

# بررسی کمی عوامل تأثیرگذار بر فراوانی تصادفات کاربران آسیب پذیر در معابر برون شهری با رویکرد مدل سازی جنگل تصادفی (مطالعه موردی: استان اصفهان)

## مقاله علمی-پژوهشی

\*علی توکلی کاشانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات ایمنی کاربردی حمل و نقل

جاده‌ای، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد نجف پور درو، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات ایمنی کاربردی حمل و نقل جاده‌ای،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مهدی حیدری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

معید ذهبیون، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [alitavakoli@just.ac.ir](mailto:alitavakoli@just.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۱۱۲-۱۰۱

## چکیده

کاربران آسیب پذیر راه، شامل عابران پیاده و موتورسواران، از مهم ترین گروه های در معرض خطر در نظام حمل و نقل محسوب می شوند و بخش چشمگیری از تلفات سوانح جاده ای را به خود اختصاص می دهند. در این پژوهش، با هدف شناسایی عوامل تعیین کننده ی فراوانی تصادفات این گروه از کاربران در معابر برون شهری استان اصفهان، از رویکرد داده محور و مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی استفاده شده است. داده های مورد نیاز شامل ۱۴۸۷۵ تصادف که ۱۹ درصد از آن تصادف منجر به جرح یا فوت کاربران آسیب پذیر گردآوری شد و اطلاعات ۴۰۰ مقطع جاده ای نیز از طریق برداشت میدانی در بیش از ۱۵ هزار کیلومتر از شبکه راه های استان جمع آوری گردید. یافته های مدل سازی نشان داد که حجم تردد، بیشترین تأثیر را بر افزایش احتمال وقوع تصادفات این گروه دارد و در عین حال، سهم و سایل نقلیه سنگین در جریان ترافیک رابطه ای غیرخطی با میزان وقوع تصادف نشان می دهد. نتایج همچنین بیانگر آن است که در راه های دوخطه، به دلیل محدودیت ظرفیت و تداخل حرکتی، نرخ وقوع تصادفات کاربران آسیب پذیر بیش از سایر انواع معابر است و در بزرگراه ها نیز افزایش سرعت و د شواری عبور ایمن، احتمال برخورد را بیشتر می کند. علاوه بر این، شاخص هایی مانند تراکم جمعیت، طول مقطع جاده و تعداد دانش آموزان هر ناحیه تأثیر مثبتی بر فراوانی تصادفات دارند. بر پایه یافته های این تحقیق، اجرای سیاست های کنترل سرعت در مسیرهای پرتردد، تفکیک مسیر حرکت و سایل نقلیه سنگین، ایجاد گذرگاه های ایمن برای عابران در محورهای چندخطه و تقویت نظارت ترافیکی در مناطق متراکم، از اقدامات کلیدی در کاهش ریسک تصادفات کاربران آسیب پذیر به شمار می آیند. همچنین، انتقال کاربری های صنعتی و تجاری به خارج از حریم راه های اصلی می تواند به طور مؤثری در بهبود ایمنی شبکه و کاهش شدت تصادفات مؤثر باشد.

واژه های کلیدی: کاربران آسیب پذیر، موتورسواران، عابران پیاده، ایمنی راه، مدل جنگل تصادفی

## ۱-مقدمه

حال توسعه با این بحران مواجه است؛ به گونه ای که در سال ۱۴۰۲ تعداد ۲۰۰۴۵ نفر در اثر سوانح رانندگی جان خود را از دست داده اند که این رقم نسبت به سال ۱۴۰۱ افزایش ۵٫۹ درصدی را نشان می دهد (سازمان پزشکی قانونی، ۱۴۰۲). روند افزایشی تصادفات در کشور بیانگر ضرورت بازنگری در سیاست های ایمنی ترافیک و اتخاذ رویکردهای نوین در مدیریت

تصادفات ترافیکی از مهم ترین چالش های ایمنی در جوامع در حال توسعه به شمار می رود و سالانه موجب بروز خسارات سنگین جانی و مالی برای شهروندان می شود. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، سوانح رانندگی نخستین علت مرگ و میر در میان جوانان در سطح جهانی محسوب می شود (World Health, 2023). ایران نیز همانند بسیاری از کشورهای

آسیب‌های وارده بیشتر می‌شود (Mohan, 2016). هرچند برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که در معابر با سرعت بالا به دلیل کنترل دسترسی‌ها یا حضور کمتر عابران، نرخ وقوع تصادفات پایین‌تر است (Zhu et al., 2022). همچنین، افزایش سهم وسایل نقلیه سنگین در جریان ترافیک، با افزایش احتمال برخورد با کاربران آسیب‌پذیر و تشدید شدت جراحات و تلفات انسانی همراه است (Al-Nuaimi & Jameel, 2023; V & Perumal, 2024). در کنار عوامل ترافیکی، ویژگی‌های محیطی نیز نقش چشمگیری در ریسک تصادفات ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که تراکم بالای جمعیت و توسعه کاربری‌های مسکونی با افزایش حجم تعاملات انسانی در معابر، احتمال بروز تصادفات عابرین پیاده و موتورسواران را بالا می‌برد (Parikh et al., 2024). همچنین تغییرات کاربری اراضی نظیر گسترش کاربری‌های تجاری یا استقرار مراکز صنعتی، با افزایش حجم تردد وسایل نقلیه و سطح تماس میان کاربران مختلف راه، احتمال بروز تصادف را تشدید می‌کند (Manullang et al., 2019). شکل توسعه کالبدی شهر نیز در این زمینه مؤثر است؛ به‌طوری که توسعه خطی سکونت‌گاه‌ها در امتداد راه‌ها و شکل‌گیری بافت‌های دوطرفه، به کاهش نقاط عبور ایمن و افزایش تمایل به عبور عرضی منجر شده و خطر برخورد را برای عابران پیاده و موتورسواران افزایش می‌دهد (Neri & da Silva, 2023). از سوی دیگر، حضور مدارس در حاشیه راه‌ها و تعداد زیاد دانش‌آموزان نیز از عوامل مؤثر بر افزایش تصادفات کاربران آسیب‌پذیر شناخته می‌شود، چراکه کودکان و نوجوانان به دلیل تجربه کمتر و رفتارهای پرخطرتر، بیشتر در معرض وقوع سوانح قرار دارند و ریسک تصادفات را افزایش می‌دهند (Yu & Zhu, 2016; Popa et al., 2023). در بعد زیرساختی نیز عواملی مانند تعداد خطوط عبور، علائم هشداردهنده و تجهیزات ایمنی نقش تعیین‌کننده‌ای در احتمال بروز تصادف دارند. نتایج مطالعات نشان داده است که افزایش تعداد خطوط، ضمن بالا بردن حجم ترافیک، دشواری عبور عرضی را برای کاربران پیاده افزایش داده و به تبع آن، خطر برخورد را بیشتر می‌کند (Shawky et al., 2014). همچنین، وجود علائم ترافیکی و هشداردهنده در مسیرها موجب افزایش هوشیاری رانندگان، بهبود دید و کاهش سرعت جریان عبوری می‌شود (Budzynski et al., 2019). احداث پل‌های عابر پیاده به عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر در ارتقای ایمنی، احتمال بروز تصادفات را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد (Shawky et al., 2014). نتایج پژوهش آنتیک و همکاران نیز در بلغراد نشان داده است که نصب سرعت‌کاه‌ها سبب کاهش سرعت وسایل نقلیه و در نتیجه کاهش تعداد و شدت تصادفات کاربران آسیب‌پذیر می‌گردد.

خطر است. در میان کاربران شبکه معابر، موتورسواران و عابران پیاده به‌عنوان کاربران آسیب‌پذیر راه، به دلیل نداشتن حفاظ فیزیکی در برابر ضربه، بیش از سایر گروه‌ها در معرض جراحات شدید و تلفات جانی قرار دارند. بر اساس آمارهای رسمی، حدود نیمی از تلفات ترافیکی کشور به این دو گروه اختصاص دارد؛ به‌گونه‌ای که سهم عابران پیاده ۳۶ درصد و سهم موتورسواران ۱۲ درصد گزارش شده است (Analysis, 2017). در حالی که بیشتر پژوهش‌های پیشین بر بررسی سوانح کاربران آسیب‌پذیر در معابر درون‌شهری متمرکز بوده‌اند، شواهد موجود نشان می‌دهد که تصادفات این گروه در محورهای برون‌شهری نیز سهم قابل توجهی از تلفات را به خود اختصاص داده است. به عنوان نمونه، در استان اصفهان طی بازه‌ی سه‌ساله‌ی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱، ۱۱٫۹ درصد از تلفات برون‌شهری مربوط به عابران پیاده و ۲۶٫۵ درصد مربوط به موتورسواران بوده است. در این راستا، پژوهش حاضر با رویکردی داده‌محور و بهره‌گیری از مدل‌های آماری مبتنی بر یادگیری ماشین، به شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر وقوع تصادفات کاربران آسیب‌پذیر در معابر برون‌شهری استان اصفهان می‌پردازد تا زمینه‌ای برای ارائه‌ی راهکارهای بهبود ایمنی این گروه از کاربران فراهم شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

وقوع تصادفات مرتبط با کاربران آسیب‌پذیر راه حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل متنوع ترافیکی، محیطی و زیرساختی است که شناسایی همه‌ی آن‌ها در عمل دشوار و گاه ناممکن به نظر می‌رسد. با این حال، شاخص‌های ترافیکی از جمله مؤثرترین متغیرها بر فراوانی تصادفات عابران پیاده و موتورسواران در شبکه معابر محسوب می‌شوند، زیرا دسترسی به داده‌های آن‌ها آسان‌تر بوده و اصلاحات مرتبط با آن‌ها از نظر مدیریتی و اجرایی امکان‌پذیر است. از میان این شاخص‌ها، حجم عبوری وسایل نقلیه به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز تصادفات کاربران آسیب‌پذیر شناخته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در مسیرهای پرتردد، افزایش میزان مواجهه میان کاربران آسیب‌پذیر و جریان عبوری وسایل نقلیه منجر به افزایش احتمال رخدادهای خطرناک و در نهایت تصادفات جرحی و فوتی می‌شود (Retallack & Ostendorf, 2020). نتایج پژوهش لی و همکاران در ایالات متحده نیز وجود رابطه‌ای مستقیم میان حجم ترافیک و فراوانی تصادفات عابران پیاده را تأیید کرده است (Lee & Abdel-Aty, 2005)، در حالی که النعمی و همکاران در بررسی خود بر روی راه‌های دوخطه‌ی دوطرفه در بغداد به نتایجی مشابه دست یافتند (Al-Nuaimi & Jameel, 2023). افزون بر این، سرعت متوسط جریان ترافیک از دیگر عوامل مؤثر بر تصادفات کاربران آسیب‌پذیر است؛ به‌طوری که با افزایش سرعت، احتمال بروز تصادف و شدت

### ۳-روش تحقیق

در این بخش، رویکرد پژوهش، داده‌های مورد استفاده و ساختار مدل تحلیلی تشریح می‌گردد. همچنین منطق به کارگیری الگوریتم انتخابی و نحوه‌ی ارزیابی عملکرد آن توضیح داده شده است تا چارچوبی شفاف از مراحل مدل سازی و تحلیل فراهم شود.

### ۳-۱-داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات ۱۴۸۷۵ تصادف که ۱۹ درصد آن منجر به جرح یا فوت کاربران آسیب‌پذیر در سطح استان اصفهان است. این داده‌ها بر اساس مختصات جغرافیایی استخراج و بر روی لایه شبکه راه‌های استان در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی جانمایی شدند. در ادامه، با در نظر گرفتن ویژگی‌های محیطی، توزیع مکانی تصادفات و قضاوت مهندسی، تعداد ۴۰۰ مقطع جاده‌ای که دارای شرایط مؤثر بر تصادفات کاربران آسیب‌پذیر (مانند وجود آبادی) بودند، به‌عنوان مقاطع نمونه انتخاب شدند. به منظور

گردآوری داده‌های تکمیلی، پیمایش میدانی در طول بیش از ۱۰ هزار کیلومتر از شبکه راه‌های استان انجام گرفت و اطلاعات مربوط به هر مقطع شامل ویژگی‌های ترافیکی، هندسی و محیطی جمع‌آوری شد.

نمونه‌ای از مقاطع منتخب در شکل ۱ نمایش داده شده است. در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار GIS، تصادفات کاربران آسیب‌پذیر واقع در شعاع ۲۵۰ متری پیرامون هر مقطع به آن مقطع تخصیص داده شد تا ارتباط مکانی دقیق‌تری بین نقاط تصادف و ویژگی‌های جاده‌ای برقرار شود. در نهایت، با ترکیب داده‌های موجود و نتایج برداشت میدانی، پایگاه داده‌ای جامع برای مدل‌سازی فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر ایجاد گردید که جزئیات متغیرهای آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای آموزش و ارزیابی مدل، ۷۰ درصد از داده‌ها به‌صورت تصادفی برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون مدل استفاده شده‌اند.



شکل ۱. نمونه‌ای از مقاطع مورد بررسی استان اصفهان

جدول ۱. جزئیات داده‌های مورداستفاده برای مدل‌سازی فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر

متغیر	نوع متغیر
تعداد تابلو	کمی
طول مقطع (کیلومتر)	کمی
تعداد خطوط در هر جهت	کمی
درصد تردد وسایل نقلیه سنگین	کمی
تعداد دانش‌آموزان	کمی

متغیر	نوع متغیر
تعداد تصادفات	کمی
حجم تردد ساعتی	کمی
سرعت متوسط	کمی
کاربری مسکونی	کیفی
کاربری تجاری	کیفی
کاربری صنعتی	کیفی

نمونه‌گیری بوت‌استرپ (Bagging): در هر مرحله، زیرمجموعه‌ای تصادفی از داده‌های آموزشی با جایگزینی انتخاب می‌شود تا برای آموزش یک تصمیم‌مستقل به‌کار رود.

انتخاب تصادفی ویژگی‌ها: در زمان تقسیم هر گره، تنها بخشی از متغیرها به صورت تصادفی برای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از هم‌بستگی زیاد میان درخت‌ها جلوگیری شود. در نهایت، تصمیم نهایی مدل بر اساس رأی‌گیری اکثریت میان خروجی درخت‌ها تعیین می‌شود.

اگر خروجی درخت‌ها برای نمونه‌ی ورودی  $X$  به ترتیب  $h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x)$  باشند، خروجی نهایی مدل از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۱۸]:

$$H(x) = \text{mode}\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x)\}$$

فراهم می‌کند.

علاوه بر این، دقت نهایی مدل با شاخص میانگین مربعات خطا (MSE) سنجیده شده است.

$$MSE = \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n \sum n(y_i - \hat{y}_i)^2$$

که در آن  $y_i$  مقدار واقعی و  $\hat{y}_i$  مقدار پیش‌بینی‌شده برای نمونه‌ی  $i$  است. هرچه مقدار MSE کمتر باشد، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است. در نهایت، خروجی مدل به‌صورت احتمال

### ۳-۲- مدل جنگل تصادفی

در سال‌های اخیر، مدل‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرها، جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی خطی محسوب می‌شوند. این مدل‌ها با حذف پیش‌فرض‌های سخت‌گیرانه درباره‌ی توزیع داده‌ها، در مواجهه با داده‌های پر حجم، نویزی یا ناهمگن کارایی بالاتری نشان می‌دهند. یکی از الگوریتم‌های قدرتمند در این حوزه، مدل جنگل تصادفی است که نخستین بار توسط بریمان معرفی شد (Breiman, 2001).

مدل جنگل تصادفی با ترکیب خروجی چندین درخت تصمیم مستقل، مدلی پایدار و مقاوم ایجاد می‌کند که در برابر نوسانات داده‌ای حساسیت کمتری داشته و کمتر دچار بیش‌برازش می‌شود. این الگوریتم بر دو مفهوم کلیدی استوار است:

در این رابطه، تابع mode مقداری را بازمی‌گرداند که بیشترین فراوانی را میان پیش‌بینی‌ها دارد.

برای ارزیابی عملکرد مدل، از نمونه‌های خارج از کیسه استفاده شده است؛ به این ترتیب که حدود یک‌سوم داده‌ها در هر مرحله از آموزش درخت حضور ندارند و برای آزمون همان درخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش، برآوردی دقیق از خطای مدل بدون نیاز به مجموعه‌ی اعتبارسنجی جداگانه

گزارش می‌شود.

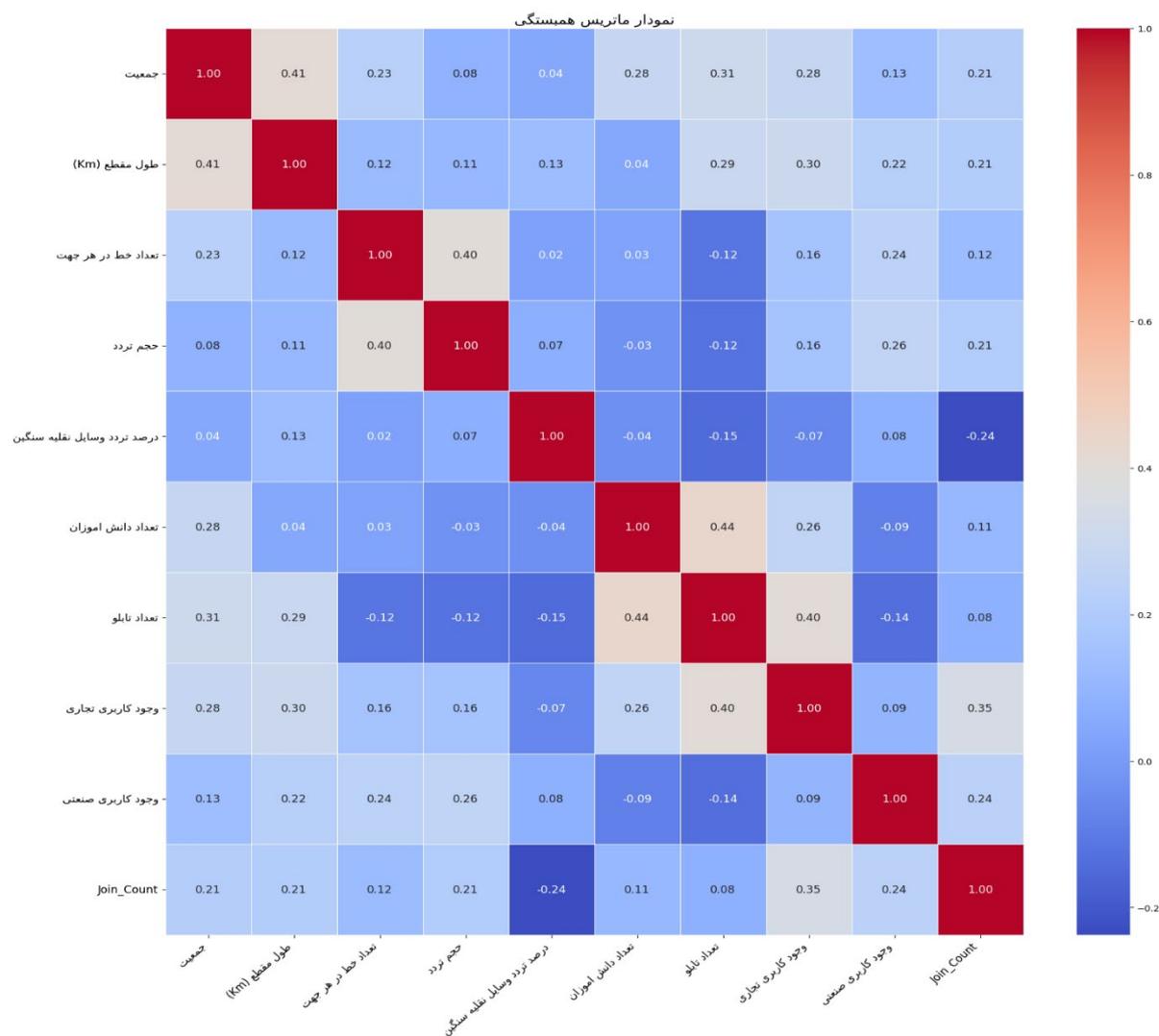
تعلق هر مقطع به طبقه‌ی «پرخطر» محاسبه شد. این احتمال‌ها، همراه با مقادیر OOB و MSE، مبنای اولویت‌بندی نقاط بحرانی و برنامه‌ریزی اقدامات ایمن‌سازی در راه‌های برون‌شهری قرار گرفتند.

#### ۴- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از توسعه مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی تصادفات ارائه می‌شود. نتایج ارائه‌شده شامل معیارهای ارزیابی مدل، دقت پیش‌بینی و تعیین مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر تعداد تصادفات کاربران آسپ‌پذیر راه است که به تفکیک

#### ۴-۱- تحلیل همبستگی میان متغیرها

پیش از اجرای مدل، ماتریس همبستگی متغیرها به منظور بررسی روابط درونی و جلوگیری از بروز هم‌خطی چندگانه توسعه داده شد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ضرایب همبستگی میان تمامی متغیرها کمتر از ۰,۷ است؛ بنابراین، استقلال نسبی میان متغیرها برقرار بوده و داده‌ها از منظر چندهمخطی برای ورود به مدل جنگل تصادفی مناسب ارزیابی شدند. این موضوع از بروز سوگیری در نتایج و کاهش دقت مدل جلوگیری می‌کند.



شکل ۲. نمودار ماتریس همبستگی بین متغیرها

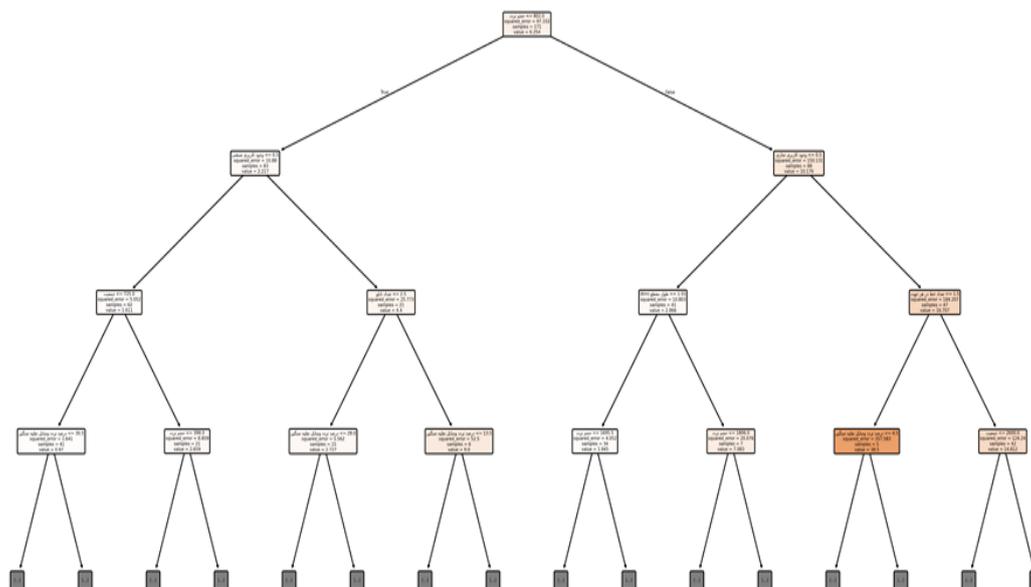
## ۲-۴- بهینه‌سازی مدل جنگل تصادفی

فرایند پیاده‌سازی مدل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه Scikit-learn انجام گرفت. به منظور افزایش دقت و پایداری مدل، بهینه‌سازی ابرپارامترها با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی احتمالی Hyperopt صورت گرفت. انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهایی نظیر تعداد درخت‌ها، عمق بیشینه، و حداقل نمونه‌های مورد نیاز در هر برگ، تأثیر مستقیم بر عملکرد مدل و کنترل بیش‌برازش دارد. نتایج تنظیم پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس ارزیابی معیار میانگین خطای مطلق (MAE)، مقدار خطا پس از تنظیم

پارامترها کاهش معناداری یافته است (جدول ۳)، که بیانگر بهبود چشمگیر توان پیش‌بینی مدل است. علاوه بر این، مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر با ۰,۵۴ به دست آمد که با توجه به ماهیت داده‌های میدانی و پراکندگی آن‌ها، نشان‌دهنده‌ی برازش قابل قبول مدل بر داده‌های آزمون است. در شکل ۳، یکی از درخت‌های تصمیم حاصل از میان ۳۰۰ درخت تشکیل‌دهنده‌ی جنگل تصادفی نمایش داده شده است تا ساختار درونی مدل و فرآیند تصمیم‌گیری آن به صورت بصری قابل درک باشد.

جدول ۲. تنظیمات ابرپارامترهای مدل جنگل تصادفی

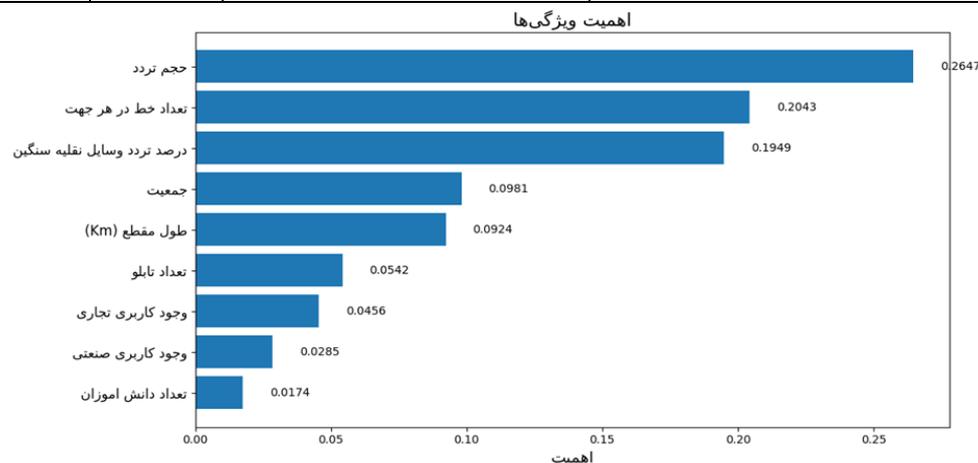
مقدار	توضیح	هابرپارامتر
۱۰	حداکثر عمق هر درخت در جنگل	max_depth
۲	حداقل تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تشکیل یک برگ	min_samples_leaf
۲	حداقل تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تقسیم یک گره داخلی	min_samples_split
۳۰۰	تعداد درخت‌های موجود در جنگل	n_estimators



شکل ۳. نمونه‌ای از درخت‌های توسعه داده طی فرایند مدل‌سازی

جدول ۳. تنظیمات هایپر پارامترهای مدل جنگل تصادفی

شاخص	شماره بخش (Fold)	مقدار (قبل از تعیین هایپر پارامتر)	مقدار (بعد از تعیین هایپر پارامتر)
MAE	۱	۴,۰۲۸۷۵۰	۳,۸۹۷۸۱۷
MAE	۲	۴,۹۶۰۱۷۸	۴,۸۱۴۴۷۲
MAE	۳	۵,۸۰۸۷۴۹	۵,۸۰۴۳۰۰
MAE	۴	۴,۵۶۱۷۸۵	۴,۸۰۸۵۶۸
MAE	۵	۶,۰۸۱۹۶۴۵	۵,۸۶۸۷۳۳
MAE	کل	۵,۰۸۸۲۸۵	۵,۰۳۸۷۷۸۴



شکل ۴. اهمیت ویژگی‌های مختلف در مدل پیش‌بینی واریانس سرعت با استفاده از مدل جنگل تصادفی

#### ۴-۳- تفسیر مدل و تحلیل متغیرهای اثرگذار

حوادث نشان می‌دهند. علاوه بر این، برخی شاخص‌های جمعیتی و زیرساختی نیز در بروز تصادفات نقش دارند، به‌گونه‌ای که جمعیت منطقه (۰,۰۹۸۱) و طول مقطع جاده‌ای (۰,۰۹۲۴) به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار شناسایی شده‌اند و نشان می‌دهند که چگالی جمعیت و توسعه شبکه معابر می‌تواند احتمال وقوع تصادفات را افزایش دهد. در مقابل، متغیرهای مرتبط با وجود کاربری‌های تجاری و صنعتی تأثیری محدودتر در مدل داشته‌اند که احتمالاً ناشی از تفاوت الگوهای حرکتی کاربران آسیب‌پذیر در این نواحی است. همچنین، تعداد دانش‌آموزان اثرگذاری نسبتاً اندکی داشته که می‌تواند ناشی از

نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی نشان می‌دهد که میزان اهمیت متغیرها در پیش‌بینی فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر عمدتاً به ویژگی‌های ترافیکی مربوط می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، حجم تردد با اهمیت نسبی ۰,۲۶۴۷ بیشترین تأثیر را در مدل داشته و بیانگر ارتباط مستقیم میان شدت جریان ترافیک و افزایش احتمال وقوع تصادفات برای کاربران آسیب‌پذیر است. پس از آن، تعداد خطوط عبوری در هر جهت (۰,۲۰۴۳) و درصد تردد وسایل نقلیه سنگین (۰,۱۹۴۹) به‌عنوان عوامل کلیدی شناخته شده‌اند که نقش ساختار هندسی راه و ترکیب ناوگان عبوری را در بروز

و چگالی جمعیتی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصادفات کاربران آسیب‌پذیر به شمار می‌آیند.

دو طرفه، میزان تصادفات بالاتر بوده، در حالی که با افزایش تعداد خطوط به چهار خط، احتمال تصادف کاهش می‌یابد؛ با این وجود، در مسیرهایی با شش خط یا بیشتر، خطر تصادف مجدداً افزایش پیدا می‌کند. این یافته با نتایج پژوهش (Shawky et al., 2014) همسو است که بیان می‌کند افزایش تعداد خطوط عبور، عبور کاربران آسیب‌پذیر را دشوارتر ساخته و احتمال تصادفات را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، فراوانی بالای تصادفات در راه‌های دوخطه دو طرفه می‌تواند ناشی از حضور گسترده‌تر کاربران آسیب‌پذیر در این مسیرها باشد. افزایش جمعیت به‌طور کلی با رشد فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر ارتباط مستقیم دارد. این ارتباط را می‌توان ناشی از افزایش میزان تعاملات میان کاربران راه و وسایل نقلیه در مناطق پرتراکم دانست؛ موضوعی که یافته‌های پژوهش (Parikh et al., 2024) را تأیید می‌کند. نتایج مدل همچنین نشان داد که افزایش طول مقطع جاده‌ای با افزایش وقوع تصادفات کاربران آسیب‌پذیر همراه است، زیرا مسیرهای طولانی‌تر احتمال مواجهه و تعامل میان این کاربران و وسایل نقلیه را در طول سفر افزایش می‌دهد. این نتیجه با مطالعات (Neri & da Silva, 2023) همسو است که تأکید دارند توسعه طولی شبکه معابر می‌تواند منجر به افزایش مواجهه کاربران با ریسک تصادف شود. از سوی دیگر، متغیر مربوط به تعداد دانش‌آموزان بیانگر آن است که در مناطقی با جمعیت بالاتر دانش‌آموزی، احتمال وقوع تصادفات کاربران آسیب‌پذیر بیشتر است. این یافته با نتایج پژوهش (Zhu et al., 2022) همخوانی دارد که نشان دادند کاربران کم‌سن و سال به دلیل تجربه کمتر در مواجهه با شرایط ترافیکی و ناآگاهی از اصول ایمنی، مستعد رفتارهای پرخطر و در نتیجه درگیری بیشتر در حوادث ترافیکی هستند. در بررسی ویژگی‌های زیرساختی، رابطه میان متغیر «تعداد تابلوهای راهنمایی» و فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر به صورت غیرخطی و نوسانی مشاهده شد. نتایج نشان داد که وجود تعداد بسیار کم یا بیش از حد علائم راهنمایی

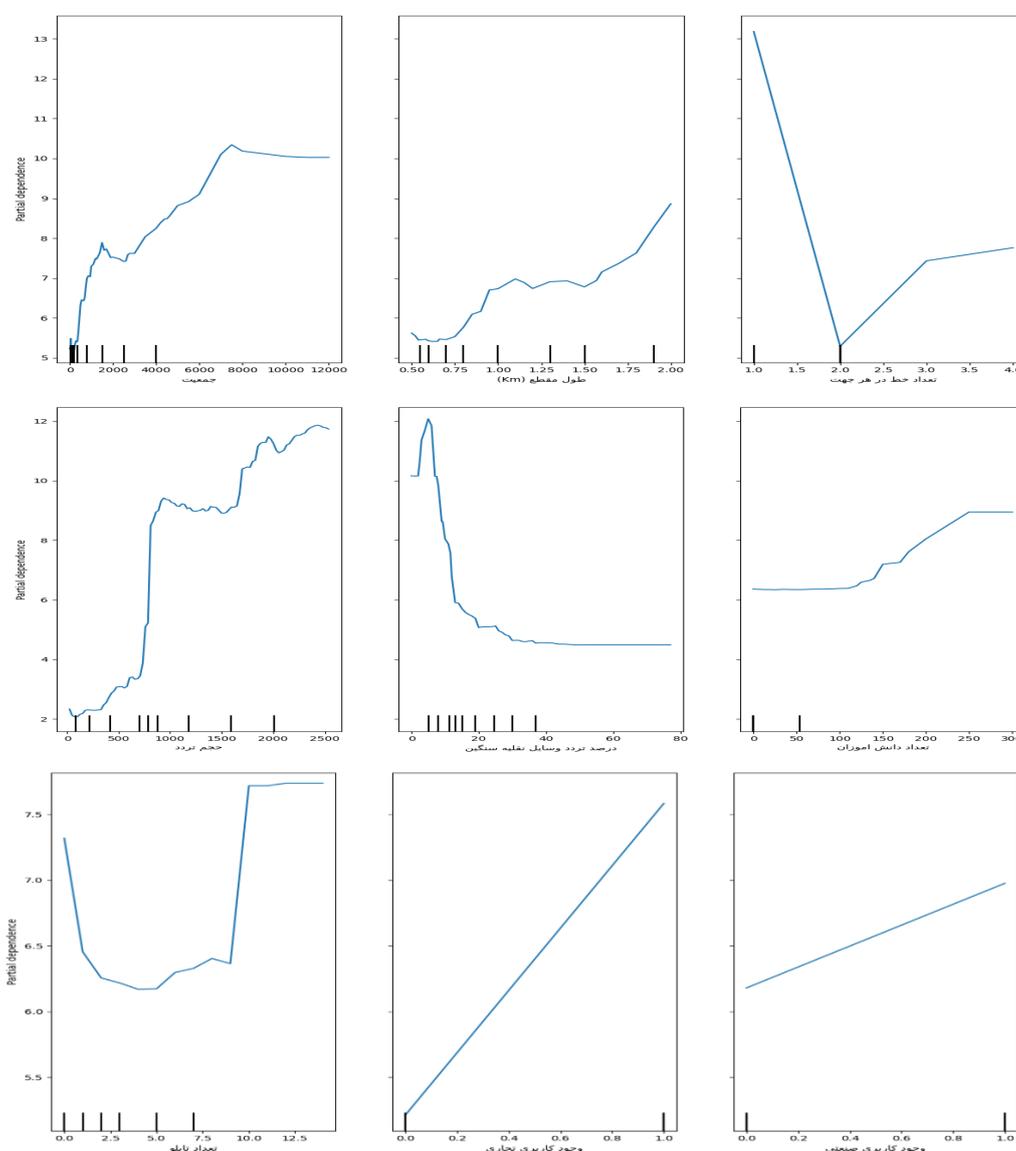
پراکندگی فضایی این گروه و توجه به ملاحظات ایمنی در مسیرهای تردد آنان باشد. به‌طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که حجم و ترکیب جریان ترافیک، ویژگی‌های زیرساختی معابر

#### ۴-۴- تحلیل روابط غیرخطی با استفاده از نمودارهای وابستگی جزئی

علاوه بر تحلیل میزان اهمیت متغیرها، بررسی اثرگذاری عوامل ورودی بر فراوانی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر از طریق نمودار وابستگی جزئی در مدل جنگل تصادفی انجام شده است. از آنجا که تصادفات کاربران آسیب‌پذیر معمولاً با پیامدهای جدی همراه‌اند، نمودارهای وابستگی جزئی برای سطوح بالاتر فراوانی تصادفات ترسیم شده‌اند تا رفتار متغیرها در شرایط بحرانی‌تر به‌طور دقیق‌تری تحلیل شود. شکل ۵ رابطه میان متغیرهای کلیدی و میزان بروز تصادفات کاربران آسیب‌پذیر را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، اغلب متغیرهای تأثیرگذار دارای روابطی غیرخطی با فراوانی تصادفات هستند که این امر بیانگر تعامل پیچیده میان عوامل محیطی، زیرساختی و ترافیکی در بروز این حوادث است. نتایج حاکی از آن است که حجم تردد به‌عنوان یکی از مؤثرترین متغیرها نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع تصادفات کاربران آسیب‌پذیر دارد، به‌طوری‌که با افزایش شدت جریان ترافیک، به‌ویژه در سطوح بالاتر، احتمال برخورد میان کاربران آسیب‌پذیر و وسایل نقلیه افزایش می‌یابد. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله (Retallack & Ostendorf, 2020) و (Lee & Abdel-Aty, 2005) مطابقت دارد که ارتباط مستقیم میان حجم تردد و تعداد تصادفات کاربران آسیب‌پذیر را گزارش کرده‌اند. همچنین، بررسی اثر درصد وسایل نقلیه سنگین نشان می‌دهد که در مقاطع با سهم کمتر از ۱۰ درصد، افزایش این متغیر منجر به رشد تصادفات می‌شود که هم‌راستا با مطالعه (Al-Nuaimi & Jameel, 2023) است؛ اما در سطوح بالاتر، با افزایش سهم وسایل نقلیه سنگین، میزان تصادفات کاهش می‌یابد. این الگو احتمالاً ناشی از محدود بودن مقاطع دارای درصد بالای وسایل نقلیه سنگین در داده‌ها و تغییر نوع کاربری راه از محلی به ترانزیتی است که با کاهش حضور کاربران آسیب‌پذیر همراه است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که در مسیرهای دوخطه

عاملی مؤثر در افزایش مواجهه کاربران آسیب پذیر با خطر تصادف معرفی کرده است. همچنین، متغیر مرتبط با وجود مناطق صنعتی نیز رابطه‌ای افزایشی با نرخ تصادفات نشان می‌دهد، به طوری که در نواحی صنعتی، احتمال وقوع تصادف برای کاربران آسیب پذیر بیشتر است. این وضعیت می‌تواند ناشی از حضور پر تعداد وسایل نقلیه سنگین، سرعت‌های بالاتر جریان ترافیک و در نتیجه کاهش سطح ایمنی برای کاربران آسیب پذیر باشد؛ موضوعی که با یافته‌های پژوهش (Manullang et al., 2019) نیز همخوانی دارد.

می‌تواند منجر به افزایش احتمال وقوع تصادف شود. این نتیجه با یافته‌های پژوهش (Budzynski et al., 2019) همسو است که بیان می‌دارد تراکم بالای تابلوها ممکن است موجب سردرگمی بصری و در نتیجه کاهش تمرکز رانندگان گردد. علاوه بر این، وجود کاربری‌های تجاری اثر مستقیمی بر افزایش نرخ تصادفات کاربران آسیب پذیر دارد؛ پدیده‌ای که ناشی از افزایش حجم تردد عابران پیاده و موتورسواران در این نواحی است. یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش (Manullang et al., 2019) مطابقت دارد که گسترش فضاهای تجاری را



شکل ۵. نمودار وابستگی جزئی عوامل کلیدی تأثیرگذار بر واریانس سرعت

#### ۴-۵- جمع‌بندی نتایج

نتایج مدل جنگل تصادفی نشان داد که متغیرهای ترافیکی، محیطی و زیرساختی نقش مهمی در بروز این تصادفات دارند. در میان این عوامل، حجم تردد بیشترین تأثیر را داشته و افزایش جریان ترافیک منجر به افزایش احتمال برخورد میان کاربران آسیب‌پذیر و وسایل نقلیه می‌شود. همچنین، سهم و وسایل نقلیه سنگین، تعداد خطوط عبوری، تراکم جمعیت و متغیرهای زیرساختی همچون تراکم تابلوها و کاربری‌های تجاری و صنعتی از عوامل مؤثر شنا سایی شدند. بر این اساس، اتخاذ راهبردهایی نظیر کنترل سرعت، تفکیک مسیر وسایل نقلیه سنگین، طراحی گذرگاه‌های ایمن و بهینه‌سازی محیط راه می‌تواند به‌طور مؤثری در کاهش تصادفات این گروه از کاربران مؤثر باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های ترافیکی، محیطی و زیرساختی با شدت‌های متفاوت بر الگوی تصادفات کاربران آسیب‌پذیر تأثیر می‌گذارند. حجم تردد به‌عنوان مهم‌ترین عامل، رابطه‌ای مستقیم با افزایش احتمال تصادف دارد؛ به‌گونه‌ای که تراکم بالای وسایل نقلیه موجب افزایش تعاملات خطرناک میان عابران پیاده، دوچرخه‌سواران و رانندگان می‌شود. بنابراین، کنترل سرعت و مدیریت جریان ترافیک در معابر پرتردد می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین سیاست‌ها در ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر مطرح شود.

نتایج مربوط به درصد وسایل نقلیه سنگین نشان داد که این متغیر تأثیری غیرخطی دارد؛ در مقادیر پایین، افزایش سهم وسایل نقلیه سنگین باعث افزایش تصادفات می‌شود، در حالی که در سطوح بالا کاهش مشاهده می‌گردد. این رفتار می‌تواند به‌دلیل تغییر کارکرد راه و کاهش تردد کاربران آسیب‌پذیر در مسیرهای با بار ترافیکی سنگین باشد. از این رو، تفکیک مسیرهای ویژه برای ناوگان سنگین و طراحی زیرساخت‌های مستقل در نواحی پرتردد کاربران آسیب‌پذیر، یکی از رویکردهای کلیدی کاهش ریسک است.

تحلیل متغیر تعداد خطوط عبوری نیز رابطه‌ای دوجبهی نشان داد: در مسیرهای دوخطه، به‌دلیل محدودیت فضا و حضور هم‌زمان کاربران مختلف، احتمال تصادف بالاست؛ در حالی که افزایش خطوط به چهار خط موجب بهبود ایمنی می‌شود. با این حال، در مسیرهای شش‌خطه یا بیشتر، مجدداً افزایش

تصادفات مشاهده شده است که به دشواری عبور عرضی و افزایش سرعت‌های عملیاتی بازمی‌گردد. این یافته بر ضرورت طراحی گذرگاه‌های ایمن، میان‌جریه‌های حفاظتی و علائم هشداردهنده در معابر چندخطه تأکید دارد.

در بخش محیطی، تراکم جمعیت و تعداد دانش‌آموزان به‌عنوان عوامل کلیدی در افزایش تصادفات شناخته می‌شوند. مناطق پر تراکم شهری به‌دلیل حجم بالای تعاملات میان کاربران راه، مستعد تصادفات بیشتری هستند. همچنین، حضور کاربران کم‌سن‌وسال به‌دلیل تجربه محدود در ارزیابی ریسک و رفتارهای پرخطر، احتمال وقوع تصادفات را افزایش می‌دهد. اجرای محدودیت‌های سرعت در اطراف مدارس، نصب تابلوهای هشدار و طراحی مسیرهای ایمن برای عابران پیاده می‌تواند راهکار مؤثری برای کاهش آسیب‌پذیری این گروه باشد. در بعد زیرساختی، نتایج نشان داد که افزایش تعداد تابلوهای راهنمایی و رانندگی در برخی مقاطع باعث افزایش تصادفات می‌شود. این امر به‌احتمال زیاد ناشی از بار شناختی زیاد و سردرگمی رانندگان در محیط‌های با تراکم بالای علائم است. بهینه‌سازی جانمایی و حذف علائم غیرضروری می‌تواند به خوانایی محیط و افزایش تمرکز رانندگان کمک کند. همچنین، وجود کاربری‌های تجاری و صنعتی با افزایش احتمال تصادف کاربران آسیب‌پذیر همراه بود. دلیل این امر افزایش حجم تردد، پیچیدگی جریان‌های حرکتی و حضور بیشتر موتورسواران و عابران در این نواحی است. بنابراین، جداسازی مسیرهای کاربران آسیب‌پذیر از مسیرهای اصلی و دور کردن نواحی صنعتی از حریم راه‌های پرتردد، راهبردی مؤثر برای کاهش خطرات است.

این پژوهش با چند محدودیت همراه بود. نخست، محدودیت در تعداد مقاطع مورد بررسی، که با وجود پوشش مناسب، می‌تواند بر دقت تعمیم‌پذیری نتایج اثرگذار باشد. دوم، محدودیت در متغیرهای در دسترس که موجب شد برخی عوامل اثرگذار مانند شرایط جوی و روشنایی در زمان وقوع تصادف در تحلیل لحاظ نشوند. همچنین، عدم دسترسی به داده‌های فردی کاربران آسیب‌پذیر (مانند سن، تجربه و رفتارهای ترافیکی) امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای رفتاری را محدود کرده است. افزون بر این، تمرکز داده‌ها بر استان اصفهان سبب می‌شود نتایج به سایر مناطق با ویژگی‌های جغرافیایی و فرهنگی متفاوت به‌طور کامل قابل تعمیم نباشند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های گسترده‌تر مکانی و متغیرهای تکمیلی برای افزایش دقت مدل و تعمیم‌پذیری نتایج استفاده شود.

- Parikh, P., et al. (2024). Impact of Road Infrastructure on VRU Safety: A Case-Control Study. in *Lecture Notes in Civil Engineering*.
- Popa, Ş., et al., (2023). Current Epidemiological Trends of Pediatric Traffic Accidents at a Romanian Clinical Hospital. *Children*, 10(9).
- Retallack, A.E. and B. Ostendorf, (2020). Relationship between traffic volume and accident frequency at intersections. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4).
- Shawky, M.A., A.M. Garib, and H. Al-Harthei, (2014). The impact of road and site characteristics on the crash-injury severity of pedestrian crashes. *Advances in Transportation Studies*, (special issue): 27-36.
- V S, V. and V. Perumal, (2024). Analysis of crash severity in rear-end and angle collisions on an urban roundabout in heterogeneous non-lane-based traffic conditions. *Transportation Letters*.
- World Health, O., (2023). Global status report on road safety 2023. Geneva: *World Health Organization*.
- Yan, M. and Y. Shen, (2022). Traffic accident severity prediction based on random forest. *Sustainability*, 14(3): 1729-1730.
- Yu, C.Y. and X. Zhu, (2016). Planning for Safe Schools: Impacts of School Siting and Surrounding Environments on Traffic Safety. *Journal of Planning Education and Research*, 36(4): 476-486.
- Zhu, M., et al., (2022). Exploring the impacts of street layout on the frequency of pedestrian crashes: A micro-level study. *Journal of Safety Research*, 81: 91-100.

## ۶-سیاسگزاری

از اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان اصفهان بابت همکاری صمیمانه در فرآیند گردآوری داده و اطلاعات ضروری برای انجام این مطالعه، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## ۷-مراجع

- (۱۴۰۲). آمار متوفیات و مصدومین حوادث رانندگی در سال ۱۴۰۲.
- Al-Nuaimi, A. and A.K. Jameel. (2023). An Impact of Traffic Characteristics on Crash Frequency. in *E3S Web of Conferences*.
- Analysis, N.C.f.S.a., (2017). Bicyclists and other cyclists: 2015 data., in *Traffic Safety Facts*.
- Breiman, L., Random forests. (2001). *Machine learning*, 45: 5-32.
- Budzynski, M., et al. (2019). Effects of Road Infrastructure on Pedestrian Safety. in *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*.
- Lee, C. and M. Abdel-Aty, (2005). Comprehensive analysis of vehicle-pedestrian crashes at intersections in Florida. *Accident Analysis and Prevention*, 37(4), 775-786.
- Manullang, O.R., et al. (2019). Changes of landuse in the campus area and their implications toward traffic condition. in *IOP Conference Series, Earth and Environmental Science*.
- Mohan, D., (2016). Speed and its effects on road traffic crashes, in *Transport Planning and Traffic Safety: Making Cities, Roads, and Vehicles Safer*. 127-135.
- Neri, T.B. and C.A.P. da Silva, (2023). The Barrier Effect of Urban Highway and the Impacts on Mobility and Transport Expenses. *Urbe*.

# Quantitative Analysis of Factors Influencing Vulnerable Road User Crash Frequency on Rural Roads via Random Forest Modeling

## (Case Study: Isfahan Province)

*Ali Tavakoli Kashani, Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran and Road Safety Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mohammad Najafpour Dero, Ph.D., Stud., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran and Road Safety Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mehdi Heydari, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Moeid Zahabeyoun, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

**E-mail: alitavakoli@iust.ac.ir**

Received: September 2025- Accepted: February 2026

### ABSTRACT

Vulnerable road users (VRUs), including pedestrians and motorcyclists, are among the most at-risk groups in the transportation system and account for a significant share of road traffic fatalities. This study aims to identify the key determinants of crash frequency among these users on rural roads in Isfahan Province by employing a data-driven approach and the Random Forest machine learning model. The dataset comprises 14,875 crashes, 19% of which resulted in injury or fatality for VRUs, along with information collected from 400 road segments through field surveys covering more than 15,000 kilometers of the provincial road network. Modeling results indicate that traffic volume has the most substantial positive impact on the likelihood of VRU crashes, while the share of heavy vehicles in the traffic stream shows a nonlinear relationship with crash frequency. The findings further reveal that two-lane roads exhibit higher VRU crash rates due to limited capacity and traffic interactions, whereas on highways, higher speeds and crossing difficulties increase collision risks. Moreover, factors such as population density, road segment length, and the number of students in each area were found to positively influence crash frequency. Based on the study findings, implementing speed control measures on high-traffic routes, segregating heavy vehicle lanes, providing safe pedestrian crossings on multilane roads, and strengthening traffic enforcement in densely populated areas are identified as key strategies for mitigating VRU crash risks. Additionally, relocating industrial and commercial land uses away from major road corridors can effectively enhance overall network safety and reduce crash severity.

**Keywords:** Vulnerable Road Users, Motorcyclists, Pedestrians, Road Safety, Random Forest Model