

تحلیل مدل اثرگذاری ویژگی‌های هندسی و ترافیکی بر بروز تداخلات بحرانی در تقاطعات چراغ‌دار چهارراهی با بهره‌گیری از شاخص زمانی پس از تخطی

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

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

صفحه ۲۹۸-۲۸۱

چکیده

با افزایش چشم‌گیر جمعیت در مناطق شهری و رشد مداوم استفاده از وسایل نقلیه، زیرساخت‌های ترافیکی بیش از هر زمان دیگری نیازمند ارتقاء و بازنگری در جهت افزایش سطح ایمنی هستند. در این میان، تقاطع‌های درون‌شهری به عنوان یکی از حساس‌ترین و پررفت‌وآمدترین بخش‌های شبکه حمل‌ونقل شهری، نقش بسیار مهمی در تضمین حرکت ایمن و روان وسایل نقلیه دارند. این نقاط به دلیل تمرکز حجم بالایی از ترافیک، بیش از سایر بخش‌ها مستعد وقوع تداخلات، کاهش سطح ایمنی و بروز رفتارهای پرخطر ترافیکی هستند. افزایش تردد در این نواحی می‌تواند شرایط را برای بروز تصادفات و موقعیت‌های نایمن بیش از پیش فراهم آورد، بنابراین شناسایی عوامل مؤثر بر ایمنی این تقاطع‌ها امری ضروری در راستای ارتقاء کیفیت خدمات حمل‌ونقل شهری محسوب می‌شود. در این مطالعه، داده‌های مربوط به ویژگی‌های هندسی و ترافیکی هفت تقاطع چراغ‌دار شهری جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. به منظور دستیابی به اطلاعات دقیق، از تکنیک تصویربرداری هوایی برای ثبت فیلم‌ها در هر یک از این تقاطع‌ها استفاده شد. سپس، تصاویر ثبت‌شده با کمک نرم‌افزارهای پردازش تصویر تحلیل گردیدند. علاوه بر این، تعداد تداخلات بحرانی و رویدادهای مربوط به زمان پس از تخطی در این تقاطع‌ها محاسبه شد. تعداد تداخلات مورد بررسی برای این شاخص ترافیکی برابر با ۲۰۴۱۲ رویداد بوده است. نتایج تحلیل‌های آماری این تحقیق که با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه به دست آمده، نشان می‌دهد که افزایش یک واحد حجم ترافیک می‌تواند تعداد تداخلات بحرانی را به میزان ۱/۶ درصد افزایش دهد. بررسی‌ها حاکی از آن است که افزایش هر یک متر در میانگین عرض ورودی تقاطعات می‌تواند تعداد تداخلات بحرانی را به طور تقریبی بین ۱۱ تا ۱۶ درصد افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز عملکردی، ایمنی تقاطعات چهار شاخه چراغ‌دار، پردازش تصویر، تداخلات ترافیکی، زمان پس از تخطی

۱- مقدمه

که سالانه بیش از ۱.۳ میلیون نفر در اثر سوانح رانندگی در سطح جهان جان خود را از دست می‌دهند، رقمی که ضرورت بازنگری و تقویت راهبردهای ایمنی را بیش از پیش نمایان می‌سازد (Organization, 2023). تقاطعات سهم قابل‌توجهی در بروز حوادث ترافیکی دارند؛ به طوری که ۴۰ درصد از کل تصادفات و ۴۶ درصد از تصادفات جرحی در این نقاط رخ می‌دهند. در این میان، تقاطعات چراغ‌دار به‌تنهایی ۲۱ درصد از کل تصادفات و ۲۴ درصد از تصادفات جرحی یا منجر به فوت را شامل

افزایش ایمنی در شبکه‌های حمل‌ونقل، با توجه به نرخ بالای سوانح رانندگی در کشور، به یکی از دغدغه‌های اصلی سیاست‌گذاران، پژوهشگران و فعالان حوزه حمل‌ونقل تبدیل شده است. آمارهای جهانی نیز بر اهمیت این موضوع تأکید دارند؛ به طوری که آسیب‌های ناشی از حوادث ترافیکی به‌عنوان هشتمین عامل اصلی مرگ‌ومیر در جهان شناخته می‌شوند. این تصادفات، به‌ویژه در میان جوانان ۱۵ تا ۲۹ سال، از جمله مهم‌ترین دلایل فوت محسوب می‌شوند. برآوردها نشان می‌دهد

تصویر دچار اعوجاج مکانی می‌شوند از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردارند. سهولت در هدایت، انعطاف‌پذیری و هزینه پایین از دیگر مزایای کلیدی این فناوری است که در سال‌های اخیر آن را به یکی از روش‌های نوظهور در تحلیل ویدئویی حمل‌ونقل بدل کرده است. در برخی موارد، پهپادها با تجهیزات پیشرفته‌تری نظیر رادار و دوربین‌های مادون قرمز ترکیب می‌شوند تا نمایی جامع و دقیق از رفتار ترافیکی در سطح تقاطع و معابر ورودی آن فراهم شود. در این پژوهش، هفت تقاطع چراغ‌دار درون‌شهری در استان کردستان در شهرستان سقز با بهره‌گیری از داده‌های استخراج‌شده توسط پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز اصلی بر تحلیل شاخص زمان پس از تخطی (PET) است، که در این پژوهش سعی شده است عوامل هندسی و ترافیکی مهم و میزان تاثیر این عوامل بر این شاخص تداخلی را که معیاری برای میزان ایمنی در تقاطعات است به دست آورد.

۲- پیشینه تحقیق

شاخص زمان پس از تخطی اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط Allen و همکاران ارائه شد و دارای گستردگی بیش‌تری نسبت به زمان تا برخورد (TTC) است و میتوان گفت این شاخص برای زمانی است که امکان تصادف یا برخورد وجود نداشته باشد، یا اینکه برای زمانی است که خطر رفع شده است و برخوردی پیش نخواهد آمد (Allen et al., 1978). در ارزیابی ایمنی ترافیکی، به‌طور سنتی از آستانه‌هایی برای شاخص زمان پس از تخطی در محدوده‌ای بین ۱ تا ۶/۵ ثانیه استفاده شده است. با این‌حال، مرور ادبیات پیشین نشان می‌دهد که در خصوص مبانی نظری و تجربی این بازه زمانی، تحلیل‌های دقیق و نظام‌مند چندانی ارائه نشده است. در بسیاری از مطالعات، انتخاب آستانه PET بیشتر بر پایه فرضیات کلی، یا با الهام از زمان ادراک-واکنش (که در محاسبه فاصله ایمن توقف کاربرد دارد) انجام شده است (Caliendo & Guida, 2012; Paul & Ghosh, 2018; Vedagiri & Killi, 2015).

در میان تلاش‌های انجام‌شده، پژوهش Peesapati گامی در جهت ایجاد پیوند بین وقوع تصادف و تداخلات عبوری برای تعیین آستانه PET در تقاطع‌های چراغ‌دار برداشته است (Peesapati et al., 2013). همچنین Zheng رویکردی مبتنی بر تحلیل همبستگی میان نرخ تصادف و تداخل در بازه‌های مختلف PET پیشنهاد کردند، که هدف آن انتخاب آستانه‌ای بود که بیشترین همبستگی آماری با تصادفات داشته باشد (Zheng et al., 2014). پائول و همکاران در پژوهشی در ناحیه مرکزی دهلی، رفتار ترافیکی در تقاطع‌های سه‌شاخه و چهارشاخه را

می‌شود (Billah et al., 2021; Chandler et al., 2013). در کشور ژاپن هم تقریباً نیمی از ۴۰۰۰ تصادف در تقاطعات است (Chaudhari et al., 2021). این افزایش درصد در تصادفات منجر به جراحت و فوت، بیانگر شدت بالاتر برخوردها در تقاطعات نسبت به سایر بخش‌های شبکه‌ی راهی است. از این رو، انجام مطالعات جامع ایمنی در این مناطق ضروری است تا بتوان با شناسایی عوامل مؤثر، اقدامات مؤثری برای کاهش این آمار اتخاذ کرد. تحلیل ایمنی ترافیک به‌طور عمده بر مبنای داده‌های تصادفات انجام می‌شود. برای درک ماهیت پیشگیرانه تصادفات و پیش‌بینی وقوع آن‌ها به‌صورت لحظه‌ای، از روش‌های آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. همچنین، اقدامات اصلاحی برای کاهش تصادفات نیز بر پایه داده‌های تصادف طراحی شده‌اند. با این حال، داده‌های تصادفی به‌طور معمول رویدادهای نادری هستند و این نوع داده‌ها با محدودیت‌های قابل توجهی روبه‌رو هستند، از جمله استدلال‌های نادرست، سوگیری‌های ذهنی و دقت پایین داده‌ها که باعث می‌شود تحقیقات لازم صورت نگیرد (Arun et al., 2018; Tarko, 2021). در بسیاری از موارد، دلایل بروز تصادف لزوماً به ویژگی‌های فیزیکی جاده یا شرایط ترافیکی محدود نمی‌شود و عوامل دیگری نیز نقش دارند؛ عواملی که معمولاً در چارچوب مدل‌های پیش‌بینی رایج قابل شناسایی نیستند. در مقابل، رویدادهای ترافیکی غیرتصادفی یا تداخلی به‌مراتب شایع‌ترند و همین امر آن‌ها را به ابزاری کارآمد برای شناسایی نواقص طراحی مسیر و شرایط خطرآفرین ترافیکی تبدیل کرده است. پژوهش‌های مختلف نیز این دیدگاه را تأیید کرده‌اند که تحلیل تداخل‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای تحلیل تصادفات باشد و در بسیاری از موارد، نتایج مشابه و قابل اعتمادی به همراه دارد. (Essa & Sayed, 2020; Li et al., 2018; Stipancic et al., 2021). در همین راستا، شاخص‌های گوناگون و متنوعی برای سنجش میزان تداخل ترافیکی توسعه یافته‌اند. از جمله می‌توان به زمان تا برخورد (Hayward, 1972)، زمان پس از تخطی (Allen et al., 1978)، حداکثر شتاب کاهشی برای جلوگیری از تصادف، فاصله زمانی اشاره کرد. شاخص‌های جایگزین ایمنی به‌طور معمول نیازمند موقعیت‌یابی دقیق کاربران مسیر هستند. برای نمونه، محاسبه شاخص زمان پس از تخطی مستلزم آگاهی از موقعیت و زمان حرکت وسیله نقلیه است، که این داده‌ها تنها از طریق سامانه‌های موقعیت‌یابی بسیار دقیق مانند GPS با دقت بالا قابل دستیابی‌اند. در این میان، استفاده از پهپادها به عنوان ابزاری نوین و کارآمد برای پایش تقاطع‌ها، به پژوهشگران امکان می‌دهد تا مسیر حرکت وسایل نقلیه را با دقتی در حد سانتی‌متر استخراج کنند. پهپادها نسبت به دوربین‌های کنار جاده‌ای که در لبه‌های

پرداختند. داده‌ها با فناوری LIDAR که دقت بالایی در شرایط مختلف آب‌وهوایی و در شب دارد، جمع‌آوری شد و اعتبار آن از طریق مقایسه با شمارش دستی تأیید گردید. داده‌برداری از ماه می تا آگوست ۲۰۲۲ انجام شد. براساس تحلیل‌ها، برای تداخلات، مقدار PET به چهار دسته تقسیم شد: و این مقدار برای تداخلات شدید یا پرخطر ۰/۷ است، برای تداخلات عمومی ۰/۷ تا ۱/۳۱، برای تداخلات خفیف ۱/۳۱ تا ۲/۲۵ و برای تداخلات بالقوه این مقدار ۲/۲۵ تا ۵/۰ ثانیه می‌باشد (Ansariyar et al., 2023).

۳- روش تحقیق

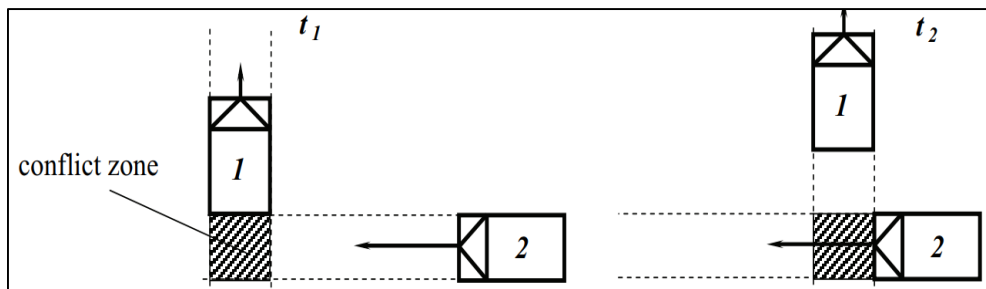
در مطالعات میدانی ترافیک، روش‌های متنوعی برای جمع‌آوری داده‌ها به کار گرفته می‌شود. رفتار ترافیکی وسایل نقلیه و همچنین ارزیابی ایمنی آن‌ها را می‌توان با بهره‌گیری از داده‌های استخراج‌شده از دوربین‌های فیلم‌برداری مورد تحلیل و بررسی قرار داد. با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی می‌توان عوامل تأثیرگذار بر شاخص ایمنی را شناسایی کرده و میزان و نوع اثر هر عامل را مشخص کرد. در بسیاری از منابع نیز این مدل‌ها برای تحلیل و ارزیابی شاخص‌های ایمنی به کار گرفته شده‌اند.

۳-۱- شاخص زمان پس از تخطی

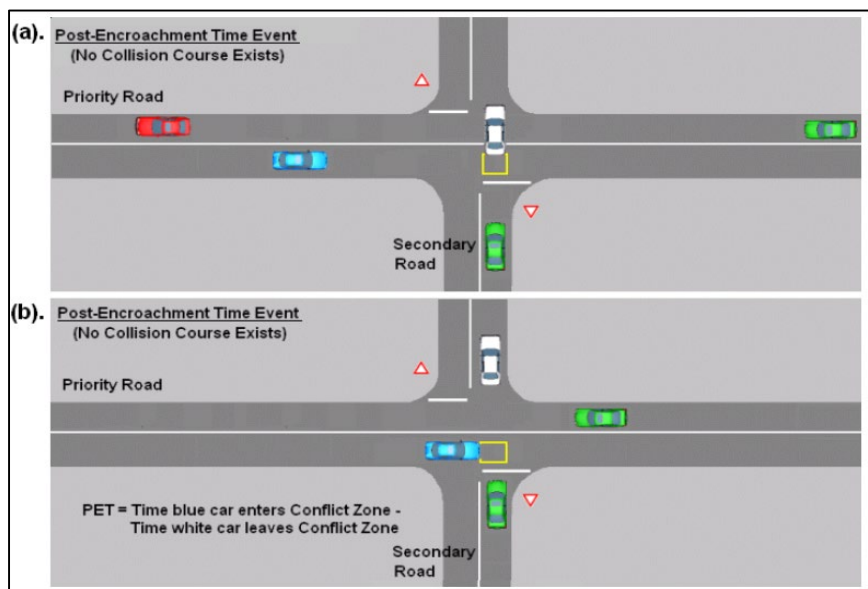
اختلاف زمانی بین ترک ناحیه تداخل توسط کاربر اول راه (عابر، وسیله نقلیه و...) و رسیدن کاربر دوم راه به همان قسمت (ناحیه تداخل) زمان پس از تخطی (PET) گویند. برای اندازه‌گیری مقدار PET، تنها نیاز به مشاهده دقیق و محدود از منطقه نزدیک به ناحیه تداخل است. از آنجایی که PET تنها نیاز به نظارت بر ناحیه با مساحت کم در اطراف تداخل دارد، فرایند اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل آن ساده‌تر است و کمتر تحت تأثیر متغیرهای خارجی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱ که به صورت واضح مشخص شده است می‌توان گفت که مقدار PET از رابطه زیر به دست می‌آید. همچنین در شکل ۲ موقعیت دو وسیله نقلیه درگیر در یک تداخل بحرانی را در یک تقاطع چهارراهی که موضوع این پژوهش است در ابتدای و انتهای اندازه‌گیری PET نشان می‌دهد که شکل بالا (a) نشان‌دهنده خروج وسیله نقلیه اول از ناحیه تداخل است و لحظه شروع زمان PET است و در شکل پایین (b) که نشان‌دهنده ورود وسیله نقلیه دوم به ناحیه تداخل است و لحظه پایانی ثبت مقدار PET است. فاصله زمانی بین این دو رخداد برابر است با مقدار PET یا زمان پس از تخطی بر حسب ثانیه می‌باشد.

برای کلاس‌های مختلف وسایل نقلیه شامل موتورسیکلت‌ها، وسایل نقلیه سبک و وسایل نقلیه سنگین بررسی کردند. برخلاف مطالعات قبلی که از یک مقدار ثابت PET استفاده می‌کردند، در این تحقیق آستانه PET در بازه‌ی ۰/۵ تا ۳/۵ ثانیه با گام‌های ۰/۵ ثانیه‌ای تحلیل شد و برای هر مقدار، تابع تجمعی توزیع محاسبه گردید. بیشترین همبستگی بین تعداد تصادفات و PET برای مقدار ۱ ثانیه مشاهده شد، که مقدار ضریب تعیین آن (R^2) برابر با ۰/۸۰۲ گزارش شده است. نتایج نشان داد که موتورسیکلت‌ها به دلیل اندازه کوچک‌تر، مانورپذیری بالاتر و رفتار رانندگی تهاجمی، در مقادیر پایین PET بیشتر در معرض خطر تصادف قرار دارند، در حالی که خودروهای سواری و سنگین در مقادیر بالاتر PET با ریسک بیشتری مواجه‌اند (Paul & Ghosh, 2020). بر اساس مطالعه Stanojević و همکاران، رفتارهای پرخطر رانندگان، به ویژه رانندگی با سرعت غیرمجاز و عدم توجه کافی به مسیر پیش رو، به عنوان عوامل کلیدی و مؤثر در بروز تصادفات موتورسیکلت‌ها شناسایی شده‌اند. این رفتارهای پرریسک نقش قابل توجهی در افزایش نرخ تصادفات و شدت آسیب‌های وارده به موتورسواران دارند (Stanojević et al., 2020). Islam و همکاران در مطالعه‌ای بر روی یک تقاطع چراغ‌دار چهارشاخه در شهر الافایا، فلوریدا، دریافتند که تغییر در زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی می‌تواند به طور مؤثری شاخص‌های ایمنی را بهبود بخشد. داده‌های این تحقیق با استفاده از پهپاد در زمان اوج ترافیک برداشت شد و شامل عبور ۴۸۷۱ وسیله نقلیه از تقاطع بود. برای تحلیل، از مدل لوجیت استفاده شد و دو روش تعیین PET، شامل روش نقطه مرکزی و روش جعبه مرزی، به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که روش جعبه مرزی در تشخیص دقیق‌تر تداخلات مؤثرتر است، به طوری که در بازه PET برابر با ۱ ثانیه، ۷۱۷ تداخل بحرانی با این روش شناسایی شد در حالی که این مقدار در روش نقطه مرکزی تنها ۱۴۱ مورد بود. همچنین تحلیل‌ها نشان دادند که افزایش یک ثانیه‌ای در زمان چراغ زرد منجر به کاهش ۱۶ درصدی در تعداد PET بحرانی، و افزایش یک ثانیه‌ای در زمان چراغ قرمز تخلیه باعث کاهش ۳ درصدی در تعداد PET بحرانی می‌شود (Islam et al., 2022).

Phajongkha و همکارانشان در پژوهشی که به تحلیل ۱۱۴ تصادف وسایل نقلیه با همدیگر در تقاطعات، در تایلند طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ پرداختند، دریافتند که عواملی همچون سرعت حرکت و میزان تجربه رانندگی کاربران جاده، نقشی تعیین‌کننده در افزایش شدت تصادفات ایفا می‌کنند (Ansariyar, Prajongkha et al., 2023). پژوهشی بر روی یک تقاطع چراغدار در شهر بالتیمور، ایالت مریلند، به بررسی ایمنی عابران پیاده با استفاده از شاخص PET



شکل ۱. روش محاسبه شاخص PET (Laureshyn, 2010)



شکل ۲. محاسبه شاخص PET در یک تقاطع چهار شاخه (Archer, 2005)

۳-۲- محدوده پژوهش

برای انجام این مطالعه میدانی از هفت تقاطع چهارراهی چراغدار در شهرستان سقز استفاده شده است، که اسم این تقاطع‌ها در جدول ۱ آمده است. برداشت فیلم‌ها در تابستان سال ۱۴۰۲ صورت گرفته است. این فیلم‌ها در روزهای یکشنبه، دوشنبه، سه‌شنبه و چهارشنبه هر هفته به غیر از ایام تعطیل ثبت شده‌اند. برای هر موقعیت (تقاطع چهار شاخه چراغدار) در دو نوبت ظهر و غروب بر اساس تاریخچه ترافیکی موجود در Google Maps، فیلم برداشت شده است، که زمان‌های فیلمبرداری هر تقاطع در جدول ۱ آورده شده است. در تمامی این تقاطع‌ها حداقل یک معبر اصلی وجود داشته و سطح روسازی آن‌ها در وضعیت خشک و استاندارد قرار داشته است. داده‌های این پژوهش نیز از طریق تصویربرداری هوایی با استفاده از پهپاد با هلی‌شات مدل مویک ایر ۲ اس ثبت و جمع‌آوری شده است.

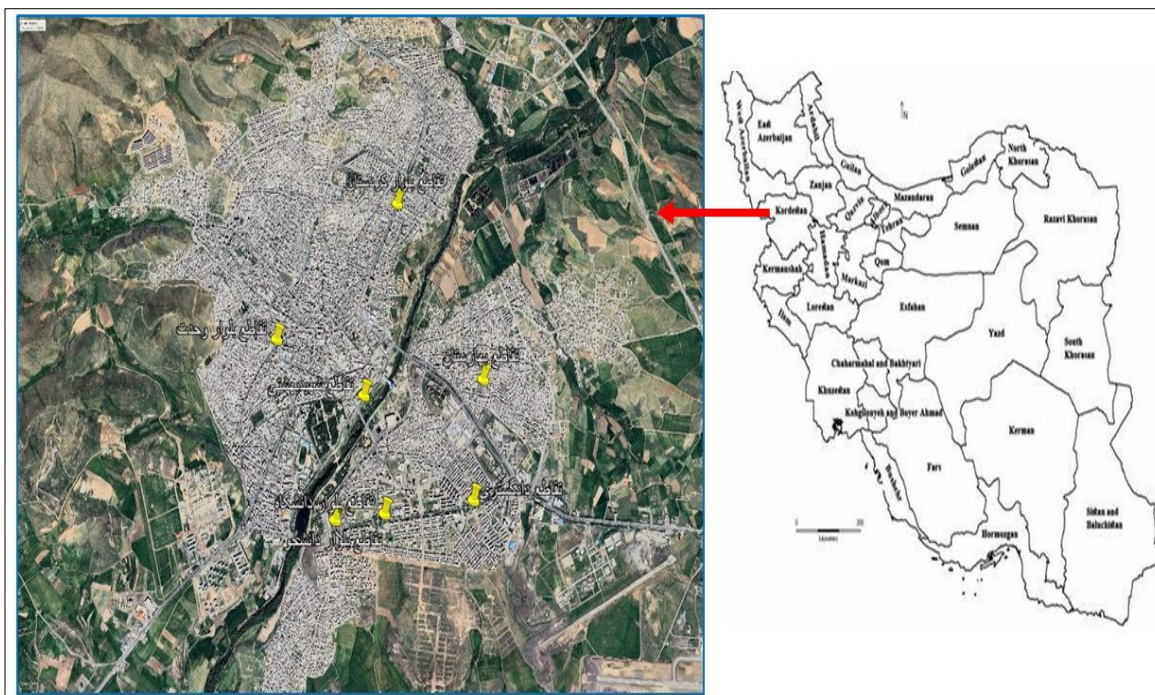
در شکل ۱ که به صورت واضح مشخص شده است می‌توان گفت که مقدار PET برابر است با زمانی که خودروی اول ناحیه تداخلی را ترک کرده تا زمانی که خودروی دوم به ابتدای ناحیه تداخلی می‌رسد و مقدار این شاخص بر حسب ثانیه از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$PET = t_2 - t_1 \quad (1)$$

لحظه ترک ناحیه تداخل به زمانی گفته می‌شود که خودرو از عرض یک خط عبور کند (T_1)، و زمان ورود وسیله نقلیه به ناحیه عبور به عنوان زمان (T_2) در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه دقیق شاخص زمان پس از تخطی (PET)، وجود یک نقطه ثابت تداخل ضروری است؛ مسئله‌ای که یکی از محدودیت‌های ذاتی اصلی این شاخص به شمار می‌آید. در صورتی که خودرو به منظور اجتناب از برخورد، اقدام به تغییر مسیر کند، محل تداخل ثابت نبوده و به یک نقطه متغیر و پویا تبدیل خواهد شد.

جدول ۱. زمان‌های فیلمبرداری در تقاطعات مورد مطالعه

زمان برداشت ترافیکی		تقاطع
غروب	ظهر	
۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	۱۱:۴۵-۱۲:۴۵	تقاطع خیابان سلمان فارسی _ عمارباسر
۱۸:۳۰-۱۹:۳۰	۱۱:۴۵-۱۲:۴۵	تقاطع بلوار دانشگاه _ خیابان محمد قاضی
۱۸:۱۵-۱۹:۱۵	۱۲:۰۰-۱۳:۰۰	تقاطع بلوار دانشگاه _ خیابان شیخ مظهر
۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	۱۱:۴۵-۱۲:۴۵	تقاطع بلوار دانشگاه _ بلوار دانشجو
۱۸:۳۰-۱۹:۳۰	۱۱:۳۰-۱۲:۳۰	تقاطع بلوار شهید بهشتی _ خیابان کرفتو
۱۸:۳۰-۱۹:۳۰	۱۱:۳۰-۱۲:۳۰	تقاطع بلوار وحدت _ خیابان سنگبران
۱۸:۴۵-۱۹:۴۵	۱۱:۴۵-۱۲:۴۵	تقاطع بلوار کردستان _ خیابان گلستان



شکل ۳. موقعیت مکانی شهرستان سقز و تقاطع‌های مورد مطالعه در این شهر

تصویر تقاطعات چهارشاخه شهری مورد مطالعه به صورت جداگانه آمده است که نام معابر هم روی هر کدام مشخص است.

همچنین موقعیت مکانی شهرستان سقز و تقاطع‌های مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است و در شکل ۴ تا شکل ۱۰ هم



شکل ۴. تقاطع بلوار کردستان - خیابان گلستان



شکل ۵. تقاطع بلوار دانشگاه - خیابان استاد هجر



شکل ۶. تقاطع بلوار دانشگاه - بلوار دانشجو



شکل ۷. تقاطع خیابان عمار یاسر - خیابان سلمان فارسی



شکل ۸. تقاطع بلوار وحدت - خیابان سنگبران



شکل ۹. تقاطع بلوار شهید بهشتی - خیابان کرفتو



شکل ۱۰. تقاطع بلوار دانشگاه- خیابان محمد قاضی

همان‌طور که در تصاویر بالا مشخص می‌شود در زمان ثبت ویدئوها با داشتن ارتفاع مناسب توسط هلی‌شات سعی بر آن شده است که ناحیه فیزیکی تقاطع و هندسه کلی تقاطع به صورت کامل در ویدئو مشخص باشد.

۳-۳- جمع‌آوری داده‌ها و استخراج متغیرها

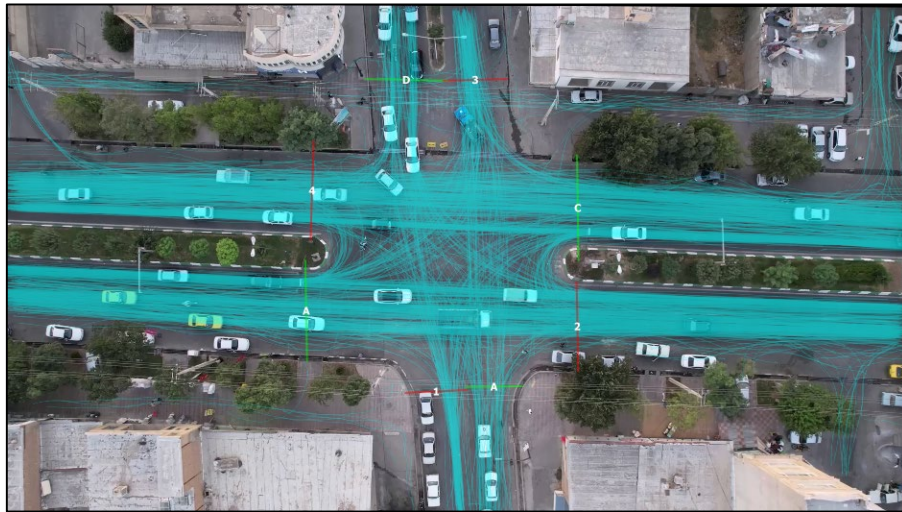
در این مطالعه، برای ضبط ویدئوها از پهپاد که از طریق یک تلفن هوشمند کنترل می‌شود، استفاده شده است. این پهپاد، قادر است فیلم‌هایی با کیفیت 4k و نرخ ثبت ۶۰ فریم در ثانیه تهیه کند و از نظر وضوح تصویر، عملکرد مناسبی ارائه می‌دهد. پس از ضبط میدانی فیلم‌ها در تقاطع‌ها، نیاز به آماده‌سازی و ویرایش آن‌ها وجود داشت. با توجه به محدودیت زمان پرواز و ظرفیت باتری پهپادها، هر بار پرواز تنها امکان ثبت حدود ۲۰ دقیقه فیلم را فراهم می‌کرد. به همین منظور، برای برش و اتصال ویدئوها، از نرم‌افزار ویرایش تصویر Camtasia 2023 استفاده شد و ویدئوها در قالب فایل‌های ۱۲ دقیقه‌ای تدوین و ذخیره شدند. در این پژوهش برای پردازش داده‌های تصویری از نرم‌افزار (DFS) Data From Sky استفاده شد. این نرم‌افزار، که بر پایه الگوریتم‌های پیشرفته بینایی ماشین و یادگیری عمیق توسعه یافته، قادر است به‌طور خودکار حرکت وسایل نقلیه را شناسایی، ردیابی و تحلیل کند. DFS امکان استخراج شاخص‌های کلیدی ترافیکی مانند سرعت، مسیر حرکت، زمان عبور و فواصل جانبی را فراهم می‌کند. یکی از مزایای برجسته این ابزار، توانایی آن در ارائه داده‌های دقیق در شرایط محیطی مختلف و پشتیبانی از تحلیل‌های ایمنی محور در تقاطع‌ها و معابر پرتراffیک است. برای ارزیابی دقت عملکرد نرم‌افزار DFS، مجموعه‌ای از روش‌های اعتبارسنجی جامع به کار گرفته شده است. در این فرآیند، حجم

ترافیک طبقه‌بندی‌شده، سرعت میانگین فضایی برای گروه‌های مختلف وسایل نقلیه و تحلیل دقیق مسیر حرکت خودروهای آزمایشی بررسی شده‌اند. جهت سنجش میزان انطباق داده‌های استخراج‌شده با واقعیت میدانی، شاخص درصد میانگین خطای مطلق محاسبه گردیده و مقایسه‌هایی میان سرعت وسایل نقلیه به‌دست‌آمده از DFS و داده‌های برداشت‌شده در محل صورت گرفته است. علاوه بر این، دقت مسیرهای حرکتی ثبت‌شده توسط این نرم‌افزار از طریق تطبیق با داده‌های موقعیت‌یابی ماهواره‌ای (GPS) در وسایل نقلیه واقعی اعتبارسنجی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که داده‌های برداشت‌شده توسط پهپاد، از دقت بسیار بالایی (بین ۹۸ تا ۱۰۰ درصد) برخوردارند و میزان خطای آن‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی در حداقل ممکن قرار دارد (Ali et al., 2024).

این نرم‌افزار بر پایه پردازش پیشرفته پیکسل‌های تصویری عمل می‌کند و به کمک تحلیل تغییرات ریزبینانه در هر پیکسل، توانایی شناسایی دقیق حرکات کاربران راه را دارد. پس از شناسایی حرکات، فرآیند کالیبراسیون آغاز می‌شود. در این مرحله، مختصات دوبعدی تصویر به مختصات واقعی جغرافیایی تبدیل می‌گردد که این امر امکان رهگیری دقیق وسایل نقلیه را در فضای واقعی فراهم می‌سازد. برای اجرای کالیبراسیون، لازم است مختصات چهار نقطه مرجع بر اساس سیستم مختصات جهانی UTM تعیین شود. با توجه به موقعیت شهرستان سقز در زون ۳۸ نیمکره شمالی این سیستم، مختصات طول (X) و عرض جغرافیایی (Y) هر نقطه باید دقیق استخراج شده و در نرم‌افزار ثبت گردد. پس از اتمام این فرآیند، پردازش و تحلیل اطلاعات بر مبنای واحدهای جهانی SI قابل انجام خواهد بود. پس از تکمیل کالیبراسیون، داده‌های مورد نیاز استخراج می‌شود که

خروجی هر رویکرد با اعداد (۱، ۲، ۳، ۴) مشخص شده‌اند که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند، حال از طریق گزینه Show Origin-Destination Statistics در بخش Analysis، می‌توان ماتریس مبدا-مقصد را استخراج و تحلیل کرد، همچنین امکان شمارش جداگانه عابران پیاده و وسایل نقلیه نیز فراهم است. برای استخراج سایر متغیرها نظیر سرعت متوسط، سرعت‌های ورودی و خروجی و مسافت کل طی شده، از گزینه Export Traffic Analysis استفاده می‌شود که در شکل ۱۲ یک نمونه از آن آورده شده است. همچنین در شکل ۱۳ یک نمونه از PET که توسط نرم افزار تشخیص داده شده به عنوان نمونه آورده شده است.

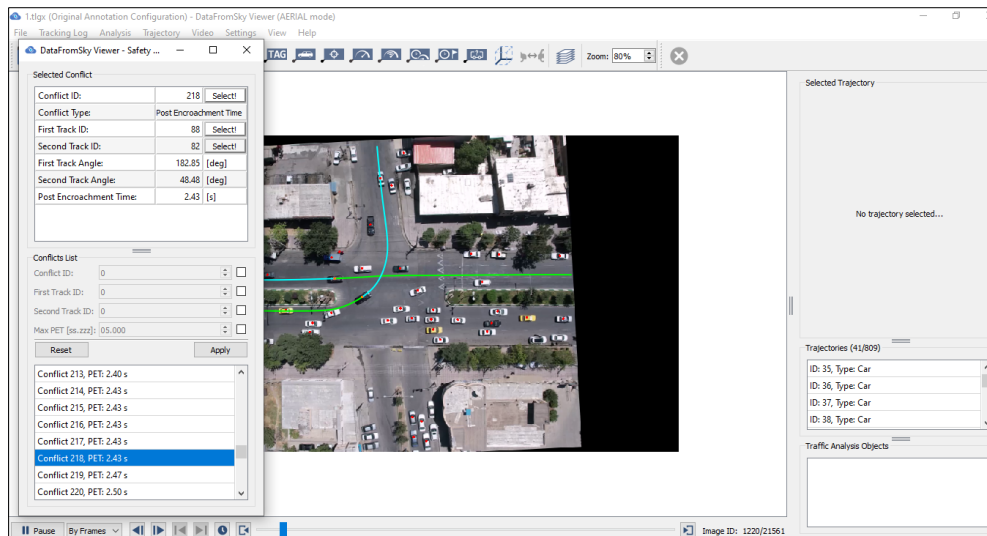
شامل متغیرهای ترافیکی، هندسی (مستقل) و شاخص ایمنی (PET) (وابسته) می‌باشد. یکی از دسته‌های کلیدی داده‌ها، متغیرهای ترافیکی هستند که با تحلیل ویدئوهای ثبت شده توسط DFS به دست می‌آیند. این متغیرها شامل مواردی مانند: حجم ترافیک تفکیک شده، میانگین سرعت کلی، سرعت‌های ورودی و خروجی، شتاب وسایل نقلیه و کل مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه در ناحیه مورد مطالعه است. برای محاسبه حجم وسایل نقلیه در هر شاخه‌ی تقاطع، نیاز به تعریف گیت‌های ورودی و خروجی می‌باشد. در هر مسیر، یک گیت ورودی و یک گیت خروجی تعریف شده است که گیت‌های ورودی با حروف (A,B,C,D) و گیت‌های



شکل ۱۱. محل قرارگیری گیت‌های ورودی و خروجی در شاخه‌های تقاطع

Survey report - Gate Statistics								
___ffmpeg.mp4	A	C	D	B	2	3	4	1
Min speed [km/h]	0.36	2.30	1.20	3.98	3.99	7.62	2.66	3.69
Max speed [km/h]	27.30	49.42	26.58	24.60	48.96	39.32	29.71	26.95
Average speed [km/h]	11.23	19.94	11.16	14.07	26.58	21.29	18.04	16.91
Car count	262	271	62	43	271	65	256	44
Medium Vehicle count	10	10	1	0	10	3	5	1
Heavy Vehicle count	10	5	0	0	10	0	4	1
Bus count	0	1	0	0	0	0	1	0
Motorcycle count	41	40	15	8	39	19	43	10
Bicycle count	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedestrian count	0	0	0	0	1	0	2	1
Tuk-Tuk count	0	1	0	0	0	0	1	0
Number of all tracked objects	323	328	78	51	331	87	312	57

شکل ۱۲. استخراج متغیرهای میانگین سرعت ورودی و میانگین سرعت خروجی



شکل ۱۳. یک نمونه از PET تشخیص داده شده توسط نرم افزار

کشیدگی قابل بررسی است. یک مدل رگرسیون خطی چندگانه دارای رابطه ۲ است.

$$Y = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \varepsilon \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، Y متغیر وابسته یا توضیح داده شده است و X_0, X_1, \dots, X_N متغیرهای مستقل هستند، $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ ضرایب رگرسیون متغیرهای مستقل می‌باشند و ε عبارت خطا با توزیع نرمال است و قسمتی را در نظر می‌گیرد که توسط متغیرهای مستقل توضیح داده نشده باشند (Wooldridge, 2016). در این تحقیق با توجه به شمارشی بودن متغیر وابسته (تعداد PET رخ داده بحرانی و بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر این تعداد) و برای بهبود برازش مدل رگرسیون خطی در داده‌های شمارشی و رفع مشکلاتی مانند واریانس ناهمسانی و چولگی توزیع، از تبدیل جذر استفاده می‌شود. این تبدیل باعث نرمال‌تر شدن باقیمانده‌ها، یکنواختی واریانس خطاها و خطی‌تر شدن رابطه بین متغیرها شده و در نتیجه دقت مدل را افزایش می‌دهد. پس از اعمال تبدیل جذر، مدل رگرسیون بر اساس تغییرات در متغیر وابسته (Y) صورت رابطه ۳ تفسیر می‌شود.

$$\Delta Y = 2\beta\sqrt{Y} + \beta^2 \quad (3)$$

در این معادله، β^2 ضریب مربوط به متغیرهای مستقل X_i در مدل تبدیل یافته است و \sqrt{Y} مقدار جذر متغیر وابسته است. این فرمول امکان تفسیر ضرایب در مقیاس اصلی Y را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که تغییر یک واحدی در X_i ، چه تغییری در Y ایجاد خواهد کرد (Kutner et al., 2005).

با توجه به مطالعات پیشین، معمولاً مقدار PET در بازه‌ای بین ۱/۵ تا ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است، که به این موضوع پرداخته شده است. بر همین اساس، در این پژوهش نیز تحلیل PET با تمرکز بر همین بازه انجام گرفته است. به منظور دقت بیشتر، PET در چهار بازه زمانی متفاوت به فاصله ۰/۵ ثانیه شامل $PET < 1.5s$, $PET < 2s$, $PET < 2.5s$, $PET < 3s$ محاسبه شده است. این روش به این دلیل انتخاب شده که در اغلب مطالعات معتبر گذشته، بازه زمانی ۱/۵ تا ۳ ثانیه به‌عنوان محدوده حساس برای تحلیل شرایط بحرانی و تعیین میزان ایمنی رفتار ترافیکی کاربران راه معرفی شده است. در نتیجه، در این پژوهش نیز پایبندی به این بازه به‌عنوان مبنای تحلیل PET در نظر گرفته شده است.

۳-۴-مدلسازی آماری

در مطالعات ایمنی ترافیک، مدلسازی آماری یکی از ابزارهای کلیدی به‌شمار می‌رود که از طریق آن می‌توان اثر عوامل مختلف بر متغیرهای هدف را ارزیابی کرد. یکی از اهداف اصلی تحلیل‌های آماری، پیش‌بینی یک یا چند متغیر بر پایه‌ی سایر متغیرهاست که تحلیل رگرسیون ابزار مهمی برای این کار به‌شمار می‌رود. رگرسیون خطی چندگانه به ما کمک می‌کند اثر همزمان چندین متغیر مستقل بر متغیر وابسته را بررسی کنیم و دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهیم. در این مدل، متغیر وابسته باید توزیع نرمال داشته باشد که با استفاده از معیارهای چولگی و

۴- نتایج و بحث

گردد. در نهایت، بر اساس نتایج، پیشنهادهایی برای اقدامات عملی و مسیرهای تحقیقاتی آینده ارائه خواهد شد. ابتدا متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل تحقیق در جدول ۲ تعریف شده است.

در این بخش از پژوهش، ابتدا نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آماری ارائه شده و سپس به بررسی و تفسیر دقیق این نتایج پرداخته می‌شود. هدف این بخش، تحلیل یافته‌ها در راستای اهداف تحقیق و پاسخ به سؤالات پژوهشی مطرح شده است. همچنین تلاش خواهد شد تا نتایج به دست آمده به طور کامل تفسیر شوند و استنباط‌های مفهومی و معناداری از آن‌ها استخراج

جدول ۲. متغیرهای وابسته و مستقل

dependent variables			Independent variables		
Variable unit	Variable Name	Variable abbreviation	Variable unit	Variable Name	Variable abbreviation
Frequency	Sqrt Frequency Post Encroachment Time	SqrtFPET< (1.5s)	Veh/time	Traffic Volume	TrV
			Km/h	Average Speed	AS
			Km/h	Average Speed Entry	ASEn
Frequency	Sqrt Frequency Post Encroachment Time	SqrtFPET< (2.0s)	Km/h	Average Speed Exit	ASEx
			m	Total Distance Traveled	TDT
			m ²	Physical Area	PhA
Frequency	Sqrt Frequency Post Encroachment Time	SqrtFPET< (2.5s)	m	Average Width Entry	AWEn
			m	Average Width Exit	AWEx
			-	U-Turn	U-T
			-	PUMP	PUMP
Frequency	Sqrt Frequency Post Encroachment Time	SqrtFPET< (3.0s)	-	Island	Is
			-	Median	MEDIAN

شده که معیار تصمیم‌گیری در این آزمون‌ها بر مبنای فرض صفر (H_0) است که بیان می‌کند توزیع داده‌ها نرمال است. چنانچه مقدار سطح معناداری بیشتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر پذیرفته می‌شود و داده‌ها نرمال در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳ که خروجی نرم‌افزار SPSS می‌باشد، مقادیر به دست آمده از آزمون‌های مذکور برای متغیر $\sqrt{FPET}1.5$ نشان‌دهنده عدم رد فرض نرمال بودن است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که متغیر وابسته پس از تبدیل، ویژگی نرمال بودن را داراست و شرایط لازم برای انجام تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره فراهم شده است.

همانطور که در جدول بالا مشاهده شد ۱۲ متغیر مستقل و ۴ متغیر وابسته در این تحقیق وجود دارد که در این تحقیق برای هر کدام از متغیرهای وابسته مدلی جداگانه ساخته شده است، یعنی ۴ مدل برای جذر مقدارهای متفاوت از PET بر اساس متغیرهای مستقل ساخته شده است. برای اجرای مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، ابتدا لازم است نرمال بودن متغیر وابسته بررسی شود. در این مطالعه، متغیر وابسته، تعداد PETهای کمتر از ۱/۵ ثانیه بوده که به دلیل ماهیت شمارشی داده‌ها، ابتدا تغییر شکل یافته و تبدیل جذر ($\sqrt{\text{}}$) روی آن اعمال شده است. جهت ارزیابی نرمال بودن متغیر تبدیل شده، از آزمون‌های کولموگروف اسمیرنوف و شاپیرو ویلک استفاده

جدول ۳. نتیجه آزمون نرمال بودن برای متغیر وابسته

Kolmogorov-Smirnov-test	Shapiro-Wilk
Sig.	Sig.
۰/۲۹۳	۰/۵۱۴

این میزان نشان‌دهنده توان نسبتاً بالای مدل در تبیین رفتار متغیر وابسته است. با این حال، حدود ۳۰ درصد از تغییرات همچنان توسط مدل پوشش داده نشده که ممکن است ناشی از متغیرهای تأثیرگذار در نظر گرفته نشده یا ناشی از خطاهای تصادفی باشد. مقدار R Square برای مدل $\sqrt{\text{PET}} < 3.0s$ ، ۰/۷۲۵ است و نشان می‌دهد در این مدل بیش از ۷۲ درصد متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شوند. نزدیکی مقدار R Square به Adjusted R Square بیانگر آن است که تعداد مشاهدات در مقایسه با تعداد متغیرهای وارد شده در مدل کافی و متناسب بوده و از بیش‌برازش جلوگیری شده است. این موضوع نشان‌دهنده اعتبار نسبی ساختار مدل و تعادل بین پیچیدگی مدل و حجم داده‌ها است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص VIF (عامل تورم واریانس) برای متغیرهای مستقل مدل همگی کمتر از ۱۰ هستند. این موضوع نشان می‌دهد که میان متغیرهای مستقل موجود، هم‌خطی چندگانه‌ی قابل توجهی وجود ندارد و رابطه‌ی خطی شدید میان آن‌ها مشاهده نمی‌شود. در نتیجه، مدل ساخته شده از این نظر قابل اعتماد و فاقد مشکل هم‌خطی است.

بعد از نرمال بودن متغیر وابسته باید معنی‌دار بودن تمامی متغیرهای مستقل به صورت تکی با متغیر وابسته بررسی شود. برای این امر باید برای هر متغیر، مدل رگرسیون خطی یک‌متغیره ساخت و باتوجه به میزان Significance به دست آمده، معنی‌دار بودن مدل را تشخیص داد که اگر مقدار Significance کمتر از ۰/۰۵ است، فرض H_0 را مبنی بر معنی‌دار نبودن متغیر رد می‌کند. پس از آن باید همبستگی کل مدل را مشخص کرد، که پس از انجام این مراحل تعدادی از متغیرهای مستقل مانند: میانگین سرعت خروجی، مسافت کل پیموده شده، مساحت ناحیه فیزیکی، میانگین عرض خروجی، وجود میانه، میانگین سرعت ورودی، میانگین سرعت، وجود سرعت‌کاه به دلایلی هم‌چون میزان همبستگی زیاد و معنی‌دار نشدن تکی متغیر در مدل حذف می‌شوند. در جدول ۴ نتایج حاصل از مدل رگرسیون ارائه شده آورده شده است که در ادامه، به تفسیر و بررسی هر یک از شاخص‌های اصلی آن پرداخته می‌شود.

مقدار ضریب تعیین (R Square) برای مدل $\sqrt{\text{PET}} < 1.5s$ برابر با ۰/۷۰۱ گزارش شده است که نشان می‌دهد مدل قادر بوده است حدود ۷۰ درصد از تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهد.

جدول ۴. نتایج تخمین ضرایب متغیرهای مدل‌های $\sqrt{\text{FPET}}$ در spss

متغیرها	ضریب (β)	سطح معناداری (Sig)	VIF	مدل
ثابت مدل	۶/۵۳	<۰/۰۰۱		SqrtFPET(1.5s)
TrV	۰/۰۳۴	<۰/۰۰۱	۱/۹۷۴	
AWEn	-۰/۳۱	۰/۰۰۱	۵/۱۳۸	
U-T	-۲/۵	<۰/۰۰۱	۵/۴۹۲	
Is	۰/۵۷	<۰/۰۰۱	۱/۴۳۹	
Adj R-Square=۰/۶۹۶		R-Square=۰/۷۰۱		
ثابت مدل	۷/۱۵	<۰/۰۰۱		SqrtFPET(2.0s)
TrV	۰/۰۳۸	<۰/۰۰۱	۱/۹۷۴	
AWEn	-۰/۳۲	۰/۰۰۳	۵/۱۳۸	
U-T	-۲/۷۷	<۰/۰۰۱	۵/۴۹۲	
Is	۰/۶۰	<۰/۰۰۱	۱/۴۳۹	
Adj R-Square=۰/۷۰۸		R-Square=۰/۷۱۲		

	<۰/۰۰۱	۷/۷۳	ثابت مدل	
۱/۹۷۴	<۰/۰۰۱	۰/۰۴۲	TrV	SqrtFPET(2.5s)
۵/۱۳۸	۰/۰۰۳	-۰/۳۴	AWEEn	
۵/۴۹۲	<۰/۰۰۱	-۳/۰۱	U-T	
۱/۴۳۹	<۰/۰۰۱	۰/۷۴	Is	
R-Square=۰/۷۲۲		Adj R-Square=۰/۷۱۷		
	<۰/۰۰۱	۷/۸۷	ثابت مدل	
۱/۹۷۴	<۰/۰۰۱	۰/۰۴۵	TrV	SqrtFPET(3.0s)
۵/۱۳۸	۰/۰۰۹	-۰/۳۲	AWEEn	
۵/۴۹۲	<۰/۰۰۱	-۳/۲۰	U-T	
۱/۴۳۹	<۰/۰۰۱	۰/۷۷	Is	
R-Square=۰/۷۲۵		Adj R-Square=۰/۷۲۰		

ورودی هر رویکرد از تقاطع، تعداد تداخلات بحرانی شاخص زمان پس از تخطی کاهش می‌یابد و همچنین دوربرگردان‌های موجود در تقاطعات موجب کاهش تعداد تداخلات می‌شوند و نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که وجود جزیره در تقاطعات چهار شاخه چراغ‌دار موجب افزایش شاخص زمان پس از تخطی می‌شود.

حال می‌توان گفت که با توجه به جدول ۴ با افزایش متغیر مستقل حجم ترافیکی متغیر وابسته یعنی تعداد تداخلات بحرانی شاخص زمان پس از تخطی افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه این ضریب برای تعداد تداخلات بحرانی زیر ۱/۵ ثانیه کمتر از از تعداد تداخلات زیر ۳ ثانیه است پس طبیعتاً تاثیر این متغیر بر تداخلات زیر ۳ ثانیه بیشتر از سایر مقادیر بحرانی است. با توجه به آن می‌توان استنباط کرد با افزایش میانگین عرض

جدول ۵. میانگین جذر ($\sqrt{Y_{PET}}$) شاخص زمان پس از تخطی برای مقادیر (۱/۵ و ۲/۰ و ۲/۵ و ۳/۰) ثانیه

average of sqrtPET($\sqrt{Y_{PET}}$)	PET Range($\frac{m}{s^2}$)
۳/۴۲	PET(1.5s)
۳/۸۱	PET(2.0s)
۴/۱۶	PET(2.5s)
۴/۵۰	PET(3.0s)

جدول ۶. ضرایب واقعی متغیرهای مستقل مدل

FPET(3.0)	FPET (2.5)	FPET(2.0)	FPET(1.5)	
۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۲۱	TrV
-۲/۷۸	-۲/۱۵	-۲/۳۴	-۲/۲۷	AWEEn
-۱۸/۵۶	-۱۵/۹۸	-۱۳/۴۳	-۱۰/۸۵	U-T
۷/۵۲	۶/۷۰	۴/۹۳	۴/۲۲	Is
۰/۷۲۵	۰/۷۲۲	۰/۷۱۲	۰/۷۰۱	R-Square

تداخل بحرانی می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت این شاخص نسبت به تغییرات حجم عبوری است. همچنین، متغیر عرض ورودی تقاطع نقش مهمی در کاهش تداخلات بحرانی شاخص زملن پس از تخطی دارد؛ به طوری که با هر یک متر افزایش در عرض شاخه ورودی، می‌توان گفت که تداخلات بحرانی ای انتظار داشت حدود ۱۲ تا ۱۶ درصد تعداد تداخلات کاهش یابد. یکی دیگر از متغیرهای مؤثر، وجود دوربرگردان در محدوده تقاطع است. طبق ضریب منفی آن، دوربرگردان می‌تواند در طول بازه زمانی مطالعه، حدود ۱۸ تداخل بحرانی ($PET < 3s$) را کاهش دهد از سوی دیگر، وجود جزیره ترافیکی در تقاطع با ضریب مثبت همراه است که نشان‌دهنده افزایش تداخلات بحرانی در این شرایط می‌باشد. این اثر احتمالاً به دلیل کاهش میدان دید یا افزایش پیچیدگی هندسی تقاطع است. در نهایت، با بررسی مقادیر ضریب تعیین (R-Square) برای هر مدل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مربوط به PET کمتر از ۳ ثانیه برازش بهتری داشته و توانایی بیشتری در توضیح تغییرات متغیر وابسته نسبت به مدل‌های دیگر دارد.

در ادامه با توجه به رابطه ۳ ضرایب اصلی متغیر دقیق حساب شده است و مقدار تغییرات به صورت دقیق آمد است. باتوجه به این رابطه ($\Delta Y = 2\beta\sqrt{Y} + \beta^2$) و مقادیر میانگین که برای ۴ مقدار مختلف در جدول ۵ به دست آمده‌اند که با توجه به این مقادیر می‌توان مقدار تغییر متغیر اصلی یعنی تعداد شاخص زمان پس از تخطی را با توجه به ضرایب متغیرهای مستقل به دست آورد. در جدول ۶، ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل در چهار مدل مختلف آورده شده است و تأثیر هر متغیر بر اساس آستانه‌های مختلف شاخص زمان پس از تخطی (PET) تحلیل شده است. طبق نتایج به دست آمده، مشخص می‌شود که با کاهش آستانه زمانی در شاخص PET، متغیر حجم ترافیک تأثیر بیشتری بر تعداد تداخلات بحرانی دارد. به عبارت دیگر، افزایش هر واحد در تعداد وسایل نقلیه سواری، تعداد تداخلات بحرانی با PET کمتر از ۳ ثانیه را حدود ۱/۹۵ برابر بیشتر از تداخلات با PET کمتر از ۱/۵ ثانیه افزایش می‌دهد. در مدل مربوط به تداخلات با PET کمتر از ۳ ثانیه، افزایش هر یک واحد وسیله نقلیه سواری ۰/۴۱ تعداد تداخلات زیر ۳ ثانیه را افزایش می‌دهد به عبارتی دیگر افزایش ۱۰۰ وسیله نقلیه سواری باعث افزایش تقریبی ۴۱

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش شده تا تأثیر ویژگی‌های هندسی و وضعیت جریان ترافیکی بر سطح ایمنی عبور و مرور در تقاطع‌های چهارراهی واقع در مناطق شهری بررسی شود. ارزیابی این موضوع از طریق تحلیل یک شاخص رفتاری مرتبط با ایمنی با عنوان شاخص زمان پس از تخطی (PET) صورت پذیرفته است. به منظور جمع‌آوری داده‌های دقیق و میدانی، از تصویربرداری هوایی در هفت تقاطع استفاده شد. اطلاعات به دست آمده، پس از پردازش و استخراج شاخص‌های مدنظر، در قالب چند مدل آماری بر پایه رگرسیون خطی چندمتغیره مورد تحلیل قرار گرفتند. این تحلیل‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار SPSS اجرا شد و هدف آن شناسایی رابطه میان متغیرهای مستقل (نظیر حجم ترافیک، عرض معبر و ...) با رفتارهای ناایمن رانندگی بود. در این بخش، نتایج به دست آمده به صورت عددی و توصیفی ارائه می‌شوند تا برداشت روشنی از تأثیر هر عامل فراهم گردد. بررسی نتایج مربوط به متغیر حجم ترافیک (TrV) نشان داد که افزایش هر واحد وسیله نقلیه سواری می‌تواند مقدار PET را افزایش دهد، هر چند که باتوجه به ضرایب می‌توان گفت تأثیر

این متغیر بر مقادیر مختلف از این شاخص به صورت $PET_{3.0} < PET_{2.5} < PET_{2.0} < PET_{1.5}$ می‌باشد، به نحوی که افزایش یک واحد وسیله نقلیه سواری تعداد تداخلات بحرانی شاخص PET کمتر از ۳ ثانیه را تقریباً ۲ برابر بیش‌تر از تعداد تداخلات کمتر از ۱/۵ ثانیه افزایش می‌دهد.

افزایش ۱ واحد متغیر حجم ترافیک (TrV) یعنی افزایش یک واحد وسیله نقلیه سواری می‌تواند تعداد تداخلات بحرانی شاخص PET کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه را به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۹، ۰/۳۵ و ۰/۴۱ افزایش دهد (حدوداً ۱/۶ درصد).

تأثیر متغیر میانگین عرض ورودی هر شاخه (AWEn) بر تعداد تداخلات بحرانی شاخص PET به صورت کاهشی می‌باشد، و افزایش هر ۱ متر عرض ورودی تعداد تداخلات بحرانی PET کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ و ۳/۰ ثانیه را به ترتیب ۲/۲۷، ۲/۳۴، ۲/۱۵ و ۲/۷۸ کاهش می‌دهد یعنی به ترتیب ۱۶ و ۱۴ و ۱۳ و ۱۱ درصد. تأثیر وجود دوربرگردان (U-T) بر روی شاخص PET معنی‌دار می‌باشد و وجود این متغیر اثر کاهشی بر تعداد تداخلات دارد، همچنین باتوجه به ضرایب مدل‌سازی مستخرج از نرم‌افزار

می‌باشد و اثر این متغیر افزایشی است و باتوجه به ضرایب متغیر و همچنین تعداد کل تداخلات می‌توان استنباط کرد که وجود جزیره تعداد تداخلات بحرانی شاخص زمان پس از تخطی کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۳/۰ و ۴/۰ ثانیه را به ترتیب در هر بازه زمانی ۴، ۵، ۶ و ۷ عدد افزایش می‌دهد.

SPSS و تعداد کل تداخلات به‌دست‌آمده از نرم‌افزار DFS می‌توان دریافت که وجود دوربرگردان تعداد تداخلات بحرانی شاخص PET کمتر از ۱/۵، ۲/۰، ۳/۰ و ۴/۰ ثانیه را به ترتیب در هر بازه زمانی ۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۱۸ عدد کاهش دهد. داده‌های به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این موضوع است که تأثیر وجود جزیره (Is) در تقاطعات چراغ‌دار بر روی شاخص PET معنی‌دار

۶- مراجع

traffic conflicts. *Journal of Transportation Engineering*, 138(12), 1453-1467 .
-Chandler, B. E., Myers, M., Atkinson, J. E., Bryer, T., Retting, R., Smithline, J., Trim, J., Wojtkiewicz, P., Thomas, G. B., & Venglar, S. P. (2013). *Signalized intersections Informational Guide* .
-Chaudhari, A., Gore, N., Arkatkar, S., Joshi, G., & Pulugurtha, S. (2021). Exploring pedestrian surrogate safety measures by road geometry at midblock crosswalks: A perspective under mixed traffic conditions. *IATSS Research*, 45(1), 87-101.
-Essa, M., & Sayed, T. (2020). Comparison between surrogate safety assessment model and real-time safety models in predicting field-measured conflicts at signalized intersections. *Transportation Research Record*, 2674(3), 100-112 .
-Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger .
-Islam, Z., Abdel-Aty, M., Goswamy, A., Abdelraouf, A., & Zheng, O. (2022). Modelling the relationship between post encroachment time and signal timings using UAV video data. *Arxiv Preprint arXiv:2210.05044* .
-Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. McGraw-hill .
-Laureshyn, A. (2010). Application of automated video analysis to road user behaviour .
-Li, P., Abdel-Aty, M., & Yuan, J. (2021). Using bus critical driving events as

-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* .
-Allen, B. L., Shin, B. T., & Cooper, P. J. (1978). *Analysis of Traffic Conflicts and Collisions* .0361-1981.
-Ansariyar, A., Ardeshiri, A., & Jeyhani, M. (2023). Investigating the collected vehicle-pedestrian conflicts by a LIDAR sensor based on a new Post Encroachment Time Threshold (PET) classification at signalized intersections. *Advances in Transportation Studies* .
-Archer, J. (2005). *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A Study of Urban and Suburban Intersections* KTH.
-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 .
-Billah, K., Adegbite, Q., Sharif, H. O., Dessouky, S & Simcic, L. (2021). Analysis of intersection traffic safety in the city of San Antonio, 2013–2017. *Sustainability*, 13(9), 5296 .
-Caliendo, C., & Guida, M. (2012). Microsimulation approach for predicting crashes at unsignalized intersections using

lifestyle on their risky behavior and road traffic accident risk. *Journal of Transportation Safety & Security*, 12(3), 400-418 .

-Stipancic, J., Miranda-Moreno, L., Saunier, N., & Labbe, A. (2018). Surrogate safety and network screening: Modelling crash frequency using GPS travel data and latent Gaussian Spatial Models. *Accident Analysis & Prevention*, 120, 174-187.

-Tarko, A. P. (2018). Estimating the expected number of crashes with traffic conflicts and the Lomax Distribution—A theoretical and numerical exploration. *Accident Analysis & Prevention*, 113, 63-73 .

-Vedagiri, P., & Killi, D. V.(2015) .Traffic safety evaluation of uncontrolled intersections using surrogate safety measures under mixed traffic conditions. *Transportation Research Record*, 2512(1), 81-89 .

-Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory Econometrics: A Modern Approach 6rd ed* . Cengage learning .

-Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(7), 633-641.

surrogate safety measures for pedestrian and bicycle crashes based on GPS trajectory data. *Accident Analysis & Prevention*, 150, 105924 .

-Organization, W. H. (2023). Global status report on road safety 2023: *summary*. *World Health Organization* .

-Paul, M., & Ghosh, I. (2018). Speed-based proximal indicator for right-turn crashes at unsignalized intersections in India. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(6), 04018024 .

-Paul, M., & Ghosh, I. (2020). Post encroachment time threshold identification for right-turn related crashes at unsignalized intersections on intercity highways under mixed traffic. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 27(2), 121-135 .

-Peesapati, L. N., Hunter, M. P & ,Rodgers, M. O. (2013). Evaluation of postencroachment time as surrogate for opposing left-turn crashes. *Transportation Research Record*, 2386(1), 42-51 .

-Prajongkha, P., Kanitpong, K., & Jensupakarn, A. (2023). Factors contributing to the severity of motorcycle rear-end crashes in Thailand. *Traffic Injury Prevention*, 24(1), 89-93 .

-Stanojević, D., Stanojević, P., Jovanović, D., & Lipovac, K. (2020). Impact of riders'

Modeling the Impact of Geometric and Traffic Characteristics on Critical Conflicts at Signalized Four-Leg Intersections Using the Post-Encroachment Time Indicator

Kamran Sarvari, M.Sc., Stud., 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: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

With the significant increase in population in urban areas and the continuous growth in the use of vehicles, traffic infrastructure is more in need of enhancement and revision than ever before to improve safety levels. In this regard, urban intersections, as one of the most sensitive and congested parts of the urban transportation network, play a crucial role in ensuring the safe and smooth movement of both vehicles and pedestrians. Due to the concentration of high traffic volumes, these points are more prone to conflicts, reduced safety levels, and the occurrence of risky traffic behaviors compared to other parts of the network. The increase in traffic volume in these areas can further create conditions conducive to accidents and unsafe situations. Therefore, identifying the factors influencing the safety of these intersections is essential for enhancing the quality of urban transportation services. In this study, data related to the geometric and traffic characteristics of seven signalized urban intersections were collected and analyzed. To obtain accurate information, aerial imaging techniques were used to record video footage at each of these intersections. The recorded images were then analyzed using image processing software. Additionally, the number of critical conflicts and post-encroachment time (PET) events at these intersections were calculated. A total of 20,412 events were considered for this traffic indicator. The results of statistical analysis, obtained using a multiple linear regression model, show that an increase of one unit in traffic volume can lead to a 1.6% increase in the number of critical conflicts. Furthermore, the analyses indicate that an increase of one meter in the average entrance width of intersections can increase the number of critical conflicts by approximately 11 to 16%.

Keywords: Safety Four-Leg Signalized Intersections, Post-Encroachment Time, Performance Analysis, Image Processing, Traffic Conflicts