

رویکرد مبتنی بر مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در پیش‌بینی تصادفات

عابران پیاده با استفاده از متغیرهای رویارویی و محیطی

سید احمد الماسی، دانشجوی دکتری، راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

حمیدرضا بهنود (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

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

آرزو حاج‌رجبی، استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

چکیده

عابران پیاده از کاربران آسیب‌پذیر در معابر درون شهری هستند که مستقیماً در معرض تصادف قرار می‌گیرند. تصادفات ترافیکی تمایل به وابستگی مکانی دارند و پدیده‌ای است که به‌عنوان همبستگی مکانی شناخته می‌شود. اهداف این مطالعه شامل شناسایی متغیرهای جایگزین برای عابرین پیاده در معابر شهری و شناسایی نواحی حادثه‌خیز تصادف با استفاده از متغیرهای رویارویی عابر پیاده و همچنین نشان دادن کارایی مدل‌های فضایی در پیش‌بینی تصادف عابرین پیاده است. در این مطالعه در گام اول که شناسایی متغیرهای رویارویی است از چندین روش آماری برای شناسایی این متغیرها استفاده شده است. همچنین، پیش‌بینی فراوانی تصادفات عابر پیاده با استفاده از ۶ مدل عملکرد آمار فضایی انجام شده است که بر اساس داده‌های تصادف عابر پیاده شهر تهران برای سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داده است که پیش‌بینی فراوانی تصادفات عابرین پیاده با استفاده از مدل‌های رگرسیون پواسون وزن‌دار جغرافیایی بر صفر و توزیع دو جمله‌ای منفی جغرافیایی بر صفر نتایج بهتری بر اساس معیارهای انتخاب مدل نسبت به سایر مدل‌ها دارد. این مطالعه پراکندگی و تراکم تصادف عابر پیاده را بدون داشتن حجم عابرین پیاده نشان داده است و بدین ترتیب می‌توان با انجام اقدامات ایمنی در مکان‌های مستعد تصادف عابر پیاده، هزینه اجتماعی و تلفات ناشی از آن را کاهش داد. در این مطالعه، استفاده از انواع مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی برای ارزیابی رابطه بین متغیرهای جامعه شناختی و تصادف در سطح ناحیه مناسب بوده است. مقایسه عملکرد مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، وجود قابل توجه ناهمگنی مکانی در تحلیل را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آمار فضایی، تصادفات عابرین پیاده، توزیع دو جمله‌ای وزن‌دار جغرافیایی بر صفر، رگرسیون پواسون وزن‌دار جغرافیایی بر

صفر

۱. مقدمه

رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، رگرسیون گاوسین وزن‌دار جغرافیایی، رگرسیون پواسن وزن‌دار جغرافیایی می‌باشد. مدل‌های رویارویی در این مطالعه با مدل‌های مطالعه [J. Lee et al., 2018] که با استفاده از روش توبیت^۳ (میزان تغییرات متغیر وابسته وقتی بیشتر از حد پایین است، با وزن احتمال بیشتر بودن از حد پایین در نظر می‌گیرد) و روش‌های مدل‌سازی خطی تعمیم یافته انجام شده و سفرهای عابر پیاده را پیش‌بینی کرده است، مقایسه می‌شود. همچنین تأثیر متغیرهای فضایی رویارویی بر اساس موقعیت جغرافیایی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به منظور شناسایی بهترین مدل رویارویی، مقایسه‌ای بین مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)^۴، رگرسیون گاوسین وزن‌دار جغرافیایی (GWGR)^۵، رگرسیون پواسن وزن‌دار جغرافیایی (GWPR)^۶، رگرسیون پواسن وزن‌دار جغرافیایی بر صفر (ZIGWPR)^۷، توزیع دوجمله‌ای منفی وزن‌دار جغرافیایی (GWNBR)^۸ و توزیع دوجمله‌ای وزن‌دار جغرافیایی بر صفر (ZIGWNBR)^۹ بر اساس معیار اطلاعاتی آکائیکه^{۱۰} (AIC) و پی مقدار (P-Valu) انجام گرفته است. پس از صحت‌سنجی مدل‌ها برای پیش‌بینی تصادف عابرین پیاده استفاده گردیده است.

پدیده ارتباط فضایی بر اساس فاصله، ارتباط بین متغیرهای برون‌زا و متغیرهای وابسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، این رابطه ممکن است در طول مشاهده ثابت نباشد. عدم توجه به ناهمگونی مخدوشگر در تجزیه و تحلیل داده‌ها، منجر به بیش پراکندگی می‌شود. از این رو، واریانس بزرگتر از میانگین خواهد شد به همین ترتیب، اگر عوامل مخدوشگر با عوامل برون‌زا شناخته شده ارتباط داشته باشند، تخمین‌ها پارامترهای مغرضانه‌ای را به همراه خواهد داشت که در نهایت منجر به ترسیم استنتاج‌های نادرست می‌شود [Washington, Karlaftis, Mannering, & Anastasopoulos, 2020]. در این مطالعه در گام اول به شناسایی متغیرهای رویارویی عابر پیاده در تصادف می‌پردازد و در گام دوم مقایسه مدل‌های آمار

عابران پیاده به‌عنوان کاربران آسیب‌پذیر در راه‌ها طبقه‌بندی شده و در رده اصلی قربانیان تصادفات محسوب می‌شوند. میزان آسیب‌دیدگی عابران پیاده در تصادفات وسایل نقلیه موتوری نسبتاً زیاد است. دلیل این امر این است که برخلاف مسافران یا رانندگان در تصادفات وسایل نقلیه موتوری، عابران پیاده مستقیماً در معرض تأثیر تصادفات رانندگی قرار دارند. امروزه اطمینان از حرکت ایمن عابران پیاده یکی از چالش برانگیزترین نگرانی مهندسان حمل‌ونقل است. با هدف توسعه سیستم حمل‌ونقل پایدار، ایمن و پویا، باید توجه مناسبی به ایمنی عابران پیاده شود. در سال ۱۳۹۶ در ایران ۲۳۲۵ عابر پیاده کشته و ۳۲۵۰۰ نفر زخمی شده‌اند که با ضریب ۱،۳۲ در هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت را نشان می‌دهد [سازمان پزشکی قانونی کشور، ۱۳۹۶]. نسبت تلفات عابر پیاده در جهان به‌طور متوسط از ۱۱ درصد به ۱۴ درصد طی یک دهه گذشته افزایش یافته است؛ بنابراین رسیدگی به ایمنی عابران پیاده و افزایش آگاهی مردم در مورد پیاده‌روی ایمن مسئله مهمی به شمار می‌رود [J. Lee, Abdel-Aty, Cai, Wang, & Huang, 2018]. با این حال، اندازه‌گیری مداوم سفرهای عابر پیاده با در نظر گرفتن همه متغیرهای مؤثر دشوار است زیرا نیازمند استفاده از منابع قابل توجهی بوده و عوامل بسیار زیادی در ایجاد سفرهای عابر پیاده نقش دارند. این مطالعه با هدف بررسی معیارهای در دسترس و انتخاب مؤثرترین معیارها به منظور پیش‌بینی متغیر رویارویی عابر پیاده (سفرهای عابر پیاده) و شناسایی نواحی مستعد تصادف عابر پیاده صورت می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، هدف از این مطالعه، تجزیه و تحلیل معیارهای جانشین^۱ مربوط به رویارویی عابران پیاده^۲ در معابر شهری از جمله استفاده از ویژگی‌های اجتماعی-جمعیتی شناختی، کاربری اراضی و ویژگی‌های هندسی محیط اطراف است. فرآیند سه مرحله‌ای که در مطالعه انجام شده شامل توسعه مدل‌های رویارویی با استفاده از مدل‌های فضایی مکان‌مند شامل:

۱-۲ تحلیل مکانی در سطح قطعات راه

در مطالعه ای متغیرهای رویارویی مختلف را برای عابران پیاده مورد بررسی قرار گرفت نتایج مطالعه نشان داد 'ورودی جمعیت' و 'ورود وسایل نقلیه- مایل پیموده شده' (VMT) "بهترین معیار رویارویی" تصادفات عابر پیاده در هر محل تصادف بر اساس محل سکونت است [Lee et al, 2018]. در مطالعه‌ای ارتباط بین ایمنی عابران پیاده در قطعات راه و جریان ترافیک مورد بررسی قرار گرفته است نتایج مطالعه نشان داد قانون مداری عابران پیاده در معابر شریانی نسبت به معابر محلی بیشتر بوده همچنین نوع زیرساخت‌های در نظر گرفته شده برای عابران پیاده تأثیر بسزای در تحرک آن در معابر شهری دارد [Galanis, Botzoris, & Eliou, 2017]. در مطالعه‌ای دیگر پس بررسی ارتباط بین ایمنی عابران پیاده و انواع کاربری‌های اطراف قطعات راه مشخص گردید که بین کاربری‌هایی که نیاز به پارک حاشیه‌ای دارند و تصادف عابر پیاده ارتباط معناداری وجود دارد به طوری که وجود خودروی پارک شده در حاشیه راه خطر تصادف عابر پیاده را تا دو برابر افزایش می‌دهد [Congiu et al., 2019]. در مطالعه‌ای به منظور بررسی ایمنی عابران پیاده در قطعات راه، ارتباط بین توسعه زمین و تصادف عابر پیاده به عنوان عامل موثر در افزایش فراوانی تصادفات عابران پیاده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت نتایج نشان داد که الگوی کاربری اراضی بر سطح فعالیت عابر پیاده با تأثیر مستقیمی بر ایمنی عابر پیاده تأثیر می‌گذارد [Miranda-Moreno, Morency, & El-Geneidy, 2011].

۲-۲ تحلیل مکانی در سطح تقاطعات

مطالعه زیادی در مورد تصادفات عابر پیاده در تقاطع‌ها توسط محققان انجام گرفته است یکی از مطالعات جامع در این خصوص در ایالت فلوریدای آمریکا انجام گرفته است که محققان در آن از روش کل و همکاران^{۱۲} پیروی کردند تا بتوانند با استفاده از داده سفر شخصی عابر پیاده، الگویی منطقی از رویارویی عابر پیاده با خطر تصادف را ایجاد کند [C. Lee &

فضایی - جغرافیایی که شرایط تصادف را وابسته به مکان تحلیل می‌کند انجام می‌گیرد سپس بر اساس معیارهای ارزیابی دقت مدل، مدل‌های مناسب، جهت پیش‌بینی فراوانی تصادف عابرین پیاده در روش فضایی - جغرافیایی را ارائه می‌دهد. بنابراین هدف از این مطالعه ضمن شناسایی نواحی پر تصادف بر اساس متغیرهای رویارویی شناسایی شده با استفاده از مدل‌های آماری مناسب و مجموعه داده‌های تصادفات مشاهده شده به منظور ارائه مدل بهبود ایمنی عابرین پیاده درون شهری است.

۲. پیشینه تحقیق

تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای اطمینان از حرکت ایمن عابر پیاده انجام شده است. محققان در تلاش‌اند تا عوامل مؤثر در مرگ و میر عابران پیاده و همچنین نواحی شهری که دارای بیشترین خطر تصادف برای عابران پیاده است را با توسعه روابط مکانی شناسایی کنند.

مطالعات تحلیل تصادفات که مبتنی بر مکان هستند به دو صورت تجمعی یعنی در یک شبکه منظم یا غیر منظم و نقطه‌ای مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرند در آمار فضایی تحلیل نوع اول را ناحیه‌ای و تحلیل نوع دوم را زمین آماری می‌نامند. با توجه به تأثیر بسزای عوامل محیطی و رویارویی در تصادفات عابران پیاده، تحلیل‌ها از نوع ناحیه‌ای بیشتر مورد نظر محققان قرار گرفته است. در تحلیل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی تخمین ضرایب متغیرهای مستقل فقط بر اساس فاصله اقلیدسی در نظر گرفته می‌شود بنابراین تحلیل مکانی بر اساس طول قطعه، محیط تقاطع، ناحیه‌های ترافیکی و مناطق شهری از نوع تحلیل‌های ناحیه‌ای می‌باشند. در این مطالعه با توجه ماهیت داده‌های در دسترس تحلیل مکانی ناحیه‌ای بر اساس نواحی ترافیکی انجام گرفته است. مطالعات مختلفی تأثیر متغیرهای رویارویی و محیطی را بر فراوانی تصادفات عابران پیاده مورد بررسی قرار داده‌اند.

است که عابران پیاده معمولاً بلافاصله پس از پیاده شدن در عجله سوار اتوبوس‌ها یا عبور از جاده‌ها هستند. مطالعات بسیار زیادی وجود دارد که تأثیر ویژگی‌های جمعیتی و اقتصادی-اجتماعی بر ایمنی عابر پیاده را توصیف می‌کند [Wier, Weintraub, Humphreys, Seto, & Bhatia, 2009]. یکی دیگر از اقدامات قابل توجه رویارویی با خطر تصادف عابر پیاده اثرات الگوی کاربری اراضی است که مدت‌هاست که توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [Wier et al, 2009; Cervero, 1996; Graham and Stephens, 2008; Le et al, 2017; Le and Abdel-Aty, 2017; al, 2018b].

۲-۴ مدل‌های آمار فضایی به منظور توسعه روش بیز

تجربی در HSM

به طور کلی، پیش‌بینی فضایی تصادفات با استفاده از پارامترهای بومی شده، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را در مقایسه با روش‌های راهنمای ایمنی راه‌ها (HSM^{۱۴}) که از پارامترهای جهانی برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند به ما می‌دهد [Liu, Khattak, & Wali, 2017]. علاوه بر این، معیار رویارویی ترافیک (مانند AADT^{۱۵} و طول قطعه) پیش‌بینی‌کننده فراوانی تصادف در نظر گرفته می‌شود و به طور گسترده‌ای توسط متخصصان حمل‌ونقل برای پیش‌بینی وقوع تصادف در یک سایت خاص استفاده شده است؛ بنابراین، در زمینه توابع عملکرد ایمنی (SPF^{۱۶})، درک روابط متفاوت فضایی بین عوامل اصلی رویارویی و فراوانی تصادف از پتانسیل قابل توجهی برای توسعه SPF های بومی شده برخوردار است که به طور بالقوه می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیق‌تر تصادف را در سایت‌های جداگانه ایجاد کند [Jun Liu, 2017]. محققان دریافته‌اند که به منظور بومی سازی پیش‌بینی فراوانی تصادفات معادله بیز تجربی مورد استفاده در HSM باید توسعه یابد البته این مسئله در کتاب HSM نیز مورد توجه و پیشنهاد شده است. مطالعات فراوانی میزان اهمیت و صحت نتایج بدست آمده از روش های آمار فضایی جهت حصول نتایج بهتر

[Abdel-Aty, 2005] همچنین در مطالعه‌ای ایمنی عابران پیاده در تقاطعات نیمه حفاظت‌شده^{۱۳}، که در آن وسایل نقلیه گردش به چپ کننده با ترافیک مخالف مواجه نمی‌شوند مورد بررسی قرار گرفت نتایج مطالعه نشان داد با توجه به در نظر گرفتن چهار سناریوی گردش به چپ و راست در بازه‌های زمانی مختلف، تخمین پارامترها تا حدودی تحت تأثیر دوره زمانی مورد استفاده برای تخمین جریان قرار گرفتند علاوه بر آن تخمین پارامترها تحت تأثیر الگوی ترافیک (ترافیک گردش به چپ یا راست) قرار دارند حتی اگر رویکردهایی انتخاب شده مشابه باشند وسایل نقلیه گردش به چپ کننده خطرات بیشتری را برای عابران پیاده نسبت به وسایل نقلیه گردش به راست کننده ایجاد می‌کنند [Leden, 2002].

۲-۳ تحلیل مکانی در سطح مناطق و نواحی

در مطالعه‌ای با استفاده از مدل دوجمله‌ای منفی و یک پارامتر تصادفی، مدل فراوانی‌های تصادف عابر پیاده برای شهر نیویورک توسعه داده شد. نتایج مطالعه نشان داد که نسبت جمعیت افراد بی‌سواد، وجود مناطق در همسایگی مناطق آسیب‌پذیر، مناطق تجاری، مناطق مدرسه، ویژگی‌های عملیات تقاطع، نوع کنترل دسترسی در جاده‌ها و تعداد خطوط تأثیرات مثبتی بر تصادفات عابر پیاده دارد [Ukkusuri et al, 2011]. محققان ایالت فلوریدا به بررسی ایمنی دانش آموزان در اطراف مدارس پرداختند و دریافتند که دانش آموزان دبیرستانی بیشتر از کودکان خردسال تحت تأثیر تصادفات هستند. همچنین تأیید کردند که دانش آموزان خرد سال در نزدیکی مدارس بیشتر در معرض خطر تصادف قرار دارند. نویسندگان دریافتند که سن، جنس و مصرف الکل راننده، سن عابر پیاده / دوچرخه سوار، تعداد خطوط، محدودیت سرعت و نسبت سرعت با میزان تصادفات ارتباط دارد [Abdel-Aty, Chundi, & Lee, 2007]. بر اساس مطالعات انجام شده تعداد دفعات تصادفات عابر پیاده در مناطق تجاری و مسکونی نسبتاً بیشتر است؛ همچنین امکانات حمل‌ونقل عمومی در برخورد عابران پیاده به دلیل این واقعیت

مدلی است که با وابستگی فضایی و ناهمگنی سروکار دارد و قبلاً در برخی از مطالعات ایمنی راه در سطح برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گرفته است، اما به دلیل بیش پراکندگی احتمالی در مشاهدات تصادفات، در تحلیل ایمنی راه مناسب به نظر نمی‌رسد. دو روش برای مدل GWNBR به کار گرفته شد تا داده‌های گسسته را به صورت غیرثابت مدل‌سازی کرده و از پراکندگی بیش از حد داده‌ها جلوگیری کند: روش اول بیش پراکندگی ثابت برای همه مناطق ترافیکی و دوم واحد بودن متغیر برای هر واحد فضایی [da Silva & Rodrigues, 2014;] در مطالعه [Huang et al., 2018] مدل GWR برای کشف روابط بین تصادفات و محیط ساخته شده برای منطقه دیترویت در میشیگان استفاده شد و نتایج نشان داد روابط بین محیط ساخته شده و تصادفات از نظر مکانی غیرثابت هستند. همچنین در مطالعه [Champahom et al., 2020] به بررسی کاربرد مدل‌های آماری برای تعیین رابطه بین متغیرهای توصیفی و فراوانی تصادفات جلو به عقب پرداخته شده است. در این مطالعه نیز چهار مدل شامل مدل رگرسیون پواسون، مدل دوجمله‌ای منفی، مدل دوجمله‌ای منفی با صفر متورم و مدل دوجمله‌ای منفی فضایی با تورم صفر توسعه داده شدند. هنگامی که مدل‌ها با معیار اطلاعاتی شرطی (AICc) مقایسه شد، نتایج نشان داد مدل دوجمله‌ای منفی فضایی با تورم صفر برای داده‌های تصادفات جلو به عقب نتایج مطلوب‌تری دارد.

در جدول یک جمع بندی منابع مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.

به منظور پیش‌بینی فراوانی تصادفات را مورد بررسی قرار داده و تایید نموده اند که در زیر به تعدادی از آنها اشاره شده است. در مطالعه [Li et al, 2013] با هدف ارزیابی GWPR داده‌های تصادف در سطح شهر انجام گردید. در این مطالعه، عملکرد GWPR با مدل خطی عمومی سستی (GLM^{۱۷}) مقایسه شد. تصادفات فوتی و ویژگی‌های شبکه جاده‌ای و ویژگی‌های اجتماعی- جمعیتی از ۵۸ شهر کالیفرنیا جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد با به دست آوردن ناهمگنی فضایی، GWPR نسبت به GLM در پیش‌بینی تصادفات فوتی در شهرها با در نظر گرفتن همبستگی مکانی به طور چشمگیری کاهش یافت. همچنین مطالعه [Sharma & Landge, 2013] مدل‌های رگرسیون تصادفی را با استفاده از داده‌های تصادف جمع‌آوری شده در طول سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ در بیش از ۱۰۰ کیلومتر طول راه مورد استفاده قرار داد. سپس به منظور مدل‌سازی وقوع تصادفات جاده‌ای از روش رگرسیون دو جمله‌ای منفی صفر متورم (ZINB^{۱۸}) و AIC برای اندازه‌گیری نیکویی برازش مدل استفاده نمودند. نتایج مطالعه نشان داد که تراکم دسترسی، عرض خط و عرض شانه پارامترهای مهمی هستند که بر ایمنی ترافیک بزرگراه انتخاب شده تأثیر می‌گذارند. در مطالعه‌ای دیگر، ناهمگنی فضایی در مدل‌سازی ایمنی منطقه‌ای با استفاده از دو روش پیشرفته مدل دوجمله‌ای منفی پارامتر تصادفی (RPNB^{۱۹}) و مدل رگرسیون پواسون با وزن جغرافیایی نیمه پارامتریک (S-GWPR^{۲۰}) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد مدل S-GWPR به دلیل در نظر گرفتن همبستگی فضایی بین متغیرها و تعدیل ناهمگنی مکانی نتیجه مطلوب‌تری دارد. باید در نظر داشته باشیم اگرچه GWPR

جدول ۱. مهمترین منابع استفاده شده با رویکرد توسعه مدل بیز تجربی مورد استفاده در HSM

نام نویسنده	سال	هدف	نتایج
Leden	۲۰۰۲	ایمنی عابران پیاده در تقاطعات محافظت شده	تأثیر حرکت‌های گردش به چپ نسبت به سایر گردش‌ها تأثیر بسیار بیشتری دارد
Abdel-Aty	۲۰۰۵	ایمنی عابران پیاده در تقاطعات	ارائه الگوی مناسب جهت ایمنی عابران پیاده در تقاطعات

نام نویسنده	سال	هدف	نتایج
Abdel-Aty	۲۰۰۷	ایمنی کودکان در مناطق دارای مدارس	ارتباط بین محدودیت سرعت و ایمنی کودکان
Miranda	۲۰۱۱	ایمنی عابران پیاده و توسعه زمین حاشیه راه	تأثیر مستقیم وجود دارد
Ukkusuri	۲۰۱۱	ارتباط بین متغیرهای رویارویی ایمنی عابران پیاده	ویژگی تقاطعات، نوع دسترسی و تعداد خطوط تأثیر بسزایی در ایمنی عابران پیاده دارد
Lee et al	۲۰۱۵	شناسایی متغیرهای رویارویی عابران پیاده	جمعیت و VKT
Galanis	۲۰۱۷	ارتباط بین جریان ترافیک و ایمنی عابران پیاده	قانون مداری عابران پیاده در خیابان‌های شریانی نسبت به محلی بیشتر است
Le	۲۰۱۷	ارتباط بین نوع کاربری مناطق و ایمنی عابران پیاده	تراکم کاربری‌های مسکونی و تجاری با ایمنی عابران پیاده ارتباط مستقیم دارد
Congiu et al	۲۰۱۹	ارتباط بین کاربری اطراف قطعات راه و ایمنی عابران پیاده	ارتباط معنادار بین پارک حاشیه‌ای و ایمنی عابران پیاده
Liu	۲۰۱۷	پیش بینی فراوانی تصادفات بر اساس مدل‌های فضایی	مدل‌های آمار فضایی محلی نتایج بهتری نسبت به مدل‌های جهانی ارائه می‌کنند
Jun Liu	۲۰۱۷	مقایسه بین تأثیر معیارهای رویارویی بر فراوانی تصادفات در مدل‌های محلی و جهانی	مدل‌های محلی نتایج بهتری را ارائه می‌کنند.
Gomes et al	۲۰۱۷	مقایسه مدل‌های آماری پیش بینی فراوانی تصادفات	مدل‌های فضایی خاصیت ناهمگونی داده‌های تصادف را تعدیل می‌کنند.
Champahom	۲۰۲۰	ویژگی داده‌های تصادف	داده‌های تصادف در مکان‌های مختلف ویژگی‌های متفاوتی دارند

۳. روش تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه در گام اول به منظور شناسایی متغیرهای رویارویی از چندین روش آماری جهت برآورد فراوانی تصادفات استفاده گردیده است. در گام دوم با استفاده از مدل‌های مدل‌های آمار فضایی- جغرافیایی پیش‌بینی فراوانی تصادفات بر اساس متغیرهای رویارویی انجام شده است در ادامه، ضمن اعتبار سنجی مدل‌ها توضیحات مختصری از تکنیک‌های مدل‌سازی که در این دو گام بکار رفته‌اند آورده شده است.

۳-۱ گام اول

۳-۱-۱ مدل‌های خطی تعمیم یافته

مدل‌های خطی تعمیم یافته خانواده گسترده‌ای از مدل‌های آماری است که در آن توزیع متغیر پاسخ متعلق به خانواده نمایی است.

این مدل‌ها دارای سه مؤلفه هستند شامل: الف) مؤلفه تصادفی که متغیر پاسخ را تعریف کرده و یک توزیع احتمال مناسب را برای آن در نظر می‌گیرد. ب) مؤلفه سیستماتیک که متغیرهای تبیینی استفاده شده را به عنوان پیشگوهای مدل تعیین می‌کنند. ج) مؤلفه ربط که تابع یا رابطه بین مؤلفه سیستماتیک و مقدار مورد انتظار میانگین مؤلفه تصادفی است.

در زمینه داده‌های شمارشی، خانواده نمایی شامل توزیع‌های پواسن، دو جمله‌ای، هندسی و دو جمله‌ای منفی می‌شود. اگر $i = 1, \dots, n$: y_i مقادیر پاسخ را نشان دهد رابطه زیر برقرار است:

$$g(\mu_i) = g(E(Y_i)) = x_i' \beta \quad (1)$$

که در آن x_i بردار متغیرهای تبیینی برای مشاهده i ام و β بردار ضرایب رگرسیونی است. تابع پیشگویی خطی یک ترکیب

خطی از متغیرهای تبیینی است و تابع پیوند (مؤلفه ربط) متغیرهای تبیینی را به میانگین طبیعی متغیر پاسخ مربوط می‌کند.

۳-۱-۲ مدل توییت

در این تحقیق به منظور حذف هرگونه پیش‌بینی منفی از تصادفات عابر پیاده، از مدل توییت برای شناسایی معیار رویارویی استفاده شده است. مدل توییت یک مدل آماری است که به منظور بررسی روابط خطی در شرایطی که در مورد متغیر وابسته یک حد بحرانی در سمت راست یا چپ مشاهده شود استفاده می‌شود. از این رو به این نوع خاص از توابع پیش‌بینی رگرسیون سانسور شده نیز اطلاق می‌شود. وجود موارد فراتر از حد بحرانی یا پائین‌تر از حد بحرانی در متغیر وابسته بیانگر یک مشکل جدی و اریب در معادله رگرسیون است و نیازمند استفاده از رگرسیون توییت است که برای توصیف رابطه بین یک متغیر وابسته غیر منفی سانسور وابسته y_i و یک متغیر مستقل (برداری) x_i مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل توییت که توسط جیمز توبین (۱۹۵۸) معرفی شده است به صورت زیر است:

$$y_i^* = \beta x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N$$
$$y_i = \begin{cases} y_i^* & \text{if } y_i^* > 0 \\ 0 & \text{if } y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲) y_i^* یک متغیر پنهان است که فقط در صورت مثبت مشاهده می‌شود. همچنین N تعداد مشاهدات، y_i متغیر وابسته، x_i یک بردار متغیرهای توضیحی، β یک بردار پارامترهای قابل تخمین و ε_i یک توزیع عادی و مستقل است. پارامتر خطا نیز دارای میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد.

۳-۱-۳ شناسایی مدل رویارویی^{۲۱} با استفاده از الگوریتم

جنگل تصادفی^{۲۲}

جنگل تصادفی مجموعه‌ای از درختان منفرد است که توسط الگوریتم CART توسعه یافته است. جنگل تصادفی به طور خاص نسبتاً جدید برای بررسی رتبه بندی اهمیت متغیرهای مستقل است [Chen & Chen, 2020] بنابراین اهمیت

متغیرهای مستقل در مدل رویارویی توسط فرایند جنگل تصادفی تعیین می‌شود که اولین گام این فرایند برازش یک درخت تصادفی به داده هاست در چنین فرآیندی برازش خطا^{۲۳} که یک روش اندازه گیری برای خطای پیشگویی جنگل تصادفی است که برای هر داده مثبت شده است و مقدار متوسط هر شاخه روی آن نیز مثبت شده است به منظور سنجش اهمیت ویژگی j ام پس از آموزش، مقادیر ویژگی j ام در میان داده‌های آموزش برازش داده می‌شود و خطای حاصله دوباره در این مجموعه داده جایگشت می‌شود [Cai, Lee, Eluru, & Abdel-Aty, 2016]

۳-۲ گام دوم

۳-۲-۱ مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی

الف) GWR: یک روش اکتشافی است که در ادبیات مربوطه عمدتاً به منظور تحلیل داده‌های مکانی استفاده می‌گردد. بر اساس مطالعات گذشته ضمن تأکید بر استفاده از مدل‌های محلی به جای مدل‌های جهانی، در ارتباط با رابطه بین ساختار شهری و رفتار عابر پیاده عمدتاً مدل‌های رگرسیون جهانی را مورد استفاده قرار داده‌اند. با این حال، از آنجا که مطالعه حاضر شامل مناطق شهری با طبقه عملکردی شریانی اصلی و جمع و پخش کننده‌ها است، ممکن است خصوصیات رفتاری عابر پیاده در هر کدام متفاوت باشد؛ بنابراین محتمل است که رابطه بین شکل شهری و پیاده‌روی در سراسر منطقه مورد مطالعه متفاوت باشد.

ب) GWGR: در این مطالعه، از یک مدل GWR گاوسی^{۲۴} برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای رویارویی (تعداد مدارس، تعداد پل‌های عابر پیاده، تعداد ایستگاه‌های اتوبوس و...) استفاده شده است در ادامه برای تعیین اینکه کدام مدل مناسب است، مقایسه‌ای بین Gaussian GWR، GWR و GWPR انجام داده شده است. مدل با مقادیر پایین‌تر AIC، مدل مناسب‌تر است [Fotheringham, Brunson, & Charlton, 2003; Tu]

[& Xia, 2008; Wang, Ni, & Tenhunen, 2005]

ج) GWPR: به دلیل آنکه داده‌های تصادف از نوع شمارشی هستند علاوه بر دو مدل مذکور در این مطالعه از یک مدل

$$\mu_i = e^{x_i^T \beta(u_j, v_j)} \text{ and } \pi_i = \frac{e^{x_i^T \gamma(u_j, v_j)}}{1 + e^{x_i^T \gamma(u_j, v_j)}}$$

در رابطه (۵)، $\beta(u_j, v_j)$ و $\gamma(u_j, v_j)$ پارامترهای رگرسیون در موقعیت (u_j, v_j) هستند. x متغیر پیشگوی وابسته به دو شرایط zero state ($y_i = 0$) و mean of poisson state ($y_i > 0$) است. باید توجه داشته باشیم که درگیری عامل موقعیت جغرافیایی در GWZIPR با یک مختصات (u_j, v_j) بیان می‌شود. عامل جغرافیایی وزنی است که در مدل GWZIPR بیانگر ویژگی محلی پارامترها برای هر مکان است.

با اعمال عامل جغرافیایی در ZIPR و استفاده از روش برآورد حداکثر درستنمایی و الگوریتم (EM)^{۳۷}، تابع درستنمایی و لگاریتم درستنمایی مدل GWZIPR توسط معادله زیر نشان داده شده است.

$$L(\gamma(u_i, v_i), \beta(u_i, v_i)) = \prod_{l=1}^n \left[\frac{e^{x_i^T \gamma(u_i, v_i)} + e^{-x_i^T \beta(u_i, v_i)}}{1 + e^{x_i^T \gamma(u_i, v_i)}} \right] + \prod_{\substack{l=1 \\ y_l > 1}}^n \left[\frac{1}{1 + e^{x_i^T \gamma(u_i, v_i)}} (\exp(-e^{x_i^T \beta(u_i, v_i)} + y_i x_i^T \beta(u_i, v_i))) \right] y_i!$$

And: $LnL(\gamma(u_i, v_i), \beta(u_i, v_i)) = \sum_{l=1}^n \ln(e^{x_i^T \gamma(u_i, v_i)} + e^{-x_i^T \beta(u_i, v_i)}) w_{il}(u_i, v_i) - \sum_{l=1}^n \ln(1 + e^{x_i^T \gamma(u_i, v_i)}) w_{il}(u_i, v_i) + \sum_{\substack{l=1 \\ y_l > 0}}^n (-e^{-x_i^T \beta(u_i, v_i)} + y_i x_i^T \beta(u_i, v_i)) w_{il}(u_i, v_i) - \sum_{\substack{l=1 \\ y_l > 0}}^n \ln(y_i!) w_{il}(u_i, v_i)$

در رابطه (۶)، $w_{il}(u_j, v_j)$ وزن موقعیت i ($i=1, 2, \dots, n$) تابع درستنمایی است. این رابطه درستنمایی غیر کامل^{۳۸} نامیده می‌شود چون $y_i = 0$ از حالت صفر یا حالت پواسن می‌آید. به همین دلیل y_i با استفاده از متغیر نهفته Z دوباره تعریف می‌شود؛ به طوری که مقدار Z_i در حالت صفر برابر ۱ و در حالت پواسن برابر صفر است. بر اساس مطالعات انجام شده به منظور دستیابی

GWPR نیز استفاده شده است. در یک مدل GWPR، فراوانی تصادف توسط مجموعه‌ای از متغیرهای توصیفی پیش‌بینی می‌شود که در آن پارامترها مجاز به تغییر در فضا هستند. این مدل را می‌توان به صورت زیر نوشت [Hezaveh, Arvin, & Cherry, 2019].

$$\ln(\lambda_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \ln(E_{vi}) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i) x_{ij}, \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، (u_i, v_i) مختصات منطقه i را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که در GWPR، $\beta_k(u_i, v_i)$ تابعی از مختصات مرکز ناحیه i است.

د) GWNBR: به دلیل آنکه داده‌های تصادف دارای خاصیت بیش پراکندگی هستند در گام بعدی مدل GWNBR نیز مورد بررسی قرار گرفته است در این مدل علاوه بر خاصیت شمارشی بودن داده‌ها بیش پراکندگی داده‌ها و همچنین برآورد داده‌های گسسته به روش غیر ثابت را نیز در نظر می‌گیرد [Silva and Rodrigues, 2014].

معادله (۴) شکل کلی مدل GWNBR را نشان می‌دهد:

$$Y_j \sim NB \left[t_j \exp(\sum_k \beta_k(u_j, v_j) x_{jk}), \alpha(u_j, v_j) \right], \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، (u_j, v_j) مختصات مکان نقاط داده j برای $j = 1, \dots, n$ و t_j یک متغیر جبران کننده^{۳۹}، α پارامتر بیش پراکندگی، β_k پارامتر مربوط به متغیر توضیحی x_{jk} برای

$k = 1, \dots, K$ و Y_j متغیر وابسته^{۴۰} است (Liu, Khattak et al. 2017).

ه) GWZIPR: اگر تعداد داده‌ها با مقدار صفر زیاد باشد ممکن است مدل‌های پر صفر نتایج بهتری ارائه کنند. مدل GWZIPR مدل جغرافیایی رگرسیون Poisson (ZIP) صفر متورم^{۴۱} با برآورد پارامترهای محلی است. در این مدل هر مشاهده از متغیرهای پاسخ، موقعیت جغرافیایی متفاوتی دارند:

$$\pi_i + (1 - \pi_i) e^{-\mu_i} \text{ for } y_i = 0 \text{ and } \frac{(1 - \pi_i) e^{\mu_i} \mu_i^{y_i}}{y_i!}, \text{ for } y_i > 0 \quad (۵)$$

که در آن D واریانس مدل را نشان می‌دهد و k تعداد پارامترها است. در $GWPR$ ، به دلیل چارچوب نا پارامتری مدل، تعداد پارامترها بی معنی است؛ بنابراین باید تعداد مؤثری از پارامترها در نظر گرفته شود که می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$k = \text{trace}(S),$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{pred} - y_{obs}|}{n}, \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{pred} - y_{obs})^2}{n}},$$

که در آن S ماتریس کلاهدار است. علاوه بر AIC ، از خطای میانگین مطلق (MAE)^{۳۱}، خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$)^{۳۲} نیز برای مقایسه عملکردهای مدل استفاده خواهیم کرد. مقدار پایین‌تر MAE و $RMSE$ نشان دهنده عملکرد بهینه مدل است. همچنین در نهایت از شاخص آماری موران^{۳۳} نیز جهت صحت سنجی مدل‌ها استفاده گردید. از نظر آماری، شاخص موران یک اندازه‌گیری از همبستگی مکانی است که توسط موران (۱۹۵۰) ایجاد شده است. در این مطالعه، از شاخص موران استفاده شده است تا بررسی شود که آیا باقی مانده پیش‌بینی‌های مربوط به تصادف در سطح کل شهر بین TAZ ‌های همسایه ارتباطی مکانی دارند یا خیر. ارزش منفی (مثبت) شاخص موران نشانگر همبستگی مکانی منفی (مثبت) در سطح کل است.

۳-۳-۲ مجموعه داده‌ها

منبع اصلی دریافت داده‌های این مطالعه شهرداری تهران است. داده‌های استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در این مطالعه ناحیه‌های مورد تحلیل برای توسعه مدل بر اساس متغیرهای رویارویی در TAZ که برای شهر تهران ۵۶۰ ناحیه می‌باشد، در نظر گرفته شده است با توجه به اینکه این داده‌ها توسط مرکز کنترل ترافیک شهرداری تهران مورد بررسی قرار گرفته است میزان داده‌های پرت کمتر از ۱۰ درصد شناسایی گردید که به دلیل ماهیت پراکندگی داده‌ها از پاکسازی داده‌ها^{۳۴} صرف نظر گردید. البته باید در نظر گرفت به منظور همسان سازی مساحت‌های مورد

به حل معادله، از روش تکراری الگوریتم^{۳۵} (EM) استفاده خواهد شد [Dewi & Amaliana, 2015].

(و) $GWZINBR$: در مطالعه حاضر به دلیل خاصیت تصادفی و شمارشی بودن داده‌های تصادف، فرض شده است در تعدادی از نواحی ترافیکی (TAZ)^{۳۶} ها تصادف رخ نمی‌دهد؛ بنابراین، این دو ویژگی را می‌توان به دو دسته شمارش نرمال ($1-P_i$) و شمارش صفر (P_i) تقسیم کرد. ممکن است مدل کلی برای تفکیک داده‌ها در هنگام تحلیل به دو قسمت جامع وجود نداشته باشد؛ بنابراین، مناسب‌ترین مدل برای حالتی که متغیرهای وابسته هم اعداد صفر هم غیر صفر هستند (دوگانه)، مدل صفر متورم است. هنگامی که ما داده‌های صفر را در مدل $GWNBR$ لحاظ کنیم، مدل حاصل $GWZINBR$ نامیده می‌شود [Mahmud, Ferreira,] [Hoque, & Tavassoli, 2019] روند تبدیل توزیع دو جمله‌ای منفی وزن‌دار جغرافیایی به حالت صفر متورم مشابه توزیع رگرسیون پواسن وزن‌دار جغرافیایی به حالت صفر متورم است باید اشاره گردد پهنای باند بهینه بر اساس آزمایش‌های متعدد انتخاب شده است تا اطمینان حاصل شود که فضاهای خالی خارج از موقعیت تصادف محدوده مورد مطالعه است. در این مطالعه جهت یافتن $GWZINBR$ از زبان برنامه نویسی R و نرم افزار $GWR4$ و $ArcGis$ نسخه ۱۰٫۲ استفاده شده است تا علاوه بر مدل‌سازی امکان تجسم روابط مکانی نیز فراهم گردد.

۳-۳-۳ گام سوم

۳-۳-۳-۱ صحت سنجی مدل‌ها

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های GWR از سه آماره برای اندازه‌گیری دقت برآورد استفاده شده است که ابتدا از AIC به عنوان نیکویی برازش استفاده شده است که مقدار کمترین این معیار AIC ، نشان دهنده نیکویی برازش مدل است [Bozdogan, 1987]. معیار AIC به شرح زیر تعریف شده است:

$$AIC = D + 2k,$$

$$AIC_c = -2L(\beta, \alpha) + 2K + \frac{2K(K+1)}{n-k-1}, \quad (9)$$

et al. 2017. Chimba, 2018 این مطالعه در دو گام شامل (۱) شناسایی متغیرهای رویارویی عابرین پیاده و (۲) بررسی ارتباط فضایی-مکانی بین متغیرها و پیش‌بینی فضایی تصادف در سطح TAZ انجام شده است. برای استخراج و پردازش داده‌ها برای گام اول (شناسایی متغیرهای جایگزین) از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نرم افزار SPSS و R، برای گام دوم (شناسایی نواحی پر تصادف بر اساس تصادفات مشاهده شده و پیش‌بینی تصادف بر اساس نتایج گام اول) از GWR4 استفاده شد. ادغام بانک اطلاعاتی با کلیه اطلاعات جمع‌آوری شده در TAZ ها، با کمک ابزارهای استاندارد در GIS انجام می‌شود که امکان جستجوی فضایی، اضافه کردن لایه‌ها و عملیات مکانی را بر اساس رابطه توپولوژیکی انجام می‌دهند.

در جدول (۲) مجموعه داده‌های تصادف عابرین پیاده شهر تهران نشان داده شده که شامل ۱۲۳۱ مورد مشاهده شده است. همچنین متغیرهای توصیفی به سه دسته "جمعیت شناختی و اجتماعی-اقتصادی"، "کاربری اراضی" و "ترافیک و هندسه" طبقه‌بندی شدند که از ۲۵ متغیر جمع‌آوری شده در نهایت ۱۵ متغیر بر اساس نتایج گام اول مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. معابر شهر تهران شامل معابر شریانی و پخش کننده برای تجزیه و تحلیل استفاده شده است. داده‌ها از منابع مختلف جمع‌آوری شده‌اند.

همبستگی بین متغیرهای توصیفی مورد استفاده در مدل توییت (مدل منتخب بر اساس نتایج گام اول مطالعه) قبل از فرایند مدل‌سازی بررسی گردید. هر جفت متغیر که ضریب همبستگی بالاتر از ۰٫۶ داشته باشند، به طور هم‌زمان در مدل‌ها قرار نمی‌گیرند [J. Lee et al., 2018] در فرایند مدل‌سازی، ابتدا متغیرهای توصیفی با کمترین مقدار همبستگی در مدل قرار گرفته و همچنین متغیرهایی با ارزش همبستگی نسبتاً کمتر در مدل ترجیح داده شده‌اند (جدول ۱ و ۲) در بررسی صورت گرفته بیشترین همبستگی متغیرهای مستقل با متغیر جمعیت افراد زیر ۱۰ سال (TP_0)، متوسط عرض پیاده‌رو (PP)، متوسط سرعت (SA) بوده است اما از آنجائیکه متغیر TP_0 در تصادفات عابرین پیاده نقش

تحلیل می‌توان کل شهر را به واحدهای مساوی تقسیم کرد اما به دلیل عدم پراکندگی همسان تصادفات عابر پیاده، بسیاری از نواحی همسان دارای تصادف مشاهده شده صفر خواهد بود.

این پژوهش یک مطالعه مقطعی از نوع مشاهده‌ای می‌باشد از آنجایی که در مطالعات مقطعی روابط علیتی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد [Savitz DA, Wellenius GA, 2022] بنابراین تمرکز این مطالعه بر استفاده از متغیرهای مستقل مطالعات پیشین بر فراوانی تصادفات بوده است که به عنوان متغیرهای رویارویی تاثیر گذار در برآورد فراوانی تصادفات معرفی گردیده اند [Liu, J et al, 2017., Lee, c et al, 2005., Gomes et al, 2019]. همچنین ویژگی TAZ هایی که برای تحلیل تصادف انتخاب شده است شامل تمامی متغیرهای جدول ۲ می‌باشد. متغیر داده‌های تصادف (CR) کل تصادفات عابر پیاده در سطح شهر تهران را نشان می‌دهد. تراکم تعداد دوربین‌های کنترل سرعت (TCA)، یک عامل خطر در محل نصب آن‌ها را نشان می‌دهد، زیرا این دستگاه‌ها معمولاً در مکان‌هایی نصب می‌شوند که رانندگان نیاز به تمرکز بیشتر داشته و خطر تصادف جاده‌ای بیشتر است [Gomes, Cunto, & da Silva, 2017] از آنجایی که حجم زیادی از عابرین پیاده در یک مکان سوار و پیاده می‌شوند و تعدادی از آن‌ها تمایل به عبور از عرض خیابان را دارند می‌تواند یک عامل خطر باشد [J. Lee et al., 2018] وجود مدارس (SC) یکی از مهم‌ترین مکان‌های جذب سفر عابر پیاده است بنابراین در ساعاتی از روز وجود مدارس در TAZ ها عامل خطر تصادف عابر پیاده می‌باشد [J. Lee et al., 2018]. وجود پل عابر پیاده (PE) بر اساس مطالعات انجام گرفته باعث بهبود ایمنی عابر پیاده در برخورد با خودرو می‌گردد [J. Lee et al., 2018] همچنین، وجود تقاطع‌ها در هر ناحیه خطر برخورد عابر پیاده را بیشتر می‌کند. بدیهی است که تراکم جمعیت (TP_0) به متر مربع در هر ناحیه و همچنین تراکم جمعیت افراد آسیب‌پذیر (TP_1 , TP_2) خطر برخورد عابر پیاده را افزایش می‌دهد [Gomes, Lee, 2018]

رویکرد مبتنی بر مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در پیش‌بینی تصادفات عابران پیاده با استفاده از متغیرهای رویارویی و محیطی

بسزایی دارد از مدل حذف نشده اما پایین‌ترین الویت به آن داده

شده است اما دو متغیر PP و SA وارد مدل نشده اند.

جدول ۲. توضیحات متغیرها

نام متغیر	توضیحات
داده‌های تصادف (CR)	اطلاعات تصادف عابرین پیاده از سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ شهر تهران
ایستگاه اتوبوس (BS)	موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس در وضع موجود و طرح تفصیلی شهر تهران
مدارس (SC)	موقعیت مدارس تمامی نواحی شهر تهران اعم از مدارس وضع موجود و طرح تفصیلی
پل عابر پیاده (PE)	موقعیت پل عابر پیاده در هر ناحیه
تقاطعات (TS)	موقعیت تمام تقاطعات کنترل شده و کنترل نشده همسطح شهری
کل جمعیت ناحیه (TP0)	بر اساس آخرین سرشماری ۱۳۹۵ کشور ایران
جمعیت کودکان ناحیه (TP1)	بر اساس آخرین سرشماری ۱۳۹۵ کشور ایران
جمعیت افراد مسن (TP2)	بر اساس آخرین سرشماری ۱۳۹۵ کشور ایران
تعداد موتورسیکلت (TM)	بر اساس اطلاعات ثبت شده در سرشماری ۱۳۹۵ و پلاک‌های ثبت شده در پایگاه پلیس
تعداد خودرو (TC)	بر اساس اطلاعات ثبت شده در سرشماری ۱۳۹۵ و پلاک‌های ثبت شده در پایگاه پلیس
نوع کاربری مسکونی (RE)	برداشت اطلاعات توسط کارشناسان شهرداری تهران سال ۱۳۹۶
نوع کاربری تجاری (BU)	برداشت اطلاعات توسط کارشناسان شهرداری تهران سال ۱۳۹۶
نوع کاربری تفریحی (RCE)	برداشت اطلاعات توسط کارشناسان شهرداری تهران سال ۱۳۹۶
متوسط عرض معبر (AW)	بر اساس لایه‌های GIS معاونت شهرسازی شهرداری تهران
متوسط تعداد خطوط (AL)	بر اساس لایه‌های GIS معاونت شهرسازی شهرداری تهران
متوسط طول رفوژ میانی (TR)	بر اساس لایه‌های GIS معاونت شهرسازی شهرداری تهران
متوسط عرض پیاده‌رو (PP)	متوسط عرض پیاده‌رو در هر TAZ بر اساس گوگل ارث
متوسط سرعت (SA)	بر اساس اطلاعات مرکز کنترل ترافیک شهرداری تهران
متوسط شیب معبر (AS)	بر اساس لایه‌های GIS معاونت شهرسازی شهرداری تهران
دوربین کنترل سرعت (TCA)	بر اساس اطلاعات مرکز کنترل ترافیک شهرداری تهران

سید احمد الماسی، حمیدرضا بهنود، آرزو حاجرجبی

جدول ۳. میزان همبستگی بین متغیرهای رویارویی تصادف عابر پیاده

	correlation	SC	BS	PE	TS	TP0	TP1	TP2	TM	TC	RE	BU	REC	AW	AL	TR	AS	TCA
SC	Pearson	1																
	Sig																	
BS	Pearson	•/54**	1															
	Sig	•/00																
PE	Pearson	•/39**	•/40**	1														
	/Sig	•/00	•/••															
TS	Pearson	•/36**	•/41**	•/21**	1													
	Sig	•/00	•/00	•/00														
TP0	Pearson	•/63**	•/60**	•/47**	•/37**	1												
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00													
TP1	Pearson	•/56**	•/36**	•/43**	•/29**	•/92**	1											
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00												
TP2	Pearson	•/58**	•/43**	•/31**	•/31**	•/85**	•/67**	1										
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00											
TM	Pearson	•/38**	•/22**	•/16**	•/09*	•/63**	•/53**	•/47**	1									
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00										
TC	Pearson	•/37**	•/60**	0/48**	0/39**	0/90**	0/58**	0/48**	0/39**	1								
	/Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00									
RE	Pearson	/27**	/07	/03	/11**	/38**	/30**	/46**	/45**	/27**	1							
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00								
BU	Pearson	/20**	/32**	/22**	/10*	/28**	/23**	/29**	/06	/28**	/00	1						
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/07							
REC	Pearson	/37**	/30**	/22**	/32**	/36**	/22**	/45**	/14**	/35**	/46**	/10**	1					
	Sig	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/00	•/01						
AW	Pearson	/12**	/01	-/01	/10*	/20**	/22**	/18**	/29**	/10*	/34**	/01	/12**	1				
	/Sig	•/00	•/01	•/04	•/01	•/00	•/00	•/00	•/00	•/01	•/00	•/58	•/00					
AL	Pearson	0/04	0/07	0/05	0/16**	0/07	-0/01	0/15**	0/20**	0/20**	0/20**	-0/03	0/00	0/41**	1			
	/Sig	0/31	0/09	0/03	0/00	0/06	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/07	0/03	0/00				

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره اول (۵۸) / پاییز ۱۴۰۲

رویکرد مبتنی بر مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در پیش‌بینی تصادفات عابران پیاده با استفاده از متغیرهای رویارویی و محیطی

TR	Pearson	0/42**	0/65**	0/65**	0/44**	0/58**	0/46**	0/50**	0/11**	0/65**	0/13**	0/23**	0/33**	0/03	0/20**	1		
	/Sig	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/00	0/01	0/00	0/00	0/04	0/00			
AS	Pearson	-0/02	0/05	-0/01	0/02	0/04	0/10**	0/21**	0/27**	0/20**	0/07	0/07	0/11**	0/04	0/38**	0/16**	1	
	Sig	0/08	0/22	0/01	0/00	0/04	0/01	0/00	0/00	0/00	0/06	0/09	0/00	0/02	0/00	0/00		
TCA	Pearson	0/28**	0/58**	0/57**	0/24**	0/40**	0/33**	0/31**	0/02	0/45**	0/00	0/31**	0/19**	0/02	0/14**	0/56**	0/09*	1
	Sig	0/00	0/00	0/00	0/00	0/000	0/00	0/00	0/51	0/00	0/98	0/00	0/00	0/02	0/00	0/000	0/02	
	N	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560
**/ Correlation is significant at the 0/001 level (2-tailed)/																		
*/ Correlation is significant at the 0/005 level (2-tailed)/																		

۴. نتایج مدل‌ها

[J. Lee et al., 2018]. جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل تویبت

با استفاده از تمام متغیرها با کمترین مقادیر MAE و RMSE بهترین عملکرد را دارد. مدل تویبت همچنین هرگونه تصادف منفی پیش‌بینی شده عابر پیاده را با استفاده از متغیرهای رویارویی، برابر با مقدار صفر نشان می‌دهد، زیرا حد پایین در صفر تعیین شده است.

در مجموع شش مدل رویارویی در این مطالعه ایجاد شده است. از آنجا که از دو روش مدل‌سازی متفاوت استفاده شده است (GLM در مقابل تویبت) برای یافتن بهترین مدل، مقایسه معیار اطلاعات (AIC) به تنهایی مناسب نیست. از این‌رو برای مقایسه مدل‌ها، MAE و RMSE برای هر مدل استفاده گردیده است.

جدول ۴. مقایسه مدل‌های رویارویی توسعه داده شده

Model Type (Exposure)	MAE	RMSE
Exposure Model (GLM) Using All Variables	26/91	40/12
Exposure Model (GLM) Using PCA Variables	37/21	49/26
Exposure Model (Tobit) Using All Variables	22/69	37/99
Exposure Model (GLM) Using Random Forests Variables	31/06	42/40
Exposure Model (Tobit) Using RF Variables	33/76	42/43
Exposure Model (Tobit) Using PCA Variables	30/61	43/24

متوسط فراوانی تصادفات به میزان ۰/۱۸۹ افزایش می‌یابد، افزایش هر ایستگاه اتوبوس باعث افزایش فراوانی تصادفات به میزان ۰/۰۳۸ خواهد شد، افزایش یک پل عابر پیاده ۰/۰۱۷- فراوانی تصادف عابر پیاده را کاهش می‌دهد، یک دوربین کنترل سرعت به طور متوسط در هر TAZ به میزان ۰/۳۱۴- تصادف عابر پیاده را کاهش می‌دهد تأثیر سایر متغیرهای مستقل بر فراوانی تصادفات عابر پیاده در جدول ۵-۷ آورده شده است. در شکل ۱ فراوانی متغیرهای رویارویی عابران پیاده در سطح TAZ نشان داده شده است. همچنین شکل ۲ نقشه فراوانی تصادفات پیش‌بینی شده عابر پیاده شهر تهران مربوط به برآورد پارامترهای مؤثر در تصادف بر اساس ۶ مدل آمار فضایی را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج مطالعه تراکم جمعیت دارای ارتباط منفی با افزایش تصادف است. مدل پیش‌بینی می‌کند که با افزایش تراکم جمعیت، تصادف کاهش می‌یابد بنابراین تأثیر تراکم جمعیت کاملاً مشهود بوده و با مطالعات قبلی مطابقت دارد [Marshall & Ferencsak, 2017]. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته توسط نویسندگان مطالعه حاضر دلیل تأثیر تراکم جمعیت بر افزایش فراوانی تصادفات می‌تواند این باشد که در مناطق مسکونی بدون

بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ در شهر تهران ۱۲۲۸ تصادف عابر پیاده گزارش شده است که در آن ۴۴ نفر فوت و ۱۱۸۴ نفر مجروح شده‌اند. در مجموع ۴۹۷۹ مدرسه، ۴۸۳۱ ایستگاه اتوبوس، ۹۲۷ پل عابر پیاده، ۸۰۱ تقاطع چراغ‌دار و ۵۳۸۶ دوربین کنترل ترافیک واقع در ۵۶۰ TAZ مختلف در این تحلیل گنجانده شده است (جدول ۲) که به طور متوسط تعداد این متغیرها بین ۰ تا ۸۰ در سطح کل TAZ ها متفاوت است. این محک اولیه نشان می‌دهد که بر اساس مطالعات گذشته تفاوت بین پراکندگی متغیرهای رویارویی در سطح TAZ ها معنادار است [Özbil Torun- 2020] نتایج مدل‌های GWR، GWGR، GWPR، ZIGWPR، ZIGWNBR و ZIGWNBR به ترتیب در جدول ۵ تا ۷ و نتایج صحت سنجی مدل‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب توزیع فراوانی متغیرهای رویارویی در سطح TAZ، نقشه پیش‌بینی فراوانی تصادف بر اساس مدل‌های مذکور را نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده مدل ZIGWNBR و ZIGWPR دقت بالاتری در پیش‌بینی تصادف بر اساس متغیرهای رویارویی دارد بر اساس نتایج جدول ۸ با افزایش تعداد یک مدرسه در هر TAZ به طور

تراکم تصادف در مدل GWPR داشته است. علامت منفی استفاده کنندگان از موتور سیکلت بر افزایش تصادف عابر پیاده می‌تواند به دلیل افزایش سفر با شیوه موتورسیکلت باشد و تعداد سفر عابرین پیاده کاهش یافته باشد. در این مطالعه متغیرهای تعداد مدارس، تعداد تقاطع‌ها، پل عابر پیاده با علامت مثبت نشان داده شده‌اند که تأثیر تقاطع‌ها در تصادف عابر پیاده قابل توجه نیست اما تأثیر مثبت در ایجاد تصادف دارد که مطالعه [J. Lee et al., 2018]. آن را تأیید می‌کند. به دلیل وجود والدین و فرزندان در مسیر مدرسه، فعالیت پیاده‌روی بیشتری در TAZ هایی که تعداد مدارس بیشتری دارد وجود دارد. خانوارهایی که کمتر از دو وسیله نقلیه دارند (۰ یا ۱ وسیله نقلیه) منبع مهم دیگری برای فعالیت عابران پیاده است. مالکیت خودرو مستقیماً با سطح درآمد خانوار مرتبط است که منعکس کننده تأثیر اقتصادی - اجتماعی بر فعالیت عابران پیاده است [J. Lee et al., 2018]. بدیهی است که اعضای خانواده بدون وسیله نقلیه نیازهای حمل‌ونقل خود را از طریق حمل‌ونقل عمومی یا پیاده‌روی برآورده می‌کنند. از طرفی میزان مالکیت خودرو در TAZ نیز تأثیر بسزایی در افزایش رویارویی عابرین پیاده دارد. البته تصادف ممکن است با وسایل نقلیه‌ای روی دهد که خارج از TAZ بوده و طی سفر کاری در TAZ های مختلف با عابر پیاده برخورد داشته باشند. در این مطالعه متغیر TC متغیر مالکیت خودرو در محدوده مطالعه است که با در نظر گرفتن دو عامل مذکور، نتایج مدل نشان می‌دهد تأثیر مثبت بر رویارویی عابر پیاده دارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این مطالعه متوسط عرض پیاده‌رو تأثیر منفی بر رویارویی عابر پیاده داشته و باعث تصادف نمی‌گردد که با مطالعات گذشته همخوانی دارد [Bricka, 2014; Khattak & Rodriguez, 2005; J. Lee et al., 2018]. این یافته‌ها همچنین مطابق با مطالعات انجام شده بر روی عوامل انسانی است که نشان می‌دهد برخی از گروه‌ها (به عنوان مثال درآمد پایین و سرانه کم خودرو، تحصیلات پایین، کاربران جوان معابر شهری) بیشتر مستعد رفتارهای ناهنجار هستند [Davey, Wishart, Freeman, & Watson, 2018].

کاربری تجاری و رفاهی به دلیل سرعت پایین وسایل نقلیه و وجود سرعت‌گیر و همچنین عوارض حواس پرت کننده، تراکم تصادف کاهش یافته است. به طور کلی در این مطالعه نتایج مدل GWPR نشان می‌دهد که وجود ایستگاه اتوبوس، تراکم جمعیت، نوع کاربری مسکونی، متوسط تعداد خطوط، تعداد دوربین کنترل ترافیک و عرض پیاده‌رو تأثیر منفی بر افزایش تعداد تصادف دارد. در مدل GWR تعداد موتورسیکلت، کاربری مسکونی، کاربری تفریحی، متوسط تعداد خطوط و تعداد دوربین کنترل سرعت در TAZ تأثیر منفی در افزایش تصادف عابر پیاده دارد. همچنین در مدل GWGR تعداد ایستگاه اتوبوس، تراکم جمعیت، تراکم کاربری مسکونی، متوسط تعداد خطوط و تعداد دوربین کنترل سرعت تأثیر منفی در افزایش تصادف دارد. لازم به ذکر است در سه مدل قید شده ارتباط معناداری بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل به دست آمده است که مطالعات قبلی این ارتباط را تأیید کرده است [Dong, Huang, Lee, Gao, & Abdel-Aty, 2016; Gomes et al., 2017; Wier, Weintraub, Humphreys, Seto, & Bhatia, 2009].

یکی از توضیحات برای نشانه منفی ایستگاه اتوبوس در معابر شهری می‌تواند کاهش حجم وسایل نقلیه موتوری در اطراف آن منطقه مسکونی باشد که باعث کاهش درگیری ترافیکی و در نهایت فرار گرفتن در معرض ترافیک موتوری سایر ساکنین می‌شود [Hezaveh et al., 2019; J. Lee et al., 2018]. [Hezaveh, 2019] از طرف دیگر، طراحی ضعیف یک شبکه چند حالته می‌تواند تأثیر منفی بر ایمنی کاربران غیر موتوری و حمل‌ونقل عمومی بگذارد. تفاوت بین علائم ضرایب برآورد شده در چند مدل مختلف نیاز به جزئیات بیشتر در مطالعات آینده دارد. ممکن است انتظار داشته باشیم که افراد مسن به دلیل آسیب‌پذیری از شدت صدمات بیشتری رنج ببرند [Hezaveh et al., 2019]. برعکس، افراد سالخورده نسبت به سایر گروه‌ها میزان سفر کمتری دارند [Bricka, 2014] در نتیجه، در این مطالعه درصد افراد سالخورده نسبت به سایر گروه‌های سنی تأثیر منفی بر افزایش

مطالعه) بوده است. از بین شش مدل جهانی و مدل‌های محلی با در نظر گرفتن پیش فرض‌های مدل، مدل‌های ZIGWPR و ZIGWNBR فرضیه H_0 را با سطح معناداری قابل قبول رد کرده و نشان داده‌اند که در هریک از حالت‌ها مقادیر میانگین فراوانی تصادف در مناطق ۲۲ گانه در طول ۲ سال مطالعه یکسان نمی‌باشد. همچنین بررسی مقدار MS در هریک از حالت‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های محلی تخمین بهتری نسبت به مدل‌های جهانی برای آزمون‌های آماری مانند فرضیه ANOVA را از خود نشان می‌دهد (هرچه مقدار MS کمتر باشد تخمین نتایج بهینه‌تر صورت می‌پذیرد). یکی از مهم‌ترین نتایج این مطالعه بدست آوردن مقدار پارامتر بیش پراکندگی در هریک از مدل‌های محلی است. به دلیل ماهیت پراکندگی داده‌های تصادف مورد مطالعه مقدار بیش پراکندگی در هریک از مدل‌ها تقریباً بین ۱,۵ تا ۲ متغیر بوده است اما این مقادیر در حالت صفر متورم هر دو مدل از این حد فراتر رفته و به بازه ۱,۵ تا ۳ رسیده است.

2007; Hezaveh et al., 2019; Nordfjærn, Hezaveh, & Mamdoohi, 2015; Özkan, Lajunen, & Chliaoutakis, Parker, & Summala, 2006]. بر اساس نتایج مدل‌سازی، تأثیر شیب و متوسط عرض معبر بر تصادف مثبت است و دلیلش می‌تواند این باشد که عابرین پیاده در معابر با عرض بیشتر باید مسافت بیشتری را طی کنند تا به طرف دیگر خیابان بروند بنابراین بیشتر در محیط عبور وسایل نقلیه قرار می‌گیرند. همچنین شیب متوسط به دلیل کنترل سخت‌تر وسایل نقلیه در شرایط آب و هوایی نامناسب تأثیر مثبتی نسبت به معابر با شیب صفر در تصادف عابر پیاده داشته است.

در این مطالعه همچنین به منظور بررسی فرض ثابت بودن میانگین تعداد تصادفات در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران در طول ۲ سال در حالت محلی و جهانی از جدول ANOVA (جدول ۹) استفاده گردید. هدف این تست بررسی تأثیر میزان خطا در نتایج فرضیه H_0 (برابری میانگین تصادف در مناطق ۲۲ گانه در طول ۲ سال

جدول ۵. نتایج مدل GWPR و GWNBR با استفاده از متغیرهای رویارویی عابرین پیاده

Model	GWPR				GWNBR				
	ضرایب	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value
(Intercept)		-۰,۰۲۹	۱۳۱۹,۰۰۰	-۳۸,۶۸۰	۰,۹۷۷	-۰,۰۲۹	۱۳۰۷,۰۰۰	-۳۸,۳۸۰	۰,۹۷۸
SC		۰,۰۱۲	۱۶,۳۶۰	۰,۲۰۴	۰,۹۹۰	۰,۰۱۲	۱۶,۳۶۰	۰,۲۰۱	۰,۹۹۱
BS		۰,۰۰۸	۱۴,۳۴۰	۰,۱۲۰	۰,۹۹۳	۰,۰۰۸	۱۴,۱۱۰	۰,۱۱۸	۰,۹۹۴
PE		-۰,۰۲۵	۵۲,۹۹۰	-۱,۳۱۶	۰,۹۸۰	-۰,۰۲۵	۵۱,۴۹۰	-۱,۳۰۶	۰,۹۸۱
TS		-۰,۰۴۱	۱۰۸,۵۰۰	-۴,۴۸۴	۰,۹۶۷	-۰,۰۴۱	۱۰۷,۸۰۰	-۴,۴۶۸	۰,۹۶۹
TP0		۰,۰۰۳	۰,۰۸۹	۰,۰۰۰	۰,۹۹۸	۰,۰۰۲	۰,۰۹۰	۰,۰۰۰	۰,۹۹۸
TP1		-۰,۰۲۲	۰,۱۷۸	-۰,۰۰۴	۰,۹۸۳	-۰,۰۲۱	۰,۱۷۹	-۰,۰۰۴	۰,۹۸۴
TP2		-۰,۰۳۲	۰,۳۴۰	-۰,۰۱۱	۰,۹۷۵	-۰,۰۳۲	۰,۳۴۳	-۰,۰۱۱	۰,۹۷۶
TM		۰,۰۰۸	۰,۹۱۳	۰,۰۰۸	۰,۹۹۳	۰,۰۰۸	۰,۹۲۴	۰,۰۰۸	۰,۹۹۴
TC		۰,۰۰۴	۱,۶۵۶	۰,۰۰۶	۰,۹۹۷	۰,۰۰۳	۱,۶۷۷	۰,۰۰۶	۰,۹۹۷
RE		-۰,۰۳۶	۱,۰۱۹	-۰,۰۳۷	۰,۹۷۱	-۰,۰۳۶	۱,۰۲۷	-۰,۰۳۶	۰,۹۷۳
BU		۰,۰۱۸	۱,۴۲۳	۰,۰۲۶	۰,۹۸۶	۰,۰۱۸	۱,۳۹۵	۰,۰۲۶	۰,۹۸۶
REC		-۰,۰۰۷	۶,۶۰۰	-۰,۰۴۵	۰,۹۹۵	-۰,۰۰۷	۶,۶۹۱	-۰,۰۴۴	۰,۹۹۵

رویکرد مبتنی بر مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در پیش‌بینی تصادفات عابران پیاده با استفاده از متغیرهای رویارویی و محیطی

Model	GWPR				GWNBR				
	ضرایب	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value
AW		۰,۰۲۸	۱۴۲,۳۰۰	۳,۹۱۶	۰,۹۷۸	۰,۰۲۸	۱۴۱,۲۰۰	۳,۸۸۴	۰,۹۷۹
TR		۰,۰۰۸	۹,۶۱۸	۰,۰۷۷	۰,۹۹۴	۰,۰۰۸	۹,۷۰۴	۰,۰۷۵	۰,۹۹۴
AS		۰,۰۳۴-	۶۶,۶۳۰	۲,۲۷۲-	۰,۹۷۳	۰,۰۳۴-	۶۶,۱۶۰	۲,۲۶۵-	۰,۹۷۴
TCA		۰,۰۲۶	۱۵,۸۷۰	۰,۴۲۰	۰,۹۷۹	۰,۰۲۶	۱۶,۰۱۰	۰,۴۲۲	۰,۹۸۰
DNeighbour		۰,۰۰۲-	۰,۰۴۷	۰,۰۰۰	۰,۹۹۸	۰,۰۰۲-	۰,۰۴۶	۰,۰۰۰	۰,۹۹۸

جدول ۶. نتایج مدل‌سازی ZIGWPR با استفاده از متغیرهای رویارویی عابرین پیاده

Model	قسمت رگرسیون				قسمت صفر انباشته				
	ضرایب	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value
(Intercept)		-۰,۳۴۸	۸,۸۶۹	-۳,۰۸۸	۰,۷۳۰	۳,۲۲۸	۲۸,۲۴۰	۹۱,۱۷۰	۰,۰۰۲
SC		-۰,۸۸۷	۰,۰۹۷	-۰,۰۸۶	۰,۳۸۰	-۲۸,۴۶۲	۰,۳۱۹	-۹,۰۶۵	۰,۰۰۰
BS		-۰,۸۴۹	۰,۰۷۸	-۰,۰۶۷	۰,۴۰۱	۳۷,۳۶۵	۰,۱۶۶	۶,۲۰۳	۰,۰۰۰
PE		۰,۹۸۴	۰,۳۲۲	۰,۳۱۶	۰,۳۳۱	۱۱,۸۳۶	۰,۴۷۹	۵,۶۶۳	۰,۰۰۰
TS		۰,۸۸۴	۰,۴۳۳	۰,۳۸۳	۰,۳۸۲	-۲۷,۴۴۷	۱,۷۴۵	-۴۷,۹۰۰	۰,۰۰۰
TP0		-۲,۱۷۱	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۳۶	-۲۵۷,۸۰۴	۰,۰۰۰	-۰,۱۲۰	۰,۰۰۰
TP1		۱,۹۱۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۶۳	۱۲۴,۴۶۸	۰,۰۰۳	۰,۳۵۷	۰,۰۰۰
TP2		۱,۲۸۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۲۰	۱۵۵,۲۵۰	۰,۰۰۴	۰,۵۸۶	۰,۰۰۰
TM		-۰,۳۰۶	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۷۶۱	۷,۶۴۱	۰,۰۰۴	۰,۰۲۸	۰,۰۰۰
TC		-۰,۴۹۱	۰,۰۰۳	-۰,۰۰۲	۰,۶۲۶	۳۴,۸۹۵	۰,۰۰۷	۰,۲۴۵	۰,۰۰۰
RE		-۰,۶۱۸	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰	۰,۵۴۰	-۷۵,۲۰۲	۰,۰۰۱	-۰,۱۰۳	۰,۰۰۰
BU		-۱,۴۸۵	۰,۰۰۶	-۰,۰۰۹	۰,۱۴۵	۵۷,۶۲۹	۰,۰۰۹	۰,۵۴۱	۰,۰۰۰
REC		۰,۴۵۶	۰,۰۲۲	۰,۰۱۰	۰,۶۵۱	۱۵,۲۷۹	۰,۰۵۴	۰,۸۱۸	۰,۰۰۰
AW		۰,۱۵۵	۰,۹۱۹	۰,۱۴۲	۰,۸۷۸	-۶,۶۴۸	۲,۴۷۷	-۱۶,۴۷۰	۰,۰۰۰
TR		-۰,۰۴۰	۰,۰۵۴	-۰,۰۰۲	۰,۹۶۸	۳۲,۸۴۳	۰,۱۷۱	۵,۶۱۵	۰,۰۰۰
AS		۰,۲۵۰	۱,۱۳۰	۰,۲۸۳	۰,۸۰۴	-۱۴,۸۵۷	۱,۹۱۰	-۲۸,۳۷۰	۰,۰۰۰
TCA		۱,۰۵۶	۰,۰۶۲	۰,۰۶۵	۰,۲۹۷	-۴۳,۴۴۶	۰,۱۴۵	-۶,۲۹۵	۰,۰۰۰
DNeighbour		۰,۶۹۶	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۴۹۰	۲۱,۷۸۱	۰,۰۰۱	۰,۰۲۴	۰,۰۰۰

جدول ۷. نتایج مدل‌سازی ZIGWNBK به منظور پیش‌بینی فراوانی تصادفات عابر پیاده

Model	قسمت رگرسیون				قسمت صفر انباشته				
	ضرایب	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value	آماره t	خطای استاندارد	برآورد	P_value
(Intercept)		۲۴۵۲,۷۰۰	۰,۱۶۷	۴۰۹,۲۰۰	۰,۰۰۰	۰,۸۹۸	۴,۴۵۳	۱۹۱,۴۰۰-	۰,۳۷۰
SC		-۷۰۹,۴۰۰	۰,۰۱۴	۱۰,۰۸۰-	۰,۰۰۰	۱,۶۸۹-	۰,۰۹۰	۲,۵۰۵-	۰,۰۹۲
BS		-۶۰۸,۹۰۰	۰,۰۰۹	-۵,۵۳۶	۰,۰۰۰	۰,۸۹۳	۰,۰۵۴	-۱,۴۵۳	۰,۳۷۲
PE		۹۳۰,۰۰۰	۰,۰۳۱	۲۸,۷۱۰	۰,۰۰۰	۲,۵۹۱	۰,۲۷۲	۱۲,۲۶۰	۰,۰۱۰
TS		۷۰۷,۸۰۰	۰,۱۴۲	۱۰۰,۶۰۰	۰,۰۰۰	۱,۵۱۷	۰,۲۲۷	۳۰,۰۹۰	۰,۱۳۰
TP0		-۳۳۸۳,۷۰۰	۰,۰۰۰	-۰,۰۲۰	۰,۰۰۰	۲,۱۶۵	۰,۰۰۰	-۰,۰۰۱	۰,۰۳۱
TP1		۱۶۷,۱۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۱۷	۰,۰۰۰	۰,۵۳۸	۰,۰۰۱	۰,۰۰۵	۰,۵۹۱
TP2		۷۷۲,۴۰۰	۰,۰۰۰	۰,۱۴۱	۰,۰۰۰	-۱,۴۸۷	۰,۰۰۱	۰,۰۷۴	۰,۱۳۸
TM		۵۱۸,۲۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۵۳	۰,۰۰۰	-۱,۶۱۵	۰,۰۰۱	-۰,۰۲۶	۰,۱۰۷
TC		-۵۱۶,۷۰۰	۰,۰۰۰	-۰,۱۷۶	۰,۰۰۰	-۰,۵۸۵	۰,۰۰۰	-۰,۰۵۱	۰,۵۵۹
RE		۱۵۹۱,۴۰۰	۰,۰۰۰	۰,۵۵۳	۰,۰۰۰	-۱,۳۳۳	۰,۰۰۶	۰,۱۹۰	۰,۱۸۳
BU		-۱۳۶۷,۴۰۰	۰,۰۰۱	-۱,۳۶۵	۰,۰۰۰	-۰,۵۲۶	۰,۰۰۲	-۰,۲۴۹	۰,۵۹۹
REC		۵۲۴,۳۰۰	۰,۰۰۱	۰,۵۵۶	۰,۰۰۰	-۲,۱۷۶	۰,۸۳۹	۰,۳۸۶	۰,۰۳۰
AW		-۵۵۸۹,۳۰۰	۰,۰۰۷	-۴۰,۹۷۰	۰,۰۰۰	۱,۷۳۹	۲,۲۶۰	-۱۰,۷۹۰	۰,۰۸۳
TR		-۳۱۳,۷۰۰	۰,۰۰۸	-۲,۵۰۸	۰,۰۰۰	-۲,۲۲۸	۰,۰۵۲	-۱,۰۷۰	۰,۰۲۶
AS		۶۴۲,۷۰۰	۰,۰۶۹	۴۴,۳۷۰	۰,۰۰۰	-۰,۴۶۹	۰,۱۵۱	۲۷,۱۹۰	۰,۶۳۹
TCA		۲۴۰۱,۶۰۰	۰,۰۰۳	۷,۶۶۶	۰,۰۰۰	-۳,۱۰۸	۰,۰۷۲	-۱,۸۱۴	۰,۰۰۲
DNeighbour		-۱۵۵,۶۰۰	۰,۰۰۰	-۰,۰۱۰	۰,۰۰۰	۲۱,۷۸۱	۸۷۶,۴۰۰	۰,۰۴۴	۰,۰۰۰

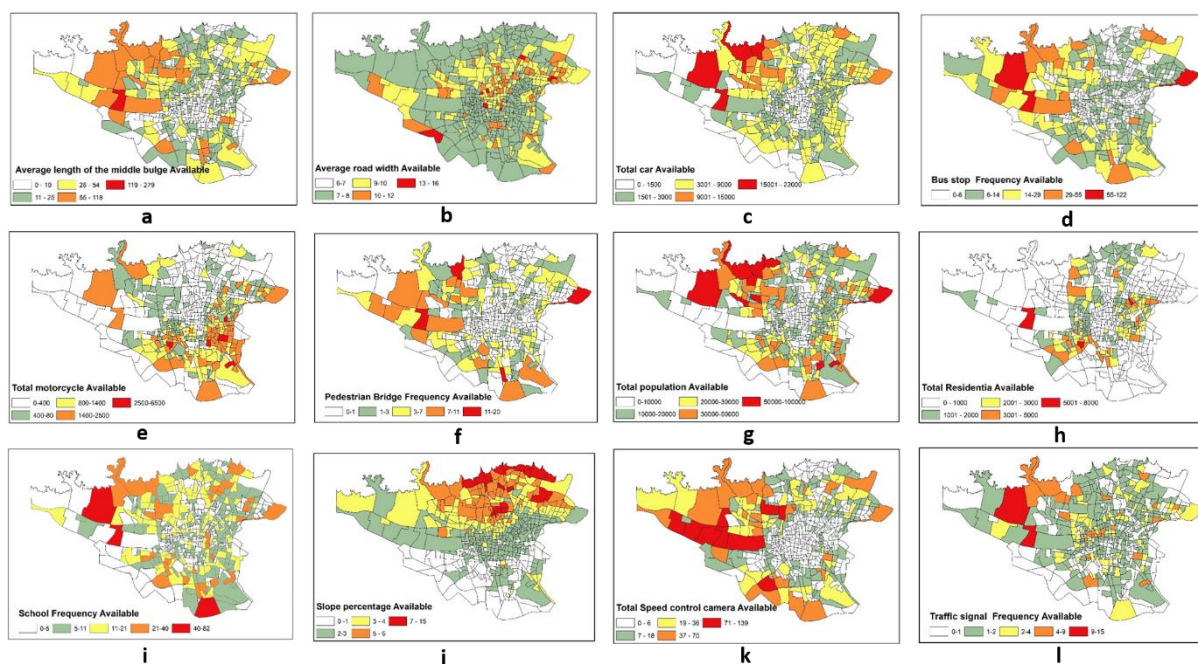
جدول ۸ نتایج صحت سنجی مدل‌ها

Models	Local Model Result					
	GWR	GWGR	GWPR	ZIGWPR	GWNBR	ZIGWNBR
Based Sigma Estimate	1/9676	2/3572	2/4282	2/6530	3/2676	3/5124
UnBased Sigma Estimate	2/1748	2/3961	2/3901	2/4921	3/1948	3/5812
-2 log-likelihood	2347/2654	2569/6562	2519/6322	2681/7522	2747/2154	2756/2154
AIC	2507/5604	2587/4516	2567/4216	2401/4026	2427/5204	2368/2154
AICc	2534/7239	2589/0339	2679/0329	2501/0259	2524/0239	2429/8512
BIC/MDL	2854/4838	2669/8567	2622/8167	2629/8371	2854/4838	2829/2514
CV	6/0549	6/3033	6/1033	7/2099	6/3179	8/254
R square	0/39	0/3562	0/4962	0/64	0/795	0/8521
Adjusted R square	0/41	0/3214	0/4714	0/62	0/781	0/8321
MAD	0/952	0/851	1/551	1/382	1/252	1/2921
RMSE	1/34	1/052	1/052	2/401	1/54	1/362
Moran's Index	0/061	0/042	0/042	0/031	0/021	0/0018
p-value	0/001>	0/001>	0/001>	0/001>	0/001>	0/001>

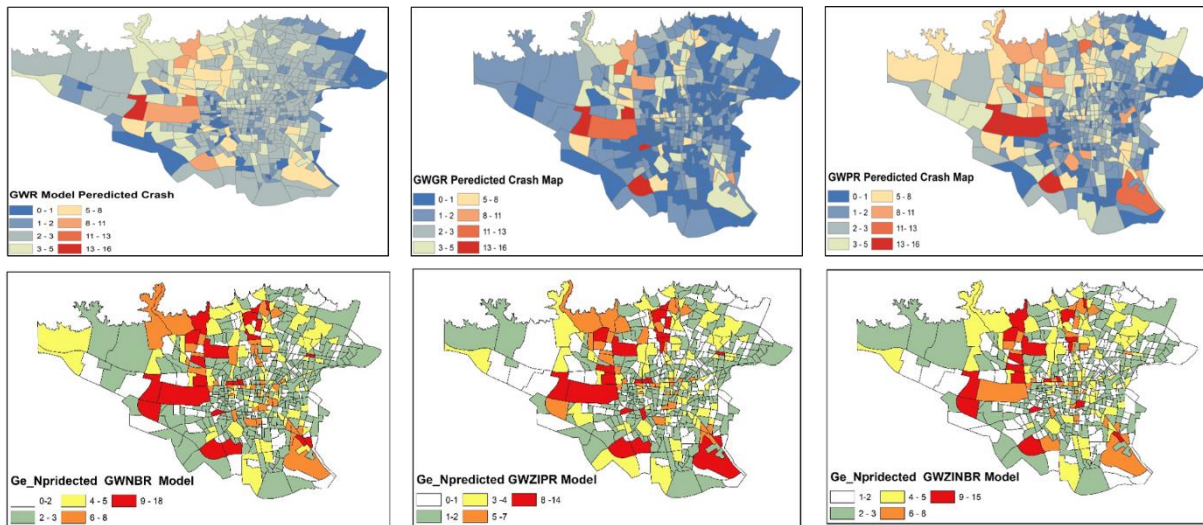
رویکرد مبتنی بر مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در پیش‌بینی تصادفات عابران پیاده با استفاده از متغیرهای رویارویی و محیطی

جدول ۹. جدول ANOVA مدل‌های جغرافیایی

Source	SS	MS	df	F	P-Value
GWR Model					
Global Residuals	3311/224	642			<0/001
GWPR Improvement	2362/057	552/2751	15/136		<0/001
GWPR Residuals	973/361	87/312	17/230	4/3481	<0/001
GWGR Model					
Global Residuals	3024/541	603			<0/001
GWPR Improvement	2271/749	452/412	15/036		<0/001
GWPR Residuals	945/745	89/418	14/741	3/985	<0/001
GWPR Model					
Global Residuals	3111/824	542			<0/001
GWPR Improvement	2168/321	258/214	8/731		<0/001
GWPR Residuals	943/125	83/012	15/74	3/386	<0/001
GWZIPR Model					
Global Residuals	2995/215	472			<0/001
ZIGWPR Improvement	1941/256	242/145	7/541		<0/001
ZIGWPR Residuals	854/218	80/241	13/572	3/154	<0/001
GWNBR Model					
Global Residuals	2952/214	425			<0/001
GWNBR Improvement	1765/321	231/614	7/154		<0/001
GWNBR Residuals	825/145	81/235	12/548	2/941	<0/001
GWZINBR Model					
Global Residuals	2983/215	402/145			<0/001
ZIGWNB Improvement	1845/654	245/173	6/974		<0/001
ZIGWNB Residuals	805/412	82/142	11/542	2/991	<0/001



شکل ۱. توزیع فراوانی متغیرهای رویارویی جغرافیایی تصادف عابر پیاده



شکل ۲. نمایش پیش‌بینی فراوانی تصادفات عابر پیاده بر اساس ۶ مدل آمار فضایی

تعداد دوربین‌های کنترل سرعت از دیگر متغیرهای مهم در این مطالعه است. در این مطالعه تأکید می‌گردد ضمن تأمین اقدامات ایمنی عابران پیاده بر مواردی از قبیل بهبود آرام‌سازی ترافیکی در نواحی دارای تراکم بالای مدارس و همچنین مدارس در محدوده تقاطعات انجام گیرد و در ناحیه‌هایی که ایستگاه اتوبوس بیشتری دارد عرض پیاده‌رو افزایش یابد، چراکه در مناطقی که عمده شیوه حملی و نقلی اتوبوس است، تمایل به پیاده‌روی و به تبع آن قرار گرفتن عابران پیاده در معرض تصادف وجود دارد.

روش پیشنهادی دو مرحله‌ای در این مطالعه شامل دو فرایند مدل‌سازی متوالی است. مدل اول متغیرهای رویارویی تأثیرگذار در تصادف عابر پیاده را شناسایی می‌کند و مدل دوم تعداد تصادفات عابر پیاده تخمین می‌زند. با این وجود، این روند محدودیتی دارد زیرا نتیجه آن می‌تواند تحت تأثیر خطاهای انباشته شده در مرحله اول به دلیل جود متغیر مخدوشگر غیرقابل کنترل و همچنین تورش اطلاعات^{۳۳} باشد. این امکان وجود دارد که با اتخاذ رویکرد مدل‌سازی هم‌زمان، مسئله برطرف شود. این مطالعه پراکندگی و تراکم تصادف عابر پیاده را بدون داشتن حجم عابرین پیاده نشان داده است و بدین ترتیب می‌توان با انجام اقدامات ایمنی در مکان‌های مستعد تصادف عابر پیاده، هزینه اجتماعی و تلفات

در این مطالعه، یک رویکرد سیستماتیک تدوین شده است که از معیارهای جایگزین تأثیر گذار تصادف عابر پیاده بر حسب اطلاعات رویارویی استفاده می‌کند. در این مطالعه در گام اول که شناسایی متغیرهای رویارویی است از چندین روش آماری برای شناسایی این متغیرها استفاده شده است و فراوانی تصادف بر اساس روش‌های مختلف ساخت مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم مدل‌های پیش‌بینی تصادف در سطح ناحیه با استفاده از متغیرهای جایگزین ارائه شده است. در این مطالعه از شش مدل **GWR**، **GWGR**، **GWPR**، **GWNBR**، **ZIGWPR** و **ZIGWNBR** برای پیش‌بینی فضایی-مکانی تصادف بر اساس متغیرهای رویارویی استفاده شده است و نتایج مطالعه نشان داد که مدل **ZIGWPR** و **ZIGWNBR** پیش‌بینی دقیق‌تری را انجام می‌دهند البته باید توجه داشته باشیم که به دلیل پراکندگی داده‌های تصادف در **TAZ**ها ممکن است نتایج مطالعه با مقداری بایاس^{۳۵} همراه باشد علاوه بر این، شناسایی معیارهای مؤثر در مواجهه با عابران پیاده از قبیل وجود مدرسه، تملک خودرو و موتورسیکلت، ایستگاه اتوبوس، عرض پیاده‌رو، پل عابر پیاده، نوع کنترل تقاطع و وجود رفوژ میانی راه، تراکم جمعیت در کیلومتر مربع، نوع کاربری، عرض معابر، متوسط تعداد خطوط معابر، متوسط شیب معابر و

۶. سیاست‌گذاری

نویسندگان این مقاله از معاونت حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران، پزشک قانونی، مرکز آمار ایران، معاونت معماری و شهرسازی شهر تهران به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و همکاری در بازدید میدانی و اطلاعات هندسی معابر تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Surrogate measures
2. Pedestrian exposure
3. Tobit
4. Geographically Weighted Regression
5. Geographical Weighted Gaussian Regression
6. Geographically Weighted Poisson Regression
7. Zero-Inflated Geographically Weighted Poisson Regression
8. Geographically Weighted Negative Binomial Regression
9. Zero-Inflated Geographically Weighted Negative Binomial Regression
10. Akaike information criterion
11. Vehicle Mail Travel
12. Keall, 1995
13. Semi-Protected
14. Highway Safety Manual
15. Annual average daily traffic
16. Safety Performance Function
17. Generalized Linear Model
18. Zero-Inflated Negative Binomial Regression
19. Random Parametric Negative Binomial
20. Semi-Parametric Geographically Weighted Poisson Regression
21. Exposure
22. Random Forest
23. Out-of-bag error
24. Gaussian
25. Offset
26. Zero inflated
27. Expectation-Maximization

ناشی از آن را کاهش داد. در این مطالعه، استفاده از انواع مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی برای ارزیابی رابطه بین متغیرهای جامعه شناختی و تصادف در سطح ناحیه مناسب بوده است. مقایسه عملکرد مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، وجود قابل توجه ناهمگنی مکانی در تحلیل را نشان می‌دهد. یافته‌های این مطالعه به طور گسترده‌ای با ادبیات موضوع تطابق داشته است. افزایش تراکم مسکونی، به ویژه در مناطق شهری با کاهش سرعت ارتباط داشته و از این‌رو کاهش فراوانی تصادف را به دنبال داشته است. از طرف دیگر، افزایش زمان سفر و به تبع آن قرار گرفتن بیشتر در معرض ترافیک بر هزینه‌های اجتماعی تصادفات تأثیر می‌گذارد. شناسایی نواحی ترافیکی مستعد تصادف می‌تواند یک عنصر سودمند برای تدوین سیاست‌هایی در حمایت از اقدامات کاهش آثار منفی مربوط به قرارگیری عابر پیاده در معرض ترافیک باشد.

۵. نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام گرفته در این مطالعه نشان داد که شناسایی عوامل مؤثر در تصادفات عابران پیاده به عنوان آسیب‌پذیرترین کاربران استفاده‌کننده از معابر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است از طرفی دیگر با توجه به ماهیت وابسته به مکان داده‌های تصادف، مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی محلی نتایج بهتری نسبت به مدل‌های مشابه جهانی ارائه می‌کند بنابراین در این مطالعه تمرکز بر مدل‌های محلی جهت پیش‌بینی فراوانی تصادفات عابران پیاده صورت گرفته است. بر اساس نتایج این مطالعه کاربری‌های تجاری، مسکونی، تفریحی-فرهنگی به ترتیب بیشترین تأثیر در افزایش فراوانی تصادفات عابران پیاده دارند. پل عابر پیاده و دوربین کنترل سرعت به ترتیب کمترین و بیشترین تأثیر را در کاهش فراوانی تصادفات عابران پیاده دارد بنابراین لزوم احداث پل‌های عابر پیاده و نصب دوربین کنترل سرعت به ترتیب میزان کاهش تصادف در هریک از TAZ ها ضروری به نظر می‌رسد.

– Davey, J., Wishart, D., Freeman, J., & Watson, B. (2007). An application of the driver behaviour questionnaire in an Australian organisational fleet setting. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(1), 11-21.

– da Silva AR, Rodrigues TCV. Geographically weighted negative binomial regression—incorporating overdispersion. *Statistics and Computing*. 2014;24(5):769-83.

– Dewi, Y. S., & Amaliana, L. (2015). Zero Inflated Poisson and Geographically Weighted Zero-Inflated Poisson Regression Model: Application to Elephantiasis (Filariasis) Counts Data. *Journal of Mathematics and Statistics*, 11(2), 52.

– Dong, N., Huang, H., Lee, J., Gao, M., & Abdel-Aty, M. (2016). Macroscopic hotspots identification: a Bayesian spatio-temporal interaction approach. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 256-264.

– Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2003). *Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships*: John Wiley & Sons.

– Galanis, A., Botzoris, G., & Eliou, N. (2017). Pedestrian road safety in relation to urban road type and traffic flow. *Transportation research procedia*, 24, 220-227.

– Gomes, M. J. T. L., Cunto, F., & da Silva, A. R. (2017). Geographically weighted negative binomial regression applied to zonal level safety performance models. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 254-261.

– Hezaveh, A. M., Arvin, R., & Cherry, C. R. (2019). A geographically weighted regression to estimate the comprehensive cost of traffic

28. Incomplete Likelihood

29. Expectation-Maximization

30. Traffic Analysis Zone

31. Mean absolute error

32. Root-mean-square deviation

33. Moran's I statistics

34. Data Clean

35. Baias

36. Information Baias

۸ مراجع

– Bozdogan, H. (1987). Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, 52(3), 345-370.

– Bricka, S. (2014). *East Tennessee Household Travel Survey*, 2008.

– Cai, Q., Lee, J., Eluru, N., & Abdel-Aty, M. (2016). Macro-level pedestrian and bicycle crash analysis: Incorporating spatial spillover effects in dual state count models. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 14-22.

– Champahom T, Jomnonkwo S, Karoonsoontawong A, Ratanavaraha V. Spatial zero-inflated negative binomial regression models: Application for estimating frequencies of rear-end crashes on Thai highways. *Journal of Transportation Safety & Security*. 2020:1-18.

– Chen, M.-M., & Chen, M.-C. (2020). Modeling road accident severity with comparisons of logistic regression, decision tree and random forest. *Information*, 11(5), 270.

– Congiu, T., Sotgiu, G., Castiglia, P., Azara, A., Piana, A., Saderi, L., & Dettori, M. (2019). Built environment features and pedestrian accidents: An Italian retrospective study. *Sustainability*, 11(4), 1064.

- domestic and expatriate Iranians. *Journal of Risk Research*, 18(5), 566-580.
- Özkan, T., Lajunen, T., Chliaoutakis, J. E., Parker, D., & Summala, H. (2006). Cross-cultural differences in driving skills: A comparison of six countries. *Accident Analysis & Prevention*, 38(5), 1011-1018.
- Savitz DA, Wellenius GA. Can Cross-Sectional Studies Contribute to Causal Inference? It Depends. *Am J Epidemiol*. 2022 Mar 1;kwac037. doi: 10.1093/aje/kwac037. Epub ahead of print. PMID: 35231933.
- Tu, J., & Xia, Z.-G. (2008). Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: Model design and evaluation. *Science of the total environment*, 407(1), 358-378.
- Ukkusuri S, Hasan S, Aziz HA. Random parameter model used to explain effects of built-environment characteristics on pedestrian crash frequency. *Transportation research record*. 2011;2237(1):98-106.
- Wang, Q., Ni, J., & Tenhunen, J. (2005). Application of a geographically-weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global ecology and biogeography*, 14(4), 379-393.
- Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E. H., Seto, E., & Bhatia, R. (2009). An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 137-145.
- Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F., & Anastasopoulos, P. (2020). Statistical and crashes at a zonal level. *Accident Analysis & Prevention*, 131, 15-24.
- Khattak, A. J., & Rodriguez, D. (2005). Travel behavior in neo-traditional neighborhood developments: A case study in USA. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(6), 481-500.
- Lee, C., & Abdel-Aty, M. (2005). Comprehensive analysis of vehicle-pedestrian crashes at intersections in Florida. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 775-786.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., Cai, Q., Wang, L., & Huang, H. (2018). Integrated modeling approach for non-motorized mode trips and fatal crashes in the framework of transportation safety planning. *Transportation Research Record*, 2672(32), 49-60.
- Liu, J., Khattak, A. J., & Wali, B. (2017). Do safety performance functions used for predicting crash frequency vary across space? Applying geographically weighted regressions to account for spatial heterogeneity. *Accident Analysis & Prevention*, 109, 132-142.
- Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S., & Tavassoli, A. (2019). Micro-level safety risk assessment model for a two-lane heterogeneous traffic environment in a developing country: A comparative crash probability modeling approach. *Journal of safety research*, 69, 125-134.
- Marshall, W. E., & Ferenchak, N. N. (2017). Assessing equity and urban/rural road safety disparities in the US. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 10(4), 422-441.
- Nordfjærn, T., Hezaveh, A. M., & Mamdoohi, A. R. (2015). An analysis of reported driver behaviour in samples of

سید احمد الماسی، حمیدرضا بهنود، آرزو حاجرجبی

econometric methods for transportation data
analysis: Chapman and Hall/CRC.

سید احمد الماسی در سال ۱۳۹۶ موفق به درجه کارشناسی ارشد از دانشگاه یزد در رشته مهندسی عمران راه و ترابری گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات ایمنی راه، طرح هندسی راه و همچنین ظرفیت راه و تقاطع می‌باشد و در حال حاضر دانشجوی سال چهارم دکتری مهندسی عمران راه و ترابری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره) می‌باشد.



حمیدرضا بهنود، در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در گرایش راه و ترابری از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات برنامه‌ریزی و مهندسی ایمنی راه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره) است.



آرزو حاج‌رجبی در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته آمار گرایش سری زمانی از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان سری زمانی و کاربردهای آن در مسایل مهندسی و مالی و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره) است.

