

مدل‌سازی شدت تصادفات جاده‌ای با استفاده از معادلات ساختاری

(مطالعه موردی: استان کرمان)

مقاله علمی - پژوهشی

سید ابراهیم عبدالمنافی*، استادیار، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علیرضا سرکار، استادیار، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
امیرحسین جشنیان، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
سمیرا یاری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: abdolmanafi@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

صفحه ۱۴۶-۱۲۷

چکیده

تصادفات رانندگی یکی از عوامل اصلی مرگ‌ومیر در جهان و منبع مهم خسارات اقتصادی برای کشورها محسوب می‌شود. این تحقیق به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات در راه‌های برون‌شهری استان کرمان با استفاده از تحلیل مسیر به روش حداقل مربعات جزئی پرداخته است. داده‌های مربوط به ۷۶۳ تصادف از سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ برای ارزیابی تأثیر متغیرهایی همچون شرایط آب و هوایی، وضعیت سطح راه، هندسه مسیر، مشخصات راننده، وضعیت روشنایی، نوع وسیله نقلیه و زمان وقوع تصادف بر شدت تصادفات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که عامل جاده با بار عاملی ۱,۷۰۲ بیشترین تأثیر را بر شدت آسیب‌دیدگی تصادفات داشته است. همچنین سن راننده با بار عاملی ۰,۹۹۷ به عنوان قوی‌ترین متغیر تبیین‌کننده در عامل انسانی و روشنایی راه با بار عاملی ۰,۹۴۶ به عنوان مهم‌ترین متغیر در عامل محیطی شناسایی شدند. این یافته‌ها می‌توانند به توسعه سیاست‌های مؤثر برای کاهش شدت تصادفات و بهبود ایمنی جاده‌ها کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مسیر، تصادفات رانندگی، مدل‌سازی معادلات ساختاری

۱- مقدمه

تصادفات جاده‌ای به یکی از پنج عامل اصلی مرگ‌ومیر تبدیل شوند. افزایش تعداد و سرعت وسایل نقلیه و توسعه شبکه‌های جاده‌ای بدون برنامه‌ریزی مؤثر می‌تواند به طور قابل توجهی این آمار را افزایش دهد (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۲۳). تصادفات جاده‌ای به دلیل تأثیرات گسترده اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، بهداشتی و انسانی از جمله مسائل بحرانی جهانی محسوب می‌شوند. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۲۳، خسارات اقتصادی ناشی از تصادفات جاده‌ای در کشورهای با درآمد کم، متوسط و زیاد به ترتیب حدود ۱ تا ۳

افراد جامعه روزانه با سیستم‌های مختلفی مواجه هستند که سیستم حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین آنهاست. بر اساس آخرین گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۲۳، حوادث جاده‌ای همچنان به عنوان یکی از اصلی‌ترین علل مرگ‌ومیر در جهان شناخته می‌شوند. بر اساس این گزارش، در سال ۲۰۲۱ حدود ۱,۱۹ میلیون نفر در تصادفات جاده‌ای جان خود را از دست داده‌اند. این حوادث همچنان علت اصلی مرگ‌ومیر در گروه سنی ۵ تا ۲۹ سال هستند. همچنین پیش‌بینی می‌شود که اگر اقدامات مؤثری برای بهبود ایمنی جاده‌ای انجام نشود، تا سال ۲۰۳۰

مربوط به تصادفات برون‌شهری استان کرمان از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ است. چارچوب پیشنهادی برای شناسایی عوامل مؤثر و تعیین اولویت راهکارها تنها برای راه‌های برون‌شهری کاربرد دارد. این مقاله شامل پنج بخش است.

۲- پیشینه تحقیق

مدلسازی تصادفات رانندگی یکی از بخش‌های کلیدی در مطالعات ایمنی جاده‌ها و مدیریت ترافیک است. هدف از مدلسازی تصادفات، تحلیل و پیش‌بینی وقوع و شدت تصادفات برای طراحی استراتژی‌های مؤثر برای کاهش حوادث و بهبود ایمنی جاده‌ها است. مدل‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای این منظور توسعه یافته‌اند که به دو دسته اصلی مدل‌های قطعی و مدل‌های تصادفی تقسیم می‌شوند. مدل‌های قطعی با فرض پیش‌بینی دقیق بر اساس شرایط ثابت و بدون در نظر گرفتن تغییرات تصادفی، برای تحلیل‌های اولیه و در شرایطی که داده‌های کافی در دسترس نباشد، مناسب هستند. از سوی دیگر، مدل‌های تصادفی به دلیل قابلیت در نظر گرفتن تغییرات و نوسانات در داده‌ها، برای شرایطی که تصادفات به صورت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی رخ می‌دهند، کاربرد بیشتری دارند (ساوالین و همکاران، ۲۰۱۱؛ آناستاسوپولوس و همکاران، ۲۰۱۲). این بخش به معرفی و بررسی مدل‌های مختلف پرداخته و کاربردهای هر یک در تحلیل تصادفات رانندگی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۲-۱ مدل‌های قطعی

مدل‌های قطعی به تحلیل تصادفات بر اساس فرضیات ثابت و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت می‌پردازند. این مدل‌ها در شرایطی که داده‌های دقیق و کافی در دسترس باشند، مفید واقع می‌شوند. مدل‌های قطعی می‌توانند برای طراحی استراتژی‌های ایمنی در جاده‌ها مانند تنظیم سرعت مجاز و نصب علائم راهنمایی کاربرد داشته باشند. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این مدل‌ها این است که قادر به در نظر گرفتن تغییرات تصادفی در داده‌های تصادفات نیستند و به همین دلیل نمی‌توانند به طور کامل پیچیدگی‌های واقعی دنیای ترافیک را مدلسازی کنند (لرد و مانرینگ، ۲۰۱۰؛ واشنگتن و همکاران، ۲۰۲۰).

درصد از تولید ناخالص ملی را به خود اختصاص می‌دهد. این موضوع، ایمنی ترافیک را به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های تحقیقاتی در حوزه حمل‌ونقل تبدیل کرده است (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۲۳). تحقیقات مختلفی به بررسی شدت تصادفات در شبکه‌های جاده‌ای پرداخته‌اند و از روش‌های مختلفی برای تحلیل عوامل تأثیرگذار استفاده کرده‌اند. معمولاً برای بررسی شدت تصادفات از مدل‌های آماری گسسته مانند مدل‌های لوجیت و پرابیت استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای تحلیل رابطه بین شدت تصادف و عوامل مؤثر مانند ویژگی‌های راننده، مشخصات خودرو، شرایط جاده و عوامل محیطی کاربرد دارند (عبدالوهاب و عبدالعاطی، ۲۰۰۱؛ آناستاسوپولوس و همکاران، ۲۰۱۲؛ چن و همکاران، ۲۰۱۷). تکنیک‌های سنتی مدلسازی معمولاً قادر به تحلیل تعاملات مستقیم و غیرمستقیم بین متغیرها و متغیرهای پنهان نیستند. این مسئله باعث می‌شود که نتایج مدلسازی دقیق نباشد. تصادفات به دلیل وجود عوامل مختلف و پیچیده، نیاز به روش‌های پیشرفته‌تری برای تحلیل دارند. مدلسازی معادلات ساختاری با توانایی تحلیل متغیرهای پنهان و غیرقابل اندازه‌گیری می‌تواند به دقت بیشتری به بررسی این پیچیدگی‌ها بپردازد.

از طرفی افزایش تعداد خودروها و تصادفات ترافیکی به ویژه در کشورهای در حال توسعه، یک مشکل جدی است. اقدامات موجود برای کاهش تصادفات اغلب ناکارآمد بوده و به نظر می‌رسد که استفاده از روش‌های جدید آماری مانند مدلسازی معادلات ساختاری می‌تواند راهکار مؤثری برای این مسئله باشد (هیر و همکاران، ۲۰۱۷؛ هنسلر و همکاران، ۲۰۱۵). این تحقیق با استفاده از مدلسازی معادلات ساختاری به شناسایی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات و تعیین اولویت‌های راهکارها برای کاهش تصادفات پرداخته است. هدف این تحقیق بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شدت تصادفات با استفاده از مدلسازی معادلات ساختاری است. اهداف خاص شامل شناسایی عوامل مؤثر، تعیین میزان تأثیر هر یک از عوامل، یافتن ارجحیت بین پارامترهای مختلف و بررسی تأثیر متغیرهای پنهان بر شدت تصادف می‌باشد. نوآوری اصلی این تحقیق در استفاده از روش تحلیل مسیر به روش حداقل مربعات جزئی برای ارزیابی تأثیر متغیرهای متنوعی از جمله شرایط آب و هوایی، وضعیت سطح راه، هندسه مسیر، مشخصات راننده، وضعیت روشنایی، نوع وسیله‌نقلیه و زمان وقوع تصادف است. داده‌های این تحقیق

۲-۲-۱ مدل‌های رگرسیون پواسون

مدل‌های رگرسیون پواسون یکی از روش‌های آماری متداول برای تحلیل تعداد و شدت تصادفات هستند. این مدل‌ها به ویژه در شرایطی که داده‌های تصادفات به صورت شمارشی و پراکنده هستند، کاربرد دارند. در مدل‌های رگرسیون پواسون، فرض بر این است که تعداد تصادفات از یک توزیع پواسون پیروی می‌کند و می‌توان ارتباط بین متغیرهای مستقل مانند ویژگی‌های جاده و تعداد تصادفات را بررسی کرد. این مدل‌ها به ویژه در تحلیل تصادفات با نرخ پایین یا بالا مفید هستند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

وانگ و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی از مدل رگرسیون پواسون برای تحلیل تعداد تصادفات در تقاطع‌های شهری استفاده کردند. متغیرهای بررسی شده شامل تراکم ترافیک، عرض جاده و وجود چراغ‌های ترافیکی بودند. نتایج نشان داد که افزایش تراکم ترافیکی و نبود چراغ‌های ترافیکی مناسب، به طور مستقیم با افزایش تعداد تصادفات مرتبط است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸).
خو و همکاران (۲۰۲۰) از مدل رگرسیون پواسون برای تحلیل تأثیر وضعیت سطح جاده و نوع وسیله‌نقلیه بر تعداد تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که سطوح لغزنده جاده و خودروهای سبک‌تر با افزایش تصادفات ارتباط دارند (خو و همکاران، ۲۰۲۰). شی و عبدالعطی (۲۰۱۵) مدل رگرسیون پواسون برای تحلیل تأثیر زمان و مکان وقوع تصادفات استفاده کردند و نشان دادند که تصادفات بیشتر در ساعات شلوغ روز و در تقاطع‌های پرتردد رخ می‌دهند (شی و عبدالعطی، ۲۰۱۵).
زو و همکاران (۲۰۲۱) از مدل رگرسیون پواسون برای تحلیل تأثیر تغییرات اقلیمی (دمای بالا و رطوبت) بر تصادفات جاده‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی خاص می‌تواند به افزایش تصادفات منجر شود (زو و همکاران، ۲۰۲۱).
چن و همکاران (۲۰۱۷) از این مدل برای تحلیل تأثیر نوع وسیله‌نقلیه و مشخصات راننده بر تعداد تصادفات استفاده کردند و دریافتند که وسایل نقلیه سنگین‌تر و رانندگان جوان‌تر در تصادفات بیشتری دخیل هستند (چن و همکاران، ۲۰۱۷).
لیو و همکاران (۲۰۱۹) از مدل رگرسیون پواسون را برای تحلیل تأثیر متغیرهای محیطی مانند نوع پوشش گیاهی و وضعیت روشنایی بر تعداد تصادفات استفاده کردند و نشان دادند که این متغیرها تأثیر معنی‌داری بر تعداد تصادفات دارند (لیو و همکاران، ۲۰۱۹).

ژو و پنگ (۲۰۲۰) در تحقیق خود از یک مدل قطعی برای تحلیل تأثیر شرایط جوی (متغیرهایی مانند باران و برف) بر شدت تصادفات جاده‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که کاهش دید در شرایط بارانی به طور مستقیم با افزایش شدت تصادفات مرتبط است (ژو و پنگ، ۲۰۲۰). کیم و همکاران (۲۰۲۱) از مدل‌های قطعی برای بررسی تأثیر شرایط ترافیکی (تراکم و سرعت متوسط خودروها) بر تعداد تصادفات در بزرگراه‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که تراکم ترافیکی بالا با کاهش شدید تعداد تصادفات ارتباط دارد (کیم و همکاران، ۲۰۲۱).
لی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل قطعی به بررسی تأثیر نوع خودرو (متغیرهایی مانند نوع وسیله نقلیه و سن راننده) بر شدت تصادفات پرداختند و دریافتند که خودروهای سنگین‌تر در تصادفات شدیدتری دخیل هستند (لی و همکاران، ۲۰۱۹). پارک و لی (۲۰۱۹) از مدل‌های قطعی برای تحلیل تأثیرات نوع مسیر (مسیرهای مستقیم یا پیچ‌دار) بر شدت تصادفات استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که مسیرهای پیچ‌دار با افزایش احتمال تصادفات شدید مرتبطاند (پارک و لی، ۲۰۱۹). چن و ژائو (۲۰۲۰) از مدل‌های قطعی برای بررسی تأثیرات ترکیبی شرایط جوی و نوع سطح جاده (آسفالت یا بتن) بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که سطح جاده در شرایط بارانی تأثیر قابل توجهی بر شدت تصادفات دارد (چن و ژائو، ۲۰۲۰). وانگ و همکاران (۲۰۲۲) از مدل قطعی برای تحلیل تأثیر نورپردازی جاده‌ای بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که نورپردازی مناسب می‌تواند به طور چشمگیری احتمال وقوع تصادفات شدید را کاهش دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۲-۲ مدل‌های تصادفی

برخلاف مدل‌های قطعی، مدل‌های تصادفی به تحلیل و پیش‌بینی تصادفات با در نظر گرفتن عدم قطعیت و تغییرات تصادفی در داده‌ها می‌پردازند. این مدل‌ها شامل تکنیک‌هایی مانند مدل‌های رگرسیون و تکنیک‌های یادگیری ماشینی هستند که برای تحلیل داده‌های پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی بکار می‌روند. مدل‌های تصادفی به دلیل توانایی‌شان برای در نظر گرفتن تغییرات و نوسانات در داده‌ها، در شرایطی که اطلاعات مربوط به تصادفات دارای نوسانات قابل توجه هستند، بسیار موثر هستند (لرد و مانرینگ، ۲۰۱۰؛ پارک و لی، ۲۰۱۹).

نتایج نشان داد که جاده‌های باریک‌تر و بدون جداکننده بیشتر در تصادفات شدید دخیل هستند (زنگ و هوانگ، ۲۰۱۴). لورد و منرینگ (۲۰۱۰) از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای تحلیل داده‌های تصادفات بر اساس متغیرهای ترافیکی و جوی استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط نامساعد جوی مانند باران و برف به افزایش شدید تصادفات منجر می‌شود (لورد و منرینگ، ۲۰۱۰). ساوولاینن و همکاران (۲۰۱۱) از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای تحلیل تأثیر متغیرهای مربوط به وسایل نقلیه و رانندگان بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که خودروهای سنگین‌تر و رانندگان با تجربه کمتر بیشتر در تصادفات شدید دخیل هستند (ساوولاینن و همکاران، ۲۰۱۱). منرینگ و همکاران (۲۰۱۶) از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای تحلیل شدت تصادفات در راه‌های روستایی استفاده کردند و دریافتند که متغیرهایی مانند نوع سطح جاده و حضور علائم ترافیکی تأثیر قابل توجهی بر شدت تصادفات دارند (منرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). ژو و سان (۲۰۱۸) از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای تحلیل تصادفات در تقاطع‌های بدون چراغ استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد خطوط و کاهش دید در این تقاطع‌ها، شدت تصادفات را افزایش می‌دهد (ژو و سان، ۲۰۱۸). مدل دوجمله‌ای منفی به عنوان توسعه‌ای از مدل پواسون طراحی شده است که به‌ویژه برای داده‌هایی با واریانس بزرگ‌تر از میانگین مناسب است. توزیع احتمال در این مدل به صورت رابطه (۳) است.

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\Gamma(x+y)}{\Gamma(k)y!} \left(\frac{k}{k+\lambda}\right)^k \left(\frac{\lambda}{k+\lambda}\right)^y, y_i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

که در آن، واریانس برابر با رابطه (۴) است.

$$\sigma^2 = \lambda + \frac{\lambda^2}{k} \quad (4)$$

که در آن، λ_i متوسط تعداد تصادفات به وقوع پیوسته در یک دوره زمانی است که از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$\lambda_i = E(y_i) = v \left[e^{\sum_{j=1}^k x_{ij} \beta_j} \right] \quad (5)$$

مدل دوجمله‌ای منفی قادر به در نظر گرفتن فرآیندگی است و به همین دلیل برای تحلیل تصادفات رانندگی که واریانس آن‌ها بیشتر از میانگین است، مناسب‌تر است (آناستاسوپولوس و همکاران، ۲۰۱۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۹).

مدل‌های رگرسیون پواسون بویژه برای داده‌های شمارشی که در آن‌ها تصادفات بصورت مستقل از یکدیگر و با نرخ ثابت در یک دوره زمانی خاص رخ می‌دهند، کاربرد دارند. توزیع پواسون بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\lambda_i^{y_i} e^{-\lambda_i}}{y_i!}, y_i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

که در آن، $P(y_i)$ احتمال وقوع y_i تصادف در یک دوره زمانی در مقطع i جاده، y_i تعداد تصادفات در یک دوره زمانی در مقطع i جاده و λ_i متوسط تعداد تصادفات به وقوع پیوسته در یک دوره زمانی است که از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\lambda_i = E(y_i) = v \left[e^{\sum_{j=1}^k x_{ij} \beta_j} \right] \quad (2)$$

مدل پواسون فرض می‌کند که واریانس و میانگین داده‌ها برابر است. با این حال، تحقیقات نشان داده‌اند که در بسیاری از موارد، واریانس از میانگین بزرگ‌تر است، که به پدیده‌ای به نام "فراپراکنندگی" منجر می‌شود. این پدیده می‌تواند موجب کاهش دقت تخمین پارامترهای مدل شود و نیاز به مدل‌های پیچیده‌تر برای اصلاح این مشکل را ایجاد کند (شی و عبدالعطی، ۲۰۱۵).

۲-۲-۲ مدل‌های رگرسیون دوجمله‌ای منفی

مدل‌های رگرسیون دوجمله‌ای منفی زمانی استفاده می‌شوند که داده‌های تصادفات دارای پراکنندگی بیش از حد هستند، یعنی واریانس داده‌ها بیشتر از مقدار میانگین آن‌ها است. این مدل‌ها نسبت به مدل‌های رگرسیون پواسون انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و می‌توانند نوسانات بیشتر در داده‌ها را به خوبی مدل‌سازی کنند. به دلیل این ویژگی، مدل‌های رگرسیون دوجمله‌ای منفی به عنوان جایگزینی مناسب برای مدل‌های پواسون در تحلیل تصادفات رانندگی با پراکنندگی بالا شناخته می‌شوند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لورد و منرینگ، ۲۰۱۰).

هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای تحلیل شدت تصادفات در بزرگراه‌ها استفاده کردند. متغیرهای بررسی شده شامل کیفیت سطح جاده، وجود علائم هشداردهنده و تراکم ترافیکی بودند. نتایج نشان داد که کیفیت نامناسب سطح جاده و عدم وجود علائم هشداردهنده با افزایش شدت تصادفات ارتباط مستقیم دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۹). زنگ و هوانگ (۲۰۱۴) از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای بررسی تأثیر ویژگی‌های جاده‌ای مانند تعداد خطوط و عرض جاده بر شدت تصادفات استفاده کردند.

۲-۳-۲ مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون

مدل‌های درخت دسته‌بندی و رگرسیون یکی از روش‌های یادگیری ماشینی هستند که برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی داده‌های تصادفات استفاده می‌شوند. این مدل‌ها بویژه در تحلیل داده‌های پیچیده و دارای ساختار غیردقیق مفید هستند. درخت‌های تصمیم‌گیری می‌توانند برای شناسایی عوامل کلیدی تأثیرگذار بر شدت تصادفات و ارائه توصیه‌هایی برای کاهش خطرات ترافیکی استفاده شوند. مزیت اصلی این مدل‌ها در سادگی تفسیر و توانایی آن‌ها در شناسایی تعاملات پیچیده بین متغیرها است (سان و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱).

لیو و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای بررسی تأثیر ویژگی‌های جاده بر شدت تصادفات استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل عرض جاده، تعداد خطوط و وجود جداکننده‌ها بود. نتایج نشان داد که جاده‌های باریک‌تر با خمیدگی‌های تند و کاهش عرض جاده از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شدت تصادفات بودند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱). سان و همکاران (۲۰۱۹) از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای تحلیل تأثیر عوامل محیطی مانند شرایط جوی و روشنایی بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط کم‌نور و جاده‌های خیس باعث افزایش شدت تصادفات می‌شود (سان و همکاران، ۲۰۱۹). ژانگ و ما (۲۰۲۰) از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای پیش‌بینی شدت تصادفات در نواحی شهری استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل تراکم ترافیک، سرعت متوسط و نوع وسیله‌نقلیه بود. نتایج نشان داد که تراکم ترافیکی بالا و سرعت متوسط کم با کاهش شدت تصادفات مرتبط است (ژانگ و ما، ۲۰۲۰). چن و همکاران (۲۰۱۷) از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای تحلیل تأثیر ویژگی‌های هندسی جاده بر شدت تصادفات استفاده کردند. متغیرهای بررسی‌شده شامل شعاع خمیدگی، شیب جاده و نوع پوشش گیاهی بودند و نتایج نشان داد که خمیدگی‌های شدیدتر و شیب زیاد به افزایش شدت تصادفات منجر می‌شوند (چن و همکاران، ۲۰۱۷). زی و یان (۲۰۲۲) از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای تحلیل تأثیر متغیرهای مختلف جاده‌ای و ترافیکی بر شدت تصادفات در تقاطع‌ها استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که وجود چراغ‌های ترافیکی و کنترل‌های سرعت می‌تواند شدت تصادفات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (زی و یان، ۲۰۲۲). لیو و همکاران (۲۰۲۰) از مدل درخت دسته‌بندی و رگرسیون برای

تحلیل تصادفات در جاده‌های بین‌شهری استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل نوع وسیله‌نقلیه، سن راننده و شرایط سطح جاده بودند و نتایج نشان داد که جاده‌های بدون چراغ راهنمایی و با سطح لغزنده بیشترین شدت تصادفات را داشته‌اند (لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل‌های درخت تصمیم برای تحلیل عوامل مؤثر بر شدت تصادفات رانندگی کاربرد دارند. این مدل‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: درخت دسته‌بندی برای متغیرهای هدف اسمی و درخت رگرسیون برای متغیرهای هدف پیوسته. درخت تصمیم با قرار دادن تمامی داده‌ها در یک گره ریشه آغاز می‌شود و سپس با استفاده از متغیرهایی که بیشترین همگنی را ایجاد می‌کنند، داده‌ها را به شاخه‌های مختلف تقسیم می‌کند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که داده‌ها در هر گره به بالاترین همگنی ممکن برسند. گره‌های انتهایی که دیگر انشعاب نمی‌دهند، گره‌های نهایی یا برگ نامیده می‌شوند (سان و همکاران، ۲۰۱۹).

چانگ و چن (۲۰۱۳) با استفاده از مدل درخت دسته‌بندی غیرپارامتریک به بررسی عوامل مؤثر بر شدت آسیب‌های راننده در تصادفات وسایل نقلیه سنگین پرداختند. نتایج نشان داد که عواملی نظیر مصرف الکل، نوع برخورد و استفاده از کمربند ایمنی تأثیر قابل توجهی بر شدت آسیب‌ها دارند (چانگ و چن، ۲۰۱۳). توکلی کاشانی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات در راه‌های دوخطه پرداختند و نشان دادند که سبقت نامناسب و عدم استفاده از کمربند ایمنی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شدت تصادفات هستند (توکلی کاشانی و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۳-۳ مدل شبکه عصبی مصنوعی

مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی از جمله روش‌های پیشرفته یادگیری ماشینی هستند که در تحلیل تصادفات ترافیکی کاربرد دارند. این مدل‌ها به دلیل قابلیت یادگیری و پیش‌بینی الگوهای پیچیده در داده‌ها بویژه در شرایطی که داده‌ها دارای روابط غیرخطی هستند، بسیار مؤثر هستند. شبکه‌های عصبی می‌توانند برای تحلیل تعاملات پیچیده بین متغیرهای مختلف مانند ویژگی‌های راننده، شرایط جاده و ویژگی‌های خودرو بکار گرفته شوند. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این مدل‌ها نیاز به داده‌های بزرگ و پیچیدگی در تنظیم پارامترها است (عبدالوهاب، ۲۰۰۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱). مدل‌های شبکه

بودند. نتایج نشان داد که رانندگان جوان تر و جاده‌های دوخطه با افزایش شدت تصادفات مرتبطاند (زو و سان، ۲۰۱۸). عبدالوهاب (۲۰۰۱) از شبکه عصبی برای مدل‌سازی شدت جراحت راننده در تصادفات تقاطعات چراغ‌دار استفاده کرد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی MLP دقت بهتری نسبت به مدل‌های سنتی مانند لاجیت تربیتی دارد (عبدالوهاب، ۲۰۰۱). کیانگ ژنگ و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم ترکیبی محدب برای آموزش سریع‌تر شبکه عصبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که این الگوریتم، دقت طبقه‌بندی بالاتری نسبت به مدل‌های آماری سنتی ارائه می‌دهد (کیانگ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۴).

۳- مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی و تحلیل شاخص‌های نیکویی برازش مدل در روش تحلیل مسیر با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی پرداخته می‌شود. روش حداقل مربعات جزئی به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی پردازش با حجم نمونه‌های کوچک به یکی از روش‌های محبوب در مدل‌سازی معادلات ساختاری تبدیل شده است. بنابراین یکی از دلایل محبوبیت و پرکاربرد بودن روش حداقل مربعات جزئی، عدم نیاز به استفاده از حجم بالای نمونه در پژوهش‌ها است. برخلاف روش‌های پیشین که به تعداد نمونه‌های بالا (بیش از ۲۰۰ نمونه) برای اجرای صحیح مدل‌های معادلات ساختاری نیاز داشتند، روش حداقل مربعات جزئی قادر است حتی با تعداد نمونه‌های کمتر از تعداد کل متغیرهای پژوهش به تحلیل بپردازد. این روش به مشکلاتی از جمله عدم همگرایی و ارائه راه‌حل‌های نامناسب که در روش‌های نسل اول با حجم نمونه اندک ایجاد می‌شود، دچار نمی‌شود. این بخش شامل مباحثی پیرامون تعیین حجم نمونه مناسب، پایایی و روایی مدل‌های اندازه‌گیری و بررسی برازش کلی مدل است.

۳-۱- تعیین حجم نمونه مناسب

یکی از قواعد شناخته شده برای تعیین حداقل نمونه لازم در روش حداقل مربعات جزئی توسط بارکلای و همکاران در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است. ایشان اظهار می‌دارند که حداقل حجم نمونه لازم برای استفاده از روش حداقل مربعات جزئی برابر است با بزرگ‌ترین مقدار حاصل از دو قاعده زیر:

الف) ۱۰ برابر تعداد شاخص‌های مدل اندازه‌گیری‌ای که دارای

عصبی مصنوعی به عنوان ابزارهای پیشرفته در تحلیل داده‌ها به الهام از عملکرد مغز انسان برای یادگیری و پردازش اطلاعات طراحی شده‌اند. این مدل‌ها قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده بین پارامترهای مستقل و وابسته هستند. در شبکه‌های عصبی، ورودی‌ها به لایه‌های مختلف شبکه وارد شده و با استفاده از ضرایب وزنی پردازش می‌شوند. خروجی نهایی از طریق توابع تحریک محاسبه می‌شود. برای آموزش شبکه، خطای بین خروجی شبکه و خروجی مطلوب محاسبه شده و از لایه‌های بالاتر به لایه‌های پایین‌تر ارسال می‌شود تا ضرایب وزنی اصلاح شوند (هیر و همکاران، ۲۰۱۷).

یوو و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی شدت تصادفات استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل سرعت خودرو، فاصله تا تقاطع و نوع وسیله‌نقلیه بودند. نتایج نشان داد که سرعت بالاتر و نزدیکی به تقاطع‌ها از عوامل اصلی افزایش شدت تصادفات بودند (یوو و همکاران، ۲۰۲۲). هوآنگ و همکاران (۲۰۱۹) از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تحلیل تأثیر ویژگی‌های هندسی جاده مانند عرض جاده و شعاع خمیدگی بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که جاده‌های با عرض کمتر و خمیدگی‌های تندتر بیشتر به تصادفات شدید منجر می‌شوند (هوآنگ و همکاران، ۲۰۱۹). زنگ و هوآنگ (۲۰۱۷) از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی شدت تصادفات در نواحی شهری استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل تراکم ترافیک، نوع وسیله‌نقلیه و شرایط جوی بودند. نتایج نشان داد که تراکم ترافیکی بالا و شرایط نامساعد جوی بیشترین تأثیر را بر شدت تصادفات داشتند (زنگ و هوآنگ، ۲۰۱۷). لیو و همکاران (۲۰۲۱) از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تحلیل تصادفات در بزرگراه‌ها استفاده کردند. متغیرهای مورد استفاده شامل نوع وسیله‌نقلیه، سرعت متوسط و حضور علائم ترافیکی بودند و نتایج نشان داد که حضور علائم مناسب می‌تواند به کاهش شدت تصادفات کمک کند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱). چن و همکاران (۲۰۲۰) از شبکه‌های عصبی برای تحلیل تأثیر متغیرهای محیطی مانند روشنایی و شرایط جوی بر شدت تصادفات استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط کم‌نور و بارندگی شدید باعث افزایش شدت تصادفات می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۲۰). زو و سان (۲۰۱۸) از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی شدت تصادفات در نواحی روستایی استفاده کردند. متغیرهای اصلی شامل نوع جاده، سن راننده و سرعت وسیله‌نقلیه

استفاده همان مفهومی که پژوهشگر مورد نظر دارد را می‌سنجند یا خیر. روایی مدل‌های اندازه‌گیری انعکاسی از دو جنبه بررسی می‌شود:

روایی همگرا: این معیار نشان‌دهنده میانگین واریانس به اشتراک گذاشته شده بین هر متغیر با شاخص‌های خود است. مقدار بحرانی روایی همگرا برابر با ۰,۵ است. مقادیر بالاتر از ۰,۵ نشان‌دهنده روایی همگرا قابل قبول است.

روایی واگرا: این معیار دو روش برای بررسی روایی واگرا دارد: الف) روش بارهای عاملی متقابل: میزان همبستگی بین شاخص‌های یک متغیر با آن متغیر و میزان همبستگی آن شاخص‌ها با متغیرهای دیگر مقایسه می‌شود. اگر همبستگی بین شاخص‌ها با متغیرهای دیگر بیشتر از همبستگی آن‌ها با متغیر مربوط به خود باشد، روایی واگرای مدل زیر سؤال می‌رود.

ب) روش فورنل و لارکر: جذر روایی همگرا متغیرها باید از مقدار همبستگی میان آن‌ها بیشتر باشد. این روش نشان‌دهنده این است که متغیرها در مدل تعامل بیشتری با شاخص‌های خود دارند تا با متغیرهای دیگر.

روایی و پایایی مدل‌های اندازه‌گیری ترکیبی

در مدل‌های ترکیبی، هر متغیر مشاهده شده (شاخص) یک بعد از مفهوم سازه‌ی متناظر را ارائه می‌دهد. برای بررسی برازش مدل‌های ترکیبی، معیارهای مختلفی به کار می‌روند:

الف) معناداری بارهای عاملی شاخص‌ها: t -value شاخص‌ها باید بیشتر از ۱,۹۶ باشد تا نشان‌دهنده معناداری بارهای عاملی باشد. شاخص‌هایی با t -value کمتر از این مقدار باید مورد بررسی مجدد قرار گیرند.

ب) هم‌خطی بین شاخص‌ها: هم‌خطی بالا بین شاخص‌ها می‌تواند باعث زیر سؤال رفتن برازش مدل شود. بررسی هم‌خطی از طریق معیار فاکتور افزایش نرخ واریانس انجام می‌شود. مقادیر فاکتور افزایش نرخ واریانس بیشتر از ۵ یا ۱۰ نشان‌دهنده هم‌خطی بالا است که نیاز به اصلاح دارد.

۳-۳- بررسی برازش بخش ساختاری مدل

پس از بررسی برازش مدل‌های اندازه‌گیری، نوبت به بررسی برازش مدل ساختاری می‌رسد. این بخش به تحلیل روابط میان متغیرهای پنهان پرداخته و شاخص‌های زیر را شامل می‌شود. الف) ضرایب معناداری t : مقادیر t برای بررسی صحت رابطه

بیشترین شاخص در میان مدل‌های اندازه‌گیری مدل اصلی پژوهش است.

ب) ۱۰ برابر بیشترین روابط موجود در ساختاری مدل اصلی پژوهش که به یک متغیر مربوط می‌شوند.

با این حال، تعیین حجم نمونه مناسب برای پژوهش‌های مختلف به عوامل زیادی بستگی دارد و شیوه‌های ارائه شده تنها در مورد تعیین حداقل حجم نمونه کارایی دارند. عوامل مختلفی از جمله توزیع داده‌ها و تعداد داده‌های گمشده بر تعیین حجم نمونه مناسب تأثیر می‌گذارند.

۳-۲- پایایی و روایی

پایایی و روایی در روش حداقل مربعات جزئی در دو بخش مدل‌های اندازه‌گیری و مدل ساختاری سنجیده می‌شود. سنجش پایایی و روایی برای هر یک از مدل‌های اندازه‌گیری انعکاسی و ترکیبی متفاوت است.

پایایی مدل‌های اندازه‌گیری انعکاسی

پایایی یا قابلیت اعتماد مدل اندازه‌گیری مشخص می‌سازد که ابزار اندازه‌گیری در صورت اجرا در شرایط یکسان تا چه اندازه نتایج یکسانی دارد. پایایی خود از سه طریق بررسی می‌شود:

الف) ضرایب بارهای عاملی: بارهای عاملی از طریق محاسبه مقدار همبستگی شاخص‌های یک متغیر با آن سازه محاسبه می‌شوند. مقدار بار عاملی باید بیشتر از ۰,۴ باشد تا پایایی مدل قابل قبول تلقی شود. در غیر اینصورت، شاخص‌ها باید اصلاح یا حذف شوند.

ب) آلفای کرونباخ: این معیار، معیاری کلاسیک برای سنجش پایایی و پایداری درونی محسوب می‌شود. مقدار آلفای کرونباخ بالاتر از ۰,۷ نشان‌دهنده پایایی قابل قبول است. در برخی موارد مقدار ۰,۶ نیز به عنوان مرز پایایی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

ج) پایایی ترکیبی: این معیار مدرن‌تر از آلفای کرونباخ است و پایایی متغیرها را با توجه به همبستگی متغیرها با یکدیگر محاسبه می‌کند. مقدار پایایی ترکیبی بالاتر از ۰,۷ نشان‌دهنده پایداری درونی مناسب است.

روایی مدل‌های اندازه‌گیری انعکاسی

روایی یا اعتبار ابزار تعیین می‌کند که آیا شاخص‌های مورد

استفاده از روش حداقل مربعات جزئی به دلیل توانایی آن در تحلیل داده‌های غیرنرمال و استفاده از مدل‌های اندازه‌گیری با یک شاخص، مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد.

۴-۱- تحلیل داده‌ها

آمار توصیفی داده‌ها و تحلیل‌های ابتدایی با هدف ارائه دیدگاه‌های اولیه در مورد ویژگی‌های تصادفات به‌طور کامل توضیح داده می‌شود. برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای آماری SPSS و SmartPLS استفاده شده است. این ابزارها به تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شدت تصادفات کمک کرده و نتایج به دست آمده را بطور دقیق‌تر ارائه می‌دهند.

۴-۱-۱- آمار توصیفی داده‌ها

الف) زمان وقوع تصادف در جداول بانک‌های اطلاعاتی، تاریخ و ساعت وقوع تصادفات به دقت ثبت می‌شود. در این پژوهش، متغیر زمان وقوع تصادف به عنوان یک عامل مستقل مورد بررسی قرار گرفت تا اهمیت ارتباط بین ساعت وقوع تصادف و شدت آن در راه‌های برون‌شهری تحلیل شود. زمان وقوع تصادفات در طول شبانه‌روز به شش گروه کلی تقسیم‌بندی شده است که از ساعات با ترافیک خلوت به ساعات با ترافیک شلوغ ترتیب یافته‌اند. گروه‌بندی شامل ۱) ساعت ۰ تا ۴ (ساعات ترافیک خلوت شبانه)، ۲) ساعت ۴ تا ۸ (ساعات ترافیک خلوت شبانه و صبحگاهی)، ۳) ساعت ۸ تا ۱۲ (ساعات اوج ترافیک صبح، شامل سفرهای کاری)، ۴) ساعت ۱۲ تا ۱۶ (ساعات ترافیک خلوت ظهر)، ۵) ساعت ۱۶ تا ۲۰ (ساعات اوج ترافیک شب، شامل سفرهای تفریحی و برگشت به منزل)، و ۶) ساعت ۲۰ تا ۲۴ (ساعات ترافیک متوسط شب) می‌باشد. این تقسیم‌بندی در نرم‌افزار SPSS کدگذاری شده است و شکل (۱) فراوانی انواع تصادفات را در هر گروه زمانی نمایش می‌دهد.

ب) وضعیت روشنایی راه

میزان روشنایی موجود در راه‌ها تأثیر مستقیمی بر میدان دید راننده دارد و می‌تواند بر قدرت تمرکز و عکس‌العمل او تأثیر بگذارد. شرایط نور کم مانند شب یا گرگ‌ومیش، ممکن است باعث کاهش دید رانندگان و توانایی آنها در کنترل وسیله‌نقلیه شود. در مقابل، ممکن است رانندگان در شرایط روشنایی کم

بین متغیرها استفاده می‌شود. مقادیر بالاتر از ۱,۹۶ نشان‌دهنده تأیید فرضیه‌ها در سطح اطمینان ۰,۹۵ هستند.

ب) معیار R^2 : این معیار نشان‌دهنده تأثیر متغیر برون‌زا بر متغیر درون‌زا است و مقادیر آن می‌تواند ضعیف، متوسط یا قوی باشد.

ج) معیار Q^2 : قدرت پیش‌بینی مدل را مشخص می‌سازد. مقادیر Q^2 باید برای تمامی متغیرهای وابسته محاسبه شود. مقادیر بالاتر نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی قوی مدل هستند.

د) معیار افزونگی: نشان‌دهنده مقدار تغییرپذیری شاخص‌های یک متغیر درون‌زا است که از متغیرهای برون‌زا تأثیر می‌پذیرد. مقدار بالای افزونگی نشان‌دهنده برازش مناسب بخش ساختاری مدل است.

۳-۴- بررسی برازش کلی مدل

مدل کلی شامل هر دو بخش مدل اندازه‌گیری و ساختاری است. بررسی برازش کلی مدل از طریق معیار نیکویی برازش انجام می‌شود. نیکویی برازش از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$GOF = \sqrt{R^2 * Commuality} \quad (6)$$

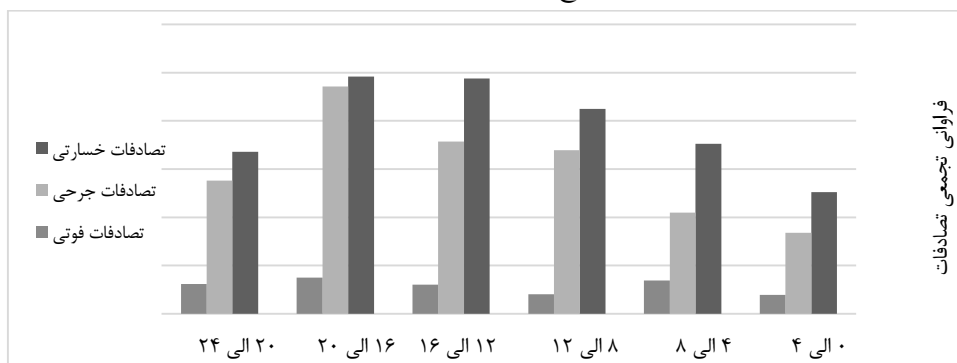
که در آن، Commuality از میانگین مقادیر اشتراکی هر متغیر درون‌زای مدل به دست می‌آید و R^2 میانگین مقادیر R^2 ها برای متغیرهای درون‌زای مدل است. به‌طور کلی، مقادیر ۰,۰۱، ۰,۲۵ و ۰,۳۶ به عنوان نیکویی برازش ضعیف، متوسط و قوی در نظر گرفته می‌شوند (هیر و همکاران، ۲۰۱۷؛ هنزله و همکاران، ۲۰۱۵).

۴- نتایج و یافته‌های تحقیق

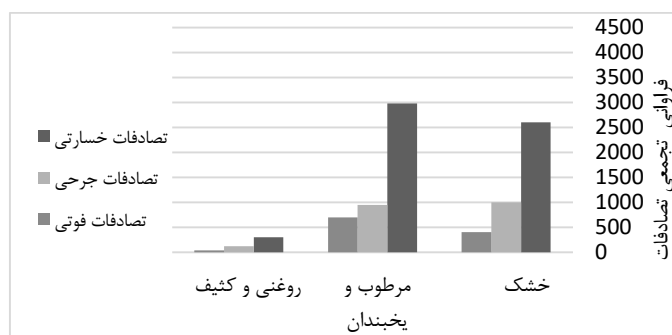
در این بخش، ابتدا آمار توصیفی داده‌ها بر اساس جنبه‌های مختلف سوانح رانندگی و نحوه کدگذاری داده‌ها برای ورود به مدل‌سازی معادلات ساختاری ارائه می‌شود. نتایج تحلیل بر مبنای مدل‌سازی معادلات ساختاری برای بررسی شدت تصادفات راه‌های برون‌شهری استان کرمان نیز ارائه خواهد شد. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، هدف از این تحقیق تحلیل عوامل مؤثر بر شدت تصادفات است. با توجه به ماهیت کیفی بسیاری از داده‌های تصادفات، استفاده از روش حداقل مربعات جزئی که تحت تأثیر توزیع نرمال یا مقیاس اندازه‌گیری متغیرها قرار نمی‌گیرد، به عنوان روش مناسب برای مدل‌سازی انتخاب شده است. در روش‌های مبتنی بر کوواریانس، پیش‌فرض‌ها شامل توزیع نرمال و متغیرهای فاصله‌ای هستند که در این تحقیق با

و غروب آفتاب و بازدیدهای میدانی انجام شده است. بدین ترتیب، زمان‌های طلوع و غروب آفتاب برای هر روز از سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ محاسبه و وضعیت روشنایی برای هر تصادف بر اساس ساعت و تاریخ وقوع آن تعیین و به داده‌ها اضافه شده است.

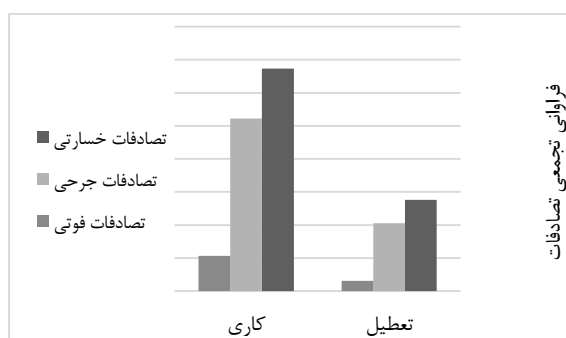
احتیاط بیشتری کنند که می‌تواند منجر به کاهش شدت تصادفات گردد. در این مطالعه، متغیر روشنایی به سه دسته (۱) روز، (۲) گرگ‌ومیش و (۳) شب تقسیم‌بندی شده است. با این حال، اطلاعات مربوط به وضعیت روشنایی در زمان وقوع تصادفات در بانک اطلاعاتی پلیس راهور موجود نبوده و لذا تعیین وضعیت روشنایی برای هر تصادف توسط محقق با استفاده از زمان طلوع



شکل ۱. فراوانی تصادفات به تفکیک ساعت



شکل ۲. فراوانی تصادفات به تفکیک وضعیت سطح راه



شکل ۳. فراوانی تصادفات به تفکیک روز هفته

(ج) وضعیت آب‌وهوایی

شرایط آب‌وهوایی به عنوان یکی از تأثیرگذارترین عوامل مؤثر در تصادفات با امکانات و تجهیزات رفاهی وسیله‌نقلیه و میدان دید راننده در ارتباط است. در فرم‌های پلیس نیز بخشی مجزا برای این عامل در نظر گرفته شده است که به صورت زیر دسته‌بندی شده و وارد نرم‌افزار مدل‌سازی شده است.

(۱) صاف

(۲) ابری و مه‌آلود

(۳) بارانی و برفی

(د) وضعیت سطح راه

شرایط سطحی راه و میزان لغزندگی آن تحت تأثیر وضعیت

ز) تحصیلات راننده

انتظار می‌رود متغیر سطح تحصیلات به عنوان ویژگی رانندگان بر روی رفتار رانندگی آنها و در نتیجه شدت تصادفات تأثیرگذار باشد. برای بررسی این موضوع، این پارامتر به عنوان یکی از متغیرهای تبیین‌کننده عامل انسانی وارد مدل گردیده است و با ۷ دسته شامل ۱) بی‌سواد، ۲) زیردیپلم، ۳) دیپلم، ۴) فوق‌دیپلم، ۵) لیسانس، ۶) فوق‌لیسانس و ۷) دکتری طبقه‌بندی شده است. شکل (۵) نشان‌دهنده فراوانی تصادفات به تفکیک سطح تحصیلات رانندگان در تصادف است.

ح) جنسیت رانندگان

جنسیت رانندگان به عنوان یکی از ویژگی رانندگان که می‌توان تفاوت آن را در نوع رفتار رانندگی بین این دو گروه یافت. برای بررسی این موضوع، این پارامتر به عنوان یکی از متغیرهای تبیین‌کننده عامل انسانی وارد مدل گردیده است و با ۲ دسته شامل ۱) زن و ۲) مرد طبقه‌بندی شده است. شکل (۶) نشان‌دهنده فراوانی تصادفات به تفکیک جنسیت رانندگان در تصادف است.

ط) استراحتگاه

یکی از عواملی که بر نحوه وقوع تصادفات و در نتیجه شدت آن تأثیرگذار است، عدم وجود یا تعداد مجتمع‌های خدمات رفاهی برای استراحت رانندگان در مسیرهای طولانی و خسته‌کننده است. این متغیر به منظور بررسی ارتباط آن با شدت وقوع تصادف به صورت کمی بر اساس تعداد استراحتگاه در هر محور در مدل ایجاد شده است. شکل (۷) نشان‌دهنده فراوانی انواع تصادفات به تفکیک تعداد استراحتگاه در حال بهره‌برداری در هر محور است.

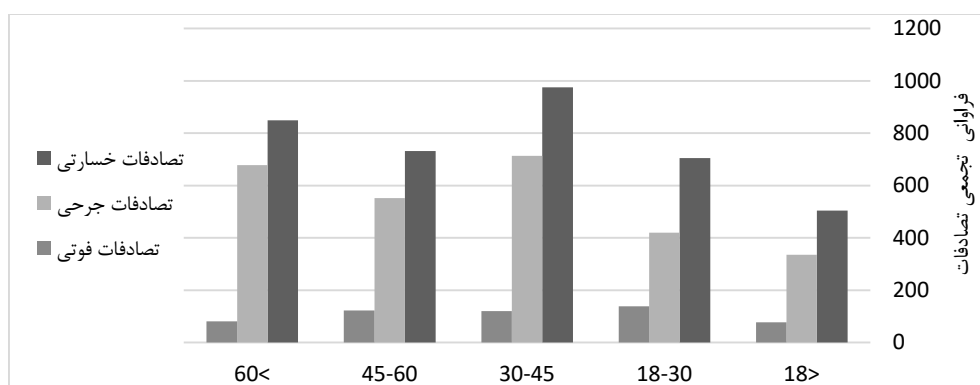
آب‌وهوایی است. در این پژوهش، این مسئله با توجه به اهمیت و در دسترس بودن اطلاعات آن در بانک اطلاعاتی تصادفات استان، مورد بررسی واقع شده است و با سه دسته ۱) خشک، ۲) مرطوب و یخبندان و ۳) روغنی و کثیف طبقه‌بندی و کدگذاری شده است که بر همین اساس، شکل (۲) که این موضوع را نمایش می‌دهد.

ه) روز هفته (کاری/تعطیل)

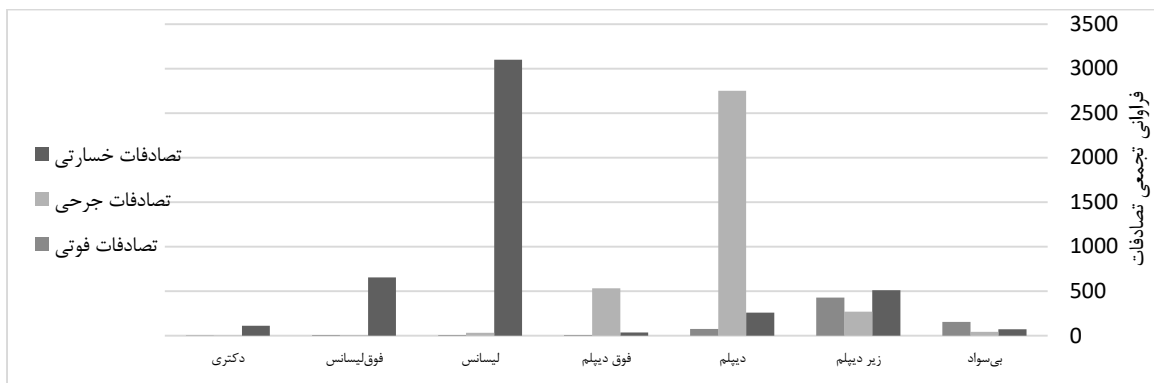
در جداول بانک اطلاعاتی، روز وقوع تصادفات ثبت می‌شود. این متغیر برای بررسی و ارزیابی ارتباط ایام تعطیل (که در این ایام سفرها افزایش می‌یابد) بر وقوع و شدت تصادفات در راه‌های برون‌شهری ایجاد شد. این متغیر به ۲ گروه کلی کاری و تعطیل تقسیم‌بندی و در نرم‌افزار SPSS کدگذاری شده است. شکل (۳) نشان‌دهنده فراوانی انواع تصادفات در هر گروه از روز هفته است.

و) سن راننده

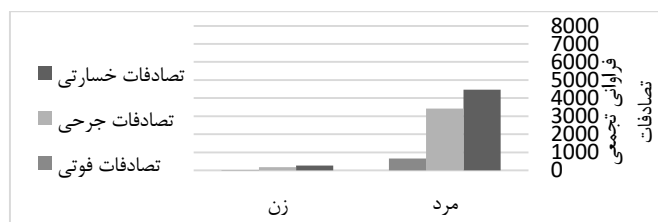
افراد در گروه‌های سنی مختلف با توجه به تجربه رانندگی، شغل، درآمد و میزان تحصیلات، رفتارهای متفاوتی را در رانندگی از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش، گروه‌های سنی رانندگان بدون نیاز به کدگذاری خاص و به‌طور پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و تحلیل‌ها بر اساس این تقسیم‌بندی انجام شده است. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر گروه‌های سنی بر وقوع و شدت تصادفات، گروه‌های سنی رانندگان به دسته‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و به‌طور ویژه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل (۴) نمایانگر فراوانی انواع تصادفات به تفکیک گروه‌های سنی رانندگان است که به تحلیل نقش گروه‌های سنی مختلف در شدت و نوع تصادفات کمک می‌کند.



شکل ۴. فراوانی تصادفات به تفکیک گروه سنی



شکل ۵. فراوانی تصادفات به تفکیک تحصیلات راننده



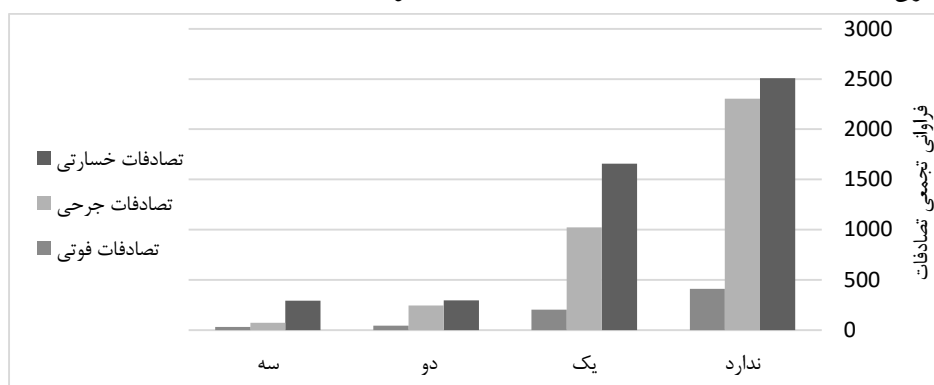
شکل ۶. فراوانی تصادفات به تفکیک جنسیت رانندگان.

ک) میانگین تردد

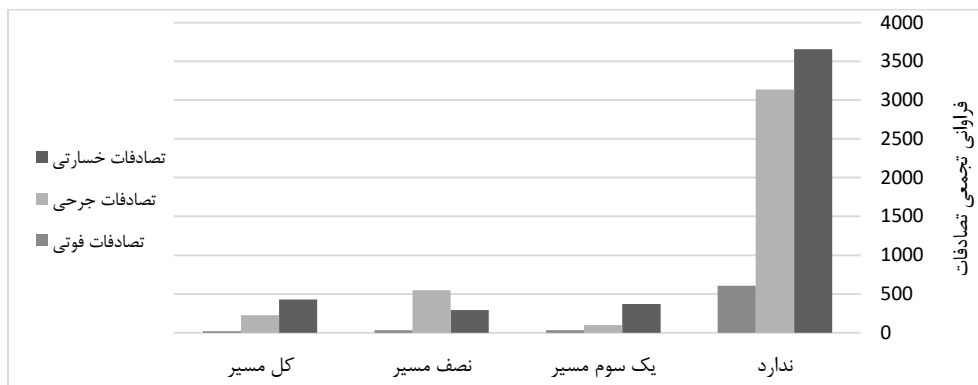
حجم وسایل نقلیه عبوری از یک محور با سرعت متوسط وسایل - نقلیه در آن محور در ارتباط است. تراکم زیاد وسایل نقلیه باعث کاهش سرعت آنها و در نتیجه کاهش شدت برخورد می شود. از طرفی ممکن است تداخلات و تعداد تصادفات خسارتی را افزایش دهد. اطلاعات مربوط به این متغیر به صورت کمی و پیوسته است و نیازی به کدگذاری آن نیست. به دلیل تنوع بسیار بالای میانگین تردد در محورها از ارائه آمار توصیفی آن خودداری شده است.

ی) دوربین کنترل سرعت

در محورهای برون شهری که اغلب سرعت وسایل نقلیه بیشتر است، دوربین های کنترل سرعت یکی از اصلی ترین ابزارها برای مجاب کردن رانندگان به رانندگی با سرعت مطمئنه است. انتظار می رود در محورهایی که دوربین کنترل سرعت نصب شده است، تصادفات ناشی از تجاوز از سرعت مقرر نسبت به محورهایی که فاقد دوربین است، کمتر باشد. درصد پوشش محورها توسط دوربین های کنترل سرعت با ۴ دسته شامل ۱) دوربین ندارد (۰٪)، ۲) یک سوم مسیر (۳۳٪)، ۳) نصف مسیر (۵۰٪) و ۴) کل مسیر (۱۰۰٪) کدگذاری شده است.



شکل ۷. فراوانی تصادفات به تفکیک تعداد ایستگاه



شکل ۸. فراوانی تصادفات به تفکیک میزان پوشش محور تحت دوربین کنترل سرعت

ل) طول محور

در این پژوهش متغیر طول محور، جزو عامل راه محسوب شده است. مقادیر این متغیر نیز دارای شرایط متغیر میانگین تردد است و از ارائه آمار توصیفی آن خودداری شده است.

۴-۲-۴-۱ مدل‌سازی معادلات ساختاری

۴-۲-۴-۱-۱ مدل اندازه‌گیری

برای اعتباریابی ابزار و مدل اندازه‌گیری در تحقیق حاضر، ابتدا باید به بررسی صحت و دقت ابزارهای مورد استفاده در مدل‌سازی معادلات ساختاری پرداخت. در این بخش، اعتبار مدل اندازه‌گیری با استفاده از تحلیل‌های آماری دقیق ارزیابی شده است تا اطمینان حاصل شود که متغیرهای مشاهده‌شده به درستی نمایانگر سازه‌های پنهان مورد نظر هستند. اعتبار سازه‌ای و همگرا از جمله معیارهایی هستند که برای ارزیابی کیفیت و دقت ابزارهای تحقیق استفاده شده‌اند. این فرآیند شامل بررسی بارهای عاملی و مقادیر میانگین واریانس استخراج شده می‌باشد که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد و دقت ابزارهای اندازه‌گیری است. نتایج به دست آمده از این ارزیابی‌ها، اعتبار بالای مدل اندازه‌گیری و ابزارهای مورد استفاده را تأیید می‌کنند.

۴-۲-۴-۲ پایایی و روایی همگرای متغیرهای پنهان

به منظور ارزیابی پایایی و روایی همگرای متغیرهای پنهان، از آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی برای سنجش پایایی، و از میانگین واریانس استخراج شده برای سنجش روایی همگرا استفاده شده است. در جدول (۱) ضرایب مربوط به روایی همگرا، آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی برای هر یک از متغیرهای پنهان ارائه شده است.

جدول ۱. ضرایب روایی همگرا، آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی

مقیاس‌ها

متغیرهای پنهان	روایی همگرا	آلفای کرونباخ	پایایی ترکیبی
عامل انسانی	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۸
عامل محیطی	۰/۸۹	۰/۹۸	۰/۹۸
عامل راه	۰/۷۱	۰/۹۰	۰/۹۲
ایمنی ترافیک	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۵

پایایی: پایایی یکی از جنبه‌های فنی آزمون‌سازی است. هدف از برآورد پایایی آزمون آن است که بدانیم اگر ویژگی مورد نظر آزمون در شرایط مشابه دوباره اندازه‌گیری شود، نتایج اصل تا چه اندازه مشابه، دقیق، پیش‌بینی‌پذیر و قابل اعتماد خواهد بود. روایی: روایی نیز یکی از جنبه‌های فنی آزمون‌سازی است. در واقع هدف از برآورد روایی، آن است که وسیله اندازه‌گیری چقدر می‌تواند خصیصه مورد نظر و نه خصیصه دیگری را اندازه بگیرد. پایایی و روایی در روش حداقل مربعات جزئی در دو بخش (۱) مربوط به مدل‌های اندازه‌گیری و (۲) مربوط به مدل ساختاری بررسی می‌شود. برای بررسی برازش بخش اول یعنی برازش مدل‌های اندازه‌گیری از پایایی شاخص و روایی همگرا استفاده می‌شود. پایایی شاخص نیز خود توسط دو معیار (۱) آلفای کرونباخ و (۲) ضریب پایایی ترکیبی مورد سنجش قرار می‌گیرد.

(۱) آلفای کرونباخ

این معیار برای سنجش پایداری درونی (سازگاری درونی) استفاده می‌شود. مقدار آلفای کرونباخ بالاتر از ۰,۷۰ نشان‌دهنده پایایی قابل قبول است و برای متغیرهایی با تعداد سؤالات کم، مقدار ۰,۶۰ نیز قابل قبول است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب آلفای کرونباخ برای تمامی متغیرها بالای ۰,۶۰ است.

نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی قابل قبول مدل است و بیان می‌کند که مدل تا چه حد قادر به پیش‌بینی مقادیر مشاهده‌شده است. جدول (۵) مقدار Q^2 و سایر معیارهای مرتبط با معیار استون-گیزر را برای متغیر وابسته ایمنی نشان می‌دهد.

جدول ۵. معیار استون-گیزر مدل

متغیر	SSO	SSE	1-SSE/SSO Q^2
safety	۷۰۷۴	۵۴۹۷,۶	۰,۲۲۳

۴-۴- شاخص نیکوی برازش (GOF)

با توجه به مقادیر Commuality و R^2 ، مقدار نیکویی برازش مدل برابر ۰,۸۴۶ است. این مقدار نشان‌دهنده برازش خوب داده‌ها توسط مدل است.

۴-۵- بحث و تفسیر نتایج

در این مرحله با استفاده از مدل ساختاری روابط بین سازه‌ها به لحاظ علی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع با در نظر گرفتن نتایج بررسی روابط بین سازه‌های مستقل و وابسته با استفاده از ضریب مربوطه می‌توان به بررسی معنی‌دار اثرات بین سازه‌های تحقیق پرداخت.

۴-۵-۱- بررسی عامل جاده

فرضیه ۱: عامل جاده بر ایمنی ترافیکی تأثیر معناداری دارد.

جدول ۶. مدل ساختاری اثر عامل جاده بر ایمنی ترافیکی

فواصل اطمینان بوت استراپ	سطح	اندازه اثر	معناداری	بار عاملی	فرضیه	معناداری	
						۹۷/۵٪	۲/۵٪
۰/۴۶	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۲/۴۶۷	۱/۷۰۲	عامل جاده ← ایمنی	

همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، مدل ساختاری نشان می‌دهد که عامل جاده با بار عاملی ۱,۷۰۲ تأثیر معناداری بر ایمنی دارد. پارامترهایی مانند AADT و وجود میانه تأثیر قابل توجهی بر ایمنی دارند.

۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۹۹	۰/۳۴	AADT
۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۸۹	۰/۳۱	طول قطعه
۰/۵۳	۰/۸۷	۰/۴	۰/۳۷	شرایط جوی
۰/۵۹	۰/۹۴	۰/۲۹	۰/۳۹	شرایط سطح جاده
۰/۵۸	۰/۹۴	۰/۳۴	۰/۳۸	روشنایی
۰/۵۷	۰/۹۴	۰/۴۳	۰/۳۵	ترافیک زمان تصادف
۰/۴۹	۰/۸۷	۰/۳۵	۰/۳۴	روز هفته (کاری/ تعطیل)
۰/۹۹۶	۰/۵۹	۰/۴۸	۰/۵۴	سطح شدت آسیب
۰/۹۹۵	۰/۵۶	۰/۴۶	۰/۵۲	تعداد افراد آسیب دیده

(۲) روایی واگرا به روش فورنل لارکر

در این روش، برای هر مؤلفه، جذر روایی همگرا باید بیشتر از حداکثر همبستگی آن مؤلفه با سایر مؤلفه‌ها باشد. از جدول (۴) می‌توان نتیجه گرفت که مدل دارای روایی واگرای مناسب است.

جدول ۴. ماتریس همبستگی و روایی همگرا

و واگرا فورنل و لارکر

متغیرهای پنهان	روایی همگرا	۱	۲	۳	۴
عامل انسانی	۰/۹۳	۰/۹۶			
عامل محیطی	۰/۸۹	۰/۴۳	۰/۹۴		
عامل جاده	۰/۷۱	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۸۴	
ایمنی	۰/۸۵	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۹۲

۴-۳- برازش کیفیتی مدل

برای ارزیابی قدرت پیش‌بینی مدل، از شاخص Q^2 استفاده شده است که مقدار آن برابر با ۰,۲۲۳ به دست آمده است. این مقدار

۴-۵-۲- بررسی عامل انسانی

فرضیه ۲: عامل انسانی بر ایمنی ترافیکی تأثیر معناداری دارد.

جدول ۷. مدل ساختاری اثر عامل انسانی بر ایمنی ترافیکی

فواصل اطمینان بوت استراپ	سطح	اندازه اثر	معناداری	بار عاملی	فرضیه
					۹۷/۵٪
۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۲/۴۹۲	۱/۳۹
					عامل انسانی ← ایمنی

همانطور که در جدول (۷) نمایان است، مدل ساختاری نشان می‌دهد که عامل انسانی با بار عاملی ۱,۳۹ تأثیر معناداری بر ایمنی دارد. متغیر سن با بار عاملی ۰,۹۹۷ قوی‌ترین تبیین‌کننده برای عامل انسانی است.

۴-۵-۳- بررسی عامل محیطی

فرضیه ۳: عامل محیطی بر ایمنی ترافیکی تأثیر معناداری دارد.

جدول ۸. مدل ساختاری اثر عامل محیطی بر ایمنی ترافیکی

فواصل اطمینان بوت استراپ	سطح	اندازه اثر	معناداری	بار عاملی	فرضیه
					۹۷/۵٪
۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۲/۶۶۳	۰/۶۸۶
					عامل محیطی ← ایمنی

همانطور که در جدول (۸) نمایان است، مدل ساختاری نشان می‌دهد که عامل محیطی با بار عاملی ۰,۶۸۶ تأثیر معناداری بر ایمنی دارد. وضعیت سطح راه و روشنایی با بار عاملی بالا تأثیر قابل توجهی بر ایمنی دارند. برخی از راهکارهایی که در ادبیات تحقیق برای کاهش شدت تصادفات ناشی از پارامترهای محیطی پیشنهاد شده‌اند، شامل اقدامات مختلفی است که بر بهبود شرایط جاده‌ای، انسانی و محیطی تمرکز دارند. به عنوان مثال، در بخش جاده‌ای، توسعه استراحتگاه‌ها و مراکز خدمات رفاهی، ایجاد پارکینگ‌های موقت و دائم، افزایش تعداد خطوط و نصب جداکننده‌ها و نصب دوربین‌های کنترل سرعت و فاصله‌سنج به منظور کاهش حوادث رانندگی پیشنهاد شده است. از سوی دیگر، در بخش عوامل انسانی، سیاست‌های تشویق‌کننده و بازدارنده

مانند افزایش جریمه‌ها، آموزش رانندگان و ارتقای قوانین و مجازات‌ها برای تخلفات خطرناک توصیه می‌شود. همچنین، در بخش عوامل محیطی، بهبود وضعیت روشنایی و سطح راه‌ها و مدیریت بهتر ترافیک در زمان وقوع تصادفات از جمله اقدامات پیشنهادی هستند. این تحلیل و راهکارها که بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌های ساختاری و تحلیل‌های آماری ارائه شده‌اند، می‌توانند به بهبود ایمنی ترافیکی در جاده‌های برون‌شهری کمک کنند.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری برای بررسی شدت تصادفات در راه‌های برون‌شهری استان کرمان، نتایج به دست آمده به وضوح تأثیرات متغیرهای مستقل پنهان را بر شدت تصادفات نشان می‌دهد. در این بررسی، تمامی متغیرهای مستقل پنهان در مدل، ارتباط معناداری با شدت تصادفات از خود نشان دادند. نتایج به دست آمده به تفصیل در زیر ارائه می‌شود. عامل جاده با بار عاملی ۱,۷۰۲، بیشترین تأثیر را بر شدت تصادفات با شدت بالا داشت. پارامترهایی مانند AADT و وجود جداکننده‌ها به‌طور معناداری توانستند شدت تصادفات را کاهش دهند. این نشان‌دهنده اهمیت طراحی مناسب جاده‌ها و وجود زیرساخت‌های حمایتی برای کاهش تصادفات است. عوامل زمانی نیز نقش مهمی ایفا کردند. در ساعات خلوت‌تر، جایی که رانندگان با سرعت بالاتری حرکت می‌کنند، شدت تصادفات افزایش می‌یافت. این نکته تأکید می‌کند که سرعت بالا در شرایطی که ترافیک کمتر است می‌تواند به شدت تصادفات بیفزاید. مسیرهای دوخطه نسبت به مسیرهای چندخطه تصادفات شدیدتری داشتند. این امر نشان‌دهنده نیاز به بهبود طراحی جاده‌ها و افزودن خطوط بیشتر برای کاهش خطر تصادفات است. دوربین‌های کنترل سرعت نیز نقش موثری در کاهش تصادفات ناشی از سرعت بالا داشتند. نصب و استفاده از این دوربین‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی در کاهش شدت تصادفات موثر واقع شود. عدم وجود استراحتگاه‌های کافی به طور معناداری با شدت بالاتر تصادفات مرتبط بود. این مسئله نشان می‌دهد که در طول مسیرهای برون‌شهری، وجود استراحتگاه‌های مناسب برای رانندگان می‌تواند به کاهش تصادفات کمک کند. عامل انسانی با بار عاملی ۱,۳۹، پس از عامل جاده، دومین عامل تأثیرگذار بر شدت تصادفات بود. رانندگان مسن‌تر، افرادی با تحصیلات بالاتر و کسانی که کمتر به بستن کمربند ایمنی پایبند هستند، بیشتر در تصادفات شدید دخیل بودند. عامل محیطی با بار عاملی ۰,۶۸۶، کمترین تأثیر را بر شدت تصادفات داشت. با این حال، وضعیت سطح جاده و شرایط روشنایی همچنان بر شدت تصادفات تأثیرگذار بودند.

جاده‌ها، عوامل انسانی و نظارت بر سرعت از اهمیت بالایی برخوردار است. بهبود این عوامل می‌تواند به کاهش قابل توجهی در شدت تصادفات منجر شود.

به ویژه در شرایط کم‌نور، احتمال آسیب‌دیدگی شدیدتر بیشتر بود. نتایج این تحلیل تأکید می‌کند که برای کاهش شدت تصادفات در راه‌های برون‌شهری استان کرمان، توجه به طراحی

۶- مراجع

- Haykin, S., (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson.
- Huang, H., et al., (2019). Analyzing injury severity in crashes using Bayesian hierarchical models: A study on Texas data. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 10-18.
doi: 10.1016/j.aap.2018.12.018
- Huang, H., et al., (2019). Assessing the Impact of Road Surface Quality on Highway Accident Severity Using Negative Binomial Regression. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(9), 32-40.
- Huang, H., et al., (2019). Neural Network Analysis of Road Geometry and Traffic Accident Severity. *Safety Science*, 116, 229-237.
- Kashani, A. T. & Mohaymany, A. S., (2011). Analysis of the traffic injury severity on two-lane, two-way rural roads based on classification tree models. *Safety Science*, 49(10), 1314-1320.
- Kim, D., et al., (2021). Traffic Conditions and Their Impact on Accident Severity: A Deterministic Approach. *Accident Analysis & Prevention*, 118, 89-95.
- Li, X., et al., (2019). Vehicle Type and Driver Characteristics: A Deterministic Model for Accident Severity. *Journal of Safety Research*, 70, 153-161.
- Li, L., Zhu, L. & Sui, D. Z., (2007). A GIS-based Bayesian approach for analyzing spatial-temporal patterns of intra-city motor vehicle crashes. *Journal of Transport Geography*, 15(4), 274-285.
- Liu, M., et al., (2020). Traffic Accident Analysis on Rural Roads Using Classification and Regression Trees. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105349.
- Liu, P., et al., (2021). Exploring the Influence of Road Characteristics on Traffic Accidents Using Classification and Regression Tree Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(5), 238-249.
- Abdelwahab, T. C. & Abdel-Aty, M. A., (2001). Development of artificial neural network models to predict driver injury severity in traffic accidents at signalized intersections. *Transportation Research Record*, 1746(1), 6-13.
- Anastasopoulos, P. C., Mannering, F. L., Shankar, V. N. & Haddock, J. E., (2012). A study of factors affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 628-633.
- Breiman, L., (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
doi: 10.1023/A:1010933404324
- Chang, L. Y. & Chien, J. T., (2013). Analysis of driver injury severity in truck-involved accidents using a non-parametric classification tree model. *Safety Science*, 51(1), 17-22.
- Chen, J., et al., (2020). Artificial Neural Networks for Analyzing Traffic Accident Severity: A Study of Environmental Factors. *Accident Analysis & Prevention*, 138, 105386.
- Chen, S. & Zhao, Y., (2020). Impact of Road Surface Conditions on Accident Severity: A Deterministic Study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117, 102-112.
- Chen, X., et al., (2017). Vehicle Type and Driver Characteristics in Traffic Accidents: A Poisson Regression Approach. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(4), 350-360.
- Chen, Y., et al., (2017). Road Geometry and Accident Severity: A Classification and Regression Tree Approach. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(4), 299-308.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. & Sarstedt, M., (2017). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. 2nd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications.
- Henseler, J., Hubona, G. & Ray, P. A., (2015). Using PLS path modeling in new technology research: Updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 116(1), 2-20.
doi: 10.1108/IMDS-09-2015-0382

- Song, Y. & Lu, Y., (2015). Decision tree methods: applications for classification and prediction. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 27(2), 130-135.
- Shi, Q. & Abdel-Aty, M., (2015). Time and Location-Based Analysis of Traffic Accidents Using Poisson Regression. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 90-98.
- Sun, Q., et al., (2019). Environmental Factors and Their Impact on Traffic Accident Severity: A Classification and Regression Tree Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 207-215.
- Wang, Q., et al., (2022). Influence of Road Lighting on Accident Severity: A Deterministic Model. *Journal of Advanced Transportation*. Article ID 9876543.
- Wang, Y., et al., (2018). Analyzing Urban Intersection Accidents Using Poisson Regression Models. *Accident Analysis & Prevention*, 115, 125-133.
- Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F. & Anastasopoulos, P., (2020). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. CRC Press.
- Washington, S., et al., (2018). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. 3rd ed. CRC Press.
- World Health Organization, (2023). *Global Status Report on Road Safety 2023*. Geneva, Switzerland: WHO.
- Xie, K. & Yan, X., (2022). Using random parameters to explore the effects of crash risk factors: A Bayesian approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 131, p. 103352. doi.org/10.1016/j.trc.2021.103352
- Xie, K. & Yan, X., (2022). Traffic Control and Accident Severity at Intersections: A Classification and Regression Tree Analysis. *Journal of Safety Research*, 82, 117-125.
- Xie, K. & Yan, X., (2013). Negative Binomial Regression Analysis of Traffic Accidents at Unsignalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2386, 45-52.
- Xu, P., et al., (2020). Poisson Regression Analysis of Road Surface and Vehicle Type Effects on Traffic Accidents. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 124-133.
- Yue, L., et al., (2022). Accident prediction using machine learning methods: A comparative study of neural networks, decision trees and random forests. *Accident Analysis & Prevention*, 160, 106316. doi.org/10.1016/j.aap.2021.106316
- Liu, X., et al., (2019). Environmental Factors Affecting Traffic Accidents: A Poisson Regression Analysis. *Journal of Transportation Land Use*, 12(1), 89-101.
- Liu, X., et al., (2021). Highway Accident Severity Analysis Using Neural Networks: A Case Study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 123, 102975.
- Lord, D. & Mannering, F., (2022). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 153, 1-17. [doi: 10.1016/j.tra.2022.02.001](https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.02.001)
- Lord, D. & Mannering, F., (2010). Negative Binomial Regression Analysis of Traffic Accident Data Under Different Weather Conditions. *Journal of Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13(2), 100-108.
- Mannering, F. L., Shankar, V. N. & Bhat, C. R., (2016). Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. *Analytic Methods in Accident Research*, 11, 1-16. [doi: 10.1016/j.amar.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.04.001)
- Mannering, F. L., et al., (2016). Rural Road Accident Severity: A Negative Binomial Regression Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 116-123.
- Miaou, S. P. & Lum, H., (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. *Accident Analysis & Prevention*, 25(6), 689-709.
- Mosedale, J. & Purdy, A., (2004). Excessive speed as a contributory factor to personal injury road accidents. *Department for Transport*.
- Park, H. & Lee, S., (2019). Road Geometry and Accident Severity: A Deterministic Analysis. *Safety Science*, 116, 223-231.
- Savolainen, P. T., et al., (2021). The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1666-1676. [doi: 10.1016/j.aap.2021.03.025](https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.03.025)
- Savolainen, P. T., Mannering, F. L., Lord, D. & Quddus, M. A., (2011). The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1666-1676. [doi: 10.1016/j.aap.2011.03.025](https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.025)

- Zhang, H. & Ma, J., (2020). Traffic Accident Severity Prediction Using Classification and Regression Trees. *Safety Science*, 123, 109-117.
- Zhu, M. & Sun, Z., (2018). Artificial Neural Networks in Rural Road Traffic Accident Severity Prediction. *Journal of Advanced Transportation*. Article ID 3457367.
- Zhu, M., et al., (2021). Climate Change Impact on Traffic Accidents: A Poisson Regression Analysis. *Environmental Science & Technology*, 55(14), 9542-9551.
- Zhu, L. & Peng, Z., (2020). Impact of Weather Conditions on Road Traffic Accidents: A Deterministic Model Approach. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(4), 455-466.
- Zadeh, L. A., (1991). From circuit theory to system theory. In *Facets of Systems Science*, 309-323. Springer, Boston, MA.
- Zeng, Q. & Huang, H., (2014). A stable and optimized neural network model for crash injury severity prediction. *Accident Analysis & Prevention*, 73, 351-358.
- Zeng, Q. & Huang, H., (2014). Negative Binomial Regression Analysis of Road Geometric Factors and Traffic Accident Severity. *Safety Science*, 64, 119-126.
- Zeng, Q. & Huang, H., (2017). Urban Traffic Accident Severity Prediction Using Artificial Neural Networks. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 154-160.

Modeling the Severity of Road Accidents Using Structural Equations (Case Study: Kerman Province)

*Seyed Ebrahim Abdolmanafi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C.,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Alireza Sarkar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C.,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Amirhossein Jashnian, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University,
Tehran, Iran.*

Samira Yari, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: abdolmanafi@srbiau.ac.ir

Received: October 2024- Accepted: January 2025

ABSTRACT

Road accidents are one of the leading causes of mortality worldwide and a significant source of economic losses for countries. This study examines the factors influencing the severity of accidents on rural roads in Kerman Province using path analysis via Partial Least Squares (PLS) method. Data from 763 accidents between 2015 and 2017 were analyzed to assess the impact of variables such as weather conditions, road surface status, road geometry, driver characteristics, lighting conditions, type of vehicle, and time of the accident on accident severity. The results of the structural equation modeling showed that the road factor had the highest impact on accident severity, with a factor loading of 1.702. Additionally, driver age, with a factor loading of 0.997, was identified as the strongest determinant in the human factor category, and road lighting, with a factor loading of 0.946, was recognized as the most important variable in the environmental factor category. These findings can help inform the development of effective policies to reduce accident severity and improve road safety.

Keywords: Path Analysis, Structural Equation Modeling, Traffic Accidents