

ارزیابی اثر تجهیزات هوشمند حمل و نقل بر ایمنی ترافیک با استفاده از مدل‌های پواسون و دوجمله‌ای منفی در جاده سراسری رامسر-گرگان

مقاله علمی-پژوهشی

اسفندیار حیدری کانی، دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*علی نادران (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علیرضا سرکار، استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: naderan@iaui.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱

صفحه ۲۷۰-۲۵۳

چکیده

به کارگیری سامانه‌های هوشمند حمل و نقل یکی از مؤثرترین مداخلات برای ارتقای ایمنی جاده‌ای محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر تجهیزات هوشمند شامل دوربین‌های کنترل سرعت، تابلوهای پیام‌متغیر و سامانه توزین در حرکت بر فراوانی تصادفات در محورهای پرتردد استان‌های مازندران و گلستان انجام شد. داده‌های شش‌ساله (۱۳۹۲-۱۳۹۷) شامل ۱۶۰۶۶۹ تصادف ثبت شده، متوسط سالانه تردد روزانه و اطلاعات دقیق محل نصب تجهیزات هوشمند حمل و نقل استخراج و تحلیل گردید. برای مدل‌سازی، از رگرسیون پواسون و دوجمله‌ای منفی به عنوان دو رویکرد معتبر در مدل‌سازی داده‌های شمارشی استفاده شد. نتایج نشان داد نصب دوربین‌ها اثر کاهشی معناداری بر تعداد تصادفات بویژه در فاصله کم از محل نصب دوربین‌ها دارد، طوریکه در اکثر مدل‌ها درصد کاهش قابل توجهی مشاهده شده است. سامانه WIM برخلاف انتظار، موجب افزایش تصادفات بویژه در فاصله بسیار نزدیک محل نصب این نوع تجهیزات شده که نتیجه رفتار غیر متعارف و مانورهای ناگهانی رانندگان بعضی از وسایل نقلیه سنگین جهت اختلال در عملکرد سامانه است. با این حال، مدل دوجمله‌ای منفی برآزش بهتری نسبت به پواسون ارائه داد و به عنوان مدل معتبرتر و قابل اتکاتر برای تحلیل داده انتخاب شد. یافته‌ها نشان می‌دهد توسعه و مدیریت درست هوشمند حمل و نقل، بویژه دوربین‌های ثبت تخلف، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای ایمنی جاده‌ای داشته باشد. اما بهره‌برداری از سامانه WIM نیازمند بازطراحی، آموزش و نظارت تکمیلی است. در پایان، پیشنهادی سیاستی و اجرایی برای بهبود عملکرد سیستم‌های هوشمند حمل و نقل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ایمنی ترافیک، تحلیل قبل-بعد، سامانه‌های هوشمند حمل و نقل، مدل‌های رگرسیون

۱- مقدمه

تصادفات جاده‌ای علاوه بر هزینه‌های مستقیم انسانی و درمانی، پیامدهای اقتصادی بلندمدتی بر نظام سلامت، صنعت بیمه، کارآمدی نیروی کار و تولید ناخالص داخلی برجای می‌گذارند (Høye, 2014). رشد قابل توجه حجم سفرها، افزایش وابستگی خانوارها به خودرو شخصی، توسعه نامتوازن نواحی شهری و برون‌شهری و شکل‌گیری الگوهای جدید سکونت و کاربری زمین موجب شده است شبکه‌های راه در دهه‌های اخیر

ایمنی ترافیک یکی از ارکان بنیادین توسعه حمل و نقل و زیربنای عملکرد پایدار شبکه‌های جاده‌ای در هر کشوری است. اهمیت این مقوله صرفاً به کاهش تلفات انسانی محدود نمی‌شود، بلکه آثار گسترده‌ای بر بهره‌وری اقتصادی، عدالت اجتماعی، پایداری محیط‌زیست و تاب‌آوری زیرساخت‌های حمل و نقل دارد. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، سیاست‌های ایمنی راه به عنوان یک حوزه راهبردی و بین‌بخشی تلقی می‌شود؛ زیرا

با فشار فزاینده تقاضا مواجه شوند. این فشار در کنار رفتارهای پرخطر بخشی از کاربران راه، از جمله سرعت غیرمجاز، سبقت‌های نایمن، عدم رعایت فاصله طولی و خستگی رانندگان، بستر بروز انواع تصادفات ترافیکی را فراهم کرده و لزوم بهره‌گیری از ابزارهای مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته نظارت ترافیکی برای مدیریت ایمنی و کنترل رفتار کاربران را به ضرورتی ناگزیر تبدیل کرده است (Guerra, 2024; Tilahun, 2023).

در این میان، سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل از مهم‌ترین ابزارهای ارتقای ایمنی ترافیک محسوب می‌شوند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های ارتباطی، حسگرهای برخط و سازوکارهای نظارتی، امکان پایش لحظه‌ای جریان ترافیک، کنترل تخلفات، مدیریت سرعت و اطلاع‌رسانی پیشگیرانه را فراهم می‌کنند (Ghasemi Noghayi, 2014; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

در بین اجزای مختلف ITS، دوربین‌های کنترل سرعت، تابلوهای پیام متغیر (VMS) و سامانه‌های توزین در حرکت (WIM) به دلیل اثر مستقیم بر رفتار رانندگان و پویایی جریان ترافیک، جایگاه ویژه‌ای دارند (Spyropoulou, Antoniou, 2014; Lagoa, Galvão, Ferreira, 2024). دوربین‌های کنترل سرعت از مؤثرترین ابزارهای سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند به شمار می‌روند و پژوهش‌های متعدد بین‌المللی اثر مثبت آن‌ها را در کاهش سرعت‌های خطرناک، یکنواخت‌سازی جریان عبوری و کاهش تعداد و شدت تصادفات تأیید کرده‌اند. رانندگان معمولاً قبل از رسیدن به دوربین با پیش آگاهی از سرعتشان می‌کاهند (Pourebrahim et al., 2024). شواهد نشان می‌دهد نصب این دوربین‌ها می‌تواند به کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی تصادفات منجر شود و این اثر در برخی کشورها حتی بیش از ۶۰ درصد گزارش شده است (Moore-Ritchie, Kienitz, Sohrweide, 2023; Tilahun, 2023). با این حال، میزان اثربخشی واقعی آن‌ها به عواملی مانند شرایط هندسی مسیر، حجم ترافیک، سطح آگاهی رانندگان، کیفیت اطلاع‌رسانی و شیوه اعمال و پیگیری قانونی تخلفات بستگی دارد (Høye, 2014). در ایران نیز مطالعات متعددی اثر نصب دوربین‌های کنترل سرعت و دیگر سامانه‌های هوشمند را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که رفتار

رانندگان در مواجهه با دوربین‌ها و تأثیر آن بر متغیرهای تصادف قابل اندازه‌گیری است (Pourebrahim, et al., 2024) و تحلیل سری زمانی تصادفات در آزادراه‌ها نیز تغییرات آماری معناداری را پس از نصب دوربین‌ها گزارش کرده است (Taghizadeh, Rahimi, Afkar, 2023). همچنین، مطالعات کنفرانسی داخلی نیز کاهش تخلفات سرعت و تصادفات جرحی-فوتی در حضور دوربین‌های کنترل سرعت را تأیید کرده‌اند (Ghasemi Saghand, Amin, Khodaei, 2025). اگرچه توسعه سامانه‌های نظارتی طی سال‌های اخیر افزایش یافته است، اما تعداد اندکی از پژوهش‌های داده‌محور، براساس مدل‌های آماری، تأثیر این تجهیزات را در مقیاس شبکه‌ای تحلیل کرده‌اند (Afandizadeh, Javanshir, shamanian, 2015).

تابلوهای پیام متغیر نیز به‌عنوان ابزارهای اطلاع‌رسانی لحظه‌ای، نقش مهمی در مدیریت سرعت، هشداردهی پیشگیرانه و کاهش عدم قطعیت تصمیم‌گیری رانندگان ایفا می‌کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند پیام‌های هدفمند، موقعیت‌محور و پیش‌بینی‌شده VMS می‌تواند نوسانات سرعت را کاهش داده و احتمال بروز تصادفات زنجیره‌ای را تا حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد (Lagoa, Galvão, Ferreira, 2024; Kaye, et al., 2024).

سامانه‌های توزین در حرکت اگرچه اساساً با هدف کنترل اضافه‌بار و حفاظت روسازی طراحی شده‌اند، اما پژوهش‌ها نشان می‌دهند این سامانه‌ها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر ایمنی ترافیک نیز اثرگذار باشند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اثر آن‌ها بر رفتار رانندگی نیازمند توجه جدی به ملاحظات مهندسی، طراحی مناسب و مدیریت صحیح بهره‌برداری است (Haugen, et al., 2015; Jacob, Beaumelle, 2010; Hagmanns, 2024). در عین حال، رفتار رانندگان وسایل نقلیه سنگین هنگام نزدیک‌شدن به ایستگاه‌های WIM، نظیر کاهش سرعت ناگهانی یا تغییر خط، در صورت طراحی و بهره‌برداری نامناسب می‌تواند پیامدهای ناخواسته ایمنی ایجاد کند (Karkowski, Rafalski, 2014; Al-Janabi, Abbasr, 2024; Yang, et al., 2024; Kim, et al., 2024).

با این حال، اغلب مطالعات دارای محدودیت در مقیاس تحلیلی و دوره زمانی بوده‌اند و کمتر پژوهشی به‌صورت ترکیبی و شبکه‌محور به ارزیابی سه فناوری ITS پرداخته است. همچنین،

جدید نیز نشان می‌دهد اثرات دوربین‌های ثبت سرعت به شدت وابسته به نحوه استقرار، گستره پوشش، سازوکار اجرای قانون و شرایط شبکه‌ای است و در برخی مطالعات اخیر، بر اهمیت تحلیل‌های قبل-بعد و مدل‌های شمارشی برای سنجش پایدار اثرات تأکید شده است (Tilahun, 2023; Guerra, 2024; Smith, 2025).

در ارزیابی تأثیر دوربین‌های کنترل سرعت با جریمه رانندگان خاطی، دریافتند که استفاده از این تجهیزات باعث افزایش قابل توجه ایمنی جاده‌ها می‌شود و برآورد شده است که نصب یک دوربین اضافه، تعداد ۱/۱۳ تصادف، ۰/۳۳ جرحی شدید و نجات جان ۰/۱۹ نفر و سود خالص حدود ۲۱ میلیون پوند به همراه دارد. این اثرات تا حد زیادی در فاصله ۰ تا ۵۰۰ متری دوربین دیده شده‌اند و امکان بازگشت مجدد تصادف در فواصل دورتر از دوربین به دلیل افزایش سرعت رانندگان فراتر از محدوده نظارت وجود دارد (Tang, 2017; Wilson et al., 2010). در ارزیابی اثرات دوربین‌های ایمنی در مکان‌های خاص می‌توان با استفاده از روش تغییر در تعداد تصادفات و تغییر در سرعت خودرو قبل و بعد از نصب و تغییرات در تشخیص تخلفات از زمان نصب به بعد انجام داد. با رصد بسیاری از سایت‌های دوربین ایمنی برای مدت زمان طولانی، می‌توان تأثیر دوربین‌های ایمنی را بررسی کرد، اما همواره فاکتورهای دیگری وجود دارند که ممکن است هرگونه تغییر مشاهده‌شده را توضیح دهند (Tavakkoli, et al., 2022). دوربین‌های مداربسته تعداد تصادفات را تا حدود ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و این اثر با افزایش فاصله از مکان دوربین کاهش می‌یابد (Høye, 2014). همچنین در ارزیابی اثربخشی دوربین‌های کنترل سرعت و بررسی و آنالیز وضعیت مناطق جاده‌ای مشابه بدون دوربین در طول دوره مطالعه، کاهش میانگین سرعت‌ها و کاهش نسبت رانندگان خاطی و کاهش تعداد تصادفات در مناطق دارای دوربین گزارش شده است و مطالعات طولانی‌مدت نشان داده‌اند روندهای مثبت حفظ شده یا با گذشت زمان بهبود یافته‌اند. این مطالعات در کشورهای در سطح درآمد پایین ضرورت دارد (Wilson et al., 2010). در جمع‌بندی ادبیات جدید نیز، ضمن تکرار این یافته‌ها، به اهمیت عدالت اجرایی، مقبولیت اجتماعی و طراحی برنامه‌های نظارت خودکار برای حفظ اثرگذاری بلندمدت اشاره می‌شود (Smith, 2025; Tavakkoli, et al., 2022).

تحلیل‌های مبتنی بر مدل‌های پیشرفته شمارشی مانند پواسون و دوجمله‌ای منفی به‌ویژه در ارتباط با اثرات سامانه‌های WIM و VMS بسیار محدود است. بر این اساس، مطالعه حاضر با دو هدف اصلی ارزیابی اثر فناوری‌های ITS شامل دوربین کنترل سرعت، WIM و VMS بر فراوانی و شدت تصادفات در محورهای استان‌های مازندران و گلستان، و مقایسه عملکرد مدل‌های پواسون و دوجمله‌ای منفی برای تعیین مناسب‌ترین مدل در تحلیل داده‌های شمارشی تصادفات طراحی شده است. از این رو، مطالعه حاضر در پی رفع خلأ موجود در ادبیات ملی از طریق تحلیل داده‌های واقعی است.

۲- پیشینه تحقیق

ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای یکی از موضوعات محوری در ادبیات حمل‌ونقل است و بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها به بررسی نقش عوامل مداخله‌گر رفتاری، اجزای هندسی و فناوریانه در شکل‌گیری تصادفات پرداخته‌اند. مطالعات فراتحلیلی و تجربی نشان می‌دهد سهم قابل‌توجهی از تصادفات ناشی از سرعت غیرمجاز، تصمیم‌گیری‌های رانندگان در شرایط عدم قطعیت و نبود سامانه‌های کنترلی کارآمد است (Elvik, 2019; Wilson et al., 2010). در پژوهش‌های جدیدتر نیز، ضمن تأکید بر نقش مداخلات کنترلی و فناوری‌های نظارتی، بر ضرورت ارزیابی‌های داده‌محور و مقایسه‌ای در مقیاس شبکه‌ای و در دوره‌های زمانی جدیدتر تأکید شده است (Elvik, 2019; guel, 2019). به همین دلیل، کشور‌های مختلف رویکرد سیستماتیک‌تری را در بهره‌گیری از سامانه‌های ITS برای مدیریت رفتار و کاهش ریسک تصادف اتخاذ کرده‌اند.

دوربین‌های کنترل سرعت یکی از مؤثرترین فناوری‌های ITS محسوب می‌شوند و تقریباً در همه کشورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک مرور فراتحلیلی نشان می‌دهد این دوربین‌ها معمولاً موجب کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی تصادفات می‌شوند (Elvik, 2019). پژوهش‌هایی این یافته را در مقیاس‌های گسترده‌تر تأیید کرده‌اند (Keall, Povey, Frith, 2001; Cameron & Delaney, 2008).

برخی مطالعات، کاهش اثربخشی دوربین‌ها در سال‌های بعد از گزارش کرده‌اند؛ موضوعی که معمولاً به سازگاری رانندگان با محل نصب یا تغییرات حجم ترافیک ارتباط داده شده است (Vadeby, Howard, 2024). در همین راستا، شواهد

احتمال زیاد درگیر تصادف و عواقب شدید آن نسبت به یک کامیون با بار مجاز است (Jacob, et al., 2010). اثر وجود سیستم توزین در حرکت در مسیر انتخابی رانندگان با بار اضافه، بارز است و پیش بینی می شود که این سیستم توانایی کاهش ریسک تصادفات را دارد (Haugen et al., 2016). در یک بررسی نقش WIM در تصادفات در ایران، کاهش احتمال تصادف در محل توزین و نقش آن با نصب این تجهیزات برای احتمال کاهش تصادفات در نظر گرفته است (Rahimoff et al., 2014). این سامانه ها اگر چه برای مدیریت اضافه بار و حفاظت روسازی طراحی شده اند، اما رفتار رانندگان قبل از ورود به ایستگاه می تواند پیامدهای ناخواسته ای ایجاد کند. مشاهده شده که برخی رانندگان کامیون برای جلوگیری از ثبت اضافه بار، رفتارهایی مانند کاهش سرعت شدید یا تغییر خط انجام می دهند که این امر احتمال برخورد های عقب به عقب و ناهمگونی جریان ترافیک را افزایش می دهد (Al-Janabi, Abbas, 2024). مطالعات جدید تر نیز در کنار تأکید بر دقت اندازه گیری و کیفیت داده های WIM، بر تحلیل داده محور WIM برای پایش ریسک و طراحی عملیاتی بهتر (مثلاً ورودی/خروجی و علائم پیش آگاهی) تأکید کرده اند (Iervolino et al., 2023; Yang et al., 2024; Kim et al., 2024).

تابلوهای پیام متغیر، شرایط و اطلاعات تأثیر گذار در جریان ترافیکی را در اختیار رانندگان برای تصمیم گیری در عکس العمل های لازم از برآیند اطلاعات از قبیل هدایت، هشدار تصادف در مسیر و یا یک نقطه خاص، قرار دهند. این تجهیزات با استفاده از امکان ارتباطات در محیط های خودرویی، خودروهای گشت راهداری و یا پلیس راه می توانند در حین حرکت و براساس مشاهده شرایط و پدیده های ترافیکی، اطلاعات لازم برای آگاهی عموم خودروها را بر روی تابلوهای پیام نمای متغیر ارسال نمایند (Rostami et al., 2014). در بررسی نقش VMS، کاهش عدم قطعیت محیطی و کمک به تصمیم گیری لحظه ای رانندگان دیده شده است و پیام های هدفمند VMS موجب افزایش تبعیت رانندگان از مقررات و کاهش نوسانات سرعت می شود (Haghighi, Amirsoleimani, Sheykhfard, 2021). همچنین، پیام های هشدار دهنده دقیق می تواند میانگین سرعت را ۷ تا ۱۲ درصد کاهش دهد (Pérez et al., 2023). مطالعات ایرانی

دوربین های کنترل ترافیک برای مدیریت ترافیک و بررسی عملکرد آن بدلیل داشتن برد مکانی محدود در قطعات قبل و بعد از محل نصب دوربین، می تواند علاوه بر نقاط حادثه خیز، توان برآورد مناطق حادثه خیز را نیز داشته باشند (Hasaninasa, Sharifi Rad, Zahedi, 2018). یافته ها نشان می دهد که اجرای برنامه های دوربین کنترل سرعت با کاهش میانگین سرعت، تعداد تصادفات کاهش می یابد. دوربین های کنترل سرعت یک مداخله موثر برای کاهش رفتار سرعت زیاد هستند و می توانند به مقابله با برخی از پیامدهای منفی سرعت کمک کنند. با توجه به تداوم افزایش در حجم ترافیک، به نظر می رسد دوربین های کنترل سرعت یک مداخله ارزشمند برای حفاظت از ایمنی عمومی است (Tilahun, 2023).

برخی منتقدان معتقدند کاهش تصادفات مشاهده شده در محل نصب دوربین های کنترل سرعت ممکن است تا حدی ناشی از رگرسیون به میانگین باشد، زیرا این تجهیزات معمولاً در مقاطعی با سابقه تصادف بالا نصب می شوند.

با این حال، مطالعات ژورنالی اخیر که با استفاده از روش های پیشرفته ای مانند تحلیل قبل بعد مبتنی بر بیز تجربی این اثر را کنترل کرده اند، نشان می دهند که پس از حذف سوگیری های آماری، نصب دوربین های کنترل سرعت همچنان به کاهش معنادار تصادفات، به ویژه تصادفات جرحی، منجر می شود و بیانگر اثر واقعی این مداخله بر بهبود ایمنی ترافیک است (Vadeby & Howard, 2024; Albrecht & Hasan, 2025).

پژوهش های متعددی در ایران به تحلیل اثر دوربین های کنترل سرعت پرداخته اند و اغلب یافته ها کاهش معنادار ۱۵ تا ۳۰ درصدی تصادفات را گزارش کرده است (Pourebrahim, et al., 2024). تأثیر روانی قابل ملاحظه دوربین های کنترل سرعت بر رانندگان در کاهش سرعت رانندگی قابل توجه است، هر چند در برخی محورها عامل سرعت علت غالب تصادفات نبوده و عوامل دیگری نقش پررنگ تری داشته اند (Tavolinejad, et al., 2021).

سیستم توزین در حرکت برای کنترل بار مجاز و پیشگیری از تصادفات وسایل نقلیه سنگینی است که بیش از حد مجاز بارگیری کرده و پتانسیل وقوع تصادف اولیه و ثانویه را دارند. اضافه بار بیش از ظرفیت اسمی کامیون ها، یکی از دلایل تصادف وسایل نقلیه سنگین است. یک کامیون با اضافه بار به

نیز نشان داده‌اند که محتوا و قالب پیام تابلوهای پیام متغیر (VMS) میتواند رفتار رانندگان (مانند تغییر خط یا واکنش به وقایع ترافیکی) را تحت تأثیر قرار دهد، که این امر به‌طور غیرمستقیم بر کاهش احتمالی برخوردها و نوسانات سرعت و در نهایت بر ایمنی راه اثرگذار است (Ilkhani, Yazdanpanah, Dehghan Benadaki, 2022). در کیفیت محتوا و زمان‌بندی پیام، بر نقش پذیرش راننده، خوانایی پیام، و سازگاری پیام با شرایط لحظه‌ای شبکه در اثربخشی VMS اشاره و تأکید شده است (Lagoa et al., 2024; Kaye et al., 2024). مطالعات مرتبط با اثرات VMS در ایران محدودتر بوده و بیشتر پژوهش‌ها بر تحلیل نقطه‌ای یا کوتاه مدت متمرکز بوده‌اند (Rostami et al., 2014; Fallah Zavarehei, Mamdouhi, 2014; Rahimoff et al., 2014). همچنین در برخی پژوهش‌ها، نقش VMS در واکنش فوری رانندگان نسبت به رخدادها چندان قوی گزارش نشده و مشاهده چشمی تراکم ناشی از تصادف توسط راننده، در برخی شرایط مؤثرتر از پیام تابلو بوده است (Xuan, Kanafani., 2014; Matowicki et al., 2021). در مقابل، در یک پژوهش در شهر آتن، اکثریت رانندگان اطلاعات ارسالی از طریق VMS را «کاملاً» یا «بسیار قابل اعتماد» دانسته‌اند و همچنین درباره حواس‌پرتی احتمالی برای موتورسواران هشدار داده شده است (Spyropoulou, Antoniou, 2015). در برخی از جاده‌ها در شبکه‌های راههای برون‌شهری ایران در سالهای اخیر تابلوهای پیام نصب شده است. در اندازه‌گیری پیامدهای رفتاری، سازگاری رفتاری متفاوتی دیده شده است. در شب رانندگان محتوای پیام را مطابق با ادراکشان از ایمنی دارند و خطر را دست کم می‌گیرند و با افزایش سرعت، رفتارهای پرخطری انجام می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد اثر کل بر سرعت بسیار قابل توجه نیست اما از نظر آماری معنی دار است. پیام‌ها ممکن است بر تصادفات از عقب تأثیر بگذارند. کاهش تعداد تصادفات در استفاده از تابلوهای پیام متغیر، قابل توجه و انتظار نیست و اثر این تابلوها بیشتر از اثر بصری نبوده است ولی در مدیریت ترافیک و هدایت رانندگان در حالت بحرانی نقش قابل توجه‌ای دارند (Fallah Zavarehei, Mamdouhi., 2014).

Hilb از منظر روش‌شناسی، پژوهش‌های فراوانی برای پیش‌بینی تصادفات جاده‌ای با استفاده از متغیرهای گوناگون وجود دارد که با روش‌های متنوع و سطوح داده‌های متفاوت به نتایج و

مدل‌های پیش‌بینی دست یافته‌اند. برای مدل‌سازی پیش‌بینی تصادفات، مطالعاتی بر روی مدل‌های رگرسیون شمارشی، مانند پواسون، دوجمله‌ای منفی، پواسون صفر تورم و دوجمله‌ای منفی با صفر زیاد متمرکز شده‌اند و نتایج نشان می‌دهد مدل دوجمله‌ای منفی و گونه‌های صفر-تورم، در بسیاری از شرایط بهتر عمل کرده‌اند (Prasetijo et al., 2019; Galatioto, et al., 2018). از طرفی، به دلیل وجود بیش‌پراکندگی در داده‌های واقعی تصادف، مدل دوجمله‌ای منفی اغلب برازش دقیق‌تر و پایاتری ارائه می‌دهد و معیارهای AIC و BIC در این مدل معمولاً عملکرد بهتری نسبت به مدل پواسون نشان می‌دهند (Lord, Mannering 2010; Hilbe, 2007). مطالعات قبل و بعد، روشی مناسب برای بررسی اثر دوربین‌های کنترل سرعت بر کاهش تصادفات جاده‌ای و تخلفات سرعت است و می‌تواند با در نظر گرفتن یا تعدیل حجم ترافیک عبوری انجام شود (Afandizadeh et al., 2015). همچنین مدل‌های رگرسیون لگاریتم طبیعی و شبکه عصبی نیز در برخی مطالعات برای ارزیابی و پیش‌بینی به کار گرفته شده‌اند (Kaffash Charandabi, Gholami, Abdollahzadeh Bina, 2022). مدل‌های پیش‌بینی تصادف چند متغیره و ساده هستند و دوره‌های ۱ تا ۸ سال مدل‌سازی انجام شده است. مدت سه سال برای جمع‌آوری تعداد تصادفات کافی و برای تجزیه و تحلیل قابل قبول است (Ambros et al., 2016).

۳- روش‌شناسی

۳-۱- محدوده مورد مطالعه

محورهای هدف جاده سراسری غربی- شرقی از رامسر در غرب استان مازندران تا ورودی غربی شهر گرگان در استان گلستان است. همه محورها چهار خطه (دو خط در هر جهت) جدا شده ترافیکی با گاردریل یا نیوجرسی و گاهی جدول بتنی است. عملکرد همه مسیر چند خطه اصلی و در رده عملکردی شریانی درجه یک است. مجموع طول جاده‌ها ۴۱۹ کیلومتر است. ۵۲ دوربین کنترل سرعت و ۲ تابلوی پیام متغیر در طول این مسیر نصب شده است. دو دستگاه سیستم توزین در حرکت در محور هراز و فیروزکوه نصب شده‌اند.

دلیل انتخاب این محورها، تشابه شرایط و خصوصیات مسیر در عوامل گوناگون ترافیکی، هندسی، توپوگرافی، اقلیمی، توسعه ای، نوع و کیفیت دسترسی‌ها، رفتارهای ترافیکی رانندگان،

دوجمله‌ای منفی استفاده می‌شود که دارای پارامتر پراکندگی بوده و قادر است واریانس اضافی را کنترل کند (Hilbe, 2007). این مدل در ادبیات بین‌المللی ایمنی راه نیز توصیه شده و عملکرد دقیق‌تری ارائه می‌دهد (Mannering, Bhat, 2014).

متغیر وابسته در هر دو مدل تعداد تصادفات در هر قطعه است و متغیرهای مستقل شامل وجود دوربین و VMS، وجود WIM و مقدار AADT می‌باشد. متغیرهای جهشی مانند Camera و WIM در صورت حضور مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر دارند.

در مدل پواسون که بصورت خطی و نمایی در رابطه‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است، فرض می‌شود که میانگین و واریانس داده‌ها برابر است. ساختار کلی مدل رگرسیون غیرخطی پواسن به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\ln(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (1)$$

$$\lambda = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k) \quad (2)$$

که در آن λ نرخ وقوع تصادفات است. در مواردی که داده‌ها دارای بیش‌پراکندگی هستند، مدل دوجمله‌ای منفی کارآمدتر است. ساختار این مدل مشابه پواسون است، با این تفاوت که پارامتر پراکندگی برای کنترل واریانس افزوده به مدل اضافه می‌شود. رابطه‌های (۳) و (۴) ساختار کلی مدل دوجمله‌ای منفی را نشان می‌دهد.

$$\ln(\mu) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3)$$

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k) \quad (4)$$

که در آن μ میانگین پیش‌بینی شده تصادفات است. ساختار مدل‌ها در این پژوهش برای تحلیل اثر دوربین‌ها و سامانه WIM و برای چهار وضعیت تعریف شده و مدل دو جمله‌ای منفی، بترتیب در رابطه‌های (۵) تا (۸) آمده است. مدل‌های پواسن با تفاوت در نام متغیر وابسته، (λ بجای μ) همانند این چهار رابطه است.

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 \text{camera} + \beta_2 \text{AADT}) \quad (5)$$

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 \text{camera}) \quad (6)$$

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 \text{WIM} + \beta_2 \text{AADT}) \quad (7)$$

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 \text{WIM}) \quad (8)$$

در این پژوهش علاوه بر داده‌های تصادفات و تردد، داده‌های مربوط به وجود یا عدم وجود تجهیز ITS در هر قطعه به‌عنوان متغیرهای جهشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. متغیر Camera و WIM متغیرهای جهشی هستند و فقط می‌توانند صفر و یک باشند. این ترکیب داده‌ای امکان تحلیل دقیق اثرات تجهیزات همچون دوربین و WIM بر فراوانی تصادفات را فراهم

روسازی آسفالتی انعطاف‌پذیر، گذرگاه‌های قانونی و غیر قانونی عابرین و تجهیزات ایمنی و کنترلی نصب شده در مسیر می‌باشد. این شرایط امکان تحلیل سازگار رفتار رانندگان در مواجهه با تجهیزات ITS را فراهم کرده است.

۳-۲- داده‌های پژوهش

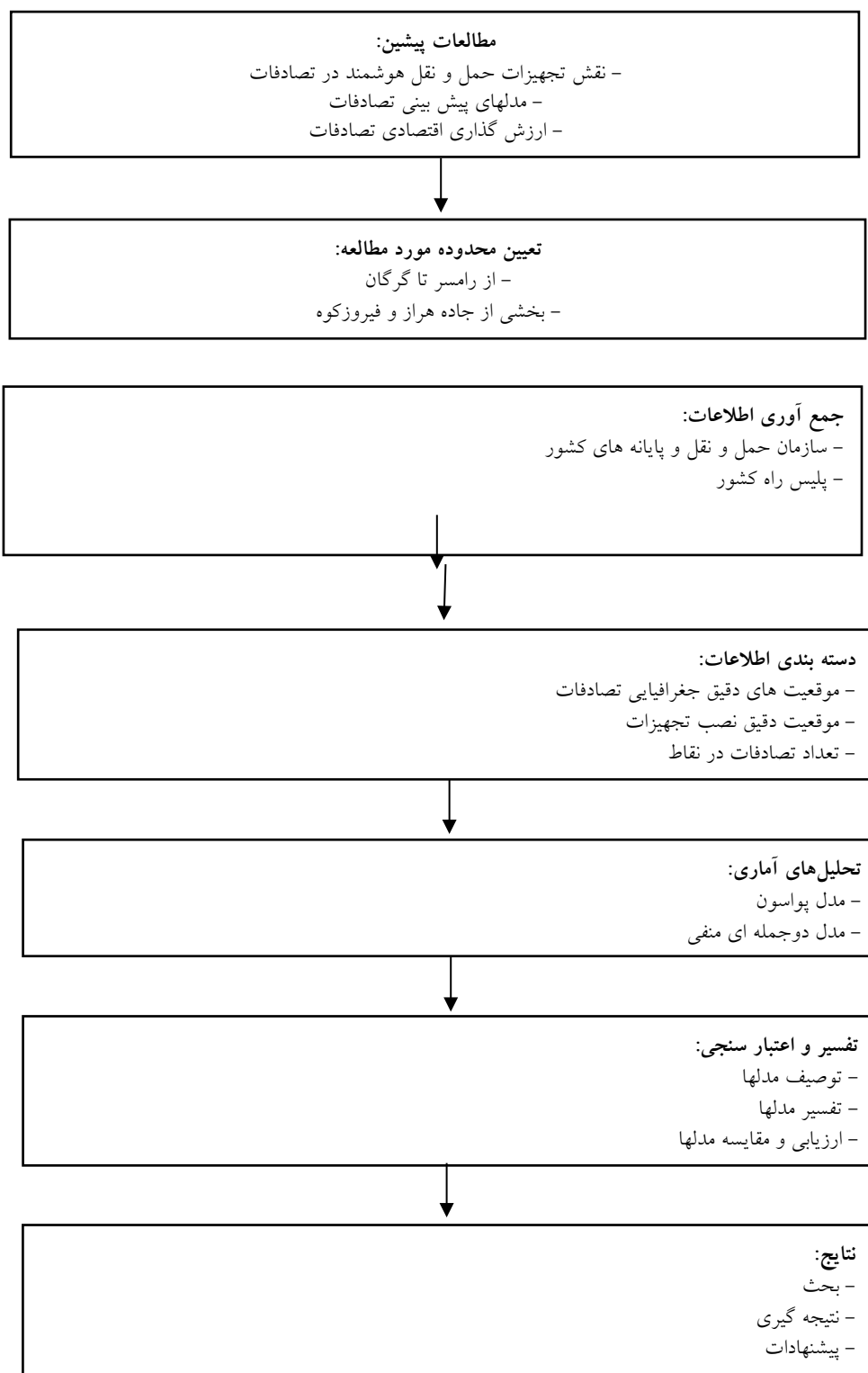
داده‌های پژوهش شامل اطلاعات شش‌ساله تصادفات با موقعیت دقیق جغرافیایی از ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ است که از سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای و پلیس‌راه کشور استخراج شده و شامل تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی است. اطلاعات مربوط به میزان تردد از سایت ایستگاه‌های تردد شمار برداشت شده است. داده‌های مربوط به سال نصب تجهیزات نیز ثبت شده و امکان تحلیل قبل-بعد را فراهم کرده است. قطعات دو کیلومتری انتخاب شده است. تاثیر تجهیزات در کاهش تصادفات در فاصله کمتر با آنها زیاد و در فاصله بیشتر باید مورد بررسی قرار گیرد (Lee, et al., 2015). بدلائل گفته شده و دید مناسب رانندگان در مسافتهای طولانی تر هر قطعه برای مطالعه ۲ کیلومتر در نظر گرفته شده است. برای هر قطعه، چهار وضعیت، (۱) بدون دوربین و بدون تصادف، (۲) با دوربین و بدون تصادف، (۳) بدون دوربین و با تصادف و (۴) با دوربین و با تصادف ممکن بوده است.

۳-۳- ساختار مدل‌ها

با توجه به اینکه متغیر وابسته در این پژوهش تعداد تصادفات در هر قطعه و هر سال است، توزیع این متغیر از نوع شمارشی بوده و دارای واریانس نامتقارن است. در چنین شرایطی، مدل‌های رگرسیون مناسب شامل رگرسیون پواسون و رگرسیون دوجمله‌ای منفی هستند. مدل پیش‌بینی از نوع علت و معلولی و روش رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل، رابطه متغیر تعداد تصادفات را با یک یا چند متغیر مستقل مانند وجود دوربین‌های کنترل سرعت، تابلوهای با پیام متغیر و سیستم توزین در حرکت بیان می‌کند. داده‌ها از نوع کمی، نسبتی و گسسته و شمارشی و دارای واریانس نامتقارن است. ماهیت داده‌های تصادفات، که به صورت شمارش رخدادها طی دوره زمانی مشخص هستند، استفاده از مدل‌های پواسون و دوجمله‌ای منفی را الزامی می‌سازد.

مدل رگرسیون پواسون فرض می‌کند که میانگین و واریانس برابر است؛ در حالی که داده‌های تصادفات معمولاً دارای بیش‌پراکندگی هستند. در چنین مواردی، مدل پواسون کارایی مطلوبی ندارد و تخمین‌ها دچار سوگیری می‌شوند (Lord & Mannering, 2010). برای رفع این مشکل، از مدل رگرسیون

می‌کند. در ساخت مدلها از نرم افزار PYTHON به دلیل توانایی آن در مدل سازی ها و تحلیل های آماری استفاده شده است. در ارزیابی نتایج مدل ها، آزمونهای آماری مانند تابع در ستمایی، ضریب پراکندگی، شاخص نیکویی برازش بیزین، و دیگر مشخصات مرتبط برای ارزیابی و مقایسه مدل ها استفاده می شود.



شکل ۱. فلوچارت روش پژوهش

۴- یافته‌ها

جدول ۱ مدل‌های ساختار مدل‌های برآوردشده و نحوه ورود متغیرها در مدل‌ها را نشان می‌دهد. مدل‌های شماره ۱ تا ۸ مربوط به محورهای است که به دوربین‌های کنترل سرعت و ثبت تخلف مجهز هستند و مدل‌های شماره ۹ تا ۱۲ به محورهای دارای سیستم توزین در حرکت مرتبط است. مدل‌ها با استفاده از دو روش رگرسیون پواسون و دوجمله‌ای منفی و با در نظر گرفتن متغیرهای مداخله‌گر برآورد شده‌اند. در این مدل‌ها، نرخ وقوع تصادفات در روش پواسون با نماد λ و در روش دوجمله‌ای منفی با نماد μ نمایش داده شده است. به‌منظور مقیاس‌بندی مناسب، مقادیر متوسط سالانه ترافیک روزانه در تمامی مدل‌ها بر عدد ۱۰۰۰۰ تقسیم شده‌اند. مدل‌های شماره ۱ تا ۸ برای محورهای چهارده‌گانه دارای دوربین و مدل‌های شماره ۹ تا ۱۲ برای محورهای دارای سامانه توزین در حرکت قابل استفاده هستند. تاثیر VMS در مدل‌ها معنادار نبوده و ارزش یک متغیر مستقل را نداشته است.

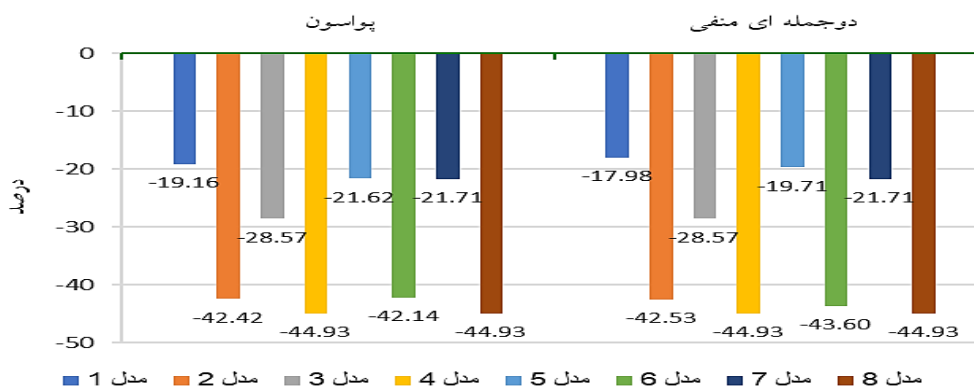
نتایج مدل‌های شماره ۱ تا ۸ به‌صورت درصد تغییرات تصادفات در شکل شماره (۲) و نتایج مدل‌های شماره ۹ تا ۱۲ در شکل شماره (۳) ارائه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که الگوی تغییرات تصادفات در محورهای با دوربین با محورهای مجهز به سامانه توزین در حرکت متفاوت است و شدت و جهت اثر این دو نوع ابزار در محورها یکسان نیست. مشخصات آماری مدل‌ها در دو روش پواسون و دوجمله‌ای منفی در جدول شماره (۲) ارائه شده است. مقایسه شاخص‌های برازش نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها، مقادیر تابع درست‌نمایی و ضریب تعیین شبه مک‌فادن در مدل دوجمله‌ای منفی بهتر از مدل پواسون است. همچنین، مقادیر معیار اطلاعات بیزی در همه موارد برای مدل دوجمله‌ای منفی کمتر

بوده که بیانگر برازش مناسب‌تر این مدل با در نظر گرفتن پیچیدگی ساختار آن است. نتایج مربوط به پایایی و روایی مدل‌ها که در جدول شماره (۳) ارائه شده است، نشان می‌دهد که از منظر پایایی، ضرایب متغیر AADT در هر دو مدل پایدار و معنادار برآورد شده‌اند، با این تفاوت که در مدل دوجمله‌ای منفی، خطای معیار ضرایب بزرگ‌تر بوده و برآوردها ماهیت محافظه‌کارانه‌تری دارند. نتایج مربوط به متغیر دوربین کنترل سرعت در هر دو مدل نامعنادار اما پایدار بوده است که نشان می‌دهد اثر این متغیر در سطح شبکه‌ای به صورت یکنواخت و غیرنقطه‌ای ظاهر می‌شود. در مقابل، متغیر سامانه توزین در حرکت در مدل پواسون به صورت معنادار برآورد شده، اما در مدل دوجمله‌ای منفی با احتیاط نامعنادار شده است؛ موضوعی که بیانگر حساسیت مدل پواسون به پراکندگی داده‌ها و احتمال بیش‌برآورد اثر این متغیر است. از نظر تکرارپذیری، هر دو مدل عملکرد مناسبی دارند، اما مدل دوجمله‌ای منفی به‌ویژه در داده‌های دارای پراکندگی زیاد، پایداری بالاتر نشان می‌دهد. از منظر روایی، فرضیات آماری مدل پواسون تا حدی برقرار است، اما وجود پراکندگی بیش از یک در داده‌های تصادفات موجب تضعیف اعتبار این مدل می‌شود. در مقابل، مدل دوجمله‌ای منفی با بهره‌گیری از پارامتر پراکندگی، سازگاری نظری بهتری با ماهیت داده‌ها دارد، هرچند ساختار آن نسبت به پواسون پیچیده‌تر است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که این پیچیدگی با بهبود برازش و افزایش اعتبار نتایج جبران شده است.

جدول ۱. مدلها و شرایط مداخله متغیرها در مدلها

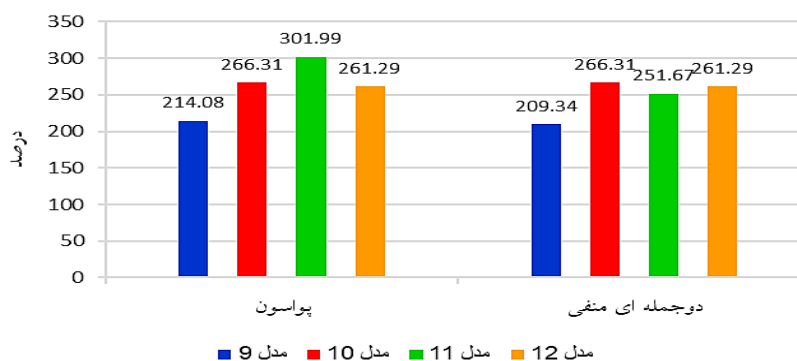
ردیف	مدت دوره	AADT	قطعه				مدل پواسون، λ	مدل دو جمله ای منفی، μ
			با	بدون	همه	با دوربین		
۱	یکسال	*	*				$exp^{(1.400-0.283 camera+0.508 AADT)}$	$exp^{(1.450-0.265 camera+0.483 AADT)}$
۲	یکسال	*				*	$exp^{(2.065-0.598 camera+0.341 AADT)}$	$exp^{(2.031-0.602 camera+0.365 AADT)}$
۳	یکسال	*	*		*		$exp^{(2.486-0.336 camera)}$	$exp^{(2.486-0.336 camera)}$
۴	یکسال	*	*			*	$exp^{(2.832-0.597 camera)}$	$exp^{(2.832-0.597 camera)}$
۵	دوسال	*			*		$exp^{(2.025-0.372 camera+0.551 AADT)}$	$exp^{(2.232-0.324 camera+0.450 AADT)}$
۶	دوسال	*				*	$exp^{(2.786-0.623 camera+0.341 AADT)}$	$exp^{(2.799+0.651 camera+0.340 AADT)}$
۷	دوسال	*	*		*		$exp^{(3.173-0.245 camera)}$	$exp^{(3.173-0.245 camera)}$
۸	دوسال	*	*			*	$exp^{(3.525-0.597 camera)}$	$exp^{(3.525+0.597 camera)}$
۹	یکسال	*	*		*		$exp^{(2.361+1.400 WIM-0.654 AADT)}$	$exp^{(2.278+1.365 WIM-0.607 AADT)}$
۱۰	یکسال	*	*		*		$exp^{(1.200+1.298 WIM)}$	$exp^{(1.200+1.298 WIM)}$
۱۱	دوسال	*	*		*		$exp^{(3.821+1.379 WIM-1.112 AADT)}$	$exp^{(3.609+1.246 WIM-0.980 AADT)}$
۱۲	دوسال	*	*		*		$exp^{(1.894+1.285 WIM)}$	$exp^{(1.894+1.285 WIM)}$

درصد تغییرات تصادفات، مقایسه مدلها، محورهای دوربین دار



شکل ۲. درصد تغییرات تصادفات ناشی از نصب دوربینها

درصد تغییرات تصادفات، مقایسه مدلها، محورهای سیستم توزین در حرکت



شکل ۳. درصد تغییرات تصادفات ناشی از نصب دوربینها

جدول ۲. مقایسه مشخصات آماری دو روش رگرسیون پواسون و دوجمله‌ای منفی

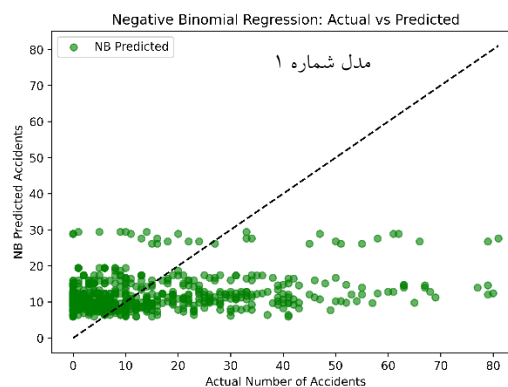
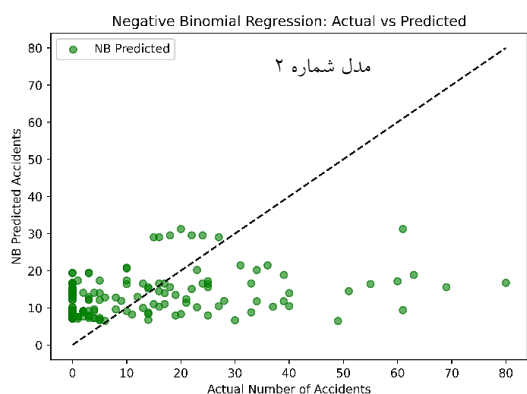
Average MSE (Cross-Validation)		Inter-Rater Reliability (Cohen's Kappa)		Dispersion Parameter		Bayesian Information Criterion		Pseudo R-squared (McFadden)		Log-Likelihood		Chi ² -pValue		شماره مدل
NB	P	NB	P	NB	P	NB	P	NB	P	NB	P	NB	P	
۲۳۱/۱۷	۲۳۱/۳	۰/۱۱	-۰/۱۲	۱/۲۲	۱۶/۹	۵۱۵۴	۱۵۴۶۶	۰/۴۰۰	۰/۰۸۴	-۲۵۶۷	-۷۷۲۳	۰	۰	۱
۲۶۲/۲۶	۲۵۴/۱	۰/۷۲	-۰/۷۲	۱/۲۳	۱۷/۸	۹۸۴	۲۹۵۶	۰/۰۵۴	۰/۱۰۷	-۴۸۴	-۱۴۷۰	۰/۰۶۹	۰	۲
۲۵۱/۲۳	۲۵۱/۲	-۰/۲	-۰/۲	۱/۲۳	۱۸/۳	۵۱۸۰	۱۶۵۹۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	-۲۵۸۴	-۸۲۹۱	۰/۰۹۱	۰	۳
۲۷۳/۸۸	۲۷۳/۹	-۱	-۱	۱/۲۳	۱۸/۷	۹۸۳	۳۰۹۱	۰/۰۹۷	۰/۰۵۷	-۴۸۶	-۱۵۴۰	۰/۰۲۱	۰	۴
۸۰۶/۳۳	۷۹۹/۲	-۰/۱۱	-۰/۱	۱/۲۲	۳۱/۴	۳۰۴۶	۱۳۵۸۳	۰/۰۳۳	۰/۰۹۳	-۱۵۱۴	-۶۷۸۲	۰/۰۰۰۳	۰	۵
۹۵۶/۱	۹۵۸/۸	-۰/۷۵	-۰/۶۴	۱/۲۴	۳۳/۸	۵۸۱	۲۵۹۸	۰/۰۴۸	۰/۱۱۳	-۲۸۴	-۱۲۹۳	۰/۱۱۸	۰	۶
۸۹۴/۹۵	۸۹۵	-۰/۲	-۰/۲	۱/۲۲	۳۴/۴	۵۰۳۴	۱۴۷۸۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	-۱۵۲۱	-۷۳۸۵	۰/۴۰۷	۰	۷
۹۷۲/۳	۹۷۲/۳	-۱	-۱	۱/۲۳	۳۵/۳	۵۷۸	۲۷۱۳	۰/۰۲۶	۰/۰۶۱	-۲۸۵	-۱۳۶۱	۰/۱۲۷	۰	۸
۲۳/۰۲	۲۴/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱/۰۳	۴/۲	۴۴۴	۵۹۹	۰/۱۴۶	۰/۲۱۲	-۲۱۶	-۲۹۳	۰/۰۰۱	۰	۹
۲۲/۹۳	۲۲/۹۳	۱	۱	۱/۰۴	۴/۴	۴۴۵	۶۱۸	۰/۱۰۳	۰/۱۶۱	-۲۱۸	-۴۳۰۵	۰/۰۰۱	۰	۱۰
۱۰۵/۳۲	۱۰۶/۸	۰/۲۵	۰/۲۵	۱/۰۳	۷/۵	۱۹۰	۳۰۸	۰/۱۹۵	۰/۲۸۴	-۹۰	-۱۴۹	۰/۰۳۵	۰	۱۱
۱۰۶/۳۱	۱۰۶/۳	۱	۱	۱/۰۵	۸/۴	۱۹۰	۳۳۷	۰/۱۰۶	۰/۱۷۰	-۹۲	-۱۶۵	۰/۰۶۳	۰	۱۲

جدول ۳. پایایی و روایی مدل‌ها

آزمون	شاخص	مدل پواسون	مدل دوجمله‌ای منفی
پایایی	ضرایب مدل	ثابت و معنادار برای AADT	مشابه پواسون ولی با خطای معیار بیشتر (محافظه‌کارتر)
	نتایج برای دوربین	نامعنادار در مدل (پایدار)	نامعنادار در مدل (پایدار)
	نتایج برای WIM	معنادار در مدل	با احتیاط نامعنادار در مدل
	تکرارپذیری	بالا، مخصوصاً در داده‌های بدون پراکندگی	بالا، به‌ویژه در داده‌های دارای پراکندگی زیاد
روایی	فرضیات آماری	تا حدی رعایت شده (پراکندگی کمی بیشتر از ۱)	با آلفای بالا فرض پراکندگی را پوشش می‌دهد
	سازگاری با داده‌ها	قابل قبول	از نظر نظری بهتر، اما کمی پیچیده
	برازش مدل	خوب	کمی بهتر از پواسون

بررسی نمودار مقایسه تصادفات پیش‌بینی‌شده و واقعی در شکل شماره (۴) برای مدل‌های منتخب شماره ۱ و ۲ در روش دوجمله‌ای منفی نشان می‌دهد که نقاط پراکنده بوده و الگوی سیستماتیک مشخصی ندارند. این امر بیانگر برازش مناسب مدل و نبود سوگیری ساختاری در پیش‌بینی‌ها است. تفاوت در تعداد مشاهدات میان این دو مدل نیز ناشی از دامنه متفاوت قطعات مورد بررسی است، با این حال عملکرد مدل دوجمله‌ای منفی در هر دو حالت رضایت‌بخش ارزیابی می‌شود.

در مجموع، نتایج جداول و شکلها نشان می‌دهد که اگرچه مدل پواسون از نظر سادگی ساختار و سهولت تفسیر قابل قبول است، اما به دلیل پراکندگی شدید داده‌های تصادفات، قابلیت اتکای لازم برای تحلیل علمی را ندارد. در مقابل، مدل دوجمله‌ای منفی با کنترل مناسب پراکندگی، برازش بهتر، پایداری بالاتر ضرایب و دقت پیش‌بینی بیشتر، به‌عنوان مدل نهایی و مناسب برای تحلیل اثر دوربین‌های کنترل سرعت و سامانه توزین در حرکت بر فراوانی تصادفات انتخاب می‌شود.



شکل ۴. نمودار نقاط تصادف پیش بینی شده با تعداد واقعی

قطعات محور به صورت یکپارچه تحلیل شده‌اند. این اختلاف، بیانگر اثر موضعی قوی دوربین‌ها و در عین حال، سرایت نسبی اثر آن‌ها به سایر بخش‌های محور است.

همین الگو در مدل‌های بدون مداخله متغیر تردد نیز مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که در مدل‌های شماره ۳ و ۴، کاهش تصادفات همچنان قابل توجه بوده و اختلاف نتایج میان مدل‌های دارای تردد و فاقد آن، نقش تعیین‌کننده حجم ترافیک را در تعدیل اثر دوربین‌ها برجسته می‌کند. این یافته نشان می‌دهد که بخشی از کاهش تصادفات ناشی از کنترل رفتار سرعتی رانندگان است، اما بخشی دیگر به تغییرات حجم تردد وابسته بوده و نادیده گرفتن آن می‌تواند به بیش‌برآورد اثر دوربین‌ها منجر شود. در تحلیل دوسالانه نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. کاهش تصادفات در مدل‌های شماره ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که اثر دوربین‌های کنترل سرعت در بازه‌های زمانی طولانی‌تر همچنان باقی می‌ماند، اما شدت این اثر با گذشت زمان کاهش می‌یابد. افزایش نسبی تصادفات در سال دوم پس از نصب نسبت به سال اول، به‌ویژه در مدل‌هایی که متغیر تردد در آن‌ها لحاظ شده است، حاکی از پدیده سازگاری رفتاری رانندگان است. به نظر می‌رسد رانندگان پس از مدتی به محل و نحوه عملکرد دوربین‌ها عادت کرده و حساسیت اولیه خود را نسبت به آن‌ها از دست می‌دهند؛ موضوعی که در ادبیات ایمنی راه به‌عنوان کاهش اثر بازدارندگی در بلندمدت شناخته می‌شود. بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تداوم اثربخشی دوربین‌ها نیازمند راهبردهای مکمل نظیر جابه‌جایی دوره‌ای محل نصب، تنوع در شیوه‌های نظارت و تقویت اجرای قانون است. نتایج مدل دوجمله‌ای منفی نشان می‌دهد که اثر سامانه توزین در حرکت بر ایمنی ترافیک در محورهای مورد مطالعه، برخلاف انتظار، افزایشی و معنادار است. در تحلیل سالانه، مدل

با انتخاب مدل دوجمله‌ای منفی به‌عنوان چارچوب نهایی تحلیل، تفسیر ضرایب و جهت اثر متغیرهای مداخله‌گر با اطمینان بیشتری امکان‌پذیر می‌شود. در بخش بحث، نتایج این مدل با یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه شده و تفاوت الگوی اثرگذاری دوربین‌های کنترل سرعت و سامانه توزین در حرکت در مقیاس شبکه‌ای مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، پیامدهای سیاستی و اجرایی این نتایج برای بهبود ایمنی راه‌ها و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند بررسی خواهد شد.

بحث

نتایج این پژوهش به روشنی نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت داده‌های تصادفات و وجود پراکندگی قابل توجه، مدل دوجمله‌ای منفی نسبت به مدل پواسون چارچوب تحلیلی مناسب‌تر و قابل‌اتکاتری برای ارزیابی اثر تجهیزات ایمنی محسوب می‌شود. برتری این مدل نه تنها از منظر شاخص‌های آماری برازش، بلکه از نظر پایداری ضرایب، کنترل پراکندگی و تفسیرپذیری نتایج نیز تأیید شد. از این رو، تفسیر اثرات دوربین‌های کنترل سرعت و سامانه‌های توزین در حرکت در ادامه بحث صرفاً بر اساس نتایج مدل دوجمله‌ای منفی انجام می‌گیرد. در محورهای مجهز به دوربین کنترل سرعت، نتایج تحلیل سالانه (یک سال قبل و یک سال بعد از نصب) نشان‌دهنده کاهش معنادار و قابل توجه تصادفات است.

در مدل‌هایی که متغیر تردد به‌عنوان عامل مداخله‌گر در نظر گرفته شده است، میزان کاهش تصادفات در مدل‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب حدود ۱۸ و ۴۳ درصد برآورد شد. نکته مهم آن است که کاهش تصادفات در قطعاتی که مستقیماً دارای دوربین هستند به‌طور محسوسی بیشتر از حالتی است که کل

فقدان ملاحظات ایمنی مکمل، به افزایش ریسک تصادف منجر شوند. این یافته‌ها بر ضرورت نگاه شبکه‌ای، رفتاری و چندبعدی در ارزیابی تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند تأکید کرده و نشان می‌دهد که موفقیت این فناوری‌ها تنها به نصب آن‌ها محدود نمی‌شود، بلکه به نحوه طراحی، جانمایی، اطلاع‌رسانی و مدیریت بهره‌برداری وابسته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند شامل دوربین‌های کنترل سرعت و سامانه توزین در حرکت بر فراوانی تصادفات در محورهای شریانی درجه یک سراسری غربی-شرقی استان مازندران و بخش شرقی استان گلستان بررسی شد. طول کل مسیرهای مورد مطالعه ۴۱۹ کیلومتر بوده و به دلیل تشابه قابل توجه شرایط محیطی، ترافیکی، هندسی و عملکردی، شبکه راه به ۲۱۲ قطعه دو کیلومتری تقسیم شد. تحلیل مبتنی بر داده‌های ۱۶۰۶۶۹ فقره تصادف ثبت‌شده در یک بازه شش‌ساله انجام گرفت که از کفایت آماری لازم برای تحلیل‌های شمارشی برخوردار است. برای سامانه توزین در حرکت نیز بازه‌ای حدود ۱۴ کیلومتر قبل و بعد از محل نصب سیستم در محورهای هراز و فیروزکوه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ماهیت داده‌های تصادفات، وجود پراکندگی بیش از حد و نقاط پرت، و با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار PYTHON دو چارچوب آماری شمارشی شامل مدل پواسون و مدل دوجمله‌ای منفی به کار گرفته شد. در نتیجه، در مجموع ۱۲ مدل ساخته شد که ۸ مدل مربوط به دوربین‌های کنترل سرعت و ۴ مدل مربوط به سیستم توزین در حرکت می‌باشند. نتایج نشان داد که مدل پواسون در مواجهه با داده‌های واقعی جاده‌ای قادر به مدیریت مناسب پراکندگی نیست و به تخمین‌های ناپایدار منجر می‌شود. در مقابل، مدل دوجمله‌ای منفی با کنترل پراکندگی، پایداری ضرایب و مقادیر بهتر معیار اطلاعات بیزین، چارچوب مناسب‌تری برای تحلیل اثر تجهیزات ایمنی ارائه داد. بر این اساس، نتایج نهایی پژوهش بر مبنای مدل دوجمله‌ای منفی تفسیر شد که این امر بر اهمیت انتخاب مدل آماری متناسب با ماهیت داده‌ها در مطالعات ایمنی جاده‌ای تأکید می‌کند. یافته‌ها نشان داد نصب دوربین‌های کنترل سرعت به‌طور معناداری با کاهش تعداد تصادفات همراه بوده است. این کاهش در قطعاتی که مستقیماً به دوربین مجهز بودند، محسوس‌تر از حالتی است که کل محور به‌صورت یکپارچه تحلیل شده است. نتایج همچنین نشان داد که با گذشت زمان از

۹ که متغیرهای WIM و AADT را هم‌زمان در بردارد، افزایش تصادفات به میزان ۲/۰۹ برابر در سال پس از نصب را نشان می‌دهد. این افزایش در مدل ۱۰، که بدون در نظر گرفتن AADT برآورد شده است، حتی شدیدتر بوده و به ۲/۶۶ برابر می‌رسد. پایداری این نتایج بیانگر آن است که افزایش تصادفات صرفاً ناشی از تغییرات حجم ترافیک نیست، بلکه به رفتار رانندگان در مواجهه با سامانه WIM مرتبط است.

در تحلیل دو سالانه نیز همین الگو تکرار شده است، به‌طوری که در مدل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب افزایش تصادفات ۲/۵۲ و ۲/۶۲ برابر برآورد شده است. اختلاف اندک میان مدل‌های دارای AADT و فاقد آن نشان می‌دهد که اگرچه تردد نقش تعدیل‌کننده دارد، اما جهت اثر WIM مستقل از حجم ترافیک باقی می‌ماند. کاهش نسبی تصادفات در سال دوم پس از نصب نسبت به سال اول می‌تواند نشانه‌ای از سازگاری رفتاری تدریجی باشد، با این حال سطح تصادفات همچنان بالاتر از دوره پیش از نصب باقی می‌ماند. رفتارهای پرخطر برخی رانندگان وسایل نقلیه سنگین، به‌ویژه مانورهای ناگهانی و ترمزگیری شدید و تغییر خط وسایل نقلیه سنگین به‌ویژه در شرایط اضافه‌بار با هدف اختلال در عملکرد سامانه یا ثبت نادرست اضافه‌بار در نزدیکی سامانه WIM، موجب افزایش ناهمگونی سرعت و کاهش زمان واکنش سایر رانندگان شده و احتمال برخوردهای جلوه‌عقب را افزایش می‌دهد. بنابراین، در شرایط طراحی و بهره‌برداری فعلی، سامانه WIM به‌جای کاهش ریسک، به یک عامل تحریک‌کننده رفتار پرخطر تبدیل شده است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که نصب سامانه توزین در حرکت بدون ملاحظات ایمنی مکمل نظیر طراحی مناسب ناحیه ورودی و خروجی، علائم پیش‌آگاهی کافی، مدیریت سرعت و کنترل رفتار رانندگان، می‌تواند پیامدهای ناخواسته ایمنی ایجاد کند. از این رو، بازنگری در نحوه استقرار و بهره‌برداری سامانه‌های WIM برای کاهش اثرات منفی آن‌ها بر ایمنی ترافیک ضروری است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه دوربین‌های کنترل سرعت به‌طور کلی اثر کاهنده و معناداری بر تصادفات دارند، اما شدت و پایداری این اثر به شدت وابسته به حجم تردد و رفتار تطبیقی رانندگان است. در مقابل، سامانه‌های توزین در حرکت، علی‌رغم مزایای بالقوه در حفاظت از روسازی و کنترل اضافه‌بار، می‌توانند در صورت

نصب دوربین‌ها، میزان تصادفات روندی افزایشی پیدا می‌کند که می‌تواند ناشی از سازگاری رفتاری رانندگان و کاهش اثر بازدارندگی اولیه باشد. علاوه بر این، حجم تردد که با شاخص متوسط سالانه ترافیک روزانه اندازه‌گیری شده است، رابطه‌ای مثبت و مستقیم با تعداد تصادفات دارد و به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تعدیل‌کننده اثر دوربین‌ها شناخته می‌شود. بنابراین، اثربخشی بلندمدت دوربین‌های کنترل سرعت مستلزم تقویت مستمر اعمال قانون و به‌روزرسانی راهبردهای نظارتی است.

تحلیل مکانی تصادفات نشان داد نقاط حادثه‌خیز عمدتاً در بخش‌هایی از شبکه تمرکز دارند که ترکیبی از ویژگی‌های هندسی نامطلوب، حجم بالای تردد و ضعف نظارت وجود دارد. در این نواحی، نصب تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند بیشترین بازده ایمنی را داشته است. دوربین‌های کنترل سرعت با ایجاد بازدارندگی روانی و عملی، به کاهش تخلقات پرخطر نظیر سرعت غیرمجاز و سبقت‌های ناایمن و تا حدی به تنظیم جریان ترافیک و افزایش سطح ایمنی منجر شده‌اند. مقایسه قطعات دارای دوربین و فاقد دوربین نیز نشان داد که در حالی که قطعات بدون دوربین در سال‌های بعدی با افزایش فراوانی تصادفات مواجه بوده‌اند، قطعات مجهز به دوربین کاهش قابل توجهی را تجربه کرده‌اند.

در مقابل، نتایج مربوط به سامانه‌های توزین در حرکت نشان داد که نصب این سیستم‌ها، برخلاف انتظار، با افزایش تصادفات همراه بوده است. در مدل‌های مرتبط با WIM، درست در سال نخست پس از نصب، افزایش جهشی و چندبرابری تصادفات مشاهده شد. شواهد میدانی نشان می‌دهد بخشی از رانندگان وسایل نقلیه سنگین، به‌ویژه در شرایط اضافه‌بار، با انجام مانورهای ناگهانی نظیر کاهش شدید سرعت و ترمزگیری روی باسکول سیستم، سعی در ایجاد خطا در فرآیند توزین دارند. این رفتارهای غیرمنتظره موجب افزایش ناهمگونی جریان ترافیک، اختلال در تصمیم‌گیری آنی سایر رانندگان و در نهایت افزایش احتمال وقوع تصادفات می‌شود. هرچند سامانه‌های توزین در حرکت نقش مهمی در حفاظت از روسازی و کاهش خسارات زیرساختی دارند، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت فقدان ملاحظات ایمنی مکمل، این سامانه‌ها می‌توانند پیامدهای ناخواسته‌ای برای ایمنی ترافیک ایجاد کنند.

با وجود افزایش تصادفات پس از نصب سامانه‌های توزین در حرکت، حذف این ابزار کنترلی به دلیل نقش حیاتی آن در مدیریت اضافه‌بار و حفظ سازه‌های راهی توصیه نمی‌شود. بلکه

ضروری است راهکارهای اصلاحی از جمله بهبود طراحی هندسی محدوده‌های ورودی و خروجی، ارتقای علائم پیش‌آگاهی، مدیریت سرعت در مجاورت سامانه و به‌کارگیری ابزارهای کمکی هوشمند نظیر پایش تصویری زنده و پردازش خودکار رفتار وسایل نقلیه به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

در نهایت، یکی از نتایج کلیدی این پژوهش تأکید بر ضرورت اجرای هم‌زمان اقدامات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در ارتقای ایمنی راه‌ها است. مسیرهایی که علاوه بر نصب تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، اصلاحات هندسی و نگهداری مناسب زیرساخت را نیز تجربه کرده‌اند، کاهش تصادفات بیشتری را نشان می‌دهند. این یافته نشان می‌دهد که سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند نباید به‌عنوان راهکاری مستقل تلقی شوند، بلکه لازم است به‌عنوان بخشی از یک راهبرد جامع و یکپارچه ایمنی جاده‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

پیشنهادهای پژوهشی آینده

نخستین پیشنهاد، گسترش بازه زمانی مطالعه و بررسی اثرات بلندمدت تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند در دوره‌های زمانی طولانی‌تر است تا پایداری یا تضعیف اثرات مشاهده‌شده به صورت دقیق‌تر تحلیل شود. انجام مطالعات مشابه در سایر محورهای شریانی و آزادراهی کشور به تعمیم‌پذیری نتایج کمک می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، مدل‌های پیشرفته‌تر شمارشی و مکانی-زمانی نظیر مدل‌های دوجمله‌ای منفی مکانی، مدل‌های آمیخته تصادفی به‌کار گرفته شود تا ناهمگنی‌های مکانی و زمانی و تفاوت‌های رفتاری رانندگان بهتر لحاظ گردد. در باره سامانه‌های توزین در حرکت، انجام مطالعات رفتاری مبتنی بر داده‌های میدانی برای شناسایی الگوهای مانور رانندگان وسایل نقلیه سنگین در نزدیکی سامانه‌ها برای طراحی مداخلات رفتاری و مهندسی مؤثرتر پیشنهاد می‌شود و سرانجام، تحلیل اقتصادی و هزینه-فایده تجهیزات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند برای تصمیم‌گیری در اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها براساس کاهش تصادفات و با در نظر گرفتن منافع اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی پیشنهاد می‌شود.

۷- مراجع

- Cameron, M., & Delaney, A. (2008). Speed enforcement—Effects, mechanisms, intensity and economic benefits of each mode of operation. *Journal of Road Safety*, Vol.19, No. 4, 42-49.
- Elvik, R. (2019). Updated estimates of the relationship between speed and road safety at the aggregate and individual levels. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 123, 114–122.
doi.org/10.1016/j.aap.2018.11.014
- Elvik, Rune & Goel, Rahul. (2019). Safety-in-numbers: An updated meta-analysis of estimates. *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 129, 136-147.
doi.org/10.1016/j.aap.2019.05.019.
- Galatioto, F., Catalano, M., Shaikh, N., McCormick, E., & Johnston, R. (2018). Advanced accident prediction models and impacts assessment. *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 12, No. 9, 1131-1141.
doi.org/10.1049/iet-its.2018.5218
- Ghasemi Saghond, S., Amin, R., & Khodaei, A. (2024). Investigating the effects of speed enforcement cameras on traffic safety and crash severity reduction. In *Proceedings of the 9th International Conference on Research in Science and Engineering and the 6th Asian International Congress on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development*, Bangkok, Jan. 31.
- Guerra, E. (2024). Evaluating the Effectiveness of Urban Speed Cameras on Traffic Safety in a Period of Dramatic Change. *University Transportation Centers, Carnegie Mellon University*.
- Haghighi, F., Amirsoleimani, A. and Sheykhsfard, A. (2021). Evaluation of speed indicator display as a traffic calming measure. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, Vol. 12, No. 3, 513-527.
doi: 10.22119/jte.2021.103983
- Hagmanns, M. P. M., Lamberty, S., Fazekas, A., & Oeser, M. (2024). Enhancing Weigh-in-Motion Systems Accuracy by Considering Camera-Captured Wheel Oscillations. *Sensors*, 24(24), 8151.
doi.org/10.3390/s24248151
- Haugen, T., Levy, J. R., Aakre, E., & Tello, M. E. P. (2015). Weigh-in-Motion Equipment – Experiences and Challenges. *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, 1423-1432.
doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.215.
- تقی زاده، وحید و رحیمی، امیر مسعود و افکار، نوید (۱۴۰۲). بررسی تاثیر دوربین‌های ثبت تخلف سرعت در ایمنی شبکه جاده‌ای به کمک روش سری زمانی (مطالعه موردی: آزادراه تبریز – زنجان). *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، دوره بیستم، دوره اول، شماره ۷۴، ۱۳۴-۱۲۱.
- doi: 10.22034/tri.2022.333743.3029**
- حسنی نسب، حسن و شریفی راد، امیر و زاهدی، محسن (۱۳۹۷). اثربخشی دوربین‌های کنترل ترافیک بر مدیریت سرعت. *فصلنامه علمی – ترویجی جاده*، شماره ۹۵، ۱۷۵-۱۸۲.
- رحیم‌آف، کامران، معصومی، مصطفی، مرشدی، مسعود، و محمدی، کبری، (۱۳۹۹). تاثیر سامانه توزین در حال حرکت (WIM) بر ارتقای عملکرد برخورد با تخلفات ترافیکی. *مطالعات مدیریت ترافیک*. شماره ۵۸، ۱۷۲-۱۴۹.
- رستمی، حبیب، عطائیان، حمیدرضا، الهی، محمد، و آدینه، پیام، (۱۳۹۳). به‌روزرسانی و تغذیه اطلاعات ترافیکی تابلوهای پیام متغیر با استفاده از فناوری‌های ارتباطات خودرویی. *نخستین همایش ملی سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند جاده‌ای*، تهران، ۳۰ دی.
- فلاح‌زواره، محسن، و ممدوحی، امیر رضا، (۱۳۹۳). بررسی اثر پیام تابلوهای پیام متغیر در بهبود رفتار رانندگان و ارتقای ایمنی راه: مطالعه موردی آزادراه تهران - ساوه. *نخستین همایش ملی سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند جاده‌ای*، تهران.
- Albrecht, M. A., & Hasan, R. (2025). Reliable crash analysis: Comparing biases and error rates of empirical Bayes before–after analyses to mixed-models. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 212, 107921.
doi.org/10.1016/j.aap.2025.107921
- Al-Janabi, A. J., Hayder, A. (2024). Analysis of the Impact of Overloading for Trucks on the Design Life of Flexible Pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
doi:10.1088/1755-1315/1374/1/012089
- Ambros, J., Valentová, V., & Sedoník, J. (2016). Developing Updatable Crash Prediction Model for Network Screening: Case Study of Czech Two-Lane Rural Road Segments. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2583, No. 1, 1-7.
doi.org/10.3141/2583-01

-Keall, M. D., Povey, L. J., & Frith, W. J. (2001). The relative effectiveness of a hidden versus a visible speed camera programme. *Accident; Analysis and Prevention*, Vol. 33, No. 2, 277-284.

doi.org/10.1016/s0001-4575(00)00042-7

-Kim, C., Lea, J. D., Harvey, J. T., & Kannekanti, V. (2023). Decision Tree Analysis for Developing Weigh-in-Motion Spectra in the Californian Pavement Management System (PaveM). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(3), 546-559.

doi.org/10.1177/03611981231182395

-Lagoa, P., Galvão, T., & Campos Ferreira, M. (2024). Variable Message Signs in Traffic Management: A Systematic Review of User Behavior and Future Innovations. *Infrastructures*, Vol. 9, No. 1, 184-185.

doi.org/10.3390/infrastructures9100184

-Lee, C., Abdel-Aty, M., Park, J., & Wang, J. H. (2015). Development of crash modification factors for changing lane width on roadway segments using generalized nonlinear models. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 76, 83-91.

doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.007

-Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 44, No. 5, 291-305.

doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001

-Mannering, F. L., & Bhat, C. R. (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic Methods in Accident Research*, Vol. 1, 1-22.

doi.org/10.1016/j.amar.2013.09.001

-Ma, Z. Shao, C. Song, Y. Chen, J. (2014). Driver response to information provided by variable message signs in Beijing. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. Vol. 26, 199-209.

doi.org/10.1016/j.trf.2014.07.006

-Matowicki, M. Pribyl, O. (2021). A driving simulation study on drivers speed compliance with respect to variable message signs. *Journal of Intelligent Transportation Systems*.

doi.org/10.1080/15472450.2021.1926247

-Hilbe, J.M. (2007). Negative Binomial Regression. Cambridge University Press, Cambridge. 77-140.

doi.org/10.1017/CBO9780511811852

-Høye, A. (2014). Speed cameras, section control, and road safety. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 73, 200-209.

doi.org/10.1016/j.aap.2014.09.001

-Iervolino, I., Baltzopoulos, G., Vitale, A., Grella, A., Bonini, G., & Iannaccone, A. (2023). Empirical distributions of traffic loads from one year of weigh-in-motion data. *Scientific Data*, 289, Vol. 10, No. 1.

doi.org/10.1038/s41597-023-02212-0

-Ilkhani, I., Yazdanpanah, M. and Dehghanbanadaki, A. (2022). Analysis of the Effect of Content and Format of Variable Message Signs on Drivers' Diversion Behavior (Case Study: Tehran). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2249-2283.

doi: 10.22119/jte.2021.286450.2536

-Jacob, B., & Feypell-de La Beaumelle, V. (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, Vol. 34, No. 1, 9-15.

doi.org/10.1016/j.iatssr.2010.06.003

-Kaffash Charandabi, N., Gholami, A., Abdollahzadeh Bina, A. (2022). Road accident risk prediction using generalized regression neural network optimized with self-organizing map. *Neural Computing and Applications*. Advance online publication.

doi.org/10.1007/s00521-022-07068-3

-Karkowski, Michał & Rafalski, Leszek. (2014). High accuracy weight in motion enforcement system implementation and testing. 21st World Congress on Intelligent Transport Systems, ITSWC 2014: Reinventing Transportation in Our Connected World. Detroit, Michigan, September 7-11.

-Kaye, S. A., Watson-Brown, N., Lewis, I., Oviedo-Trespalacios, O., & Senserrick, T. (2024). Perceived effectiveness of traditional and technology-based speeding-related countermeasures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 104, 348-358.

doi.org/10.1016/j.trf.2024.06.010

- Tavakkoli, M., Torkashvand-Khah, Z., Fink, G., Takian, A., Kuenzli, N., de Savigny, D., & Cobos Muñoz, D. (2022). Evidence from the Decade of Action for Road Safety: A systematic review of the effectiveness of interventions in low and middle-income countries. *Public Health Reviews*, 43, 1604499.
doi.org/10.3389/phrs.2022.1604499
- Tavolinejad, H., Malekpour, M. R., Rezaei, N., Jafari, A., Ahmadi, N., Nematollahi, A., Abdolhamidi, E., Foroutan Mehr, E., Hasan, M., & Farzadfar, F. (2021). Evaluation of the effect of fixed speed cameras on speeding behavior among Iranian taxi drivers through telematics monitoring. *Traffic Injury Prevention*, Vol. 22, No. 7, 559–563.
doi.org/10.1080/15389588.2021.1957100
- Tilahun, N. (2023). Safety impact of automated speed camera enforcement: Empirical findings based on Chicago's speed cameras. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(1), 1490–1498.
doi.org/10.1177/03611981221104808
- Vadeby, A., & Howard, C. (2024). Spot speed cameras in a series – Effects on speed and traffic safety. *Accident Analysis & Prevention*, 199, 107525.
doi.org/10.1016/j.aap.2024.107525
- Wilson, C., Willis, C., Hendrikz, J. K., Le Brocque, R., & Bellamy, N. (2010). Speed cameras for the prevention of road traffic injuries and deaths. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2010(11), Article CD004607.
doi.org/10.1002/14651858.CD004607.pub4
- Xuan, Y., & Kanafani, A. (2014). Evaluation of the effectiveness of accident information on freeway changeable message signs: A comparison of empirical methodologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 158-171.
doi.org/10.1016/j.trc.2014.08.011
- Yang, X., Wang, X., Podolsky, J., Huang, Y., & Lu, P. (2024). Addressing wander effect in vehicle weight monitoring: An advanced hybrid weigh-in-motion system integrating computer vision and in-pavement sensors. *Measurement*, 234, 114870.
doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114870
- Moore-Ritchie, C., Kienitz, H., Sohrweide, T. (2023). Speed safety cameras (SSC): Transportation research synthesis (Report No. TRS2303). Minnesota Department of Transportation, *Office of Research & Innovation*.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). Behavioral Traffic Safety Messaging on Variable Message Signs. *Washington, DC: The National Academies Press*.
doi.org/10.17226/26656
- Pérez, K., Santamariña-Rubio, E., Ferrando, J., López, M. J., & Badiella, L. (2023). Effectiveness of a Road Traffic Injury Prevention Intervention in Reducing Pedestrian Injuries, Barcelona, Spain, 2002-2019. *American Journal of Public Health*, Vol. 113, No. 5, 495–499.
doi.org/10.2105/AJPH.2022.307216
- Pourebrahim,K. , Ghanbari,A. , Ghanipour,D. and Yazdani,M. (2024). Unveiling the impact of speed control cameras on urban crashes in Tabriz city, Iran: A GIS-based analysis. *Archives of Trauma Research*, Vol. 13, No. 1, 12-19.
doi: 10.48307/atr.2024.414957.1030
- Prasetijo, J., Musa, W. Z., Mohd Jawi, Z., Zainal, Z. F., Hamid, N. B., Subramaniyan, A., Siang, A. J. L. M., Anting, N., & Mohd Hafzi Md, I. (2020). Vehicle road accident prediction model along Federal Road FT050 Kluang–Ayer Hitam–Batu Pahat route using excess zero data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 852, No. 1, 012144.
doi.org/10.1088/1757-899X/852/1/012144
- Spyropoulou, I., & Antoniou, C. (2015). Determinants of driver response to variable message sign information in Athens. *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 9, No. 4, 453-466.
doi.org/10.1049/iet-its.2014.0053
- Tang, C. K. (2017). Do speed cameras save lives? (SERC Discussion Paper No. 0221). Centre for Economic Performance, *London School of Economics and Political Science*.

Evaluating the Impact of Intelligent Transportation Systems on Traffic Safety Using Poisson and Negative Binomial Models

(Case Study: Ramsar–Gorgan National Highway)

*Esfandiar Heidari Kani, Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering,
SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

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

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

E-mail: naderan@iaui.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Intelligent Transportation Systems (ITS) are widely recognized as effective interventions for improving road safety. This study evaluates the impact of ITS components, including speed enforcement cameras, Variable Message Signs (VMS), and Weigh-In-Motion (WIM) systems, on crash frequency along high-traffic road corridors in Mazandaran and Golestan provinces. A six-year dataset (2013–2018) comprising 16,669 reported crashes, annual average daily traffic (AADT), and detailed spatial information on ITS installations was analyzed. Poisson and Negative Binomial regression models were employed to model crash frequency as count data. The results indicate that speed cameras have a statistically significant crash-reduction effect, particularly within short distances from installation sites, with substantial reductions observed across most model specifications. In contrast, WIM systems were associated with an increase in crash frequency, especially in close proximity to their locations. This finding is attributed to abnormal driving behavior and sudden maneuvers by some heavy vehicle drivers attempting to disrupt or evade system operation. Model comparison results show that the Negative Binomial model provides a better fit than the Poisson model, indicating the presence of over dispersion in the crash data. Overall, the findings suggest that proper deployment and management of ITS—especially automated enforcement cameras—can significantly enhance road safety. However, effective implementation of WIM systems requires redesign, driver training, and enhanced monitoring. Policy and operational recommendations are provided to improve ITS performance.

Keywords: Traffic Safety, Before–After Analysis, Intelligent Transportation Systems (ITS), Regression Models