جمله مهم-ترین این اقدامات عبارتند از : عملیات آواربرداری برای باز کردن مسیرهای امدادرسانی، عملیات جست و جو و نجات، عملیات تخلیه‌ی مجروحین به مراکز درمانی، عملیات تخلیه‌ی افراد سالم به پناهگاه‌ها، توزیع اقلام امدادی به مراکز درمانی و پناهگاه‌ها و توزیع انرژی است.

از جمله تصمیمات کلیدی که در فاز پاسخ به فجایع مطرح می‌گردند، شامل مسائل زمان‌بندی، مسیریابی، تخصیص، مکان‌یابی و موجودی هستند که در این مقاله، مسیریابی و زمان‌بندی همزمان عملیات تخلیه‌ی افراد سالم از نقاط حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها با فرض امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده و امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی امدادی، در نظر گرفته شده است. برای این‌که مسأله به مسأله‌ی دنیای واقعی نزدیک‌تر شود، محدودیت تعداد و

ظرفیت وسایل امدادی، محدودیت ظرفیت پناهگاه‌ها و محدودیت عدم نقض پنجره‌های زمانی برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها هم لحاظ شده تا بتوان برنامه‌ریزی بهتری برای فاز پاسخ در شرایط اضطراری انجام داد.

در ادامه ساختار مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش دوم مرور ادبیات، در بخش سوم بیان مسأله، مدل‌سازی ریاضی مسأله در بخش

چهارم، معرفی مثال عددی و نتایج حل مدل در بخش پنجم و نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی در بخش ششم ارائه شده است.

2. مرور ادبیات

ابعاد وسیع خسارات و تلفات ناشی از وقوع بلایای طبیعی در سال‌های اخیر سبب شده است که طرح‌های مدیریت بحران جامعی برای پاسخ‌گویی

سریع در فاز پاسخ به بحران ارائه شوند که هدف از این طرح‌ها ارائه‌ی برنامه‌ی منسجم برای کاهش مرگ و میرها و به حداقل رساندن خسارات اقتصادی است [1, 2] که از جمله مهم‌ترین اقدامات در حوزه‌ی مدیریت بحران، برنامه‌ریزی برای تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه دیده و توزیع اقلام امدادی است. دو تصمیم عملیاتی مسیریابی و زمان‌بندی در مراحل امدادرسانی به عنوان حوزه‌ی جدیدی در تحقیقات شناخته می‌شوند و در ادبیات کمتر به بررسی همزمان این مسائل مخصوصاً در حوزه‌ی تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه دیده پرداخته شده است. در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مسائل مسیریابی و زمان‌بندی در فاز پاسخ به بحران بیان شده‌اند.

انگیواویو و همکاران در سال 2010، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [3]. بیش در سال 2011، یک مدل سه سطحی مسیریابی و تخصیص برای تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه داد که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، چند دوره‌ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده است [4]. آبدلگاواد و آبدلهای در سال 2011 یک مدل سه سطحی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص برای عملیات تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه دیده به پناهگاه‌ها ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه دیده توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل و امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل در نظر گرفته شده است. مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند [5]. حامدی و همکاران در سال 2012، یک مدل سه سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبارهای اقلام امدادی به پناهگاه‌ها ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل چند هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند [6]. ریبریو و لاپورته در سال 2012، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه،

تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [7]. وهلگمیوس و همکاران در سال 2012، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، چند دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [8]. وکس و همکاران در سال 2012، یک مدل دو سطحی مسیریابی برای عملیات جست و جو و نجات در نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک واحد امداد و نجات در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [9]. گان و همکاران در سال 2013، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت، ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [10]. کی و فنگ در سال 2013، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [11]. ازسویدان و سیپاهیگلو در سال 2013، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [12]. لی و همکاران در سال 2013، یک مدل چهار سطحی زمان‌بندی برای توزیع تجهیزات پزشکی به بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال و تقسیم منابع به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر، ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی، با ظرفیت نامحدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند [13]. لی و همکاران در سال 2013، یک مدل چهار سطحی زمان‌بندی برای توزیع تجهیزات پزشکی به بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی، با ظرفیت محدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند [14]. پرامیودیتا و همکاران در سال 2014، یک مدل سه سطحی مسیریابی، مکان‌یابی و تخصیص برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده به دپوهای جمع‌آوری آوار ارائه 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 مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [15]. ازدومار و همکاران در سال 2014، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل چند هدفه، چند دوره‌ای، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [16]. گان و همکاران در سال 2014، یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت، ارائه دادند که امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [17]. وکس و همکاران در سال

2014، یک مدل دو سطحی مسیریابی برای عملیات جست و جو و نجات در نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که امکان خدمت-دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک واحد امداد و نجات در نظر گرفته شده است و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [18].

با توجه به مطالعات گذشته، شکاف‌های موجود در ادبیات مربوط به مسائل مسیریابی و زمان‌بندی در حوزی بحران عبارتند از:

1. اکثر مقالات مسیریابی و زمان‌بندی در حوزه‌ی بحران به بحث توزیع اقلام امدادی پرداخته‌اند و به موضوع تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه دیده کمتر توجه شده است.
2. در اکثر مقالات، ظرفیت انبارها (مراکز بحران) و تسهیلات نامحدود در نظر گرفته شده‌اند که در دنیای واقعی در مراکز بحران تعداد محدودی وسایل امدادی وجود دارد و تسهیلاتی مانند پناهگاه‌ها و بیمارستان‌ها و ... دارای ظرفیت محدود هستند.
3. در اکثر شبکه‌هایی که در مقالات مسیریابی و زمان‌بندی مطرح می‌شوند، تنها ارائه‌ی خدمت به هر گره از شبکه، توسط یک وسیله‌ی حمل و نقل در نظر گرفته شده است یعنی هر گره تنها روی یک مسیر قرار گرفته است و به امکان تقسیم‌پذیری تقاضای هر گره، توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل کمتر پرداخته شده است.
4. در اکثر مقالات مسیریابی و زمان‌بندی یک مکان برای شروع حرکت وسایل حمل و نقل در نظر گرفته شده و به وجود چندین مکان برای شروع حرکت وسایل کمتر توجه شده است
5. اکثر مقالات مسیریابی و زمان‌بندی در حوزه‌ی بحران، به بررسی مسائل مسیریابی و زمان‌بندی به طور مستقل پرداخته‌اند و کمتر به موضوع مسیریابی و زمان‌بندی همزمان عملیات امداد رسانی توجه شده است.

3. بیان مسأله

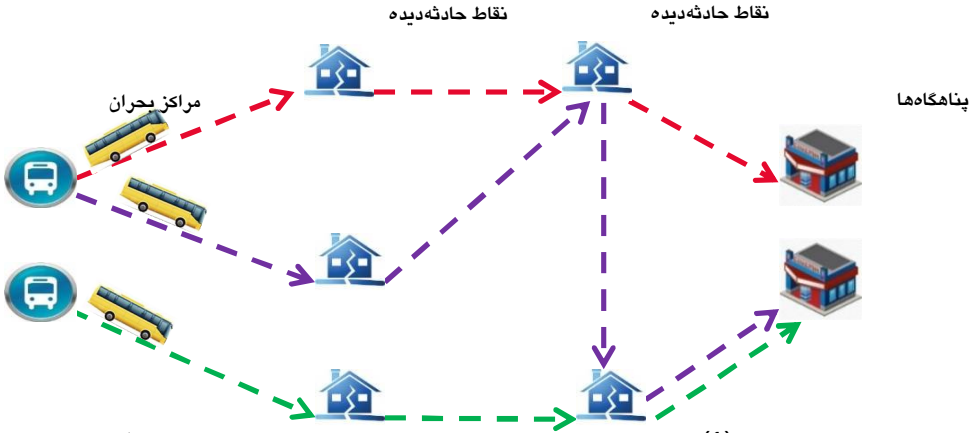
یکی از مهم‌ترین اقداماتی که در زمان وقوع فجایع طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان و .. باید صورت گیرد تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها در کمترین زمان ممکن برای کاهش خطرات احتمالی است، که امکان دارد به دلیل تهدید زیر ساخت‌ها در مناطق آسیب‌دیده رخ دهند. با توجه به بافت هر منطقه و شدت وقوع فاجعه، تعداد افرادی که در هر منطقه‌ی آسیب‌دیده زنده می‌مانند و نیاز به خدمات درمانی ندارند، متفاوت است. با توجه به شکل (1) که نشان دهنده‌ی شبکه‌ی تخلیه‌ی افراد سالم از نقاط حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها است که براساس ساعات اولیه‌ی وقوع حادثه رسم شده است و تمام افراد هر منطقه، باید از محل حادثه تخلیه شوند، انتقال افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها بدین صورت است که هر وسیله‌ی امدادی مانند اتوبوس، مینی‌بوس، ماشین‌های سواری و ... از یکی از مراکز بحران حرکت خود را آغاز کرده و سپس با توجه به ظرفیت وسیله، ظرفیت پناهگاه‌ها و پنجره‌های زمانی رسیدن به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها، بهترین مسیر را برای انتقال افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به یکی از پناهگاه‌ها انتخاب می‌کند. بنابراین امکان ارائه‌ی خدمات به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی امکان‌پذیر است و همچنین امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل امکان‌پذیر می‌باشد.

با توجه به شبکه‌ی در نظر گرفته شده، عمده فرضیات مسأله عبارتند از :

- تعداد و مکان مراکز بحران، نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها و زمان حمل و نقل بین آن‌ها شناخته شده است.

- پنجره‌ی زمانی برای نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
- چندین نقطه‌ی حادثه‌دیده، چندین پناهگاه با ظرفیت محدود و انبار وسایل چندگانه در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم در نظر گرفته شده‌اند.
- امکان قرار گرفتن هر نقطه‌ی حادثه‌دیده و هر پناهگاه روی چندین مسیر در نظر گرفته شده است.
- چندین نوع وسیله‌ی امدادی با ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند.
- شروع حرکت هر وسیله فقط از یکی از انبار وسایل و پایان حرکت فقط به یکی از پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
- امکان عدم اعزام هر وسیله در نظر گرفته شده است.

با ارائه‌ی یک مدل پیشنهادی، به تعیین همزمان مسیر و زمان حرکت هر وسیله‌ی امدادی پرداخته شده که هدف کمینه-سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است.



شکل (1) شبکه‌ی تخلیه‌ی افراد سالم از نقاط حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها

4. مدل‌سازی ریاضی

در این بخش مسأله‌ی تشریح شده در قسمت قبل را به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌کنیم.

1.4. مجموعه‌ها

مجموعه‌هایی که در مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی تخلیه‌ی افراد سالم مطرح می‌شوند، عبارتند از :

D	مجموعه‌ی مراکز بحران در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم
E	مجموعه‌ی نقاط حادثه‌دیده
S	مجموعه‌ی پناهگاه‌ها
V	مجموعه‌ی وسایل در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم
N	مجموعه‌ی کل نقاط در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم (اجتماع سه مجموعه‌ی D، E و S)

2.4. اندیس‌ها

مجموعه اندیس‌های مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی تخلیه‌ی افراد سالم عبارتند از :

i, j	مجموعه‌ی اندیس گره‌ها در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم	$i , j \in N$
v	مجموعه‌ی اندیس وسایل در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم	$v \in V$

3.4. پارامترها

پارامترهای مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی تخلیه‌ی افراد سالم عبارتند از :

c_{ij}	زمان حمل و نقل از گره‌ی $i \in N$ به گره‌ی $j \in N$
d_i	مقدار تقاضای نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی $i \in E$
Cap_i	ظرفیت پناهگاه $i \in S$ برای تخلیه‌ی افراد سالم
b_i	حداکثر زمان رسدن به گره‌ی $i \in E \bigcup S$
Cap_v	ظرفیت وسیله‌ی $v \in V$
n	حداکثر تعداد وسایل در دسترس برای فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم
Dt_i	زمان ارائه‌ی خدمت در گره‌ی $i \in E \bigcup S$
M	عدد خیلی بزرگ

4.4. متغیرها

متغیرهای تصمیم مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی تخلیه‌ی افراد سالم عبارتند از :

X_{vij} برابر یک 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 یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in E \bigcup S$ تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است.

Z_v برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است.

Q_{vi} تعداد افرادی که در نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی $i \in E$ توسط وسیله‌ی $v \in V$ بارگیری می‌شوند یا تعداد افرادی که توسط وسیله‌ی $v \in V$ در پناهگاه $i \in S$ تخلیه می‌گردند.

T_{vi} زمان رسیدن وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in N$

5.4. مدل ریاضی

این مدل براساس کمینه‌سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها نوشته شده است.

تابع هدف

$$Min \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} T_{vi} \qquad (1)$$

S.T.

محدودیت‌های مربوط به مسیریابی وسایل امدادی و تعادل جریان در گره‌های شبکه

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in D} X_{vij} = Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in D \cup E} X_{vij} = \sum_{i \in E \cup S} X_{vji} \qquad \forall j \in E, \forall v \in V \qquad (3)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} = d_i \qquad \forall i \in E \qquad (4)$$

$$d_i Y_{vi} \geq Q_{vi} \qquad \forall i \in E, \forall v \in V \qquad (5)$$

$$Y_{vi} \leq Q_{vi} \qquad \forall i \in E, \forall v \in V \qquad (6)$$

$$\sum_{j \in E \cup D} X_{vji} = Y_{vi} \qquad \forall i \in E, \forall v \in V \qquad (7)$$

$$\sum_{j \in E} X_{vji} = Y_{vi} \qquad \forall i \in S, \forall v \in V \qquad (8)$$

$$X_{vii} = 0 \qquad \forall i \in N, \forall v \in V \qquad (9)$$

محدویت‌های مرتبط با تعداد و ظرفیت وسایل امدادی و ظرفیت پناهگاه‌ها

$$\sum_{i \in E} Q_{vi} \leq Cap_v Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (10)$$

$$Q_{vi} \leq Cap_v Y_{vi} \qquad \forall i \in S, \forall v \in V \qquad (11)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} \leq Cap_i \qquad \forall i \in S \qquad (12)$$

$$\sum_{i \in S} Q_{vi} = \sum_{i \in E} Q_{vi} \qquad \forall v \in V \qquad (13)$$

$$\sum_{v \in V} Z_v \leq n \quad (14)$$

محدودیت‌های مرتبط با زمان‌بندی حرکت وسایل امدادی و رعایت پنجره‌های زمانی

$$T_{vi} = 0 \qquad \forall i \in D, \forall v \in V \quad (15)$$

$$\left(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}\right) - M\left(1 - X_{vij}\right) \leq T_{vj} \qquad \forall j \in E, \forall v \in V, \forall i \in D \cup E \quad (16)$$

$$\left(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}\right) - M\left(1 - X_{vij}\right) \leq T_{vj} \qquad \forall j \in S, \forall v \in V, \forall i \in E \quad (17)$$

$$T_{vi} \leq b_i \qquad \forall v \in V, \forall i \in E \cup S \quad (18)$$

محدودیت‌های مربوط به مشخص نمودن نوع متغیرها

$$X_{vij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall v \in V \quad (19)$$

$$Y_{vi} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (20)$$

$$Z_v \in \{0,1\} \qquad \forall v \in V \quad (21)$$

$$Q_{vi} \geq 0 \qquad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (22)$$

$$T_{vi} \geq 0 \qquad \forall i \in N, \forall v \in V \quad (23)$$

تابع هدف (1) بیان کننده‌ی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است. محدودیت (2) بیانگر این است که اگر وسیله‌ای اعزام شود باید فقط از یک مرکز بحران حرکت خود را آغاز کند. محدودیت (3) نشان دهنده‌ی محدودیت حفاظت جریان در نقاط حادثه‌دیده است. محدودیت (4) بیان‌گر تخلیه‌ی تمام افراد هر منطقه‌ی آسیب‌دیده از محل حادثه است. محدودیت (5) و (6) نشان دهنده‌ی رابطه‌ی بین دو متغیر Q_{vi} و Y_{vi} در هر منطقه‌ی آسیب‌دیده است که در محدودیت (5) زمانی که Q_{vi} مقدار بزرگتر از صفر می‌گیرد سبب می‌شود که Y_{vi} مقدار یک را اختیار کند و در محدودیت (6) زمانی که Q_{vi} مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود Y_{vi} مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت (7) بیان کننده‌ی این است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه‌ی حادثه‌دیده اختصاص یابد قبل از آن منطقه، فقط یک مرکز بحران یا یک منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی دیگری وجود دارد. محدودیت (8) نشان دهنده‌ی این است که اگر وسیله‌ای به یک پناهگاه اختصاص یابد قبل از آن پناهگاه فقط یک منطقه‌ی حادثه‌دیده قرار گرفته است. محدودیت (9) از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت (10) بیان کننده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله‌ی امدادی است. محدودیت (11) بیان کننده‌ی رابطه‌ی بین دو

متغیر Q_{vi} و Y_{vi} در هر پناهگاه است. محدودیت (12) نشان دهنده‌ی حداکثر ظرفیت هر پناهگاه است. محدودیت (13) بیانگر این است که تعداد افرادی که از مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف به هر وسیله‌ی امدادی اختصاص می‌یابند تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت (14) نشان دهنده‌ی حداکثر تعداد وسایل امدادی در دسترس است. محدودیت (15) بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله از هر مرکز بحران صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت (16) و (17) زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده و هر پناهگاه را نشان می‌دهد. محدودیت (18) بیانگر پنجره‌ی زمانی مربوط به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است. محدودیت‌های (19)، (20)، (21)، (22) و (23) نشان دهنده‌ی نوع متغیرها است.

5. معرفی مثال عددی

1.5. شرح مثال

مثال معرفی شده شامل هفت گره است که گره‌های 1 و 2 به عنوان مراکز بحران و گره‌های 3، 4 و 5 به عنوان مناطق حادثه‌دیده و گره‌های 6 و 7 به عنوان پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده‌اند و حداکثر سه وسیله‌ی امدادی در دسترس است که ظرفیت هر کدام از وسایل 14 نفر در نظر گرفته شده است. در جدول (1) اطلاعات مورد نیاز برای این هفت گره بیان گردیده است.

جدول (1) اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه

گره‌ها	مقدار تقاضا (نفر) (d_i)	ظرفیت (نفر) (Cap_i)	پنجره‌ی زمانی (واحد زمانی) (b_i)	زمان ارائه‌ی خدمت (واحد زمانی) (Dt_i)
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	20	-	60	15
4	10	-	60	15
5	10	-	60	15
6	-	30	90	15
7	-	30	90	15

زمان‌های حمل و نقل بین تمام گره‌های شبکه در جدول (2) نشان داده شده است.

جدول (2) زمان‌های حمل و نقل بین تمام گره‌های شبکه (واحد زمانی)

گره‌ها	1	2	3	4	5	6	7
1	-	35	10	20	15	25	30
2	35	-	40	15	25	40	45
3	10	40	-	20	15	20	25
4	20	15	20	-	15	30	35
5	15	25	15	15	-	25	30
6	25	40	20	30	25	-	15
7	30	45	25	35	30	15	-

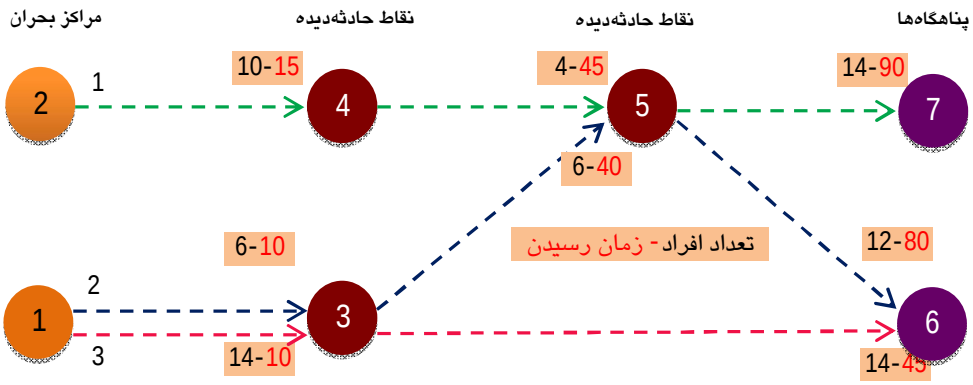
2.5. نتایج

مسأله‌ی انتخابی با استفاده از نرم افزار GAMS 23,0,2 و سالور CPLEX بر روی رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7 4702MQ 2,20GHz up to 3,20 GHz and 6GB RAMDDR3 under Win Seven اجرا شد. زمان حل این مثال با نرم افزار GAMS، 0,17 ثانیه بوده و مقدار کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها 335 واحد زمانی به دست آمده است. نتایج حل مدل بر روی مثال در نظر گرفته شده در جدول (3) نشان داده شده است.

جدول (3) نتایج حل مدل

وسایل امدادی	مسیر پیموده شده	تعداد افرادی که در هر مسیر سوار یا پیاده می‌شوند (نفر)	زمان رسیدن به هر گره در هر مسیر (واحد زمانی)
1	2-4-5-7	0-10-4-14	0-15-45-90
2	1-3-5-6	0-6-6-12	0-10-40-80
3	1-3-6	0-14-14	0-10-45

در جدول (3) مسیر حرکت هر وسیله‌ی امدادی، تعداد افرادی که در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده سوار وسیله و در پناهگاه مربوطه پیاده می‌شوند و زمان رسیدن وسیله‌ی امدادی به هر یک از مناطق آسیب‌دیده و پناهگاهی که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است. به عنوان نمونه وسیله‌ی امدادی 1 از مرکز بحران 2 حرکت خود را آغاز کرده و سپس در منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی 4، 10 نفر را پس از گذشت 15 واحد زمانی از لحظه‌ی شروع حرکت، سوار کرده و به منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی 5 رفته و در آن‌جا 4 نفر را پس از گذشت 45 واحد زمانی سوار کرده و در نهایت پس از گذشت 90 واحد زمانی به پناهگاه 7 می‌رسد و 14 نفر را در این پناهگاه پیاده می‌کند.

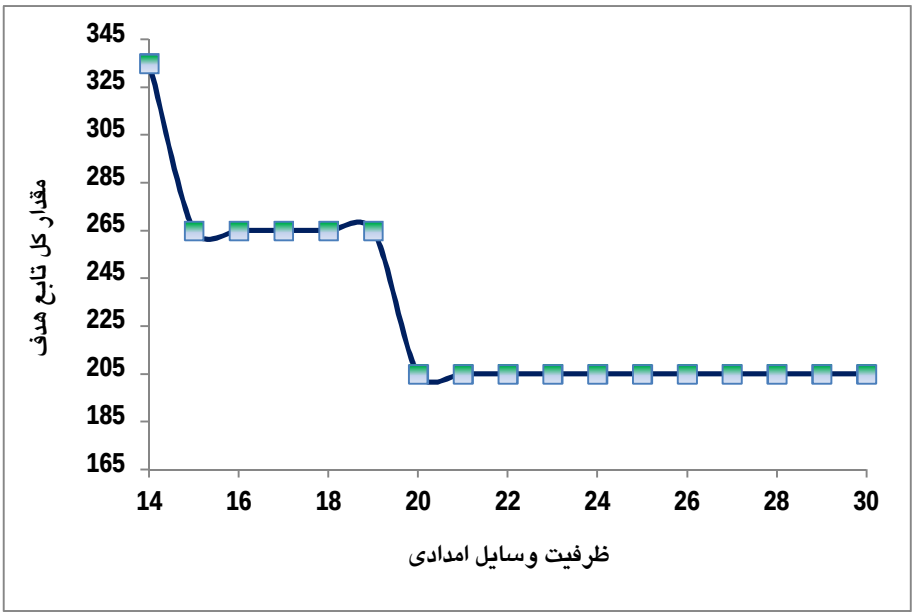


شکل (2) نتایج حل مدل به صورت گرافیکی

شکل (2) نتایج حل مدل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. اعداد روی کمان‌ها در مراکز بحران، بیانگر شماره‌ی وسیله‌ی امدادی است، که از آن مرکز بحران حرکت خود را آغاز نموده است، اعداد روی کمان‌ها در نقاط حادثه‌دیده، تعداد افرادی را که در آن مناطق آسیب‌دیده سوار وسیله‌ی مربوطه شده و همچنین زمان رسیدن وسیله به آن منطقه را نشان می‌دهد و اعداد روی کمان‌ها در پناهگاه‌ها، تعداد افرادی را که در آن پناهگاه از وسیله‌ی مربوطه پیاده شده و زمان رسیدن وسیله به آن منطقه را بیان می‌کند.

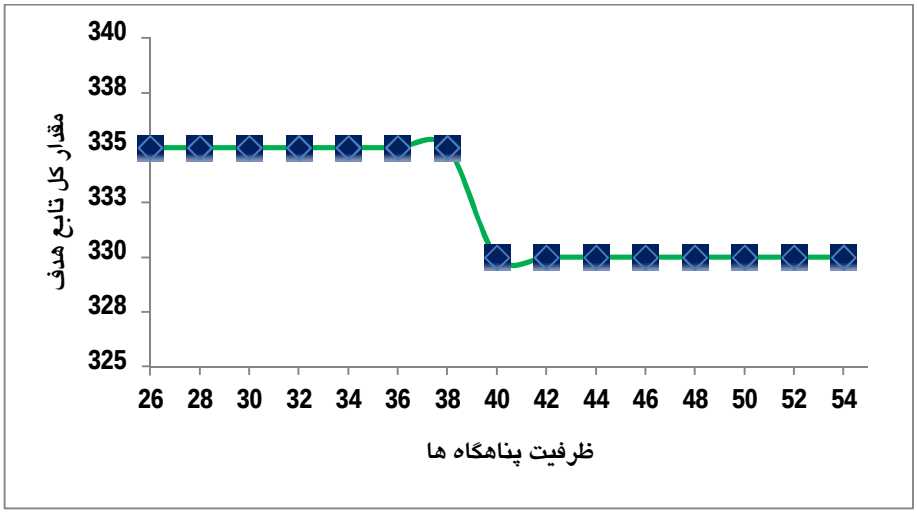
3.5. آنالیز حساسیت

در ادامه دو تحلیل حساسیت برای بیان تأثیر تغییر در پارامترهای ورودی، روی خروجی‌های مدل نشان داده شده است.



شکل (3) نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت وسایل امدادی

در شکل (3) میزان تغییر کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها به ازای تغییر در ظرفیت وسایل امدادی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (3) ملاحظه می‌شود با افزایش ظرفیت وسایل امدادی از 14 نفر به 15 نفر، کل زمان سفر افراد به میزان 70 واحد زمانی کاهش می‌یابد و با افزایش ظرفیت تا مقدار 20 نفر، مقدار کل تابع هدف کاهش یافته اما ظرفیت‌های بیشتر از این مقدار در مقدار کل زمان سفر تأثیری ندارد. همچنین مدل برای ظرفیت‌های کمتر از مقدار 14 نفر، جواب موجه ندارد.



شکل (4) نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت پناهگاه‌ها

در شکل (4) میزان تغییر کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها به ازای تغییر در ظرفیت پناهگاه-ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (4) ملاحظه می‌شود با افزایش ظرفیت پناهگاه‌ها از 38 نفر به 40 نفر، کل زمان سفر افراد به میزان 5 واحد زمانی کاهش می‌یابد و با افزایش ظرفیت تا مقدار40 نفر مقدار کل تابع هدف کاهش یافته، اما ظرفیت‌های بیشتر از این مقدار در مقدار کل زمان سفر تأثیری ندارد. همچنین مدل برای ظرفیت‌های کمتر از مقدار 26 نفر، جواب موجه ندارد.

تأیید اعتبار مدل از آن جهت اثبات می‌گردد که این مقاله مبتنی بر مدل‌های مسیریابی و زمان‌بندی و توسعه‌ای بر مدل‌های [4, 5] می‌باشد که به عنوان مدل‌های پایه در نظر گرفته شده بودند. از طرفی تعریف مسئله با فرضیات جدید و طراحی و مدل‌سازی شبکه از طریق دریافت نظرات افراد خبره صحه‌گذاری شده است. همچنین حل صحیح مدل در محیط نرم افزاری و آنالیز حساسیت‌های مختلف صورت گرفته، نشان از تأیید منطق روابط موجود بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی همزمان عملیات تخلیه‌ی افراد سالم در زمان وقوع فاجعه ارائه گردید. نوآوری این مقاله نسبت به مطالعات پیشین، در نظر گرفتن مسأله‌ی

مسیریابی و زمان‌بندی همزمان برای یک شبکه‌ی سه سطحی شامل چندین مرکز بحران، مناطق آسیب‌دیده و پناهگاه‌ها است که امکان خدمت‌دهی به افراد سالم در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله و امکان خدمت گرفتن از هر پناهگاه توسط چندین وسیله در نظر گرفته شده است. برای این‌که مسأله به مسأله‌ی دنیای واقعی نزدیک‌تر شود محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل، محدودیت ظرفیت پناهگاه‌ها و محدودیت پنجره‌های زمانی برای رسیدن وسایل به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده و به هر پناهگاه لحاظ شده تا بتوان بحران را بهتر مدیریت کرد. هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است. در ادامه به منظور اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا، حل و تحلیل حساسیت گردید.

معمولا در هنگام وقوع بحران و به خصوص در فاز پاسخ، اقدامات بدون برنامه‌ریزی مناسب انجام می‌گیرد، که این امر مشکلات عدیده‌ای را به دنبال دارد. این در حالی است که می‌توان با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی از جمله روش‌های مطرح شده در تحقیق در عملیات (OR)، برنامه‌ریزی‌ها و تصمیمات را بهینه کرده و آسیب‌های ناشی از سوء مدیریت را به میزان قابل توجهی کاهش داد. به همین دلیل در مقاله‌ی ارائه شده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به عنوان یک ابزار کارآمد در بهینه‌سازی تصمیم‌ها استفاده شده است تا مدیران حوزه‌ی مدیریت بحران را در جهت ارائه‌ی یک برنامه‌ی منسجم یاری داده و بهره‌وری تصمیمات اتخاذ شده در فاز پاسخ را افزایش دهد. در واقع مدل ارائه شده این قابلیت را دارد که در هنگام وقوع بحران بر روی آمار و اطلاعات اولیه‌ی به دست آمده از مناطق حادثه دیده و براساس نظرات تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت بحران، اجرا شود به این معنا که مدل انعطاف‌پذیر بوده و به راحتی بر روی مجموعه فاکتورهای مهم، قابلیت اجرا دارد و براساس نتایج و خروجی‌های مدل، بهترین اقدامات (مسیریابی و زمان‌بندی حرکت وسایل امدادی) در جهت امداد و نجات افراد حادثه دیده صورت گیرد.

از طرفی یکی از مسائل مهم از دیدگاه تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت بحران، ارائه‌ی خدمات به بازماندگان تمام مناطق آسیب‌دیده در کمترین زمان ممکن است که در مدل ارائه شده با یکپارچه‌سازی دو مسأله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی و با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از محدودیت‌های منطبق بر دنیای واقعی، انتخاب مسیر حرکت هر وسیله‌ی امدادرسانی برای دیدار نقاط حادثه دیده و پناهگاه‌ها با توجه به حداکثر زمان مجاز برای خدمت‌رسانی به این مناطق انجام می‌گیرد که این امر سبب برقراری عدالت در ارائه‌ی خدمات، میان نقاط آسیب دیده می‌گردد.

برای تحقیقات آتی می‌توان موارد زیر را پیشنهاد نمود : 1- توسعه مدل حاضر در حالت چنددوره‌ای و اهداف چندگانه؛ 2- توجه به بحث تأمین اقلام امدادی مورد نیاز پناهگاها در شرایط بحران 3- در نظر گرفتن وسایل حمل و نقل متفاوت زمینی و هوایی 4- استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ. 5- اجرای مدل پیشنهادی بر روی مسائل و شبکه‌های دنیای واقعی.

منابع

[۱] A. R. Akkihal, "Inventory pre-positioning for humanitarian operations," Massachusetts Institute of Technology, ۲۰۰٦.

[۲] K. Eshghi and R. C. Larson, "Disasters: lessons from the past ۱۰۵ years," *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. ۱۷, pp. ٦۲-۸۲, ۲۰۰۸.

[۳] S. U. Ngueveu, C. Prins, and R. W. Calvo, "An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. ۳۷, pp. ۱۸۷۷-۱۸۸۵, ۲۰۱۰.

[٤] D. R. Bish, "Planning for a bus-based evacuation," *OR spectrum*, vol. ۳۳, pp. ٦۲۹-٦٥٤, ۲۰۱۱.

[٥] H. Abdelgawad and B. Abdulhai, "Large-scale evacuation using subway and bus transit: approach and application in city of Toronto," *Journal of Transportation Engineering*, vol. ۱۳۸, pp. ۱۲۱٥-۱۲۳۲, ۲۰۱۱.

[٦] M. Hamedi, A. Haghani, and S. Yang, "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. ٥٤, pp. ۱۲۰٥-۱۲۱۹, ۲۰۱۲.

[۷] G. M. Ribeiro and G. Laporte, "An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. ۳۹, pp. ۷۲۸-۷۳٥, ۲۰۱۲.

[۸] S. Wohlgemuth, R. Oloruntoba, and U. Clausen, "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. ٤٦, pp. ۲٦۱-۲۷۱, ۲۰۱۲.

[۹] F. Wex, G. Schryen, and D. Neumann, "Operational emergency response under informational uncertainty: a fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units," ۲۰۱۲.

[۱۰] X. Gan, Y. Wang, Y. Yu, and B. Niu, "An emergency vehicle scheduling problem with time utility based on particle swarm optimization," in *Proceedings of the ۹th international conference on Intelligent Computing Theories and Technology*, ۲۰۱۳, pp. ٦۱٤-٦۲۳.

[۱۱] L. Ke and Z. Feng, "A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. ٤۰, pp. ٦۳۳-٦۳۸, ۲۰۱۳.

[۱۲] F. B. Ozsoydan and A. Sipahioglu, "Heuristic solution approaches for the cumulative capacitated vehicle routing problem," *Optimization*, vol. ٦۲, pp. ۱۳۲۱-۱۳٤۰, ۲۰۱۳.

[۱۳] K. Lee, L. Lei, M. Pinedo, and S. Wang, "Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations," *International Journal of Production Research*, vol. ٥۱, pp. ۷۰۷۱-۷۰۹۰, ۲۰۱۳.

[۱٤] K. Lee, L. Lei, and H. Dong, "A Solvable Case of Emergency Supply Chain Scheduling Problem with Multi-stage Lead Times," *Journal of Supply Chain and Operations Management*, vol. ۱۱, p. ۳۰, ۲۰۱۳.

[۱٥] A. Pramudita, E. Taniguchi, and A. G. Qureshi, "Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. ۱۲٥, pp. ٤٤٥-٤٥۸, ۲۰۱٤.

[۱٦] L. Özdamar, D. T. Aksu, and B. Ergüneş, "Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. ٤۸, pp. ۲٤۹-۲٦۲, ۲۰۱٤.

[۱۷] X. Gan, Y. Wang, J. Kuang, Y. Yu, and B. Niu, "Emergency Vehicle Scheduling Problem with Time Utility in Disasters," *Mathematical Problems in Engineering*, ۲۰۱٤.

[۱۸] F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, and D. Neumann, "Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units," *European Journal of Operational Research*, vol. ۲۳٥, pp. ٦۹۷-۷۰۸, ۲۰۱٤.