

## تحلیل اثرات پارامترهای هندسی و ترافیکی بر بروز تداخلات بحرانی با استفاده از شاخص ایمنی زمان تا برخورد (TTC) در تقاطع‌های چراغ‌دار درون‌شهری

مقاله علمی-پژوهشی

کامران سروری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\*امین میرزا بروجردیان (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: [boroujerdian@modares.ac.ir](mailto:boroujerdian@modares.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳

صفحه ۶۸-۴۷

### چکیده

ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار شهری است و نقشی مهم در کاهش تصادفات و تلفات انسانی دارد. با توجه به گسترش روزافزون شهرنشینی و افزایش حجم تردد در شبکه معابر، توجه به عوامل مؤثر بر بروز سوانح ترافیکی اهمیت یافته است. از این رو، تحلیل علمی رفتار ترافیکی و شناسایی مؤلفه‌های مؤثر در ایمنی، به‌ویژه در نقاط حساس مانند تقاطع‌های شهری، ضرورتی اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت ترافیک شهری محسوب می‌شود. در این راستا، تقاطع‌های چراغ‌دار به دلیل ویژگی‌های مثبت در کنترل جریان عبور و افزایش ایمنی، به‌عنوان یکی از راهکارهای رایج در سامان‌دهی ترافیک مطرح شده‌اند. در شبکه حمل‌ونقل شهری، این تقاطع‌ها عناصر کلیدی و حساس ساختار خدمات ترافیکی‌اند که هدف اصلی از طراحی آن‌ها، کاهش تداخل میان وسایل نقلیه و دیگر کاربران راه و بهبود نظم عبور و مرور در معابر پرتردد است. این پژوهش به تحلیل ایمنی تقاطع‌های چهارشاخه چراغ‌دار شهری با بهره‌گیری از شاخص زمان تا برخورد پرداخته و داده‌های میدانی را از طریق تصویربرداری هوایی با پهپاد در هفت تقاطع پرتردد شهرستان سقز جمع‌آوری کرده متغیرهای ترافیکی و هندسی نظیر حجم ترافیک، سرعت و عرض ورودی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل ویدئو و الگوریتم‌های پردازش تصویر استخراج و تحلیل شدند. مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره نشان دادند که افزایش حجم ترافیک به‌ازای هر واحد وسیله نقلیه، تعداد تداخلات بحرانی TTC را تقریباً ۱/۲ درصد افزایش می‌دهد، همچنین افزایش یک متر عرض ورودی هر تقاطع می‌تواند تعداد تداخلات بحرانی مبتنی بر شاخص زمان تا برخورد را ۲۴ تا ۲۸ درصد کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی تقاطعات چهارراهی چراغ‌دار، زمان تا برخورد، آنالیز عملکردی، پردازش تصویر، تداخلات ترافیکی

### ۱-مقدمه

حمل‌ونقل جاده‌ای قابل پذیرش نیست، این رویکرد بر این اصل استوار است که جان انسان‌ها نباید بهای عملکرد شبکه حمل‌ونقل باشد و هدف نهایی آن، ایجاد سیستمی ایمن و پایدار با نرخ مرگ‌ومیر و آسیب‌های شدید برابر با صفر است (Tingvall & Haworth, 1999). با در نظر گرفتن این موضوع، بسیاری از پژوهشگران و سازمان‌ها به‌صورت فعال در حال تلاش برای

طبق آماري که توسط سازمان جهانی بهداشت گزارش شده است، سالانه نزدیک به ۱/۳۵ میلیون نفر بر اثر تصادفات جاده‌ای جان خود را از دست می‌دهند (Organization, 2022). بر پایه رویکرد چشم‌انداز صفر که نخستین بار توسط Tingvall و Haworth در سال ۱۹۹۹ مطرح شد، از منظر اخلاقی هیچ‌گونه مرگ یا آسیب جدی ناشی از جابه‌جایی افراد در سامانه

کارایی و اعتبار این شاخص‌ها در ارزیابی جامع ریسک‌های موجود در طول رانندگی یا در یک موقعیت خاص از زیرساخت‌های جاده‌ای، همچنان محل تردید است (Mullakkal-Babu et al., 2017; Yang et al., 2021). در حال حاضر، هیچ شاخص ایمنی موجودی قادر به پوشش کامل ریسک تصادف ناشی از تمامی انواع برخوردهای ممکن نیست. این موضوع یکی از کاستی‌های اساسی در تحلیل‌های ایمنی جانشین (Surrogate Safety Analysis) به شمار می‌رود که در مطالعات متعددی نیز به آن اشاره شده است (Arun et al., 2021; Johnsson et al., 2018).

در شیوه‌های رایج، مدیریت جریان ترافیک که با هدف ارتقاء سطح خدمات در زیرساخت‌های ترافیکی انجام می‌شود و ایمنی جاده‌ای که بر کاهش تصادفات متمرکز است. اغلب به صورت جداگانه و مستقل از یکدیگر بررسی شده‌اند، با وجود آنکه ارتباطی روشن و انکارناپذیر میان این دو حوزه وجود دارد. یکی از دلایل اصلی این تفکیک را می‌توان در فراگیری ابزارهای شبیه‌سازی میکروسکوپی ترافیک دانست که عمدتاً بر تحلیل و بهبود جریان ترافیکی تمرکز دارند و به مقوله ایمنی توجه کمتری دارند. با این حال، اغلب مدل‌های جریان ترافیک موجود صرفاً بر سنجش سطح خدمت تمرکز دارند و محیطی عاری از تصادف را به صورت پیش‌فرض در نظر می‌گیرند. این در حالی است که چنین مدل‌هایی از رفتارهای مخاطره‌آمیز کاربران جاده که می‌توانند منجر به وقوع تصادف شوند، چشم‌پوشی می‌کنند. افزون بر این، دستیابی به داده‌های کلیدی در زمینه متغیرهای مؤثر بر ایمنی فرایندی پیچیده و وابسته به الگوریتم‌های پیشرفته و دقیق است (Astarita & Giofré, 2019; Essa & Sayed, 2018; Reyad et al., 2022). در حال حاضر، سامانه‌های نوین مدیریت و فناوری اطلاعات قادرند داده‌های ترافیکی را با دقت و وضوح بالا گردآوری کرده و به صورت کارآمد مدیریت و تحلیل نمایند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش داده، امکان پایش دقیق وضعیت ترافیکی را در لحظه فراهم کرده و بستر مناسبی برای تحلیل رفتار ترافیکی، شناسایی گلوگاه‌های جریان عبور و مرور، و ارزیابی ریسک‌های ایمنی فراهم می‌سازند. یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و توسعه یک شاخص جامع برای تحلیل ایمنی، پیچیدگی‌های ناشی از ماهیت دویبعدی دینامیک حرکت وسایل نقلیه و تنوع سناریوهای برخورد میان آن‌هاست. در چنین محیط‌هایی، وسایل نقلیه

ارزیابی و کاهش خطر مرگ‌ومیر ناشی از تصادفات رانندگی هستند. این اقدامات با هدف ارتقای ایمنی ترافیک، شناسایی عوامل پرخطر و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش سوانح انجام می‌شود (Charly & Mathew, 2019; Chen et al., 2020; Xie et al., 2019). هدف نهایی این اقدامات، ایجاد سیستمی ایمن و پایدار در حوزه حمل‌ونقل جاده‌ای است؛ سیستمی که از بروز تلفات جانی و آسیب‌های شدید تا حد امکان جلوگیری کند (Hossain et al., 2019; Kim et al., 2017; Naumann et al., 2019). سهم پژوهش‌های صورت‌گرفته را می‌توان در روند نزولی نرخ سالانه تصادفات جاده‌ای در بسیاری از کشورها مشاهده کرد. با این وجود، مرگ‌ومیرهای جاده‌ای همچنان یکی از چالش‌های جدی در سراسر جهان به‌شمار می‌رود. در گذشته، تلاش‌ها برای بهبود ایمنی سیستم حمل و نقل عمدتاً بر پایه تحلیل و مدل‌سازی داده‌های تصادفات انجام می‌شد. با این حال، این رویکردها به دلیل چالش‌های متعدد مرتبط با داده‌های تصادفات، نتوانستند به طور کامل در ارتقاء ایمنی جاده‌ها مؤثر واقع شوند (Wali et al., 2019). مشکلات اصلی مرتبط با داده‌های تصادفات شامل موارد زیر است: تصادفات ترافیکی به دلیل ویژگی‌های خاص خود نسبت به دیگر حوادث ترافیکی استثنایی هستند، زیرا معمولاً حاصل یک سری وقوع‌های ناگوار از مجموعه‌ای از احتمالات کوچک هستند. علاوه بر این، برای جمع‌آوری داده‌های کافی جهت مدل‌سازی آماری، نیاز به مدت زمان طولانی برای ثبت تصادفات وجود دارد. یکی دیگر از مشکلات این است که تمامی تصادفات ترافیکی ثبت نمی‌شوند و میزان گزارش نشدن آن‌ها به شدت تصادف و نوع کاربران جاده‌ای درگیر بستگی دارد.

از سوی دیگر، اطلاعات مربوط به جنبه‌های رفتاری پیش از وقوع تصادفات نیز معمولاً به سختی در دسترس قرار می‌گیرد (Laureshyn, 2010; Laureshyn et al., 2017; Olszewski et al., 2016).

بر این اساس، شماری از پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که تحلیل ایمنی جاده‌ها در صورت بهره‌گیری از شاخص‌های معتبر و قابل‌اعتماد مبتنی بر رویدادهای غیرتصادفی قابل شناسایی، به‌عنوان جانشین‌هایی برای داده‌های تصادفات، می‌تواند دقت و کارایی بیشتری داشته باشد (Ghanim et al., 2020; Yamada & Kuroki, 2019). اگرچه شاخص‌های ایمنی متعددی برای سنجش ریسک تصادف وجود دارد، اما اغلب آن‌ها عمدتاً بر خطر برخوردهای عقب‌به‌جلو تمرکز دارند. علاوه بر این، میزان

ثانیه‌ای در نظر گرفته شده است، تا بتوان رخدادهای مخاطره‌آمیز را از وضعیت‌های غیربحرانی تفکیک نمود. با این حال، این مطالعه فاقد ارزیابی شدت تداخلات بوده و همچنین در فرایند مدل‌سازی، از چارچوب رگرسیون خطی تعمیم‌یافته استفاده شده است. از این‌رو، توسعه توابع پیش‌بینی ایمنی (SPFs) در سطح چرخه‌های سیگنال با بهره‌گیری از شاخص‌های متنوع‌تری از تداخلات ترافیکی و در نظر گرفتن آستانه‌های متفاوت برای هر شاخص، می‌تواند در بازتاب سطوح مختلف شدت تداخلات مؤثر واقع شود. این رویکرد نه تنها موجب دقت بیشتر در شناسایی موقعیت‌های پرخطر می‌شود، بلکه امکان تحلیل حساسیت نسبت به شدت بالقوه خطر را نیز فراهم می‌آورد.

## ۲- پیشینه تحقیق

تابع‌های عملکرد ایمنی برای تقاطع‌های دارای چراغ راهنمایی، در مطالعات متعددی به‌طور گسترده توسعه، ارزیابی و اسننجی شده‌اند. پژوهش‌های متعددی نیز اقدام به توسعه و کالیبراسیون مدل‌های SPFs متناسب با شرایط محلی مناطق مختلف کرده‌اند. در اغلب این مطالعات، میزان مواجهه ترافیکی با استفاده از شاخص‌هایی نظیر میانگین ترافیک روزانه سالیانه (AADT) محاسبه شده است و نرخ تصادفات نیز به‌صورت تجمعی و در بازه‌های زمانی چندساله در نظر گرفته شده‌اند. اگرچه این رویکرد امکان تحلیل الگوهای بلندمدت ایمنی را فراهم می‌سازد، اما ممکن است نوسانات کوتاه‌مدت و پویایی‌های لحظه‌ای ترافیک و تصادفات را به‌درستی بازتاب ندهد (El-Basyouny & Sayed, 2012; Lyon et al., 2005; Persaud et al., 2012; Wang & Abdel-Aty, 2008). برای غلبه بر محدودیت‌های مطالعات تصادفات، تکنیک تداخل ترافیکی به‌عنوان رویکردی پیش‌نگر و فعال پیشنهاد شده است تا ایمنی جاده‌ای را از منظری جامع‌تر نسبت به تحلیل صرف داده‌های تصادف بررسی کند (Songchitruksa & Tarko, 2006). تداخلات ترافیکی بسیار بیشتر از تصادفات رخ می‌دهند، به‌وضوح قابل مشاهده‌اند و می‌توانند بینشی ارزشمند در مورد مکانیزم‌های شکست و زنجیره رخدادهایی که منجر به تصادفات می‌شوند، ارائه دهند. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که کاهش میزان تداخلات ترافیکی می‌تواند به کاهش فراوانی تصادفات جاده‌ای منجر شود (Ismail et al., 2011; Sacchi et al., 2013). استفاده از تداخلات ترافیکی به‌عنوان روشی مکمل برای تحلیل تصادفات، در پژوهش‌های ایمنی حمل و نقل

به‌صورت هم‌زمان در دو بُعد مکان‌یابی و حرکت می‌کنند و تعاملات پیچیده‌ای همچون تغییر مسیر، عبور از تقاطع، یا ادغام در جریان ترافیک شکل می‌گیرد که می‌تواند به انواع مختلفی از تداخلات و برخوردها منجر شود؛ از جمله برخوردهای زاویه‌ای، جانبی، از عقب و حتی مواجهه‌های مستقیم. افزون بر این، شناسایی، طبقه‌بندی و تعمیم تمام این سناریوهای بالقوه برخورد، با استفاده از پایگاه‌های داده مسیرهای حرکتی وسایل نقلیه، فرایندی بسیار دشوار و نیازمند بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی پیشرفته و الگوریتم‌های هوشمند است. این پیچیدگی‌ها مانعی جدی در مسیر توسعه چارچوب‌های تحلیلی جامع و دقیق برای ارزیابی ایمنی در تسهیلات مختلف حمل‌ونقلی محسوب می‌شوند. (Anis et al., 2025; Jiao et al., 2025)

برای پر کردن خلأ موجود در روش‌های رایج ارزیابی ایمنی مبتنی بر شاخص‌های جایگزین، این مطالعه استفاده از شاخصی با عنوان زمان تا برخورد را به‌عنوان یک معیار پیش‌نگر و کارآمد برای تحلیل ایمنی پیشنهاد می‌دهد (Hayward, 1972). TTC به مدت‌زمان باقی‌مانده تا لحظه برخورد بین دو وسیله نقلیه اطلاق می‌شود، در صورتی که هر دو وسیله با سرعت فعلی و در مسیر فعلی خود حرکت کنند. این شاخص قادر است در تمامی سناریوهای ترافیکی، فارغ از نوع تصادف، هندسه مسیر و وضعیت حرکتی وسایل نقلیه، به‌کار گرفته شود. در مواقعی که وسایل نقلیه در مسیر برخورد قرار دارند، محاسبه TTC بر مبنای کمترین فاصله بین آن‌ها و نرخ بسته‌شدن این فاصله در همان راستا انجام می‌شود، که می‌تواند شاخصی مؤثر برای شناسایی موقعیت‌های پرخطر پیش از وقوع تصادف باشد. توابع پیش‌بینی ایمنی توسعه‌یافته در این مطالعه، مبتنی بر داده‌های میدانی استخراج‌شده از ضبط‌های ویدئویی در هفت تقاطع چراغ‌دار چهارشاخه شهری بوده‌اند. در این تحقیق، به‌جای تکیه صرف بر داده‌های تصادفات، از تداخلات ترافیکی به‌عنوان شاخص جانشین استفاده شده است؛ چرا که این رویدادها از فراوانی بیشتری نسبت به تصادفات برخوردارند و امکان تحلیل دقیق‌تری از شرایط بحرانی در شبکه ترافیکی فراهم می‌کنند. مدل‌های ارائه‌شده از برآزش آماری مناسبی برخوردار بوده‌اند و کلیه متغیرهای تبیینی نظیر حجم ترافیک در سطح بالایی معنادار ارزیابی شده‌اند. به‌منظور شناسایی تداخلات، از شاخص زمان تا برخورد (TTC) به‌عنوان تنها معیار استفاده شده است. در این مدل‌ها، آستانه TTC برابر با ۱/۵ ثانیه تا ۳/۰ ثانیه به فاصله ۰/۵

این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات ایمنی پیش‌تصادفی مورد استفاده قرار گیرد (Xie et al., 2016). در مطالعه‌ای که توسط Sayed و همکارانش انجام شد، از شاخص TTC با آستانه کمتر از ۳ ثانیه به‌عنوان معیار ارزیابی ایمنی تداخلات بین وسایل نقلیه استفاده گردید. آن‌ها تداخلاتی با مقدار TTC کمتر از این حد را به‌عنوان شرایط بحرانی در نظر گرفته و برای تحلیل ایمنی از آن بهره بردند (Sayed et al., 2013). در دو مطالعه‌ای دیگر، Yuan و همکاران و با استفاده از داده‌های بلوتوث، شرایط آب‌وهوایی و اطلاعات سامانه‌های کنترل تطبیقی چراغ‌راهنمایی، رابطه بین وقوع تصادف در شریان‌های شهری و عواملی چون ویژگی‌های ترافیکی، فزبنندی چراغ‌ها و وضعیت آب‌وهوا را در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای بررسی کرده‌اند (Yuan & Abdel-Aty, 2018; Yuan et al., 2018). مطابق با یافته‌های پژوهشگران و همچنین مستندات ارائه‌شده در دستورالعمل‌ها و راهنماهای معتبر بین‌المللی، برای هر یک از شاخص‌های تعارضات ترافیکی، آستانه‌های مشخصی تعریف شده است که گذر از آن‌ها نشانگر افزایش سطح ریسک در موقعیت‌های مورد نظر می‌باشد. به‌عنوان نمونه، در راهنمای استاندارد مدیریت ایمنی ترافیکی کشور هلند، آستانه‌ای برای شاخص زمان تا برخورد تعیین شده است که بر اساس آن، در صورتی که حداقل مقدار ثبت‌شده در یک رویداد ترافیکی کمتر از ۱/۵ ثانیه باشد، آن موقعیت به‌عنوان یک وضعیت دارای پتانسیل خطر بالا در محیط‌های درون‌شهری شناخته می‌شود (Kraay & Van der Horst, 1985).

اسا و همکاران در پژوهشی که روی شش تقاطع چهارشاخه چراغ‌دار انجام دادند (دو تقاطع در ادمنتون، آلبرتا و چهار تقاطع دیگر در سوری، بریتیش کلمبیا در کشور کانادا)، هدفشان بررسی تأثیر شاخص‌های ترافیکی در طول یک‌چرخه چراغ‌راهنمایی بود. این تحقیق با استفاده از داده‌های مربوط به موقعیت و خط سیر خودروها، قصد داشت تا به‌منظور ارتقای ایمنی تقاطع‌ها از این اطلاعات بهره‌برداری کند. در این تحقیق، از شاخص‌های زمان تا برخورد (TTC)، زمان تا برخورد (MTTC)، و حداکثر شتاب کاهشی برای جلوگیری از تصادف (DRAC) استفاده شد. شاخص TTC در زمان‌های مختلف از ۱ تا ۳ ثانیه و با فاصله‌های ۰/۵ ثانیه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی تداخلات در ابتدای زمان سبز اتفاق می‌افتد که به دلیل تغییرات سرعت در هنگام آزادسازی

رواج یافته است. تداخل ترافیکی وضعیتی است که در آن کاربران جاده‌ای آن‌قدر به هم نزدیک می‌شوند که در صورت ادامه مسیر فعلی، احتمال تصادف وجود دارد، همچنین پژوهش‌هایی با بهره‌گیری و تحلیل ویدئویی، استخراج خودکار تداخلات ترافیکی از تصاویر تقاطع‌ها را امکان‌پذیر کرده‌اند که این روش نسبت به برداشت دستی، کارآمدتر و دقیق‌تر است. برخی مطالعات نیز سعی کرده‌اند تابع عملکرد ایمنی (SPF) را برای تقاطع‌های چراغ‌دار، بر اساس تداخلات میدانی مشاهده‌شده توسعه دهند. در این مدل‌ها، شاخص مواجهه معمولاً حجم ترافیک ساعتی و خروجی مدل تعداد تداخلات در هر ساعت است (Autey et al., 2012; Saunier & Sayed, 2008).

تعداد محدودی از مطالعات پیشین به‌طور خاص به تحلیل ایمنی در تقاطع‌های چراغ‌دار و شریان‌های شهری پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، Theofilatos و همکاران با بهره‌گیری از داده‌های ترافیکی و به صورت لحظه‌ای، به بررسی احتمال وقوع و شدت تصادفات در دو شریان شهری در شهر آتن، یونان پرداخته است. با این حال، در این مطالعه داده‌های ترافیکی در بازه‌های زمانی یک‌ساعته تجمیع شده‌اند که این موضوع ممکن است مانع از شناسایی نوسانات ترافیکی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت‌تر، مانند چرخه‌های سیگنال چراغ راهنمایی، شود (Theofilatos, 2017). Saunier و همکارانش با جمع‌آوری داده‌های مسیر حرکتی وسایل نقلیه در یک تقاطع شهری، به ارزیابی احتمال وقوع تصادف پرداختند. آن‌ها از تعارضات ترافیکی تعریف‌شده بر اساس شاخص زمان تا برخورد (TTC) به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل بهره گرفتند (Saunier & Sayed, 2008). St-Aubin و همکاران با ارائه چارچوبی نوین برای ردیابی خودکار وسایل نقلیه از داده‌های ویدئویی ترافیکی در مقیاس بزرگ، نشان دادند که داده‌های دقیق مسیر حرکتی وسایل نقلیه قابلیت بالایی در تحلیل‌های ایمنی مبتنی بر شاخص زمان تا برخورد (TTC) دارند و می‌توان از آن‌ها در مطالعات پیشگیرانه ایمنی ترافیک به‌خوبی بهره گرفت (St-Aubin et al., 2015). همچنین، شی و همکاران با تحلیل داده‌های ویدیویی ترافیکی، اعتبار و روایی روش ارزیابی ایمنی مبتنی بر شاخص زمان تا برخورد (TTC) را تأیید کردند. آن‌ها با نشان دادن وجود همبستگی مثبت و معنادار میان تعارضات شناسایی‌شده بر پایه TTC و داده‌های واقعی ثبت‌شده از تصادفات، اثبات کردند که

### ۳- روش تحقیق

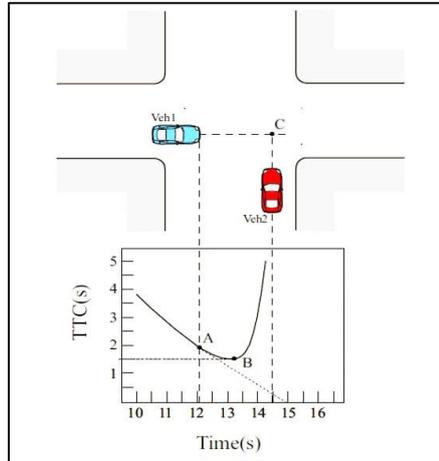
در این مطالعه، تحلیل ایمنی تقاطع‌های چراغ‌دار چهارراهی بر پایه استخراج شاخص‌های تعارض ترافیکی از داده‌های ویدئویی انجام شده است. داده‌های خام از طریق ثبت تصویری از تقاطع‌ها در ساعات اوج ترافیک به دست آمد و با بهره‌گیری از ابزارهای پردازش تصویری و تحلیل رفتاری وسایل نقلیه، مدل ایمنی مورد نظر محاسبه شده است. تمرکز این تحقیق بر بررسی ارتباط شاخص زمان تا برخورد با متغیرهای ترافیکی و هندسی می‌باشد.

#### ۳-۱ شاخص زمان تا برخورد

زمان تا برخورد شاخصی است برای اندازه‌گیری مدت زمان باقی مانده تا وقوع برخورد میان دو وسیله نقلیه، در صورتی که هر دو با سرعت و مسیر فعلی خود ادامه دهند. این شاخص معمولاً برای پیش‌بینی و تحلیل تعارضات ترافیکی و ارزیابی ایمنی استفاده می‌شود. برای محاسبه شاخص زمان تا برخورد، ابتدا باید راستای برخورد بین وسایل نقلیه مشخص شود. شاخص زمان تا برخورد زمانی کاهش می‌یابد که مسیر حرکت ثابت باشد و احتمال تصادف افزایش یابد. در تحلیل‌های ایمنی مبتنی بر شاخص زمان تا برخورد، تعیین یک آستانه زمانی مشخص برای تفکیک تعارضات بحرانی و غیربحرانی ضروری است. این آستانه که به عوامل مختلفی مانند کاهش سرعت، مانورهای فرار و اصطکاک سطح جاده بستگی دارد، به تحلیلگران کمک می‌کند تا خطرات را بهتر شناسایی کرده و برای ارتقای ایمنی جاده‌ها اقدام کنند. در شکل ۱ نحوه شکل‌گیری نمودار شاخص زمان تا برخورد برای دو وسیله نقلیه در یک تقاطع به صورت گویا نمایش داده شده است. این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که چگونه تغییرات در سرعت و جهت حرکت وسایل نقلیه می‌تواند بر مقدار شاخص زمان تا برخورد اثرگذار باشد و در نتیجه احتمال وقوع تصادف را افزایش یا کاهش دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، بلافاصله پس از رسیدن به حداقل مقدار TTC، (که ۱/۵ ثانیه می‌باشد) این شاخص به سرعت افزایش می‌یابد که بیانگر فاصله‌گیری وسایل نقلیه و کاهش ریسک برخورد است. تحلیل چنین الگوهایی امکان شناسایی موقعیت‌های بحرانی را فراهم می‌سازد و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در تدوین راهکارهای ارتقای ایمنی ترافیکی مورد استفاده قرار گیرد.

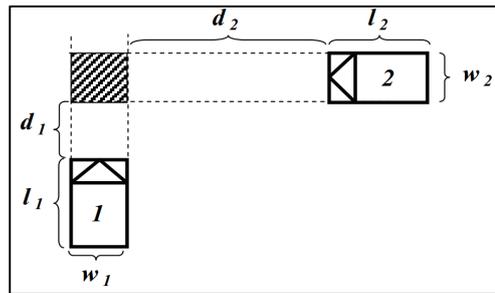
صف یا شروع حرکت وسایل نقلیه است. همچنین، بالاترین شدت تداخل در ابتدای زمان فرمز مشاهده می‌شود که به دلیل تصمیم‌گیری در زمان تغییر چراغ از سبز به زرد می‌باشد (Essa & Sayed, 2019). در یک مطالعه موردی انجام‌شده توسط Tageldin و همکاران در کشور چین، برای تحلیل تداخلات ترافیکی از آستانه زمانی ۳/۰ ثانیه استفاده شد. در این پژوهش، تداخلاتی که دارای مقدار TTC بیش از سه ثانیه بودند، به دلیل نداشتن اهمیت ایمنی قابل توجه، از فرایند ارزیابی حذف شدند. همچنین، بر اساس نتایج این مطالعه، مقدار TTC برابر یا کمتر از ۱/۵ ثانیه به عنوان معیار مناسبی برای شناسایی تداخلات بحرانی در تقاطع‌های شهری پیشنهاد شده است (Tageldin et al., 2015). با پیشرفت‌های چشمگیر در توان محاسباتی و توسعه هوش مصنوعی، استخراج داده‌های حجیم مسیر حرکتی وسایل نقلیه از تصاویر ویدئویی ترافیکی به شکلی سریع، دقیق و مؤثر امکان‌پذیر شده است (Xie et al., 2019) از آنجا که داده‌های ویدئویی قادر به ثبت دقیق حرکات لحظه‌ای تمامی وسایل نقلیه حاضر در صحنه هستند، تحلیل کمی و دقیق تعارضات ترافیکی بر پایه این داده‌ها می‌تواند تصویری جامع و واقع‌گرایانه از سطوح ریسک و شرایط ناایمن در محیط‌های ترافیکی ارائه دهد (Yang et al., 2021).

اگرچه مطالعاتی در زمینه ارزیابی ایمنی، پیش‌بینی وقوع تصادفات یا تداخلات، و توسعه مدل‌های عملکرد ایمنی (SPFs) برای تقاطع‌های چراغ‌دار صورت گرفته است، اما همچنان نیاز به توسعه مدل‌هایی وجود دارد که امکان تحلیل ایمنی در زمان واقعی را فراهم آورند. بر اساس مطالعات قبلی، تعاریف مختلفی برای شاخص ایمنی زمان تا برخورد وجود دارد. در اکثر پژوهش‌های پیشین اشاره شده است که می‌توان مقدار TTC را از ۱/۵ تا ۳/۰ ثانیه به صورت بازه‌های ۰/۵ ثانیه‌ای بررسی کرد، در این پژوهش نیز مقدار TTC از ۱/۵ ثانیه تا ۳ ثانیه به صورت بازه‌های ۰/۵ ثانیه‌ای یعنی ۴ مقدار مختلف ( $TTC < 1.5s$ ,  $TTC < 2s$ ,  $TTC < 2.5s$ ,  $TTC < 3s$ ) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است تا بتوان به مدلی مناسب برای ایمنی تقاطعات چهارراهی چراغ‌دار دست یافت.



شکل ۱. نمودار شاخص زمان تا برخورد دو وسیله نقلیه (Cunto, 2008)

با توجه به شکل ۲ و برای حالتی که احتمال برخورد دو تا خودرو به صورت عمود برهم باشد (حالت تداخل ۹۰ درجه باشد)، مقدار شاخص زمان تا برخورد از رابطه ۱ به دست خواهد آمد.



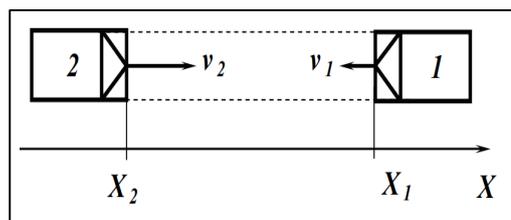
شکل ۲. محاسبه TTC برای تداخلات عمود برهم (Laureshyn, 2010)

$$TTC = \frac{d_2}{v_2}, \text{ if } \frac{d_1}{v_1} < \frac{d_2}{v_2} < \frac{d_1 + l_1 + w_1}{v_1} \quad (1)$$

$$TTC = \frac{d_1}{v_1}, \text{ if } \frac{d_2}{v_2} < \frac{d_1}{v_1} < \frac{d_2 + l_2 + w_2}{v_2} \quad (2)$$

که در این روابط  $d_1$ : فاصله خودرو اول تا ناحیه برخورد،  $d_2$ : فاصله خودرو دوم تا ناحیه برخورد،  $w_1$ : عرض خودرو اول،  $w_2$ : عرض خودرو دوم،  $l_1$ : طول خودرو اول و  $l_2$ : طول خودرو دوم می‌باشند. از روابط ۱ و ۲ و با توجه به شکل ۲ می‌توان مقدار حداقل TTC را بین دو خودرو پیدا کرد و کمترین آن را به عنوان  $TTC_{min}$  در نظر می‌گیریم.

با توجه به شکل ۳ و رابطه ۳ می‌توان مقدار  $TTC_{min}$  را برای حالتی که دو خودرو در یک راستا هستند و امکان تصادف جلو به عقب وجود دارد، محاسبه کرد. لازم به ذکر است این تصادفات یا این شرایط بیش‌تر برای تقاطعات چراغ‌دار ملاک است.



شکل ۳. محاسبه TTC برای تداخلات موازی (پشت سرهم یا جلو به عقب). (Laureshyn, 2010)

$$TTC = \frac{X_1 - X_2 - L_1}{v_1 - v_2}, \quad \text{if } v_2 > v_1 \quad (3)$$

با توجه به اینکه احتمال برخورد های شاخه شاخ در تقاطعات چراغدار بسیار نادر است پس از شرح روابط این حالت در این پژوهش صرف نظر شده است.

جدول ۱. مشخصات تقاطع های مطالعه شده

شکل تقاطع	زمان برداشت فیلم	تقاطع
	ظهر: ۱۱:۴۵-۱۲:۴۵  غروب: ۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	بلوار کردستان _ خیابان گلستان
	ظهر: ۱۱:۴۵-۱۲:۴۵  غروب: ۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	بلوار دانشگاه _ بلوار دانشجو
	ظهر: ۱۱:۴۵-۱۲:۴۵  غروب: ۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	خیابان سلمان فارسی _ عمار یاسر

### ۳-۲- محدوده پژوهش

مطالعه حاضر به بررسی رفتار ترافیکی و تحلیل ایمنی در هفت تقاطع چهارراهی چراغ‌دار منتخب در محدوده شهری شهرستان سقز می‌پردازد. این تقاطع‌ها با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر حجم تردد بالا، قرارگیری در مناطق پرتردد شهری، وجود حداقل یک معبر اصلی و برخورداری از چراغ‌راهنمایی دوفاز انتخاب شده‌اند. داده‌های مورد نیاز پژوهش از طریق فیلم‌برداری هوایی با استفاده از پهپاد (هلی‌شات) مدل مویک ایر ۲ اس و از زاویه عمودی نسبت به سطح زمین برداشت شده‌اند. فرایند تصویربرداری در فصل تابستان سال ۱۴۰۲ و در بازه زمانی مشخصی شامل دو نوبت ظهر (ساعت ۱۲ الی ۱۳) و غروب (ساعت ۱۸ الی ۱۹) انجام شده است. این بازه‌ها بر اساس تحلیل تاریخیچه ترافیکی و همچنین بررسی میدانی شرایط واقعی ترافیک در سطح شهر تعیین شده‌اند. برای حفظ همگنی داده‌ها و معنادار بودن آن‌ها و کاهش اثر عوامل مزاحم، ثبت فیلم‌ها تنها در روزهای غیرتعطیل رسمی و به‌جز روزهای پنجشنبه صورت گرفته و در تمامی تقاطع‌ها، شرایط جوی پایدار، بدون بارندگی یا وزش باد شدید، حاکم بوده است. سطوح روسازی در تقاطع‌های مورد نظر خشک، هموار و در وضعیت استاندارد قرار داشته‌اند که امکان ثبت دقیق مسیر حرکتی وسایل نقلیه و تحلیل شاخص‌های ایمنی را فراهم نموده است. موقعیت مکانی

دقیق هر یک از تقاطع‌های مورد بررسی، به همراه زمان‌های دقیق فیلم‌برداری آن‌ها، در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ و جدول ۲ و تصاویر تقاطعات که ارائه شده به‌خوبی قابل مشاهده است که در زمان ثبت و ضبط ویدئوهای میدانی، تلاش شده است تا با استفاده از هلی‌شات و انتخاب ارتفاعی مناسب، پوشش کاملی از ناحیه فیزیکی تقاطع‌ها حاصل شود. این اقدام با هدف اطمینان از آن صورت گرفته است که تمام اجزای اصلی تقاطع، از جمله مسیرهای ورودی و خروجی، عرض هر شاخه، خطوط راهنما، موقعیت علائم و هندسه کلی تقاطع، به‌صورت واضح و بدون نقص در قاب تصویر ثبت گردد. این دقت در تصویربرداری، زمینه‌ای را فراهم آورده است تا در مراحل بعدی پردازش و تحلیل داده‌های ویدئویی، جزئیات لازم با دقت بالا استخراج شده و صحت تحلیل‌های ترافیکی و ایمنی افزایش یابد.

### ۳-۳- جمع‌آوری داده‌های ویدئویی و پردازش تصویر

در این تحقیق به‌منظور گردآوری داده‌های میدانی، از فناوری برداشت تصاویر هوایی بهره گرفته شد. فرآیند تصویربرداری با استفاده از پهپاد پیشرفته مدل مویک ایر ۲ اس صورت پذیرفت که امکان ثبت دقیق و با کیفیت حرکات ترافیکی در محدوده تقاطع‌ها را فراهم ساخت تصویر این پهپاد در شکل ۴ نشان داده شده است.



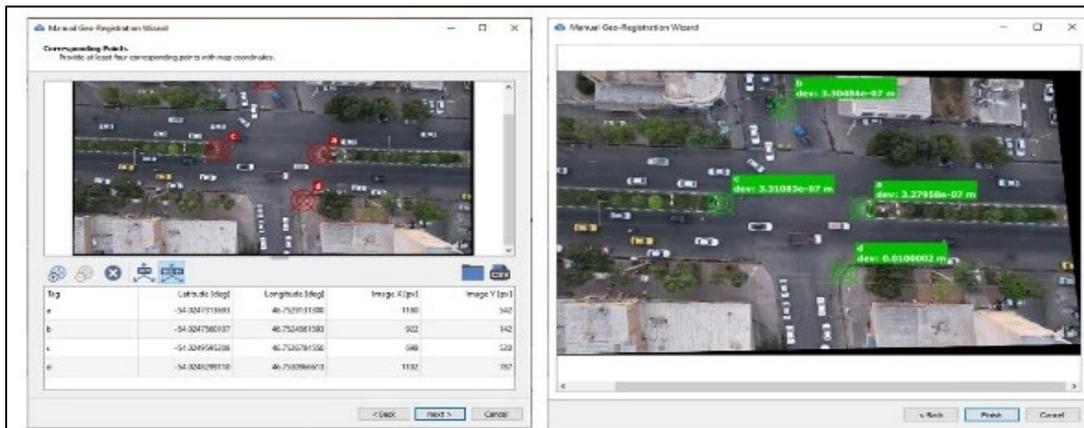
شکل ۴. هلی‌شات مورد استفاده برای برداشت ویدئو

جدول ۲. مشخصات تقاطع‌های مطالعه شده (ادامه جدول ۱)

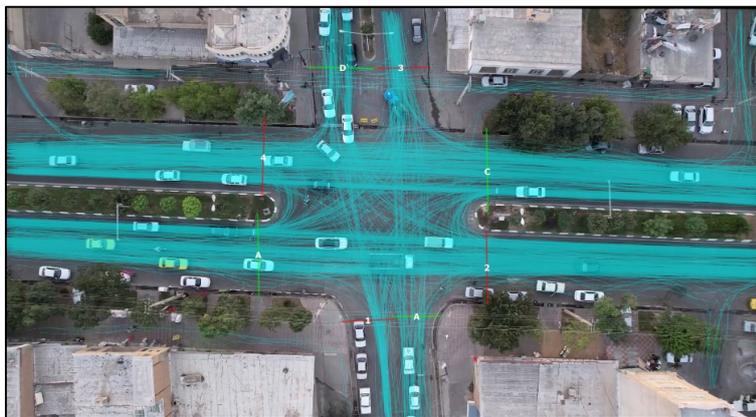
شکل تقاطع	زمان برداشت فیلم	تقاطع
	<p>ظهر: ۱۱:۴۵-۱۲:۴۵</p> <p>غروب: ۱۸:۳۰-۱۹:۳۰</p>	<p>بلوار دانشگاه_ خیابان محمد قاضی</p>
	<p>ظهر: ۱۱:۳۰-۱۲:۳۰</p> <p>غروب: ۱۸:۳۰-۱۹:۳۰</p>	<p>بلوار وحدت _ خیابان سنگبران</p>
	<p>ظهر: ۱۱:۳۰-۱۲:۳۰</p> <p>غروب: ۱۸:۳۰-۱۹:۳۰</p>	<p>بلوار شهید بهشتی - خیابان کرفتو</p>
	<p>ظهر: ۱۲:۰۰-۱۳:۰۰</p> <p>غروب: ۱۸:۱۵-۱۹:۱۵</p>	<p>بلوار دانشگاه_ خیابان شیخ مظهر</p>

پیوسته و با جزئیات بالا را نیز فراهم می‌سازد (Ali et al., 2024). در این مطالعه، نرم‌افزار DFS با استفاده از پردازش دقیق تصاویر و تغییرات پیکسلی، به شناسایی و ردیابی حرکات وسایل نقلیه می‌پردازد. پس از آن، فرآیند کالیبراسیون برای تبدیل مختصات تصویری به مختصات جغرافیایی (UTM) انجام می‌شود تا موقعیت واقعی وسایل نقلیه در محیط شهری مشخص گردد. برای این منظور، دست‌کم چهار نقطه مرجع با مختصات دقیق در محدوده تقاطع ثبت می‌گردد. با توجه به فرارگیری شهرستان سقز در زون ۳۸ نیمکره شمالی سیستم UTM، مختصات انتخاب‌شده باید با این سامانه سازگار باشد. پس از اتمام کالیبراسیون مانند شکل ۵، محاسبه پارامترهایی نظیر سرعت، مسیر حرکت و فواصل بین وسایل نقلیه صورت می‌گیرد و داده‌ها به فرمت قابل تحلیل در چارچوب واحدهای سیستم بین‌المللی تبدیل می‌شوند. در نهایت، اطلاعات استخراج‌شده شامل متغیرهای هندسی، ترافیکی و شاخص‌های ایمنی به عنوان ورودی مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری استفاده می‌شوند. متغیرهای ترافیکی به‌عنوان یکی از داده‌های اصلی از طریق تحلیل ویدئوهای ضبط‌شده با نرم‌افزار DFS استخراج شده‌اند. این متغیرها شامل حجم ترافیک در هر شاخه، سرعت متوسط وسایل نقلیه، شتاب، و مجموع مسافت پیموده‌شده در محدوده مورد بررسی هستند. برای برآورد دقیق حجم ترافیک در هر مسیر تقاطع، ابتدا باید نقاط ورودی و خروجی جریان ترافیک، تحت عنوان گیت، مشخص شوند. در این فرآیند، برای هر جهت حرکتی یک گیت ورود و یک گیت خروج اختصاص می‌یابد. گیت‌های ورودی با حروف الفبایی (A,B,C,D) و گیت‌های خروجی با اعداد (۱ تا ۴) نام‌گذاری می‌شوند. این پیکربندی که در شکل ۶ نشان داده شده است به تحلیلگر این امکان را می‌دهد تا با استفاده از گزینه‌ی **Show Origin-Destination Statistics** در بخش تحلیل، جریان‌های حرکتی وسایل نقلیه را ردیابی کرده و ماتریس مبدأ-مقصد را تولید کند. همچنین این ابزار قابلیت تمایز و شمارش مستقل عابران پیاده و انواع وسایل نقلیه را دارا می‌باشد. برای استخراج متغیرهایی مانند میانگین سرعت، سرعت‌های ورود و خروج، و مجموع مسافت پیموده‌شده توسط وسایل نقلیه، از قابلیت **Export Traffic Analysis** در نرم‌افزار استفاده می‌شود. همچنین، برای شناسایی شاخص زمان تا برخورد، نرم‌افزار به‌طور خودکار مقادیر مربوطه را شناسایی و ثبت می‌کند که نمونه‌ای از آن در شکل ۷ برای  $TTC=1.43$  ثانیه ارائه شده است.

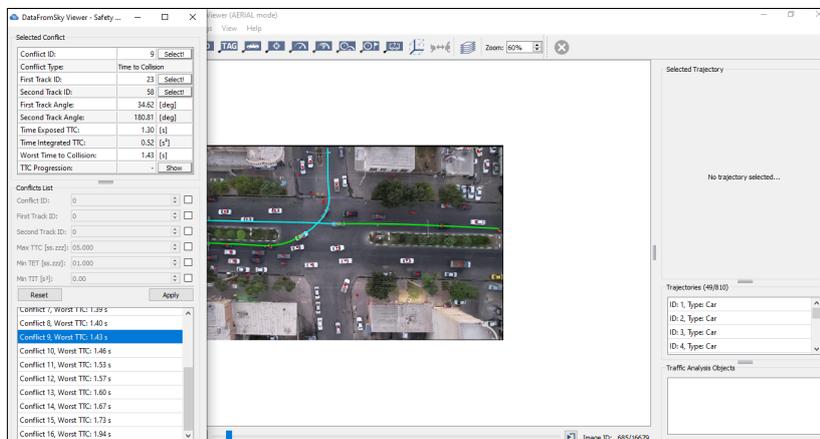
به‌منظور گردآوری داده‌های تجربی مورد نیاز جهت تحلیل رفتار ترافیکی و ارزیابی شاخص‌های ایمنی در تقاطع‌های شهری، از فناوری برداشت تصویری هوایی با استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین بهره گرفته شد. پهپاد مورد استفاده در این پژوهش به دوربینی با وضوح بالا (۴ کیلوگرم) و قابلیت ثبت تصاویر در نرخ فریم مناسب مجهز بود که امکان تصویربرداری پیوسته از جریان ترافیک در شرایط واقعی و در بازه‌های زمانی هدفمند را فراهم آورد. انتخاب ساعات برداشت، باهدف ثبت وضعیت‌های پرتردد و متداول ترافیکی صورت گرفت تا الگوهای رفتاری وسایل نقلیه در شرایطی با بیشترین قابلیت تعمیم بررسی شوند. پس از انجام پروازها، داده‌های ویدئویی خام به‌وسیله نرم‌افزار ویرایش تصویر کم‌تازیا ۲۰۲۳ مورد بازبینی، تدوین و قطعه‌بندی قرار گرفت تا کیفیت و یکپارچگی آن‌ها برای پردازش‌های بعدی تضمین گردد. در ادامه، برای تحلیل کمی و استخراج متغیرهای ترافیکی از داده‌های تصویری، از نرم‌افزار تخصصی **Data From Sky** بهره گرفته شد. این نرم‌افزار که بر مبنای الگوریتم‌های پیشرفته بینایی ماشین و یادگیری عمیق طراحی شده است، قابلیت شناسایی و رهگیری خودکار حرکت وسایل نقلیه در بستر زمانی و مکانی را دارا بوده و توانایی استخراج متغیرهایی نظیر موقعیت آنی، سرعت لحظه‌ای، زاویه حرکت، مسیر طی شده و فاصله بین وسایل نقلیه را با دقت بالا دارد. پیش از آغاز فرآیند تحلیل، کالیبراسیون دقیق محیط فیزیکی تقاطع‌ها در نرم‌افزار انجام شد. بدین منظور، حداقل چهار نقطه مرجع دارای مختصات دقیق جغرافیایی در سیستم مختصات **UTM** برای هر تقاطع تعریف گردید تا امکان تبدیل داده‌های تصویری به مختصات فضایی واقعی فراهم شود. برای اعتبارسنجی داده‌های استخراج‌شده و اطمینان از صحت عملکرد نرم‌افزار DFS، مجموعه‌ای از روش‌های ارزیابی دقت به کار گرفته شد. از جمله این روش‌ها می‌توان به تطبیق حجم ترافیک طبقه‌بندی‌شده، مقایسه سرعت وسایل نقلیه با مشاهدات میدانی، و تحلیل تطابق مسیرهای حرکتی وسایل نقلیه آزمایشی با داده‌های GPS اشاره کرد. به‌منظور سنجش میزان خطای عددی، شاخص درصد میانگین خطای مطلق محاسبه گردید. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که داده‌های استخراج‌شده از طریق فناوری برداشت هوایی، دارای دقت بسیار بالا بوده (بیشتر از ۹۸ درصد) و قابلیت اطمینان مناسبی برای تحلیل‌های ایمنی محور دارند. این روش، در مقایسه با شیوه‌های سنتی برداشت میدانی، ضمن کاهش خطای انسانی، امکان دستیابی به داده‌های



شکل ۵. قبل و بعد کالیبره کردن نرم‌افزار



شکل ۶. گیت‌های ورود و خروجی شاخه‌های تقاطع



شکل ۷. یک نمونه TTC تشخیص داده شده توسط DFS

### ۳-۴-مدل‌سازی

رگرسیون چندمتغیره بهره‌برداری شده است. این روش با فراهم‌سازی امکان تحلیل هم‌زمان متغیرهای متعدد، ابزاری دقیق برای تبیین سازوکارهای تأثیرگذار در رفتار ترافیکی در تقاطع‌های چراغ‌دار شهری فراهم می‌آورد، یک مدل رگرسیون چندگانه را می‌توان به صورت رابطه ۴ نمایش داد.

$$Y = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \varepsilon$$

در مطالعات مرتبط با ایمنی ترافیک، یکی از رویکردهای تحلیلی مؤثر، استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته برای شناسایی و سنجش میزان اثرگذاری متغیرهای مختلف بر شاخص‌های ایمنی است. در این پژوهش، جهت بررسی روابط میان پارامترهای ترافیکی و هندسی با میزان تداخلات بحرانی، از الگوی آماری (۴)



آماري نظير ناهمسانی واریانس و چولگی توزیع داده‌ها، از تبدیل ریشه دوم (جذر) برای متغیر وابسته استفاده شده است. این رویکرد به بهبود ویژگی‌های آماری مدل و افزایش دقت تحلیل کمک می‌کند و در آن  $Y$  به صورت رابطه ۵ توضیح داده می‌شود. در این مدل، ضریب  $\beta^2$  بیانگر تأثیر متغیر مستقل  $X_i$  بر جذر متغیر وابسته  $\sqrt{Y}$  است و امکان تفسیر تأثیر هر واحد تغییر در  $X_i$  بر مقدار اصلی  $Y$  را فراهم می‌سازد (Neter et al., 1996).

$$\Delta Y = 2\beta\sqrt{Y} + \beta^2$$

در معادله (۴)، مقدار  $Y$  نمایانگر متغیر وابسته‌ای است که هدف مدل‌سازی می‌باشد، در حالی که  $X_0$  تا  $X_n$  به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند که بر  $Y$  تأثیر می‌گذارند. ضرایب  $\beta_0$  تا  $\beta_n$  میزان اثر هر متغیر مستقل را بر متغیر وابسته تعیین می‌کنند. مؤلفه  $\varepsilon$  نیز بیانگر خطای تصادفی مدل است که معمولاً دارای توزیع نرمال فرض می‌شود و بخش‌هایی از تغییرات  $Y$  را شامل می‌شود که توسط متغیرهای مستقل قابل پیش‌بینی نیستند (Wooldridge, 2016). در این پژوهش، با توجه به ماهیت شمارشی متغیر وابسته (یعنی تعداد دفعات وقوع TTC بحرانی) و هدف تحلیل تأثیر متغیرهای مختلف بر این مقدار، به منظور بهبود برازش مدل رگرسیون خطی و کاهش مشکلات

(۵)

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش از پژوهش به نتایج تحقیق و بحث در مورد نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است. ابتدا لازم است متغیرهای وابسته و متغیرهای تأثیرگذار بر آن‌ها (متغیرهای مستقل) توضیح داده شوند که متغیرهای وابسته در جدول ۲ و متغیر مستقل در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲. متغیرهای وابسته مدل

نام مخفف متغیر	نام لاتین متغیر	واحد متغیر	نام فارسی متغیر
<b>SqrtFTTC &lt; (1.5s)</b>	SqrtFrequency Time-To-collision	تعداد	جذر تعداد تداخلات زمان تا برخورد زیر ۱/۵ ثانیه
<b>SqrtFTTC &lt; (2.0s)</b>	SqrtFrequency Time-To-collision	تعداد	جذر تعداد تداخلات زمان تا برخورد زیر ۲ ثانیه
<b>SqrtFTTC &lt; (2.5s)</b>	SqrtFrequency Time-To-collision	تعداد	جذر تعداد تداخلات زمان تا برخورد زیر ۲/۵ ثانیه
<b>SqrtFTTC &lt; (3.0s)</b>	SqrtFrequency Time-To-collision	تعداد	جذر تعداد تداخلات زمان تا برخورد زیر ۳ ثانیه

جدول ۳. متغیرهای مستقل مدل

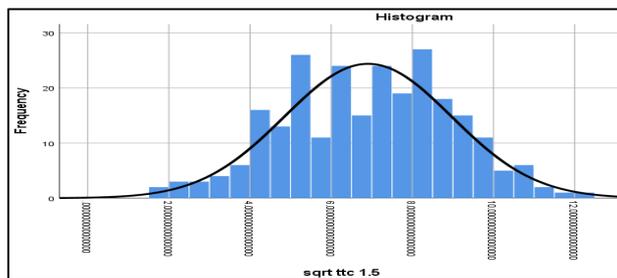
نام مخفف متغیر	نام لاتین متغیر	واحد متغیر	نام فارسی متغیر
TrV	Traffic Volume	سواری در زمان	حجم ترافیک
AS	Average Speed	کیلومتر بر ساعت	سرعت متوسط
ASEn	Average Speed Entry	کیلومتر بر ساعت	سرعت متوسط ورودی
ASEx	Average Speed Exit	کیلومتر بر ساعت	سرعت متوسط خروجی
TDT	Total Distance Traveled	متر	مسافت کل پیموده شده کاربران
PhA	Physical Area	مترمربع	مساحت ناحیه فیزیکی تقاطع
AWEn	Average Width Entry	متر	میانگین عرض ورودی
AWEx	Average Width Exit	متر	میانگین عرض خروجی
U-T	U-Turn	-	دوربرگردان
Bump	Bump	-	سرعت‌کاه
Is	Island	-	جزیره
M	Median	-	میانه

در صورتی که مقدار **Significance** (سطح معناداری) بیش از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر رد نمی‌شود و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که متغیر وابسته توزیع نرمال دارد با توجه به جدول ۴ و شکل ۸ برای متغیر وابسته مدل ( $\sqrt{FTTC1.5}$ )، نتایج آزمون‌های کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو ویلک که از **spss** گرفته شده‌اند نشان می‌دهد متغیر نرمال است و فرض  $H_0$  رد نمی‌شود.

برای انجام مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، ابتدا باید نرمال بودن متغیر وابسته، بررسی شود. از آنجا که نوع داده‌ها شمارشی است، جهت نرمال‌سازی، تبدیل آن‌ها با استفاده از دستور **Sqrt** (ریشه دوم) انجام شده است. به منظور ارزیابی نرمال بودن، از آزمون‌های کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو ویلک و یا بررسی شاخص‌های کشیدگی و چولگی استفاده می‌شود. فرض صفر ( $H_0$ ) در این آزمون‌ها بر نرمال بودن توزیع متغیر وابسته است.

جدول ۴. نتیجه آزمون نرمال بودن برای متغیر وابسته

Kolmogorov-Smirnov-test	Shapiro-Wilk
Sig.	Sig.
۰/۳۰۶	۰/۵۱۱



شکل ۸. نمودار نرمال بودن متغیر وابسته در spss

باید همبستگی متغیرهای معنی دار شده را بررسی کرد که با توجه به مقادیرهای به دست آمده در جدول ۵ متغیرهای وجود یا عدم وجود جزیره (Is)، مسافت کل پیموده شده کاربران (TDT)، مساحت ناحیه فیزیکی تقاطع (PhA)، وجود یا عدم وجود دوربرگردان (U-T) و میانگین عرض خروجی (AWEx) از مدل به دلیل اینکه همبستگی با سایر متغیرهای مستقل دارند باید حذف شوند. این متغیرها در صورتی که در مدل باقی بمانند موجب می شود که ضرایب سایر متغیرها به درستی حاصل نشوند و یا معنی داری خود را از دست بدهند.

بعد از نرمال بودن متغیر وابسته باید معنی دار بودن تمامی متغیرهای مستقل به صورت تکی با متغیر وابسته بررسی شود. برای این امر باید برای هر متغیر، مدل رگرسیون خطی یک متغیره ساخت و با توجه به میزان Significance به دست آمده، معنی دار بودن مدل را تشخیص داد. با توجه به اینکه اگر مقدار Significance کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض  $H_0$  را مبنی بر معنی دار نبودن متغیر رد می کند و در این مرحله متغیر میانگین سرعت خروجی (ASEx) معنی دار نشده است و از مدل حذف شده است. پس از انجام عملیات نرمال بودن متغیر وابسته و همچنین مشخص کردن متغیرهای معنی دار شده در مرحله بعد

جدول ۵. نتایج همبستگی متغیرهای مدل باهم

Is	M	U-T	SH	AW Ex	AW En	PhA	TDT	ASEn	AS	TrV	SqrtF TTC1 .5	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	SqrtFTTC1.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۰/۶۷	TrV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	-۱/۴	-۲/۵	AS
-	-	-	-	-	-	-	-	۱	/۷۲	-۳/۲	-۳/۹	ASEn
-	-	-	-	-	-	-	۱	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۵۰	۰/۵۴	TDT
-	-	-	-	-	-	۱	۰/۳۳	-۳/۹	-۲/۰	۰/۸۱	۰/۵۸	PhA
-	-	-	-	-	۱	۰/۷۵	۰/۱۹	-۱/۷	-۲/۰	۰/۶۸	۰/۳۵	AWEn
-	-	-	-	۱	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۲۲	-۲/۰	-۱/۸	۰/۷۱	۰/۳۹	AWEx
-	-	-	۱	۰/۳۵	۰/۳۹	-۱/۱	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۳۰	-۱/۲	-۱/۲	BUMP
-	-	۱	-۱/۰۹	-۱/۸۶	-۱/۸۹	-۱/۷۱	-۱/۰۲	۰/۳۱	۰/۴۰	-۱/۶۸	-۳/۴	U-T
-	۱	-۱/۵۵	-۱/۴۲	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۷۶	۰/۴۲	-۳/۷	-۱/۲	۰/۸۷	۰/۶۱	Median
۱	-۱/۴۲	۰/۵۵	۰/۴۲	-۱/۵۴	-۱/۵۰	-۱/۶۳	۰/۳۰	۰/۶۸	۰/۴۹	-۱/۴۲	-۱/۷	Is

باشد که در مدل در نظر گرفته نشده‌اند یا خطای تصادفی باشند، نزدیک بودن مقدار  $R^2$  و  $Adjusted R^2$  بدین معنی است که اندازه نمونه نسبت به تعداد متغیرهای موجود در مدل مناسب است و نسبت خوبی دارد و در قسمت  $VIF$  اعدادی که به دست آمده بیانگر این است که رابطه خطی کامل بین متغیرهای مستقل موجود در مدل وجود ندارد و هم خطی ندارند (این اعداد باید کمتر از ۱۰ باشند که مقدارشان درست است).

پس از این مرحله، باید مدل رگرسیون خطی چندمتغیره را با متغیرهای مستقل باقیمانده از مراحل بالا انجام داد تا تأثیر هر کدام بر روی متغیر وابسته به دست آید. در جدول ۶ مدل‌های که ساخته شده نشان داده شده است، که به ترتیب به شرح هر کدام پرداخته می‌شود.  $R^2$  به دست آمده برابر است با ۰/۶۱۱ که این عدد نشان دهنده این است که مدل پیشنهادی توانسته است ۶۱ درصد از تغییرات موجود در متغیر وابسته را توضیح دهد با این حال، ۳۹ درصد از تغییرات در متغیر وابسته هنوز توسط مدل توضیح داده نشده و ممکن است ناشی از عواملی

جدول ۶. نتایج تخمین ضرایب متغیرهای مدل‌های SqrtFTTC در spss

R-Square	Adj R-Square	متغیرها						ثابت مدل	مدل
		M	B	AWEn	ASEn	AS	TrV		
		۲/۱۸	۳/۰۵	-۱/۰۴	-۰/۱۶	-۰/۱۲	۰/۰۴۶	۱۱/۸۶	ضریب ( $\beta$ )
۰/۶۱۱	۰/۶۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	معنی‌داری (sig.)
		۸/۳۳۳	۵/۱۷۰	۴/۷۷۲	۳/۲۶۹	۲/۵۲۶	۷/۱۹۳		VIF
		۳/۳۷	۴/۲۵	-۱/۳۹	-۰/۱۷	-۰/۱۷	۰/۰۵۶	۱۴/۴۷	ضریب ( $\beta$ )
۰/۷۰۳	۰/۶۹۶	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	معنی‌داری (sig.)
		۸/۳۳۳	۵/۱۷۰	۴/۷۷۲	۳/۲۶۹	۲/۵۲۶	۷/۱۹۳		VIF
		۴/۱۲	۵/۰۰	-۱/۶۴	-۰/۱۶	-۰/۲۲	۰/۰۶۹	۱۶/۴۵	ضریب ( $\beta$ )
۰/۷۱۵	۰/۷۰۸	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	معنی‌داری (sig.)
		۸/۳۳۳	۵/۱۷۰	۴/۷۷۲	۳/۲۶۹	۲/۵۲۶	۷/۱۹۳		VIF
		۵/۱۷	۵/۹۷	-۱/۹۴	-۰/۱۶	-۰/۲۵	۰/۰۷۶	۱۸/۴۵	ضریب ( $\beta$ )
۰/۷۷۰	۰/۷۶۵	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	معنی‌داری (sig.)
		۸/۳۳۳	۵/۱۷۰	۴/۷۷۲	۳/۲۶۹	۲/۵۲۶	۷/۱۹۳		VIF

گرفت افزایش حجم ترافیک تعداد تداخلات بحرانی را افزایش می‌دهد، همچنین ضریب منفی متغیر میانگین سرعت و میانگین سرعت ورودی نشان دهنده این است که اگر میانگین سرعت ناحیه فیزیکی تقاطع افزایش یابد تعداد تداخلات شاخص زمان تا برخورد کم می‌شود و ضریب منفی متغیر میانگین عرض ورودی تقاطع دلالت بر این دارد اگر عرض افزایش یابد تداخلات بحرانی کاهش می‌یابد همچنین وجود سرعت‌کاه و میانه تعداد تداخلات بحرانی شاخص زمان تا برخورد را در همه زمان‌ها افزایش می‌دهند یعنی به عبارتی احتمال برخورد با وجود سرعت‌کاه و میانه در تقاطعات چراغ‌دار افزایش می‌یابد (مقدار درست و دقیق این ضرایب در ادامه آمده است). در مجموع، مدل رگرسیون  $\text{SqrtFTTC} < 3.0$  با Adjusted R-Square معادل  $0.765$  بهترین برازش را ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان مدل نهایی برای پیش‌بینی TTCهای بحرانی مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین با توجه به اینکه مقدار Significance برای همه متغیرها کمتر از  $0.05$  شده است پس تمامی متغیرها معنی‌دار هستند. حال با توجه به رابطه  $5 (\Delta Y = 2\beta\sqrt{Y} + \beta^2)$  و مقادیر میانگین  $(\sqrt{Y})$  که برای ۴ مقدار مختلف TTC به دست آمده است.

$$\sqrt{Y}_{TTC1.5} = 6.9, \quad \sqrt{Y}_{TTC2.0} = 8.48, \quad \sqrt{Y}_{TTC2.5} = 10.00, \quad \sqrt{Y}_{TTC3.0} = 11.35$$

تداخلات بحرانی کم می‌شود و نتیجه عکس دارند، و با افزایش سرعت متوسط تقاطع به میزان ۱ کیلومتر بر ساعت تعداد تداخلات زیر  $1/5$ ،  $2/5$ ،  $3/5$ ،  $4/5$ ،  $5/5$ ،  $6/5$ ،  $7/5$ ،  $8/5$ ،  $9/5$ ،  $10/5$ ،  $11/5$ ،  $12/5$ ،  $13/5$ ،  $14/5$ ،  $15/5$ ،  $16/5$ ،  $17/5$ ،  $18/5$ ،  $19/5$ ،  $20/5$ ،  $21/5$ ،  $22/5$ ،  $23/5$ ،  $24/5$ ،  $25/5$ ،  $26/5$ ،  $27/5$ ،  $28/5$ ،  $29/5$ ،  $30/5$ ،  $31/5$ ،  $32/5$ ،  $33/5$ ،  $34/5$ ،  $35/5$ ،  $36/5$ ،  $37/5$ ،  $38/5$ ،  $39/5$ ،  $40/5$ ،  $41/5$ ،  $42/5$ ،  $43/5$ ،  $44/5$ ،  $45/5$ ،  $46/5$ ،  $47/5$ ،  $48/5$ ،  $49/5$ ،  $50/5$ ،  $51/5$ ،  $52/5$ ،  $53/5$ ،  $54/5$ ،  $55/5$ ،  $56/5$ ،  $57/5$ ،  $58/5$ ،  $59/5$ ،  $60/5$ ،  $61/5$ ،  $62/5$ ،  $63/5$ ،  $64/5$ ،  $65/5$ ،  $66/5$ ،  $67/5$ ،  $68/5$ ،  $69/5$ ،  $70/5$ ،  $71/5$ ،  $72/5$ ،  $73/5$ ،  $74/5$ ،  $75/5$ ،  $76/5$ ،  $77/5$ ،  $78/5$ ،  $79/5$ ،  $80/5$ ،  $81/5$ ،  $82/5$ ،  $83/5$ ،  $84/5$ ،  $85/5$ ،  $86/5$ ،  $87/5$ ،  $88/5$ ،  $89/5$ ،  $90/5$ ،  $91/5$ ،  $92/5$ ،  $93/5$ ،  $94/5$ ،  $95/5$ ،  $96/5$ ،  $97/5$ ،  $98/5$ ،  $99/5$ ،  $100/5$ ،  $101/5$ ،  $102/5$ ،  $103/5$ ،  $104/5$ ،  $105/5$ ،  $106/5$ ،  $107/5$ ،  $108/5$ ،  $109/5$ ،  $110/5$ ،  $111/5$ ،  $112/5$ ،  $113/5$ ،  $114/5$ ،  $115/5$ ،  $116/5$ ،  $117/5$ ،  $118/5$ ،  $119/5$ ،  $120/5$ ،  $121/5$ ،  $122/5$ ،  $123/5$ ،  $124/5$ ،  $125/5$ ،  $126/5$ ،  $127/5$ ،  $128/5$ ،  $129/5$ ،  $130/5$ ،  $131/5$ ،  $132/5$ ،  $133/5$ ،  $134/5$ ،  $135/5$ ،  $136/5$ ،  $137/5$ ،  $138/5$ ،  $139/5$ ،  $140/5$ ،  $141/5$ ،  $142/5$ ،  $143/5$ ،  $144/5$ ،  $145/5$ ،  $146/5$ ،  $147/5$ ،  $148/5$ ،  $149/5$ ،  $150/5$ ،  $151/5$ ،  $152/5$ ،  $153/5$ ،  $154/5$ ،  $155/5$ ،  $156/5$ ،  $157/5$ ،  $158/5$ ،  $159/5$ ،  $160/5$ ،  $161/5$ ،  $162/5$ ،  $163/5$ ،  $164/5$ ،  $165/5$ ،  $166/5$ ،  $167/5$ ،  $168/5$ ،  $169/5$ ،  $170/5$ ،  $171/5$ ،  $172/5$ ،  $173/5$ ،  $174/5$ ،  $175/5$ ،  $176/5$ ،  $177/5$ ،  $178/5$ ،  $179/5$ ،  $180/5$ ،  $181/5$ ،  $182/5$ ،  $183/5$ ،  $184/5$ ،  $185/5$ ،  $186/5$ ،  $187/5$ ،  $188/5$ ،  $189/5$ ،  $190/5$ ،  $191/5$ ،  $192/5$ ،  $193/5$ ،  $194/5$ ،  $195/5$ ،  $196/5$ ،  $197/5$ ،  $198/5$ ،  $199/5$ ،  $200/5$ ،  $201/5$ ،  $202/5$ ،  $203/5$ ،  $204/5$ ،  $205/5$ ،  $206/5$ ،  $207/5$ ،  $208/5$ ،  $209/5$ ،  $210/5$ ،  $211/5$ ،  $212/5$ ،  $213/5$ ،  $214/5$ ،  $215/5$ ،  $216/5$ ،  $217/5$ ،  $218/5$ ،  $219/5$ ،  $220/5$ ،  $221/5$ ،  $222/5$ ،  $223/5$ ،  $224/5$ ،  $225/5$ ،  $226/5$ ،  $227/5$ ،  $228/5$ ،  $229/5$ ،  $230/5$ ،  $231/5$ ،  $232/5$ ،  $233/5$ ،  $234/5$ ،  $235/5$ ،  $236/5$ ،  $237/5$ ،  $238/5$ ،  $239/5$ ،  $240/5$ ،  $241/5$ ،  $242/5$ ،  $243/5$ ،  $244/5$ ،  $245/5$ ،  $246/5$ ،  $247/5$ ،  $248/5$ ،  $249/5$ ،  $250/5$ ،  $251/5$ ،  $252/5$ ،  $253/5$ ،  $254/5$ ،  $255/5$ ،  $256/5$ ،  $257/5$ ،  $258/5$ ،  $259/5$ ،  $260/5$ ،  $261/5$ ،  $262/5$ ،  $263/5$ ،  $264/5$ ،  $265/5$ ،  $266/5$ ،  $267/5$ ،  $268/5$ ،  $269/5$ ،  $270/5$ ،  $271/5$ ،  $272/5$ ،  $273/5$ ،  $274/5$ ،  $275/5$ ،  $276/5$ ،  $277/5$ ،  $278/5$ ،  $279/5$ ،  $280/5$ ،  $281/5$ ،  $282/5$ ،  $283/5$ ،  $284/5$ ،  $285/5$ ،  $286/5$ ،  $287/5$ ،  $288/5$ ،  $289/5$ ،  $290/5$ ،  $291/5$ ،  $292/5$ ،  $293/5$ ،  $294/5$ ،  $295/5$ ،  $296/5$ ،  $297/5$ ،  $298/5$ ،  $299/5$ ،  $300/5$ ،  $301/5$ ،  $302/5$ ،  $303/5$ ،  $304/5$ ،  $305/5$ ،  $306/5$ ،  $307/5$ ،  $308/5$ ،  $309/5$ ،  $310/5$ ،  $311/5$ ،  $312/5$ ،  $313/5$ ،  $314/5$ ،  $315/5$ ،  $316/5$ ،  $317/5$ ،  $318/5$ ،  $319/5$ ،  $320/5$ ،  $321/5$ ،  $322/5$ ،  $323/5$ ،  $324/5$ ،  $325/5$ ،  $326/5$ ،  $327/5$ ،  $328/5$ ،  $329/5$ ،  $330/5$ ،  $331/5$ ،  $332/5$ ،  $333/5$ ،  $334/5$ ،  $335/5$ ،  $336/5$ ،  $337/5$ ،  $338/5$ ،  $339/5$ ،  $340/5$ ،  $341/5$ ،  $342/5$ ،  $343/5$ ،  $344/5$ ،  $345/5$ ،  $346/5$ ،  $347/5$ ،  $348/5$ ،  $349/5$ ،  $350/5$ ،  $351/5$ ،  $352/5$ ،  $353/5$ ،  $354/5$ ،  $355/5$ ،  $356/5$ ،  $357/5$ ،  $358/5$ ،  $359/5$ ،  $360/5$ ،  $361/5$ ،  $362/5$ ،  $363/5$ ،  $364/5$ ،  $365/5$ ،  $366/5$ ،  $367/5$ ،  $368/5$ ،  $369/5$ ،  $370/5$ ،  $371/5$ ،  $372/5$ ،  $373/5$ ،  $374/5$ ،  $375/5$ ،  $376/5$ ،  $377/5$ ،  $378/5$ ،  $379/5$ ،  $380/5$ ،  $381/5$ ،  $382/5$ ،  $383/5$ ،  $384/5$ ،  $385/5$ ،  $386/5$ ،  $387/5$ ،  $388/5$ ،  $389/5$ ،  $390/5$ ،  $391/5$ ،  $392/5$ ،  $393/5$ ،  $394/5$ ،  $395/5$ ،  $396/5$ ،  $397/5$ ،  $398/5$ ،  $399/5$ ،  $400/5$ ،  $401/5$ ،  $402/5$ ،  $403/5$ ،  $404/5$ ،  $405/5$ ،  $406/5$ ،  $407/5$ ،  $408/5$ ،  $409/5$ ،  $410/5$ ،  $411/5$ ،  $412/5$ ،  $413/5$ ،  $414/5$ ،  $415/5$ ،  $416/5$ ،  $417/5$ ،  $418/5$ ،  $419/5$ ،  $420/5$ ،  $421/5$ ،  $422/5$ ،  $423/5$ ،  $424/5$ ،  $425/5$ ،  $426/5$ ،  $427/5$ ،  $428/5$ ،  $429/5$ ،  $430/5$ ،  $431/5$ ،  $432/5$ ،  $433/5$ ،  $434/5$ ،  $435/5$ ،  $436/5$ ،  $437/5$ ،  $438/5$ ،  $439/5$ ،  $440/5$ ،  $441/5$ ،  $442/5$ ،  $443/5$ ،  $444/5$ ،  $445/5$ ،  $446/5$ ،  $447/5$ ،  $448/5$ ،  $449/5$ ،  $450/5$ ،  $451/5$ ،  $452/5$ ،  $453/5$ ،  $454/5$ ،  $455/5$ ،  $456/5$ ،  $457/5$ ،  $458/5$ ،  $459/5$ ،  $460/5$ ،  $461/5$ ،  $462/5$ ،  $463/5$ ،  $464/5$ ،  $465/5$ ،  $466/5$ ،  $467/5$ ،  $468/5$ ،  $469/5$ ،  $470/5$ ،  $471/5$ ،  $472/5$ ،  $473/5$ ،  $474/5$ ،  $475/5$ ،  $476/5$ ،  $477/5$ ،  $478/5$ ،  $479/5$ ،  $480/5$ ،  $481/5$ ،  $482/5$ ،  $483/5$ ،  $484/5$ ،  $485/5$ ،  $486/5$ ،  $487/5$ ،  $488/5$ ،  $489/5$ ،  $490/5$ ،  $491/5$ ،  $492/5$ ،  $493/5$ ،  $494/5$ ،  $495/5$ ،  $496/5$ ،  $497/5$ ،  $498/5$ ،  $499/5$ ،  $500/5$ ،  $501/5$ ،  $502/5$ ،  $503/5$ ،  $504/5$ ،  $505/5$ ،  $506/5$ ،  $507/5$ ،  $508/5$ ،  $509/5$ ،  $510/5$ ،  $511/5$ ،  $512/5$ ،  $513/5$ ،  $514/5$ ،  $515/5$ ،  $516/5$ ،  $517/5$ ،  $518/5$ ،  $519/5$ ،  $520/5$ ،  $521/5$ ،  $522/5$ ،  $523/5$ ،  $524/5$ ،  $525/5$ ،  $526/5$ ،  $527/5$ ،  $528/5$ ،  $529/5$ ،  $530/5$ ،  $531/5$ ،  $532/5$ ،  $533/5$ ،  $534/5$ ،  $535/5$ ،  $536/5$ ،  $537/5$ ،  $538/5$ ،  $539/5$ ،  $540/5$ ،  $541/5$ ،  $542/5$ ،  $543/5$ ،  $544/5$ ،  $545/5$ ،  $546/5$ ،  $547/5$ ،  $548/5$ ،  $549/5$ ،  $550/5$ ،  $551/5$ ،  $552/5$ ،  $553/5$ ،  $554/5$ ،  $555/5$ ،  $556/5$ ،  $557/5$ ،  $558/5$ ،  $559/5$ ،  $560/5$ ،  $561/5$ ،  $562/5$ ،  $563/5$ ،  $564/5$ ،  $565/5$ ،  $566/5$ ،  $567/5$ ،  $568/5$ ،  $569/5$ ،  $570/5$ ،  $571/5$ ،  $572/5$ ،  $573/5$ ،  $574/5$ ،  $575/5$ ،  $576/5$ ،  $577/5$ ،  $578/5$ ،  $579/5$ ،  $580/5$ ،  $581/5$ ،  $582/5$ ،  $583/5$ ،  $584/5$ ،  $585/5$ ،  $586/5$ ،  $587/5$ ،  $588/5$ ،  $589/5$ ،  $590/5$ ،  $591/5$ ،  $592/5$ ،  $593/5$ ،  $594/5$ ،  $595/5$ ،  $596/5$ ،  $597/5$ ،  $598/5$ ،  $599/5$ ،  $600/5$ ،  $601/5$ ،  $602/5$ ،  $603/5$ ،  $604/5$ ،  $605/5$ ،  $606/5$ ،  $607/5$ ،  $608/5$ ،  $609/5$ ،  $610/5$ ،  $611/5$ ،  $612/5$ ،  $613/5$ ،  $614/5$ ،  $615/5$ ،  $616/5$ ،  $617/5$ ،  $618/5$ ،  $619/5$ ،  $620/5$ ،  $621/5$ ،  $622/5$ ،  $623/5$ ،  $624/5$ ،  $625/5$ ،  $626/5$ ،  $627/5$ ،  $628/5$ ،  $629/5$ ،  $630/5$ ،  $631/5$ ،  $632/5$ ،  $633/5$ ،  $634/5$ ،  $635/5$ ،  $636/5$ ،  $637/5$ ،  $638/5$ ،  $639/5$ ،  $640/5$ ،  $641/5$ ،  $642/5$ ،  $643/5$ ،  $644/5$ ،  $645/5$ ،  $646/5$ ،  $647/5$ ،  $648/5$ ،  $649/5$ ،  $650/5$ ،  $651/5$ ،  $652/5$ ،  $653/5$ ،  $654/5$ ،  $655/5$ ،  $656/5$ ،  $657/5$ ،  $658/5$ ،  $659/5$ ،  $660/5$ ،  $661/5$ ،  $662/5$ ،  $663/5$ ،  $664/5$ ،  $665/5$ ،  $666/5$ ،  $667/5$ ،  $668/5$ ،  $669/5$ ،  $670/5$ ،  $671/5$ ،  $672/5$ ،  $673/5$ ،  $674/5$ ،  $675/5$ ،  $676/5$ ،  $677/5$ ،  $678/5$ ،  $679/5$ ،  $680/5$ ،  $681/5$ ،  $682/5$ ،  $683/5$ ،  $684/5$ ،  $685/5$ ،  $686/5$ ،  $687/5$ ،  $688/5$ ،  $689/5$ ،  $690/5$ ،  $691/5$ ،  $692/5$ ،  $693/5$ ،  $694/5$ ،  $695/5$ ،  $696/5$ ،  $697/5$ ،  $698/5$ ،  $699/5$ ،  $700/5$ ،  $701/5$ ،  $702/5$ ،  $703/5$ ،  $704/5$ ،  $705/5$ ،  $706/5$ ،  $707/5$ ،  $708/5$ ،  $709/5$ ،  $710/5$ ،  $711/5$ ،  $712/5$ ،  $713/5$ ،  $714/5$ ،  $715/5$ ،  $716/5$ ،  $717/5$ ،  $718/5$ ،  $719/5$ ،  $720/5$ ،  $721/5$ ،  $722/5$ ،  $723/5$ ،  $724/5$ ،  $725/5$ ،  $726/5$ ،  $727/5$ ،  $728/5$ ،  $729/5$ ،  $730/5$ ،  $731/5$ ،  $732/5$ ،  $733/5$ ،  $734/5$ ،  $735/5$ ،  $736/5$ ،  $737/5$ ،  $738/5$ ،  $739/5$ ،  $740/5$ ،  $741/5$ ،  $742/5$ ،  $743/5$ ،  $744/5$ ،  $745/5$ ،  $746/5$ ،  $747/5$ ،  $748/5$ ،  $749/5$ ،  $750/5$ ،  $751/5$ ،  $752/5$ ،  $753/5$ ،  $754/5$ ،  $755/5$ ،  $756/5$ ،  $757/5$ ،  $758/5$ ،  $759/5$ ،  $760/5$ ،  $761/5$ ،  $762/5$ ،  $763/5$ ،  $764/5$ ،  $765/5$ ،  $766/5$ ،  $767/5$ ،  $768/5$ ،  $769/5$ ،  $770/5$ ،  $771/5$ ،  $772/5$ ،  $773/5$ ،  $774/5$ ،  $775/5$ ،  $776/5$ ،  $777/5$ ،  $778/5$ ،  $779/5$ ،  $780/5$ ،  $781/5$ ،  $782/5$ ،  $783/5$ ،  $784/5$ ،  $785/5$ ،  $786/5$ ،  $787/5$ ،  $788/5$ ،  $789/5$ ،  $790/5$ ،  $791/5$ ،  $792/5$ ،  $793/5$ ،  $794/5$ ،  $795/5$ ،  $796/5$ ،  $797/5$ ،  $798/5$ ،  $799/5$ ،  $800/5$ ،  $801/5$ ،  $802/5$ ،  $803/5$ ،  $804/5$ ،  $805/5$ ،  $806/5$ ،  $807/5$ ،  $808/5$ ،  $809/5$ ،  $810/5$ ،  $811/5$ ،  $812/5$ ،  $813/5$ ،  $814/5$ ،  $815/5$ ،  $816/5$ ،  $817/5$ ،  $818/5$ ،  $819/5$ ،  $820/5$ ،  $821/5$ ،  $822/5$ ،  $823/5$ ،  $824/5$ ،  $825/5$ ،  $826/5$ ،  $827/5$ ،  $828/5$ ،  $829/5$ ،  $830/5$ ،  $831/5$ ،  $832/5$ ،  $833/5$ ،  $834/5$ ،  $835/5$ ،  $836/5$ ،  $837/5$ ،  $838/5$ ،  $839/5$ ،  $840/5$ ،  $841/5$ ،  $842/5$ ،  $843/5$ ،  $844/5$ ،  $845/5$ ،  $846/5$ ،  $847/5$ ،  $848/5$ ،  $849/5$ ،  $850/5$ ،  $851/5$ ،  $852/5$ ،  $853/5$ ،  $854/5$ ،  $855/5$ ،  $856/5$ ،  $857/5$ ،  $858/5$ ،  $859/5$ ،  $860/5$ ،  $861/5$ ،  $862/5$ ،  $863/5$ ،  $864/5$ ،  $865/5$ ،  $866/5$ ،  $867/5$ ،  $868/5$ ،  $869/5$ ،  $870/5$ ،  $871/5$ ،  $872/5$ ،  $873/5$ ،  $874/5$ ،  $875/5$ ،  $876/5$ ،  $877/5$ ،  $878/5$ ،  $879/5$ ،  $880/5$ ،  $881/5$ ،  $882/5$ ،  $883/5$ ،  $884/5$ ،  $885/5$ ،  $886/5$ ،  $887/5$ ،  $888/5$ ،  $889/5$ ،  $890/5$ ،  $891/5$ ،  $892/5$ ،  $893/5$ ،  $894/5$ ،  $895/5$ ،  $896/5$ ،  $897/5$ ،  $898/5$ ،  $899/5$ ،  $900/5$ ،  $901/5$ ،  $902/5$ ،  $903/5$ ،  $904/5$ ،  $905/5$ ،  $906/5$ ،  $907/5$ ،  $908/5$ ،  $909/5$ ،  $910/5$ ،  $911/5$ ،  $912/5$ ،  $913/5$ ،  $914/5$ ،  $915/5$ ،  $916/5$ ،  $917/5$ ،  $918/5$ ،  $919/5$ ،  $920/5$ ،  $921/5$ ،  $922/5$ ،  $923/5$ ،  $924/5$ ،  $925/5$ ،  $926/5$ ،  $927/5$ ،  $928/5$ ،  $929/5$ ،  $930/5$ ،  $931/5$ ،  $932/5$ ،  $933/5$ ،  $934/5$ ،  $935/5$ ،  $936/5$ ،  $937/5$ ،  $938/5$ ،  $939/5$ ،  $940/5$ ،  $941/5$ ،  $942/5$ ،  $943/5$ ،  $944/5$ ،  $945/5$ ،  $946/5$ ،  $947/5$ ،  $948/5$ ،  $949/5$ ،  $950/5$ ،  $951/5$ ،  $952/5$ ،  $953/5$ ،  $954/5$ ،  $955/5$ ،  $956/5$ ،  $957/5$ ،  $958/5$ ،  $959/5$ ،  $960/5$ ،  $961/5$ ،  $962/5$ ،  $963/5$ ،  $964/5$ ،  $965/5$ ،  $966/5$ ،  $967/5$ ،  $968/5$ ،  $969/5$ ،  $970/5$ ،  $971/5$ ،  $972/5$ ،  $973/5$ ،  $974/5$ ،  $975/5$ ،  $976/5$ ،  $977/5$ ،  $978/5$ ،  $979/5$ ،  $980/5$ ،  $981/5$ ،  $982/5$ ،  $983/5$ ،  $984/5$ ،  $985/$

۳ ثانیه، مناسب‌تر و برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است زیرا از همه مدل‌های دیگر بالاتر است.

در هر بازه مطالعه شده افزایش می‌دهند. باتوجه به جدول ۷ که مقدار R-Square مدل‌های مقادیر مختلف را نشان می‌دهد، می‌توان گفت که مدل ساخته شده برای تعداد تداخلات زیر

جدول ۷. ضرایب اصلی متغیرهای مستقل موثر بر متغیر وابسته FTTC

FTTC (3.0)	FTTC (2.5)	FTTC (2.0)	FTTC (1.5)	
۱/۶۶	۱/۳۸	۰/۹۵	۰/۶۴	TrV
-۵/۶۱	-۴/۳۵	-۲/۸۵	-۱/۶۴	AS
-۳/۶۵	-۳/۱۷	-۲/۸۵	-۲/۱۸	ASEn
-۴۰/۷۸	-۳۰/۱۱	-۲۱/۶۴	-۱۳/۲۷	AWEn
۱۷۲/۷۱	۱۰۹/۰۰	۹۰/۱۴	۵۱/۳۹	B
۱۴۵/۴۳	۸۶/۸۵	۶۸/۵۱	۳۴/۸۳	M
۰/۷۷۰	۰/۷۱۵	۰/۷۰۳	۰/۶۱۱	R-Square

## ۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج مدل، افزایش یک واحد در متغیر حجم ترافیک (TrV)، به معنای افزوده شدن یک وسیله نقلیه سواری، می‌تواند به ترتیب موجب افزایش ۰/۶۴، ۰/۹۵، ۱/۳۸ و ۱/۶۶ مورد در تعداد تداخلات بحرانی مربوط به شاخص TTC در بازه‌های زمانی کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵، ۳/۰ ثانیه شود. این روند افزایشی معادل تقریباً ۱/۲ درصد رشد در تعداد رخدادهای بحرانی در این سطوح زمانی است.

تأثیر متغیر مستقل میانگین متوسط سرعت (AS) در این پژوهش برای شاخص TTC معنی‌دار شده است و با افزایش سرعت متوسط تعداد تداخلات بحرانی کاهش می‌یابد که هر ۱ کیلومتر بر ساعت افزایش در این متغیر، تعداد تداخلات بحرانی کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه به ترتیب ۱/۶۴، ۲/۸۵، ۴/۳۵ و ۵/۶۱ عدد کاهش می‌دهد یا به عبارتی ۳/۱، ۳/۶، ۳/۹، ۴/۰ درصد کاهش می‌دهد.

تأثیر متغیر میانگین عرض ورودی هر شاخه (AWEn) بر تعداد تداخلات بحرانی شاخص TTC به صورت کاهش می‌باشد، و افزایش هر ۱ متر عرض ورودی تعداد تداخلات بحرانی TTC کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه را به ترتیب ۱۳/۲۷، ۲۱/۶۴، ۳۰/۱۱ و ۴۰/۷۸ مورد کاهش می‌دهد یا به ترتیب به میزان ۲۴/۲، ۲۶/۵، ۲۶/۸، ۲۸/۵ درصد کاهش می‌یابد.

این پژوهش به بررسی تأثیر عوامل هندسی و ترافیکی بر ایمنی تقاطعات چهارشاخه درون‌شهری با تمرکز بر شاخص زمان تا برخورد (TTC) پرداخته است. داده‌ها از طریق تصویربرداری هوایی در هفت تقاطع جمع‌آوری و پس از پردازش، متغیرهایی مانند عرض شاخه‌ها، حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه مورد تحلیل قرار گرفتند. با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره، اثر هر عامل بر میزان تداخلات بحرانی مبتنی بر TTC در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد و نتایج نشان داد برخی متغیرها نقش مؤثری در کاهش یا افزایش ریسک برخورد دارند.

تحلیل نتایج مرتبط با متغیر حجم ترافیک (TrV) نشان می‌دهد که با افزایش هر واحد به تعداد وسایل نقلیه سواری، تعداد وقوع شاخص زمان تا برخورد (TTC) نیز روند افزایشی خواهد داشت. بر اساس ضرایب حاصل از مدل، می‌توان بیان کرد که اثرگذاری این متغیر بر شاخص TTC در سطوح مختلف به شکل زیر قابل تفسیر است:

$$TTC_{1.5} < TTC_{2.0} < TTC_{2.5} < TTC_{3.0}$$

به نحوی که افزایش حجم ترافیک تعداد تداخلات کمتر از ۳/۰ ثانیه را ۲/۵ برابر بیش‌تر از تعداد تداخلات کمتر از ۱/۵ ثانیه افزایش می‌دهد.

تعداد کل تداخلات می‌توان استنباط کرد که وجود سرعت‌گاه  
تعداد تداخلات بحرانی شاخص TTC کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵  
و ۳/۰ ثانیه را به ترتیب ۵۱، ۹۰، ۱۰۹، ۱۷۲ مورد افزایش می‌دهد.  
- داده‌های آماری مؤید این است که وجود میانه تعداد تداخلات  
بحرانی این شاخص را افزایش می‌دهد همچنین باتوجه به تعداد  
کل تداخلات و ضرایب به‌دست‌آمده از تحلیل آماری می‌توان  
نتیجه گرفت که وجود میانه می‌تواند تعداد تداخلات بحرانی  
شاخص TTC کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه را به ترتیب  
۳۴، ۶۸، ۸۶، ۱۴۵ مورد افزایش دهد.

- تأثیر متغیر میانگین سرعت متوسط ورودی (ASEn) به‌گونه‌ای  
است که افزایش این متغیر موجب کاهش تعداد تداخلات بحرانی  
می‌شود که افزایش هر ۱ کیلومتر بر ساعت این متغیر، شاخص  
تعداد تداخلات بحرانی کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه را  
به ترتیب ۲/۱۸، ۲/۸۵، ۳/۱۷ و ۳/۶۵ مورد کاهش می‌دهد  
به ترتیب تعداد تداخلات این شاخص به میزان ۴/۱، ۳/۶، ۲/۸،  
۲/۶ درصد کاهش می‌یابد.

- تأثیر وجود یا عدم وجود سرعت‌گاه (SH) می‌تواند بر شاخص  
ترافیکی TTC معنی‌دار باشد، وجود سرعت‌گاه اثر افزایشی  
بر شاخص مذکور دارد و باتوجه به ضرایب متغیر و همچنین

## ۶- مراجع

- Chen, A. Y., Chiu, Y. L., Hsieh, M. H., Lin, P.-W., & Angah, O. (2020). Conflict analytics through the vehicle safety space in mixed traffic flows using UAV image sequences. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 119, 102744 .
- Cunto, F. (2008). Assessing safety performance of transportation systems using microscopic simulation .
- El-Basyouny, K., & Sayed, T. (2012). Measuring safety treatment effects using full Bayes non-linear safety performance intervention functions. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 152-163 .
- Essa, M., & Sayed, T. (2018). Traffic conflict models to evaluate the safety of signalized intersections at the cycle level. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89, 289-302 .
- Essa, M., & Sayed, T. (2019). Full Bayesian conflict-based models for real time safety evaluation of signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 367-381 .
- Ghanim, M., Kharbeche, M., Hannun, J., Hannun, J., & Shamiyeh, K. (2020). Safety and operational performance of signalized roundabouts: a case study in doha. *Procedia Computer Science*, 170, 427-433.
- Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger .
- Hossain, M., Abdel-Aty, M., Quddus, M. A., Muromachi, Y., & Sadeek, S. N. (2019). Real-time crash prediction models: State-of-the-art, design pathways and ubiquitous requirements. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 66-84 .
- Ali, Y., Sarkar, D. R., Rao, K. R., Chatterjee, N., & Bhaskar, A. (2024). Scrutinizing Data from Sky: An Examination of Its Veracity in Area Based Traffic Contexts. *arXiv preprint arXiv:2404.17212* .
- Anis, M., Li, S., Geedipally, S. R., Zhou, Y., & Lord, D. (2025). Real-time risk estimation for active road safety: Leveraging Waymo AV sensor data with hierarchical Bayesian extreme value models. *Accident Analysis & Prevention*, 211, 107880 .
- Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., & Sayed, T. (2021). A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques. *Accident Analysis & Prevention*, 153, 106016 .
- Astarita, V., & Giofré, V. P. (2019). From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 94, 215-236 .
- Autey, J., Sayed, T., & Zaki, M. H. (2012). Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 120-130 .
- Charly, A., & Mathew, T. V. (2019). Estimation of traffic conflicts using precise lateral position and width of vehicles for safety assessment. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 1052.64-65.

- Organization, W. H. (2022). Powered two-and three-wheeler safety: a road safety manual for decision-makers and practitioners. *World Health Organization* .
- Persaud, B., Saleem, T., Faisal, S., Lyon, C., Chen, Y., & Sabbaghi, A. (2012). Adoption of Highway Safety Manual predictive methodologies for Canadian highways. *Proceedings from the 2012 Conference of the Transportation Association of Canada*, Fredericton, New Brunswick ,
- Reyad, P., Sayed, T., Essa ,M., & Zheng, L. (2022). Real-time crash-risk optimization at signalized intersections. *Transportation Research Record*, 2676(12), 32-50 .
- Sacchi, E., Sayed, T., & Deleur, P. (2013). A comparison of collision-based and conflict-based safety evaluations: The case of right-turn smart channels. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 260-266 .
- Saunier, N., & Sayed, T. (2008). Probabilistic framework for automated analysis of exposure to road collisions. *Transportation Research Record*, 2083(1), 96-104 .
- Sayed, T., Zaki, M. H., & Autey, J. (2013). Automated safety diagnosis of vehicle–bicycle interactions using computer vision analysis. *Safety Science*, 59, 163-172 .
- Songchitruksa, P., & Tarko, A. P. (2006). The extreme value theory approach to safety estimation. *Accident Analysis & Prevention*, 38(4), 811-822 .
- St-Aubin, P., Saunier, N., & Miranda-Moreno, L. (2015). Large-scale automated proactive road safety analysis using video data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 363-379 .
- Tageldin, A., Sayed, T., & Wang, X. (2015). Can time proximity measures be used as safety indicators in all driving cultures? Case study of motorcycle safety in China. *Transportation Research Record*, 2520(1), 165-174 .
- Theofilatos, A. (2017). Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials. *Journal of Safety Research*, 61, 9-21 .
- Tingvall, C., & Haworth, N. (1999). Vision Zero-An ethical approach to safety and mobility. 6th ITE international conference road safety & traffic enforcement: *Beyond 2000*.
- Wali, B., Khattak, A. J., & Karnowski, T. (2019). Exploring microscopic driving volatility in naturalistic driving environment prior to involvement in safety critical events—Concept of event-based driving
- Ismail, K., Sayed, T., & Saunier, N. (2011). Methodologies for aggregating indicators of traffic conflict. *Transportation Research Record*, 2237(1), 10-19 .
- Jiao, Y., Calvert, S. C., van Cranenburgh, S., & van Lint, H. (2025). A unified probabilistic approach to traffic conflict detection. *Analytic Methods in Accident Research*, 45, 100369 .
- Johnsson, C., Laureshyn, A & ,De Ceunynck, T. (2018). In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators. *Transport Reviews*, 38(6), 765-785.
- Kim, E., Muennig, P., & Rosen, Z. (2017). Vision zero: a toolkit for road safety in the modern era. *Injury Epidemiology*, 4, 1-9 .
- Kraay, J., & Van der Horst, A. (1985). A diagnosis of road safety using the Dutch conflict observation technique DOCTOR. *Institute for Road Safety Research SWOV: Leidschendam, The Netherlands* .
- Laureshyn, A. (2010). Application of automated video analysis to road user behaviour .
- Laureshyn, A., De Ceunynck, T., Karlsson, C., Svensson, Å., & Daniels, S. (2017). In search of the severity dimension of traffic events: Extended Delta-V as a traffic conflict indicator. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 46-56 .
- Lyon, C., Haq, A., Persaud, B., & Kodama, S. T. (2005). Safety performance functions for signalized intersections in large urban areas: Development and application to evaluation of left-turn priority treatment. *Transportation Research Record*, 1908(1), 165-171 .
- Mullakkal-Babu, F. A., Wang, M., Farah, H., van Arem, B., & Happee, R. (2017). Comparative assessment of safety indicators for vehicle trajectories on highways. *Transportation Research Record*, 2659 , (1), 127-136.
- Naumann, R. B., Heiny, S., Evenson, K. R., LaJeunesse, S., Cooper, J. F., Doggett, S., & Marshall, S. W. (2019). Organizational networks in road safety: case studies of US Vision Zero cities. *Traffic Injury Prevention*, 20(4), 378-385 .
- Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). Applied linear statistical models .
- Olszewski, P., Buttler, I., Czajewski, W., Dąbkowski, P., Kraśkiewicz, C., Szagała, P., & Zielińska, A. (2016). Pedestrian safety assessment with video analysis. *Transportation Research Procedia*, 14, 2044-2053 .

- Yamada, K., & Kuroki, M. (2019). New traffic conflict measure based on a potential outcome model. *Journal of Causal Inference*, 7(1), 20180001 .
- Yang, D., Ozbay, K., Xie, K., Yang, H., Zuo, F., & Sha, D. (2021). Proactive safety monitoring: A functional approach to detect safety-related anomalies using unmanned aerial vehicle video data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 127, 103130 .
- Yuan, J., & Abdel-Aty, M. (2018). Approach-level real-time crash risk analysis for signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 119, 274-289 .
- Yuan, J., Abdel-Aty, M., Wang, L., Lee, J., Wang, X., & Yu, R. (2018). Real-time crash risk analysis of urban arterials incorporating bluetooth, weather, and adaptive signal control data. *arXiv preprint arXiv:1805.07826* .
- volatility. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 105277 .
- Wang, X., & Abdel-Aty, M. (2008). Modeling left-turn crash occurrence at signalized intersections by conflicting patterns. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 76-88 .
- Wooldridge, J. M. (2021). *Introductory Econometrics: A Modern Approach* 6rd ed. *Cengage Learning* .
- Xie, K., Li, C., Ozbay, K., Dobler, G., Yang, H., Chiang, A.-T., & Ghandehari, M. (2016). Development of a comprehensive framework for video-based safety assessment. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*.
- Xie, K., Ozbay, K., Yang, H., & Li, C. (2019). Mining automatically extracted vehicle trajectory data for proactive safety analytics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 106, 61-72 .

# Analyzing the Effects of Geometric and Traffic Parameters on Critical Conflicts Using the Time-to-Collision (TTC) Safety Index at Urban Signalized Intersections

*Kamran Sarvari, M.Sc., Grad., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares, University, Tehran, Iran.*

*Aminmirza Boroujerdian, Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

**E-mail: boroujerdian@modares.ac.ir**

Received: September 2025- Accepted: February 2026

## ABSTRACT

Road transport safety is a key component of sustainable urban development, playing a crucial role in reducing accidents and human casualties. With rapid urbanization and increasing traffic volumes, attention to factors influencing traffic accidents has grown significantly. Thus, the scientific analysis of traffic behavior and identification of safety-related factors—especially at critical points like urban intersections—is essential for effective traffic planning and management. Signalized intersections are widely used in urban traffic systems due to their benefits in controlling flow and enhancing safety. They are considered key, sensitive elements in urban traffic networks, primarily designed to reduce conflicts among road users and improve flow in congested areas. This study analyzes the safety of urban signalized four-way intersections using the Time-to-Collision (TTC) index. Field data was collected through aerial imagery with drones at seven high-traffic intersections in Saqqez city. Traffic and geometric variables such as traffic volume, speed, and entry width were extracted and analyzed using the Data from Sky software and image processing algorithms. Multiple linear regression models revealed that for every additional vehicle in traffic volume, the number of critical TTC conflicts increases by approximately 1.2%. Furthermore, an increase of one meter in the entry width of each intersection can reduce the number of critical collisions based on the TTC index by 24% to 28%.

**Keywords:** Safety Four-Leg Signalized Intersections, Time to collision, Performance Analysis, Image Processing, Traffic Conflicts