تجزیه و تحلیل خودهمبستگی مکانی تصادفات بر اساس شدت آن‌ها (مطالعه موردی: شهر قزوین)

مقاله علمی – پژوهشی

محمدرضا کمالی‌نژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
*امیرعباس رصافی (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
حمید میرزاحسین، دانشیار، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
مهدی رفعتی‌فرد، استادیار، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rasafi@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰– پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲
صفحه ۳۴-۱۹

چکیده

تصادفات به دلیل تأثیر مهمی که بر اقتصاد، سیاست و اجتماع شهری ایفا می‌کنند، به عنوان یکی از چالش‌ها و مسائل اصلی سیستم حمل‌ونقل، نتایج گسترده‌ای را در این زمینه‌ها به دنبال دارند. شناسایی و تحلیل عوامل تأثیرگذار گامی اساسی در راستای کاهش تصادفات و ارتقای ایمنی راه‌ها محسوب می‌شود. تحلیل الگوهای مکانی تصادفات به عنوان یکی از چالش‌های مهم در مدیریت شهری و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، نقش تعیین‌کننده‌ای در شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات ایمنی دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته تحلیل مکانی، الگوی توزیع مکانی تصادفات در شهر قزوین طی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های مورد استفاده شامل میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه برای سنجش تجمع یا پراکندگی نقاط، و تحلیل موران جهانی و محلی برای شناسایی خودهمبستگی مکانی و خوشه‌بندی تصادفات است. نتایج حاصل از تحلیل ANND نشان می‌دهد که تصادفات در شهر قزوین به‌صورت تصادفی توزیع نشده‌اند و تمایل قوی به تشکیل خوشه‌های مکانی دارند. شاخص موران جهانی در سال‌های مورد مطالعه مثبت و معنادار بود که نشانگر وجود خودهمبستگی مکانی و تجمع نقاط پرخطر است. همچنین، تحلیل موران محلی با ترسیم نقشه‌های خوشه‌بندی و معنی‌داری، نواحی بحرانی (HH) و ایمن (LL) را به‌صورت دقیق‌تری مشخص کرد. این پژوهش می‌کوشد درک جامعی از الگوهای مکانی تصادفات در شهر قزوین ارائه داده، و به عنوان ابزاری کاربردی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری در جهت کاهش تصادفات و بهبود ایمنی معابر به کار رود. شناسایی خوشه‌های پرخطر و بررسی تغییرات سالانه آن‌ها می‌تواند به طراحی راهکارهای هدفمند و ارزیابی اثربخشی اقدامات گذشته منجر شود.

واژه‌های کلیدی: خودهمبستگی مکانی، تحلیل مکانی تصادفات، تصادفات رانندگی، شدت تصادف

۱-مقدمه

شناسایی عوامل تأثیرگذار بر تصادفات، به عنوان بخش مهمی از چالش‌های حمل‌ونقل و ترافیک، نقشی اساسی در پیشگیری، مدیریت و نظارت بر آنان دارد. در این میان تحلیل الگوهای مکانی تصادفات درون‌شهری می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی الگوهای مکانی تصادفات و همچنین نقاط حادثه‌خیز و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به منظور بهبود ایمنی ترافیکی و پیشگیری از وقوع تصادفات عمل کند. از این رو در سال‌های اخیر، تحلیل‌های مکانی به عنوان یکی از موضوعات مهم در مطالعات ایمنی جاده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تحلیل‌ها در درک الگوهای مکانی وقوع تصادفات، شناسایی نقاط حادثه‌خیز، تحلیل خوشه‌بندی تصادفات و بررسی ارتباط میان عوامل محیطی و وقوع حوادث کاربرد دارد. با استفاده از تحلیل

مکانی، می‌توان توزیع مکانی تصادفات را با توجه به متغیرهای مختلف مشخص کرد (Ziakopoulos & Yannis, 2020). پژوهش‌ها در زمینه تجزیه‌وتحلیل تصادفات عمدتاً با استفاده از روش‌های سنتی و غیرمکانی انجام شده است. در این روش‌ها، تعداد وسیله‌های نقلیه در یک بازه زمانی مشخص به یک مسیر تخصیص داده می‌شده و معیار خطرناک بودن مسیرها براساس تعداد تصادفات آن مسیر تعیین می‌شده است. از این رو، شناسایی مکان‌ها و زمان‌های پرتکرار تصادفات مشخص نبوده است، در حالی که این امر برای برنامه‌ریزان حمل‌ونقل اهمیت دارد (Harirforoush et al., 2019; Ryder et al., 2019). پژوهش‌های مربوط به تحلیل وقوع و توزیع تصادفات به طور کلی به دنبال بررسی سه هدف اصلی هستند: شناسایی راه‌ها یا ویژگی‌های ترافیکی که باعث تصادفات بیشتری می‌شوند، شناسایی نواحی که تمرکز تصادفات بالایی دارند و شناسایی تصادفاتی که منجر به عواقب بدتری برای کاربران می‌شوند (Briz-Redón et al., 2019).

امروزه با توجه به افزایش چشمگیر تصادفات در سراسر جهان و ضرورت بررسی جنبه‌های مختلف آن، تحلیل‌های مکانی و زمانی تصادفات در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل مکانی تصادفات با استفاده از داده‌های جغرافیایی و تکنیک‌های آماری، به شناسایی الگوهای مکانی تصادفات می‌پردازد. یکی از رویکردهای نوین در تحلیل مکانی تصادفات، استفاده از خودهمبستگی مکانی است. این روش کمک می‌کند تا الگوهای توزیع تصادفات را شناسایی کرده و مناطق پرخطر و مستعد تصادف با دقت بیشتری تعیین شوند. به طور خاص، شناسایی خوشه‌های تصادفات با شدت‌های مختلف (فوتی، جرحی و خسارتی) می‌تواند درک بهتری از نقش عوامل مکانی و محیطی در وقوع تصادفات فراهم آورد و به برنامه‌ریزی بهتر برای ارتقای ایمنی راه‌ها کمک کند. بااین‌حال، مطالعاتی که به تحلیل خودهمبستگی مکانی شدت تصادفات پرداخته‌اند، همچنان محدود هستند و بیشتر آن‌ها تنها به تعداد تصادفات توجه کرده‌اند. از این رو، مسئله اصلی پژوهش حاضر این است که چگونه می‌توان با استفاده از خودهمبستگی مکانی، الگوهای شدت تصادفات را شناسایی و مقایسه کرد و درک بهتری از تأثیر عوامل محیطی و مکانی در تصادفات در مناطق مختلف به دست آورد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوهای مکانی تصادفات، می‌کوشد به شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع و شدت تصادفات در شهر قزوین بپردازد. استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل مکانی و خودهمبستگی مکانی، امکان درک جامع‌تر از توزیع مکانی تصادفات و تأثیر عوامل محیطی و مکانی در تصادفات جاده‌ای در مناطق مختلف را فراهم می‌آورد و می‌تواند راهکارهای عملی برای ارتقای ایمنی ترافیکی ارائه دهد.

۲-پیشینه تحقیق

گدامو و همکاران (۲۰۲٤) به بررسی خودهمبستگی مکانی شدت تصادفات در دو شهر آدیس‌آبابا و برلین و مقایسه الگوهای این تصادفات در کشورهای با درآمد پایین و بالا پرداخته‌اند. مطالعه آنان از داده‌های سه‌ساله تصادفات در این دو شهر استفاده کرده و روش‌های پیشرفته آماری شامل فاصله متوسط نزدیک‌ترین همسایه برای تعیین اهمیت خوشه‌بندی مکانی داده‌ها، شاخص موران جهانی برای بررسی اهمیت آماری خودهمبستگی مکانی و شاخص موران محلی برای شناسایی مکان‌های خوشه‌های با ارزش بالا–بالا و پایین–پایین استفاده کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحلیل فاصله متوسط نزدیک‌ترین همسایه خوشه‌بندی قابل توجه شدت تصادفات در هر دو شهر را نشان داد، به‌جز تصادفات کشنده در برلین. نتایج موران جهانی، ارزش قوی و معنادار آماری برای آدیس‌آبابا را نشان داد، در حالی که این مقدار برای برلین کمتر بود. نتایج موران محلی نشان داد که در آدیس‌آبابا، نواحی مرکزی و مسکونی شهر دارای ارزش‌های پایین–پایین بودند، در حالی که حاشیه شهر ارزش‌های بالا–بالا را نشان می‌داد. در برلین، خوشه‌های بالا–بالا و پایین–پایین در حاشیه شهر به‌صورت متداخل دیده شدند. این تفاوت‌ها به عوامل اجتماعی–اقتصادی، رفتار کاربران جاده‌ای و عوامل مربوط به زیرساخت جاده‌ای نسبت داده شده است. بااین‌حال، شباهت وجود مکان‌های بالا–بالا قابل توجه در حاشیه هر دو شهر برجسته بود. نتایج این مطالعه با پژوهش‌های پیشین سازگار است و بر لزوم بررسی‌های بیشتر در مکان‌های دیگر تأکید دارد. این پژوهش، رویکردهای نوآورانه‌ای را برای تحلیل الگوهای شدت تصادفات ارائه کرده و راهکارهایی برای بهبود ایمنی جاده‌ای در کشورهای با شرایط مختلف پیشنهاد می‌دهد (Gedamu et al., 2024).

ها و تی پونگ تائو (۲۰۲٤) از ترکیب تصاویر سنجش‌ازدور و روش‌های آماری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی نقاط بحرانی تصادفات جاده‌ای بهره گرفته است. هدف

اصلی این پژوهش شناسایی و رتبه‌بندی نقاط بحرانی تصادفات جاده‌ای در استان تان‌هوای ویتنام بوده است. داده‌های تصادفات جاده‌ای طی چهار سال از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ تحلیل شده‌اند. در این مطالعه، روش‌های تحلیل مکانی از جمله شاخص شدت و تحلیل آماری گتیس–ارد جی همراه با درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که با استفاده از تحلیل خودهمبستگی مکانی، ٦٤ نقطه بحرانی شناسایی شدند که ۳۲ نقطه از آن‌ها به‌عنوان مکان‌های حادثه‌خیز و خطرناک مشخص شدند. این پژوهش از تحلیل‌های آماری مکانی گتیس–ارد جی برای شناسایی مکان‌های نقاط بحرانی استفاده کرده و اهمیت آماری این نقاط را ارزیابی کرده است. نتایج مطالعه نشان‌دهنده اثربخشی این تکنیک‌ها در شناسایی نقاط بحرانی و پیش‌بینی تصادفات جاده‌ای در استان تان‌هوا است. این پژوهش ابزارهای مفیدی برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و ارتقای ایمنی جاده‌ای ارائه کرده است (Ha & Thi Phuong Thao, 2024).

ماهاتو و همکاران (۲۰۲٤) به بررسی توزیع مکانی و شدت تصادفات جاده‌ای در نپال پرداخته‌اند. این موضوع به‌عنوان یک معضل مهم بهداشت عمومی جهانی شناخته می‌شود که منجر به آسیب‌ها، مرگ‌ومیرها و خسارت‌های اقتصادی چشمگیری می‌شود. در نپال نیز تصادفات جاده‌ای یک نگرانی جدی است که تفاوت‌های قابل‌توجهی در میزان وقوع و شدت آن در مناطق مختلف وجود دارد. این مطالعه به تحلیل توزیع مکانی و انواع آسیب‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای در سال‌های مالی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ پرداخته و بر تأثیر نوع جاده‌ها و عوامل جغرافیایی تمرکز کرده است. در این پژوهش شامل استفاده از داده‌های ۷۷ منطقه نپال با شرایط جغرافیایی و اقلیمی متنوع است. داده‌های مربوط به تصادفات جاده‌ای، شامل آسیب‌های مرگ‌بار و غیرمرگ‌بار، از دفتر پلیس ترافیک کاتماندو جمع‌آوری شده است. تحلیل‌های مکانی با استفاده از نرم‌افزارهای QGIS و GeoDa انجام شده و برای شناسایی خودهمبستگی مکانی شدت تصادفات از شاخص موران استفاده شده است. همچنین تحلیل‌های تک‌متغیره و دومتغیره برای بررسی عوامل خطر مرتبط با تصادفات جاده‌ای انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نرخ کلی مرگ‌ومیر از ۷٫۷۰ به ۹٫۸۹ در هر ۱۰۰٬۰۰۰ نفر بین سال‌های مالی ۲۰۱۹–۲۰۲۰ و ۲۰۲۱–۲۰۲۲ افزایش یافته است. بااین‌حال، خوشه‌بندی مکانی تصادفات در طول سال‌ها کاهش یافته است.

در سال مالی ۲۰۱۹–۲۰۲۰ خوشه‌بندی متوسطی مشاهده شد (Moran's I=۰٫۲۷٦، p-value=۰٫۰۰۱) که در سال‌های بعدی کاهش یافته و تا سال ۲۰۲۱–۲۰۲۲ به توزیعی تقریباً تصادفی رسیده است (Moran's I=-۰٫۰۱۵، p-value=۰٫٤٥۷). تحلیل شدت تصادفات نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه بین مناطق است، به‌طوری‌که نرخ مرگ‌ومیر در مناطق دورافتاده مانند موستانگ و موگو بالا و در مناطقی مانند مانانگ پایین است. همچنین تحلیل شبکه جاده‌ای نشان داد که نوع جاده‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر شدت تصادفات دارد. جاده‌های آسفالتی همبستگی منفی با نرخ تصادفات داشتند، در حالی که جاده‌های خاکی با نرخ بالاتری از تصادفات همراه بودند. خوشه‌های داغ و سرد برای هر نوع جاده شناسایی شد که مناطقی با شدت بالاتر یا پایین‌تر تصادفات را نشان می‌دهد (Mahato et al., 2024).

ژنگ و همکاران (۲۰۲٤) به منظور شناسایی نقاط خطرناک تصادفات، از داده‌های ۱۰۵۹ تصادف معتبر در شهر لندن استفاده کردند. ابتدا تحلیل نزدیک‌ترین همسایه برای بررسی همبستگی مکانی نقاط تصادف انجام شد. سپس، پهنای باند بهینه برآورد چگالی کرنل با استفاده از روش استخراج خودکار ArcGIS، تحلیل خوشه‌های مکانی چندگانه و تحلیل خودهمبستگی مکانی افزایشی مشخص شد. برای ارزیابی دقت نتایج برآورد چگالی کرنل در پهنای باندهای مختلف، از شاخص دقت پیش‌بینی استفاده شد. نتایج نشان داد که نقاط تصادف به صورت خوشه‌ای و تجمعی در مکان‌های خاصی از شهر توزیع شده‌اند. پهنای باند بهینه برآورد چگالی کرنل به‌دست‌آمده از طریق تحلیل ISA برابر با ۱۳٤ متر بود و شاخص PAI برابر با ٤٫۳۸۱ بود که نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی بهتر و توزیع متعادل‌تر نقاط خطر است. این پهنای باند امکان شناسایی موفقیت‌آمیز بیشتر مناطق با خطر بالا و نقاط خطر تصادف بالقوه را فراهم کرد که به عوامل محیطی ترافیکی مربوط بودند. این روش نشان‌دهنده قابلیت اطمینان، دقت و استحکام در مقیاس‌های زمانی متوسط تا بلندمدت است و می‌تواند به‌عنوان یک الگوی تحلیلی برای کمک به برنامه‌ریزان در بهبود دقت شناسایی نقاط خطر مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش همچنین به کاهش وقوع تصادفات، ارتقای ایمنی حمل‌ونقل پایدار و ارائه بینش‌های ارزشمند برای مدیریت ایمنی ترافیک هوشمند و پیشگیری از تصادفات در مناطق شهری کمک

می‌کند (Zheng et al., 2024). علم و تبسم (۲۰۲۳) با هدف کاهش تصادفات جاده‌ای و اثرات اجتماعی و اقتصادی آن‌ها، بر شناسایی مناطق خطرناک جاده‌ای و بررسی ارتباط مکان تصادفات با جغرافیا و عوامل پیرامونی متمرکز شده‌اند. در این پژوهش با استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل مکانی نقاط حادثه‌خیز در ایالت اوهایو، داده‌های تصادفات جاده‌ای طی چهار سال (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) جمع‌آوری و با استفاده از تحلیل‌های همبستگی مکانی و ابزارهای آماری مانند شاخص موران و گتیس–ارد جی تحلیل شدند. هدف این پژوهش، یافتن مکان‌هایی با احتمال بالای وقوع تصادفات و رتبه‌بندی مناطق حادثه‌خیز بر اساس سطح شدت تصادفات بوده است. نتایج پژوهش نشان داد که روش‌های به‌کاررفته، از جمله تحلیل همبستگی مکانی و ابزار گتیس–ارد جی، در شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز مؤثر بوده‌اند. نقاط شناسایی‌شده شامل مناطقی با شدت بالای تصادفات در شهرهای بزرگ ایالت اوهایو، از جمله کلیولند، سینسیناتی، تولیدو و کلمبوس بودند. بر این اساس توصیه شده است که به کاهش اثرات منفی اجتماعی و اقتصادی تصادفات در این مناطق اولویت دهند و پژوهش‌های جامع‌تری انجام دهند. این مطالعه از طریق ترکیب تحلیل شدت تصادفات با بررسی نقاط حادثه‌خیز در GIS، کمک شایانی به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در حوزه ایمنی جاده‌ای کرده است و می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود ایمنی در جاده‌ها ارائه دهد (Alam & Tabassum, 2023).

هدف پژوهش مونسینگ (۲۰۲۳) تحلیل تصادفات جاده‌ای شهری در سریلانکا با استفاده از GIS در شبکه‌های پیچیده شهری بود. این پژوهش از یک رویکرد دومرحله‌ای استفاده کرد. مرحله اول، تحلیل نقاط داغ بر اساس زمان‌ها و انواع تصادفات (کشنده، غیرجدی و فقط خسارت) بود که از روش‌های برآورد چگالی کرنل و سلسله‌مراتب نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. همچنین، نقشه‌های شدت تصادفات جداگانه‌ای ایجاد شد و نتایج به‌صورت بصری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش برآورد چگالی کرنل نمای کلی کاملی از تصادفات را فراهم می‌کند، در حالی که سلسله‌مراتب نزدیک‌ترین همسایه مناطقی با تصادفات زیاد را مشخص می‌کند. روش برآورد چگالی کرنل برای کاهش ترافیک بلندمدت و بهبود ایمنی پیش‌بینی شده بود، در حالی که نقشه شدت سلسله‌مراتب نزدیک‌ترین همسایه برای متخصصان ایمنی جاده‌ای بینش فوری فراهم می‌کرد. رویکرد ریاضی شامل محاسبه شاخص دقت پیش‌بینی برای هر روش بود که نشان داد سلسله‌مراتب نزدیک‌ترین همسایه ارزش بالاتری دارد و بنابراین گزینه بهتری برای تحلیل ایمنی جاده‌ها است. نتیجه‌گیری این مطالعه پیشنهاد می‌کند که روش سلسله‌مراتب نزدیک‌ترین همسایه برای تحلیل ایمنی جاده‌ها مناسب‌تر است و می‌تواند راهنمایی‌های مهمی برای برنامه‌ریزی شهری و اقدامات پیشگیری از تصادفات فراهم کند (Munasinghe, 2023).

هزایمه و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی الگوی مکانی–زمانی تصادفات با استفاده از داده‌های پنج‌ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹) برای استان اربد در اردن پرداخته‌اند.

الگوی مکانی نقاط داغ تصادفات و تحولات زمانی آن‌ها در طول شبکه‌های جاده‌ای داخلی و شریانی منطقه مورد مطالعه با استفاده از خودهمبستگی مکانی (شاخص موران جهانی) و تحلیل نقاط داغ محلی (روش گتیس–ارد جی) در محیط GIS شناسایی شده است. نتایج نشان داد که تعداد تصادفات گزارش‌شده به طور تدریجی سال‌به‌سال تقریباً ۳۸٪ افزایش یافته است. تحلیل تصادفات در سطح شدت نشان داد که توزیع مکانی نقاط داغ تصادفات به طور چشمگیری مشخص است. تصادفات با شدت کمتر (۹۵٪) در شبکه جاده‌ای داخلی در شهرهای استان اربد که بالاترین حجم ترافیک را دارند، رخ داده است. تحلیل خودهمبستگی مکانی و آمار گتیس–ارد جی با سطح معناداری ۹۹٪ الگوهای خوشه‌ای از تصادفات را در طول بخش‌های شبکه جاده‌ای داخلی و شریانی نشان داد. بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹، تکامل قابل‌توجهی در خوشه‌های نقاط داغ تصادفات مشاهده شد (Hazaymeh et al., 2022).

چولاک و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل نقاط داغ بر اساس وزن‌های مکانی شبکه پرداختند. این پژوهش به مشکلات فزاینده ترافیکی ناشی از افزایش تعداد خودروها، و به‌ویژه به تصادفات رانندگی در سطح جهانی پرداخته که یک نگرانی بزرگ در زمینه بهداشت عمومی محسوب می‌شود. این مطالعه افزایش تصادفات رانندگی در جاده‌ای مهم که دو استان مرزی ترکیه را به هم متصل می‌کند، به افزایش امکانات حمل‌ونقل ارتباط می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش شناسایی مناطقی در استان ریزه است که تصادفات رانندگی، به‌ویژه فوتی یا جرحی، در آن‌ها متمرکز شده‌اند. این شناسایی به توسعه راهبردهای پیشگیری از تصادفات کمک می‌کند. این مطالعه از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های آمار مکانی برای تجزیه‌وتحلیل توزیع مکانی

تصادفات رانندگی در امتداد ٤٥ کیلومتر از مسیرهای اصلی ریزه، با استفاده از داده‌های تصادف جمع‌آوری شده در طی پنج سال، استفاده می‌کند. ویژگی برجسته این پژوهش، استفاده نوآورانه از تحلیل نقاط داغ بر اساس وزن‌های مکانی شبکه است. این روش با روش‌های متداول تفاوت دارد؛ زیرا ویژگی‌های مکانی شبکه جاده‌ها را در نظر می‌گیرد. این مطالعه از آمار گتیس-ارد جی برای تحلیل نقاط داغ استفاده کرده است، که در آن یک مجموعه داده شبکه ایجاد شده و وزن‌های مکانی داده‌های جاده‌ای برای تولید وزن‌های مکانی لازم برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، روش برآورد چگالی کرنل برای شناسایی "نقاط داغ" تصادفات رانندگی به کار گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این دو روش سپس به صورت بصری مقایسه می‌شوند و اطلاعاتی در مورد مناطق پرخطر تصادف فراهم می‌کنند. این مطالعه رویکردی نوآورانه در تحلیل ایمنی ترافیکی مبتنی بر GIS ارائه می‌دهد و به راهبردهای مؤثرتر پیشگیری از تصادفات در شبکه‌های جاده‌ای شهری و روستایی کمک می‌کند (Colak et al., 2018).

۲-۱-داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های تصادفات شهر قزوین در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹٤ تا ۱۳۹٦ استفاده شده است. داده‌ها شامل اطلاعاتی نظیر، شناسه، مختصات جغرافیایی تصادفات (در قالب x و y)، موقعیت و محل تصادف، نوع شدت تصادف (اعم از فوتی، جرحی و خسارتی)، دلیل تصادف (عدم رعایت حق تقدم، عدم توجه به جلو، عدم توانایی در کنترل وسیله، دور زدن در محل ممنوع و ...)، سال، جهت برخوردها، محدوده سرعت و اطلاعاتی در مورد روشنی هوا (روز و شب). شکل ۱ توزیع مکانی تصادفات را در طول شبکه خیابانی قزوین نشان می‌دهد.

شکل ۱. توزیع مکانی تصادفات شهر قزوین

همچنین در جدول ۱ تعداد و درصد تصادفات را بر اساس شدت و سال خلاصه شده است. بر این اساس، میانگین سه‌ساله تعداد تصادفات فوتی ۷,۱۰ درصد، تصادفات جرحی ٦۲ درصد که بیشترین درصد آمار را به خود اختصاص داده است و در آخر هم ۳۰,۹ درصد تصادفات هم مربوط به تصادفات خسارتی است.

جدول ۱. تفکیک تصادفات براساس سال و شدت آن

ردیف	سال	تصادفات فوتی		تصادفات جرحی		تصادفات خسارتی		مجموع در کل
		تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد
۱	۹٤	۱۲	٪٤,٥۰	۱۹٦	٪۷۳,۷۰	٥۸	٪۲۱,۸۰	۲٦٦
۲	۹٥	۱۹	٪۱۲,٥۰	۸۳	٪٥٤,٦۰	٥۰	٪۳۲,۹۰	۱٥۲
۳	۹٦	۸	٪٦,۲۰	٦۰	٪٤٦,٥۰	٦۱	٪٤۷,۳۰	۱۲۹
مجموع		۳۹	٪۷,۱۰	۳۳۹	٪٦۲	۱٦۹	٪۳۰,۹۰	٥٤۷

۳-روش‌شناسی

شکل ۲ به صورت شماتیک، مراحل پژوهش و ترتیب اجرای آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود این پژوهش با جمع‌آوری داده‌های خام تصادفات، شامل اطلاعات مکانی و توصیفی مانند مختصات جغرافیایی و شدت تصادفات، آغاز شده، سپس داده‌ها با حذف موارد پرت و ناقص، تصحیح مختصات، و استانداردسازی متغیرها پردازش شدند. در مرحله بعد، ساختارهای شش‌ضلعی مکانی ایجاد و با داده‌های تصادفات ترکیب شدند تا تحلیل‌های مکانی انجام شود. با استفاده از تحلیل میانگین نزدیک‌ترین همسایه و شاخص موران (جهانی و محلی)، الگوی توزیع تصادفات (تصادفی، خوشه‌ای یا پراکنده) بررسی و نقاط داغ و سرد شناسایی شدند. در نهایت، نتایج تفسیر و پیامدهای کاربردی آن‌ها ارائه شد، که می‌تواند به برنامه‌ریزی برای کاهش تصادفات کمک کند.

در این پژوهش، از سه روش آمار مکانی برای بررسی خوشه‌بندی و خودهمبستگی مکانی تصادفات بر اساس شدت آن‌ها استفاده شد. ابتدا، تحلیل خوشه‌بندی مکانی با استفاده از روش میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه[۳] انجام شد تا اهمیت آماری خوشه‌بندی مکانی داده‌های تصادفات بر اساس شدت آن‌ها بررسی شود. سپس، از موران جهانی[۴] برای بررسی اهمیت آماری خودهمبستگی مکانی تصادفات بر اساس شدت استفاده شد. در نهایت، از موران محلی[۵] برای شناسایی مکان‌هایی با خوشه‌های مختلف شدت تصادف استفاده شد. برای پردازش داده‌های تصادفات (ترسیم، پاک‌سازی و افزودن ویژگی‌های جدید) و انجام عملیات مکانی (ایجاد شبکه شش‌ضلعی، ادغام داده‌ها و تحلیل‌ها) از نرم‌افزار R استفاده شد.

۳-۱-روش میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه

در این پژوهش از این روش استفاده شده و فرمول محاسبه آن طبق میچل (۲۰۲۱) (Mitchell, 2021) به شکل رابطه‌ی ۱ بیان شده است.

$$ANND = \frac{D_o}{D_e} \quad (۱)$$

که در این رابطه:

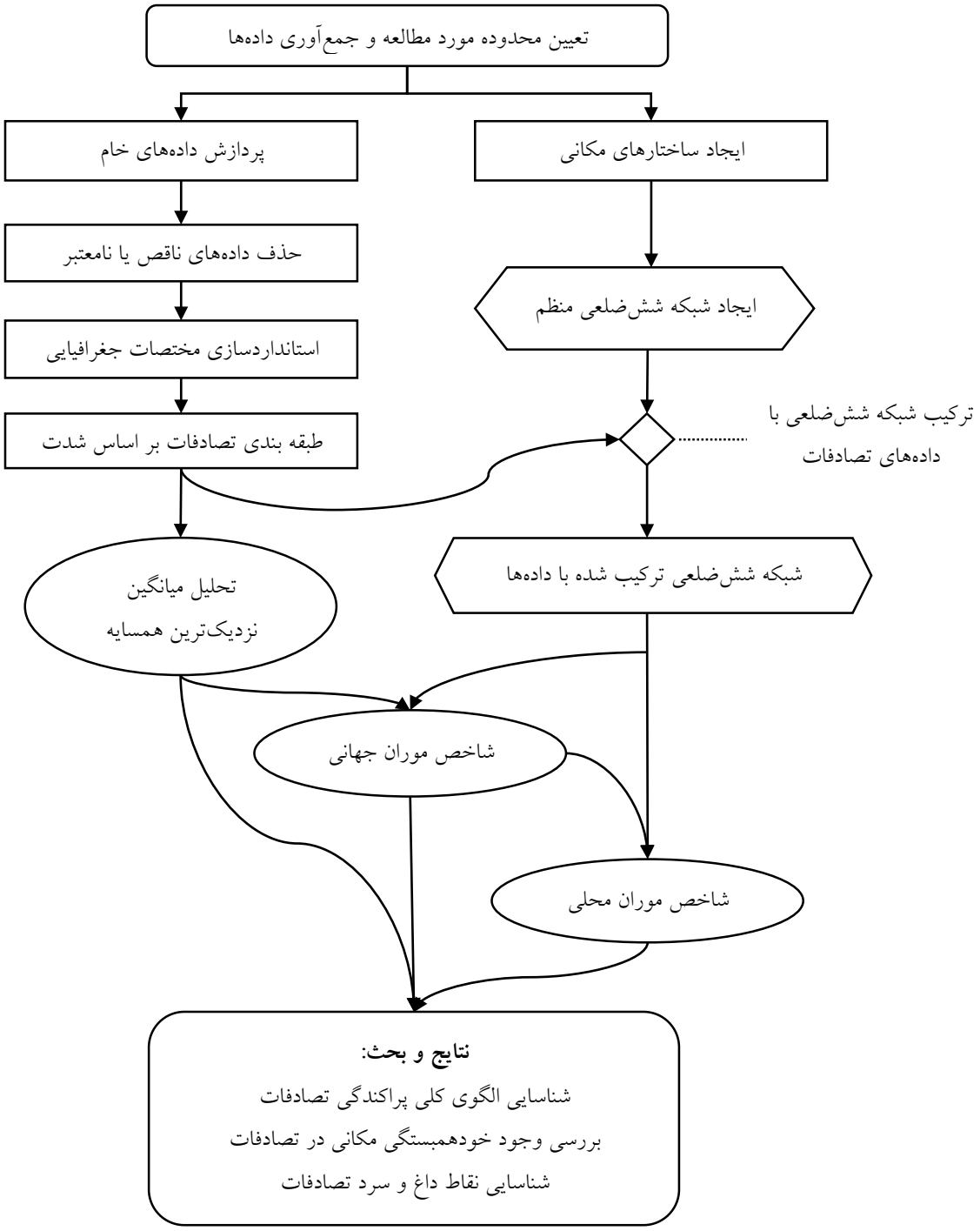
- Do: میانگین فاصله مشاهده‌شده بین ویژگی‌ها است؛ که توسط رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$D_o = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n} \quad (۲)$$

که در آن:

- Di: فاصله بین ویژگی iام و نزدیک‌ترین همسایه آن،
- N: تعداد کل ویژگی‌ها، و
- De: میانگین فاصله موردانتظار برای توزیع تصادفی فرضی است که توسط رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$D_e = 0.5\sqrt{\frac{n}{A}} \quad (۳)$$



شکل ۲. نمودار جریان کار پژوهش

که در آن:

A: مساحت کوچک‌ترین مستطیل محاطی شامل تمامی ویژگی‌ها (یا مقدار مساحت مشخص‌شده توسط کاربر) است.

برای تحلیل آماری ANND، Z-score از رابطه‌ی ٤ محاسبه می‌شود.

$$Z - score = \frac{(D_o - D_e)}{SE} \quad (٤)$$

که در آن:

SE: خطای استاندارد است که توسط رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود.

$$SE = \frac{0.26136}{\sqrt{\frac{n^2}{A}}} \quad (۵)$$

شاخص نسبت ANND به صورت مستقیم نشان‌دهنده الگوی مکانی است. اگر مقدار این شاخص کمتر از یک باشد، نشان‌دهنده خوشه‌بندی در الگو است و اگر بیشتر از یک باشد، پراکندگی در الگو را نشان می‌دهد. همچنین معناداری آماری شاخص بر اساس مقادیر Z-score و P-value سنجیده می‌شود. برای انجام تحلیل ANND، از نرم‌افزار R استفاده شده است. این تحلیل برای تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی انجام شد تا الگوی مکانی و سطح خوشه‌بندی تصادفات بر اساس شدت آن‌ها بررسی شود.

۳-۲-شاخص موران جهانی[۶]

آنسلین بیان کرده است که شاخص موران جهانی پرکاربردترین شاخص برای تحلیل خودهمبستگی مکانی در مقیاس کلان است. این شاخص یک مقدار منفرد است که از آماره‌های ضرب متقابل بین یک متغیر و تأثیر مکانی (وزن‌دهی) به دست می‌آید که متغیرها به صورت انحراف از میانگین محاسبه می‌شوند (Anselin, 1996).

رابطه‌ی محاسبه موران در معادله‌ی ٦ آورده شده است.

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \times \frac{\sum\sum(X_i - \overline{X})(X_j - \overline{X})}{\sum_i (X_i - \overline{X})^2} \quad (٦)$$

در این رابطه:

- X_i و X_j مقادیر متغیر برای نقاط i و j هستند.
- X: میانگین کل متغیرها.
- W_{ij}: وزن مکانی یا رابطه بین نقاط i و j
- N: تعداد کل مشاهدات.
- $\sum_i \sum_j W_{ij}$: مجموع کل وزن‌ها.

دامنه مقادیر شاخص موران جهانی بین ۱- تا ۱ است. مقدار مثبت این شاخص بیانگر خوشه‌بندی مقادیر مشابه در فضا است، در حالی که مقدار منفی نشان‌دهنده پراکندگی مقادیر متفاوت در نزدیکی هم می‌باشد. اگر مقدار شاخص به صفر نزدیک باشد، الگوی مکانی تصادفی تلقی می‌شود. اهمیت آماری شاخص موران نیز با استفاده از روش Z-Score محاسبه می‌شود که در آن فرض می‌شود توزیع تصادفی با میانگین صفر و واریانس یک است. Z-Score مثبت نشان‌دهنده آن است که همسایگی ویژگی‌ها مقادیر مشابه دارند، در حالی که Z-Score منفی بیانگر این است که ویژگی‌ها در میان مقادیر غیرمشابه قرار گرفته‌اند.

اختصاص وزن عددی برای نشان‌دادن مقادیر بالا یا پایین بر اساس شدت تصادف، پیش از انجام تحلیل‌های مکانی، امری حیاتی است. محققان از وزن‌های مختلفی برای انعکاس شدت تصادف استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، هزینه واحد فشرده (Lee & Khattak, 2019)، وزن متوسط هزینه تصادف (Le & Lin, 2022)، وزن خسارت معادل اموال تنها (Atumo et al., 2022)، و وزن‌های تصادفی ۵، ۳ و ۱ استفاده شده‌اند (Elvik, 2008). بااین‌حال، در این مطالعه، وزن‌های ۵۰، ۳۰ و ۱۰ به ترتیب برای تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تحلیل موران به مقادیر وزن‌ها حساس نیست، به جز تفاوت در مقدار آن‌ها. به عبارت دیگر، استفاده از وزن‌های ۵، ۳ و ۱ نتیجه‌ای مشابه با وزن‌های ۵۰، ۳۰ و ۱۰ برای سطوح شدت تصادفات به دست می‌دهد.

پیاده‌سازی یک روش مفهومی مناسب یا ماتریس وزن مکانی برای تعیین روابط مکانی امری ضروری است. چندین روش مفهومی در دسترس است، از جمله روش‌های مبتنی بر فاصله، روش‌های مبتنی بر مجاورت (وزیر و رخ[۷])، روش نزدیک‌ترین k-همسایه[۸]، روش کرنل. در پژوهش‌های ایمنی جاده‌ای، برخی مطالعات از روش‌های مفهومی مبتنی بر فاصله ثابت استفاده کرده‌اند (Lee & Khattak, 2019; Moons et al., 2009).

در حالی که برخی دیگر از روش‌های مبتنی بر مجاورت استفاده کرده‌اند (Al Hamami & Matisziw, 2021; Matkan et al., 2013). ماتریس وزن مبتنی بر فاصله به انتخاب فاصله حساس است و در مورد داده‌های تصادف خوشه‌ای، منجر به تعداد زیادی همسایه می‌شود.

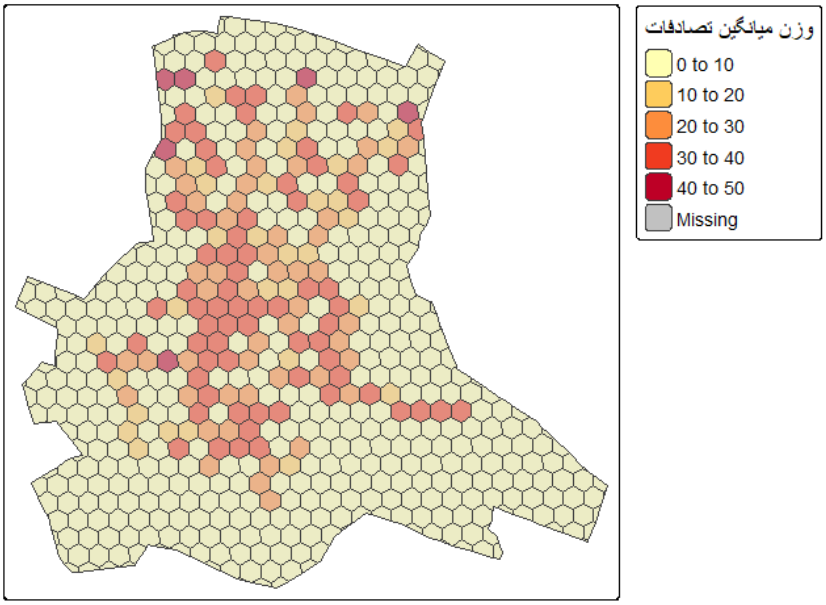
بر این اساس، برای جلوگیری از مشکل تعداد زیاد همسایه‌ها در تحلیل داده‌های تصادف خوشه‌ای، داده‌های نقطه‌ای تصادف به داده‌های چندضلعی تبدیل شدند. سپس، از روش مفهومی مبتنی بر مجاورت "وزیر" استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار R، یک شبکه شش‌ضلعی با طول ضلع ٤٠٠ متر ایجاد شده است. سپس، داده‌های نقطه‌ای تصادفات به شبکه شش‌ضلعی ادغام شده است، به گونه‌ای که هر شش‌ضلعی حاوی تعداد تصادفات واقع شده در آن و همچنین وزن تجمعی داده‌ها بر اساس شدت تصادف است. برای جلوگیری از اثر تورم داده ها به دلیل تمرکز تصادفاتی با شدت کم در یک ناحیه، میانگین وزن هر شش‌ضلعی از طریق معادله (۷) محاسبه شده است.

$$AverageWeight_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}}{n} \quad (۷)$$

که در آن:

- ω_{ij} : وزن تصادف j در شبکه i
- n: تعداد کل تصادفات در شبکه.

روش میانگین وزن از سوءتفسیرهای احتمالی جلوگیری می‌کند و اطمینان می‌دهد که خانه‌ای با تعداد زیادی تصادف جرحی به عنوان مکانی با اهمیت بالا (مانند خانه‌ای با تصادفات فوتی) اشتباه گرفته نشود. پس از محاسبه‌ی وزن متوسط برای هر خانه، لایه‌ی شبکه‌بندی حاصل برای انجام تحلیل‌های مکانی آماده شد. در R، از بسته‌های مکانی مانند spdep و rgeoda برای انجام تحلیل‌های موران به‌صورت جهانی و محلی استفاده شد. نتیجه نهایی در شکل ۳ آمده که نقشه میانگین وزنی تصادفات و شبکه بندی تصادفات است.



شکل ۳. شبکه‌بندی داده‌های تصادفات

۳-۳-شاخص موران محلی

شاخص موران محلی یکی از ابزارهای مهم در تحلیل همبستگی مکانی است که به شناسایی نقاط داغ[۹] و نقاط سرد[۱۰] کمک می‌کند. این شاخص به بررسی تغییرات محلی در سراسر منطقه مطالعه پرداخته و می‌تواند رفتارهای مکانی مشابه و متضاد را تمایز دهد. از جمله آمارهای متداول برای همبستگی مکانی محلی، شاخص موران محلی است که توسط آنسلین (Anselin, 1996) معرفی شد و معمولاً به دلیل توانایی تفکیک دقیق‌تر ویژگی‌های مکانی ترجیح داده می‌شود. فرمول این شاخص به شرح زیر است.

$$I_i = c^* Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \quad (۸)$$

که در آن:

- Z_i و Z_j انحراف از میانگین برای متغیرهای i و j
- W_{ij}: وزن‌های مکانی بین مشاهدات i و j
- c^*: معکوس $\sum_i Z_i^2$

برخلاف شاخص جهانی موران که به تحلیل همبستگی مکانی در سطح کل منطقه می‌پردازد، شاخص موران محلی بینشی دقیق‌تر در سطح مشاهدات فردی ارائه می‌دهد و می‌تواند هر مشاهده را با همسایگانش مقایسه کند. این شاخص در نهایت به تفکیک مناطق مختلف به چهار دسته زیر می‌پردازد.

-بالا–بالا (H-H)[۱۱]: مشاهداتی با مقادیر بالا که توسط مشاهدات دیگری با مقادیر بالا احاطه شده‌اند که نشان‌دهنده خوشه‌های تصادفات با شدت بالا است.

-پایین–پایین (L-L)[۱۲]: مشاهداتی با مقادیر پایین که توسط مشاهدات دیگری با مقادیر پایین احاطه شده‌اند که نمایانگر خوشه‌های تصادفات با شدت پایین است.

-بالا–پایین (H-L)[۱۳]: مشاهداتی با مقادیر بالا که توسط مشاهدات با مقادیر پایین احاطه شده‌اند.

-پایین–بالا (L-H)[۱۴]: مشاهداتی با مقادیر پایین که توسط مشاهدات با مقادیر بالا احاطه شده‌اند.

این تحلیل می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر الگوهای مکانی و به درک بهتری از روابط موجود در داده‌های مکانی کمک کند.

٤-نتایج

٤-١-نتایج تحلیل میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه

جدول ۲ نتایج تحلیل ANND را برای تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی در شهر قزوین در سال‌های ۱۳۹٤ تا ۱۳۹٦ نشان می‌دهد. الگوی کلی تصادفات جرحی نشان‌دهنده قوی‌ترین تجمع فضایی در بین سه گروه مورد بررسی است. مقادیر نسبت ANND که در تمام سال‌ها کمتر از ۰,۷ است، همراه با مقادیر Z-score منفی و بسیار پایین و P-valueهای بسیار کوچک به وضوح نشان می‌دهند که تصادفات جرحی از الگوی تجمعی بسیار معناداری پیروی می‌کنند. این یافته حاکی از آن است که عوامل خاصی در مکان‌های مشخصی منجر به وقوع متمرکز این نوع تصادفات می‌شوند.

در مورد تصادفات خسارتی، اگرچه الگوی تجمعی مشاهده می‌شود، اما شدت این تجمع نسبت به تصادفات جرحی کمتر است. نسبت ANND در محدوده ۰,٦ تا ۰,۸ قرار دارد و مقادیر P-value اگرچه همچنان معنادار، اما بزرگ‌تر از مقادیر مربوط به تصادفات جرحی می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه مکان‌های خاصی مستعد وقوع تصادفات خسارتی هستند، اما این تمرکز به شدت تصادفات جرحی نیست.

تصادفات فوتی الگوی متفاوتی را نشان می‌دهند. در برخی سال‌ها مانند سال ۹٤ با نسبت ANND برابر ۰,۷۷۹۷۵ تمایل به تجمع دارند، اما این الگو از نظر آماری کاملاً معنادار نیست (P-value=۰,۱٤٤٤۰). در مقابل، در سال ۹۵ با نسبت ANND برابر ۱,۱۸۵۸٤ و Z-score مثبت (۱,۵٤۹٦۹)، الگو به سمت پراکندگی میل می‌کند. این نوسان در الگوی فضایی ممکن است نشان‌دهنده تأثیر عوامل تصادفی یا متغیرهای محیطی متفاوت در سال‌های مختلف بر وقوع این نوع تصادفات باشد. در کل، تصادفات جرحی بیشترین تمایل به خوشه‌بندی را نشان می‌دهند و این الگو از نظر آماری بسیار معنادار است. تصادفات خسارتی نیز الگوی خوشه‌ای معناداری دارند، اما این الگو در سال ۱۳۹۵ ضعیف‌تر است و تصادفات فوتی در سال‌های ۱۳۹٤ و ۱۳۹٦ تمایل به خوشه‌بندی دارند، اما این الگو از نظر آماری معنادار نیست. در سال ۱۳۹۵، الگوی پراکنده‌تری مشاهده می‌شود. هدف اصلی بررسی این موضوع بود که آیا نقاط مربوط به تصادفات به‌صورت تصادفی در فضای جغرافیایی توزیع شده‌اند یا خیر؛ نتایج تحلیل ANND نشان دادند که تصادفات به‌صورت تصادفی در فضای جغرافیایی توزیع نشده‌اند و تمایل به تشکیل خوشه‌های مکانی دارند.

جدول ۲. نتیجه تحلیل ANND

	فوتی			جرحی			خسارتی		
	۹٤	۹۵	۹٦	۹٤	۹۵	۹٦	۹٤	۹۵	۹٦
ANNDo	۰,۰۰۵۱٦	۰,۰۰۸۹۷	۰,۰۰٦۱۲	۰,۰۰۱۳۳	۰,۰۰۲۷۵	۰,۰۰۲۷۲	۰,۰۰۲۸۳	۰,۰۰۳۳٦	۰,۰۰۲۹۳
ANNDe	۰,۰۰٦٦۱	۰,۰۰۷۵٦	۰,۰۰۷٤۷	۰,۰۰۲۷٤	۰,۰۰٤۰۹	۰,۰۰٤۵۲	۰,۰۰٤٤٦	۰,۰۰٤۰٤	۰,۰۰٤۱۰
نسبت ANND	۰,۷۷۹۷۵	۱,۱۸۵۸٤	۰,۸۱۹۵۰	۰,٤۸٦٦٤	۰,٦۷۱۸۱	۰,٦۰۱٤٤	۰,٦۳۳۱۳	۰,۸۳۲٦۸	۰,۷۱۵٤۹
Z_score	−۱,٤۵۹٦۱	۱,۵٤۹٦۹	−۰,۹۷٦٦۷	−۱۳,۷٤۹۱۸	−۵,۷۲۰۰۱	−۵,۹۰٦۰٦	−۵,۳٤۵۰۵	−۲,۲٦۳٤۵	−٤,۲۵۱۰۱
P-value	۰,۱٤٤٤۰	۰,۱۲۱۲۲	۰,۳۲۸۷۳	< ۰,۰۰۱	< ۰,۰۰۱	< ۰,۰۰۱	< ۰,۰۰۱	۰,۰۲۳٦۱	< ۰,۰۰۱

٤-۲- نتیجه تحلیل موران جهانی

در این مطالعه، از تحلیل موران جهانی برای بررسی وجود خودهمبستگی مکانی آماری معنادار در شدت تصادفات استفاده شد. این تحلیل نشان می‌دهد که آیا شدت‌های مشابه تصادفات در کنار هم خوشه‌بندی شده‌اند یا به صورت پراکنده در منطقه تحلیل توزیع شده‌اند. این کار با استفاده از یک شاخص موران و آزمون آماری انجام شده است. بر این اساس، جدول ۳ نتایج تحلیل موران جهانی را بر اساس شدت تصادفات در شهر قزوین در طول سه سال خلاصه می‌کند.

جدول ۳. نتیجه تحلیل موران جهانی به تفکیک سال

سال	موران	شاخص موردانتظار[15]	Z_Score	P-value
۹٤	۰,۳۳۱	−۰,۰۰۱٦۱	۱۳,۵۵	< ۰,۰۰۱
۹۵	۰,۱۱۷	−۰,۰۰۱٦۱	٤,۸٤	< ۰,۰۰۱
۹٦	۰,۱۵٦	−۰,۰۰۱٦۱	٦,٤٤	< ۰,۰۰۱

برای سال ۹۴، شاخص موران برابر با ۰,۳۳۱ است که نشان‌دهنده‌ی وجود الگوی تجمعی قوی در داده‌های تصادفات این سال است. مقدار Z-Score برابر با ۱۳,۵۵ و P-Value بسیار کوچک (کمتر از ۰,۰۰۱) است که تأیید می‌کند این الگوی تجمعی از نظر آماری بسیار معنادار است.

برای سال ۹۵، شاخص موران برابر با ۰,۱۱۷ است که نشان‌دهنده‌ی وجود الگوی تجمعی با شدت کمتر نسبت به سال ۹۴ است. مقدار Z-Score برابر با ٤,٨٤ و P-Value کمتر از ۰,۰۰۱ است که نشان‌دهنده‌ی معناداری آماری این الگو است.

برای سال ۹۶، شاخص موران برابر با ۰,۱۵٦ است که نشان‌دهنده‌ی وجود الگوی تجمعی نسبتاً قوی در داده‌های این سال است. مقدار Z-Score برابر با ٦,٤٤ و P-Value بسیار کوچک (کمتر از ۰,۰۰۱) است که تأیید می‌کند این الگوی تجمعی از نظر آماری بسیار معنادار است.

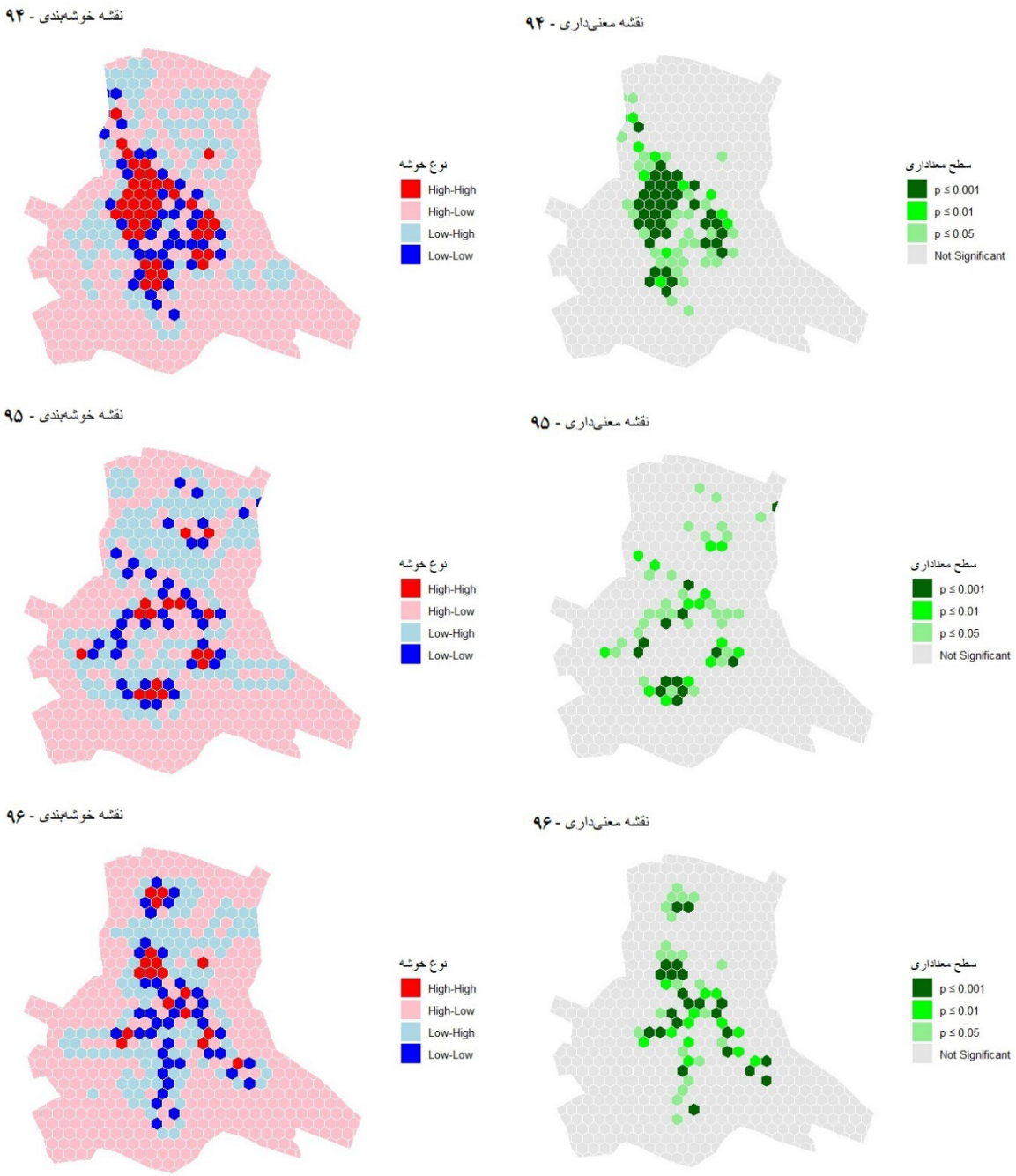
این نتایج نشان می‌دهد که در طول سه سال مورد مطالعه، شدت تصادفات در شهر قزوین تمایل به خوشه‌بندی مکانی داشته است، به‌طوری که مناطق با شدت تصادفات مشابه در کنار هم تجمع یافته‌اند. این الگو در سال ۱۳۹٤ بیشترین شدت را داشته و در سال ۱۳۹۵ کاهش یافته، اما در سال ۱۳۹٦ مجدداً تقویت شده است.

٤-۳- نتایج تحلیل موران محلی

همان‌طور که در فصل روش‌شناسی هم گفته شد، در این پژوهش، برای شناسایی الگوهای خوشه‌ای محلی شامل مناطق High-High (HH)، Low-Low (LL)، High-Low (HL)، و Low-High (LH) از موران محلی استفاده شد. برخلاف موران جهانی که تنها یک مقدار کلی برای کل منطقه ارائه می‌دهد، موران محلی میزان خودهمبستگی مکانی را در سطح هر مشاهده و مقایسه آن با همسایگانش بررسی می‌کند.

پس از انجام تحلیل از نقشه‌های خوشه‌بندی و معنی‌داری در بیان بهتر نتایج موران محلی استفاده شد (شکل ٤). علت استفاده از این نقشه‌ها این است که ترکیب نقشه‌های خوشه‌بندی و معنی‌داری به شناسایی دقیق نواحی پرخطر کمک می‌کند. مناطق HH معنادار اولویت بالایی برای اقدامات ایمنی دارند، در حالی که نقاط HL یا LH معنادار ممکن است نشان‌دهنده شرایط خاصی باشند که نیاز به بررسی دقیق‌تر دارند. این تحلیل می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های مدیریت ترافیک، بهبود زیرساخت‌های شهری، و افزایش ایمنی جاده‌ای نقش مهمی ایفا کند؛ بنابراین، استفاده از این دو نقشه در کنار یکدیگر موجب می‌شود که تحلیل موران محلی نه‌تنها از نظر شناسایی الگوهای مکانی، بلکه از لحاظ اطمینان آماری نیز قابل‌اتکا باشد.

با توجه به تحلیل نقشه‌های معناداری آماری خوشه‌ها، تمرکز خوشه‌های معنادار در مرکز شهر: در هر سه سال، خوشه‌های دارای معناداری آماری (به‌ویژه خوشه‌های با بالاترین سطح معناداری) عمدتاً در مرکز شهر قزوین متمرکز شده‌اند. این امر نشان می‌دهد که مرکز شهر قزوین به طور مداوم به عنوان یک منطقه پرخطر برای تصادفات جرحی شناخته می‌شود. در حالی که تمرکز کلی خوشه‌ها در مرکز شهر ثابت بوده است، پراکندگی جزئی خوشه‌ها در طول سه سال تغییر کرده است. این تغییرات ممکن است نشان‌دهنده تغییرات در عوامل مؤثر بر تصادفات جرحی در شهر باشد. خوشه‌هایی با اهمیت آماری بالا ($p \leq ۰,۰۰۱$) نشان می‌دهد که الگوهای خوشه‌بندی تصادفات در این مناطق به احتمال زیاد تصادفی نیستند و عوامل خاصی در این مناطق باعث افزایش تصادفات می‌شوند و دارای اهمیت آماری بالایی هستند. با توجه به تحلیل نقشه‌های خوشه‌بندی، در هر سه سال، خوشه‌های HH عمدتاً در مرکز شهر قزوین متمرکز شده‌اند. این امر نشان‌دهنده وجود مناطق پرخطر دائمی در مرکز شهر است. پراکندگی خوشه‌های HL و LL در طول سه سال تغییر کرده است. به نظر می‌رسد که تعداد خوشه‌های LL در سال ۱۳۹۵ افزایش یافته و سپس در سال ۱۳۹٦ کاهش یافته است. پراکندگی خوشه‌های HL نیز در طول سه سال متغیر بوده است. با وجود تغییرات جزئی، الگوهای مکانی کلی تصادفات در شهر قزوین در طول سه سال پایدار بوده است. تمرکز خوشه‌های HH در مرکز شهر و وجود خوشه‌های LL و HL در مناطق اطراف نشان‌دهنده وجود الگوهای مکانی قوی است.



شکل ٤. نقشه‌های خوشه‌بندی و معنی‌داری

۵-نتیجه‌گیری

تحلیل‌های انجام‌شده بر روی داده‌های مکانی تصادفات ترافیکی شهر قزوین طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۹٤ تا ۱۳۹٦، شواهد روشنی از وجود الگوهای فضایی معنادار در توزیع مکانی تصادفات با شدت‌های مختلف (فوتی، جرحی و خسارتی) ارائه داد و استفاده از شاخص آماری موران محلی و تحلیل معناداری آماری خوشه‌ها، امکان بررسی دقیق خودهمبستگی مکانی و شناسایی خوشه‌های معنادار تصادفات را فراهم آورد. بررسی تغییرات الگوهای مکانی تصادفات در طول زمان (سال‌های ۱۳۹٤ تا ۱۳۹٦) نشان داد که الگوهای خوشه‌بندی تصادفات در این سال‌ها تغییر کرده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند تغییرات در زیرساخت‌های شهری، طرح هندسی معابر، ساختارهای ترافیکی، اعمال و اجرای قوانین راهنمایی و رانندگی و غیره در این سال‌ها باشد. نتایج حاصل از تحلیل موران محلی نشان داد که الگوهای توزیع مکانی تصادفات

بر اساس شدت آن‌ها از خودهمبستگی مکانی معناداری برخوردار است. به عبارت دیگر، تصادفات با شدت‌های مشابه (فوتی، جرحی و خسارتی) تمایل به خوشه‌بندی مکانی دارند. نقشه‌های معناداری آماری خوشه‌ها، صحت و قدرت الگوهای شناسایی‌شده را تأیید کرد. خوشه‌هایی با سطح معناداری بالا ($p \leq ۰,۰۰۱$ و $p \leq ۰,۰۱$) در مناطق مرکزی شهر قزوین شناسایی شدند که نشان‌دهنده تمرکز بالای تصادفات با شدت‌های مشابه در این مناطق است. این مناطق نیازمند توجه ویژه و اجرای اقدامات پیشگیرانه جهت کاهش تصادفات هستند.

تحلیل‌ها نشان داد که تصادفات جرحی با بیشترین میزان تجمع فضایی در نقاط خاصی از شهر متمرکز شده‌اند. این در حالی است که تصادفات فوتی الگوی فضایی متفاوتی را نشان می‌دهند و در برخی سال‌ها تمایل به پراکندگی داشته‌اند. نتایج شاخص موران جهانی با مقادیر مثبت و معنادار وجود خودهمبستگی مکانی در داده‌های تصادفات را تأیید می‌کند. نقشه‌های موران محلی نیز به‌وضوح خوشه‌های پرخطر (HH) را عمدتاً در مناطق مرکزی شهر و خوشه‌های ایمن (LL) را در مناطق پیرامونی شناسایی کردند. این تمرکز مکانی حاکی از آن است که بروز تصادفات شدید، نه یک پدیده تصادفی، بلکه تا حد زیادی وابسته به ویژگی‌های فضایی، زیرساختی و کارکردی محیط شهری است. به طور خاص، تراکم بالای کاربری‌ها، ازدحام ترافیکی، طراحی غیراصولی معابر در مناطق مرکزی، از جمله عواملی هستند که می‌توانند در ایجاد چنین خوشه‌هایی نقش داشته باشند.

علاوه بر این، بررسی روند تغییرات مکانی تصادفات در طول سه سال مطالعه شده، از پویایی الگوهای فضایی حکایت دارد. این تغییرات می‌تواند بازتابی از تحولات فیزیکی و نهادی در سطح شهر باشد؛ از جمله بهسازی یا تغییر طرح هندسی معابر، اجرای پروژه‌های عمرانی، تغییر در سیاست‌های راهنمایی و رانندگی، افزایش نظارت پلیسی، و یا حتی تغییر در رفتار ترافیکی کاربران راه. چنین نتایجی ضرورت توجه به تحلیل‌های مکانی-زمانی در فرآیند سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی ایمنی ترافیک شهری را دوچندان می‌کند.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین راهکارهای هدفمند ایمنی ترافیک در مناطق پرریسک مورد استفاده قرار گیرد. ازجمله پیشنهاد می‌شود که مدیریت شهری با بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی، نسبت به اولویت‌بندی مداخلات ترافیکی در نقاط پرحادثه، بازطراحی فضاهای پرخطر، و ارتقای زیرساخت‌های نظارتی و کنترلی اقدام نماید تا از بروز تصادفات شدید در آینده جلوگیری شود.

۶-پی‌نوشت‌ها

1. Incremental Spatial Autocorrelation (ISA)
2. Predictive Accuracy Index (PAI)
3. Average Nearest Neighbor Distance (ANND)
4. Global Moran’s I
5. Local Moran’s I
6. Global Moran's I
7. Queen and Rook
8. K-nearest neighbor
9. Hotspots
10. Cold Spots
11. High-High
12. Low-Low
13. High-Low
14. Low-High
15. Expected Index

۷-مراجع

-Al Hamami, M., & Matisziw, T. C. (2021). Measuring the spatiotemporal evolution of accident hot spots. *157*, 106133 .

-Alam, M. S., & Tabassum, N. J. (2023). Spatial pattern identification and crash severity analysis of road traffic crash hot spots in Ohio .

-Anselin, L. (1996). The Moran Scatterplot as an ESDA Tool to Assess Local Instability in Spatial Association. *Taylor & Francis*. 121–138.

-Atumo, E. A., Fang, T., & Jiang, X. (2022). Spatial statistics and random forest approaches for traffic crash hot spot identification and prediction. *29*(2), 207-216 .

-Briz-Redón, Á., Martínez-Ruiz, F., & Montes, F. (2019). Spatial analysis of traffic accidents near and between road intersections in a directed linear network. *132*, 105252 .

-Colak, H. E ,.Erbas, Y. S., & Bediroglu, S. (2018). Hot spot analysis based on network spatial weights to determine spatial statistics of traffic accidents in Rize, Turkey. *11*(7), 1-13 .

-Elvik, R. (2008). A survey of operational definitions of hazardous road locations in some European countries. *40*(6), 1830-1835 .

-Gedamu, W. T., Plank-Wiedenbeck, U., & Wodajo, B. T. (2024). 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. *200* .

-Ha, L., & Thi Phuong Thao, V. (2024). Analyzing Road Traffic Incident Hotspots Using Cluster Analysis in Thanh Hoa Province of Vietnam .
-Harirforoush, H., Bellalite, L., & Benie, G. (2019). Spatial and Temporal Analysis of Seasonal Traffic Accidents. *4*, 7-16 .
-Hazaymeh, K., Almagbile, A., & Alomari, A. H. (2022). Spatiotemporal Analysis of Traffic Accidents Hotspots Based on Geospatial Techniques. *11.*
-Le, K. G., & Lin, L. T. (2022). Traffic accident hotspot identification by integrating kernel density estimation and spatial autocorrelation analysis: a case study. *27*(2), 543-553 .
-Lee, M., & Khattak, A. J. (2019). Case study of crash severity spatial pattern identification in hot spot analysis .
-Mahato, R. K., Htike, K. M., Sornlorm, K., Koro, A. B., Kafle, A., & Sharma, V. (2024). A spatial autocorrelation analysis of road traffic accidents by severity using Moran's I spatial statistics: a study from Nepal 2019-2022. *24*.
-Matkan, A. A., Mohaymany, A. S., Shahri, M., & Mirbagheri ,B. (2013). Detecting the spatial-temporal autocorrelation among crash frequencies in urban areas. *40*(3), 195-203 .
-Mitchell, A. (2021). The ESRI Guide to GIS Analysis. Vol. 2, Spatial Measurements & Statistics. *ESRI Press .*
-Moons, E., Brijs, T., & Wets, G. (2009). Improving Moran's index to identify hot spots in traffic safety. In (pp. 117-132). *Springer .*
-Munasinghe, D. S. (2023). Spatial analysis of urban road traffic accidents using GIS. *1*.(2).
-Ryder, B., Gahr, B., Egolf, P., Dahlinger, A., & Wortmann, F. (2019). Spatial prediction of traffic accidents with critical driving events – Insights from a nationwide field study. *124*, 611-626 .
-Zheng, M., Xie, X., Jiang, Y., Shen, Q., Geng, X., Zhao, L., & Jia, F. (2024). Optimizing Kernel Density Estimation Bandwidth for Road Traffic Accident Hazard Identification: A Case Study of the City of London. *16* .
-Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2020). A review of spatial approaches in road safety. *135*, 105323 .

Spatial Autocorrelation Analysis of Traffic Accidents Based on Their Severity

(Case Study: Qazvin)

Mohammadreza Kamalinezhad, M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

***Amir Abbas Rassafi,** Professor, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

Hamid Mirzahossein, Associate Professor, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Mehdi Rafatifard, Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: rasafi@eng.ikiu.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

Transportation, as one of the key infrastructures of urban development, plays a significant role in urban economy, politics, and society. At the same time, traffic accidents, as one of the main challenges and issues of this system, have widespread consequences in these areas. Identifying and analyzing them is a fundamental step toward reducing accidents and improving road safety. The analysis of spatial patterns of traffic accidents, as one of the major challenges in urban management and transportation planning, plays a decisive role in identifying critical hotspots and prioritizing safety measures. In this study, using advanced spatial analysis methods, the spatial distribution pattern of traffic accidents in Qazvin from 2015 to 2017 was examined. The methods used include the Average Nearest Neighbor Distance (ANND) to measure the clustering or dispersion of points, as well as global and local Moran's I analysis to identify spatial autocorrelation and accident clustering. The results of the ANND analysis indicate that accidents in Qazvin are not randomly distributed and exhibit a strong tendency to form spatial clusters. The global Moran's index was positive and significant during the study years, indicating the presence of spatial autocorrelation and the clustering of high-risk points. Additionally, local Moran's analysis, by mapping clustering and significance, more precisely identified critical (HH) and safe (LL) zones. This study not only provides a comprehensive understanding of the spatial patterns of traffic accidents in Qazvin but also serves as a practical tool for urban policymakers and planners to reduce accidents and improve road safety. Identifying high-risk clusters and examining their annual changes can lead to the design of targeted solutions and the evaluation of the effectiveness of past measures.

Keywords: Spatial Autocorrelation, Spatial Analysis of Accidents, Traffic Accidents, Accident Severity