

برآورد ظرفیت راه در زمان وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک

امیررضا ممدوحی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمد مصطفی مسعودی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
علیرضا ماهپور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدحسین نوروزعلیائی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مقصود پوریاری، کارشناس ارشد، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Email: armamdoohi@modares.ac.ir

پذیرش: ۹۲/۲/۲۳

دریافت: ۹۱/۰۹/۱۹

چکیده

بخش عمده‌ای از خسارات ناشی از بحران‌هایی مانند زلزله، در اثر آسیب دیدن سیستم حمل و نقل است. پس از وقوع بحران، ظرفیت، به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌های راه ممکن است کاهش یابد. هدف این مطالعه بررسی و برآورد میزان تأثیر پذیری ظرفیت راه در اثر شدت خسارت‌های مختلف وارد به بدنه راه (باند‌ها و شانه راه) و ابنیه فنی (پل و تونل) در نتیجه وقوع بحران است. رویکرد مطالعه حاضر، شبیه‌سازی شرایط پس از بحران با استفاده از مفهوم گلوگاه است. فرض می‌شود پس از وقوع بحران، خرابی راه همانند گلوگاه عمل کرده و باعث کاهش ظرفیت شود. با توجه به ماهیت احتمالی بحران و عدم قطعیت در نوع، محل و شدت خسارات ناشی از آن، یک روش منطقی برای شبیه‌سازی شرایط بحران، سناریوسازی است. در این مطالعه فرض می‌شود در هر سناریو بخشی از عرض راه بسته شده است. برای هر یک از سناریوها حجم عبوری از گلوگاه با استفاده از انجام پنج آزمایش شبیه‌سازی و میانگین گرفتن از حجم عبوری از مقطع گلوگاه در این آزمایش‌ها محاسبه می‌شود. ظرفیت راه پس از وقوع بحران به صورت تابعی از ظرفیت پایه، خصوصیات باند، شانه و ابنیه فنی در نظر گرفته شده است. ضریب ظرفیت باقیمانده راه پس از بحران برابر با نسبت حجم عبوری از گلوگاه به ظرفیت پایه راه در شرایط عادی خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد رفتار کاهش ظرفیت آزادراه و بزرگراه به ازای میزان خرابی‌های مختلف (درصدی از عرض راه) به صورت پلکانی بوده و با افزایش تعداد خط در یک جهت، از میزان افت در پله‌ها کاسته می‌شود. همچنین میزان کاهش ظرفیت در راه‌های دارای تعداد خطوط کمتر، دیرتر اتفاق افتاده و میزان افت در آنها شدیدتر است.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت، بحران، گلوگاه، شبیه‌سازی، باند، شانه

۱. مقدمه

این مقاله با هدف بررسی و برآورد تغییرات ظرفیت (به‌عنوان یک متغیر درون‌زا) یک کمان از شبکه در نتیجه وقوع بحران تدوین شده است. با این تفاوت که برخلاف مطالعات انجام‌شده تاکنون، خرابیها به‌صورت درصدی از عرض راه در نظر گرفته شده‌اند (رویکرد غیر صفر و یک) و تأثیر محل وقوع خرابی (بدنه راه و ابنیه فنی) بر ظرفیت راه به‌طور جداگانه تعیین شده است که نوآوری آن نیز محسوب می‌شود.

بر خلاف شرایط پس از بحران، پیش از وقوع بحران اطلاع دقیقی از محل و شدت خسارات احتمالی وارده و همچنین نحوه تأثیرگذاری خرابیهای مختلف بر ظرفیت راه وجود ندارد. بنابراین، در این مطالعه به بررسی و برآورد مقدار کاهش ظرفیت آزادراه و بزرگراه در مناطق گوناگون (هموار، تپه‌ماهوری و کوهستانی) با توجه به میزان خسارتهای مختلف وارد به بدنه راه (باندها و شانه راه) و ابنیه فنی (پل و تونل) در نتیجه وقوع بحران پرداخته شده است.

در شرایط پیش از بحران، نبود اطلاع کافی از چگونگی اثرگذاری موارد یاد شده بر ظرفیت راه و همچنین ماهیت احتمالی بحران (محل و شدت خرابیهای حاصل از آن) باعث می‌شود که نتوان از روشهای معمول در بررسی ظرفیت استفاده کرد. همچنین آماری از عملکرد راهها در شرایط بحرانی وجود ندارد و در صورت وجود نیز نمی‌توان به‌راحتی به آنها استناد کرد، زیرا ماهیت بحران احتمالی بوده و لزوماً در دو حادثه مشابه نتیجه یکسانی به دست نمی‌آید. بنابراین به بررسی و برآورد نتایج سناریوهای محتمل وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک پرداخته می‌شود.

ساختار این مقاله به این ترتیب است که ادبیات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع در بخش دوم مورد توجه قرار گرفته است. در بخش سوم روش پژوهش توضیح داده شده و نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی روش پژوهش در بخش چهارم ارائه و تحلیل شده است. نتیجه‌گیری از این پژوهش و ارائه پیشنهاداتی برای مطالعات آینده در بخش پایانی انجام شده است.

امروزه شبکه‌های حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از زیرساختهای اساسی هر کشوری مطرح بوده و از جنبه‌های گوناگون اقتصادی، اجتماعی و سیاسی حائز اهمیت هستند. در میان شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل (جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی)، اصولاً حمل‌ونقل جاده‌ای به دلیل ویژگیهای منحصربه‌فرد خود به‌عنوان متداول‌ترین شیوه مطرح است. از جمله ویژگیهای این شیوه می‌توان به هزینه مناسب، دسترسی سریع، انعطاف‌پذیری در انتخاب مسیر و نیز امکان دسترسی به کلیه مراکز تولید و جذب بار و مسافر اشاره کرد. از این رو، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از ملزومات برنامه‌ریزی صحیح و اصولی، در نظر گرفتن شرایط مختلف عملکردی سیستم از جمله شرایط بحرانی است. از طرفی شبکه راهها به‌عنوان شریانهای حیاتی نقش مهمی در مدیریت بحران به ویژه در مرحله برون‌بری و امدادسانی دارند.

شرایط بحرانی می‌تواند مستقیماً بر ظرفیت راه اثر گذارد، هر چند که ممکن است عدم کارایی راه در شرایط بحرانی به دلایلی غیر از کاهش ظرفیت نیز باشد. به‌عنوان مثال، در زلزله دی‌ماه سال ۱۳۸۲ در بم، جاده ارتباطی با مرکز استان آسیب چندانی ندیده بود، اما به‌دلیل حجم بالای ترافیک برای کمک‌رسانی به منطقه (با استفاده از شیوه‌های هوایی، ریلی و جاده‌ای)، عملکرد راه موجود نامناسب بود [Yaghoobi and Hosseini, 2009]. بنابراین، برنامه‌ریزی برای مراحل مختلف مدیریت بحران در شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای پیش از وقوع بحران حائز اهمیت است.

در صورت وقوع بحران، ممکن است بخشی از راه تخریب یا بسته شود که در این حالت عملاً ماهیت ترافیک عبوری و شرایط عملکردی راه تغییر خواهد کرد. این وضعیت ممکن است در محل‌های گوناگون (خطوط عبوری، شانه راه و ابنیه فنی) و با شدتهای متفاوت (میزان خرابی در عرض و طول راه) اتفاق افتد. در نتیجه تخریب بخشی از راه، ظرفیت نیز به‌عنوان معیاری تأثیر گذار بر عملکرد راه دچار اختلال شده و با توجه به محل و شدت انسداد ممکن است کاهش یابد.

برآورد ظرفیت راه در زمان وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک

۲. مرور ادبیات

ظرفیت اولیه خواهد بود. به عبارت دیگر، ۴۲ درصد از ظرفیت راه کاسته شده است. مطالعه آیین‌نامه ظرفیت راهها گرچه توانسته تا حدود زیادی برآوردی از ظرفیت پس از بحران را ارائه کند، ولی تنها برای آزادراه صورت گرفته است. علاوه بر این، مسدود شدن خطوط را به صورت صفر و در نظر می‌گیرد؛ یعنی یا یک خط کاملاً مسدود شده است و یا کاملاً جریان در آن وجود دارد. سینها و همکاران [Sinha et al., 2007] به منظور دستیابی به نتایج HCM 2000 (جدول ۱) (ظرفیت در هر دو حالت پیش و پس از بحران)، پارامترهای چند نرم‌افزار شبیه‌ساز مختلف را در دو مرحله کالیبره کردند: در مرحله ۱ که هیچ حادثه‌ای رخ نداده است پارامترهای مدل شبیه‌سازی به گونه‌ای کالیبره شده‌اند که همان ظرفیتهای موجود در جداول HCM برای یک راه با تعداد خطوط مشخص به دست آیند. در مرحله ۲، حالتی را که حادثه رخ داده و بخشی از عرض راه مسدود شده است مورد مطالعه قرار دادند.

کین و اسمیت [Qin and Smith, 2001] در مطالعه‌ای به بررسی میزان کاهش ظرفیت راه بر اساس آمار جمع‌آوری شده از راههای Hampton در ویرجینیای آمریکا پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در اثر انسداد یک و دو خط عبور از یک راه دارای سه خط در هر جهت، به ترتیب به میزان ۶۳ و ۷۷ درصد از ظرفیت راه کاسته خواهد شد.

در مطالعه دیگری [Hajihosseini and Hedayat, 2006] میزان کاهش ظرفیت راهها پس از وقوع زلزله‌ای فرضی در پنج

ارزیابی تأثیر بحران بر ظرفیت راهها مسئله‌ای مهم و در عین حال پیچیده است. در پژوهشهای مرتبط با بررسی عملکرد شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای در صورت وقوع بحران که به دو گروه کلی مطالعات پیش و پس از بحران (از جهت زمان انجام مطالعه نسبت به زمان وقوع بحران) تقسیم می‌شوند، ظرفیت راه یکی از موارد اثرگذار در تحلیلها شناخته می‌شود. مطالعات بسیاری شرایط پس از بحران را مورد مطالعه قرار داده‌اند که در بیشتر آنها ظرفیت به عنوان یک متغیر برون‌زا مطرح بوده است [Chen et al., 2000]. به دلیل ماهیت احتمالی بحران (عدم اطلاع از ویژگیهای آن مانند شدت و محل وقوع)، مطالعات اندکی اثرات احتمالی بحران بر روی پارامترهای راه را بررسی کرده‌اند [Sinha et al., 2007]. به طور مشخص، بررسی تغییرات ظرفیت راه به عنوان یکی از عوامل تأثیر گذار بر عملکرد شبکه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

طبق آیین‌نامه ظرفیت راهها [HCM, 2000]، ظرفیت باقیمانده راه پس از وقوع حوادث به صورت غیرخطی با انسداد فیزیکی خطوط تغییر می‌کند. جدول ۱ مقدار ظرفیت باقیمانده آزادراه را با توجه به تعداد خطوط عبور در حالت عادی (پایه) و موقعیت انسداد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر ظرفیت در این جدول برای طول مدت زمان حادثه تعیین شده‌اند. به طور مثال، در اثر تصادف در یک آزادراه دارای چهار خط عبور در هر جهت، در صورت مسدود شدن یک خط، ظرفیت جدید برابر با ۵۸ درصد

جدول ۱. نسبت ظرفیت باقیمانده آزادراه با توجه به تعداد خطوط مسدود شده (درصد) [HCM, 2000]

تعداد خطوط عبور (باند) پایه در هر جهت							موقعیت و مقدار انسداد
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	
۹۳	۹۱	۸۹	۸۷	۸۵	۸۳	۸۱	شانه راه
۷۸	۷۵	۷۱	۶۵	۵۸	۴۹	۳۵	یک باند
۶۳	۵۷	۵۰	۴۰	۲۵	۱۷	۰	دو باند
۴۱	۳۶	۲۶	۲۰	۱۳	۰	۰*	سه باند

* غیر قابل محاسبه

گرفته شده و با استفاده از نرم‌افزار HCS میزان ظرفیت راه‌ها و نیز میزان کاهش ظرفیت آنها مطابق سناریوها برآورد شده است. ظرفیت آزادراه و بزرگراه فرضی برای هر یک از سناریوها به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. در مطالعه مذکور، راههای واقع در مناطق هموار و تپه‌ماهوری و همچنین پل یا تونل در راههای کوهستانی در نظر گرفته نشده که از جامعیت پژوهش کاسته است.

در مطالعه‌ای دیگر [Cambridge Systematics, 1998]، برای حوادثی که کمتر از یک ساعت به طول می‌انجامد، ظرفیت کل ساعت به‌صورت متوسط وزنی ظرفیت در زمان حادثه و ظرفیت در شرایط پیش و پس از آن تعریف شده است. در این مطالعه ظرفیت راه برای حادثه‌ای که کمتر از یک ساعت باعث انسداد راه شده (تصادف دو وسیله نقلیه) به‌صورت رابطه (۱) محاسبه شده که با توجه به ماهیت بحران (به‌ویژه زلزله) برای حوادث طبیعی

شهر به دست آمده است. در این پژوهش فرض بر آن است که این شهرها همگی در مناطق کوهستانی واقع شده و پس از وقوع زلزله، به‌علت ریزش سنگ، جاده‌های بین شهرها دچار خرابی و کاهش ظرفیت می‌شوند. شبکه ارتباطی این پنج شهر از آزادراه و بزرگراه تشکیل شده است. آزادراهها دارای چهار باند با سرعت مجاز ۶۰ مایل بر ساعت، دو باند در هر جهت به عرض ۱۲ فوت، شانه به عرض ۶ فوت و فاصله گاردریل با لبه آسفالت ۲ فوت در هر دو سوی رفت و برگشت است. همچنین، بزرگراه دو بانده با سرعت مجاز ۵۰ مایل بر ساعت، دارای یک باند در هر طرف به عرض ۱۲ فوت و شانه به عرض ۶ فوت در هر دو سوی رفت و برگشت است و در هیچیک از این مسیرها، پل و تونل وجود ندارد. در این مطالعه شرایط پس از بحران با سناریوسازی بررسی شده است که با توجه به ماهیت احتمالی بحران می‌تواند تغییر کند. در این پژوهش شش سناریو برای حالت پس از بحران در نظر

جدول ۲. ظرفیت آزادراه و کاهش آن پس از زلزله [Hajihosseainloo and Hedayat, 2006]

ردیف	شدت خرابی	میزان خرابی راه (درصد)	کاهش ظرفیت (pcph)	ظرفیت (pcph)
۱	سناریو (۰)	۰	۰	۲۷۷۱
۲	سناریو (۱)	۱۵	۴۱۰	۲۳۶۱
۳	سناریو (۲)	۲۰	۵۸۵	۲۱۸۶
۴	سناریو (۳)	۳۰	۸۲۸	۱۹۴۳
۵	سناریو (۴)	۴۵	۱۲۵۰	۱۵۲۱
۶	سناریو (۵)	۶۰	۱۶۷۸	۱۰۹۳

جدول ۳. ظرفیت بزرگراه و کاهش آن پس از زلزله [Hajihosseainloo and Hedayat, 2006]

ردیف	شدت خرابی	میزان خرابی راه (درصد)	کاهش ظرفیت (pcph)	ظرفیت (pcph)
۱	سناریو (۰)	۰	۰	۱۵۸۸
۲	سناریو (۱)	۴	۸۰	۱۵۰۸
۳	سناریو (۲)	۱۱	۱۹۱	۱۳۹۷
۴	سناریو (۳)	۲۵	۳۹۷	۱۱۹۱
۵	سناریو (۴)	۳۴	۵۴۰	۱۰۴۸
۶	سناریو (۵)	۵۷	۹۰۵	۶۸۳

برآورد ظرفیت راه در زمان وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک

ظرفیت راه (پیش و پس از وقوع حادثه) در مدل‌های شبیه‌سازی خرد ترافیک درون‌زا^۴ بوده و به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود [Sinha et al., 2007].

در این پژوهش ظرفیت راه پس از وقوع بحران به‌صورت تابعی از ظرفیت پایه راه در شرایط عادی و ضرایب تأثیر باند، شانه و ابنیه فنی در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه زیر که جنبه نوآوری این مقاله است پیشنهاد می‌شود:

$$C_d = C_b * f_n * f_{ic} * f_s \quad (2)$$

که در آن:

C_d : ظرفیت راه پس از وقوع بحران

C_b : ظرفیت پایه راه در شرایط عادی (مستخرج از آیین‌نامه ظرفیت راهها)

f_n : ضریب تأثیر خرابی عرض باند بر ظرفیت (مستخرج از نتایج شبیه‌سازی)

f_{ic} : ضریب تأثیر خرابی عرض شانه راه بر ظرفیت (مستخرج از نتایج شبیه‌سازی)

f_s : ضریب تأثیر خرابی پل یا تونل بر ظرفیت (مستخرج از نتایج شبیه‌سازی)

به‌منظور ارزیابی تأثیر مقادیر گوناگون شدت خرابی و محل وقوع انسداد بر ظرفیت راه و محاسبه ضرایب رابطه بالا، از مفهوم گلوگاه ترافیک و مدل شبیه‌سازی خرد ترافیک استفاده شده است، به این ترتیب که فرض می‌شود پس از وقوع بحران، خرابی راه همانند گلوگاه عمل کرده و باعث اختلال در عملکرد راه و کاهش ظرفیت می‌شود.

گلوگاه‌های ترافیکی^۵ می‌توانند به‌دلیل ایجاد تغییرات در عرضه یا بیشتر بودن تقاضا نسبت به ظرفیت ایجاد شوند [Roess, 2004]. گلوگاهها باعث تغییر در ماهیت ترافیک و شرایط عملکردی در بخشی از راه شده و به‌طور مشخص باعث تغییر ظرفیت راه و سرعت متوسط حجم عبوری می‌شوند.

[Coifman and Kim, 2011]. این حالت احتمالاً زمانی رخ می‌دهد که در اثر شرایط طبیعی (باریک شدن عرض راه، وجود پل یا تونل و ...) یا وقوع یک حادثه و بسته شدن بخشی از راه،

قابل تعمیم نیست.

$$C(I, S) = [C(I = 0, S) * (1 - t(I))] + [C(I = 0, S) * R(I, S) * t(I)] \quad (1)$$

که در آن:

$C(I, S)$: ظرفیت متوسط یک‌ساعته مقطع S برای حادثه نوع I (vph: وسیله نقلیه در ساعت)

$C(I = 0, S)$: ظرفیت مقطع S تحت شرایط عملکردی طبیعی (vph)

$t(I)$: متوسط طول مدت زمان حادثه نوع I (ساعت)

$R(I, S)$: ظرفیت باقیمانده (درصد) در اثر حادثه نوع I برای مقطع S

کاواکامی در مطالعه خود به کمک یک روش پیشنهادی میزان ظرفیت راه پس از وقوع زلزله را برآورد کرد [Kawakami, 2000]. در این روش، ظرفیت هر قطعه از راه در شرایط پس از زلزله برابر با کمترین ظرفیت در هر منطقه خراب‌شده آن قطعه در نظر گرفته شده است. نتایج ارایه شده در این مقاله شامل ارزیابی عملکرد شبکه در شرایط پس از زلزله به‌کمک نسبت حجم به ظرفیت قطعات راه است. همچنین، چن و آگوچی در مقاله‌ای در هفتمین کنفرانس ملی شریانهای حیاتی آمریکا در سال ۲۰۰۳، ظرفیت راه پس از زلزله را به کمک یک روش پیشنهادی تخمین زده‌اند. در این روش پیشنهادی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها و ساختمانهای خراب‌شده که پس از زلزله، راهها را اشغال می‌کنند در نظر گرفته شده است [Chen and Eguchi, 2000].

۳. روش پژوهش

مدل‌های گوناگونی از جمله مدل‌های تشکیل صف^۱، موج شوک^۲ و همچنین مدل‌های شبیه‌سازی خرد ترافیک جهت بررسی تغییرات ویژگیهای راهها در اثر وقوع بحران و انسداد بخشی از راه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مدل‌های تشکیل صف و موج شوک، ظرفیت راه در حین، پیش و پس از وقوع حادثه، برون‌زا بوده و به‌عنوان ورودی مدل محسوب می‌شود، اما برخلاف این دو،

۳۰۰۰ متر (به منظور غیرمنقطع بودن جریان ترافیک) و عرض خط ۳/۶ متر (در شرایط عادی) بوده و طول ناحیه گلوگاه (ناحیه میانی) نیز ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین عرض هر خودرو ۲ متر منظور شده است. در این مقاله، دو نوع راه (آزادراه و بزرگراه) در سه منطقه (هموار، تپه ماهوری و کوهستانی) مطابق با آیین نامه ظرفیت راهها [HCM 2010] مدل شدند که برای آزادراه و بزرگراه، دو، سه و چهار خط عبور در یک جهت در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت جریان آزاد برای آزادراه و بزرگراه به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است.

۳-۲ پیاده سازی و کالیبراسیون

شرایط گلوگاه در هر یک از سناریوهای خرابی برای انواع راهها شبیه سازی شده و در نهایت، ظرفیت جدید راه (ظرفیت پس از وقوع خسارت در راه) محاسبه شده است. برای شبیه سازی شرایط گلوگاه و تعیین مقدار تغییر ظرفیت در اثر بحران، حجم عبوری از کمان در حالت عادی (به عنوان یکی از ورودیهای مدل شبیه سازی)، با توجه به نوع راه، منطقه و سرعت جریان آزاد در کمان، برابر با ظرفیت راه (مطابق با آیین نامه ظرفیت راهها) در نظر گرفته شده است. پس از آن نحوه تعیین ضرایب موثر بر ظرفیت راهها حائز اهمیت است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. همچنین با توجه به فرضهای مدل، ظرفیت عبوری آزادراه و بزرگراه به ترتیب برابر با ۲۴۰۰ و ۲۲۰۰ وسیله نقلیه در هر خط در هر ساعت منظور شده است.

۳-۲-۱ ضرایب تأثیر عرض باند و شانه (f_{ic} و f_n)

در هر یک از سناریوهای خرابی ناشی از وقوع بحران، فرض می شود که عرض باندها و یا شانه راه در گامهای ۱۰ درصدی بسته شده است. سپس، شرایط گلوگاه ایجاد شده در هر یک از سناریوها، برای انواع راهها با تعداد خطوط مختلف شبیه سازی شده و در نهایت، ظرفیت جدید راه محاسبه می شود.

عرض راه کاهش یابد. در این صورت، ظرفیت بخشی از راه نسبت به حالت عادی تغییر خواهد کرد [Banks, 1990]. شبیه سازی عبارت است از تکرار نتایج دنیای واقعی با استفاده از یک مدل مشخص و بر اساس فرضهای مشخص [Ang and Tang, 1990]. یکی از جذاب ترین و مهم ترین ویژگیهای استفاده از شبیه سازی این است که سناریوهای بالقوه را می توان در دنیای مجازی (پیش از اجرا در دنیای واقعی) آزمایش کرد. این امر بویژه زمانی مورد توجه خواهد بود که تغییرات هندسی و عملیاتی یک سناریوی معلوم از لحاظ اقتصادی گران یا از نظر عملیاتی مشکل باشد [Chen et al., 2000]. مدل های شبیه سازی خرد، هر یک از واحدهای راننده، خودرو و همچنین تعاملات آنها را با سایر خودروها و جاده در نظر می گیرد. در مدل های خرد، متغیرهای مکانی و زمانی هر خودرو دارای اهمیت بسیاری است [Sinha et al., 2007]. نقش مدل شبیه سازی به عنوان ابزاری در محاسبه ضرایب رابطه (۲) است، به طوری که با شبیه سازی سناریوهای مد نظر مقادیر این ضرایب برآورد شده اند. با توجه به ماهیت احتمالی بحران و بی اطلاعی از محل و شدت خسارات پیش از وقوع آن، در این مقاله از رویکرد شبیه سازی شرایط بحران برای سناریوهای تغییر عرض راه از قالب کلی سناریوهای مکانی بهره گرفته شده است. با توجه به در نظر گرفتن تأثیر خط به صورت صفر و یک (بسته بودن یا نبودن کامل یک خط) در مطالعات پیشین، تلاش این پژوهش که نوآوری آن نیز هست، بررسی تغییر جزئی در عرض راه است. به این معنی که فرض می شود در هر سناریو، بخشی از عرض راه (با گامهای ۱۰ درصدی، از صفر تا صد درصد) بسته می شود.

۳-۱ فرض ها

در این مقاله فرض می شود پس از وقوع بحران، خرابی راه همانند گلوگاه عمل کرده و باعث ایجاد اختلال در عملکرد راه و کاهش ظرفیت می شود. کمان مفروض با در نظر گرفتن گلوگاه به سه ناحیه^۱ پیش از گلوگاه، گلوگاه و بعد از گلوگاه تقسیم شده است. به این ترتیب که کل محدوده تحت تأثیر دارای طولی برابر

برآورد ظرفیت راه در زمان وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک

۳-۲-۲ ضریب تأثیر پل و تونل (f_s)

در این مطالعه، فرض شده است که حتی اگر بخشی از پل یا تونل واقع شده در یک کمان خراب شود، در صورت وجود راهی جایگزین برای آن کمان، ظرفیت راه جایگزین را به‌عنوان ظرفیت جدید آن کمان در نظر گرفته و اگر راه جایگزین وجود نداشته باشد، ظرفیت کمان صفر خواهد بود. مشخص است که در صورت وارد نشدن خسارت به پل و تونل، ظرفیت کمان مطابق سابق و برابر با ظرفیت پایه خواهد بود.

۳-۲-۳ نحوه محاسبه ضرایب ظرفیت باقیمانده

برای هر یک از سناریوها، حجم عبوری از گلوگاه با استفاده از انجام پنج آزمایش شبیه‌سازی و میانگین‌گیری از حجم عبوری از مقطع گلوگاه در این آزمایشها محاسبه می‌شود. ضریب ظرفیت باقیمانده راه پس از بحران برابر با نسبت حجم عبوری از گلوگاه به ظرفیت پایه راه خواهد بود. به‌طور مثال، برای یک بزرگراه سه‌خطه با سرعت جریان آزاد ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و ظرفیت ۶۶۰۰ (برابر سه خط هر کدام برابر ۲۲۰۰) وسیله‌نقلیه در ساعت، پس از ایجاد گلوگاه به طوری که تنها ۳۰ درصد عرض باند باقی بماند (۷۰ درصد خرابی)، پس از انجام ۵ آزمایش شبیه‌سازی و میانگین‌گیری از حجمهای عبوری از گلوگاه در این آزمایشها، حجم عبوری از گلوگاه ۱۶۷۶ وسیله‌نقلیه به‌دست می‌آید. در این

حالت ضریب ظرفیت باقیمانده راه برابر است با:

$$25/4\% = 100 * (1676 \div 6600) = \text{ضریب ظرفیت باقیمانده}$$

به این ترتیب، ضرایب برای انواع راههای دارای تعداد باندهای مختلف و واقع شده در مناطق گوناگون و همچنین برای عرضهای مختلف انسداد محاسبه شده است. در مجموع در حدود ۳۵۰ مدل و ۱۷۰۰ آزمایش شبیه‌سازی انجام شد.

۴. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل ظرفیت

ضریب ظرفیت باقیمانده حاصل از شبیه‌سازی مقادیر مختلف خرابی عرض آزادراه و بزرگراه به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. جدول ۴ ضریب ظرفیت باقیمانده آزادراه در مناطق مختلف به‌ازای میزان خرابی مختلف باند را نشان می‌دهد. به‌طور مثال، در صورت خرابی یک خط از یک آزادراه سه‌خطه در منطقه هموار، حدود ۸۵ درصد از ظرفیت راه باقی می‌ماند (کاهش ۱۵ درصدی ظرفیت). شاید در نگاه اول این انتظار وجود داشته باشد که به اندازه میزان خرابی فیزیکی (۳۳ درصد)، از مقدار ظرفیت کاسته شود. علت این امر در نحوه در نظر گرفتن تعداد خطوط در مقطع گلوگاه است. به‌عبارت بهتر، با از بین رفتن یک خط از سه خط آزادراه، دو خط عبور معادل ۷/۲ متر عرض دارند که با فرض تغییر رفتار رانندگی و در نظر گرفتن ۲ متر عرض لازم برای هر اتومبیل، این مقطع توانایی عبور ۳ خط خودرو به‌صورت فشرده‌تر

جدول ۴. ضریب ظرفیت باقیمانده آزادراه در مناطق مختلف به‌ازای میزان خرابی مختلف باند (f_n)

تعداد خط در یک جهت (N)	نوع منطقه	میزان خرابی از کل عرض باندها (درصد)									
		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۲	هموار	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۰	*	*	*
	په‌ماهوری	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۷	*	*	*
	کوهستانی	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۵	*	*	*
۳	هموار	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۲۹	۰/۲۶	*	*
	په‌ماهوری	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۸۰	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۲۵	۰/۲۴	*	*
	کوهستانی	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۲۴	۰/۲۳	*	*
۴	هموار	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۴۴	۰/۲۷	*	*
	په‌ماهوری	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۵۶	۰/۳۵	۰/۲۶	*	*
	کوهستانی	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۵۲	۰/۳۲	۰/۲۶	*	*

جدول ۵. ضریب ظرفیت باقیمانده بزرگراه در مناطق مختلف به ازای میزان خرابی مختلف پاند (V_p)

تعداد خط در یک جهت (n)	نوع منطقه	میزان خرابی از کل عرض باندها (درصد)									
		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۲	هموار	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۵	*	*	*
	تپه ماهوری	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۴	*	*	*
	کوهستانی	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۳	*	*	*
۳	هموار	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۲۵	۰/۲۴	*	*
	تپه ماهوری	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۲۴	۰/۲۳	*	*
	کوهستانی	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۲۴	۰/۲۳	*	*
۴	هموار	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۱۹	*	*
	تپه ماهوری	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۵۴	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۱۷	*	*
	کوهستانی	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۱۷	*	*

جدول ۶. ضریب ظرفیت باقیمانده راه در مناطق مختلف به ازای میزان خرابی مختلف شانه (V_s)

نوع راه	نوع منطقه	میزان خرابی از کل عرض شانه (درصد)									
		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
آزادراه	هموار	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۶
	تپه ماهوری	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۶
	کوهستانی	۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۵
بزرگراه	هموار	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴
	تپه ماهوری	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۳
	کوهستانی	۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۳

برای مناطق مختلف آرایه شده است.

۴-۱ تأثیر تعداد خطوط عبور (n) بر ضریب ظرفیت باقیمانده راه همان گونه که در شکل ۱ و شکل ۲ مشاهده می شود، رفتار کاهش ظرفیت آزادراه و بزرگراه به ازای میزان خرابیهای مختلف به صورت پلکانی است. با افزایش تعداد خطوط در یک جهت، از میزان افت^۷ در پله ها کاسته شده و تغییرات منحنی، نرم تر می شود. با بررسی بیشتر این تغییرات می توان به این نتیجه رسید که کاهش ظرفیت در راههای دارای تعداد خطوط کمتر دیرتر اتفاق افتاده ولی میزان افت در آنها شدیدتر است. به این معنی که در صورت خرابی یک خط در آزادراه دوخطه، ۵۹ درصد از ظرفیت راه از

را دارد. رانندگان ترجیح می دهند به جای حرکت در خطوط ترسیم شده فیزیکی (۲ خط باقیمانده در مثال فوق)، در خطوطی با عرض کمتر و نزدیک به سایر خودروها (۳ خط با عرض $(\frac{2}{4} = 3 = \frac{7}{2})$ متر) حرکت کنند. با در نظر گرفتن رفتار رانندگی در کشور، بخصوص در مقاطع کوتاهی مانند گلوگاههای ترافیکی این مسئله ملموس و قابل توجه است.

علاوه بر این، به منظور بررسی اثر خرابی در شانه راه عملیات مشابهی صورت گرفت و برای مناطق مختلف (هموار، تپه ماهوری و کوهستانی) با میزان خرابی متفاوت شانه (درصد)، ضریب ظرفیت باقیمانده راه مورد نظر به دست آمد. در جدول ۶ میزان ضریب ظرفیت باقیمانده برای میزان مختلف تخریب شانه آزادراه

برآورد ظرفیت راه در زمان وقوع بحران با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه ترافیک

نشان می‌دهد. این تغییرات بیانگر آن است که برای یک راه با ویژگیهای ثابت، هر چه شیب منطقه طرح بیشتر شود، میزان تأثیر خرابی بر ظرفیت راه بیشتر خواهد بود. دلیل این امر نیز می‌تواند تأثیر شیب راه بر حرکت وسایل نقلیه باشد.

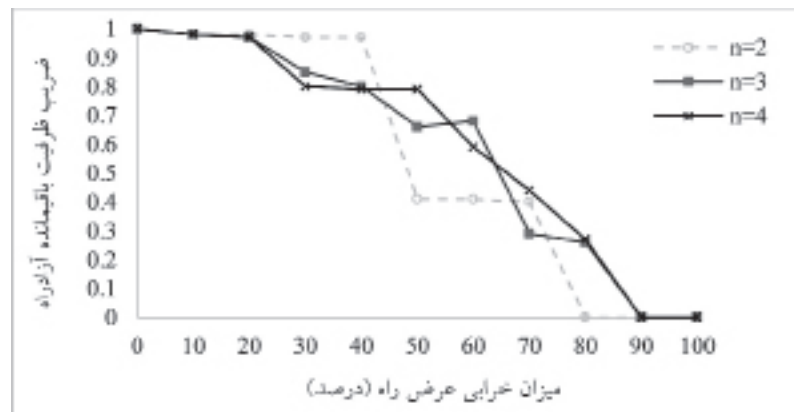
۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

شبکه‌های حمل‌ونقل به عنوان یکی از زیرساختهای ملی حائز اهمیت هستند. در میان شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل، حمل‌ونقل جاده‌ای به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد خود به عنوان متداول‌ترین شیوه مطرح بوده و بنابراین، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح آن از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از

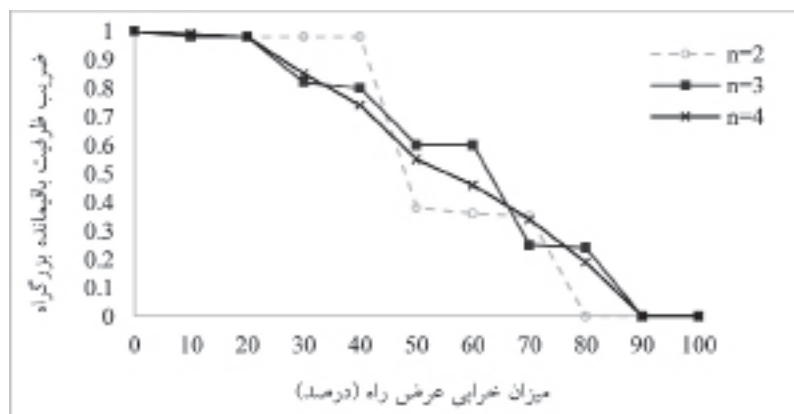
بین می‌رود. این در حالی است که در آزادراههای سه‌خطه و چهارخطه، این میزان به ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۲ درصد است. تحلیل این است که به‌ازای سهم خرابی واحد (درصد)، عرض خراب‌شده در راههای دارای تعداد خطوط بیشتر بزرگ‌تر بوده و زودتر باعث انسداد یک خط می‌شود. آشکار است که در راههای دارای تعداد خطوط بیشتر، عرض فیزیکی باقیمانده راه را می‌توان بین تعداد خودروی بیشتری تقسیم کرد.

۴-۲ تأثیر نوع منطقه بر ضریب ظرفیت باقیمانده راه

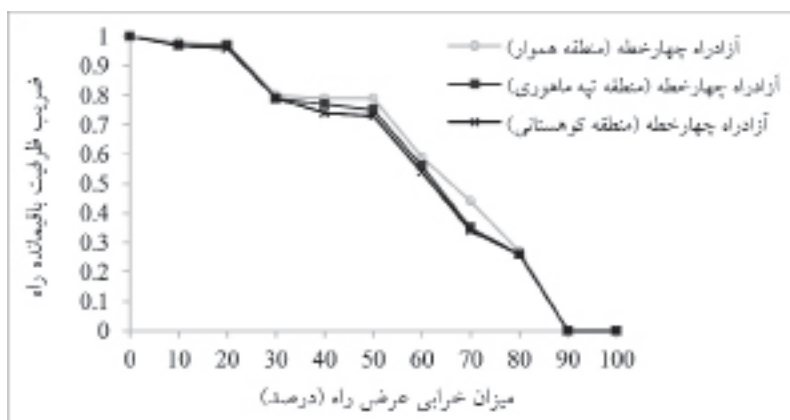
شکل ۳ ضریب ظرفیت باقیمانده راه را با توجه به مقدار خرابی و نوع منطقه‌ای که راه در آن واقع شده است برای آزادراه چهارخطه



شکل ۱. ضریب ظرفیت باقیمانده با توجه به مقدار خرابی و تعداد خطوط (آزادراه، منطقه هموار)



شکل ۲. ضریب ظرفیت باقیمانده با توجه به مقدار خرابی و تعداد خطوط (بزرگراه، منطقه هموار)



شکل ۳. مقدار ضریب ظرفیت باقیمانده با توجه به مقدار خرابی و نوع منطقه (n=4)

قرار گرفته است، پیشنهاد می‌شود که در پژوهشهای آتی بررسی تغییرات طول خرابی بر عملکرد راه مد نظر قرار گیرد. پیشنهاد دیگر بررسی تأثیر مدت زمان مسدود بودن راه بر ظرفیت مورد مطالعه است.

۶. پی نوشت‌ها

- 1- Exogenous
- 2- Queuing
- 3- Shockwave
- 4 - Endogenous
- 5- Bottleneck
- 6- Segment
- 7- Drop
- 8- Smooth

۷. مراجع

- حاجی حسینلو، منصور و هدایت، شرمین (۱۳۸۵) "مطالعه و بررسی حجم عبوری و کمترین زمان سفر در شبکه حمل‌ونقل در شرایط بحرانی زلزله"، سومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت ترافیک، تهران.
- یعقوبی وایقان، فریبرز و حسینی، محمود (۱۳۸۸) "ارایه یک روش ارزیابی سریع خطرپذیری لرزه‌ای برای سامانه‌های

ملزومات برنامه‌ریزی صحیح و اصولی، در نظر گرفتن شرایط مختلف عملکردی سیستم از جمله شرایط بحرانی است. در این مطالعه با هدف بررسی و برآورد تغییرات ظرفیت یک کمان از شبکه در نتیجه وقوع بحران، با رویکردی متفاوت از مطالعات گذشته، خرابیها به صورت سهمی (درصدی) از عرض راه در نظر گرفته شده‌اند و تأثیر محل وقوع خرابی (بدنه راه و ابنیه فنی) بر ظرفیت راه به‌طور جداگانه و با استفاده از شبیه‌سازی گلوگاه تعیین شد.

نتایج اجرای سناریوهای کاهش عرض راه نشان می‌دهد رفتار کاهش ظرفیت آزادراه و بزرگراه به‌ازای میزان خرابیهای مختلف (درصدی از عرض راه) به‌صورت پلکانی است و با افزایش تعداد خطوط در یک جهت، از میزان افت در پله‌ها کاسته می‌شود. با بررسی بیشتر نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش ظرفیت در راههای دارای تعداد خطوط کمتر (n=2) دیرتر اتفاق افتاده ولی میزان افت در آنها شدیدتر است. همچنین تأثیر انسداد یک خط در راههای دارای تعداد خطوط کمتر شدیدتر است. به این معنی که در صورت خرابی یک خط در آزادراه دوخطه، ۵۹ درصد از ظرفیت راه از بین می‌رود. این در حالی است که در آزاد راه سه‌خطه و چهارخطه، این میزان به ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۲ درصد است.

با توجه به این که در این مقاله طول ناحیه مسدود شده ثابت در نظر گرفته شده و تأثیر تغییرات عرض راه بر ظرفیت مورد بررسی

-Coifman, B. and Kim, S. (2011) "Extended bottlenecks, the fundamental relationship, and capacity drop on freeways", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 45, pp. 980-991.

-Kawakami, H. (2000) "Earthquake performance of highway system in Tokyo", 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

-Qin, L. and Smith, B. L. (2001) "Characterization of accident capacity reduction", USA: Research report No. UVACTS-15-0-48, Center for Transportation Studies, University of Virginia.

-Roess, R. P., Prassas, E. S. and McShane, W. R. (2004) "Traffic engineering", USA: Pearson Prentice-Hall.

-Sinha, P., Hadi, M. and Wang, A. (2007) "Modeling reductions in freeway capacity due to incidents in microscopic simulation models", Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol. 1999, pp. 62-68.

-Transportation Research Board (2010) "Highway capacity manual", USA: National Research Council.

-Transportation Research Board (2000) "Highway capacity manual", USA: National Research Council.

حمل و نقل برون‌شهری، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره اول ۶۵-۸۶

-Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1990) "Probability concepts in engineering planning and design; Vol. 2: Decision, risk and reliability", USA: John Wiley & Sons.

-Banks, J. H. (1990) "Flow processes at a freeway bottleneck", Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Vol 1287, pp. 20-28.

-Cambridge Systematics (1998) "Sketch methods for estimating incident impacts² Final report prepared for Federal Highway Administration.

-Chen, A., Yang, H., Lo, H. and Tang, W. (2000) "Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 36, pp. 225-252.

-Chen, Y. Y. and Eguchi, R. T. (2003) "Post-earthquake road unblocked reliability estimation based on an analysis of randomness of traffic demands and road capacities², Proceedings of the 6th US conference on lifeline earthquake engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 916-925.