

بررسی توزیع مکانی الگوهای تصادفات درون‌شهری با استفاده از

روش‌های تحلیل مکانی

نوید افکار^۱، امیر مسعود رحیمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای عمران - راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

چکیده

تصادفات رانندگی به عنوان یکی از چالش‌های مهم سلامت عمومی در سطح جهان، سالانه خسارات جانی و اقتصادی قابل توجهی به همراه دارند. با این حال، این تصادفات دارای الگوهای قابل تحلیل و تا حدی قابل پیش‌بینی هستند و بر رسی آن‌ها از منظر مکانی می‌تواند به درک بهتر عوامل مؤثر و کاهش ریسک کمک کند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تصادفات ترافیکی اغلب دارای همبستگی فضایی بوده و تحلیل آن‌ها نیازمند استفاده از روش‌های آماری مناسب برای سنجش این وابستگی‌ها است. بر این اساس، هدف این مطالعه تحلیل مکانی تصادفات ترافیکی در شهر زنجان با استفاده از شاخص خودهمبستگی فضایی موران ($Moran's I$) در محیط GIS بوده است. در این راستا، مجموعه‌ای از متغیرهای تأثیرگذار شامل تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع‌ها، تراکم محورهای ارتباطی، کاربری‌های تجاری و خدماتی و شدت جذب سفر مورد بررسی قرار گرفتند تا ارتباط آن‌ها با الگوی وقوع تصادفات مشخص شود. نتایج نشان داد که تمامی متغیرهای مذکور دارای رابطه‌ای مستقیم و معنادار با وقوع تصادفات هستند، به طوری که بیشترین تأثیر مربوط به تراکم جمعیتی، کاربری‌های اصلی، تقاطع‌ها و شدت جذب سفر است. همچنین، تحلیل فضایی بیانگر آن است که توزیع تصادفات در شهر زنجان از الگوی خوشه‌ای پیروی کرده و نقاط حادثه‌خیز به طور مشخص قابل شناسایی هستند. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی شهری برای کاهش تصادفات مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تصادفات درون‌شهری، نقاط حادثه‌خیز، خودهمبستگی مکانی موران I

۱- مقدمه

درصد از وسایل نقلیه در کشورهای با درآمد پایین قرار دارند، اما بیش از ۹۰ درصد از مرگ و میرهای ناشی از تصادفات ترافیکی را شامل می‌شوند. به این ترتیب، پیشگیری و کاهش تصادفات رانندگی در مقیاس بین‌المللی و ملی، به ویژه در کشورهای با درآمد پایین، یک ضرورت اساسی است [۳].

ایران نیز از جمله کشورهایی است که از نظر سوانح ترافیکی، یکی از بیشترین میزان تصادفات و مرگ و میر را تجربه می‌کند [۴]. در ایران، ۲۵ درصد از مرگ و میرهای غیرطبیعی کشور به دلیل تصادفات ترافیکی است [۵]. تصادفات ترافیکی جاده‌ای (RTA) در ایران به دلایل مختلفی از جمله جمعیت جوان کشور (که بیشتر در معرض تصادفات قرار دارند)، قیمت پایین بنزین، پایین بودن میزان استفاده از حمل و نقل عمومی نسبت به وسایل نقلیه شخصی، و طراحی‌های ایمنی غیر استاندارد به یک مسئله جدی سلامت عمومی تبدیل شده است [۶]. این تصادفات و آسیب‌های مرتبط با

تصادفات رانندگی یکی از معضلات تهدیدکننده زندگی بشر در جهان است که سالانه خسارات جانی و مالی زیادی را در کشورهای مختلف به بار می‌آورد [۱]. طبق گزارش وضعیت جهانی ایمنی جاده‌ها که توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۲۰۲۰ میلادی ارائه شد، سالانه حدود ۱.۱۹ میلیون نفر در اثر سانحه‌های ترافیکی جان خود را از دست می‌دهند و ۲۰ تا ۵۰ میلیون نفر نیز دچار ناتوانی‌های جسمانی می‌شوند. علاوه بر این، صدمات ناشی از تصادفات، هشتمین علت اصلی مرگ و میر در بین افراد ۵ تا ۲۹ ساله است [۲].

گزارش‌ها نشان می‌دهند که بیشترین تصادفات ترافیکی در کشورهای با درآمد کم و متوسط رخ می‌دهد، در حالی که فقط ۴۰

آن نقش قابل توجهی درباره بیماری‌ها و مرگ و میرها در ایران دارند و تأثیر بسزایی بر رفاه اجتماعی و اقتصادی مردم می‌گذارند. به همین دلیل، تصادفات ترافیکی جاده‌ای سومین عامل مرگ و میر در ایران محسوب می‌شوند [۷].

در این میان، شهر زنجان، مانند سایر نقاط کشور به ویژه در هسته مرکزی آن، با افزایش تعداد خودروها و گرایش مردم به استفاده از انواع وسایل نقلیه، شاهد افزایش تصادفات درون‌شهری بوده است. به‌طوری‌که در سال ۱۴۰۳ طبق گزارش مرکز پزشکی قانونی ایران، از ۲۱۱ تصادف رخ داده در استان زنجان، ۳۱ مورد آن مربوط به حوادث درون‌شهری است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۳). هرچند این میزان در مقایسه با سایر استان‌ها کمتر است، اما همچنان تبعات جانی و مالی بسیاری به همراه دارد که گاهی مصدومیت‌های ناشی از آن تا سال‌ها ادامه می‌یابد.

بنابراین، با توجه به آمار بالای تصادفات در ایران و زنجان، شناسایی و تجزیه و تحلیل سیستماتیک عوامل مؤثر بر تصادفات و استفاده از راهکارهای مناسب، نظیر تجهیزات کنترل تردد، طراحی بهینه جاده‌ها و فعالیت مؤثر پلیس راهنمایی و رانندگی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است [۸]. این موارد ضرورت و اهمیت انجام پژوهش‌های بیشتر در این حوزه را نمایان می‌سازد. علاوه بر این، با توجه به اهمیت حمل و نقل و جاده‌های درون‌شهری در جوامع، تحلیل اطلاعات مربوط به تصادفات، از جمله نوع تصادف، محل وقوع آن و دیگر عوامل مرتبط با حمل و نقل، برای انجام تحلیل‌های ایمنی حمل و نقل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳].

هدف از این تحقیق، بررسی همبستگی بین نرخ تصادفات و عوامل منطقه‌ای نظیر جمعیت، عناصر فرم شهری و عناصر سفرهای شهری زنجان می‌باشد. در راستای تبیین دقیق‌تر مسئله پژوهش و هدایت تحلیل‌ها در چارچوبی منسجم، تدوین سؤالات مشخص پژوهشی ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، سؤالات زیر به‌منظور بررسی ابعاد مختلف الگوی فضایی تصادفات و عوامل مؤثر بر آن مطرح می‌شوند:

✓ آیا توزیع فضایی تصادفات درون‌شهری زنجان از الگوی تصادفی تبعیت می‌کند یا دارای خودهمبستگی فضایی معنادار است؟

✓ چه رابطه‌ای میان متغیرهای فضایی-کارکردی شهری (نظیر تراکم جمعیت، کاربری‌های جاذب سفر، تراکم تقاطع‌ها و شدت جذب سفر) و الگوی وقوع تصادفات وجود دارد؟

✓ آیا تمرکز تصادفات در نواحی خاص شهری (نظیر هسته مرکزی و محورها) پرتدد با شدت فعالیت‌های شهری و کاربری زمین مرتبط است؟

۲- مرور ادبیات

با توجه به سهم بالای تصادفات، نیاز به مدل‌سازی و تحلیل وضعیت ایمنی راه‌ها دوچندان می‌شود. سرشنیان وسایل نقلیه، اعم از رانندگان و مسافران، همواره در معرض خطرات زیادی قرار دارند [۹]. تحقق موفقیت در سیاست‌های ایمنی و تضمین اثربخشی اقدامات پیشگیرانه، مستلزم بهره‌گیری از نتایج مطالعات و تحقیقات علمی در حوزه ایمنی راه است. با توجه به یافته‌های حاصل از پژوهش‌های پیشین در زمینه ایمنی ترافیک، برنامه‌ریزی دقیق و آینده‌نگرانه برای مدیریت ایمنی، به‌ویژه با در نظر گرفتن روند احتمالی افزایش تصادفات رانندگی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۰].

بنابراین، نیاز به روشی برای شناسایی عوامل مؤثر در تصادفات و پیش‌بینی خطر وقوع آن‌ها به‌طور دقیق‌تر احساس می‌شود. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) یکی از فناوری‌های نوین و توانمند در تحلیل مکانی-فضایی تصادفات درون‌شهری و برون‌شهری به شمار می‌روند. این سامانه‌ها با استفاده از ابزارهای متعدد تحلیل مکانی، امکان برآورد دقیق خطر وقوع تصادفات و شناسایی نقاط حادثه‌خیز را فراهم می‌آورند [۱۱]. به‌طور کلی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان سیستم‌های مدیریت اطلاعات مکانی و ابزارهای تحلیلی مکانی، نقش مؤثری در تحلیل تصادفات جاده‌ای دارند. از آنجا که تصادف یک پدیده مکانی است، تحلیل‌های مکانی می‌توانند به شناسایی و پیش‌بینی خطرات در مسیرهای مختلف کمک کنند [۱۲].

در سال‌های اخیر، سیستم‌های اطلاعات مکانی پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه سازمان‌دهی و مدیریت داده‌های مکانی ایجاد کرده‌اند و علاوه بر ارائه اطلاعات دقیق، امکاناتی نظیر تحلیل‌های مکانی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی را در اختیار برنامه‌ریزان و مدیران

حمل و نقل قرار داده‌اند. فرض اصلی در استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در رابطه با حوادث ترافیکی این است که تصادفات رویدادهای گسسته نیستند، بلکه دارای ابعاد مکانی و زمانی هستند [۱۳]. علاوه بر این، شدت تصادفات جاده‌ای؛ رویدادی تصادفی و اتفاقی نیست، بلکه دارای الگوهایی قابل پیش‌بینی و پیشگیری است.

بنابراین، می‌توان گفت که تصادفات ترافیکی می‌توانند رویدادهایی با همبستگی مکانی باشند و تجزیه و تحلیل توزیع فرکانس تصادفات نیازمند ارزیابی پارامترهایی است که خصوصیات و همبستگی مکانی را منعکس کنند. معمولاً این جنبه فضایی داده‌های تصادف در عمل روزمره توسط آژانس‌های برنامه‌ریزی استفاده نمی‌شود، که این موضوع به شکاف بین تحقیق و عمل دامن می‌زند. تجزیه و تحلیل فضایی تصادفات ترافیکی امکان در نظر گرفتن عوامل مختلف فضایی مؤثر بر وقوع تصادف را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، می‌توان تعیین کرد که آیا عوامل مکانی می‌توانند کنترل شوند و آیا این عوامل می‌توانند در توسعه برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری یا راه‌حل‌های مهندسی مؤثر برای کاهش تصادفات ترافیکی نقش داشته باشند [۱۴].

پیشرفت‌های مهمی در روش‌های تحلیلی برای تجزیه و تحلیل تصادفات ترافیکی صورت گرفته است، اما هنوز بین روش‌های عملی و مرز مطالعاتی فاصله وجود دارد [۱۵]. مدیریت همبستگی فضایی یکی از حوزه‌های با شکاف قابل توجه بین تمرین و تحقیق است. تحلیل فضایی به داده‌های مکانی در مقیاس بزرگ نیاز دارد تا برای تجزیه و تحلیل سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مناسب باشد. به عبارت دیگر، رویدادهای تصادف در دامنه‌های مکانی و زمانی به‌طور تصادفی رخ نمی‌دهند، بلکه ممکن است خوشه‌هایی از تصادفات تشکیل شوند [۱۶]. بنابراین، برای تحلیل تعداد تصادفات رانندگی، ضروری است که تصادفات مکرر در مکان‌ها و زمان‌های خاص شناسایی شوند.

مطالعه ارائه‌شده توسط ابوالفضل‌زاده و همکاران به بررسی تصادفات درون‌شهری با علت تامه عدم توجه به جلو در طی دوران همه‌گیری کرونا با استفاده از رگرسیون لجستیک می‌پردازد. تمرکز اصلی این مطالعه بیشتر بر شناسایی الگوهای محیطی بوده و کمتر به تحلیل استنباطی عمیق یا ارتباط سیستماتیک میان متغیرهای شهری و ساختار فضایی تصادفات پرداخته است. این موضوع

نشان‌دهنده خلأیی است که پژوهش حاضر با استفاده از شاخص Moran's I و تحلیل معناداری، در پی پوشش آن می‌باشد [۱۷].

تحقیق ارائه شده توسط صدیق‌باور و همکاران به بررسی الگوهای فضایی تصادفات ترافیکی با بهره‌گیری از مدل محلی GWPR پرداخته و به بررسی تاثیر سهم انواع کاربری‌ها بر احتمال وقوع تصادف در نواحی ترافیکی شهر شیراز پرداخته است. اهمیت این مطالعه از آن جهت است که بررسی اثرات فضایی انواع کاربری اراضی در هریک از نواحی ترافیکی را بررسی کرده است [۱۸].

بسته به هدف مطالعه و ماهیت داده‌ها، استفاده از روش‌های مختلف مانند NetKDE، KDE و شاخص‌های محلی همبستگی فضایی (LISA)؛ موران I محلی و Getis-Ord Gi* برای شناسایی نقاط داغ می‌تواند بسیار مفید باشد. به همین جهت، محققان مختلفی از نگاشت‌های مکانی حوادث ترافیکی استفاده کرده‌اند. روش‌های نگاشت مبتنی بر آمار موران I از محبوب‌ترین روش‌ها در این حوزه هستند زیرا نشان می‌دهند که حوادث داغ ترافیکی از نظر آماری معنادار هستند [۱۹].

مطالعه ماهاتو و همکاران به بررسی توزیع مکانی و خوشه‌بندی تصادفات جاده‌ای در نپال پرداخته است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل فضایی از جمله شاخص Moran's I، الگوهای خودهمبستگی فضایی تصادفات مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داد که تصادفات به‌صورت خوشه‌ای و غیرتصادفی توزیع شده‌اند. همچنین تحلیل‌های خوشه‌بندی محلی به شناسایی نواحی پرخطر کمک کرده و ارتباط میان ویژگی‌های جغرافیایی و وقوع تصادفات را برجسته ساخته است [۲۰].

محمد در مطالعه‌ای با تمرکز بر مدل‌سازی آماری، از رگرسیون پواسون در کنار تحلیل‌های فضایی برای بررسی تصادفات استفاده کرده است. در این تحقیق، ابتدا وجود وابستگی فضایی با استفاده از شاخص‌هایی نظیر Moran's I بررسی شده و سپس مدل‌های رگرسیونی برای تحلیل شدت و فراوانی تصادفات به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که لحاظ کردن ساختار فضایی داده‌ها منجر به بهبود دقت مدل و تبیین بهتر عوامل مؤثر بر تصادفات می‌شود [۲۱].

درس و همکاران در یک مرور نظام‌مند، کاربرد ابزارهای مبتنی بر GIS در ارزیابی تصادفات جاده‌ای را بررسی کرده‌اند. این مطالعه

نشان می‌دهد که شاخص‌های خودهمبستگی فضایی نظیر Moran's I از پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی الگوهای مکانی تصادفات هستند. همچنین نتایج حاکی از آن است که ترکیب GIS با روش‌های آماری فضایی می‌تواند به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در حوزه ایمنی راه کمک کند [۲۲].

یامتراکول و همکاران به تحلیل خوشه‌بندی زمانی-مکانی تصادفات در منطقه کلان‌شهری بانکوک پرداخته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از ابزارهای GIS و شاخص Moran's I، خوشه‌های معنادار تصادف در بازه زمانی طولانی شناسایی شده‌اند. یافته‌ها نشان داد که برخی مناطق به‌طور مداوم به‌عنوان نقاط پرخطر ظاهر می‌شوند و این امر بیانگر نیاز به مداخلات هدفمند و بلندمدت است [۲۳].

شنول در تحقیقی تأثیر الگوهای ترافیکی و شرایط خاص ناشی از همه‌گیری COVID-19 بر نقاط حادثه‌خیز را مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه، با استفاده از تحلیل‌های فضایی از جمله Moran's I، تغییرات در الگوهای خوشه‌بندی تصادفات قبل و حین همه‌گیری تحلیل شده است. نتایج نشان داد که تغییر در حجم و الگوی ترافیک می‌تواند به جابه‌جایی hotspotها منجر شود [۲۴].

رودینووا و همکاران به بررسی رابطه بین توزیع فضایی تصادفات و توسعه اقتصادی در روسیه پرداخته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از شاخص Moran's I، وجود خودهمبستگی فضایی در داده‌های تصادفات تأیید شده و ارتباط آن با شاخص‌های اقتصادی تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح توسعه منطقه‌ای می‌تواند بر الگوهای تصادف تأثیرگذار باشد [۲۵].

زلیگا و همکاران با تمرکز بر شهر کوریتیبیا، به تحلیل خوشه‌های زمانی-مکانی تصادفات پرداخته‌اند. در این مطالعه، روش‌های خودهمبستگی فضایی از جمله Moran's I برای شناسایی الگوهای تجمعی تصادفات استفاده شده و نتایج نشان داد که ترکیب تحلیل زمانی و مکانی می‌تواند درک عمیق‌تری از رفتار تصادفات ارائه دهد و به بهبود برنامه‌ریزی شهری کمک کند [۲۶].

رحمتی و همکاران نیز با رویکردی زمانی-مکانی به تحلیل تصادفات منجر به جرح و فوت در استان اصفهان پرداخته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از Moran's I و سایر تکنیک‌های تحلیل خوشه‌ای، الگوهای فضایی و تغییرات زمانی تصادفات شناسایی شده است. نتایج نشان‌دهنده وجود خوشه‌های پایدار در برخی نواحی بوده و اهمیت در نظر گرفتن دینامیک زمانی در کنار ساختار فضایی برای مدیریت ایمنی راه را تأکید می‌کند [۲۷].

یالچین و همکاران با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر GIS، به تحلیل توزیع زمانی و مکانی تصادفات در مرکز شهر آنتالیا پرداخته‌اند. در این پژوهش، شاخص Moran's I برای بررسی خودهمبستگی فضایی و شناسایی خوشه‌های تصادف مورد استفاده قرار گرفته و نتایج نشان داد که تصادفات به‌صورت معناداری در برخی نواحی متمرکز هستند. این مطالعه بر نقش ابزارهای GIS در تحلیل دقیق و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده تأکید دارد [۲۸].

تاکنون مطالعات بسیاری در سطوح جهانی و ملی به شناسایی عوامل مؤثر در وقوع تصادفات جاده‌ای پرداخته‌اند که در جدول (۱) به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

جدول (۱): پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه تصادفات

نتیجه	محقق
در مطالعه‌ای بر عوامل مؤثر در تصادفات افراد مسن در ایران دریافتند که بزرگراه‌ها، جاده‌های اصلی، جاده‌های فرعی و کوچه‌ها به ترتیب بیشترین نرخ وقوع تصادفات را دارند.	اتحاد و همکاران (۲۰۱۵) [۲۹]
به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های ایران پرداختند. وسایل نقلیه سنگین نقش مهمی در توسعه اقتصادی هر کشور به‌ویژه کشورهای در حال توسعه مانند ایران دارد. در این تحقیق داده‌های تصادفات راه‌های ایران را با استفاده از مدل پروبیت ترتیبی سلسله مراتبی با متغیرهای تصادفی ^۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد چندین متغیر تأثیر معناداری با شدت تصادفات دارد از جمله: آموزش راننده، داشتن سیستم ترمز پیشرفته، وجود قوس در راه‌ها و سرعت بالا.	احسان رحیمی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۰]

¹ random threshold random parameters hierarchical ordered probit model

نتیجه	محقق
به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسیله نقلیه و عابران پیاده در راه‌های برون‌شهری استان گیلان پرداختند. آن‌ها برای تحلیل داده‌ها از دو مدل ماشین یادگیری ¹ و لوجیت استفاده کردند و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد عواملی نظیر تجاوز از سرعت مجاز، شرایط جوی بارانی و رانندگان در سن ۳۰ تا ۵۰ سال باعث افزایش شدت تصادفات وسیله نقلیه می‌شود. همچنین عواملی نظیر شرایط جوی بارانی و عدم روشنایی کافی باعث افزایش شدت تصادفات عابران پیاده می‌شود.	میثم قاصدی و همکاران (۲۰۲۱) [۳۱]
به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات وسایل نقلیه سنگین در راه‌های برون‌شهری استان گیلان پرداختند. در این پژوهش از روش‌های آماری و رگرسیون لاجیت برای مدلسازی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد وجود قوس در هندسه راه، برخورد جلو به جلو، تصادفات در ساعات غیر اوج (یک تا شش صبح) و ساعات اوج عصر (۱۹ تا نیمه شب)، بومی بودن راننده و برخورد با ماشین آلات کشاورزی باعث افزایش شدت تصادف می‌شود. همچنین موتورسواران آسیب‌پذیرترین کاربران راه در برخورد با وسایل نقلیه سنگین هستند. از سوی دیگر، عواملی نظیر وجود میانه راه، نوع برخورد بغل به بغل و آب‌وهوای صاف باعث کاهش شدت تصادف می‌شود.	ایرج برگ گل و همکاران (۲۰۲۲) [۳۲]
در این تحقیق، چهارده عامل مستقل که از گزارش‌های پلیس و بازدید میدانی به دست آمده بودند، به سه گروه اصلی عوامل انسانی، شرایط جوی و عوامل ترافیکی-هندسی تقسیم‌بندی شدند. بر اساس این دسته‌بندی، از رگرسیون پواسون برای تحلیل تأثیر مستقیم این عوامل بر تعداد تصادفات عابران پیاده در تقاطع‌ها و از رگرسیون چندمتغیره برای تحلیل تأثیر سه دسته کلی ذکر شده بر تصادفات عابران پیاده در تقاطع‌ها استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که عوامل سن راننده با ۱۱ درصد، وضعیت آب و هوای بارانی با ۷ درصد و نبود چراغ راهنمایی با ۴۰ درصد بیشترین تأثیر را در افزایش تعداد تصادفات عابران در تقاطع‌ها داشته‌اند. همچنین، بیشترین فراوانی تصادفات عابران در تقاطع‌ها در مناطق دو و چهار شهری رخ داده و تقاطع‌های میدان توشیبا، چهارراه حشمت و میدان گاز به‌عنوان پرتصادف‌ترین تقاطع‌های شهر رشت شناسایی شدند.	عفتی و قنبری (۲۰۲۴) [۳۳]
این مطالعه کاربرد ابزارهای مبتنی بر GIS در تحلیل و ارزیابی تصادفات ترافیکی را بررسی کرده و نشان می‌دهد که این ابزارها نقش مهمی در شناسایی الگوهای مکانی و نقاط حادثه‌خیز دارند. نتایج همچنین بر اهمیت ترکیب روش‌های آماری فضایی (مانند Moran's I) با داده‌های مکانی برای بهبود تصمیم‌گیری‌های ایمنی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل تأکید دارد.	درسا و همکاران (۲۰۲۵) [۲۲]
این مطالعه با استفاده از رویکرد زمانی-مکانی، الگوهای توزیع تصادفات منجر به جرح و فوت در اصفهان را تحلیل کرده و خوشه‌های معنادار فضایی را شناسایی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تصادفات دارای تمرکز مکانی و زمانی مشخصی هستند و این خوشه‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای مداخلات هدفمند در بهبود ایمنی ترافیک مورد استفاده قرار گیرند.	رحمتی و همکاران (۲۰۲۶) [۲۷]

مکانی آن‌ها به‌ویژه در شهرهای در حال توسعه، همچنان کمبود دارد.

این تحقیق به‌طور خاص با هدف بررسی توزیع مکانی الگوهای تصادفات درون‌شهری در شهر زنجان انجام شده است. این تحقیق با نوآوری‌های خاص خود، به‌ویژه در استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تحلیلی مکانی، به شناسایی نقاط حادثه‌خیز و الگوهای توزیع تصادفات (شهر زنجان) کمک کرده است. این روش‌ها، به‌ویژه با امکان تحلیل مکانی و شبیه‌سازی‌های

نتایج مطالعات موجود نشان می‌دهند که علی‌رغم پیشرفت‌های صورت گرفته در تحلیل تصادفات ترافیکی، هنوز خلأهایی در تحقیقات و تحلیل‌های مربوط به عوامل مؤثر بر تصادفات وجود دارد. در بسیاری از مطالعات پیشین، تصادفات به‌طور عمده با استفاده از روش‌های آماری تجزیه و تحلیل شده‌اند و در برخی از آن‌ها تنها به بررسی عوامل مؤثر بر وقوع تصادفات پرداخته شده است. این در حالی است که مطالعات جامع و همه‌جانبه‌ای در زمینه شناسایی و تحلیل عوامل ایجادکننده تصادفات و همچنین جنبه‌های

¹ Machine Learning

فضایی، امکان شناسایی سریع و بصری الگوهای حوادث ترافیکی و نقاط داغ آن‌ها را فراهم می‌آورند.

در این راستا، ابتدا به شناسایی فضایی عوامل مؤثر در وقوع تصادفات درون‌شهری پرداخته شده و سپس توزیع مکانی حوادث ترافیکی (شهر زنجان) بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در بهبود استراتژی‌های ایمنی و کمک به مدیران حمل‌ونقل و ترافیک برای اتخاذ تصمیمات بهینه و طراحی تدابیر مؤثر برای کاهش تصادفات و افزایش ایمنی، در نقاط حادثه‌خیز کاربرد داشته باشد.

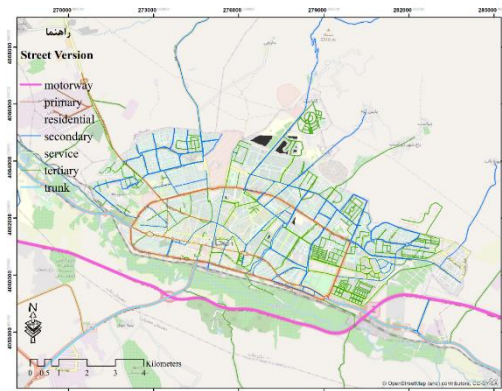
١-٣- محدوده مورد مطالعه

شهر زنجان، مرکز استان زنجان، در شمال غربی ایران واقع شده است. این شهر به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه خود، از اهمیت استراتژیک بالایی برخوردار است. زنجان از شمال با استان اردبیل، از غرب با استان آذربایجان شرقی، از جنوب با استان همدان و از شرق با استان قزوین هم‌مرز است. شهر زنجان، به عنوان محدوده پژوهش، در مساحتی به اندازه ۶۱۶۱ هکتار گسترده شده است. طبق آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، جمعیت این شهر به ۴۳۳۴۷۵ نفر می‌رسد؛ که این تعداد زنجان را به بیستمین شهر پرجمعیت کشور تبدیل کرده است (Statistics Center of Iran, 2016). بر اساس تقسیمات اداری، زنجان به ۴ منطقه، ۳۵ ناحیه و ۱۱۰ محله تقسیم شده است (Statistics of Zanjan Municipality, 2016). طول معابر سواره درون‌شهری زنجان بر اساس نتایج حاصله از طرح تفصیلی ۱۱۰۶۵۰۹۵/۱ مترمربع می‌باشد که با سرانه ۳۱.۶۱ مترمربع، ۱۷.۹۳ درصد از مجموع کاربری‌های شهر زنجان را به خود اختصاص داده است. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه پژوهش را نشان می‌دهد.

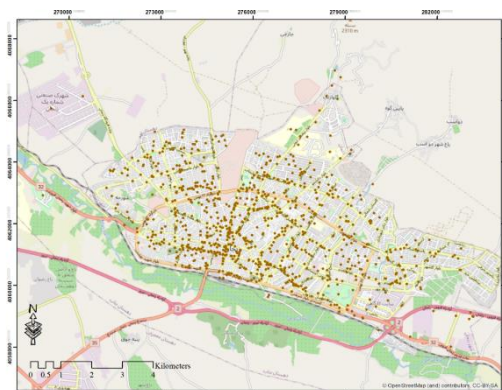


شكل ١: موقعيت منطقه مورد مطالعه

مشخص گردید. در واقع این داده‌ها به دلیل داشتن مختصات مکانی، قابلیت تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های مربوطه را دارند. حجم داده‌های مورد استفاده در این پژوهش ۶۶۵۶ مورد تصادف به صورت نقطه‌ای در شبکه راه‌های درون‌شهری شامل: بزرگراه‌ها، راه‌های اصلی، خیابان‌های فرعی و محلی، خیابان‌های درجه سه و ارتباطی است (شکل ۲). همچنین شکل (۳) نحوه توزیع مکانی تصادفات را بر روی نقش را نشان می‌دهد. در گام نخست، داده‌های تصادف نقطه‌ای با مختصات مکانی مشخص، پس از گردآوری از منابع رسمی، تحت فرآیند پیش‌پردازش قرار گرفت. این فرآیند شامل حذف داده‌های تکراری، بررسی داده‌های ناقص و کنترل سازگاری مکانی داده‌ها با شبکه معابر شهری بود. این اقدام موجب کاهش خطاهای ناشی از داده‌های ورودی و افزایش دقت تحلیل‌های مکانی گردید.



شکل ۲: شبکه معابر شهری زنجان



شکل ۳: توزیع فضایی تصادفات درون‌شهری زنجان

شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش با توجه به ماهیت و هدف پژوهش در چهار بعد شامل، عناصر ترافیک شهری، عناصر فرم شهری، انواع تصادفات و عناصر سفر شهری تقسیم‌بندی شده‌اند.

برای شناسایی این ابعاد ابتدا مطالعات محدود صورت گرفته در این زمینه مورد بررسی قرار گرفت، و با جمع‌بندی نهایی، ۵ معیار به‌عنوان معیارهای مؤثر در خطر وقوع تصادفات شناسایی و انتخاب گردید. در جدول (۲) نیز معیارهای مورد استفاده در پژوهش و منابع اخذ هریک مشخص گردیده است.

با توجه به داده‌های مورد استفاده، عوامل مؤثر در وقوع تصادفات و توزیع مکانی تصادفات درون‌شهری زنجان، ساختار کلی پژوهش تهیه گردید. در این ساختار، داده‌های ورودی که از منابع مختلف اخذ شده‌اند، پس از پیش‌پردازش‌های لازم نظیر حذف داده‌های تکراری و ناقص، در پایگاه داده ذخیره شده و مورد تحلیل قرار گرفتند تا در سطوح بعدی مورد استفاده قرار بگیرند. در ادامه به‌منظور تحلیل رویدادهای تصادف که دارای مختصات مکانی می‌باشند و سنجش همبستگی میان عوامل مؤثر در وقوع تصادفات درون‌شهری زنجان، از آماره موران جهانی جهت بررسی و شناسایی الگوهای مکانی توزیع تصادفات استفاده شده است.

۲-۳- انتخاب شاخص موران جهانی (Moran's I)

تحلیل خودهمبستگی مکانی موران I جهانی، از شاخص‌های آماری مورد استفاده برای تحلیل الگوهای مکانی تصادفات و شناسایی عوامل دخیل در وقوع آن است. در خصوص رده‌بندی الگوهای مکانی که به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی هستند می‌توان بر چگونگی نظم و ترتیب واحدهای ناحیه‌ای توجه داشت. خودهمبستگی فضایی به معنای این است که ارزش صفات مورد بررسی با هم مرتبط است و این همبستگی می‌تواند به نظم جغرافیایی پدیده‌ها مربوط باشد.

انتخاب شاخص خودهمبستگی فضایی موران جهانی (Moran's I) در این پژوهش، مبتنی بر انطباق مستقیم آن با هدف اصلی مطالعه، یعنی بررسی معناداری آماری الگوی فضایی تصادفات و تشخیص وجود یا عدم وجود ساختار فضایی در داده‌ها بوده است. برخلاف بسیاری از روش‌های توصیفی، Moran's I یک ابزار استنباطی (inferential) است که امکان آزمون فرضیه صفر مبنی بر تصادفی بودن توزیع فضایی را فراهم می‌سازد.

یکی از مهم‌ترین مزایای Moran's I، توانایی آن در کمی‌سازی شدت و جهت وابستگی فضایی است. این شاخص نه تنها مشخص می‌کند که آیا الگوهای مکانی به‌صورت خوشه‌ای،

پراکنده یا تصادفی هستند، بلکه شدت این الگوها را نیز در قالب یک مقدار عددی استاندارد ارائه می‌دهد. در چارچوب این پژوهش، این ویژگی امکان مقایسه سیستماتیک میان متغیرهای مختلف (مانند تراکم جمعیت، کاربری زمین و تقاطع‌ها) و ارزیابی نقش آن‌ها در شکل‌گیری الگوی تصادفات را فراهم کرده است.

در نهایت، انتخاب Moran's I با هدف حرکت از تحلیل‌های صرفاً توصیفی به سمت تحلیل‌های تبیینی و مبتنی بر شواهد انجام شده است. این شاخص با فراهم کردن امکان شناسایی ساختارهای فضایی معنادار، بستری مناسب برای تفسیر روابط میان تصادفات و عوامل مؤثر فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان گام اولیه در توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر (مانند مدل‌های رگرسیون فضایی یا تحلیل‌های زمانی-مکانی) مورد استفاده قرار گیرد.

لذا الگوی توزیع رویدادها توسط مقادیر Moran I به تصویر کشیده می‌شود و با توجه به عوارض مشخص شده و صفت‌های مربوطه، الگوی خوشه‌ای، پراکنده و یا تصادفی تعیین خواهد شد. در واقع Moran I نشان می‌دهد که مکان و مقادیر عوارض از نظر فضایی به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی توزیع شده است لذا برای محاسبه آماره یا شاخص Moran، ابتدا نمره استاندارد Z و P-Value محاسبه می‌شود و در مرحله بعد به ارزیابی و معنادار بودن شاخص پرداخته می‌شود.

مشابه بسیاری از تحقیقات سال‌های اخیر که در بخش مرور ادبیات ذکر شده است، برای محاسبه خودهمبستگی فضایی با استفاده از شاخص Moran I جهانی از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق N تعداد پدیده‌ها، X_i مقدار متغیر در یک موقعیت مشخص، X_j مقدار متغیر در یک موقعیت دیگر، X میانگین متغیر و W وزنی است که به اختلاف بین موقعیت i و موقعیت j اعمال می‌شود. اگر مقدار شاخص Moran نزدیک عدد +۱ باشد، داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای بوده و اگر مقدار شاخص Moran نزدیک به عدد -۱ باشد، آنگاه داده‌ها از هم گسسته و پراکنده می‌باشند [۳].

۴- یافته‌ها

۴-۱- تحلیل فضایی عوامل مؤثر در وقوع تصادفات

درون‌شهری زنجان

ابتدا، به منظور دستیابی به درک جامع و فضایی از عوامل مؤثر در وقوع تصادفات در شهر زنجان، هر یک از این عوامل به طور جداگانه در محیط نرم‌افزار ArcGIS مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. سپس، با استفاده از آماره Moran جهانی و ایجاد همبستگی با عوامل، میزان تأثیر هر یک از آنها در وقوع تصادفات شهری زنجان تعیین خواهد شد.

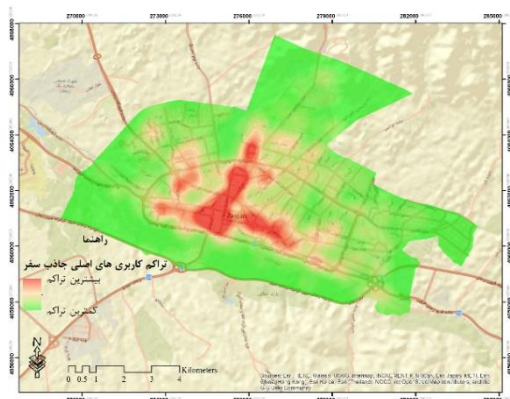
۴-۲- عناصر جمعیتی

شکل (۴) توزیع تراکم جمعیتی در شهر زنجان را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل بر اساس طیف رنگی، مناطق با بیشترین تراکم جمعیتی به رنگ قرمز و مناطق با کمترین تراکم به رنگ زرد نمایش داده شده‌اند. تراکم جمعیتی بر اساس داده‌های آماری مناطق مختلف شهر زنجان و با انطباق بر موقعیت جغرافیایی هر یک از آنها تهیه شده است.

جدول ۲: شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش

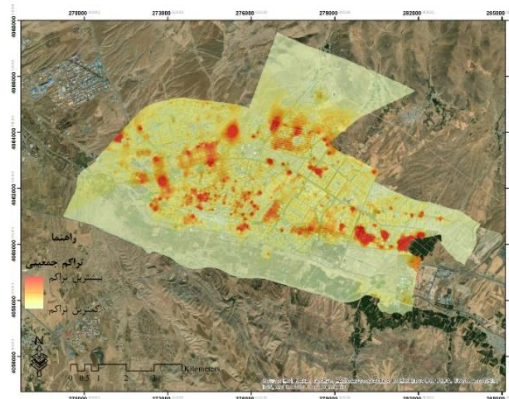
منبع	گویه	شاخص
آمارنامه شهر زنجان	بررسی تأثیر ویژگی‌های جمعیتی	عناصر جمعیتی
طرح تفصیلی شهر زنجان	بررسی تأثیر کاربری‌های جاذب سفر	عناصر فرم شهری
پلیس راهور شهر زنجان و OSM	بررسی تأثیر تقاطع‌های درون‌شهری	
طرح تفصیلی شهر زنجان	بررسی تأثیر تراکم محورهای مواصلاتی	
طرح تفصیلی شهر زنجان	بررسی تأثیر تراکم کاربری‌های تجاری-خدماتی	
پلیس راهور شهر زنجان و OSM	بررسی تأثیر توزیع فضایی نقاط تصادفات	عناصر تراکم تصادفات درون‌شهری
پلیس راهور شهر زنجان و OSM	بررسی تأثیر مناطق ترافیکی	عناصر سفرهای شهری

۱۱۲۸/۹ هکتار به کاربری اراضی خالی و در دست احداث اختصاص یافته است.



شکل ۵: توزیع کاربری‌های اصلی جاذبه سفر درون‌شهری زنجان

بر اساس شکل (۵) کاربری‌های مورد بررسی، شامل مکان‌هایی هستند که مردم به‌طور مکرر به آن‌ها مراجعه می‌کنند و باعث افزایش تردد در آن مناطق می‌شوند، از جمله: ۱- مراکز تجاری و بازارها (مثل بازار سستی زنجان، مجتمع‌های تجاری) ۲- مراکز اداری و دولتی (شهرداری، ادارات مهم، دادگستری و...) ۳- دانشگاه‌ها و مدارس (مانند دانشگاه زنجان و سایر مراکز آموزشی) ۴- ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی (پایانه‌های اتوبوس، ایستگاه راه‌آهن و تاکسی) ۵- مراکز درمانی و بیمارستان‌ها. داده‌های کاربری شهری بر اساس طرح تفصیلی شهر زنجان تهیه شده است که به ازای هر یک از نواحی به صورت جزئی در مختصات مربوطه قرار داده شده است. مناطقی که دارای بیشترین فراوانی این کاربری‌ها هستند به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. این مناطق شامل: خیابان فردوسی، سعدی، امام خمینی، خرمشهر، شهدا و کارگران می‌باشد که در واقع شامل بخش مرکزی شهری است. این منطقه درصد بالایی از کاربری‌های جاذب سفر را در خود جای داده‌اند اما آنچه که اهمیت دارد وجود کاربری‌های تجاری و خدماتی است. در تحلیل‌های بعدی این دو کاربری با دقت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همپوشانی نقشه تراکم تصادفات نشان می‌دهد که مناطق پرتراکم تصادف نیز اغلب در نزدیکی همین کاربری‌های جاذب سفر قرار دارند. محتمل‌ترین دلیل بروز ازدحام ترافیکی در این مناطق، تراکم بالای کاربری‌های تجاری، اداری و درمانی در مرکز تجاری شهر و همچنین غلبه هویت تاریخی-اجتماعی این منطقه است. این مسئله باعث ترغیب بیشتر شهروندان در مراجعه به این منطقه جهت گشت و گذار، تأمین مایحتاج زندگی روزمره خود و سفر با هدف انجام



شکل ۴: توزیع تراکم جمعیتی در شهر زنجان

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته بر روی نقشه تراکم جمعیتی شهر زنجان، مناطقی با رنگ قرمز، نشان‌دهنده تراکم بالای جمعیت هستند. این مناطق معمولاً شامل مراکز تجاری، مراکز خرید، بازارها، پایانه‌های حمل‌ونقل عمومی و محلات مسکونی پرتراکم می‌باشند. در چنین مکان‌هایی به علت حجم بالای عابران پیاده و خودروها، احتمال وقوع تصادف بیشتر است. این مناطق به دلیل رفت‌وآمد زیاد افراد، اگر زیرساخت‌های مناسب مانند پل‌های عابر پیاده، خط‌کشی‌های مشخص و چراغ‌های راهنمایی کافی نباشد، با حجم بالای تصادفات مواجه خواهد شد. از همپوشانی نقشه تراکم جمعیتی و نقشه پراکنش تصادفات شهر زنجان می‌توان نتیجه گرفت که تراکم جمعیتی عامل مهمی در بروز تصادفات است و همپوشانی بالایی بین مناطق پرتراکم جمعیتی و مناطق پرتراکم تصادفات دیده می‌شود.

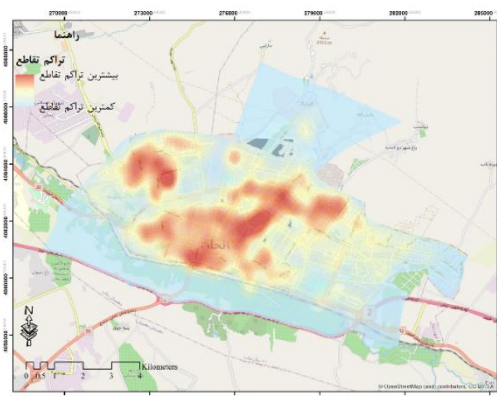
۳-۴- عناصر فرم شهری

این بُعد شامل گویه‌های کاربری‌های جاذب سفر، تقاطع‌های درون‌شهری، تراکم محورهای مواصلاتی و تراکم کاربری‌های تجاری - خدماتی است. در ادامه هریک به صورت جداگانه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

شکل (۵) کاربری‌های جاذب سفر در شهر زنجان را نشان می‌دهد. مطابق نقشه مذکور مساحت محدوده وضع موجود شهر زنجان معادل ۵۴۵۹/۶۳۱۱۹ هکتار می‌باشد. از این میزان ۲۳/۳۲ درصد معادل ۱۰۰۵ هکتار به کاربری مسکونی، ۳۱/۶۴ درصد معادل ۱۳۶۸/۹۱۷ هکتار به کاربری خدمات شهری، ۱۷/۱۱ درصد معادل ۷۴۰/۴ هکتار به کاربری اراضی غیرشهری، ۲۶/۰۹ درصد معادل

امور اداری و درمانی خود شده و در نتیجه می‌تواند باعث افزایش ترافیک و وقوع ازدحام ترافیکی در این منطقه از شهر شود که این خود عامل اساسی در بروز تصادفات شهری است.

شکل (۶) تراکم تقاطع‌های شهر زنجان را نشان می‌دهد. متناسب این نقشه هرچه از سمت رنگ قرمز به رنگ آبی حرکت می‌کنیم از تعداد و فراوانی تقاطع‌های شهری کاسته می‌شود.



شکل ۶: تراکم تقاطع‌های شهر زنجان

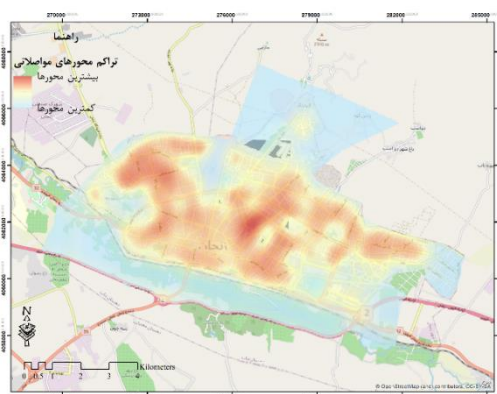
طبق شکل (۶)، چهار تقاطع خروجی مهم شهر زنجان شامل: عاصم زنجانی، فردوسی، شهیدآوینی و تقاطع موجود در گلستان شمالی، از مهم‌ترین تقاطع‌های شهر زنجان می‌باشند که عمدتاً در مرکز شهر، محدوده‌های تجاری و اداری و در امتداد مسیرهای اصلی قرار دارند. این امر طبیعی است، زیرا در این مناطق حجم بالایی از عبور و مرور وسایل نقلیه و عابران پیاده وجود دارد. جدول (۳)

جدول ۳: الگوهای حاصل از مقایسه نقشه تراکم تصادفات و تراکم تقاطع‌ها

○ افزایش حجم ترافیک در تقاطع‌های مهم ○ عبور عابران پیاده از تقاطع‌ها ○ تداخل مسیرهای مختلف خودروها ○ تداخل حرکتی بین وسایل نقلیه در جهات مختلف ○ افزایش توقف و شروع حرکت مکرر خودروها ○ افزایش احتمال عبور غیرمجاز از چراغ قرمز یا حق تقدم	مناطق با بیشترین تقاطع‌ها، مانند مرکز شهر و خیابان‌های پرتدد، بیشترین میزان تصادفات را دارند.
○ در بخش‌های حاشیه‌ای شهر که تقاطع‌های کمتری دارند، تعداد تصادفات نیز پایین‌تر است. این امر نشان می‌دهد که وجود تقاطع‌های زیاد، یکی از عوامل اصلی وقوع تصادفات در شهر زنجان می‌باشد.	مناطق با تراکم کم تصادفات و تراکم کم تقاطع‌ها
○ در برخی مناطق که تراکم تصادفات زیاد است اما تعداد تقاطع‌ها کمتر است، ممکن است عوامل دیگری مانند سرعت بالا، عرض معبر نامناسب، یا عدم رعایت مقررات رانندگی در وقوع تصادفات تأثیر داشته باشند.	نقاط پرتراکم تصادف اما کم‌تراکم از نظر تقاطع

الگوهای حاصل از مقایسه نقشه تراکم تصادفات و تراکم تقاطع‌ها را نشان می‌دهد.

شکل (۷) نشان‌دهنده تراکم مسیرهای مواصلاتی در شهر زنجان است. مناطق با رنگ قرمز نشان‌دهنده بیشترین تراکم مسیرهای ارتباطی هستند، در حالی که مناطق با رنگ زرد و آبی تراکم کمتری دارند. بیشترین تراکم مسیرها در مرکز و مسیرهای اصلی شهر مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت این مسیرها در جابه‌جایی شهری است. مسیرهای مواصلاتی پرتراکم عمدتاً منطبق بر بیشترین مسیرهای جابه‌جایی کالا و مسافر است ولی بیشترین تمرکز آن مربوط به بخش مرکزی، حوالی سعدی وسط و کوچمشکی است.



شکل ۷: تراکم مسیرهای مواصلاتی در شهر زنجان

- کمترین تراکم در مناطق حاشیه‌ای: در مناطق شمالی و شرقی زنجان، تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی کمتر دیده می‌شود که به دلیل تمرکز کاربری‌های مسکونی و صنعتی در این نواحی است.

جدول (۴) نتایج حاصل از مقایسه نقشه تراکم کاربری‌های تجاری - خدماتی و نقشه پراکنش تصادفات درون‌شهری زنجان را نشان می‌دهد.

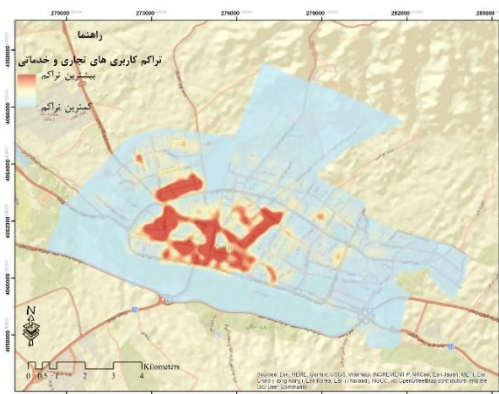
۴-۴- عناصر تصادفات درون‌شهری

شکل (۹) نقشه توزیع تراکم تصادفات درون‌شهری زنجان را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد تصادفات درون‌شهری زنجان تابعی از عوامل و شاخص‌های متعددی است که در فراوانی، نوع و شدت تصادفات نقش بسزایی می‌توانند داشته باشند. همانگونه که پیشتر اشاره شد، پس از اخذ داده‌های تصادفات شهری از پلیس راهور و پالایش آن، مختصات یکی به یک آنها استخراج شده و در بان داده‌ها قرار گرفت. زمانی که مجموعه‌ای از این عوامل در کنار هم قرار می‌گیرند، نقاط حادثه‌خیزی را شکل می‌دهند که به عنوان موقعیت‌های با خطر نسبتاً بالا تعریف می‌شوند. این شاخص نشان‌دهنده میزان تراکم تصادفات است که با توجه به تصادفات رخ داده پیشین استخراج می‌شود. در یک محدوده هرچقدر میزان تصادفات بیشتری رخ داده باشد، نشان از خطرناک بودن آن محدوده دارد. شناسایی این نقاط، اولین و کم‌هزینه‌ترین راهبرد در راستای مدیریتی ایمنی راه‌هاست که بر اساس آن تنها بخش‌هایی از راه جهت ایمن‌سازی انتخاب می‌گردد که در آن تعداد تصادفات زیادی ثبت شده است.

در شکل (۹) مناطق قرمز رنگ دارای بیشترین میزان تصادفات درون‌شهری هستند. این مناطق منطبق بر محورهای بزرگراه ۲۲ (بلوار شهید آوینی) بهمن و دکتر شریعتی به عنوان محورهای اصلی و محورهای فرعی پروفیسور ثبوتی و فردوسی می‌باشند. این منطقه به علت قرارگیری مراکز آموزشی و بهداشتی (بیمارستان موسوی)، و تفرجگاه گاوازننگ، سالانه بیشترین تعداد تصادفات جاده‌ای را شامل می‌شود.

همپوشانی نقشه تراکم مسیرهای مواصلاتی با نقشه تراکم تصادفات شهری نشان می‌دهد، مناطق با بیشترین تصادفات عموماً در مسیرهای پُر تردد قرار دارند. در واقع نقشه تصادفات نشان می‌دهد که بسیاری از نقاط قرمز رنگ (محل تصادفات پرتکرار) در مناطقی قرار گرفته‌اند که در نقشه مسیرهای مواصلاتی دارای تراکم بالایی هستند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر حجم ترافیک در افزایش احتمال تصادف است. این موضوع گویای آن است که این نقاط نیازمند بهبود در طراحی هندسی یا مدیریت ترافیک هستند. علاوه بر این مسیرهای اصلی و کمربندی‌ها نسبتاً تصادفات کمتری دارند - در حالی که این مسیرها در نقشه مواصلاتی به‌خوبی مشخص هستند، در نقشه تصادفات کمتر دیده می‌شوند، که نشان‌دهنده تأثیر طراحی مناسب‌تر و کاهش تقاطع‌های پرخطر در این مسیرها است.

شکل (۸) توزیع کاربری‌های تجاری و خدماتی شهر زنجان را نشان می‌دهد. در این نقشه مناطق با بیشترین تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.



شکل ۸: توزیع کاربری‌های تجاری و خدماتی شهر زنجان

این مناطق عمدتاً در مرکز شهر زنجان و اطراف محورهای اصلی قرار دارند. برخی از ویژگی‌های این نقشه شامل موارد زیر است:

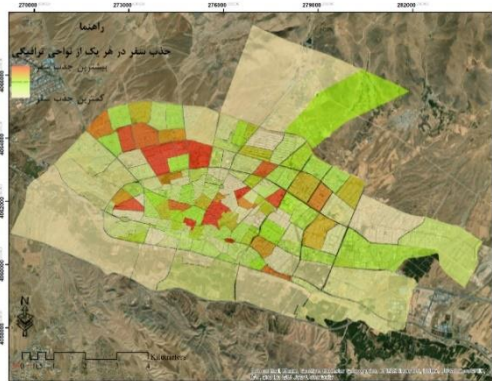
- تمرکز بالا در مرکز شهر: بیشترین تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی در مرکز زنجان دیده می‌شود، که نشان‌دهنده هسته اقتصادی و تجاری شهر است.
- توزیع در امتداد خیابان‌های اصلی: بسیاری از این کاربری‌ها در امتداد محورهای مواصلاتی اصلی شهر توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده نقش این معابر در جذب سفرهای شهری است.

جدول ۴: مقایسه نقشه تراکم کاربری‌های تجاری - خدماتی و نقشه پراکنش تصادفات درون‌شهری زنجان

نقاطی که بیشترین تصادفات در آن‌ها رخ داده، تقریباً منطبق بر نواحی با تراکم بالای کاربری‌های تجاری و خدماتی هستند.
این مناطق جز گلوگاه‌ها و تقاطع‌های اصلی پرترددی هستند که تراکم بالای تصادفات نیز در مجاورت این تقاطع‌ها دیده می‌شوند.
این مناطق به علت دارا بودن تراکم بالای کاربری‌های تجاری و خدماتی معمولاً میزان تردد عابرین پیاده و خودروهای بیشتری دارند، که منجر به افزایش احتمال وقوع تصادفات می‌شود.
از سوی دیگر بسیاری از کاربری‌های تجاری و خدماتی در محورهای اصلی مستقر شده‌اند، که این محورها معمولاً حجم ترافیکی بالایی دارند و همین عامل موجب افزایش تعداد تصادفات می‌شود.
نواحی تجاری بخش مرکزی شهر معمولاً به دلیل توقف‌های غیرمجاز و پارک‌های حاشیه‌ای، احتمال تصادفات افزایش می‌یابد.

۴-۵- عناصر سفر شهری (مناطق ترافیکی)

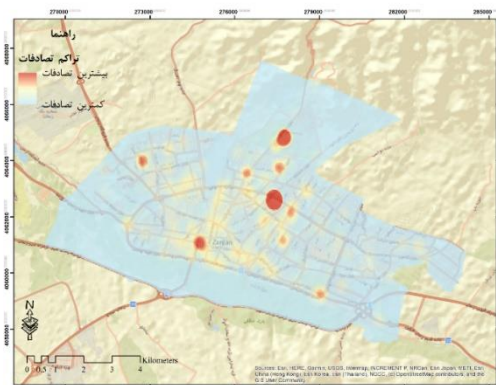
در شهر زنجان وجود مناطق ترافیکی به‌عنوان بخش‌هایی از شهر یا شبکه حمل‌ونقلی باعث می‌شود که در آن‌ها حجم تردد وسایل نقلیه و عابران پیاده بالا باشد و نیاز به مدیریت ترافیک ویژه دارند. بدیهی است مناطق ترافیکی مدل بر مبنای منطقه بندی شهرداری زنجان تقسیم بندی شد. این مناطق به دلیل تمرکز بالای فعالیت‌های اقتصادی، اداری، تجاری و تفریحی، معمولاً با تراکم بالای سفر، ترافیک سنگین، و افزایش احتمال تصادفات مواجه هستند. شکل (۱۰) مناطق ترافیکی شهر زنجان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: مناطق ترافیکی شهر زنجان

در شکل (۱۱) مناطقی که به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند به عنوان مناطق اصلی جاذب سفر شناخته می‌شوند که با حجم بالای تردد وسایل نقلیه و عابران پیاده، وجود مراکز تجاری، اداری، خدماتی و تفریحی، تراکم زیاد کاربری‌های جاذب سفر (مانند بازارها، مراکز خرید و دانشگاه‌ها) و ترافیک سنگین و کندی حرکت وسایل نقلیه مواجه هستند.

. همچنین، بخش مرکزی و حوالی میدان انقلاب و بازار نیز به علت حجم بالای ترافیک شهری، ازدحام کاربری‌ها به ویژه کاربری‌های تجاری و خدماتی و همچنین بیشترین جابه‌جایی کالا و مسافر، به عنوان محورهای پرخطر وقوع تصادفات درون‌شهری شناخته می‌شوند و در تحلیل‌های خوشه‌ای با رتبه اهمیت بالا قرار می‌گیرند



شکل ۹: تراکم پراکنش تصادفات درون‌شهری زنجان

در طیف رنگی تراکم تصادفات درون‌شهری زنجان هرچه از رنگ قرمز به سمت مناطق آبی رنگ حرکت می‌کنیم، از میزان تراکم تصادفات کاسته می‌گردد. با این وجود، میزان تصادفات شهر زنجان با توجه به آمارهای ارائه شده از سوی مرکز راهنمایی و رانندگی شهر زنجان، در مقایسه با سایر شهرهای میانی از درصد و فراوانی کمتری برخوردار است. با این حال دارای نقاط حادثه‌خیزی است که مسئله هندسه جاده و روسازی آن از عوامل اساسی در بروز تصادفات در این نقاط است.

جدول ۵: همپوشانی نقشه مناطق ترافیکی شهر زنجان با نقشه تراکم تصادفات شهری

نقاط داغ تصادفات (قرمز پررنگ) با مناطقی که جذب سفر بالایی دارند، همپوشانی قابل توجهی دارند. به عنوان مثال بخش مرکزی شهر علاوه بر آنکه جز مناطق ترافیکی هستند، با حجم بالای تصادفات شهری نیز روبه رو هستند.
با مقایسه دو نقشه، ارتباط مستقیم بین میزان جذب سفر و تراکم تصادفات کاملاً مشهود است. در مناطق با جذب سفر بالا (قرمز و نارنجی در نقشه مناطق ترافیکی)، تراکم تصادفات نیز بیشتر است (قرمز در تراکم تصادفات). این رابطه را می‌توان به چند دلیل تبیین کرد:
- افزایش حجم وسایل نقلیه و تردد عابران پیاده در مناطق پرتردد، خطر تصادفات را افزایش می‌دهد. - وجود مراکز تجاری، اداری و خدماتی که موجب افزایش تقاضای سفر و در نتیجه افزایش احتمال وقوع تصادفات می‌شود.

توزیع مکانی هریک با استفاده از آماره موران جهانی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و در نهایت مهم‌ترین عوامل اثر گذار استخراج خواهند شد.

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، مقدار شاخص موران جهانی برای متغیرهای مورد بررسی بالای صفر و مثبت است ولی تنها تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع و شدت جذب سفر بالای ۰.۱ می‌باشند و عوامل تراکم محورهای مواصلاتی، تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی دارای مقداری پایین‌تر از ۰.۱ هستند. این نکته نشان می‌دهد که بر اساس شاخص موران جهانی، از بین عناصر مؤثر در وقوع تصادفات جاده‌ای، تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع و شدت جذب سفر، دارای الگوی خوشه‌ای بالا در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد می‌باشد. علاوه بر این بالاترین میزان آماره موران جهانی مربوط به شدت جذب سفر با میزان ۰.۵ و کمترین مقدار آن مربوط به نوع تراکم جمعیتی است.

آماره Z در بین متغیرهای مورد بررسی همگی دارای مقادیر بالا است ولی میزان آن در بین متغیرهای تراکم تقاطع با مقدار ۱۳.۲۷ و تراکم جمعیتی با میزان ۱۳.۰۸ دارای بالاترین مقادیر می‌باشند. مقدار p -value تنها برای عوامل تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع دارای مقدار عددی صفر می‌باشد.

بنابراین درمجموع بر اساس مقادیر موران جهانی، در نگاه اول شاید بتوان چنین استنباط نمود که الگوی پراکنش کلیه شاخص‌های مورد بررسی دارای الگوی خوشه‌ای است اما با توجه به مقدار Z و مقدار ارزشی p -value می‌توان فرضیه صفر و عدم وجود خودهمبستگی فضایی بین داده‌های تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع و شدت جذب سفر را رد نمود.

در مقابل هرچه از نواحی قرمز رنگ به سمت نواحی سبز روشن حرکت می‌کنیم، با کمترین میزان جذب سفر روبه‌رو می‌شویم. ویژگی بارز نواحی حاشیه‌ای و مناطق کم‌تراکم شهری (رنگ‌های سبز و زرد روشن) کاهش فعالیت‌های اقتصادی و خدماتی در این نواحی است. جدول (۵) همپوشانی نقشه مناطق ترافیکی شهر زنجان با نقشه تراکم تصادفات شهری نشان می‌دهد

۴-۶- بررسی شاخص خودهمبستگی فضایی آماره موران جهانی

خروجی تحلیل خودهمبستگی فضایی موران جهانی، به‌صورت عددی در جدول (۶) ارائه شده است. به‌طورکلی اگر شاخص موران نزدیک به +۱ باشد، داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای بوده و اگر مقدار آن نزدیک به عدد ۱- باشد آنگاه داده‌ها از هم گسسته و پراکنده خواهند بود. در موران جهانی فرضیه صفر این است که هیچ نوع خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر عنصر مرتبط با عوارض جغرافیایی موردنظر وجود ندارد. حال زمانی که مقدار p -value بسیار کوچک (کمتر از ۰.۰۵) و مقدار Z محاسبه شده (قدر مطلق آن) بسیار بزرگ باشد (خارج از محدوده اطمینان باشد)، آنگاه می‌توان فرضیه صفر را رد کرد. اگر شاخص موران بزرگ‌تر از صفر باشد، داده‌ها نوعی خوشه‌بندی فضایی و اگر کمتر از صفر باشد دارای الگوی پراکنده می‌باشند. در این پژوهش متغیرهای تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع، تراکم محورهای مواصلاتی، تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی، شدت جذب سفر به عنوان عوامل اثرگذار در وقوع تصادفات درون‌شهری زنجان در نظر گرفته شده‌اند. پیشتر تحلیل فضایی و نحوه توزیع و پراکنش هریک به صورت اجمالی بیان شده است. حال برای مدلسازی مکانی تصادفات درون‌شهری زنجان الگوی

جدول ۶: تحلیل خودهمبستگی فضایی موران جهانی

متغیر	p-value	z-score	Pattern	Expected I	Moran's I
تراکم جمعیتی	0	13.08	Clustered	0.006711-	0.19
تراکم کاربری‌های اصلی	0	7.24	Clustered	0.006711-	0.206
تراکم تقاطع	0	13.27	Clustered	0.006711-	0.449
تراکم محورهای مواصلاتی	0/00159	12.21	Random	0.006711-	0.429
تراکم کاربری‌های تجاری و خدماتی	0/000215	3.76	Random	0.006711-	0.478
شدت جذب سفر	0/00982	2.31	Clustered	0.006711-	0.526

معابر شهری انجام شد. این مرحله به‌طور مستقیم از بروز خطاهای مکانی (geocoding errors) و سوگیری‌های ناشی از داده‌های ناسازگار جلوگیری نموده و بستر لازم برای تحلیل‌های فضایی قابل اعتماد را فراهم ساخت.

در سطح دوم، اعتبار روش تحلیلی با اتکا بر چارچوب‌های پذیرفته‌شده در آمار فضایی ارزیابی گردید. استفاده از شاخص خودهمبستگی فضایی موران جهانی به‌عنوان یک آزمون استنباطی (inferential statistic)، امکان بررسی صریح فرضیه صفر مبنی بر تصادفی بودن توزیع فضایی را فراهم نمود. ترکیب همزمان سه شاخص Moran's I، آماره استاندارد Z و مقدار احتمال (P-value)، این امکان را فراهم ساخت تا نه‌تنها جهت و شدت وابستگی فضایی مشخص شود، بلکه معناداری آماری آن نیز در سطوح اطمینان بالا (۹۵٪ و ۹۹٪) مورد آزمون قرار گیرد. معنادار بودن مقادیر به‌دست‌آمده و رد فرضیه صفر، بیانگر آن است که الگوهای شناسایی‌شده، حاصل نوسانات تصادفی نبوده بلکه ناشی از ساختارهای فضایی نظام‌مند در داده‌ها و شناسایی الگوهای خوشه‌ای تصادفات است.

در سطح سوم، اعتبار تبیینی روش از طریق اعتبارسنجی همگرایی فضایی (spatial convergent validity) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، الگوهای به‌دست‌آمده از تحلیل خودهمبستگی فضایی با لایه‌های مستقل شامل تراکم جمعیتی، کاربری‌های جاذب سفر، تراکم تقاطع‌ها و شدت جذب سفر مقایسه شد. هم‌پوشانی فضایی معنادار میان نواحی با مقادیر بالای این متغیرها و خوشه‌های تصادف، نشان‌دهنده انسجام درونی مدل و توانایی آن در بازنمایی واقعیت‌های فضایی سیستم شهری است. این

موران I مثبت، Z-score بالا و P-value صفر نمایانگر این است که عوامل مؤثر در تصادفات ترافیکی در شهر زنجان حالت خوشه‌بندی شده دارند و کمتر از یک درصد احتمال دارد که این الگوی خوشه‌ای نتیجه یک شانس تصادفی باشد. لذا با توجه به نتایج خاص از خودهمبستگی مکانی موران I مشخص شد که الگوی مکانی عوامل مؤثر در وقوع تصادفات ترافیکی در شهر زنجان طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ تنها در بین عوامل عرض معبر، تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های اصلی، تراکم تقاطع دارای الگوی خوشه‌ای قوی است و برای سایر عوامل با در نظر گرفتن مقدار Z-score بالا و P-value عدم وجود خودهمبستگی فضایی و الگوی توزیع تصادفی تأیید می‌شود.

۴-۷- اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و نوآوری روش

پیشنهادی

در خصوص اعتبارسنجی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی و به منظور تضمین استحکام روش‌شناختی و قابلیت اتکای نتایج، چارچوب اعتبارسنجی پژوهش حاضر در سه بعد مکمل شامل اعتبار داده‌ها (data validity)، روایی آماری (statistical validity) و اعتبار تبیینی-مفهومی (inferential validity) طراحی و اجرا گردید.

در سطح نخست، اعتبار داده‌های ورودی از طریق یک فرآیند نظام‌مند پیش‌پردازش و کنترل کیفیت تضمین شد. مجموعه داده شامل ۶۶۵۶ رخداد تصادف نقطه‌ای پس از اخذ از منابع رسمی، تحت عملیات پالایش شامل حذف رکوردهای تکراری و بررسی داده‌های ناقص قرار گرفت. سپس مختصات دقیق مکانی هر یک از تصادفات مشخص شده و کنترل سازگاری توپولوژیک با شبکه

همگرایی میان داده‌های مستقل و وابسته، به‌عنوان شاهدهی تجربی بر روایی ساختاری (construct validity) روش تلقی می‌شود.

در نهایت، اعتبار تفسیری نتایج از طریق ارزیابی سازگاری منطقی میان خروجی‌های آماری و شناخت نظری از پویایی‌های ترافیک شهری مورد تأیید قرار گرفت. به‌گونه‌ای که خوشه‌های شناسایی‌شده از تصادفات، به‌طور معناداری با نواحی دارای تمرکز فعالیت‌های اقتصادی، گره‌های ترافیکی و محورهای پرتردد انطباق داشته‌اند. این انطباق نه‌تنها نشان‌دهنده صحت نتایج، بلکه بیانگر توان تبیینی بالای روش در پیوند دادن الگوهای آماری با سازوکارهای واقعی تولید ریسک در محیط‌های شهری است.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، با اتکا بر یک چارچوب تحلیلی چندلایه و مبتنی بر آزمون‌های استنباطی، از سطح بالایی از اعتبار در ابعاد داده‌ای، آماری و مفهومی برخوردار بوده و قادر است الگوهای فضایی تصادفات را با دقت و قابلیت اعتماد بالا شناسایی و تبیین نماید.

در خصوص نوآوری این پژوهش، این مطالعه تحلیل تصادفات ترافیکی را با عبور از رویکردهای صرفاً توصیفی و حرکت به سوی یک چارچوب فضایی استنباطی مبتنی بر شاخص موران ارتقا می‌دهد:

- گذار از تحلیل‌های توصیفی به تحلیل‌های استنباطی فضایی
- یکپارچه‌سازی تحلیل فضایی با متغیرهای ساختاری شهری
- تمرکز بر آزمون ساختار فضایی به‌جای صرف شناسایی نقاط داغ (Hotspots)
- کاهش وابستگی به پارامترهای ذهنی در تحلیل فضایی

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که توزیع فضایی تصادفات درون‌شهری زنجان به‌طور معناداری از الگوی تصادفی تبعیت نکرده و دارای ساختار خوشه‌ای مشخصی است. مقادیر مثبت و معنادار شاخص موران جهانی، همراه با آماره‌های Z و P ، بیانگر وجود خودهمبستگی فضایی مثبت و تمرکز تصادفات در نواحی خاص شهری است. این یافته تأیید می‌کند که تصادفات نه به‌صورت پراکنده، بلکه در قالب خوشه‌های مکانی شکل می‌گیرند که تحت تأثیر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی شهر هستند.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، شناسایی نقش برجسته متغیرهای فضایی-کارکردی در شکل‌گیری الگوی تصادفات است. تحلیل‌ها نشان دادند که متغیرهایی نظیر تراکم جمعیتی، تراکم کاربری‌های جاذب سفر، تراکم تقاطع‌ها و شدت جذب سفر، بیشترین همبستگی فضایی را با وقوع تصادفات دارند. این متغیرها در واقع نمایانگر شدت تعاملات انسانی و ترافیکی در فضا هستند و افزایش آن‌ها منجر به افزایش احتمال تعارضات حرکتی و در نتیجه افزایش ریسک تصادف می‌شود. این نتیجه، دیدگاه‌های سنتی که تصادفات را صرفاً تابع ویژگی‌های هندسی راه می‌دانند، به چالش کشیده و اهمیت عوامل فضایی و برنامه‌ریزی شهری را برجسته می‌سازد.

از منظر فضایی، نتایج نشان‌دهنده تمرکز قابل توجه تصادفات در هسته مرکزی شهر و در امتداد محورهای پرتردد است. این تمرکز فضایی با نواحی دارای بیشترین فعالیت‌های اقتصادی، خدماتی و تجاری هم‌پوشانی دارد که بیانگر رابطه مستقیم میان شدت فعالیت‌های شهری و افزایش ریسک تصادف است. به بیان دیگر، فضاهایی که بیشترین جاذب سفر را دارند، به‌طور همزمان به‌عنوان کانون‌های پرخطر ترافیکی نیز عمل می‌کنند. این یافته، اهمیت رویکرد یکپارچه میان برنامه‌ریزی کاربری زمین و مدیریت ایمنی ترافیک را برجسته می‌سازد.

از دستاوردهای مهم دیگر این پژوهش، ارائه یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر آمار فضایی برای شناسایی نواحی پرخطر است که نسبت به روش‌های صرفاً توصیفی (مانند KDE)، قابلیت استنتاج آماری و تصمیم‌سازی دقیق‌تری را فراهم می‌سازد. این چارچوب امکان تمایز میان خوشه‌های واقعی و الگوهای تصادفی را فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای مدیران شهری مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این، پژوهش حاضر به‌طور ضمنی نشان می‌دهد که شدت و نوع کاربری زمین می‌تواند به‌عنوان یک شاخص پیش‌بینی‌کننده ریسک تصادف در محیط‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع می‌تواند مبنایی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی فضایی (spatial predictive models) در مطالعات آینده باشد، به‌گونه‌ای که با استفاده از داده‌های کاربری زمین و جمعیت، بتوان نواحی مستعد بروز تصادف را پیش از وقوع شناسایی کرد.

۴. Atighechian, G., Z. Taghiyan, and M. Nasr Isfahani, *Prediction of Road Traffic Accident Casualties Using GAP Index (Glasgow Coma Scale, Age, Systolic Blood Pressure) in Kashani Hospital, Isfahan*. Health in Emergencies and Disasters Quarterly, 2025. **10**(2): p. 0-0.
۵. Seif, M., et al., *Prediction of the burden of road traffic injuries in Iran by 2030: Prevalence, death, and disability-adjusted life years*. Chinese journal of traumatology, 2024. **27**(04): p. 242-248.
۶. Mohammadi, A., et al., *Pedestrian road traffic accidents in metropolitan areas: GIS-based prediction modelling of cases in Mashhad, Iran*. Sustainability, 2023. **15**(13): p. 10576.
۷. Ghezelbash, S., R. Ghezelbash, and M. Kalantari, *Developing a spatio-temporal interactions model for car crashes using a novel data-driven AHP-TOPSIS*. Applied Geography, 2024. **162**: p. 103151.
۸. lak, B. and A. babaei, *Analysis of Factors Affecting Driving Violations Based on Linear Regression and Fuzzy Logic (in persian)*. Road, 2020. **74**.
۹. Ahmed, A., et al., *What makes accidents severe! explainable analytics framework with parameter optimization*. European Journal of Operational Research, 2024. **317**(2): p. 425-436.
۱۰. Ameri, M., et al., *Predicting Traffic Safety Using PSO-SVM Method and Back Propagation Neural Network*. Ferdowsi Civil Engineering, 2021. **34** (۴): p. 1-14.
۱۱. sedigh bavar, M., A. Naderan, and M. Saffarzadeh, *The spatial effect of the contribution of land use types in the occurrence of accidents based on traffic area zones (Case study: Shiraz metropolis)*. Ferdowsi Civil Engineering, 2023. **36**(3): p. ۱-۱۶.
۱۲. Effati, M., et al., *Modelling and Analyzing the Severity of two-lane Highway Crashes Using the Spatial Data mining, Case Study: Old Corridor of Qazvin-Loshan (in persian)*. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021. **51**(105): p. 81-95.
۱۳. Khan, A.A. and J. Hussain, *Utilizing GIS and Machine Learning for Traffic Accident Prediction in Urban Environment*. Civil Engineering Journal, 2024. **10**(6): p. 1922-1935.
۱۴. Rhee, K., et al., *Spatial regression analysis of traffic crashes in Seoul*. Accident Analysis & Prevention, 2016. **91**: p. 190-199.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش امکان اولویت‌بندی مداخلات ایمنی را فراهم می‌کند. به‌جای اجرای اقدامات گسترده و پرهزینه در سطح کل شهر، می‌توان منابع را به‌صورت هدفمند در نواحی دارای بیشترین ریسک (مانند تقاطع‌های پرتراکم، مراکز فعالیت شهری و محورهای اصلی) متمرکز نمود. این رویکرد نه تنها موجب افزایش کارایی مداخلات می‌شود، بلکه می‌تواند در کاهش هزینه‌های مدیریت ایمنی نیز مؤثر باشد.

از نظر نوآوری، این پژوهش با ترکیب تحلیل‌های آماری فضایی و متغیرهای کارکردی شهری، گامی در جهت حرکت از تحلیل‌های صرفاً توصیفی به سمت تحلیل‌های تبیینی در حوزه ایمنی ترافیک برداشته است. این رویکرد امکان درک عمیق‌تر از سازوکارهای شکل‌گیری تصادفات را فراهم کرده و زمینه را برای توسعه سیاست‌های مبتنی بر شواهد (evidence-based policies) فراهم می‌سازد.

در مجموع، نتایج این پژوهش ضمن تأیید وجود الگوی خوشه‌ای در توزیع تصادفات درون‌شهری زنجان، بر نقش کلیدی عوامل فضایی و ساختاری شهر در شکل‌گیری این الگو تأکید دارد. اگرچه برخی محدودیت‌های روش‌شناختی و تفسیری در ارائه نتایج مشاهده می‌شود، اما چارچوب تحلیلی پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای مطالعات تکمیلی و توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر در حوزه ایمنی ترافیک شهری فراهم آورد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ایمنی ترافیک شهری یک پدیده چندبعدی است که تحت تأثیر تعامل پیچیده میان ساختار فضایی شهر، الگوهای کاربری زمین و جریان‌های ترافیکی شکل می‌گیرد. بنابراین، هرگونه مداخله مؤثر در این حوزه مستلزم اتخاذ رویکردی یکپارچه و میان‌رشته‌ای است که بتواند این عوامل را به‌صورت همزمان در نظر گیرد.

۶- مراجع

۱. Yassin, S. and Pooja, *Road accident prediction and model interpretation using a hybrid K-means and random forest algorithm approach*. SN Applied Sciences, 2020. **2**: p. 1-13.
۲. WHO, *Road traffic injuries*. 2023, World Health Organization.
۳. Rahmati, M., et al., *Investigation of Spatio-Temporal Patterns of Suburban Traffic Accidents in Isfahan Province in GIS Environment (in persian)*. Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research, 2024. **2**(1): p. 79-96.

- ۲۴ Şenol, H.İ., *The effect of traffic patterns and COVID-19 on accident hotspots in Turkey*. Journal of Spatial Science, 2025: p. 1-19.
- ۲۵ Rodionova, M., et al., *Spatial Analysis of Road Crashes and Economic Development of Territory: The Case of the Russian Federation*. International Journal of Technology, 2025. **16**(4): p. 1167-1178.
- ۲۶ Szeliga, R.A., et al., *Traffic accident studies: an analysis of spatio-temporal clusters in the city of Curitiba*. Urban, Planning and Transport Research, 2026. **14**(1): p. 2606557.
- ۲۷ Rahmati, M., et al., *Mapping clusters of road traffic accident fatalities and injuries: A spatiotemporal study in Isfahan Province, Iran*. Traffic Injury Prevention, 2026: p. 1-10.
- ۲۸ Yalcin, M.A., et al., *A GIS-Based Approach to Analyzing Traffic Accidents and Their Spatial and Temporal Distribution: A Case Study of the Antalya City Center*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2026. **15**(1): p. 19.
- ۲۹ Etehad, H., et al., *Impact of road traffic accidents on the elderly*. Archives of gerontology and geriatrics, 2015. **61**(3): p. 489-493.
- ۳۰ Rahimi, E., et al., *Investigating the injury severity of single-vehicle truck crashes in a developing country*. Accident Analysis & Prevention, 2020. **137**: p. 105444.
- ۳۱ Ghasedi, M., M. Sarfjoo, and I. Bargegol, *Prediction and analysis of the severity and number of suburban accidents using logit model ,factor analysis and machine learning: a case study in a developing country*. SN Applied Sciences, 2021. **3**(1): p. 13.
- ۳۲ Bargegol, I., et al., *Discovering the Factors Affecting the Severity of Heavy Vehicle Crashes on Rural Roads Using Logit Regression*. Ferdowsi Civil Engineering, 2022. **35**(2): p. 75-86.
- ۳۳ Effati, M. and I. Ghanbari, *Spatial Analysis of Pedestrian Crashes at Intersections Using Geospatial Information Systems (GIS)(Case Study: Rasht City)*. Road, 2024. **32**(119): p. 259-278.
- ۱۵ Mannering, F. and C. Bhat, *Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions*. Analytic methods in accident research, 2014. **1**: p. 1-22.
- ۱۶ Effati, M., et al., *Analysis of Spatial Factors Contributing on Concentration of Highway Corridors Crashes Using GIS and Data Mining*. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014. **4**(2): p. 87-102.
- ۱۷ abolfazlzadeh, M., E. abdolmanafi, and H. khaksar, *Modeling and Analyzing the Accidents Severity due to the Lack of Attention to the Front in Corona Pandemic Restrictions using Logistic Regression*. Ferdowsi Civil Engineering, 2023. **36**(2): p. 61-72.
- ۱۸ Bavar, M.S., A. Naderan, and M. Saffarzadeh, *Evaluating the Spatial Impacts of Environmental Factors on the Frequency of Urban Crashes using the Spatial Bayes Method based on Euclidean Distance and Contiguity*. Ferdowsi Civil Engineering, 2023. **36**(۲)
- ۱۹ Gedamu, W.T., U. Plank-Wiedenbeck, and B.T. Wodajo, *A spatial autocorrelation analysis of road traffic crash by severity using Moran's I spatial statistics: A comparative study of Addis Ababa and Berlin cities*. Accident Analysis & Prevention, 2024. **200**: p. 107535.
- ۲۰ Mahato, R.K., et al., *Spatial distribution and cluster analysis of road traffic accidents in Nepal*. PloS one, 2025. **20**(8): p. e0331333.
- ۲۱ Mohammed, J.M., *Spatial regression analysis using Poisson regression: Applications in studying traffic accidents*. European Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2025. **3**(3): p. 268-275.
- ۲۲ Deressa, B.F., et al., *A Systematic Review of GIS-Driven Road Traffic Accident Evaluation*. Vehicles, 2025. **7**(4): p. 161.
- ۲۳ Iamtrakul, P. and S. Chayphong, *GIS-based analysis of spatio-temporal clustering of road traffic accidents in Bangkok Metropolitan Region (BMR), Thailand from 2012 to 2021*. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2025. **31**: p. 101489.

Investigation of the spatial distribution of urban accident patterns using spatial analysis methods

Navid Afkar¹, Amir Masoud Rahimi^{2,*}

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Road traffic accidents represent a major global public health challenge, resulting in substantial human and economic losses each year. However, these incidents exhibit discernible patterns and are, to some extent, predictable. Examining them from a spatial perspective can therefore contribute to a better understanding of the underlying factors and support risk reduction strategies. Recent studies have shown that traffic accidents often display significant spatial autocorrelation, necessitating the use of appropriate statistical methods to quantify and analyze such dependencies. Accordingly, the aim of this study is to investigate the spatial distribution of traffic accidents in the city of Zanjan using the Moran's I spatial autocorrelation index within a GIS environment. To this end, a set of influential variables—including population density, density of major land uses, intersection density, road network density, commercial and service land uses, and trip attraction intensity—were examined to determine their relationship with accident occurrence patterns. The results indicate that all examined variables exhibit a significant and positive association with traffic accidents, with the strongest effects observed for population density, major land uses, intersection density, and trip attraction intensity. Furthermore, spatial analysis reveals that the distribution of accidents in Zanjan follows a clustered pattern, with distinct high-risk (hotspot) areas clearly identifiable. The findings of this study can serve as an effective tool for urban planners and decision-makers in developing targeted strategies to reduce traffic accidents.

Keywords: Urban accidents, Accident hotspots, Moran's I spatial autocorrelation

² Associate Professor, +989134264550, amrahimi@znu.ac.ir, (Corresponding Author)

واژه‌نامه

ردیف	واژه/اصطلاح انگلیسی	معادل فارسی درج شده یا مناسب	کاربرد در متن مقاله
۱	Moran's I	شاخص خودهمبستگی فضایی موران / آماره موران جهانی	شاخص اصلی تحلیل الگوی مکانی و سنجش خوشه‌ای یا تصادفی بودن داده‌ها
۲	GIS	سیستم/سامانه اطلاعات جغرافیایی	محیط اصلی گردآوری، تلفیق و تحلیل داده‌های مکانی تصادفات
۳	WHO	سازمان بهداشت جهانی	منبع آمار جهانی مربوط به مرگ‌ومیر و آسیب‌های ناشی از تصادفات
۴	RTA	تصادفات ترافیکی جاده‌ای	اصطلاح اختصاری برای Road Traffic Accidents
۵	OpenStreetMap	پایگاه داده مکانی متن باز و مشارکتی	منبع داده برای شبکه معابر، تقاطع‌ها و عوارض مکانی
۶	OSM	اختصار OpenStreetMap	اشاره اختصاری به پایگاه داده OpenStreetMap
۷	Points of Interest	نقاط مهم شهری	عوارض یا مکان‌های مهم شهری مانند مراکز خدماتی و جاذب سفر
۸	ArcGIS	نرم افزار ArcGIS	نرم افزار مورد استفاده برای مکان‌یابی، پردازش و تحلیل داده‌های مکانی
۹	spatio-temporal	زمانی-مکانی	رویکرد تحلیلی پیشنهادی/محدودشده برای بررسی هم‌زمان بُعد مکان و زمان
۱۰	Local Moran's I	موران I محلی	شاخص محلی برای شناسایی خوشه‌های معنادار و نقاط پرت
۱۱	hotspots	نقاط داغ / نقاط حادثه‌خیز	نواحی با تمرکز بالای تصادف یا خطر ترافیکی
۱۲	cold spots	نقاط سرد	نواحی با تراکم پایین تر رخداد یا مقادیر مکانی کمتر
۱۳	inferential	استنباطی	ویژگی آماری روش موران برای آزمون فرضیه تصادفی بودن توزیع
۱۴	spatial weight matrix	ماتریس وزن فضایی	ماتریسی برای تعریف روابط همسایگی و وابستگی مکانی بین واحدها
۱۵	scalable	مقیاس پذیر	قابلیت استفاده شاخص در مقیاس‌های مختلف فضایی
۱۶	Kernel Density Estimation	چگالی کرنل	روش توصیفی برآورد تراکم نقاط، که در مقاله با Moran's I مقایسه شده است
۱۷	KDE	اختصار Kernel Density Estimation	اشاره اختصاری به روش چگالی کرنل
۱۸	reproducibility	قابلیت تکرارپذیری	ویژگی روش‌های آماری با وابستگی کمتر به پارامترهای ذهنی
۱۹	Z-score	آماره/نمره استاندارد Z	شاخص آزمون معناداری الگوی مکانی در کنار مقدار P
۲۰	P-value / p-value	مقدار احتمال / ارزش P	شاخص احتمال برای ارزیابی معناداری آماری نتایج
۲۱	data validity	اعتبار داده‌ها	یکی از ابعاد چارچوب اعتبارسنجی پژوهش
۲۲	statistical validity	روایی/اعتبار آماری	بعد آماری اعتبارسنجی روش پیشنهادی

ردیف	واژه/اصطلاح انگلیسی	معادل فارسی درج شده یا مناسب	کاربرد در متن مقاله
۲۳	inferential validity	اعتبار تبیینی-مفهومی	بعد استنباطی/تبیینی اعتبارسنجی روش پیشنهادی
۲۴	geocoding errors	خطاهای مکانی	خطاهای احتمالی در تعیین یا انطباق مختصات مکانی تصادفات
۲۵	inferential statistic	آزمون/آماره استنباطی	توصیف نقش Moran's I در آزمون فرضیه تصادفی بودن توزیع
۲۶	spatial convergent validity	اعتبارسنجی همگرای فضایی	مقایسه هم پوشانی الگوهای تصادف با لایه های مستقل شهری
۲۷	construct validity	روایی ساختاری	شاهد تجربی برای انسجام و اعتبار ساختاری روش
۲۸	spatial predictive models	مدل های پیش بینی فضایی	پیشنهاد برای توسعه مدل های آینده بر پایه کاربری زمین و جمعیت
۲۹	evidence-based policies	سیاست های مبتنی بر شواهد	چارچوب پیشنهادی برای تصمیم گیری و مدیریت ایمنی شهری
۳۰	Pattern	الگو	ستون جدول نتایج برای بیان خوشه ای یا تصادفی بودن الگو
۳۱	Clustered	خوشه ای	نوع الگوی فضایی شناسایی شده در نتایج