

## تحلیل اثر تصادفات در محل تداخلات ورودی و خروجی بزرگراهی بر جریان ترافیک بالادست با تحلیل زمانی-مکانی

امیررضا مهدوی، دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
ایار فخوری، کارشناس مطالعات و برنامه‌ریزی سازمان مدیریت و مهندسی شبکه حمل‌ونقل شهرداری تبریز، تبریز، ایران  
مهدی باوقار زعیمی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران شمال، تهران، ایران  
سامان مشاق‌زاده، مدیرعامل، شرکت مشاوران اندیشکار، تهران، ایران  
محمود صفارزاده (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: saffar\_m@modares.ac.ir

### چکیده

پژوهش حاضر به بررسی اثر مکانی-زمانی تصادفات در محل تداخلات ورودی و خروجی بزرگراهی بر جریان ترافیک بالادست در شرایط غیراشباع می‌پردازد. مقطعی از بزرگراه یادگار امام (میان بزرگراه‌های حکیم و همت) به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با استفاده از داده‌های میدانی و مدل کلان تکر، شبیه‌سازی خرد تکر در نرم‌افزار Vissim انجام می‌گیرد. پس از کالیبراسیون مدل، ۱۸ سناریوی انسداد خطوط عبوری به مدت ۵ تا ۳۰ دقیقه شبیه‌سازی می‌شود. شاخص‌هایی نظیر زمان سفر، تأخیر، طول صف و میزان آلاینده‌گی ارزیابی شده و یک شاخص جدید برای تحلیل مکانی-زمانی تحت عنوان نسبت تأخیر به زمان سفر حالت عادی معرفی می‌شود. برای تعیین محدوده اثر نیز از گرادیان مکانی گسسته استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد انسداد خط میانی بیشترین تأثیر را بر عملکرد شبکه دارد، به‌گونه‌ای که به ازای هر دقیقه انسداد این خط، متوسط زمان سفر تا ۲/۹۲ ثانیه و تأخیر تا ۳/۹۴ ثانیه برای هر وسیله نقلیه افزایش می‌یابد. همچنین سرعت انتشار اثر انسداد بین ۳۲/۴ تا ۴۲/۳ متر بر دقیقه و مدت‌زمان گسترش آن تا فاصله ۵۵۰ متری بین ۱۲ تا ۱۷ دقیقه متغیر است. شاخص شدت انسداد نیز برای خط میانی به‌طور میانگین برابر با ۶۴۹ متر-دقیقه برآورد می‌شود که بیشتر از انسداد سایر خطوط است. یافته‌ها بر ضرورت تدوین راهکارهای واکنش سریع، اولویت‌دهی به رفع انسداد خطوط میانی و استقرار سامانه‌های هشدار بلادرنگ در مقاطع بحرانی تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی: تصادفات، تحلیل مکانی-زمانی، جریان ترافیک غیراشباع، محل تداخل جریان ترافیک، PTV Vissim

به مدت ۵ تا ۳۰ دقیقه مدنظر قرار گرفته و اثر این رخدادهای بر متغیرهای کلیدی جریان ترافیک مورد تحلیل قرار گرفته است. در هر سناریوی شبیه‌سازی شده، فرض بر آن است که تنها یک خط عبوری دچار اختلال می‌گردد. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیرپذیری جریان ترافیک از رخدادهای اختلال زا کوتاه‌مدت (همانند تصادف) در شرایط جریان غیراشباع و بررسی نحوه تأثیرگذاری تصادف بر زمان و مکان اختلالات ترافیکی جریان بالادست است. برای نیل به این هدف در تحلیل مکانی-زمانی، یک شاخص جدید ارائه می‌گردد که نسبت تأخیر به زمان سفر حالت عادی است. درنهایت برای تعیین محدوده اثر مکانی-زمانی تصادف در سناریوهای مختلف، از گرادیان مکانی شاخص پیشنهادی استفاده می‌گردد. تعیین محدوده اثر تصادفات می‌تواند منجر به شناخت دقیق‌تر رفتار ترافیکی شود و مدیریت بهتر صحنه تصادفات شود.

## ۲. ادبیات پژوهش

در دهه‌های اخیر، شبیه‌سازی خرد نگر ترافیک به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. نرم‌افزار PTV Vissim به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی، امکان مدل‌سازی دقیق رفتار رانندگان و تعاملات بین وسایل نقلیه را فراهم می‌کند. در ادامه، به بررسی مطالعاتی پرداخته می‌شود که با استفاده از این نرم‌افزار، اثرات تصادفات بر جریان ترافیک را تحلیل کرده‌اند.

در سال‌های ابتدایی، پژوهش‌ها بر توسعه روش‌های شبیه‌سازی تصادفات متمرکز بودند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای، روشی جدید برای شبیه‌سازی سه‌بعدی تصادفات با استفاده از Vissim ارائه شد که امکان بازسازی دقیق‌تر صحنه‌های تصادف را فراهم می‌کرد. این روش با ترکیب مدل‌های سه‌بعدی و داده‌های واقعی، به تحلیل بهتری از مکانیزم تصادفات دست یافت. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۲، با استفاده از نرم‌افزار Vissim، تأثیر تعداد خطوط مسدود شده، حجم ترافیک بالادست و مدت‌زمان

در دهه‌های اخیر، با گسترش شبکه‌های بزرگراهی درون‌شهری و افزایش حجم تردد وسایل نقلیه، حفظ ایمنی و پایداری جریان ترافیک به یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت حمل‌ونقل شهری تبدیل شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل اختلال در جریان روان ترافیک، وقوع تصادفات رانندگی به‌ویژه در محل تداخلات ورودی و خروجی بزرگراهی است. این نقاط به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از تغییر مسیر حرکت وسایل نقلیه، کاهش ناگهانی سرعت و تراکم حرکتی، مستعد بروز حوادث هستند و وقوع تصادف در آن‌ها می‌تواند تأثیری چندلایه و گسترده بر کل شبکه ترافیکی بگذارد.

درحالی‌که مطالعات متعددی به بررسی اثر تصادفات بر عملکرد جریان ترافیک پرداخته‌اند، اما تحلیل دقیق اثر این رخدادهای در محل تداخلات ورودی و خروجی بزرگراهی کمتر موردتوجه محققان قرار گرفته است. این در حالی است که این نواحی به دلیل تنوع حرکت وسایل نقلیه و نیاز به تغییر مسیر، از حساس‌ترین نقاط شبکه بزرگراهی به‌شمار می‌روند. در این مطالعه، شرایط غیراشباع جریان ترافیک در نظر گرفته شده است تا بررسی شود که در چنین وضعیتی، در صورت وقوع تصادف و انسداد یکی از خطوط عبوری، چه تغییراتی در زمان سفر، تشکیل صف، کاهش سرعت و انتقال اختلالات به مقاطع دیگر به وجود می‌آید. در همین راستا، با بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی-زمانی<sup>۱</sup>، تلاش شده است تا تعیین شود کدام مقاطع از بزرگراه و در چه بازه‌های زمانی تحت تأثیر وقوع تصادف قرار می‌گیرند و روند بازگشت شرایط ترافیکی به حالت عادی چگونه خواهد بود.

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی خرد نگر در نرم‌افزار PTV Vissim، به بررسی اثر وقوع تصادف و انسداد خطوط عبوری در مقطع بزرگراهی یادگار امام (حدفاصل بزرگراه حکیم تا بزرگراه همت) پرداخته شده است. در این راستا، سناریوهای متعددی شامل انسداد هر یک از خطوط عبوری شماره ۱، ۲ و ۳

تصادف بر ظرفیت جاده و تأخیر ترافیکی شبیه‌سازی و تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد خطوط مسدود شده و مدت‌زمان تصادف منجر به افزایش تأخیر و طول صف می‌شود. مطالعه‌ای توسط Liu و همکاران (۲۰۱۷) به توسعه یک مدل تحلیل پویا در حوزه مکان-زمان برای پیش‌بینی تأثیرات ناشی از وقوع تصادفات ترافیکی پرداخته است. این مدل با تلفیق تکنیک‌های تحلیل مکانی-زمانی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های فیزیکی موج ضربه‌ای ترافیک، توانسته تأثیر گسترش تصادفات در شبکه جاده‌ای را در موقعیت‌های متفاوت (اعم از مسیرهای مستقیم و پیچیده) شبیه‌سازی کند. برای ارزیابی دقت مدل، دو سناریوی واقعی با داده‌های میدانی و مدل دنباله‌روی خودرو بررسی شده و دقت پیش‌بینی بیش از ۶۰٪ به‌دست آمده است. این رویکرد ضمن نیاز کمتر به پارامترهای پویا، از نظر محاسباتی نیز بهینه‌تر از مدل‌های سنتی عمل کرده و قابلیت تعمیم به سطوح مختلف راه‌ها را دارد.

در سال‌های اخیر، تحلیل مکانی-زمانی تصادفات به‌عنوان روشی مؤثر برای شناسایی الگوهای تصادفات و نقاط حادثه‌خیز مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴، با استفاده از تکنیک‌های بصری سازی مکانی-زمانی مبتنی بر GIS، تصادفات درون‌شهری در شیراز مورد بررسی قرار گرفت و مناطق پرخطر شناسایی شدند.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹، تحلیل مکانی-زمانی تصادفات فصلی با استفاده از روش برآورد چگالی کرنل (KDE) انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب KDE با شاخص موران محلی (Local Moran's I) می‌تواند خوشه‌های تصادفات را با دقت بیشتری شناسایی کند.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹، با استفاده از روش KDE+، رفتار مکانی-زمانی نقاط پر تصادف در جاده‌های روستایی جمهوری چک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این نقاط در طول زمان تغییر می‌کنند و تنها تعداد محدودی از آن‌ها در بازه زمانی نه‌ساله پایدار باقی می‌مانند.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱، با استفاده از تحلیل‌های خوشه‌ای و روش‌های آماری، همبستگی‌های مکانی-زمانی تصادفات شهری در ولز بررسی شد. نتایج نشان داد که تصادفات در ساعات اوج ترافیک و در ماه‌های گرم‌تر سال بیشتر رخ می‌دهند.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲، با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک ترتیبی وزنی جغرافیایی و زمانی (GTWOLR)، شدت تصادفات در بزرگراه‌های روستایی آنهویی چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عواملی مانند نوع تصادف، سن راننده، نوع وسیله نقلیه و ویژگی‌های جاده تأثیر قابل توجهی بر شدت تصادفات دارند.

Moriano و همکاران (۲۰۲۴) با هدف کاهش زمان تشخیص تصادف (TTDA)، مدلی مبتنی بر یادگیری ماشین را توسعه داده‌اند که از ویژگی‌های مکانی-زمانی داده‌های ترافیکی استفاده می‌کند. آن‌ها از داده‌های راداری، شرایط نوری و آب‌وهوایی در مجاورت تصادف بهره گرفته‌اند تا دقت شناسایی را افزایش دهند. در این مطالعه، مدل XGBoost بهترین عملکرد را داشته و توانسته است تصادفات را با دقت ۸۳٪ و میانگین دقت ۴۹٪ تنها ۱ دقیقه پس از وقوع تشخیص دهد. این پژوهش نشان می‌دهد درک تأثیر تصادف بر مقاطع مجاور می‌تواند تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تری از تصادف فراهم کند.

Zhang و همکاران (۲۰۲۴) با هدف تحلیل مکانی-زمانی تأخیر ناشی از تصادفات بزرگراهی، روشی ترکیبی مبتنی بر داده‌های واقعی موقعیت‌یابی وسایل نقلیه و شاخص عملکرد ترافیکی (TPI) ارائه کرده است. در این مطالعه، با استفاده از خوشه‌بندی فضایی و مدل خطای مکانی (SEM)، ارتباط بین ویژگی‌های تصادف (نظیر نوع تصادف، نوع راه، محیط پیرامونی و سرعت قبل از تصادف) با شدت و گستره تأخیر تحلیل شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص TPI به‌خوبی مدت، شدت و وسعت تأخیرها را در شبکه بزرگراهی ثبت می‌کند و ابزار مؤثری برای تدوین استراتژی‌های واکنش اضطراری و سیاست‌گذاری ترافیکی به شمار می‌رود.

در یک مطالعه موردی در محور هراز (ایران)، پژوهشی با هدف تحلیل مکانی-زمانی تصادفات جاده‌ای و شناسایی خوشه‌های مکانی پرحادثه انجام شده است. با استفاده از داده‌های سازمان امداد و نجات و به‌کارگیری تکنیک‌هایی مانند تابع کرنل برای تخمین تراکم و شاخص *Getis-Ord Gi*، مناطق دارای تراکم بالا در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ شناسایی شدند. نتایج نشان داد که تراکم تصادفات در طول زمان دچار تغییرات مکانی شده و مناطقی مانند کهرود پایین، پنجاب و پلور به‌عنوان نقاط بحرانی با مقدار میانگین *Z-score* برابر با ۴٫۴۹ مشخص شدند. همچنین کاهش تدریجی در تعداد خوشه‌های مکانی و درصد تصادفات در آن‌ها مشاهده شده است. این تحقیق بر کارایی روش‌های آماری مکانی در تحلیل توزیع مکانی-زمانی تصادفات تأکید دارد و ابزار مؤثری برای تصمیم‌سازی در بهبود ایمنی و اطلاع‌رسانی به کاربران جاده معرفی می‌شود.

در یک مطالعه موردی در شهر اصفهان، تأثیر خودروهای سبک باری بر ایمنی ترافیکی و وقوع تصادفات در مناطق درون‌شهری بررسی شده است. این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه این خودروها همیشه مستقیماً درگیر تصادفات نیستند، اما با ایجاد اختلال در جریان ترافیک (مانند پارک در محل‌های نامناسب یا توقف هنگام تخلیه بار)، نقش مهمی در کاهش ایمنی ایفا می‌کند.

کنند. با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل لوجیت، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصادفات ناشی از این خودروها شناسایی و اولویت‌بندی شدند. همچنین، با رویکرد تحلیل مکانی-زمانی، نقاط پر تصادف شهر و زمان‌های بحرانی مشخص شده و در نهایت، طرحی برای مدیریت زمان و مسیر تردد این وسایل پیشنهاد شده است که هدف آن کاهش خطر تصادف و بهبود ایمنی شهری است.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵، بر پایه داده‌های ناوگان متصل، نویسندگان الگوریتمی برای تشخیص سریع تصادفات در آزادراه‌ها پیشنهاد داده‌اند که تنها با استفاده از داده‌های موقعیت یابی *GPS* عمل می‌کند. شاخص به‌کاررفته، تغییرات زمانی-مکانی موقعیت و سرعت وسایل نقلیه است. این الگوریتم محل تصادف را دقیق‌تر از روش‌های سنتی مشخص می‌کند و وقوع و رفع تصادف را به ترتیب ۷:۴۰ دقیقه و ۵:۵۹ دقیقه زودتر شناسایی می‌کند. دقت آن بر اساس شاخص *F1* برابر ۸۲/۴۵ درصد تأیید شده است.

مطالعات مختلف از شاخص‌های متعددی برای تحلیل مکانی-زمانی تصادفات استفاده کرده‌اند. در جدول ۱، مهم‌ترین این شاخص‌ها و مطالعات مرتبط با آن‌ها ارائه شده است:

جدول ۱. شاخص‌های استفاده‌شده در مطالعات پیشین برای تحلیل مکانی-زمانی تصادفات

مطالعات مرتبط	سال	توضیحات	شاخص
Shi & Cheng	۲۰۱۲	مدلسازی دقیق جریان ترافیک و تأثیر تصادفات بر پارامترهای ترافیکی	شبیه‌سازی خرد نگر با VISSIM
Harirforoush et al.	۲۰۱۹	روشی برای شناسایی نقاط پر تصادف با استفاده از توزیع فضایی تصادفات	برآورد چگالی کرنل (KDE)
Bíl et al.	۲۰۱۹	روشی برای شناسایی نقاط پر تصادف با استفاده از توزیع فضایی تصادفات	برآورد چگالی کرنل (KDE)

مطالعات مرتبط	سال	توضیحات	شاخص
Wang et al.	۲۰۲۱	مدلی برای تحلیل تأثیر عوامل مختلف بر شدت تصادفات با در نظر گرفتن وابستگی‌های مکانی و زمانی	مدل رگرسیون لجستیک ترتیبی وزنی جغرافیایی و زمانی (GTWOLR)
Wang et al.	۲۰۲۱	روشی برای شناسایی الگوهای تجمعی تصادفات در فضا و زمان	تحلیل خوشه‌ای
L. Querfurth	۲۰۲۵	روشی برای تشخیص سریع تصادفات در آزادراه‌ها	سرعت

شناسایی بازه‌های زمانی با جریان غیراشباع است. بر اساس این داده‌ها، ساعت‌های اوج ترافیک (که بیانگر اشباع جریان هستند) شناسایی و از تحلیل‌های اصلی حذف می‌شوند تا تمرکز مطالعه بر روی بازه‌هایی باشد که در آن‌ها جریان ترافیک روان ولی آسیب‌پذیر در برابر اختلالات باشد.

در کنار این آماربرداری، برداشت‌های مشابهی نیز در بزرگراه‌های همت و حکیم صورت می‌گیرد تا تصویر کامل‌تری از وضعیت جریان ترافیک در شبکه اطراف و تأثیرات احتمالی این مسیرها بر محدوده مورد مطالعه به دست آید. لازم به ذکر است که این آماربرداری‌ها تنها در مقاطعی انجام می‌شود که وسایل نقلیه فقط به صورت مستقیم حرکت می‌نمایند و آماربرداری در رمپ‌ها و لوپ‌ها تقاطع‌های غیر همسطح انجام نمی‌شود.

### ۳-۲ استفاده از مدل کلان نگر برای تکمیل داده‌ها

با توجه به محدودیت‌های موجود در برداشت اطلاعات تردد وسایل نقلیه و نیز به منظور به دست آوردن تصویری یکپارچه از توزیع حجم تردد در شبکه، از مدل کلان نگر حمل و نقل شهر تهران که در نرم‌افزار EMME2 توسعه یافته، استفاده می‌گردد. این مدل امکان استخراج حجم عبوری از تمامی کمان‌های شبکه بزرگراهی مورد مطالعه را فراهم می‌کند. همچنین داده‌های حاصل از این مدل با نتایج آماربرداری میدانی تطبیق داده می‌شوند تا صحت و دقت تخمین‌ها تضمین شود.

با توجه به مرور ادبیات موجود، مطالعات متعددی به تحلیل اثر تصادفات بر جریان ترافیک و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی پرداخته‌اند. بسیاری از این پژوهش‌ها بر تحلیل‌های زمانی و مکانی متمرکز بوده‌اند، اما در بیشتر موارد، تحلیل‌های جامع برای شناسایی محدوده اثر تصادف بر جریان بالادست به‌ویژه در شرایط غیراشباع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، اکثر تحقیقات از شاخص‌های استاندارد مانند زمان سفر، حجم عبوری و تأخیر برای ارزیابی تأثیر تصادفات استفاده کرده‌اند. با این حال، در مطالعه جاری، برای نخستین بار از شاخص جدید نسبت تأخیر به زمان سفر حالت عادی و همچنین گرادیان مکانی گسسته برای تعیین محدوده اثر مکانی-زمانی تصادفات بر جریان بالادست استفاده شده است. این نوآوری‌ها می‌توانند به تحلیل دقیق‌تر و بهینه‌تر اثرات تصادفات در شرایط غیراشباع کمک کنند و اطلاعات جدیدی را در اختیار محققان و مدیران ترافیکی جهت تعیین محدوده اثر تصادفات قرار دهند.

### ۳. روش شناسی پژوهش

در این بخش روش شناسی پژوهش جاری ارائه می‌گردد.

#### ۳-۱ گردآوری داده‌های ترافیکی

به منظور شبیه‌سازی دقیق جریان ترافیک در مقطع مورد مطالعه، ابتدا یک آماربرداری میدانی به مدت ۱۴ ساعت متوالی از ساعت ۶ صبح تا ۸ شب در بزرگراه یادگار امام (حدفاصل بزرگراه حکیم تا بزرگراه همت) انجام می‌گردد. هدف از این آماربرداری، استخراج حجم وسایل نقلیه عبوری در وضعیت واقعی و

### ۳-۳ طراحی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار PTV

#### Vissim

در مرحله بعد، شبکه بزرگراه یادگار امام در بازه مذکور (میان بزرگراه حکیم و بزرگراه همت) با تمام ویژگی‌های هندسی و عملکردی آن شامل تعداد خطوط، عرض خطوط، محل ورودی و خروجی‌ها، شیب طولی، سرعت مجاز و علائم ترافیکی در نرم‌افزار شبیه‌سازی خرد نگر PTV Vissim مدل‌سازی می‌شود.

لازم به ذکر است که ابتدا شرایط وضع موجود شبیه‌سازی می‌گردد تا بتوان مدل خرد نگر را با توجه به شرایط واقعی شبکه موردبررسی کالیبره نمود. لازم به ذکر است برای کالیبراسیون مدل خرد نگر شبکه بزرگراهی موردبررسی، از شاخص GEH استفاده می‌گردد که مطابق با رابطه (۱) است.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M-C)^2}{M+C}} \quad (1)$$

که رابطه فوق،  $M$  حجم تردد ورودی به شبکه در مدل خرد نگر شبیه‌سازی شده و  $C$  حجم تردد ورودی به شبکه در واقعیت (شمارش‌شده در آماربرداری) است. برای آنکه کالیبراسیون مدل خرد نگر، بر اساس این شاخص مطلوب باشد، مقدار GEH باید کمتر از ۵ شود سپس در این مرحله مقادیر پایه شاخص‌های ارزیابی ترافیک نظیر حجم عبوری، زمان سفر، سرعت متوسط، طول صف و مصرف سوخت که نشان‌دهنده وضع موجود شبکه هستند، استخراج می‌شوند.

سپس سناریوهای مختلف وقوع تصادف طراحی و شبیه‌سازی می‌شوند. در این سناریوها فرض بر آن است که در هر حالت، تنها یکی از خطوط عبوری دچار انسداد می‌شود. این انسدادها در سه موقعیت مختلف یعنی خط عبوری شماره ۱ (نزدیک‌ترین خط به شانه راست)، شماره ۲ (خط میانی) و شماره ۳ (نزدیک‌ترین خط به وسط بزرگراه) برای مدت‌زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه به صورت جداگانه اعمال می‌گردند. در مجموع ۱۸ سناریوی مجزا برای شرایط وقوع تصادف تعریف

می‌شود که این سناریوها در کنار سناریوی وضع موجود، مجموعه‌ای جامع از حالت‌های ممکن را پوشش می‌دهند.

### ۳-۴ تنظیمات خروجی و تحلیل مکانی-زمانی

به منظور انجام تحلیل‌های دقیق در حوزه اثرات مکانی و زمانی تصادف، نیاز است تنظیمات خاصی در نرم‌افزار Vissim اعمال شود تا خروجی شاخص‌های ارزیابی ترافیکی در بازه‌های مکانی و زمانی منظم قابل دریافت باشد. مقطع مورد مطالعه از بزرگراه یادگار امام به فواصل با طول ۵۰ متر تقسیم می‌شوند و خروجی‌ها برای بازه‌های یک دقیقه‌ای برای هر مقطع ثبت می‌گردند.

شاخص‌هایی نظیر سرعت متوسط، حجم عبوری، زمان سفر، تأخیر و طول صف در هر بازه مکانی و زمانی ثبت می‌شوند تا امکان بررسی نحوه گسترش اختلال ترافیکی در طول بزرگراه و شناسایی روند بازگشت شرایط به حالت عادی فراهم شود. این داده‌ها پایه تحلیل‌های مکانی-زمانی را فراهم کرده و ابزاری مناسب برای ارزیابی شدت، گستره و پایداری اثر تصادف در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی فراهم می‌آورند.

### ۳-۵ تحلیل مکانی-زمانی<sup>۲</sup> اثر تصادفات بر جریان

#### بالادست

برای تحلیل دقیق نحوه گسترش اثرات ناشی از وقوع تصادف در طول مقطع بزرگراهی مورد مطالعه و در طول زمان، از تحلیل مکانی-زمانی استفاده می‌شود. هدف اصلی در این بخش، شناسایی آن بخش از مقاطع بالادست است که در اثر وقوع تصادف و انسداد مسیر، دچار اختلال شده‌اند. همچنین نحوه و سرعت انتشار این اختلال در جریان بالادست این شبکه موردبررسی قرار خواهد گرفت. برای نیل به این هدف از یک شاخص جدید پیشنهادی که نسبت تأخیر به زمان سفر حالت عادی است، استفاده می‌گردد که این شاخص به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$d_n^i = \frac{t_{ni} - t_n}{t_n} \quad (2)$$

که در رابطه فوق،  $t_n$  زمان سفر در شرایط عادی در مقطع  $n$ ،  $t_{ni}$  زمان سفر در سناریو وقوع تصادف  $i$  در مقطع  $n$  و  $d_n^i$  نسبت

تأخیر سناریو تصادف  $i$  به زمان سفر شرایط عادی در مقطع  $n$  است.

سپس برای به دست آوردن شدت تغییرات مکانی شاخص پیشنهادی، گرادیان مکانی گسسته<sup>۲</sup> آن با استفاده از رابطه (۳)، محاسبه خواهد شد:

$$g_{ni} = \frac{d_n^i - d_{n-1}^i}{\Delta x} \quad (3)$$

که در آن  $d_n^i$  و  $d_{n-1}^i$  به ترتیب نسبت تأخیر سناریو تصادف  $i$  در مقاطع  $n$  و  $n-1$  گرادیان مکانی گسسته مقطع  $n$  در سناریو تصادف  $i$  و  $\Delta x$  طول مقطع بزرگراه است که در این پژوهش برابر با ۵۰ متر فرض گردیده است.

برای شناسایی محدوده‌ای از بالادست که به‌طور معنادار تحت تأثیر تصادف قرار می‌گیرد، روند تغییرات گرادیان مکانی گسسته در طول مقطع در هر لحظه بررسی می‌شود. مطابق با مطالعات پیشین در تحلیل جریان ترافیک مقطعی که در آن‌ها گرادیان مکانی گسسته تأخیر شدیدی را نشان می‌دهند، به‌عنوان نقاط مرزی انتقال اثر تصادف در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعه، مقدار آستانه به‌صورت تجربی و با تحلیل سناریوی پایه و داده‌های وضع موجود تعیین می‌گردد (رابطه ۴).

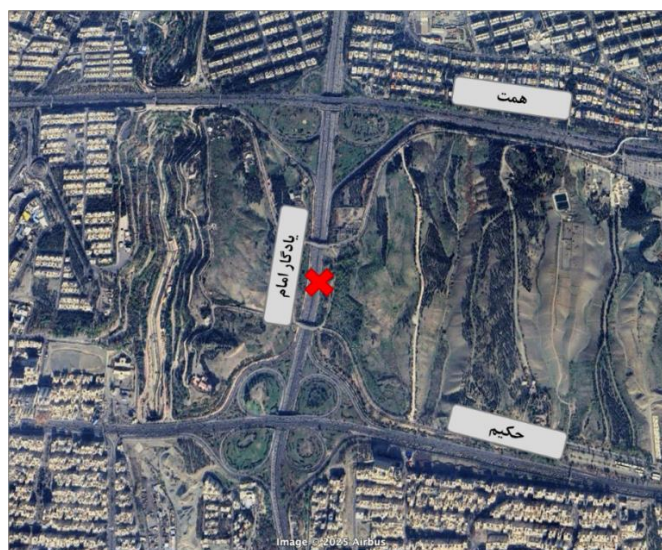
$$|g_{ni}| \geq \theta_n \quad (4)$$

که رابطه فوق  $\theta_n$  آستانه مجاز تغییرات برای گرادیان مکانی گسسته برای مقطع  $n$  از بزرگراه است. چنانچه توزیع نرمال برای

گرادیان مکانی گسسته فرض گردد، بیش از ۹۵ درصد داده‌ها در فاصله ۲ انحراف معیار از میانگین قرار می‌گیرند. از این رو در پژوهش جاری آستانه تغییرات مجاز، برابر با ۲ برابر انحراف معیار گرادیان مکانی گسسته در شرایط عادی جریان ترافیک در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴. تحلیل داده‌ها

در شکل ۱ شبکه موردبررسی در این پژوهش به تصویر کشیده شده است. این شبکه شامل بخشی از بزرگراه‌های یادگار امام، حکیم و همت و همچنین تقاطع‌های غیر همسطح آن‌ها است. محل وقوع تصادف فرضی، در بزرگراه یادگار امام مابین بزرگراه‌های حکیم و همت در جهت جنوب به شمال است که در شکل ۱ با ضربدر قرمز رنگ مشخص شده است. محل وقوع تصادف دقیقاً در محدوده تداخلی جریان ترافیک ورودی از رمپ شرق به شمال بزرگراه حکیم و جریان ترافیک خروجی به رمپ جنوب به شرق یادگار امام (ورودی همت شرق) قرار دارد. مقطعی از بزرگراه یادگار امام که این پژوهش موردبررسی قرار می‌گیرد، دارای طول ۲۲۰۰ متر است که جریان ترافیک جهت جنوب به شمال آن تحت تأثیر این تصادف قرار خواهد گرفت.

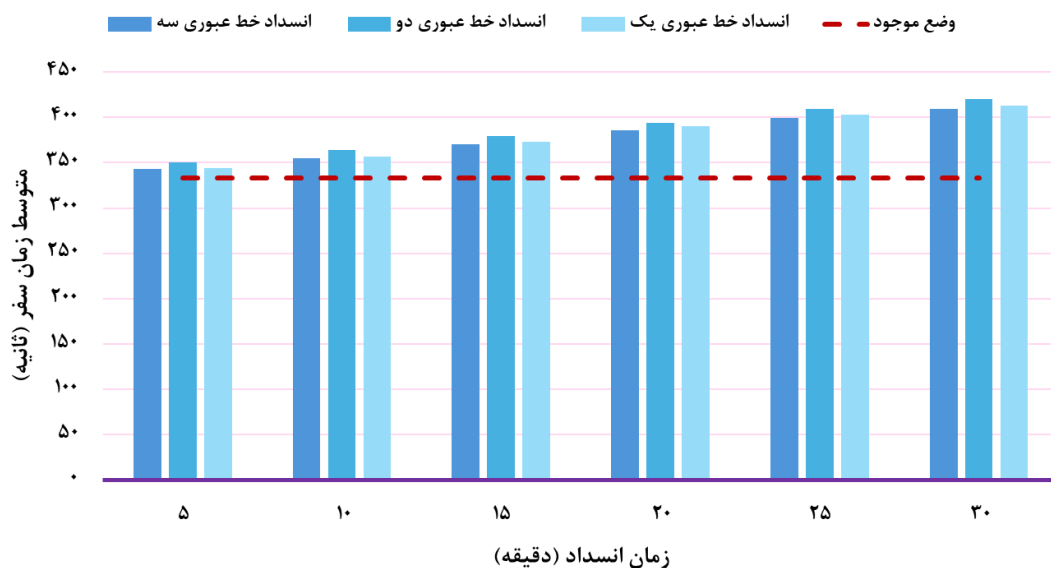


شکل ۱. شبکه بزرگراهی موردبررسی و محل وقوع تصادف فرضی

بر اساس آماربرداری‌های صورت گرفته کل حجم ورودی (تمامی معابر و جهت‌ها) به شبکه موردبررسی برابر با ۱۳۲۵۸ همسنگ سواری در یک ساعت (C) بوده است درحالی‌که بعد از پرداخت مدل خرد نگر در نرم‌افزار PTV Vissim مجموع تمام احجام واردشده به شبکه، برابر با ۱۳۷۷۶ همسنگ سواری در یک ساعت (M) برآورد گردیده است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، شاخص GEH برای مدل کالیبره شده برابر با ۴/۴۶ خواهد بود که بیانگر وضعیت مطلوب مدل و معتبر بودن نتایج مدل است.

به‌منظور پایدارسازی شرایط ترافیکی و حذف اثرات اولیه ورود ناگهانی وسایل نقلیه، یک دوره پیش‌گرم<sup>۴</sup> در ابتدای هر شبیه‌سازی به مدت ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است و پس‌ازاین مدت تمامی شاخص‌ها به‌منظور بررسی وضعیت سناریوها، به مدت ۶۰ دقیقه استخراج می‌شوند. لازم به ذکر است فرض

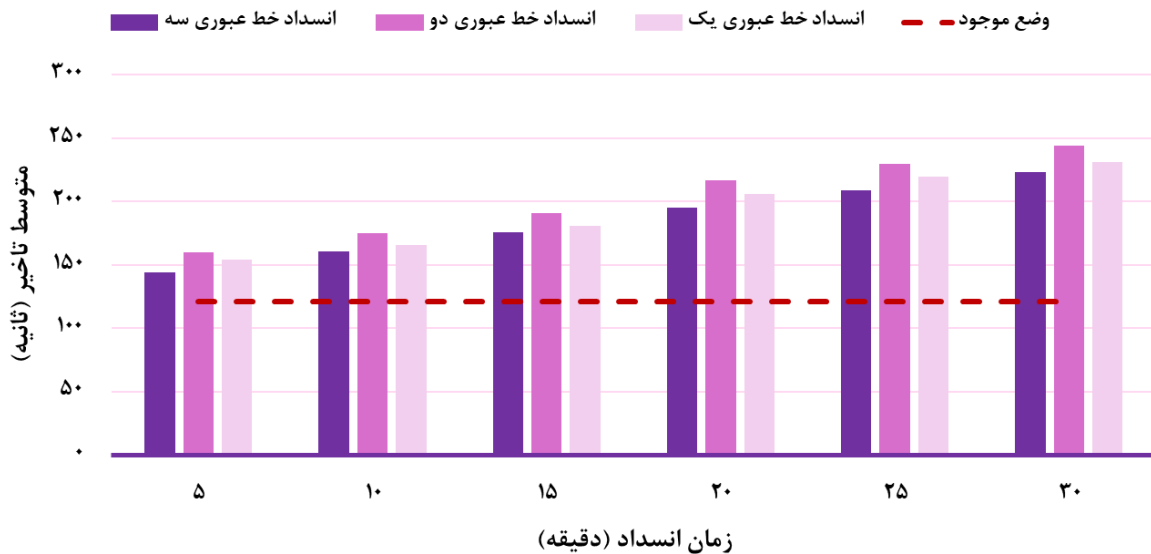
می‌شود در تمامی سناریوها، تصادف در دقیقه ۱۰ پس از دوره پیش‌گرم، اتفاق می‌افتد و انسداد شروع می‌شود. در ادامه ابتدا شاخص‌های کلی ترافیکی، در ۱۸ سناریو بررسی می‌شوند سپس به تحلیل‌های مکانی-زمانی ارائه خواهد شد. مطابق با شکل ۲، می‌توان گفت متوسط زمان سفر در تمام سناریوهای انسداد خط عبوری ۲ نسبت به انسداد سایر خطوط، بیشتر است. متوسط زمان سفر در حالت انسداد خط عبوری یک و ۳ به ترتیب در رتبه‌های ۲ و ۳ قرار خواهند گرفت. همچنین می‌توان گفت به ازای هر یک دقیقه انسداد در خط عبوری ۲، ۲/۹۲ ثانیه زمان سفر تمامی کاربران افزایش خواهد یافت که این افزایش برای حالت انسداد خطوط عبوری یک و ۳ به ترتیب برابر با ۲/۷۹ و ۲/۶۵ است. به‌بیان‌دیگر هر دقیقه انسداد خط عبوری ۲، به ترتیب ۴/۷ و ۱۰/۲ درصد بیشتر از انسداد خطوط یک و ۳، منجر به افزایش زمان سفر کاربران می‌گردد.



شکل ۲. متوسط زمان سفر در جهت جنوب به شمال بزرگراه یادگار امام در محدوده موردبررسی در کل مدت زمان شبیه‌سازی

عبوری ۲، ۳/۹۴ ثانیه تأخیر اضافه به کاربران تحمیل می‌گردد که این مقدار به ازای هر دقیقه انسداد خط عبوری ۱ و ۳ به ترتیب برابر با ۳/۵۹ و ۳/۳۶ ثانیه است.

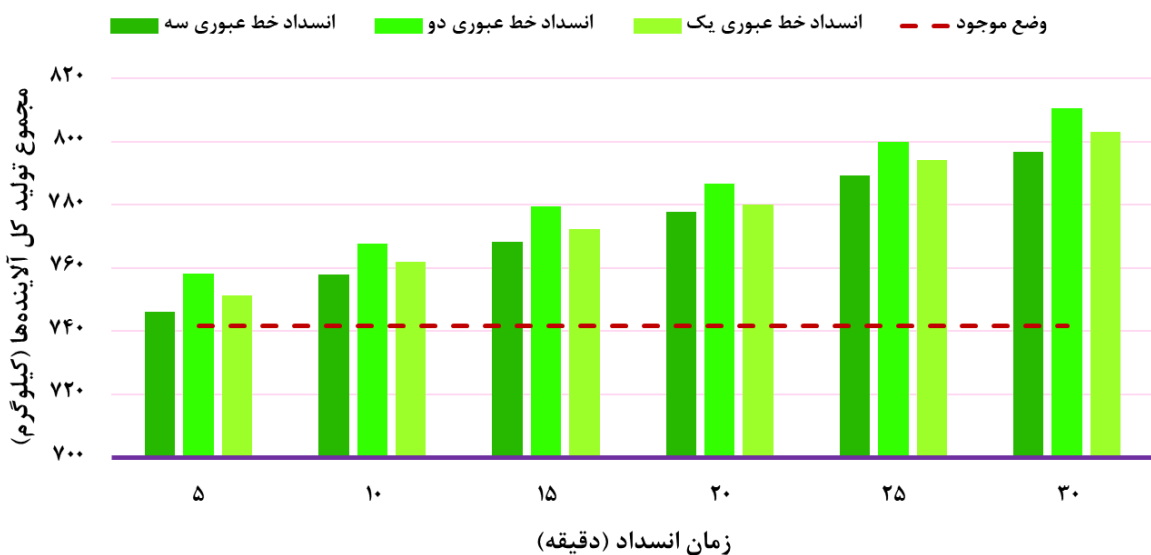
شکل ۳ نشان‌دهنده وضعیت متوسط تأخیر در سناریوهای مختلف است که نتایج آن کاملاً مشابه با متوسط زمان سفر است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت، به ازای هر دقیقه انسداد خط



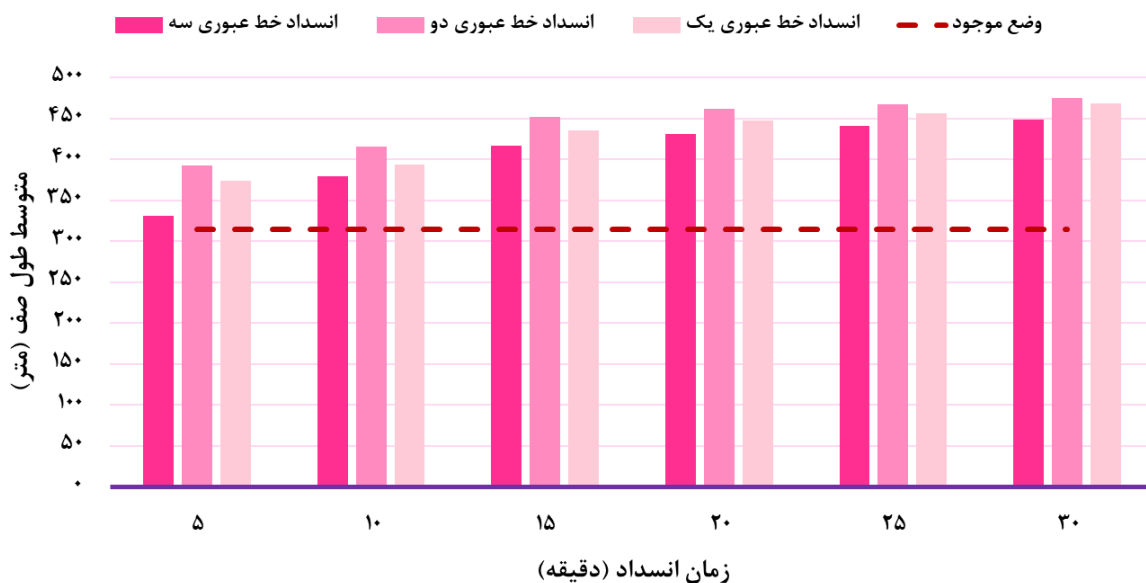
شکل ۳. متوسط تأخیر در جهت جنوب به شمال بزرگراه یادگار امام در محدوده مورد بررسی در کل مدت زمان شبیه سازی

زیست محیطی بیشتر تولید می گردد در حالی که در صورت انسدادهای خطوط عبوری یک و ۳ به ترتیب ۲/۰۶ و ۱/۹۵ کیلوگرم تولید خواهد شد.

شکل ۴ مجموع تولید کل آلاینده های زیست محیطی را نشان می دهد که شامل آلاینده های  $PM_{10}$ ،  $PM_{2.5}$ ،  $NOX$ ،  $HC$ ،  $CO$  و  $CO_2$  می گردد. نتایج حاکی از آن است که به ازای هر یک دقیقه انسدادهای سه عبوری ۲، ۲/۲۰ کیلوگرم آلاینده های



شکل ۴. متوسط تولید آلاینده های زیست محیطی در جهت جنوب به شمال بزرگراه یادگار امام در محدوده مورد بررسی در کل مدت زمان شبیه سازی

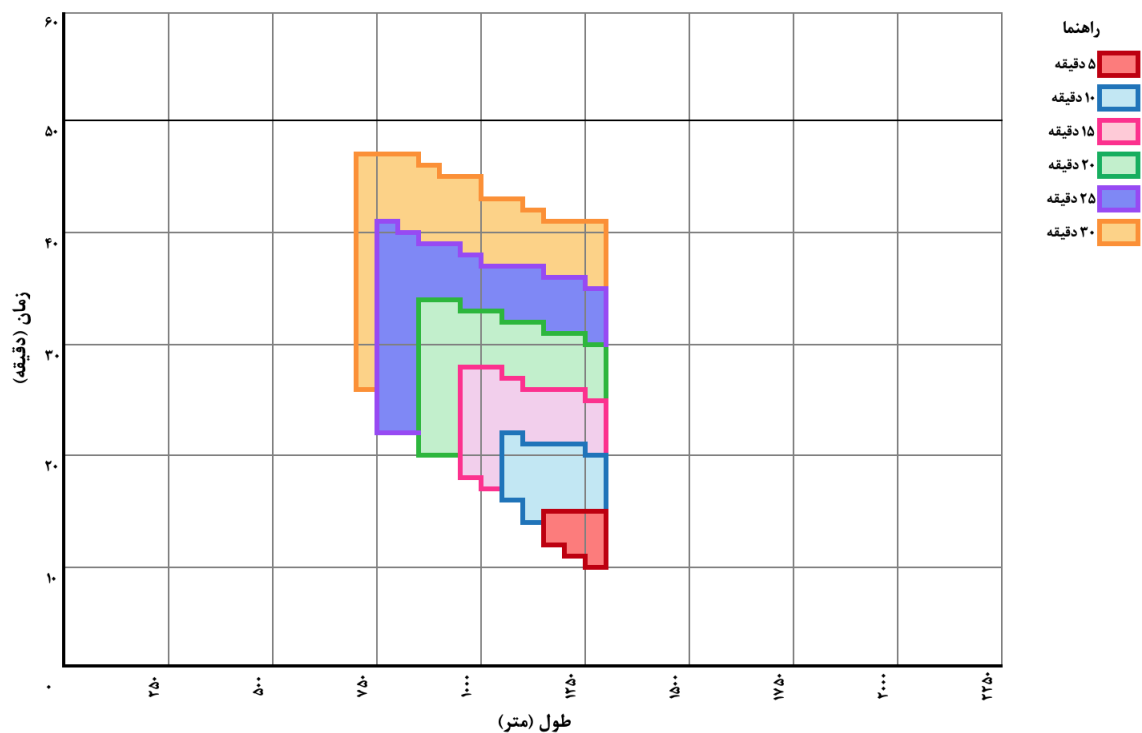


شکل ۵. متوسط طول صف در جهت جنوب به شمال بزرگراه یادگار امام در محدوده مورد بررسی در کل مدت زمان شبیه سازی

محدوده اثر تصادف در صورت انسداد خط عبوری یک، به مدت ۱۰ دقیقه، برابر با مجموع محدوده های قرمز و آبی است. به همین صورت برای سناریو ۱۵ دقیقه انسداد، محدوده اثر مکانی-زمانی، برابر با مجموع محدوده های قرمز، آبی و صورتی خواهد بود. بر اساس این نتایج مشخص می گردد، در این سناریوها ۱۷ دقیقه طول می کشد تا محدوده اثر مکانی تصادف به فاصله ۵۵۰ متری از محل تصادف انتشار یابد. به بیان دیگر سرعت انتشار اثر تصادف در این حالت برابر با ۳۲/۴ متر بر دقیقه برآورد می گردد. همچنین می توان گفت در این حالت ۷ دقیقه زمان نیاز است تا شرایط تردد در مسیر مورد بررسی به حالت عادی بازگردد.

شکل ۵ که نشان دهنده متوسط طول صف است، بیانگر آن است که به ازای انسداد هر یک دقیقه خط عبوری ۲، ۴/۸۶ متر طول صف افزایش خواهد یافت درحالی که به ازای هر یک دقیقه انسداد خطوط عبوری یک و ۳ طول صف به میزان ۴/۶۲ و ۴/۱۲ متر افزایش می یابد.

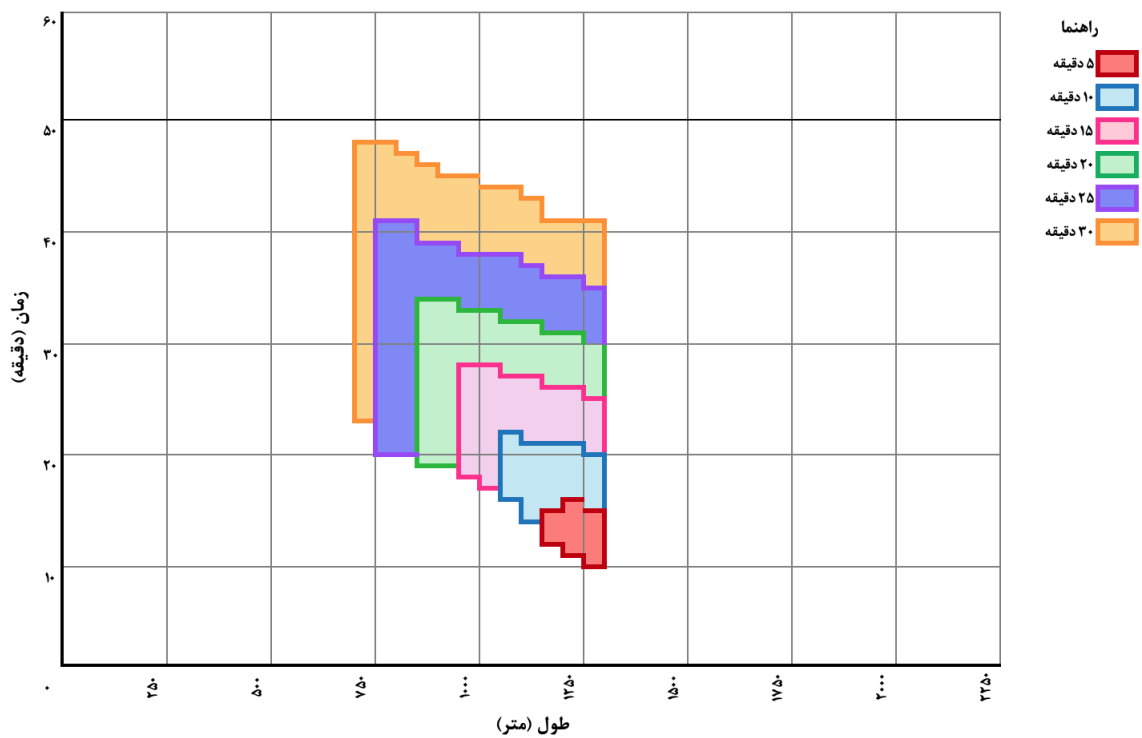
در شکل ۶، محدوده اثر مکانی-زمانی تصادف در صورتی که منجر به انسداد خط عبوری یک گردد، نشان داده شده است. لازم به ذکر است، محدوده اثر مکانی زمانی به صورت تجمعی در شکل به تصویر کشیده شده است. این محدوده اثر مکانی-زمانی بر اساس گرادیان مکانی گسسته نسبت تأخیر به زمان سفر حالت عادی برآورد گردیده است. به بیان ساده تر، می توان گفت



شکل ۶. محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری یک در سناریوهای مختلف

شکل ۷ نشان‌دهنده محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری دو در سناریوهای مختلف ۵۵۰ متری برسد که بیانگر سرعت انتشار  $42/3$  متر بر دقیقه است.

شکل ۷ نشان‌دهنده محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری دو است. در این حالت حدود ۱۳ دقیقه طول می‌کشد تا محدوده اثر مکانی تصادف به فاصله ۵۵۰ متری برسد که بیانگر سرعت انتشار  $42/3$  متر بر دقیقه است.

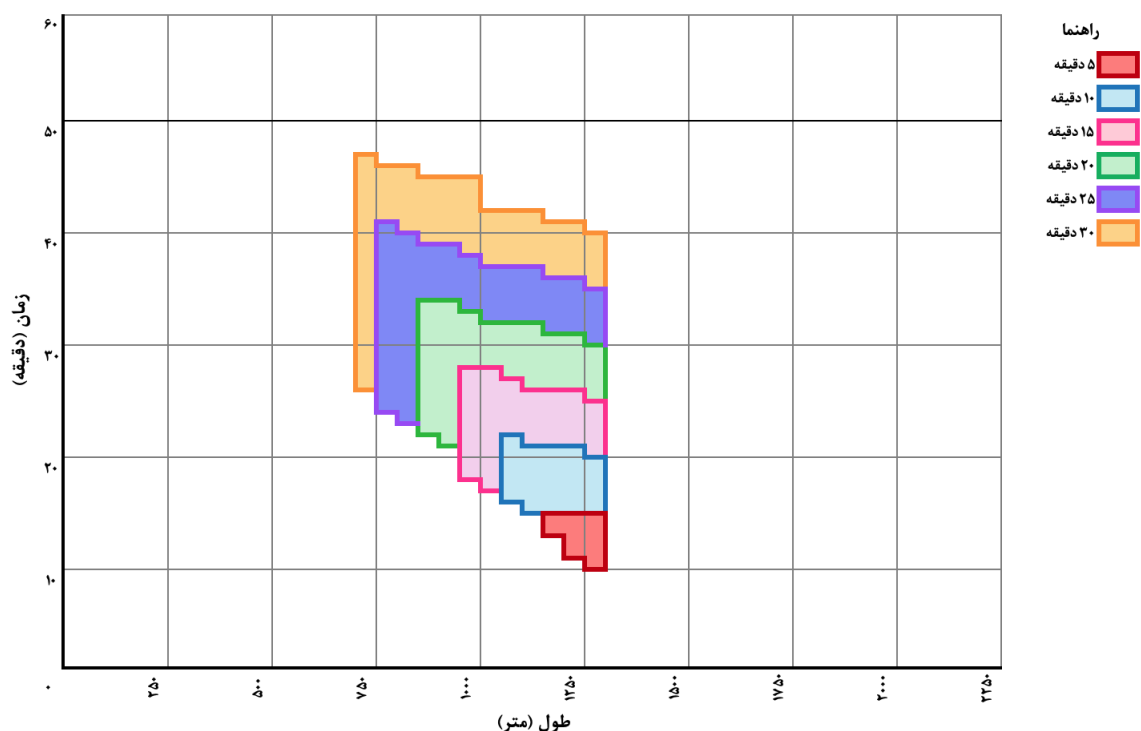


شکل ۷. محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری دو در سناریوهای مختلف

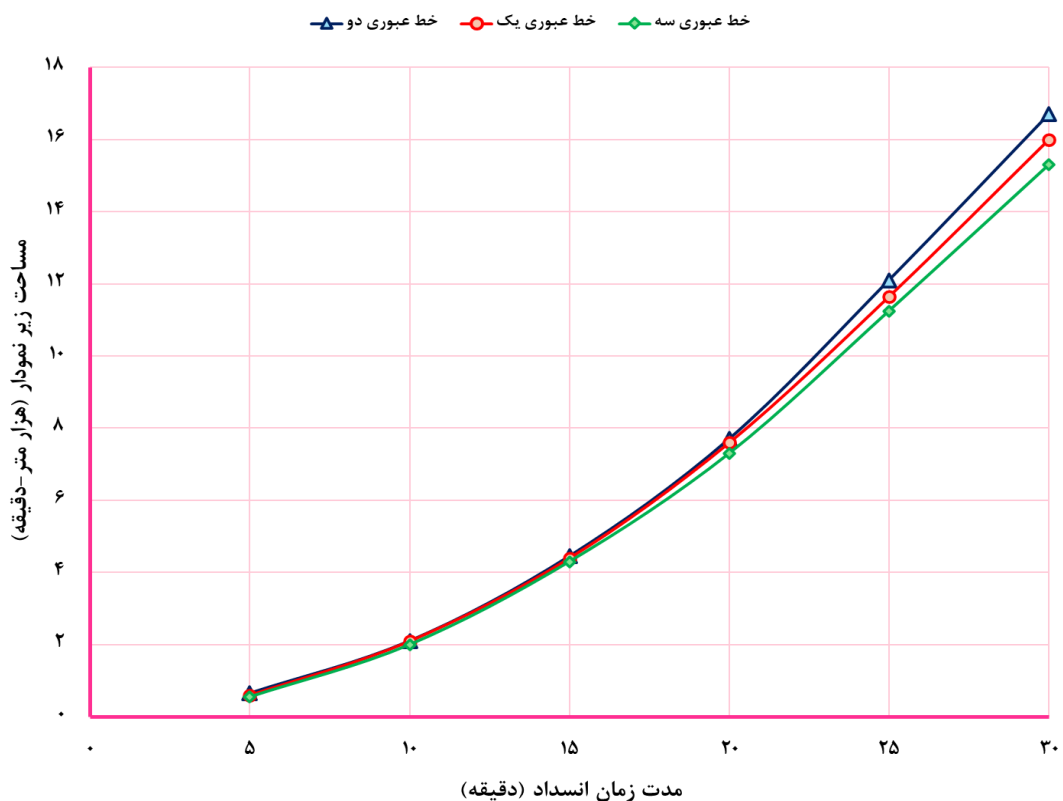
شکل ۸ که در آن محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری سه در سناریوهای مختلف به تصویر کشیده شده، حاکی از آن است که ۱۷ دقیقه زمان لازم است تا محدوده اثر مکانی تصادف به فاصله ۵۵۰ متری از محل تصادف برسد؛ که در این حالت نیز سرعت انتشار اثر تصادف، برابر با ۳۲/۴ متر بر دقیقه است.

با استفاده از نمودار محدوده اثر مکانی-زمانی، می‌توان شدت انسداد را برآورد نمود. مساحت زیر این نمودار که واحد آن متر-دقیقه است، به‌نوعی بیانگر شدت انسداد است و هر چه مقدار آن بیشتر باشد، شدت انسداد نیز بیشتر خواهد بود. بر همین اساس مساحت زیر نمودار برای ۱۸ سناریو مختلف انسداد بر اثر

تصادف، محاسبه می‌گردد که نتیجه آن در شکل ۹ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که شدت اثر انسداد در صورتی که تصادف منجر به انسداد خط عبوری ۲ شود، به ازای هر یک دقیقه انسداد به‌طور متوسط برابر با ۶۴۹ متر-دقیقه است. درحالی‌که برای سناریوهای انسداد خطوط یک و ۳ این مقدار به ترتیب برابر با ۶۲۲ و ۵۹۷ متر-دقیقه خواهد بود. این اعداد و سایر تحلیل‌های صورت گرفته نشان‌دهنده آن است که چنانچه تصادفی رخ دهد و منجر به انسداد خط عبوری ۲ گردد، تأثیر آن بر جریان بالادست به نسبت انسداد سایر خطوط عبوری بیشتر است.

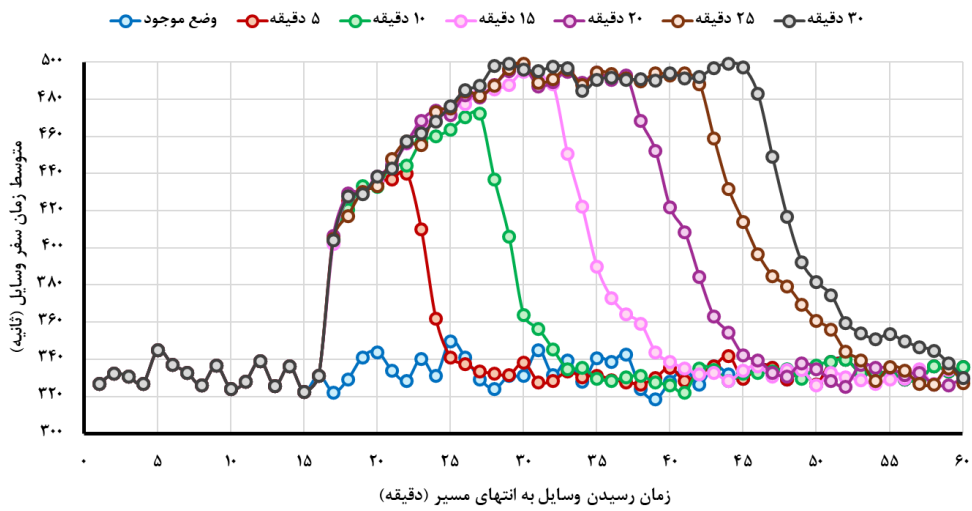


شکل ۸. محدوده اثر مکانی-زمانی تجمعی تصادف در صورت انسداد خط عبوری سه در سناریوهای مختلف

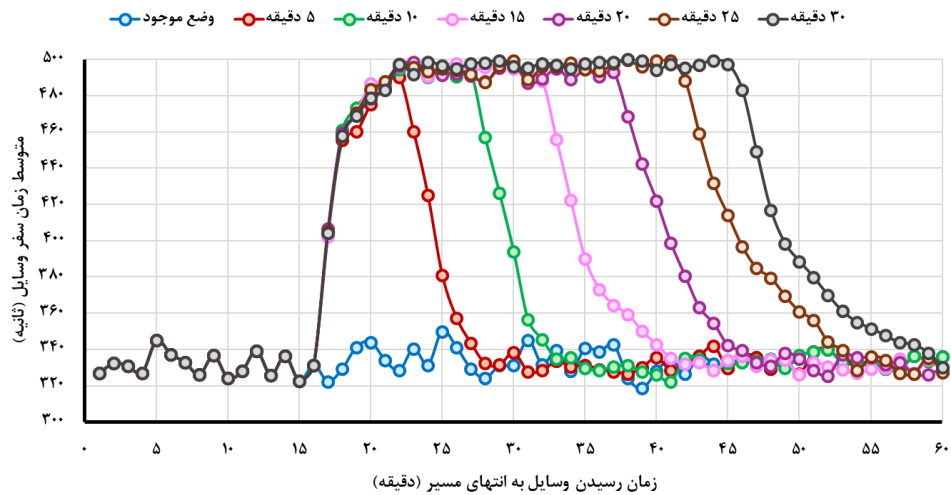


شکل ۹. نمودار شدت اثر انسداد در سناریوهای مختلف

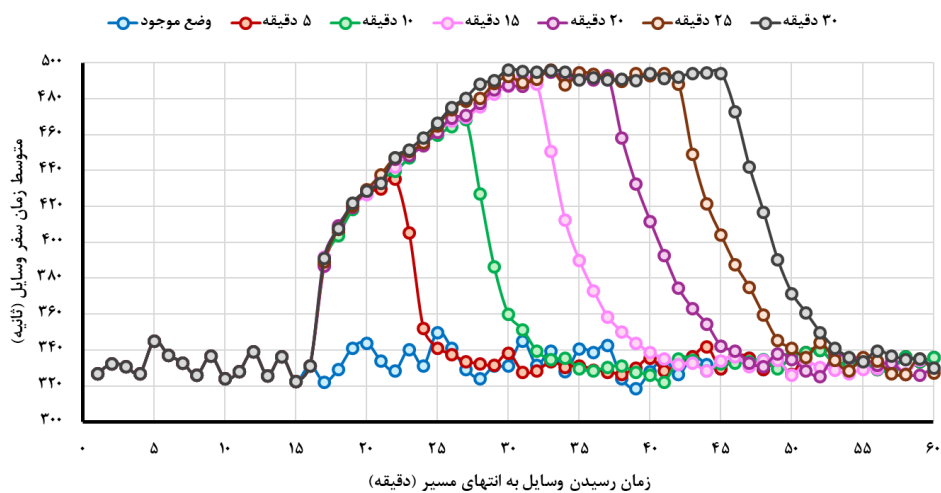
در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، متوسط زمان سفر وسایل نقلیه در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی برای سناریوهای انسداد خطوط عبوری ۱ تا ۳ به ترتیب به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است برای محاسبه زمان سفر وسایل نقلیه در مسیر ۲۲۰۰ متری، زمان سفر وسایلی که توانسته‌اند در مدت شبیه‌سازی تمام این مسیر را به‌طور کامل طی کنند، محاسبه می‌گردد. در این تصاویر محور افقی نشان‌دهنده زمانی است که وسایل نقلیه به نقطه پایان مسیر می‌رسند.



شکل ۱۰. زمان سفر وسایل نقلیه در صورت انسداد خط عبوری یک در سناریوهای مختلف



شکل ۱۱. زمان سفر وسایل نقلیه در صورت انسداد خط عبوری دو در سناریوهای مختلف



شکل ۱۲. زمان سفر وسایل نقلیه در صورت انسداد خط عبوری سه در سناریوهای مختلف

بر اساس شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، می‌توان گفت انسداد خط عبوری ۲، بیشتر تأثیر را بر زمان سفر وسایل نقلیه دارد. شکل کلی نمودارها، حاکی از آن است که در لحظه وقوع تصادف و شروع انسداد، یک جهش ناگهانی در زمان سفر وسایل نقلیه رخ می‌دهد. سپس با ماندگاری شرایط انسداد زمان سفر وسایل به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند تا زمان سفر به حدود ۴۹۰ الی ۵۰۰ ثانیه همگرا شود. نتایج بیانگر آن است که در صورتی که خط عبوری ۲ بر اثر تصادف انسداد پیدا کند، زمان سفر ابتدا یک جهش ۳۶ درصدی دارد. در حالی که این جهش برای سناریوهای انسداد خطوط عبوری یک و ۳ به ترتیب برابر با ۲۷ و ۲۲ درصد خواهد بود.

مطابق با شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ می‌توان گفت زمان سفر در سناریو انسداد خط عبوری ۲، پس از سپری شدن ۶ دقیقه از شروع انسداد، به حد نهایی خود همگرا می‌شود در حالی که زمان سفر در سناریوهای انسداد خطوط عبوری یک و ۳ به ترتیب بعد از ۱۲ و ۱۳ دقیقه به حد نهایی خود همگرا می‌شود.

## ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اثر تصادفات در محل تداخلات ورودی و خروجی بزرگراهی را بر جریان ترافیک بالادست با رویکرد تحلیل زمانی-مکانی بررسی می‌کند. برای این منظور، مقطعی از بزرگراه یادگار امام (حدفاصل بزرگراه حکیم تا همت) به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و مدل کلان نگر تهران، مدل‌سازی خرد نگر در نرم‌افزار Vissim انجام می‌شود و وضعیت موجود پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی، مبنای شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. سپس ۱۸ سناریوی تصادف با انسداد یکی از خطوط عبوری برای بازه‌های زمانی ۵ تا ۳۰ دقیقه شبیه‌سازی می‌شود و شاخص‌های عملکردی همچون زمان سفر، تأخیر، طول صف و میزان آلاینده‌گی تحلیل گردید. در این پژوهش یک شاخص جدید برای تحلیل مکانی-زمانی اثر تصادفات معرفی می‌گردد که نسبت تأخیر به زمان سفر حالت

عادی است. برای تشخیص محدوده اثر از گرادیان مکانی گسسته استفاده می‌گردد.

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، در هر دقیقه انسداد خط عبوری، زمان سفر در سناریوهای انسداد خط اول، دوم و سوم به ترتیب به میزان ۲/۷۹، ۲/۹۲ و ۲/۶۵ ثانیه برای هر وسیله نقلیه به ازای هر دقیقه انسداد افزایش می‌یابد. همچنین به ازای هر دقیقه انسداد خط عبوری ۲، ۳/۹۴ ثانیه تأخیر اضافه به کاربران تحمیل می‌گردد که این مقدار به ازای هر دقیقه انسداد خط عبوری ۱ و ۳ به ترتیب برابر با ۳/۵۹ و ۳/۳۶ ثانیه است.

تحلیل مکانی-زمانی سناریوهای مختلف انسداد خطوط عبوری بزرگراه نشان می‌دهد که انسداد خط عبوری دوم (میانی) بیشترین اثر منفی را بر شاخص‌های عملکردی جریان ترافیک دارد. تحلیل سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که اثر مکانی تصادف در تمام حالات با سرعتی مشخص در امتداد بالادست گسترش می‌یابد. این سرعت انتشار اثر تصادف برای حالت انسداد خط ۲ برابر با ۴۲/۳ و برای انسداد خطوط ۱ و ۳ برابر با ۳۲/۴ متر بر دقیقه برآورد می‌شود. این شاخص تعیین می‌کند که در چه بازه زمانی و تا چه فاصله‌ای از محل حادثه، جریان ترافیک دچار اختلال می‌شود. در سناریوهای مختلف، زمان لازم برای رسیدن اثر به فاصله ۵۵۰ متری بین ۱۲ تا ۱۷ دقیقه متغیر بوده که نشان‌دهنده اهمیت موقعیت انسداد (خطوط عبوری یک، ۲ و ۳) در شدت تأثیر آن بر جریان ترافیک بالادست است. این نرخ‌ها می‌توانند مبنایی برای برنامه‌ریزی زمان واکنش اضطراری و پیش‌بینی محدوده‌های بحرانی انسداد در مدیریت هوشمند سوانح ترافیکی باشند.

شدت انسداد نیز که با مساحت زیر نمودار مکانی-زمانی جمع‌ی بیان می‌شود، برای انسداد خط دوم حدود ۶۴۹ متر-دقیقه به ازای هر دقیقه انسداد برآورد شده، در حالی که این مقدار برای خطوط اول و سوم به ترتیب برابر با ۶۲۲ و ۵۹۷ متر-دقیقه است.

نتایج نشان می‌دهد که حتی در شرایط جریان غیراشباع نیز، وقوع تصادف و انسداد جزئی در یکی از خطوط عبوری، می‌تواند

عملکرد شبکه را به شکل محسوسی تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل شهری لازم است ضمن در نظر گرفتن تمهیداتی برای واکنش سریع به تصادفات، نسبت به مدیریت جریان ترافیک در شرایط اضطراری و طراحی سناریوهای کنترل هوشمند اقدام کنند. همچنین با توجه به تأثیر قابل توجه انسداد خطوط در بازه‌های زمانی کوتاه، پیشنهاد می‌شود سامانه‌های پایش و اطلاع‌رسانی بلادرنگ در این گونه مقاطع حساس مستقر شوند تا کاهش تبعات ثانویه حاصل شود.

## ۶. پیشنهادها

برای تکمیل مطالعات صورت گرفته، پیشنهاد می‌گردد شرایط تصادف در سایر انواع معابر شهر تهران شبیه‌سازی گردد و بر اساس نتایج به دست آمده، یک مدل جامع برای تحلیل رفتار ترافیکی شهروندان ارائه گردد. همچنین توصیه می‌گردد با در مطالعات آتی مدلی برای تعیین محدوده اثر مکانی-زمانی تصادفات در شهر تهران، با استفاده از اطلاعات دوربین‌های نظارتی و داده‌های واقعی تصادفات ارائه گردد.

## ۷. قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از کارشناسان و مدیران معاونت مطالعات و برنامه‌ریزی سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهر تهران بابت در اختیار قرار دادن خروجی‌های تخصیص ترافیک مدل کلان نگر شهر تهران، برای محدوده موردبررسی این پژوهش، تشکر و قدردانی نمایند.

## ۸. پی‌نوشت‌ها

1. Spatiotemporal
2. Spatiotemporal Analysis
3. Discrete Spatial Derivative
4. Warm up

## ۹. مراجع

– ج. سمیعا، م. رنجبر شویی، ع. نیک پور، (۱۴۰۲). تحلیل مکانی-زمانی تصادفات جاده‌ای در محور مواصلاتی هراز با

استفاده از شاخص‌های آمار مکانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه علمی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۴)، ۵۰۸-۵۲۷.

– ش. افندی زاده، شهریار، م. نیکومنش، ح. بیگدلی‌راد. (۱۴۰۲). روش مکانی-زمانی برای کاهش تصادفات کلان‌شهرها با استفاده از مدل لوجیت. جاده.

– Shi, J. Q., & Cheng, L. (2013). Simulation and analysis of highway traffic accident based on VISSIM. *Applied Mechanics and Materials*, 253, 1682-1685.

– Liu, C., Zhang, S., Wu, H., & Fu, Q. (2017). A dynamic spatiotemporal analysis model for traffic incident influence prediction on urban road networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11), 362.

– Soltani, A., & Askari, S. (2014). Analysis of intra-urban traffic accidents using spatiotemporal visualization techniques. *Transport and Telecommunication*, 15(3), 227-232.

– Harirforoush, H., Bellalite, L., & Bénié, G. B. (2019). Spatial and temporal analysis of seasonal traffic accidents. *Am. J. Traffic Transp. Eng*, 4(7), 10-11648.

– Bíl, M., Andrášik, R., & Sedoník, J. (2019). A detailed spatiotemporal analysis of traffic crash hotspots. *Applied geography*, 107, 82-90.

– Ma, Q., Huang, G., & Tang, X. (2021). GIS-based analysis of spatial-temporal correlations of urban traffic accidents. *European transport research review*, 13, 1-11.

– Chen, Y., Luo, R., King, M., Shi, Q., He, J., & Hu, Z. (2022). Spatiotemporal analysis of crash severity on rural highway: A case study in

Anhui, China. *Accident Analysis & Prevention*, 165, 106538.

– Moriano, P., Berres, A., Xu, H., & Sanyal, J. (2024). Spatiotemporal features of traffic help reduce automatic accident detection time. *Expert Systems with Applications*, 244, 122813.

– Zhang, Y., Pan, Z., Zhu, F., Shi, C., & Yang, X. (2024). Quantitative Estimation and Analysis of Spatiotemporal Delay Effects in Expressway Traffic Accidents. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(11), 407.

– Querfurth, L., Rehborn, H., Bernhardt, B., Guan, Y., Huang, W., & Hoffmann, S. (2025). Crash localization and traffic impact assessment via spatio-temporal analysis of connected vehicle data. *Accident Analysis & Prevention*, 214, 107956.

– Transport for London, (2021), *Traffic Modelling Guidelines, Version 4.0*