

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال

مجروحان ناشی از زلزله

صدیقه خوشه‌چین بهار (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، برنامه‌ریزی و مدیریت تولید، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

E-mail: s.khoushehchin_bahar@srbiau.ac.ir

مهدی نجفی، استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

سید محمد حاجی مولانا، استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

با توجه به افزایش قابل توجه ازدحام ترافیک بر زمان سفر و وابستگی نجات جان مجروحان ناشی از زلزله به سرعت امداد رسانی و انتقال به بیمارستان‌ها جهت کاهش تلفات انسانی، در این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه اضطراری (VRP) در فاز پاسخ به زلزله با در نظر گرفتن تأثیر ترافیک در زمان سفر از طریق تابع توسعه‌یافته BPR با هدف انتقال سریع مصدومان با اولویت‌های امداد رسانی مختلف، از مناطق زلزله‌زده به بیمارستان‌ها پرداخته شده است. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) چند هدفه، چند حالتی و چند دوره‌ای پیشنهادی مبتنی بر شبکه، به صورت بهینه‌سازی قطعی فرموله شده و جهت خطی‌سازی روابط ریاضی، از برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر و تکنیک تابع قطعه‌قطعه خطی استفاده می‌گردد. مدل چند هدفه دارای اهداف بشر دوستانه، هزینه‌ای و زمان است که به روش ترکیبی سلسله‌مراتبی لگژیوگرافیک و مجموع وزنی حل می‌شود. عملکرد مدل با یک مسئله فرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد که پس از کد نمودن با نرم‌افزار GAMS و حل آن از طریق CPLEX، نتایج به دست آمده، حاکی از عملکرد مناسب مدل در حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه امدادی و انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها در کوتاه‌ترین مسیر از نظر فاصله زمانی است.

واژه‌های کلیدی: حمل و نقل مصدومان، برنامه‌ریزی وسایل نقلیه، ازدحام ترافیک، تابع BPR، تابع قطعه‌قطعه خطی

۱. مقدمه

یک شبکه جاده‌ای استفاده می‌کنند از ظرفیت طراحی شبکه حمل‌ونقل تجاوز نماید. به دلیل محدودیت زمان طلایی امداد رسانی، خطر مرگ‌ومیر با گذشت زمان به شدت افزایش می‌یابد، لذا، برنامه‌ریزی برای مدیریت صحیح منابع و تخصیص وسایل نقلیه اورژانسی به مسیرها و بیمارستان‌ها و انتقال سریع مصدومان به مراکز درمانی با توجه به نقش ازدحام ترافیک در افزایش زمان سفر، از اهمیت بالایی برخوردار است. تابع BPR که توسط اداره راه‌های عمومی ایالات متحده در سال ۱۹۶۴ معرفی شده، قادر به مدل کردن ترافیک و تأثیر آن در زمان سفر است که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته است.

هدف این مقاله، توسعه یک رویکرد عملی برای انتقال سریع مصدومان در فاز پاسخ به زلزله با توجه به شرایط دنیای واقعی و پاسخ به برخی سؤالات است از قبیل اینک: چگونه ازدحام ترافیک بر برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مصدومان تأثیر می‌گذارد؟ چگونه می‌توان مسئله مسیریابی وسایل نقلیه برای انتقال مصدومان به نزدیک‌ترین بیمارستان‌ها از نظر کوتاه‌ترین فاصله زمانی را مدل کرد؟ تأثیر اولویت خدمت‌رسانی به دو گروه از مصدومان و هزینه استفاده از وسایل نقلیه اورژانسی زمینی و هوایی بر نحوه تخصیص منابع وسایل نقلیه و تخت‌های بیمارستانی به مجروحان چگونه است؟

برای حل مسئله، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) پیشنهاد می‌گردد که به منظور مدیریت انتقال مصدومان در فاز پاسخ به زلزله، شرایط دنیای واقعی همچون ازدحام ترافیک در سیستم حمل‌ونقل شهری، جریان‌های متنوع وسایل نقلیه عبوری و اورژانسی را در نظر می‌گیرد. مسئله به روش ابتکاری برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر با استفاده از تکنیک تابع قطعه‌قطعه خطی، مجدداً جهت خطی سازی فرموله می‌شود. سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر است.

بخش ۲ به مرور ادبیات و مقالات مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. بخش ۳ به تعریف مسئله و مدل ریاضی بهینه

زلزله از جمله بلاای طبیعی است که به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن دقیق زمان و مکان وقوع آن، گاهی منجر به خسارات مالی فراوان و تلفات انسانی تأسّف‌بار می‌شود. مدیریت فجایع معمولاً از طریق چهار فاز پیشگیری، آمادگی، پاسخ و بازسازی صورت می‌پذیرد. برای مثال، مکان‌یابی تسهیلات و پیش موقعیت‌یابی موجودی در فاز پیش از بحران انجام می‌شود، درحالی‌که عملیات مربوط به توزیع کمک‌های امدادی و انتقال مصدومان در فاز پس از بحران مورد توجه قرار دارد. برنامه‌ریزی انتقال سریع مصدومان به نزدیک‌ترین بیمارستان‌ها یکی از چالش‌های اصلی در فاز پاسخ به بلاای طبیعی همچون زلزله است که خود متأثر از ازدحام ترافیک و اختلال در سیستم حمل‌ونقل شهری است که منجر به افزایش قابل توجه زمان سفر وسایل نقلیه اضطراری و زمان امداد رسانی به مجروحان فاجعه می‌شود.

ایران یکی از کشورهای زلزله‌خیز دنیا است که شاهد وقوع زلزله های سهمگین و مرگ‌باری همچون زلزله سال ۱۳۵۷ طمس، زلزله سال ۱۳۶۹ رودبار- منجیل، زلزله سال ۱۳۸۲ بم، زلزله سال ۱۳۹۱ ورزقان و زلزله ۵٫۹ ریشتری خوی در سال ۱۴۰۱ بوده است. با توجه به گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشور، در سال ۱۴۰۰ تعداد ۸۶۳۰ زمین‌لرزه به ثبت رسیده است و آمارها نشان می‌دهند، در این مدت، به‌طور متوسط در همراه حداقل یک زمین لرزه با بزرگی بیش از ۵ ریشتر رخ داده است. همچنین تعداد ۱۴۴ زمین‌لرزه در استان تهران ثبت شد که بزرگ‌ترین آن‌ها در حوالی پردیس با بزرگی ۳/۹ ریشتر بوده است.

انتقال مصدومان یکی از فعالیت‌های حیاتی لجستیک اضطراری است که شامل تخلیه مجروحان از نقاط آسیب‌دیده به مراکز درمانی است. زمان نقش حیاتی در سیستم لجستیک امداد ایفا می‌کند و ازدحام ترافیک، یکی از فاکتورهای حیاتی است که منجر به تأخیر در عملیات بشردوستانه شده و موجب افزایش زمان تخلیه مجروحان پس از فاجعه می‌شود. ازدحام ترافیک، شرایطی از تأخیر ترافیکی است که در آن وسایل نقلیه‌ای که از

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال مجروحان ناشی از زلزله

در سال ۲۰۱۹ بیان نمودند که تابع BPR در تأثیر ازدحام ترافیک در مدل‌های برنامه‌ریزی تأمین اضطراری استفاده نشده است. در این میان، تحقیق وانگ در سال ۲۰۱۸ در حوزه مدیریت زنجیره تأمین اضطراری از طریق تابع BPR انجام شده است، اما مسائل موردبررسی در زمینه مکان‌یابی انبار، پیش‌مکان‌یابی موجودی و سیاست‌های کنترل ترافیک نزدیک به حوزه موردتحقیق مقاله ما نیست. همچنین توکلی مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۶، با الهام از مقاله نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۳، برنامه‌ریزی لجستیکی انتقال مصدومان و توزیع کالاهای امدادی در فاز پاسخ به زلزله و تأثیر تأخیر ترافیک ناشی از کاهش ظرفیت راه و وقوع پس‌لرزه‌ها بدون استفاده از تابع BPR را موردبررسی قرار دادند و یک مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی چندهدفه، چندحالتی و چند کالایی را با قابلیت اطمینان مسیر فرموله و آن را با یک رویکرد فازی TH حل و با طراحی مسئله فرضی وقوع زلزله در شهر تبریز عملکرد مدل را بررسی و ارزیابی نمودند.

با توجه به بررسی تحقیقات انجام‌شده و عدم وجود کار مشابه در زمینه لجستیک انتقال مصدومان در فاز پاسخ به زلزله با استفاده از تابع BPR، ما از مدل بهینه‌سازی قطعی مقاله نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به‌عنوان مدل پایه استفاده نموده و یک مدل چند هدفه، چندحالتی و چند دوره‌ای طراحی و توسعه داده می‌شود. مقاله نجفی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی استوار چند هدفه، چند کالایی، چندحالتی و چند دوره‌ای است که هر دو فعالیت توزیع کالا و انتقال مصدومان در فاز پاسخ به زلزله را در نظر می‌گیرد و اهداف آن از نوع بشردوستانه و هزینه‌ای هستند که به‌صورت لکزیکوگرافیک با اولویت بالاتر خدمت‌رسانی به مجروحان نسبت به سایر اهداف حل می‌شوند.

۳. روش پژوهش

شبکه مبتنی بر جریان موردبررسی $G(N, A)$ شامل مجموعه N گره با اندیس‌های n, m و A کمان است. مکان نقاط آسیب‌دیده (D) ، بیمارستان‌ها (H) و همچنین نقاط میانی (I) که در آن‌ها امکان تبادل مجروحان بین آمبولانس‌ها و هلیکوپترها میسر است،

سازی غیرخطی قطعی جهت انتقال مصدومان از مناطق زلزله‌زده به بیمارستان‌ها با استفاده از تابع BPR توسعه‌یافته و همه‌نشانه‌های استفاده‌شده جهت فرموله کردن مدل و همچنین فرضیات تحقیق اختصاص دارد. بخش ۴ به رویکرد حل و روش خطی سازی مدل به روش ابتکاری می‌پردازد. در بخش ۵ پیاده‌سازی مدل در مقیاس کوچک، جهت بررسی عملکرد مدل طراحی و اجرا می‌شود و سرانجام در بخش ۶ نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. ادبیات پژوهش

تابع BPR یک تابع محدب، غیر کاهشی و مشتق‌پذیر است که ارتباط بین زمان سفر (یا سرعت) و حجم ترافیک روی بخش جاده را بیان می‌کند و به‌صورت فرمول (۱) زیر توسط اداره راه‌های عمومی ایالات‌متحده پیشنهاد شده است.

$$t(x) = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x}{c}\right)^\beta\right) \quad \alpha = 0.15, \beta = 4 \quad (1)$$

که $t(x)$ زمان سفری است که در آن حجم اختصاص‌یافته x می‌تواند روی بخش جاده در واحد زمان سفر نماید، c ظرفیت عملی راه (حداکثر نرخ جریان) در واحد زمان و t_0 زمان سفر جریان آزاد در حجم صفر است. پارامترهای $\alpha \geq 0$ و $\beta \geq 0$ پارامترهای تنظیم تابع هستند.

با توجه به بررسی انجام‌شده روی مقالات مرتبط با برنامه‌ریزی لجستیک اضطراری در فاز پاسخ به زلزله با تمرکز بر مسئله انتقال مصدومان و تأثیر ازدحام ترافیک در زمان سفر از طریق تابع BPR، می‌توان گفت مطالعات کمی در خصوص بررسی ازدحام ترافیک در لجستیک بشردوستانه انجام شده است و عمده مقالاتی نیز که به بررسی تأخیرات ناشی از ازدحام ترافیک پرداختند به مسئله تخصیص ترافیک برای برنامه‌ریزی تخلیه افراد به مناطق امن و پناهگاه‌ها یا قابلیت اطمینان شبکه توجه نمودند. برای مثال فراهانی و همکاران در مقاله مروری سال ۲۰۲۰ اشاره نمودند که هیچ‌یک از مقالات، از تابع BPR برای انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها در فاز پاسخ به زلزله استفاده نکردند و وانگ و نی فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و سوم/ شماره ۹۴ / پاییز ۱۴۰۲

گره آسیب‌دیده d و توزیع‌شده از گره n به گره m در زمان t توسط وسیله نقلیه نوع v با Y_{wnmt}^{dv} نمایش داده شده است. همچنین متغیر Λ_{nt}^v مربوط به تعداد وسایل نقلیه در دسترس در گره n در زمان t است. متغیرهای Q_{wit}^v و R_{wit}^v به ترتیب تعداد مجروحان نوع w که از یک نوع وسیله نقلیه به وسیله نقلیه نوع دیگر در گره میانی i منتقل می‌شوند و بالعکس مجروحان دریافتی را محاسبه می‌کند. همچنین تابع BPR توسعه‌یافته به‌عنوان زمان واقعی سفر برای پیمودن لینک (n, m) توسط وسیله نقلیه نوع v در زمان t با نشانه Θ_{nmt}^v نمایش داده شده است. در ادامه این بخش، فرمول ریاضی مدل پایه، مدل غیرخطی پایه با اعمال ازدحام ترافیک و روش حل جهت خطی سازی روابط مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود.

۳-۱ فرمول ریاضی مدل پایه (The Basic MIP)

با الهام از مدل ریاضی نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۳، مدل پایه با رویکرد بهینه‌سازی قطعی به‌صورت زیر فرموله شده است.

$$\text{Min } \pi = \pi_1 + \varepsilon \pi_2 \quad (2)$$

$$\text{Min } \pi_1 = \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \rho_w G_{wdt} \quad (3)$$

$$\text{Min } \pi_1 = \sum_{n \in N} \sum_{m \in N} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T, \theta_{nm}^v > 0} \rho'_v Z_{nmt}^v \quad (4)$$

تابع هدف (۳)، مجموع وزنی کل مجروحان خدمت‌رسانی نشده و تابع هدف (۴)، تعداد کل وسایل نقلیه مورد‌استفاده در طی دوره برنامه‌ریزی را حداقل می‌کند. به‌منظور اجتناب از حرکت غیرضروری وسایل نقلیه امدادی، هزینه به‌کارگیری آن‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور کاهش حجم محاسبات حل مدل چند هدفه، از روش ترکیبی لکزیکوگرافی و مجموع وزنی برای تابع هدف کل استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت بالای جان انسان‌ها نسبت به هزینه‌های امداد، تابع هدف (۲) به نحوی فرموله شده است که بالاترین اولویت، جهت خدمت‌رسانی به مجروحان به تابع هدف (۳) اختصاص‌یافته و اولویت بسیار ناچیزی به‌اندازه اسپیلون برای تابع هدف (۴) در نظر گرفته شده است. این توابع به‌صورت مجموع وزنی با یکدیگر ترکیب شده

مشخص است. همچنین مجموعه (P) شامل همه گره‌ها به‌جز گره‌های بیمارستانی است. دو نوع مجروحان (W) با مصدومیت شدید $W1$ و متوسط $(W2)$ با اولویت خدمت‌رسانی مختلف ρ_w به ترتیب ۰٫۲، ۰٫۸، ۰٫۲ تعریف شده‌اند. همچنین دو نوع وسیله نقلیه امدادی (V) شامل هلیکوپتر v_h و آمبولانس v_b کار خدمت‌رسانی و انتقال مجروحان را انجام می‌دهند. تعداد وسایل نقلیه اورژانسی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی و مقادیر افزوده‌شده به هر گره n در زمان t که با λ_{nt}^v نشان داده می‌شود و ظرفیت آن‌ها برای حمل مجروحان η^v مشخص و محدود بوده و هزینه استفاده ρ_v از هلیکوپتر بیشتر از هزینه استفاده آمبولانس تعیین شده است. خدمت‌رسانی به مجروحان هنگامی خاتمه یافته تلقی می‌شود که به بیمارستان‌ها تحویل داده شوند. زمان سفر جریان آزاد برای عبور وسیله نقلیه نوع v از لینک (n, m) در حجم ترافیک صفر با θ_{nm}^v جریان ترافیک پیش‌زمینه مربوط به وسایل نقلیه مردم عادی عبوری روی لینک (n, m) در زمان t با x_{nmt} و ظرفیت طراحی و عملی راه برای لینک (n, m) با c_{nm} مشخص و قابل احصاء است. طول افق برنامه‌ریزی با T و اندیس های s, t, \hat{t} نشان داده می‌شود. تعداد مجروحان نوع W تخلیه‌شده در گره d در زمان t با ω_{wdt} و ظرفیت بیمارستان h برای درمان مجروحان نوع W در زمان t با Π_{wht} نشان داده شده است. قابلیت حمل وسایل نقلیه برای حمل مجروحان e_w^v با نشان داده می‌شود که اعداد یک یا صفر را می‌گیرند. پارامتر B یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ و پارامتر ε به‌عنوان یک عدد مثبت به اندازه کافی کوچک تعریف شده‌اند. پارامتر باینری δ_{nmt}^v مقدار ۱ را می‌گیرد، اگر وسیله نقلیه نوع v که از گره n در زمان s حرکت می‌کند به گره m قبل از زمان $t + 1$ برسد و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. همچنین برای متغیرهای مدل از نشانه‌های زیر استفاده شده است.

تعداد مجروحان خدمت‌رسانی نشده در گره d در زمان t با G_{wdt} ، تعداد وسایل نقلیه نوع v در حال حرکت از گره n به گره m در زمان t با Z_{nmt}^v و تعداد مجروحان نوع w متعلق به

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال مجروحان ناشی از زلزله

اند و به دلیل مقدار ناچیز ضریب اپسیلون توابع هدف، نیازی به نرمال‌سازی ضرایب وجود ندارد و تأثیر معناداری در نتایج حل مدل به دست نمی‌آید.

$$-\sum_{v \in V} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} \sum_{s \leq t, t|\theta_{nh}^v > 0} Y_{wnhs}^{dv} \delta_{snht}^v + \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} \sum_{m \in N} \sum_{s \leq t, t|\theta_{hm}^v > 0} Y_{whms}^{dv} + \sum_{s \leq t} \omega_{wds} = G_{wdt} \quad \forall d \in D, w \in W, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in N} \sum_{s \leq t, t|\theta_{np}^v > 0} Y_{wnps}^{dv} \delta_{snpt}^v - \sum_{v \in V} \sum_{m \in N} \sum_{s \leq t, t|\theta_{pm}^v > 0} Y_{wpms}^{dv} = 0 \quad \forall p \in P, d \in D, p \neq d, w \in W, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in N} \sum_{s \leq t, t|\theta_{dn}^v > 0} Y_{wdns}^{dv} \leq \sum_{s \leq t} \omega_{wds} \quad \forall d \in D, w \in W, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{m \in N} Y_{wnmt}^{dv} \leq B e_w^v \quad \forall d \in D, w \in W, t \in T \quad (8)$$

حمل می‌شوند. به منظور کاهش زمان حل مدل و حجم محاسبات موردنیاز، می‌توان از معادل محدودیت شماره (۸) یعنی $Y_{wnmt}^{dv} = 0$ استفاده نمود، مشروط به عدم وجود لینک بین دو گره n و m یا اینکه وسیله نقلیه امدادی، مجاز به حمل مجروحان نباشد. محدودیت (۹) تعداد مجروحان منتقل شده بین وسایل نقلیه اورژانسی مجاز در گره‌های میانی را تعریف می‌کند.

محدودیت (۵) تعداد مجروحان خدمت‌رسانی نشده در مناطق آسیب‌دیده را محاسبه می‌کند. محدودیت (۶) جریان مجروحان در گره میانی را تنظیم و تضمین می‌کند که هیچ مجروحویی در گره میانی باقی نماند. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تعداد مجروحان اعزام‌شده از یک گره تقاضای مشخص، بیشتر از تعداد مجروحان شناسایی‌شده در آن گره نیست. محدودیت (۸) اطمینان می‌دهد که همه مجروحان توسط وسایل نقلیه مجاز

$$\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{s \leq t} Y_{wnis}^{dv} (\delta_{snit}^v - \delta_{sni(t-1)}^v) - \sum_{d \in D} \sum_{m \in N} Y_{wimt}^{dv} = Q_{wit}^v - R_{wit}^v \quad \forall d \in D, w \in W, i \in I, v \in V \quad (9)$$

(۹-۱) تعداد مجروحان منتقل شده از یک وسیله نقلیه به دیگری و محدودیت (۹-۲) تعداد مجروحان دریافتی را محاسبه می‌کند.

همچنین جهت نحوه تبادل بین وسایل نقلیه امدادی مختلف می‌توان معادله (۹) را با معادلات (۹-۱) و (۹-۲) جایگزین و پس از به دست آمدن نتایج حل مسئله استخراج نمود. محدودیت

$$Q_{wit}^v = \max \left(0, \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} Y_{wint}^{dv} - \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{s < t} Y_{wnis}^{dv} (\delta_{snit}^v - \delta_{sni(t-1)}^v) \right) \quad \forall d \in D, w \in W, i \in I, v \in V \quad (9-1)$$

$$R_{wit}^v = \max \left(0, -\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} Y_{wint}^{dv} + \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{s < t} Y_{wnis}^{dv} (\delta_{snit}^v - \delta_{sni(t-1)}^v) \right) \quad \forall d \in D, w \in W, i \in I, v \in V \quad (9-2)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{w \in W} Y_{wnmt}^{dv} \leq \eta^v Z_{nm}^v \quad \forall n, m \in N, v \in V, t \in T, t|\theta_{nm}^v > 0 \quad (10)$$

$$Z_{nm}^v \leq B \theta_{nm}^v \quad \forall n, m \in N, v \in V, t \in T \quad (11)$$

وجود لینک ارتباطی محدود می‌کند، می‌تواند با فرمول $Z_{nm}^v = 0$ مشروط به عدم وجود لینک بین دو گره n و m جایگزین شود.

محدودیت (۱۰) تعداد مجروحان توزیع شده را به ظرفیت حمل وسایل نقلیه اورژانسی جهت انتقال مصدومان محدود می‌کند. محدودیت (۱۱) که برنامه سفر هر وسیله نقلیه اضطراری را به

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{s < t, \\ t|\theta_{nm}^v > 0}} Z_{nms}^v \delta_{smt}^v + \sum_{s \leq t} \lambda_{ms}^v = \Lambda_{mt}^v + \sum_{n \in N} \sum_{\substack{s \leq t, \\ t|\theta_{nm}^v > 0}} Z_{mns}^v \quad \forall m \in N, v \in V, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{s \leq t, \\ t|\theta_{nh}^v > 0}} Y_{wnhs}^{dv} \delta_{snht}^v - \sum_{d \in D} \sum_{m \in N} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{s \leq t, \\ t|\theta_{hm}^v > 0}} Y_{whms}^{dv} \leq \sum_{s \leq t} \Pi_{whs} \quad \forall w \in W, h \in H, t \in T \quad (13)$$

$$Y, Z, G, \Lambda \in Z^+ \quad (14)$$

توضیحات قبلی توابع هدف (۳) و (۴) در مدل پایه است. هدف جدیدی به‌عنوان معادله (۱۸) افزوده شده است که برابر با مجموع مقدار واقعی زمان سفر است، اما پیشنهاد این معادله به‌عنوان تابع هدف، به دلیل تنظیم نتایج حل مدل و محدود نمودن سقف زمان واقعی سفر به نزدیک‌ترین عدد صحیح است، زیرا با توجه به فرمول تابع BPR نتایج اعدادی اعشاری هستند، اما دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی اعداد گسسته می‌باشند و ضروری است سقف مقداری که زمان واقعی سفر می‌گیرد، محدود شود. توضیحات معادله (۱۵) مشابه معادله (۱) مدل پایه است.

$$\text{Min } \pi = \pi_1 + \varepsilon \pi_2 + \varepsilon \pi_3 \quad (15)$$

$$\text{Min } \pi_1 = \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \rho_w G_{wdt} \quad (16)$$

$$\text{Min } \pi_2 = \sum_{n \in N} \sum_{m \in N} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{t \in T, \\ \theta_{nm}^v > 0}} \rho'_v Z_{nmt}^v \quad (17)$$

$$\text{Min } \pi_3 = \sum_{n \in N} \sum_{m \in N} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{t \in T, \\ \theta_{nm}^v > 0}} \Theta_{nmt}^v \quad (18)$$

گذاشته و به دلیل ضرب متغیرهای عدد صحیح Y_{wnms}^{dv} در متغیر باینری δ_{nmt}^v روابط مذکور غیرخطی می‌شوند. با تعریف مجدد مقدار δ_{nmt}^v بر اساس زمان واقعی سفر، معادله (۱۹) را خواهیم داشت که رابطه‌ای غیرخطی است.

$$\delta_{smt}^v = \max \left(0, \text{sign} \left(\text{floor} \left(\frac{t-s}{\varepsilon + \Theta_{nmt}^v} \right) \right) \right)$$

ذکر است، زمان واقعی سفر هلیکوپترها، معادل زمان سفر جریان آزاد آن‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه معادله (۲۰) غیرخطی است، ضروری است مانند سایر روابط ریاضی مورد اشاره، جهت خطی سازی آن اقدام شود.

محدودیت (۱۲) جریان وسایل نقلیه روی هر گره را محدود می‌کند. محدودیت (۱۳) تعداد مجروحان اعزامی به بیمارستان‌ها را با توجه به ظرفیت پذیرش بیمارستان برحسب نوع مصدومیت محدود می‌کند. محدودیت (۱۴) مربوط به تعیین نوع متغیرها است.

۲-۳ فرمول مدل ریاضی غیرخطی مدل پایه (The

MINLP BPR)

در فرمول مدل پایه جهت محاسبه زمان واقعی سفر بر اساس تابع BPR تغییراتی داده می‌شود. توابع هدف (۱۶) و (۱۷) مشابه

لازم به ذکر است، به دلیل محاسبه تأثیر ترافیک در زمان سفر از طریق تابع BPR و استفاده از زمان واقعی سفر یعنی Θ_{nmt}^v به‌عنوان یک متغیر عدد صحیح مثبت به‌جای پارامتر زمان سفر جریان آزاد، مقدار δ_{nmt}^v تبدیل به یک متغیر باینری می‌شود که به تبع آن، روی محدودیت‌های (۵)، (۶)، (۹)، (۱۲) و (۱۳) تأثیر

$$\forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, \theta_{nm}^v > 0 \quad (19)$$

لذا، با توسعه معادله اصلی تابع BPR، تغییراتی در جهت اعمال ترافیک پیش‌زمینه وسایل نقلیه عادی عبوری، آمبولانس‌های در حال حرکتی که از دوره‌های قبلی سفر خود را آغاز و هنوز به مقصد نرسیده‌اند و همچنین جریان آمبولانس‌هایی که در دوره مورد بررسی سفر خود را شروع کرده‌اند، داده می‌شود. لازم به

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال مجروحان ناشی از زلزله

$$\Theta_{nmt}^v = \theta_{nm}^v \left(1 + \alpha \left(\frac{x_{nmt} + \sum_{s \leq t} Z_{nms}^v - \sum_{t' \leq t} \sum_{s < t'} (\delta_{snmt'}^v Z_{nmt'}^v - \delta_{snmt'-1}^v Z_{nmt'-1}^v)}{c_{nm}} \right)^\beta \right) \quad (20)$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, s, t, t' \in T, t | \theta_{nm}^v > 0, c_{nm} > 0$$

ترافیک بر زمان سفر از طریق تابع BPR به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود. با نام‌گذاری ضرب متغیرهای عدد صحیح Y_{wnms}^{dv} و Z_{nms}^v در متغیر باینری δ_{nmt}^v به ترتیب با عنوان Y_{wsnmt}^{dv} و Ψ_{snmt}^v ، با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی عدد صحیح روابط غیرخطی مرتبط در محدودیت‌های مدل پایه را خطی سازی می‌کنیم.

۳-۳ روش حل

جهت خطی سازی مدل از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر و تکنیک تابع قطعه‌قطعه خطی استفاده می‌شود. فرمول ریاضی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MIP) برای مسیریابی وسایل نقلیه جهت انتقال مصدومان به نزدیک‌ترین بیمارستان از نظر فاصله زمانی، با اعمال تأثیر ازدحام

$$-\sum_{v \in V} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} \sum_{s \leq t, t | \theta_{nh}^v > 0} \Upsilon_{wsnht}^{dv} + \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} \sum_{m \in N} \sum_{s \leq t, t | \theta_{hm}^v > 0} Y_{whms}^{dv} + \sum_{s \leq t} \omega_{wds} = G_{wdt} \quad \forall d \in D, w \in W, t \in T \quad (21)$$

$$Q_{wit}^v = \max(0, \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} Y_{wint}^{dv} - \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{s < t} (\Upsilon_{wsnit}^{dv} - \Upsilon_{wsnit-1}^{dv})) \quad \forall d \in D, w \in W, i \in I, v \in V \quad (22)$$

$$R_{wit}^v = \max(0, -\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} Y_{wint}^{dv} + \sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{s < t} (\Upsilon_{wsnit}^{dv} - \Upsilon_{wsnit-1}^{dv})) \quad \forall d \in D, w \in W, i \in I, v \in V \quad (23)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in N} \sum_{s \leq t, t | \theta_{np}^v > 0} \Upsilon_{wsnpt}^{dv} - \sum_{v \in V} \sum_{m \in N} \sum_{s \leq t, t | \theta_{pm}^v > 0} Y_{wpms}^{dv} = 0 \quad \forall p \in P, d \in D, p \neq d, w \in W, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{n \in N} \sum_{v \in V} \sum_{s \leq t, t | \theta_{nh}^v > 0} \Upsilon_{wsnht}^{dv} - \sum_{d \in D} \sum_{m \in N} \sum_{v \in V} \sum_{s \leq t, t | \theta_{hm}^v > 0} Y_{whms}^{dv} \leq \sum_{s \leq t} \Pi_{whs} \quad \forall w \in W, h \in H, t \in T \quad (25)$$

$$\Upsilon_{wsnmt}^{dv} \geq Y_{wnms}^{dv} - B(1 - \delta_{snmt}^v) \quad \forall n, m \in N, d \in D, w \in W, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (26)$$

$$\Upsilon_{wsnmt}^{dv} \leq Y_{wnms}^{dv} + B(1 - \delta_{snmt}^v) \quad \forall n, m \in N, d \in D, w \in W, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (27)$$

$$\Upsilon_{wsnmt}^{dv} \leq B \delta_{snmt}^v \quad \forall n, m \in N, d \in D, w \in W, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (28)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{s < t, t | \theta_{nm}^v > 0} \Psi_{snmt}^v + \sum_{s \leq t} \lambda_{ms}^v = \Lambda_{mt}^v + \sum_{n \in N} \sum_{s \leq t, t | \theta_{nm}^v > 0} Z_{nms}^v \quad \forall m \in N, v \in V, t \in T \quad (29)$$

$$\Psi_{snmt}^v \geq Z_{nms}^v - B(1 - \delta_{snmt}^v) \quad \forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (30)$$

$$\Psi_{snmt}^v \leq Z_{nms}^v + B(1 - \delta_{snmt}^v) \quad \forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (31)$$

$$\Psi_{snmt}^v \leq B \delta_{snmt}^v \quad \forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (32)$$

$$\Theta_{nmt}^v \geq (t-s) + \varepsilon - B \delta_{snmt}^v \quad \forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (33)$$

$$\Theta_{nmt}^v \leq (t-s) + B(1 - \delta_{snmt}^v) \quad \forall n, m \in N, v \in V, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (34)$$

$$\Theta_{nmt}^v = \theta_{nm}^v \quad \forall n, m \in N, v \in V_n, s, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (35)$$

خطی است، لذا از تکنیک تابع قطعه‌قطعه خطی برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر برای حل آن استفاده می‌شود.

از آنجاکه تابع چندجمله‌ای و نمایی تابع BPR در معادله (۲۰) غیرخطی است، می‌توان معادله مذکور را با معادله (۳۶) جایگزین نمود، اما همچنان به دلیل وجود تابع درجه چهارم، معادله غیر

$$\Theta_{nmt}^v = \theta_{nm}^v \left(1 + \alpha \left(\frac{x_{nmt} + \sum_{s \leq t} Z_{nms}^v - \sum_{t' \leq t} \sum_{s < t'} (\Psi_{snmt'}^v - \Psi_{snmt'-1}^v)}{c_{nm}} \right)^\beta \right) \quad (36)$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, s, t, t' \in T, t | \theta_{nm}^v > 0, c_{nm} > 0$$

با توجه به روش ارائه‌شده توسط طاها (۲۰۱۷)، برای تابع قطعه‌قطعه خطی، اقدامات زیر را انجام می‌دهیم. اگر k تعداد نقاط شکست باشند، آنگاه a_k برای $k = 1, 2, \dots, K$ به‌عنوان طول نقطه شکست روی محور x -ها است، به‌نحوی که $a_1 < a_2 < \dots < a_k$ و $f(a_k) = 1 + \alpha(a_k)^\beta \dots < a_k$ امین نقطه شکست روی محور y -ها خواهد بود. اگر بخش کسری معادله (۳۶) را Γ_{nmt}^v بنامیم، معادله (۳۷) را خواهیم داشت.

$$\Gamma_{nmt}^v = \left(\frac{x_{nmt} + \sum_{s \leq t} Z_{nms}^v - \sum_{t' \leq t} \sum_{s < t'} (\Psi_{snmt'}^v - \Psi_{snmt'-1}^v)}{c_{nm}} \right)^\beta \quad \forall n, m \in N, v \in V_b, s, t, t' \in T, t | \theta_{nm}^v > 0, c_{nm} > 0 \quad (37)$$

مربوط به مقدار بهینه u_{nmvt}^k باشد، مقدار 1 می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار آن صفر است. متغیرهای ϕ_{nmvt}^k و Γ_{nmt}^v مثبت هستند، اما u_{nmvt}^k یک متغیر باینری است. همواره تعداد قطعات یا توابع تفکیکی یکی کمتر از تعداد نقاط شکست خواهد بود. لذا با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، روابط زیر ارایه می‌شود.

وزن نقطه شکست k به‌عنوان ϕ_{nmvt}^k نامیده می‌شود. حداکثر دو ϕ_k مثبت هستند و اگر ϕ_k مثبت باشد، آنگاه فقط یکی از نقاط مجاور ϕ_{k+1} یا ϕ_{k-1} می‌توانند مقدار مثبت بگیرند. همچنین تابع هدف می‌تواند، با مجموع تعدادی مسائل تکی که هریک بین دو نقطه شکست قرار دارند، تقریب زده شود. نقطه بهینه فقط در یکی از این قطعه‌ها قرار می‌گیرد، بنابراین، اگر قطعه

$$\Theta_{nmt}^v \geq \theta_{nm}^v \Gamma_{nmt}^v$$

$$\Gamma_{nmt}^v = \sum_{k \in K} f(a_k) \phi_{nmvt}^k$$

$$\left(\frac{x_{nmt} + \sum_{s \leq t} Z_{nms}^v - \sum_{t' \leq t} \sum_{s < t'} (\Psi_{snmt'}^v - \Psi_{snmt'-1}^v)}{c_{nm}} \right) = \sum_{k \in K} \phi_{nmvt}^k a_k \quad \forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (40)$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (38)$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (39)$$

$$\phi_{nmvt}^k \leq u_{nmvt}^k + u_{nmvt}^{k-1}$$

$$\sum_{k \in K} \phi_{nmvt}^k = 1$$

$$\sum_{k \in K} u_{nmvt}^k = 1$$

$$Y, Z, G, \Lambda \in Z^+, \Gamma \& \phi \in R^+, \delta \& u \in \{0, 1\}$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (41)$$

$$\forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (42)$$

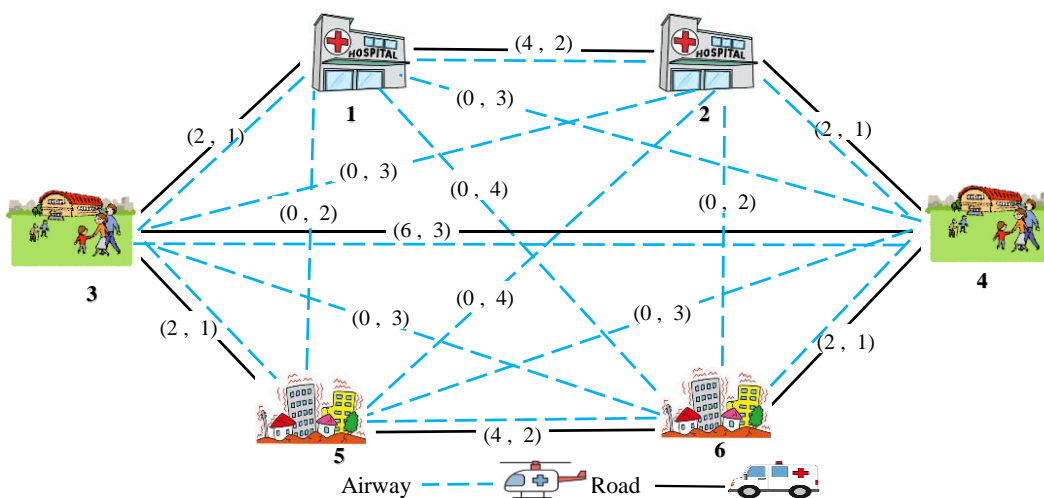
$$\forall n, m \in N, v \in V_b, t \in T, t | \theta_{nm}^v > 0 \quad (43)$$

$$(44)$$

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال مجروحان ناشی از زلزله

۳-۴ پیاده‌سازی مدل در مقیاس کوچک

جهت بررسی عملکرد مدل و ارزیابی نتایج به دست آمده، یک مسئله کوچک با ۶ گره برای ۲۴ دوره برنامه‌ریزی، مطابق شکل ۱ طراحی شده است. در گره‌های ۱ و ۲ بیمارستان‌ها و در گره‌های ۳ و ۴ نقاط میانی قرار دارند. نقاط زلزله زده شامل گره‌های ۵ و ۶ است. اعداد روی کمان‌ها به ترتیب نشان‌دهنده زمان سفر جریان آزاد برای مسیر زمینی و هوایی است. ظرفیت طراحی راه برابر با ۵۰ برابر مقدار تابع یکنواخت در بازه (۱۰ و ۱۲) و مقدار حجم ترافیک وسایل نقلیه عادی عبوری ۱,۳ برابر ظرفیت عملی راه در نظر گرفته شده است. هزینه استفاده از هلیکوپتر برابر با ۰,۹۹ و هزینه استفاده از آمبولانس ۰,۰۱ تعیین شده است و به ترتیب هر یک قابلیت حمل ۱۰ و ۲ بیمار را دارند. برای نوع مصدومان نوع شدید اولویت خدمت‌رسانی ۰,۸ و برای نوع متوسط اولویت ۰,۲ تعیین شده است. عدد بزرگ برابر با ۱۰,۰۰۰ و عدد کوچک اپسیلون معادل ۰,۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در ابتدای برنامه‌ریزی تعداد ۲۵ آمبولانس و ۵ هلیکوپتر در هر یک از گره‌های ۱ و ۲ قرار دارند و مأموریت خود را از آنجا آغاز می‌کنند.



شکل ۱. محل قرارگیری گره‌ها در شبکه و زمان سفر جریان آزاد

ظرفیت بیمارستان‌ها جهت پذیرش بیماران برحسب نوع مصدومیت، در جدول شماره ۱ و تعداد مجروحان منتظر دریافت

بدهی است که محدودیت (۳۸) همواره برقرار است. عبارت کسری و غیرخطی تابع BPR یعنی Γ_{nmt}^v با کمک برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر به معادله (۳۹) تبدیل می‌شود. همچنین معادله (۴۰) مقدار ورودی به تابع تقریب را در نقاط شکست محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۴۱) تا (۴۳) جهت تأمین شروط تکنیک قطعه‌قطعه خطی هستند. نوع متغیرها در محدودیت (۴۴) بیان شده است. مقادیر u_{nmt}^k برای $k = |K|$ برابر صفر هستند. با توجه به فرمول تابع BPR می‌دانیم که مقدار به دست آمده برای Θ_{nmt}^v به عنوان زمان واقعی سفر، مقداری اعشاری است. از طرف دیگر، دوره‌های زمانی ما گسسته و اعداد صحیح هستند. لذا، مقدار آن باید به نزدیک‌ترین عدد صحیح رو به بالا گرد شود. از طرف دیگر با توجه به معادله (۳۸) ضروری است، مقدار Θ_{nmt}^v به سقف نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شود تا از گسترش بی‌اندازه و مقدار غیرمنطقی آن خودداری شود، این کار با انجام تنظیمات لازم در تابع هدف (۱۸) انجام شده است. همچنین بخش کسری تابع BPR با سه نقطه (۰ و ۱)، (۲ و ۱,۶۰۷) و (۳ و ۱,۹۱۱) قابل تقریب است.

خدمت و انتقال به بیمارستان‌ها در طی دوره برنامه‌ریزی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. ظرفیت بیمارستان‌ها جهت خدمت‌رسانی به انواع مصدومان

N2			N1			گره
T1	T2	T3	T1	T2	T3	زمان
۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	ظرفیت برای مصدومان نوع w1
۱۰۰	۴۰	۲۰	۱۰۰	۴۰	۲۰	ظرفیت برای مصدومان نوع w2

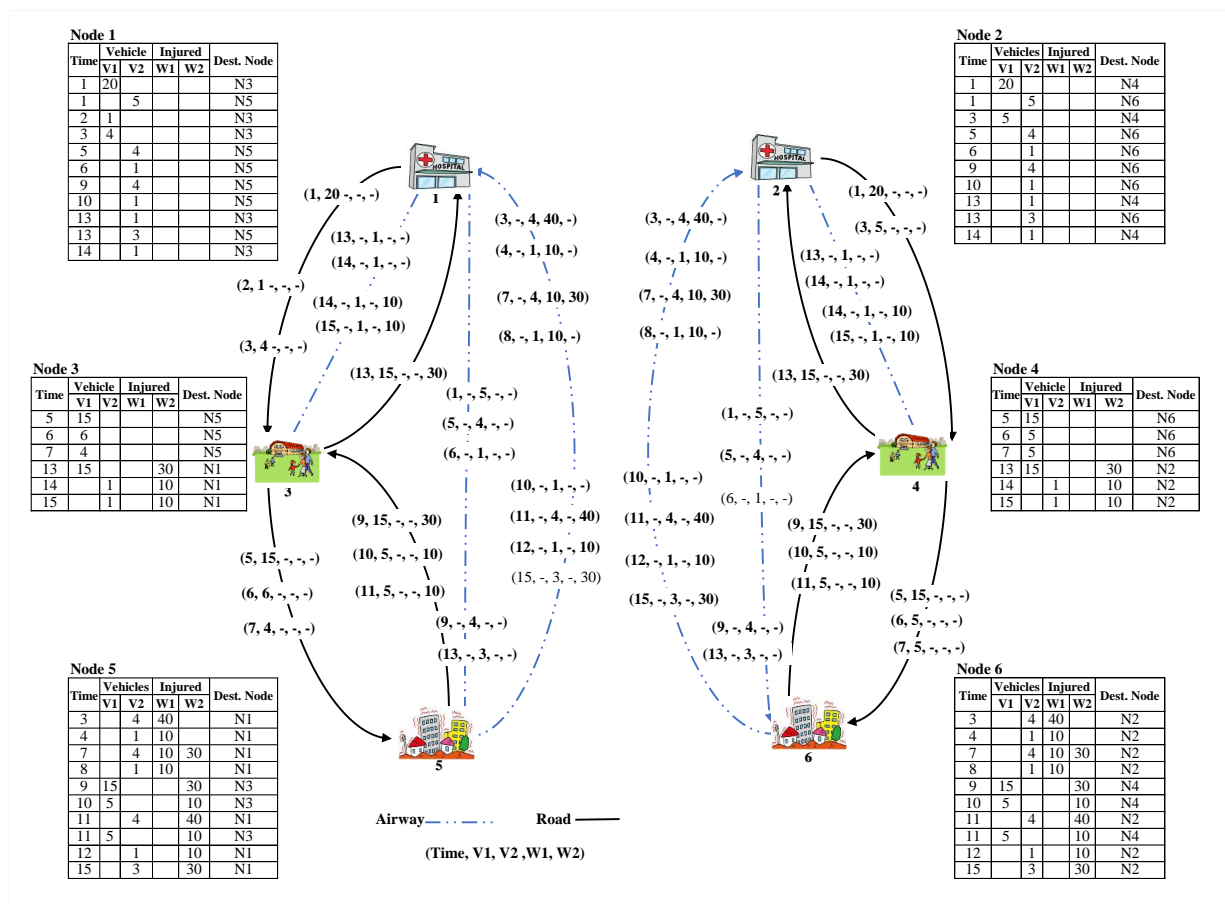
جدول ۲. تقاضای مجروحان برحسب نوع مصدومیت

N2			N1			گره
T1	T4	T8	T1	T4	T8	زمان
۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	ظرفیت برای مصدومان نوع w1
۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	ظرفیت برای مصدومان نوع w2

مسئله خطی سازی شده MIP BPR با استفاده از نرم‌افزار GAMS کد نویسی و توسط CPLEX روی یک لپ‌تاپ با مشخصات Intel (R) Core (TM) i7-10750H, CPU 2.60 GHz و 16 GB RAM در زمان ۴۸,۵۷۸ ثانیه حل گردید. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل، مسیر حرکت وسایل نقلیه امدادی، و نحوه تخصیص مجروحان به وسایل نقلیه و بیمارستان‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. برخی از نتایج به‌دست‌آمده از حل مسئله به شرح زیر است:

کل زمان موردنیاز برای انتقال همه مصدومان به بیمارستان‌ها ۱۷ دوره به طول می‌انجامد.

بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت انتقال مجروحان ناشی از زلزله



شکل ۲. برنامه‌ریزی حرکت وسایل نقلیه و نحوه انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها

بیشترین مسیرهای هوایی مورد استفاده (N5-N1) و (N6-N2) است که تعداد ۱۸ هلیکوپتر در هر یک از این مسیرها پرواز نموده و ۷۰ مجروح نوع شدید و ۱۱۰ مجروح نوع متوسط را به بیمارستان‌ها انتقال دادند.

جهت انتقال مصدومان از گره N5 به بیمارستان N1 مسیرهای (N1-N5) و (N1-N3-N5-N3-N1) با آمبولانس و مسیرهای (N1-N5) با هلیکوپتر پیموده شده است. جهت انتقال مصدومان از گره N6 به بیمارستان N2 مسیرهای (N2-N4-N6-N4-N2) با آمبولانس و مسیرهای (N2-N6-N2) با هلیکوپتر طی شده است. در مجموع ۸۰ مجروح نوع شدید که در زمان $t=1$ در گره های زلزله زده N5 و N6 شناسایی شدند، توسط هلیکوپترها در زمان $t=3$ برداشته شده و پس از دو دوره در زمان $t=5$ به بیمارستان‌های مستقر در گره‌های N1 و N2 تحویل داده شدند. مابقی ۶۰ مجروح نوع شدید توسط هلیکوپترها در زمان‌های

از مجموع ۶۰ تعداد کل مجروحان و همچنین ۳۲۰ مجروح نوع متوسط، تعداد ۲۶۰ مجروح با مصدومیت متوسط با هلیکوپتر و ۶۰ نفر باقیمانده توسط آمبولانس به بیمارستان‌ها انتقال می‌یابند. تمامی ۱۴۰ مجروح با مصدومیت شدید توسط هلیکوپتر منتقل می‌شوند و ۸۷ درصد انتقال مجروحان متوسط نیز توسط هلیکوپتر انجام شده است. در هر یک از دوره‌های زمانی $t=14$ و $t=15$ تعداد ۱۰ مجروح نوع متوسط در هر یک از گره‌های میانی N3 و N4 از آمبولانس به هلیکوپتر منتقل شده‌اند. همچنین ۸۰ سورتی پرواز توسط هلیکوپترها و ۱۸۰ سفر توسط آمبولانس‌ها بین گره‌های مختلف جهت انتقال مجروحان به بیمارستان‌ها انجام شده است. بیشترین مسیرهای مورد استفاده در طی دوره برنامه‌ریزی شامل مسیرهای (N4-N2) و (N3-N1) است که ۱۵ آمبولانس از هر یک از این مسیرها عبور کرده و ۳۰ مجروح نوع متوسط را به بیمارستان‌ها منتقل نمودند. همچنین

t=4, t=7 و t=8 برداشته شده و به ترتیب در زمان‌های t=6, t=9 و t=10 تحویل بیمارستان‌ها داده می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این مقاله به بررسی تأثیر ازدحام ترافیک در افزایش زمان سفر و برنامه‌ریزی انتقال مصدومان با استفاده از تابع BPR پرداخته شده است. تابع BPR امکان مدل‌سازی ترافیک با توجه به تنوع ترافیک پیش‌زمینه و وسایل نقلیه اضطراری و ظرفیت عملی راه را فراهم می‌نماید. لذا، یک مدل توسعه‌یافته BPR جهت کار با جریان‌های مختلف ترافیکی پیشنهاد گردید. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با رویکرد بهینه‌سازی قطعی برای مسئله چند هدفه، چند حالتی و چند دوره‌ای مسیریابی وسایل نقلیه اضطراری و انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها در کوتاه‌ترین مسیر از نظر فاصله زمانی فرموله شده و سپس با کمک برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی تفکیک‌پذیر نسبت به خطی سازی روابط اقدام گردید. اهداف اصلی مسئله شامل اهداف بشردوستانه و هزینه‌ای است که با توجه به اهمیت جان انسان‌ها نسبت به هزینه‌های امداد، تابع چند هدفه به‌صورت ترکیبی از مدل‌های لکزیکوگرافیک و تجمعی فرموله و حل گردید. همچنین با طراحی و حل یک مثال کوچک، نتایج به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرار گرفت که حاکی از عملکرد مناسب مدل در حل مسئله و نتایج منطقی و قابل قبول در انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها از کوتاه‌ترین مسیر از لحاظ فاصله زمانی بوده است. لذا اهم نتایج به شرح زیر است:

۱- استفاده و توسعه تابع BPR جهت لحاظ نمودن تنوع

جریان ترافیکی و مدل‌سازی آن در عملیات لجستیک اضطراری در فاز پاسخ به زلزله

۲- ارائه روش ابتکاری برای حل مدل چند هدفه با ترکیبی از روش‌های لکزیکوگرافیک و تجمعی جهت کاهش زمان محاسبات

۳- بررسی تأثیر ترافیک در برنامه‌ریزی انتقال مصدومان با توجه به نوع مصدومیت و اولویت خدمت‌رسانی

تحقیقات آتی می‌تواند، در زمینه فعالیت‌های لجستیکی توأم انتقال مجروحان از مراکز آسیب‌دیده به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی و توزیع کالاهای امدادی از مراکز توزیع به مناطق آسیب دیده، مکان‌یابی مراکز درمانی، انبارها و مراکز توزیع، در نظر گرفتن عدم قطعیت و کار با داده‌های غیرقطعی و همچنین حل با استفاده از روش‌های فرا ابتکاری برای مسئله با ابعاد بزرگ و افق زمانی بالاتر ادامه یابد.

۵. مراجع

– Dean M.D., Nair S.K., (2014). Mass-casualty triage: Distribution of victims to multiple hospitals using the SAVE model. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 363-373.

– Ahmadi M., Seifi A., Tootooni B., (2015). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 145-163.

– Bayram V., (2016). Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2), 63-84.

– Farahani R.Z., Lotfi M.M., Baghaian A., Ruiz R., Rezapour S., (2020). Mass casualty management in disaster scene: A systematic review of OR&MS research in humanitarian operations. *European Journal of Operational Research* 287(3), 787–819.

– Caunhye A.M., Nie X., Pokharel S., (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 4-13.

– Safeer M., Anbuudayasankar S.P., Balkumar K., Ganesh K., (2014). Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics. *Procedia Engineering*, 97, 2248-2258.

- environment. International journal of environmental research and public health, 16(20).
- Soltani-Sobh A., Heaslip K., Stevanovic A., El Khoury J., Song Z., (2016). Evaluation of transportation network reliability during unexpected events with multiple uncertainties. International journal of disaster risk reduction, 17, 128-136.
- Wang Q., (2018). Emergency logistics considering traffic congestion (Doctoral dissertation). Nanyang Technological University, Singapore.
- Tavakkoli-Moghaddam R., Shishegar S., Siadat A., Mohammadi M., (2016). Design of a reliable bi-objective relief routing network in the earthquake response phase. Procedia Computer Science, 102,74-81.
- Najafi M., Eshghi K., Dullaert W., (2013). A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 49(1), 217-249.
- Taha H.A., (2017). Operations Research: An Introduction, Global Edition 10th Edition, Pearson.
- Adarang H., Bozorgi-Amiri A., Khalili-Damghani K., Tavakkoli-Moghaddam R., (2020). A robust bi-objective location-routing model for providing emergency medical services. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 10(3), 285–319.
- Campos V., Bandeira R., Bandeira A., (2012). A method for evacuation route planning in disaster situations. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 54, 503-512.
- Gao X., Cao C., (2020). Multi-commodity rebalancing and transportation planning considering traffic congestion and uncertainties in disaster response. Computers and Industrial Engineering, 149.
- Wang Q., Nie X., (2019). A stochastic programming model for emergency supply planning considering traffic congestion., IISE Transactions, 51(8), 910-920.
- Bayram V., Tansel B.C., Yaman H., (2015). Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning. Transportation research part B: methodological, 72, 146-163.
- Bayram V., Yaman H., (2018). A stochastic programming approach for shelter location and evacuation planning. RAIRO-Operations Research, 52(3), 779-805.
- Sherali H.D., Carter T.B., Hobeika A.G., (1991). A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. Transportation Research Part B: Methodological, 25(6): 439-452.
- Ng M., Waller S., (2009). The evacuation optimal network design problem: model formulation and comparisons. Transportation Letters, 1(2), 111-119.
- Hammad A.W., (2019). A Bilevel Multi-objective Optimisation Approach for Solving the Evacuation Location Assignment Problem. Advances in Civil Engineering.
- Liang B., Yang D., Qin X., Tinta T., (2019). A risk-averse shelter location and evacuation routing assignment problem in an uncertain

Considering the Traffic Congestion Impact on Emergency Vehicle Planning in the Earthquake Response Phase

Sedigheh Khoushch Bahar*, Ph.D. Student at Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mehdi Najafi, Assistant Prof. at Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Seyyed Mohammad Hadji Molana, Assistant Prof. at Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

E-mail: s.khoushch_bahar@srbiau.ac.ir

Abstract

Traffic congestion during the earthquake response phase could significantly affect relief emergency logistics planning and endangers injured people's lives. Given this significant impact, this study develops a mathematical formulation to employ the BPR function and capture the traffic congestion impact on emergency vehicle planning for casualty transportation. The problem under investigation is formulated as a mixed integer non-linear programming (MINLP) that comprises multi-objective functions and considers different modes of transportation for casualties. The developed formulation is then linearized through a piecewise linear function technique. Subsequently, we employ the lexicographic and weighted sum techniques to develop a hybrid solution algorithm for solving the proposed linear formulation. Finally, the developed formulation and solution algorithm are applied in a numerical case to investigate the impact of traffic congestion. The result reveals the significant effects of traffic congestion on vehicle delays, choosing emergency vehicle routing, allocating emergency vehicles to the routes and hospitals, and assigning injured people to the emergency vehicles and the hospitals. This analysis also exhibits that applying the developed mechanism improves casualty transportation in the earthquake response.

Keywords: Casualty Transportation; Vehicle Planning, Traffic Congestion, The BPR function, The Piecewise Linear function