

## توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز: مطالعه موردی شهر مشهد

عماد سروری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ابوالفضل محمدزاده مقدم (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید مهدی صالحی، استادیار، گروه ریاضی و آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

E- mail: ab-moghadam@um.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۸

### چکیده

در راستای دستیابی به سیستم حمل‌ونقل ایمن و کاهش عواقب جبران‌ناپذیر ناشی از سوانح ترافیکی نیاز است تا موضوع ایمنی ترافیک در کنار سایر اهداف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مانند آلودگی هوا، اقتصادی-جمعیتی و غیره موردبررسی قرار گیرد. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های آماری برای کمی‌سازی اثر پارامترهای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بر ایمنی ترافیک و به دنبال آن ایجاد ارتباط بین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و ایمنی ترافیک، موردتوجه برنامه‌ریزان قرار گرفته است. هدف پژوهش حاضر، توسعه مدل‌های کلان نگر پیش‌بینی تصادفات است که در سطح کلان اثر طیفی از ویژگی‌های نواحی ترافیکی شهر مشهد را بر فراوانی تصادفات مدل می‌کند. بدین منظور، علاوه بر مدل پواسون که متداول‌ترین و پایه‌ای‌ترین مدل پیش‌بینی تصادفات است، مدل‌های پواسون-لگ‌نرمال و اتورگرسیو شرطی نیز برای در نظر گرفتن اثر بیش پراکنشی اطلاعات و وابستگی‌های فضایی مورد استفاده قرار گرفته است. جهت مقایسه مدل‌های پیشنهادی از معیار انحرافی (DIC) استفاده شده است. نتایج مقایسه مدل‌ها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز و وابستگی فضایی به ترتیب توسط مدل‌های پواسون-لگ‌نرمال و اتورگرسیو شرطی به‌طور قابل‌توجهی عملکرد مدل‌ها را ارتقا می‌بخشد و مقدار معیار DIC را از ۴۶۲۳/۴۱ در مدل پواسون به ترتیب به ۲۰۶۶/۸۲ و ۲۰۵۵/۲۸، کاهش می‌دهد. قابل‌ذکر است که مدل اتورگرسیو شرطی (BYM) بهترین عملکرد را دارا است ( $DIC=2055/28$ )، که اهمیت در نظر گرفتن وابستگی فضایی در مدل‌های پیش‌بینی تصادفات را در تصحیح تخمین و همچنین جایگزینی برای متغیرهای در نظر گرفته نشده، برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز، مدل اتورگرسیو شرطی، مدل پواسون-لگ‌نرمال، مدل‌های پیش‌بینی تصادفات

کلان نگر، وابستگی‌های فضایی.

## ۱. مقدمه

اثر عوامل مختلف بر تصادفات پیش‌بینی گردد، تا بتوان برای تدوین برنامه‌ریزی هدفمند، آگاهانه و جامع برای آینده از آن‌ها استفاده کرد.

مدل‌های آماری پیش‌بینی تصادفات به‌عنوان ابزاری مفید برای کمک به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در زمینه ایمنی ترافیک مطرح است [Gustavsson and Svensson, 1976, Poch and Mannering, 1996, Abbas, 2004, Geedipally and Lord, 2011, Amoh-GyimahSaber and Sarvi, 2017]، که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به دودسته مدل‌های کلان نگر و مدل‌های خرد نگر تقسیم کرد. مدل‌های خرد نگر به‌منظور بررسی ایمنی اجزای شبکه راه‌ها مانند قطعات راه و تقاطع، برای اعمال اقدامات اصلاحی در سطح خرد مورد استفاده قرار می‌گیرد [KimWashington and Oh, 2006, Cafiso et al. 2010, Meng and Qu, 2012]، در مقابل، مدل‌های کلان نگر در سطح نواحی توسعه داده می‌شوند و معمولاً هدف از توسعه این مدل‌ها برآورد اثر ویژگی‌های اقتصادی، جمعیت‌شناسی، کاربری اراضی و سایر ویژگی‌های مرتبط در سطح نواحی است که می‌تواند مورد استفاده برنامه‌ریزان شهری و متخصصین حمل‌ونقل قرار گیرد [HadayeghiShalaby and Persaud, 2003, HuangAbdel-Aty and Darwiche, 2010, Abdel-Aty et al. 2011, Abdel-Aty et al. 2013, Huang et al. 2016]، معمولاً نوع اخیر مدل‌های پیش‌بینی تصادفات در سطح نواحی ترافیکی<sup>۱</sup> [Naderan and Shahi, 2010, PulugurthaDuddu and Kotagiri, 2013]، نواحی ترافیکی اصلاح‌شده<sup>۲</sup> [LeeAbdel-Aty and Jiang, 2014]، نواحی سرشماری<sup>۳</sup> [Wier et al. 2009] و بخش<sup>۴</sup> [Li et al. 2013] توسعه داده می‌شود، که از میان آن‌ها نواحی ترافیکی از محبوبیت بیشتری برخوردار است چراکه از نظر ویژگی‌های ترافیکی دارای یکنواختی بیشتری است [Garber and Hoel 2014] و علاوه بر آن می‌تواند میان مدیریت تقاضای سفر<sup>۵</sup> و نتایج حاصل از مدل‌سازی ایمنی ترافیک ارتباط برقرار کند. علیرغم آنکه تعداد زیادی از مطالعات ایمنی ترافیک باهدف توسعه مدل‌های کلان نگر<sup>۶</sup> پیش‌بینی تصادفات انجام گرفته است ولی تاکنون تعداد

درحالی‌که درگذشته ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای کمتر موردتوجه قرار می‌گرفته است، در حال حاضر با توجه به خسارات عظیم مادی و معنوی ناشی از تصادفات، ایمنی ترافیک به یک موضوع مهم در سطح ملی و جهانی تبدیل‌شده است. آمارهای جهانی تصادفات نشان می‌دهد که بر اثر سوانح ترافیکی سالانه در حدود ۱/۲۵ میلیون نفر جان خود را ازدست‌داده و ۵۰ میلیون نفر نیز مجروح می‌شوند، همچنین پیش‌بینی می‌شود که آمار تلفات جرحی و فوتی ناشی از سوانح ترافیکی تا سال ۲۰۲۰، به میزان ۶۰ درصد افزایش یابد. [World Health Organization, 2015]، رقم به دست آمده برای نرخ مرگ‌ومیر ترافیکی در سال ۲۰۱۵، ۲۱ در هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت است [سازمان پزشکی قانونی کشور ۱۳۹۶، مرکز آمار ایران ۱۳۹۷] که در مقایسه با متوسط جهانی (۱۶/۳۹) رقم بالایی را نشان می‌دهد [World Health Organization, 2015]، نام‌گذاری دهه حاضر (۲۰۱۱-۲۰۲۰) به‌عنوان دهه اقدام برای ایمنی ترافیک توسط سازمان ملل، باعث شده است تا توجهات بیش‌ازپیش به موضوع ایمنی ترافیک جلب شود. علاوه بر این در دستور کار توسعه پایدار سازمان ملل برای سال ۲۰۳۰ لزوم توجه به ایمنی ترافیک و کاهش سوانح به‌عنوان زیرمجموعه‌ی دو آرمان کلی سلامت-رفاه عمومی و شهرهای پایدار از مجموعه ۱۷ آرمان کلی مورد تأکید قرار گرفته است [United Nations, 2015].

اخیراً در کنار سایر پارامترهای موردتوجه در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل نظیر آلودگی هوا، اثرات اقتصادی-جمعیتی و غیره، عامل ایمنی ترافیک نیز موردتوجه پژوهشگران و تصمیم‌گیران در زمینه حمل‌ونقل قرار گرفته است [Washington, 2006, HadayeghiShalaby and Persaud, 2007, Tarko et al. 2008, Wier et al. 2009]، بدین منظور مناسب است تا

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

جدول ۱. مشخصات پژوهش‌های انجام‌گرفته در راستای توسعه مدل‌های جامع پیش‌بینی تصادفات در سطح کلان

شهر/کشور	متغیر پاسخ	طبقه‌بندی متغیرهای مستقل	مقیاس مورد مطالعه	مرجع
انگلستان <sup>۶</sup>	تصادفات جرحی و فوتی	کاربری اراضی، انواع راه‌ها و ویژگی‌های جمعیتی	بخش سرشماری <sup>۱۰</sup>	[Noland and Quddus 2004]
سانفرانسیسکو <sup>۷</sup>	تصادفات جرحی عابران پیاده	کاربری اراضی، انواع راه‌ها، ویژگی‌های جمعیتی انواع سفر	نواحی آماری	[Wier et al. 2009]
تورنتو <sup>۸</sup>	تصادفات کل	کاربری اراضی، انواع راه‌ها، ویژگی‌های جمعیتی، مشاغل و واحد سکونت	نواحی آماری	[HadayeghiShalaby and Persaud 2010a, HadayeghiShalaby and Persaud 2010b]
ملبورن <sup>۹</sup>	تصادفات کل عابران پیاده و دوچرخه‌سواران	ویژگی‌های اقتصادی جمعیتی، کاربری اراضی و تعداد سفرهای پیاده و با دوچرخه	نواحی آماری سطح ۲ <sup>۱۱</sup> (سیستم ناحیه بندی در استرالیا)	[Amoh-GyimahSaber and Sarvi 2016]

در بسیاری از کاربردهای عملی از جمله مطالعات فراوانی تصادفات این فرض نقض می‌شود و مقدار واریانس معمولاً از میانگین بیش‌تر است. از دلایل این پدیده که آن را بیش پراکنشی<sup>۱۳</sup> می‌نامند، می‌توان به حذف متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر فراوانی تصادفات اشاره کرد. اجبار در حذف متغیر مؤثر مشکلی شایعی است که پژوهشگران با آن روبرو هستند، به‌ویژه در مطالعات کلان نگر ایمنی ترافیک که امکان اندازه‌گیری برخی از متغیرهای مؤثر مانند فرهنگ مردم در استفاده از سیستم حمل‌ونقل و تغییرات آب‌وهوا وجود ندارد، در نظر گرفتن اثر بیش پراکنشی اهمیت می‌یابد. مدل‌های پواسون-گاما<sup>۱۴</sup> و یا مدل پواسون-لگ‌نرمال، دو مدل توسعه‌یافته بر پایه مدل پواسون هستند که قابلیت در نظر گرفتن اثر بیش پراکنشی در مدل را ایجاد می‌کنند [Milton and Mannering, 1998, Lord and Miranda-Moreno, 2008].

فرض اساسی مدل‌های مذکور بر مستقل بودن مشاهدات است، درعین حال همواره در حضور داده‌های فضایی، وابستگی‌های فضایی بین مشاهدات اهمیت می‌یابد به این معنی که انتظار می‌رود فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

معدودی از پژوهش‌ها به توسعه مدل‌های جامع کلان نگر تصادفات پرداخته‌اند. شرح این مطالعات در جدول ۱ آورده شده است. بررسی ادبیات مطروحه نشان می‌دهد که در ابتدا لوین و نیز مدل‌های کلان نگر پیش‌بینی تصادفات را با استفاده از مدل‌های خطی توسعه دادند [LevineKim and Nitz, 1995]، این در حالی است که اطلاعات تصادفات به‌طور ذاتی شمارشی، با مقادیر مثبت و دارای چولگی است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فرض نرمال بودن فراوانی تصادفات توسط مدل‌های خطی مناسب پژوهش‌های مدل‌سازی فراوانی تصادفات نیست.

برای گذر از قیود محدودکننده مدل‌های خطی استفاده از خانواده مدل‌های خطی تعمیم‌یافته<sup>۱۲</sup> به‌عنوان راهکاری جایگزین موردتوجه پژوهشگران قرار گرفت. از این میان استفاده از توزیع پواسون برای مدل‌سازی فراوانی تصادفات رواج یافت [Miao and Lum, 1993, Ma and Kockelman, 2006]. اما در استفاده از مدل پواسون پژوهشگران با مشکل دیگری مواجه شدند که در آن مقدار واریانس محدود و برابر با میانگین است، حال آنکه

2017]. در این پژوهش مدل پیشنهادی بر اساس مدل خطی توسعه یافته است که تناسب مناسبی با داده‌های تصادفات ندارد. شریعت مهیمنی و همکارانش در پژوهش خود برای توسعه مدل کلان نگر پیش‌بینی تصادفات بر اساس بانک اطلاعات شهر مشهد، مدل‌های محلی پواسون را با استفاده از تکنیک GWR توسعه دادند تا علاوه بر در نظر گرفتن اثرات ناهمسان‌ساز فضایی، مدلی متناسب با ویژگی‌های شمارشی تصادفات، ارائه شود [Shariat Mohaymany et al. 2015]. در پژوهش انجام گرفته توسط سروری، محمدزاده مقدم و صالحی، اثر کاربری اراضی شهر مشهد بر فراوانی تصادفات جرحی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش نیز برای توسعه مدل از تکنیک GWR برای محلی سازی مدل پواسون استفاده شده است. علاوه بر بهبود عملکرد به کمک تکنیک مذکور، نقشه‌های تغییرات اثر کاربری اراضی بر فراوانی تصادفات جرحی نیز ارائه گردیده است [Soroori, Mmohamadzadeh Moghaddam and Salehi, 2017].

بروجردیان، صفارزاده و قاسم‌زاده خشک‌رودی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی نرخ تصادفات راه از روش‌های اقتصادسنجی فضایی استفاده کردند [Boroujerdian, Saffarzadeh and Ghsemzade Khoshkroodi, 2015]. اگرچه روش ارائه شده توسط آن‌ها با استفاده از عامل تأخیر فضایی<sup>۱۷</sup> قابلیت در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی را دارد، اما با توجه به آنکه مدل‌ها بر پایه مدل خطی توسعه یافته‌اند، نمی‌توانند روشی مناسب را برای داده‌های شمارشی و غیر منفی تصادفات را در اختیار پژوهشگران قرار دهند.

در پژوهشی دیگر که توسط شریعت مهیمنی و شهری انجام گرفته است، مدل‌های فضایی با اتورگرسیو شرطی بر اساس مدل دوجمله‌ای منفی توسعه یافته است، که نتایج بهبود عملکرد

مشاهدات نزدیک‌تر از نظر مکانی رفتار مشابه‌تری داشته باشند. در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی می‌تواند اثر متغیرهای مستقل در نظر گرفته نشده را الگوسازی نماید، علاوه بر این می‌تواند عملکرد مدل را به صورت محلی بهبود بخشد [Agüero-Valverde and Jovanis, 2008]. برای لحاظ کردن اثر وابستگی‌های فضایی در مدل، بساج، یورک و مولی استفاده از مدل‌های اتورگرسیو شرطی را پیشنهاد دادند که در آن با استفاده از توزیع پیشین اتورگرسیو شرطی برای اثر تصادفی مدل می‌توان وابستگی‌های فضایی را به مدل اضافه کرد [Besag York and Mollié, 1991]. استفاده از این رویکرد مدل‌سازی به علت عملکرد مناسب در مطالعات ایمنی ترافیک مورد توجه قرار گرفته است [Lee Abdel-Aty and Jiang, 2015, Huang et al. 2016, Wang et al. 2016, Huang et al. 2017].

پژوهش انجام گرفته توسط نادران و شاهی را می‌توان اولین پژوهش در زمینه توسعه مدل‌های کلان نگر به احتساب آورد که بر اساس مورد مطالعاتی شهرهای ایران انجام گرفته است [Naderan and Shahi, 2010]. آن‌ها در پژوهش خود برای تسهیل یکپارچه‌سازی ایمنی ترافیک با مدل‌سازی چهار مرحله‌ای تقاضای سفر، مجموعه‌ای از مدل‌های پیش‌بینی تصادفات را بر اساس انواع مختلف متغیرهای تولید و جذب سفر را برای شهر مشهد توسعه دادند. در این پژوهش برای توسعه مدل‌ها از روش دوجمله‌ای منفی استفاده شده است و در عین حال لزوم توجه به وابستگی فضایی در توسعه مدل‌ها را نیز اظهار داشتند. محمدی شفابخش و نادران مدل‌های پیش‌بینی تصادفات را بر اساس تعداد سفر مدهای مختلف حمل‌ونقل شهر مشهد توسعه دادند. در این پژوهش علاوه بر مدل دوجمله‌ای منفی، برای در نظر گرفتن اثرات ناهمسان‌ساز فضایی<sup>۱۵</sup> از تکنیک رگرسیون وزنی جغرافیایی<sup>۱۶</sup> (GWR) استفاده کردند [MohammadiShafabakhsh and Naderan,

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

در بخش بعدی، روش‌شناسی مدل‌های مورد استفاده بررسی می‌شود، در ادامه اطلاعات گردآوری شده و ویژگی‌هایشان توضیح داده می‌شود، در انتها نتایج حاصل از مدل‌سازی و تفاسیر آن‌ها و بخش نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. روش‌شناسی

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، استفاده از مدل پواسون یکی از متداول‌ترین روش‌هایی است که برای مدل کردن متغیرهای شمارشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه فرض شود فراوانی تصادفات  $Y_i$  از توزیع پواسون پیروی کند، آنگاه تابع جرم احتمال آن به صورت زیر خواهد بود [Miaou, 1994]

$$p(y_i|\mu_i) = \frac{e^{-\mu_i}\mu_i^{y_i}}{y_i!}, \quad (1)$$

که در آن  $\mu_i$  نشان‌دهنده میانگین شرطی توزیع پواسون است که به صورت ترکیب خطی از متغیرهای مستقل تعریف می‌شود

$$\ln(\mu_i) = \sum_k x_{ik}\beta_k, \quad (2)$$

در رابطه (۲) متغیرهای مستقل و ضرایب رگرسیون به ترتیب با  $x_{ik}$  و  $\beta_k$  نمایش داده می‌شوند. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز بیان شد، ضعف مهم این مدل کمتر تخمین زدن واریانس است. به منظور در نظر گرفتن بیش پراکنشی داده‌های تصادفات، می‌توان ساختار انعطاف‌پذیر مدل پواسون-لگ‌نرمال را با اضافه کردن بخش تصادفی به پارامتر میانگین توزیع به دست آورد. بنابراین از بازنویسی رابطه (۲) خواهیم داشت [Gonzales-Barron and Butler 2011]

مدل را نشان می‌دهد [Shariat-Mohaymany and Shahri, 2017].

بر اساس مطالب ذکر شده در بالا، در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا بتوان از دو منظر کاربردی و روش‌شناسی آماری عملکرد مدل‌های کلان نگر پیش‌بینی تصادفات را بهبود بخشید.

از دیدگاه روش‌شناسی آماری در این پژوهش هدف آن است تا بتوان با استفاده از مدل‌های پواسون-لگ‌نرمال و اتورگرسیون شرطی (بر پایه مدل پواسون-لگ‌نرمال) مدل‌هایی منعطف را توسعه داد که می‌توانند با در نظرگیری اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز و وابستگی‌های فضایی، عملکرد فرایند مدل‌سازی تصادفات را ارتقا بخشند. لازم به ذکر است که پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مدل پواسون-لگ‌نرمال مدلی منعطف‌تر نسبت به مدل دوجمله‌ای منفی است، بویژه زمانی که میانگین مشاهدات بالا است و مقادیر صفر مشاهده نشده است (مشابه با اطلاعات تجمیع شده در پژوهش حاضر) [Lord and Mannering, 2010, Gonzales-Barron and Butler, 2011, KhazraeeJohnson and Lord, 2018]؛ بنابراین در این پژوهش بجای استفاده از مدل متداول دوجمله‌ای منفی مدل‌های مبتنی بر مدل پواسون-لگ‌نرمال به کار گرفته شده است. چنانچه در جدول ۱ ملاحظه شد، تاکنون در تعداد معدودی از مطالعات ایمنی ترافیک مدل‌های جامع کلان نگر توسعه داده شده است. از دیدگاه کاربردی در پژوهش حاضر سعی می‌شود تا با استفاده از بانک جامع اطلاعات گردآوری شده برای شهر مشهد، بتوان مدلی جامع را برای تصادفات جرحی توسعه داد که در آن اثر متغیرها در کنار یکدیگر بر فراوانی تصادفات جرحی بررسی شود. زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ویژگی‌های اقتصادی جمعیتی و کاربری اراضی عناوین کلی هستند که متغیرهای مستقل بر اساس آن دسته‌بندی می‌شوند.

توسط  $v_i$  و وابستگی فضایی را توسط  $\epsilon_i$  به مدل اضافه می‌کند. برای تکمیل شدن ساختار بیزی مورد استفاده برای مدل کردن فراوانی تصادفات، می‌توان  $\theta_i$  را جایگزین  $v_i$  در رابطه (۳) کرد. همچنین توسط رابطه (۸) که پیش‌ازین توسط آگرو-والوردو و خوانیس [Aguero-Valverde and Jovanis, 2008] مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان میزان تغییرات قابل توضیح توسط بخش فضایی را از رابطه زیر به دست آورد

$$\gamma = \frac{sd(\epsilon)}{sd(\epsilon) + sd(v)} \quad (۸)$$

که در آن  $sd(\epsilon)$  و  $sd(v)$  به ترتیب انحراف معیار متغیرهای تصادفی  $\epsilon$  و  $v$  هستند.

## ۲-۱ توزیع‌های پیشین

برای کامل کردن مدل‌های بیزی لازم است تا برای پارامترهای مدل توزیع پیشین مناسب انتخاب کرد. در این پژوهش با توجه به عدم پیش‌آگاهی لازم نسبت به پارامترها، برای تمامی آن‌ها توزیع پیشین ناآگاهی بخش<sup>۱۹</sup> در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور، فرض شده است که ضرایب رگرسیونی در تمامی مدل‌ها از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ۱۰۰۰۰۰۰ پیروی می‌کنند. همچنین فرض می‌کنیم پارامتر  $\sigma^2$  و  $\tau^2$  در مدل‌های پواسون-لگ‌نرمال و BYM، دارای توزیع معکوس گاما با پارامتر شکل ۱ و پارامتر مقیاس ۰/۰۱ است.

## ۲-۲ بررسی وابستگی فضایی میان مشاهدات

برای بررسی وجود وابستگی فضایی بین مشاهدات استفاده از شاخص موران<sup>۲۰</sup> پیشنهاد می‌گردد. این شاخص از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$\ln(\mu_i) = \sum_k x_{ik} \beta_k + v_i, \quad (۳)$$

$$v_i \sim N(0, \sigma^2), \quad (۴)$$

که در آن  $v_i$  کمک می‌کند تا واریانس اضافه ناشی از بیش پراکنشی در مدل لحاظ شود.

استقلال مشاهدات، فرض محدودکننده دیگری است که مناسب داده‌های فضایی نیست. برای در نظر گرفتن وابستگی بین مشاهدات، مشابه با ایده اصلی مدل پواسون-لگ‌نرمال، می‌توان مدل پواسون را با اضافه کردن بخش تصادفی گسترش داد، با این تفاوت که در اینجا اثر تصادفی دارای توزیع پیشین اتورگرسیو شرطی هست که قابلیت در نظر گرفتن وابستگی بین نواحی مجاور را دارد. یکی از مدل‌های متداول که با استفاده از پیشین‌های اتورگرسیو شرطی توسعه یافته است توسط بساج و همکارانش [Besag et al. 1991] ارائه گردید و بر اساس نام آن‌ها به اختصار به مدل BYM<sup>۲۱</sup> شهرت یافت. ساختار این مدل به شرح زیر است.

$$\theta_i = v_i + \epsilon_i \quad (۵)$$

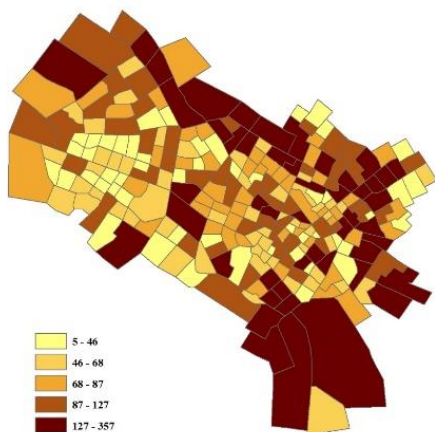
$$v_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (۶)$$

$$\epsilon_i | \epsilon_{j \neq i}, W, \tau^2 \sim N\left(\frac{\sum_j w_{ij} \varphi_j}{\sum_j w_{ij}}, \frac{\tau^2}{\sum_j w_{ij}}\right) \quad (۷)$$

در روابط بالا  $w_{ij}$  درایه‌های ماتریس همسایگی  $W$  است که ساختار فضایی را تعریف می‌کند. اعضای این ماتریس دودویی است؛ در صورتی که دو ناحیه  $i$  و  $j$  دارای مرز مشترک باشند، مقدار  $w_{ij}$  برابر با یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. تغییرات ناشی از اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز و وابستگی‌های فضایی به ترتیب توسط پارامترهای  $\sigma^2$  و  $\tau^2$  کنترل می‌شود. این ساختار قابلیت در نظرگیری هم‌زمان اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز را

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

اطلاعات گردآوری‌شده و مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱. پراکنندگی تصادفات جرحی در شهر مشهد

اطلاعات به‌طور کلی در ۳ دسته شامل زیرساخت‌های حمل‌ونقل، اقتصادی-جمعیتی و کاربری اراضی تقسیم‌بندی می‌شوند.

بررسی ایمنی ترافیک در انواع مختلف راه‌ها و عوامل مؤثر بر آن و اقدامات اصلاحی متناسب همواره یکی از موضوعات مورد علاقه متخصصین حمل‌ونقل و تصمیم‌گیران بوده است [Mountain Fawaz and Jarrett, 1996, Milton and Mannering, 1998, Quddus, 2008, Park et al. 2012]. در این پژوهش انواع راه‌ها از دید کلان مورد توجه قرار می‌گیرند و بررسی اثر آن بر سیستم حمل‌ونقل کل شهر، مطلوب این پژوهش است. لازم به ذکر است، با توجه به آنکه رمپ‌ها از نظر خصوصیات ترافیکی و تأثیرگذاری بر ایمنی ترافیک به‌طور متفاوت از قطعات راه مجاور عمل می‌کنند، به‌عنوان دسته‌ای جداگانه ارائه شده‌اند تا اثر آن‌ها بر ایمنی ترافیک مشخص شود.

پژوهش انجام‌گرفته توسط لاسکالا و گرونولد، از نخستین مطالعات انجام‌گرفته در زمینه تعیین اثر عوامل محیطی و جمعیتی بر وقوع تصادفات است [LaScala Gerber and Gruenewald

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) (\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)} \quad (9)$$

که در آن  $y_i$  و  $y_j$  مقادیر مشاهده‌شده تصادفات به ترتیب در نواحی  $i$  و  $j$  است و  $n$  تعداد کل مشاهدات است. مقادیر این شاخص بین -۱ تا ۱ تغییر می‌کند. فرض صفر آزمون آماری با این شاخص، عدم وجود وابستگی و یا تصادفی بودن مشاهدات است که مقادیر نزدیک به یک آن نشان دهنده وابستگی بین مشاهدات است و هرچه به -۱ نزدیک شود، مشاهدات دارای پراکنندگی کامل کامل خواهند بود که هر دو حالت نقض فرض صفر است.

### ۳. بانک اطلاعات

جهت ارائه نظر در مورد مدل‌های پیشنهادشده، مجموعه اطلاعات مرتبط با تصادفات شهر مشهد برای سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۴ از سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهر مشهد اخذ شده است. شهر مشهد به‌عنوان دومین کلان‌شهر، یکی از مقاصد مهم سفرها در کشور می‌باشد و از نظر سوانح ترافیکی جزء شهرهای پرحادثه کشور محسوب می‌شود. بر اساس بانک اطلاعاتی گردآوری شده در سال ۱۳۹۴، بر اثر سوانح ترافیکی ۲۶۴۷۹ نفر مجروح و ۲۸۱ نفر نیز جان خود را از دست دادند. در دسترس بودن اطلاعات معتبر برای این شهر امکان انجام پژوهش‌های علمی را میسر ساخته است. بنابراین برای دستیابی به اهداف پژوهش و ارزیابی مدل‌های پیشنهادی، از اطلاعات این شهر کمک گرفته شده است. جهت توسعه مدل‌های کلان نگر، تمامی اطلاعات توسط نرم‌افزار Arc GIS بر اساس ۲۵۳ ناحیه ترافیکی مشخص شده برای این شهر، تجمیع شده است. قابل ذکر است تنها نوع تصادفات جرحی به‌طور کامل برای شهر مشهد ثبت شده و در دسترس است، بنابراین مدل‌های پیش‌بینی تصادفات برای همین دسته توسعه داده خواهد شد. شکل ۱ نحوه پراکنندگی تصادفات جرحی در سطح شهر مشهد و در واحد نواحی ترافیکی را نشان می‌دهد. خلاصه آماری

قابل توجه بر الگوی تولید و جذب سفرهای نواحی ترافیکی مؤثر است، بنابراین موردعلاقه برنامه ریزان شهری و متخصصین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل نیز می‌باشد و محاسبه اثر آن‌ها بر ایمنی ترافیک می‌تواند به تصمیم‌گیری آگاهانه و برنامه‌ریزی هدفمند ایمنی محور کمک کند. این موضوع می‌تواند درک متخصصین از وضعیت ایمنی ترافیک شهر را قبل از هرگونه برنامه‌ریزی برای توسعه شهری و یا سناریوسازی‌های معمول در مدل‌سازی مدیریت تقاضای سفر، افزایش دهد. لوکیتو-سیدریس، لیجت و سونگ علاوه بر شاخص‌های ترافیکی و جمعیتی، برای برای نخستین بار اثر کاربری اراضی بر فراوانی تصادفات عابران پیاده را موردبررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، کاربری تجاری و مناطق با تراکم بالای کاربری مسکونی، بیش‌ترین تاثیر را در

نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که چگالی بیشتر جمعیت، ترکیب جمعیتی با سهم بیش‌تر آقایان و جمعیت بیش‌تر بیکاران و کمتر افراد تحصیل‌کرده در افزایش وقوع تصادفات جرحی مرتبط با عابران پیاده نقش دارد. سه متغیر جمعیت، تعداد وسایل نقلیه و شاغلین هر ناحیه به‌عنوان نشانگرهای ویژگی‌های اقتصادی-جمعیتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی پژوهش‌های قبلی نیز نشان می‌دهد این سه متغیر جزو کمیت‌های اصلی اقتصادی-جمعیتی هستند که نیاز است اثر آن‌ها بر ایمنی ترافیک مشخص شود [ Wagenaar, 1984, Hedayeghi et al. ] 2010b.

متغیرهای کاربری اراضی دارای اهمیت برجسته‌ای در تعیین الگوی پراکندگی تصادفات است، چراکه این دسته از متغیرها به‌طور



توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

جدول ۲. شاخص‌های آماری داده‌های مورد استفاده.

دسته	متغیر	توضیحات	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف استاندارد
تصادفات	Y	فراوانی تصادفات جرحی	۹۰/۲۷	۵	۳۵۷	۵۷/۵۷
	X1	طول راه‌های فرعی (کیلومتر)	۱۰/۷۶	۰	۷۶/۶۹	۸/۴۵
زیرساخت‌ها	X2	طول راه‌های شریانی درجه یک (کیلومتر)	۱/۶۶	۰	۱۰/۶۸	۱/۶۵
	X3	طول راه‌های شریانی درجه دو (کیلومتر)	۱۰/۸۳	۰	۳۵/۹۵	۲/۷۵
	X4	طول راه‌های جمع و پخش کننده (کیلومتر)	۱/۶۴	۰	۱۲/۷۶	۱/۷۹
	X5	طول راه‌های دسترسی (کیلومتر)	۰/۶۸	۰	۱۳/۰۱	۱/۲۲
	X6	طول رمپ‌ها (کیلومتر)	۰/۴۲	۰	۵/۷۳	۰/۸۶
	X7	شاغلین (برحسب هزار نفر)	۳/۹۳	۰	۱۹/۵۶	۳/۲۳
اقتصادی-جمعیتی	X8	تعداد خودرو (برحسب هزار دستگاه)	۳/۴۵	۰	۱۶/۳۷	۲/۵۹
	X9	مساحت کاربری فرهنگی (برحسب کیلومتر مربع)	۰	۰	۰/۳۹	۰/۰۳
کاربری اراضی	X10	مساحت کاربری تجاری (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۲	۰	۰/۲	۰/۰۲
	X11	مساحت کاربری تفریحی (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۵	۰	۲/۵۹	۰/۲
	X12	مساحت کاربری مسکونی (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۳	۰	۱/۱۸	۰/۱۹
	X13	مساحت کاربری کشاورزی (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۷	۰	۲/۹۷	۰/۲۴
	X14	مساحت کاربری صنعتی (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۳	۰	۱/۷۸	۰/۱۵
	X15	مساحت کاربری اداری (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۵	۰	۲/۸۶	۰/۲۹
	X16	مساحت کاربری آموزشی (برحسب کیلومتر مربع)	۰/۰۲	۰	۰/۴۴	۰/۰۳

از ده برای جلوگیری از آثار شدید هم خطی حذف گردد [Craney and Surles, 2002]، بر این اساس متغیر «راه‌های مسکونی» از مجموعه متغیرهای مورد استفاده حذف می‌گردد. نتایج تحلیل همبستگی مکانی با استفاده از شاخص موران برای تصادفات جرحی شهر مشهد بیان‌گر رد فرض صفر است (P-مقدار کمتر از ۰/۰۰۰۰۰۱). بنابراین ارائه راهکار استفاده از مدل فضایی برای در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۴. مدل‌سازی و نتایج

جهت کمی‌سازی اثرات ویژگی‌های نواحی ترافیکی بر ایمنی ترافیک، مدل فراوانی تصادفات جرحی در بستر رویکرد بیزی، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

افزایش فراوانی تصادفات فوتی دارند، در مقابل تراکم تصادفات در مناطق با کاربری اداری، صنعتی و خالی از سکنه کمتر به چشم می‌خورد [Loukaitou-Sideris, Liggett and Sung, 2007]. با توجه به اهمیت این دسته از متغیرها، مطالعات دیگری نیز برای کمی‌سازی اثر متغیرهای کاربری اراضی بر وقوع تصادفات انجام گرفته است [Hedayeghi et al. 2010b, CoruhBilgic and Tortum, 2015].

در این پژوهش از روش عامل تورم واریانس<sup>۲۱</sup> (VIF) استفاده شده است. نتایج تحلیل هم خطی در جدول ۳ آورده شده است. به صورت ضمنی پیشنهاد می‌گردد متغیرهای با VIF بزرگ‌تر

چنانچه آماره مذکور برای هر پارامتر در بازه (۱/۹۶، ۱/۹۶-) باشد می‌توان رأی به همگرایی زنجیر داد. بر این اساس، جهت دستیابی به زنجیره همگرا و تخمین قابل اعتماد که شرط مذکور را دارا باشد، در هر مدل پانصد هزار نمونه گرفته شده است. همچنین برای حذف خودهمبستگی‌های احتمالی بین مشاهدات، از هر ۱۰ مشاهده فقط اولین مورد را ثبت کرده و بقیه کنار گذاشته می‌شوند.

برای مقایسه مدل‌ها از معیار اطلاع انحرافی<sup>۲۲</sup> (DIC) پیشنهاد شده توسط اشپیگل هالتر و همکاران استفاده شده است [Spiegelhalter et al. 2002]. در این معیار مدلی عملکرد بهتر را ارائه می‌دهد که مقدار DIC آن کمتر باشد. جدول ۴ شامل خلاصه آماری از توزیع‌های پسین به دست آمده برای هر پارامتر و نیز معیار مقایسه DIC است.

نکته قابل توجه آن است که اضافه کردن اثر تصادفی مستقل و همبستگی فضایی به ترتیب در مدل‌های پواسون-لگ‌نرمال و مدل‌های BYM باعث بهبود چشمگیر عملکرد مدل می‌شود و مقدار DIC را از ۴۶۲۳/۴۱ در مدل پواسون به ۲۰۶۶/۸۲ در مدل پواسون-لگ‌نرمال و ۲۰۵۵/۲۸ در مدل BYM می‌رساند. چنانچه مشاهده می‌شود مدل BYM به عنوان مدل فضایی، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به رابطه (۸)، پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل BYM نشان می‌دهد که ۷۲ درصد از تغییرات می‌تواند توسط بخش فضایی تعریف شود که مقدار قابل توجهی است.

در شکل ۲ تغییرات جزء فضایی مدل BYM در سطح نواحی ترافیکی شهر مشهد نمایش داده شده است که دارای الگوهای مشخصی در مناطق مختلف شهر می‌باشد. به عنوان مثال منطقه تقریبی شمال شرق شهر دارای جزء فضایی با مقادیر بالا است و برعکس در مناطق مرکزی به سمت غرب شهر این جزء مقادیر کمتری را به خود می‌گیرد. این الگوها همان وابستگی میان

توسط سه مدل پواسون، پواسون-لگ‌نرمال و مدل BYM به صورت تابعی از متغیرهای مستقل، توسعه داده شد. به کمک روش مبتنی بر شبیه‌سازی زنجیر مارکوف مونت کارلو (MCMC)، می‌توان توزیع‌های پسین هر پارامتر را که در تفکر بیزی به مثابه متغیر در نظر گرفته می‌شوند به دست آورد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این روش شبیه‌سازی زمانی معتبر است که زنجیر همگرا شود. برای بررسی همگرایی زنجیر تولید شده در این پژوهش از معیار Geweke (GE) استفاده شده است.

جدول ۳. تحلیل هم خطی متغیرهای مستقل.

متغیر	عامل تورم واریانس (VIF)
X1	۱۱/۲۰
X2	۴/۲۹
X3	۵/۲۹
X4	۲/۲۶
X5	۱/۷۱
X6	۳/۸۰
X7	۹/۷۹
X8	۹/۲۷
X9	۱/۰۵
X10	۱/۶۳
X11	۴/۹۰
X12	۵/۹۱
X13	۱/۳۶
X14	۲/۰۵
X15	۳/۷۰
X16	۱/۶۶

توسط این آماره میانگین بازه‌های مختلف نمونه‌گیری مورد بررسی قرار می‌گیرد (بازه ۱۰ درصد اول و ۵۰ درصد آخر نمونه‌گیری). چنانچه اختلاف میانگین‌ها از نظر آماری کم باشد بدان معناست که توزیع نمونه‌ها تغییر نکرده و زنجیره همگرا است. فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

فاصله اعتبار ۹۵ درصد شامل صفر نباشد می‌توان گفت مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامتر موردنظر از نظر آماری معنی‌دار است. قابل‌توجه است که تعداد زیادی از پارامترهایی توسط مدل پواسون ساده به‌صورت خوش‌بینانه معنی‌دار شده‌اند، علت این امر همان ویژگی منحصر‌به‌فرد مدل پواسون است که میزان واریانس را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زدند.

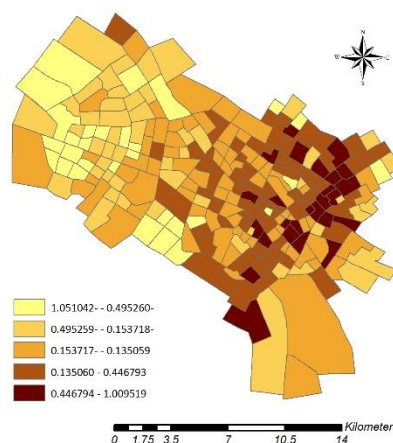
بنابراین در این بخش به تفسیر نتایج پارامترهایی پرداخته می‌شود که از نظر آماری در یکی از دو مدل پواسون-لگ‌نرمال و BYM معنی‌دار است.

مقادیر تخمین زده‌شده برای راه‌های شریانی نشان می‌دهد افزایش سهم این نوع از راه‌ها در هر ناحیه سبب افزایش فراوانی تصادفات جرحی می‌شود که با نتایج تحقیقات قدوس همخوانی دارد [Quddus, 2008]. بالا بودن سرعت عملکردی و طراحی نایمن و غیراستاندارد راه‌های شریانی می‌تواند از مهم‌ترین علل این برآورد باشد. چنانچه انتظار می‌رود و نتیجه مدل پواسون-لگ‌نرمال نشان می‌دهد وجود رمپ‌ها به دلیل اثراتی که بر همگرایی و واگرایی جریان ترافیک دارد و همین‌طور ویژگی‌های هندسی خاص آن باعث کاهش ایمنی می‌گردد. جالب‌توجه است که نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار Arc GIS نشان می‌دهد که حدود ۲۰ درصد از تصادفات راه‌های شریانی درجه‌یک به قطعه‌ای از راه اختصاص دارد که در آن رمپ واقع شده است، بنابراین طراحی هندسی استاندارد و تعبیه تجهیزات لازم جهت جداسازی جریان ترافیک در این قطعات می‌تواند تأثیر بسزایی در ایمنی راه‌های شریانی بگذارد. نتایج به‌دست‌آمده در بخش اقتصادی-جمعیتی نشان می‌دهد افزایش تعداد خودروها باعث کاهش تصادفات جرحی می‌شود. به‌عنوان یکی از دلایل احتمالی این پدیده می‌توان به مشکل اکثر کلان‌شهرهای کشور در کم بودن ظرفیت معابر اصلی شهرها برای سرویس‌دهی به حجم خودروی

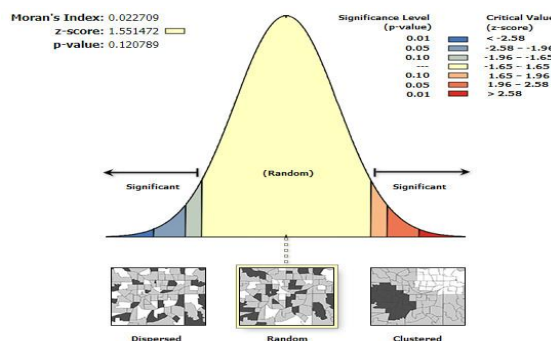
فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

مشاهدات است که در مدل BYM می‌توان ساختار آن‌ها را به دست آورد.

با توجه به در نظر گرفتن وابستگی میان مشاهدات در مدل BYM، انتظار می‌رود تا میان باقی‌مانده‌های مدل، وابستگی فضایی وجود نداشته باشد (استقلال فضایی). نتایج تحلیل وابستگی فضایی باقی‌مانده‌های مدل با استفاده از شاخص موران



شکل ۲. تغییرات جزء تصادفی مدل در سطح نواحی ترافیکی نشان می‌دهد که نمی‌توان فرض صفر مبنی بر تصادفی بودن باقی‌مانده‌ها را رد کرد (p-مقدار = ۰/۱۲) که به معنای زدودن وابستگی فضایی از مشاهدات است (شکل ۳).



شکل ۳. گزارش روش تحلیل وابستگی فضایی با استفاده از روش موران

بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده بر اساس فاصله اعتبار می‌توان معنی‌داری پارامترها را بررسی کرد. چنانچه بازه به‌دست‌آمده برای

عبوری اشاره کرد، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش تعداد خودرو در نواحی، سرعت عملکردی و به دنبال آن کاهش شدت تصادفات را شاهد باشیم. مطابق انتظار تعداد شاغلین با افزایش تصادفات جرحی رابطه مستقیمی دارد، چراکه این گروه از افراد با

فعالیت‌های روزانه خود همواره سهم بالایی در تعیین الگوی سفرهای درون‌شهری دارد و ریسک تصادفات را افزایش می‌دهند.

جدول ۴. نتایج مدل‌سازی

اتورگرسو شرطی (BYM)				پواسون- لگ‌نرمال				پواسون				
میانۀ ۲/۵۰% ۹۷/۵۰% معیار (GE)				میانۀ ۲/۵۰% ۹۷/۵۰% معیار (GE)				میانۀ ۲/۵۰% ۹۷/۵۰% معیار (GE)				
۱/۷۰	۳/۶۵	۳/۳۸	۳/۵۲	۰/۸۰	۳/۷۶	۳/۵۳	۳/۶۴	۰/۵۰	۳/۸۹	۳/۸۳	۳/۸۶	عرض از مبدأ
۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۱۶	-۰/۸۰	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۵۰	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۹	X1
۳/۲۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵	-۱/۳۰	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۹۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	X2
۰/۹۰	۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۱/۴۰	۰/۰۶	-۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	X3
۱/۸۰	۰/۰۵	-۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۹۰	۰/۰۷	-۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	X4
۰/۸۰	۰/۱۳	-۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۵۰	۱/۸۰	-۰/۰۱	۰/۰۸	-۰/۸۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵	X5
-۰/۵۰	-۰/۰۲	-۰/۱۷	-۰/۱۰	۱/۲۰	-۰/۱۲	-۰/۲۴	-۰/۱۸	-۱/۰۰	-۰/۱۲	-۰/۱۵	-۰/۱۳	X6
۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۹	-۱/۶۰	۰/۱۹	۰/۱۱	۰/۱۵	۱/۲۰	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۲	X7
-۱/۹۰	۱/۸۹	-۱/۲۲	۰/۳۴	-۰/۸۰	۲/۵۷	-۱/۴۶	۰/۵۵	-۱/۴۰	۰/۹۷	۰/۰۰	۰/۵۰	X8
-۰/۳۰	۸/۵۷	۳/۱۴	۵/۸۴	۰/۹۰	۹/۸۶	۴/۵۵	۷/۱۹	-۰/۲۰	۶/۰۶	۵/۰۰	۵/۵۳	X9
-۰/۳۰	-۰/۱۲	-۰/۷۰	-۰/۴۱	-۰/۴۰	۰/۱۰	-۰/۶۳	-۰/۲۶	۰/۲۰	-۰/۱۰	-۰/۲۷	-۰/۱۹	X10
-۰/۱۰	۱/۷۱	۰/۸۱	۱/۲۶	۰/۷۰	۱/۵۵	۰/۵۸	۱/۰۷	-۰/۷۰	۰/۹۲	۰/۷۱	۰/۸۱	X11
-۱/۹۰	۰/۲۴	-۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۲۵	-۰/۲۱	۰/۰۱	-۰/۹۰	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۵	X12
-۱/۶۰	-۰/۰۳	-۰/۹۴	-۰/۴۸	۱/۰۰	۰/۰۵	-۰/۸۴	-۰/۴۰	۰/۰۰	-۰/۰۶	-۰/۲۴	-۰/۱۵	X13
۰/۱۰	۰/۰۱	-۰/۳۶	-۰/۱۷	-۰/۸۰	-۰/۰۳	-۰/۴۲	-۰/۲۰	۰/۰۰	-۰/۰۷	-۰/۲۰	-۰/۱۳	X14
-۰/۱۰	-۰/۴۲	-۳/۰۳	-۱/۳۳	۰/۵۰	-۰/۳۶	-۴/۳۲	-۲/۳۱	-۰/۷۰	-۱/۷۱	-۲/۶۸	-۲/۱۹	X15
۱/۳۰	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۲۹	-۱/۱۰								$\tau^2$
-۱/۲۰	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۴		۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۱۵					$\sigma^2$
۲۰۵۵/۲۸				۲۰۶۶/۸۲				۴۶۲۳/۴۱				DIC

اصلی شهر خدمات خود را ارائه می‌دهند به‌طور طبیعی باعث افزایش احتمال تداخل عابران با جریان ترافیک می‌شوند و با توجه به آنکه آسیب‌پذیری بیشتری دارند، معمولاً تصادفات شامل این گروه جراحات شدید را به همراه دارد. علامت منفی کاربری تفریحی نشان‌دهنده کاهش تصادفات در نواحی ترافیکی است که دارای این نوع از کاربری هستند. معمولاً این نوع از کاربری‌ها مانند

تحلیل اطلاعات مربوط به تعداد سفرهای تولید شده از هر ناحیه ترافیکی نشان می‌دهد که در حدود ۲۹ درصد از سفرها مربوط به سفرهای باهدف کاری است.

بررسی اثرات کاربری اراضی نشان می‌دهد که کاربری تجاری به‌صورت قابل‌توجهی بر تصادفات جرحی اثرگذارند. نواحی تجاری به‌ویژه آن دسته از مراکزی که در مجاورت خیابان‌های فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال دوازدهم/ شماره دوم (۴۷)/ زمستان ۱۳۹۹

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

مدل‌های پواسون و پواسون-لگ‌نرمال پیشنهاد گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این رویکرد به طرز قابل توجهی عملکرد مدل را افزایش داده است و مقدار DIC را از ۴۶۲۳/۴۱ در مدل پواسون به ۲۰۶۶/۸۲ در مدل پواسون-لگ‌نرمال و ۲۰۵۵/۲۸ در مدل اتورگرسیو شرطی کاهش داده است.

تحلیل فضایی باقی‌مانده‌های مدل BYM با استفاده از شاخص موران، نشان می‌دهد بکارگیری چنین روشی با موفقیت توانسته است وابستگی مکانی را در نظر بگیرد و باقی‌مانده‌های تصادفی (غیر وابسته) را نتیجه دهد.

علاوه بر این، نتایج حاصل از مدل BYM نشان می‌دهد که اثر متغیرهای در نظر گرفته نشده در مدل می‌تواند به‌خوبی توسط الگوهای مکانی پوشش داده شود. در این پژوهش ۷۲ درصد تغییرات توسط جزء تصادفی توصیف می‌گردد.

برای تکمیل نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهادهایی وجود دارد که می‌تواند در پژوهش‌های آتی در صورت تکمیل بانک اطلاعاتی شهر مشهد مدل‌های پیش‌بینی تصادفات را برای سایر سطوح تصادفات (خسارتی و فوتی) توسعه داد و اثر متغیرها را بر وقوع انواع تصادفات سنجید. همچنین مناسب است تا عملکرد دو رویکرد بیزی و کلاسیک با روش برآورد بای ماکسیمم درستنمایی در توسعه مدل‌های پیش‌بینی تصادفات مقایسه شود و ضعف‌ها و نقاط قوت هرکدام مورد بررسی قرار گیرد. بررسی اثر متغیرهای کاربری اراضی در دیگر شهرهای کشور سنجیده شود و نتایج بر اساس هویت شهری، با یکدیگر مقایسه شود و علل اختلاف‌های احتمالی بین نتایج مورد بحث قرار گیرند.

## ۶. پی‌نوشتها

1. Traffic Analysis Zone
2. Traffic Safety Analysis Zone
3. Census tract

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره دوم (۴۷) / زمستان ۱۳۹۹

پارک‌ها و بوستان‌ها، استفاده‌کنندگان از سیستم حمل‌ونقل را از آن جدا کرده و به مناطقی خارج از آن هدایت می‌کنند که وسیله حمل‌ونقل و در نتیجه سوانح ترافیکی در آن‌ها وجود ندارد، البته علامت مثبت نیز برای این نوع از کاربری‌ها با توجه به نحوه ارتباط با سیستم حمل‌ونقل و نیز استفاده‌کنندگان قابل توجه است و بنابراین مناسب است تا با توجه به مورد مطالعه برای آن اعلام نظر شود. علامت برآورد کاربری مسکونی اثر آن را بر کاهش ایمنی ترافیک نشان می‌دهد. مشابه با نتیجه این پژوهش کیم پنت و یاماشیتا نیز نتایج مشابهی را در رابطه با کاهش ایمنی ترافیک در کاربری مسکونی یافتند [KimPant and Yamashita, 2010]. به نظر می‌رسد بتوان با اصلاح طرح هندسی، افزایش فاصله دید و رعایت سلسه‌مراتب حرکت و استفاده از امکانات و تجهیزات لازم برای آرام‌سازی جریان ترافیک در این مناطق ایمنی را افزایش داد. نتایج تحقیق اساما و همکارش در شهر ونکوور کانادا نشان می‌دهد که تمهیدات انجام‌گرفته برای عبور و مرور ایمن جریان ترافیک در مناطق مسکونی، افزایش ایمنی را باعث شده است و اثر کاهش کاربری مسکونی بر کاهش تصادفات عابران را نشان می‌دهد [Osama and Sayed, 2017].

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر توسعه مدل‌های جامع پیش‌بینی تصادفات در سطح کلان نگر است که می‌تواند اثر طیفی از متغیرهای مستقل موردعلاقه برنامه‌ریزان بر فراوانی تصادفات جرحی را نشان دهد. از دیدگاه آماری دو عامل اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز و وابستگی فضایی در توسعه مدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

چنانکه شاخص موران نیز نشان می‌دهد ایده استفاده از مدل‌های فضایی امری منطقی و ضروری است. بدین منظور

- سازمان پزشکی قانونی کشور (۱۳۹۶) "اطلاعات آماری / تصادفات، بازیابی شده در ۱۰ بهمن ۱۳۹۶"، از [http://www.lmo.ir/web\\_directory/53999](http://www.lmo.ir/web_directory/53999)

- Abbas, K. A. (2004) "Traffic safety assessment and development of predictive models for accidents on rural roads in Egypt", Accident Analysis & Prevention, Vol. 36, No. 2, pp. 149-163.

- Abdel-Aty, M., Lee, J., Siddiqui, C. and Choi, K. (2013) "Geographical unit based analysis in the context of transportation safety planning", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 49, pp. 62-75.

- Abdel-Aty, M., Siddiqui, C., Huang, H. and Wang, X. (2011) "Integrating trip and roadway characteristics to manage safety in traffic analysis zones", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2213, pp. 20-28.

- Agüero-Valverde, J. and Jovanis, P. (2008) "Analysis of road crash frequency with spatial models", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2061, pp. 55-63.

- Amoh-Gyimah, R., Saberi, M. and Sarvi, M. (2016) "Macroscopic modeling of pedestrian and bicycle crashes: A cross-comparison of estimation methods", Accident Analysis & Prevention, Vol. 93, pp. 147-159.

- Amoh-Gyimah, R., Saberi, M. and Sarvi, M. (2017) "The effect of variations in spatial units on unobserved heterogeneity in macroscopic crash models", Analytic Methods in Accident Research, Vol. 13, pp. 28-51.

4. County
5. Travel demand management
6. England
7. San Francisco
8. Toronto
9. Melbourne
10. Census ward
11. Statistical area level 2
12. generalized linear model
13. overdispersion
14. poisson-gamma
15. Spatial heterogeneity
16. Geographically Weighted Regression
17. Spatial lag term
18. Besag, York, and Mollié
19. Non-informative
20. Moran index
21. Variance Inflation Factor
22. Deviance Information Criterion

## ۷. مراجع

- مرکز آمار ایران (۱۳۹۷) "داده‌ها و اطلاعات آماری، بازیابی شده در ۲۷ خرداد ۱۳۹۷"، از <https://www.amar.org.ir/> و بخش داده‌ها و اطلاعات-آماري

- بروجردیان، امین میرزا، صفار زاده، محمود، قاسم زاده خشکرودی، علی (۲۰۱۵) "استفاده از مدل‌های اقتصادسنجی فضایی در پیش‌بینی نرخ تصادفات راه"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره ۳، بهار ۱۳۹۴، ص ۳۸۳-۳۹۶.

- سروری، عماد، محمدزاده مقدم، ابوالفضل، صالحی، مهدی، (۱۳۹۶) "توسعه مدل کلان نگر پیش‌بینی تصادفات توسط روش رگرسیون پواسون وزن‌دار شده جغرافیایی"، کنفرانس ملی حمل و نقل دستاوردهای اخیر در مهندسی و برنامه ریزی، قزوین، ایران.

- Gustavsson, J. and Svensson, Å. (1976) "A poisson regression model applied to classes of road accidents with small frequencies", Scandinavian Journal of Statistics, Vol. 3 No. 2, pp. 49-60.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. and Persaud, B. (2003) "Macrolevel accident prediction models for evaluating safety of urban transportation systems", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1840, pp. 87-95.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. and Persaud, B. (2007) "Safety prediction models: Proactive tool for safety evaluation in urban transportation planning applications", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2019, pp. 225-236.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. and Persaud, B. (2010a) "Development of planning-level transportation safety models using full bayesian semiparametric additive techniques", Journal of Transportation Safety & Security, Vol. 2, No. 1, pp. 45-68.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A.S. and Persaud, B. N. (2010) "Development of planning level transportation safety tools using geographically weighted poisson regression", Accident Analysis & Prevention, Vol. 42, No. 2, pp. 676-688.
- Huang, H., Abdel-Aty, M. and Darwiche, A. (2010) "County-level crash risk analysis in Florida: Bayesian spatial modeling", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2148, pp. 27-37.
- Besag, J., York, J. and Mollié, A. (1991) "Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics", Annals of the Institute Of Statistical Mathematics, Vol. 43, No. 1, pp. 1-20.
- Cafiso, S., Di Graziano, A., Di Silvestro, G., La Cava, G. and Persaud, B. (2010) "Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables", Accident Analysis & Prevention, Vol. 42, No. 4, pp. 1072-1079.
- Coruh, E., Bilgic, A. and Tortum, A. (2015) "Accident analysis with aggregated data: The random parameters negative binomial panel count data model", Analytic methods in accident research, Vol. 7, pp. 37-49.
- Craney, T. A. and Surles, J. G. (2002) "Model-dependent variance inflation factor cutoff values", Quality Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 391-403.
- Garber, N. J. and Hoel, L. A. (2014) "Traffic and highway engineering", Stanford, Cengage Learning.
- Geedipally, S. and Lord, D. (2011) "Examination of crash variances estimated by poisson-gamma and conway-maxwell-poisson models", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2241, pp. 59-67.
- Gonzales-Barron, U. and Butler, F. (2011) "A comparison between the discrete poisson-gamma and poisson-lognormal distributions to characterise microbial counts in foods", Food Control, Vol. 22, No. 8, pp. 1279-1286.

- Lee, J., Abdel-Aty, M. and Jiang, X. (2015) "Multivariate crash modeling for motor vehicle and non-motorized modes at the macroscopic level", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 78, pp. 146-154.
- Levine, N., Kim, K. E. and Nitz, L.H. (1995) "Spatial analysis of honolulu motor vehicle crashes: Ii. Zonal generators", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 27, No. 5, pp. 675-685.
- Li, Z., Wang, W., Liu, P., Bigham, J. M. and Ragland, D. R. (2013) "Using geographically weighted poisson regression for county-level crash modeling in california", *Safety Science*, Vol. 58, pp. 89-97.
- Lord, D. and Mannering, F. (2010) "The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 44, No. 5, pp. 291-305.
- Lord, D. and Miranda-Moreno, L.F. (2008) "Effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter of poisson-gamma models for modeling motor vehicle crashes: A bayesian perspective", *Safety Science*, Vol. 46, No. 5, pp. 751-770.
- Loukaitou-Sideris, A., Liggett, R. and Sung, H.-G. (2007) "Death on the crosswalk: A study of pedestrian-automobile collisions in los angeles", *Journal of Planning Education and Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 338-351.
- Ma, J. and Kockelman, K. (2006) "Bayesian multivariate poisson regression for models of injury count, by severity", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1950, pp. 24-34.
- Huang, H., Song, B., Xu, P., Zeng, Q., Lee, J. and Abdel-Aty, M. (2016) "Macro and micro models for zonal crash prediction with application in hot zones identification", *Journal of Transport Geography*, Vol. 54, pp. 248-256.
- Huang, H., Zhou, H., Wang, J., Chang, F. and Ma, M. (2017) "A multivariate spatial model of crash frequency by transportation modes for urban intersections", *Analytic Methods In Accident Research*, Vol. 14, pp. 10-21.
- Khazraee, S. H., Johnson, V. and Lord, D. (2018) "Bayesian poisson hierarchical models for crash data analysis: Investigating the impact of model choice on site-specific predictions", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 117, pp. 181-195.
- Kim, D.-G., Washington, S. and Oh, J. (2006) "Modeling crash types: New insights into the effects of covariates on crashes at rural intersections", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 282-292.
- Kim, K., Pant, P. and Yamashita, E. (2010) "Accidents and accessibility: Measuring influences of demographic and land use variables in Honolulu, Hawaii", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2147, pp. 9-17.
- Lascala, E. A., Gerber, D. and Gruenewald, P. J. (2000) "Demographic and environmental correlates of pedestrian injury collisions: A spatial analysis", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 32, No. 5, pp. 651-658.
- Lee, J., Abdel-Aty, M. and Jiang, X. (2014) "Development of zone system for macro-level traffic safety analysis", *Journal of Transport Geography*, Vol. 38, pp. 13-21.



- Noland, R. B. and Quddus, M. A. (2004) "A spatially disaggregate analysis of road casualties in England", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 36, No. 6, pp. 973-984.
- Osama, A. and Sayed, T. (2017) "Macro-spatial approach for evaluating the impact of socio-economics, land use, built environment and road facility on pedestrian safety", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 44, No. 12, pp. 1036-1044.
- Park, E. S., Carlson, P. J., Porter, R. J. and Andersen, C. K. (2012) "Safety effects of wider edge lines on rural, two-lane highways", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 48, pp. 317-325.
- Poch, M. and Mannering, F. (1996) "Negative binomial analysis of intersection-accident frequencies", *Journal of transportation engineering*, Vol. 122, No. 2, pp. 105-113.
- Pulugurtha, S. S., Duddu, V. R. and Kotagiri, Y. (2013) "Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use characteristics", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 50, pp. 678-687.
- Quddus, M. A. (2008) "Modelling area-wide count outcomes with spatial correlation and heterogeneity: An analysis of london crash data", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, No. 4, pp. 1486-1497.
- Shariat-Mohaymany, A. and Shahri, M. (2017) "Crash prediction modeling using a spatial semi-local model: A case study of Mashhad, Iran", *Applied Spatial Analysis and Policy*, Vol. 10, No. 4, pp. 565-584.
- Meng, Q. and Qu, X. (2012) "Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 48, pp. 254-263.
- Miaou, S.-P. (1994) "The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-482.
- Miaou, S.-P. and Lum, H. (1993) "Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 25, No. 6, pp. 689-709.
- Milton, J. and Mannering, F. (1998) "The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies", *Transportation*, Vol. 25, No. 4, pp. 395-413.
- Mohammadi, M., Shafabakhsh, G. and Naderan, A. (2017) "Macro-level modeling of urban transportation safety: Case-study of Mashhad (Iran)", *Transport and Telecommunication Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 282-289.
- Mountain, L., Fawaz, B. and Jarrett, D. (1996) "Accident prediction models for roads with minor junctions", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 28, No. 6, pp. 695-707.
- Naderan, A. and Shahi, J. (2010) "Aggregate crash prediction models: Introducing crash generation concept", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 42, No. 1, pp. 339-346.

motor vehicle accidents”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 16, No. 3, pp. 191-205.

Wang, X., Yang, J., Lee, C., Ji, Z. and You, S. (2016) "Macro-level safety analysis of pedestrian crashes in shanghai, China”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 96, pp. 12-21.

- Washington, S. (2006) "Incorporating safety into long-range transportation planning", Transportation Research Board Publications: NCHRP Reprt.

- Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E. H., Seto, E. and Bhatia, R. (2009) "An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 41, No. 1, pp. 137-145.

- World Health Organization (2015) "World report on road traffic injury prevention", Geneva, WHO.

- Shariat Mohaymany, A., Shahri, M., Mirbagheri, B. and Matkan, A. A. (2015) "Exploring spatial non stationarity and varying relationships between crash data and related factors using geographically weighted poisson regression”, Transactions in GIS, Vol. 19, No. 2, pp. 321-337.

- Spiegelhalter, D. J., Best, N. G., Carlin, B. P. and Van Der Linde, A. (2002) "Bayesian measures of model complexity and fit”, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), Vol. 64, No. 4, pp. 583-639.

- Tarko, A., Inerowicz, M., Ramos, J. and Li, W. (2008) "Tool with road-level crash prediction for transportation safety planning”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2083, pp. 16-25.

- United Nations (2015) "Sustainable development goals", New York, United Nations.

- Wagenaar, A. C. (1984) "Effects of macroeconomic conditions on the incidence of

توسعه مدل‌های منعطف کلان نگر پیش‌بینی فراوانی تصادفات با در نظرگیری وابستگی‌های فضایی و اثرات مشاهده نشده ناهمسان‌ساز...

عماد سروری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی سجاد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات ایمنی ترافیک و مدل‌سازی تصادفات، مدل‌سازی حمل‌ونقل، داده‌کاوی و مطالعات در زمینه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است.



ابوالفضل محمدزاده مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۸۷ را از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شبیه‌سازی جریان ترافیک، مدل‌سازی در ایمنی ترافیک، داده‌کاوی، طراحی آزمایش در تکنولوژی بتن و آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه فردوسی مشهد است.



سید مهدی صالحی، درجه کارشناسی در رشته آمار را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته آمار گرایش آمار-ریاضی را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته آمار گرایش استنباط از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان داده‌های ترتیبی، نمونه‌گیری مجموعه رتبه‌دار، نظریه توزیع‌ها و آمار محاسباتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه نیشابور است.

