فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و پنجم، شماره ۱۰۰، بهار ۱۴۰۴، ص. ۱۷-۱

ارزیابی اثرگذاری متغیرهای مختلف زیرساخت راه و جریان ترافیک در تصادفات وسیله با وسیله برون‌شهری از طریق مدل‌سازی تصادفات

ابوالفضل خویشداری، دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران-حمل‌ونقل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

حمید میرزاحسین (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مهندسی عمران-حمل‌ونقل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

E-mail: mirzahossein@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

تصادفات یک وسیله نقلیه با وسیله نقلیه دیگر یکی از شایع‌ترین نوع تصادفات در کشورهای درحال‌توسعه است. در این مقاله از طریق تعریف یک شاخص تصادف که در بردارنده وزن شدت تصادفات، وزن نوع راه و طول راه است میزان شدت و فراوانی تصادفات به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است و میزان اهمیت متغیرهای مختلف شامل متغیرهای زیرساخت راه و متغیرهای جریان ترافیک در این شاخص توسعه داده‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور تعیین میزان اهمیت متغیرهای مهم در شاخص تصادف، در ابتدا نسبت به پالایش داده‌های در دسترس صورت گرفت. در ادامه همبستگی سعی شد تا استقلال خطی مابین متغیرها از طریق محاسبه شاخص Variable Inflation factor (VIF) ارزیابی و متغیرهای مستقل تشکیل شوند. درنهایت نسبت به مدل‌سازی تصادفات، مقایسه مدل‌های مختلف با کمک شاخص‌های نکویی برازش و محاسبه Odds ratio پرداخته شد بررسی‌های این پژوهش نشان داد از میان ۱۰ تکنیک مدل‌سازی تصادفات، روش دوجمله‌ای منفی با اثرات ثابت (FENB) نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد که مقدار شاخص AIC و BIC آن کمترین مقدار و به ترتیب برابر با ۱۱۸۷/۰ و ۱۲۷۵/۲ است. با بهره‌گیری از نتایج این مقاله می‌توان به تصمیم‌سازی به شکل مناسب در عرصه ایمنی راه پرداخت.

واژه‌های کلیدی: تصادفات وسیله-وسیله، شاخص تصادف، مدل‌سازی تصادفات، خصوصیات راه، خصوصیات جریان ترافیک

۱. مقدمه

فراهم آوردن تردد ایمن و پویا یکی از مهم‌ترین اهداف کشورهای مختلف است. در این راستا متخصصین عرصه حمل-ونقل به‌صورت پیوسته در تلاش‌اند تا با بهره‌گیری از رویکردهای مختلف تجزیه‌وتحلیل تصادفات، به بررسی مهم‌ترین عوامل درگیر بپردازند. اهمیت این موضع با رشد آمار تلفات سال ۲۰۲۰ در برخی کشورها دوچندان می‌شود. برای مثال علی‌رغم کاهش سفرها در دوران پاندمی کرونا در ایالات متحده آمریکا، آمار تلفات ناشی از سوانح ترافیکی افزایش ۷/۲ درصدی نسبت به مدت مشابه سال ۲۰۱۹ داشته است [Administration, 2021]. تصادفات دارای الگوهای متفاوتی‌اند، یکی از مهم‌ترین الگوی تصادفات ترافیکی از نوع واژگونی است. در این نوع تصادف به دلیل سرعت بالا، خستگی و خواب‌آلودگی، مصرف مشروبات الکلی و نظایر آن توسط راننده، راننده وسیله نقلیه کنترل خودرو را از دست داده و پس از خروج از مسیر دچار واژگونی شود. تحقیقات نشان داده است، در کشورهای پیشرفته سهم این نوع از تصادفات یک‌سوم کل تصادفات واقعه است [El-Hennawy et al., 2014]. البته در برخی کشورها نظیر ایالت متحده آمریکا، سهم تصادفات واژگونی گزارش متغیر و برابر با ۲۵ درصد بوده است که افزایش ۹ درصدی نسبت به سال ۲۰۱۹ داشته است [Analysis, 2021]. آمار تصادفات سال ۲۰۰۰ الی ۲۰۰۷ سه ایالت استرالیا نیز نشان داده است، تصادفات واژگونی سهم ۳۵ درصدی در تلفات سوانح ترافیکی داشته‌اند [Fréchède et al., 2011]. در اثر تصادف واژگونی، سقف وسیله نقلیه به میزان ۹۰ درجه دوران می‌کند. این دوران می‌تواند طی یک تصادف بارها و بارها تکرار شود و در اثر آن صدمات جدی به راننده و سرنشینان وارد گردد. بررسی محققین در گذشته [Funk et al., 2012] حاکی از آن است که عوامل مختلفی در بروز و تشدید تصادفات واژگونی نقش دارند. ازجمله این عوامل یا رخدادها می‌توان به پرتاب به بیرون سرنشینان، نبستن کمربندی ایمنی، تعداد دفعات دوران خودرو در اثر واژگونی، محل نشستن در داخل خودرو، صدمه به سقف، نوع وسیله نقلیه و نیز خصوصیات دموگرافیکی نظیر سن، جنسیت و مصرف مشروبات الکلی اشاره نمود [Gloeckner et al., 2006; Padmanaban et al., 2005; Parenteau & Shah, 2000; Parker et al., 2007; Viano et al., 2007]. هدف از این مقاله شناسایی میزان اهمیت توأمان متغیرهای مختلف زیرساخت راه و جریان ترافیک در بروز تصادفات واژگونی از طریق تکنیک مدل‌سازی است که جزء خلأ تحقیقاتی است و در این مقاله به آن پرداخته شده است.

بخش‌های بعدی مقاله حاضر بدین شکل است؛ بخش دوم به بررسی مطالعات پیشین و شناسایی پرداخته شده است. در ادامه در بخش سوم، روش تحقیق شامل جمع‌آوری آمار و اطلاعات، پالایش و مدل‌سازی تصادفات آورده شده است. در بخش چهارم یافته‌های تحقیق و نتایج به‌دست‌آمده آورده شده است. در بخش پنجم و نهایی مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده شده است

۲. ادبیات پژوهش

تاکنون مطالعات مختلفی پیرامون متغیرهای مهم تأثیرگذار در خصوص تصادفات واژگونی انجام شده است. برای مثال در پژوهشی تصادفات واژگونی در محدوده راه‌های کوهستانی موردبررسی قرار گرفت. متغیرهای مورداستفاده در این پژوهش شامل سرعت مجاز تردد، وضعیت میانه راه، نوع رویه راه (آسفالتی یا نه)، فصل وقوع تصادف، روز کاری یا تعطیلی بودن تصادف، روز یا شب بودن، شرایط جوی رویه راه و خصوصیات راننده نظیر گروه سنی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه سه نوع مدل شامل: لوجیت مرسوم، مدل پارامتر تصادفی غیرهمبسته لوجیت و مدل پارامتر تصادفی همبسته لوجیت مورد مقایسه قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد مدل پارامتر تصادفی همبسته لوجیت نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد. در این مطالعه متغیرهایی نظیر شیب کرانه خاکی مسیر و نیز سایر خصوصیات راه موردبررسی قرار نگرفتند [Alrejjal et al., 2021]. در یک بررسی مشابه با متغیرهای مشابه مطالعه قبلی، به بررسی تأثیر

این متغیرها در تصادفات واقعه در راه‌های قوس کوهستانی در ایالت وایومینگ پرداخته شد. مدل‌سازی داده‌ها با کمک روش مدل لوجیت ترکیبی انجام گرفت. بررسی‌ها نشان داد متغیرهای شرایط آب‌وهوایی، شرایط سطح رویه راه و سرعت ازجمله مهم‌ترین نوع متغیرها در تصادفات واقعه هستند. در این مطالعه انواع طبقه‌بندی راه‌ها و نیز سایر خصوصیات راه به دلیل دشواری در برداشت اطلاعات، موردبررسی قرار نگرفت [Alrejjal et al., 2022]. در یک بررسی دیگر سعی شد تا اثر نوع وسیله نقلیه و طرح هندسی راه مورد تردد در وقوع تصادفات واژگونی راه‌های کوهستانی موردبررسی قرار گیرد. بدین منظور انواع شرایط وزن و خصوصیات فنی وسایل نقلیه سنگین و نیز شیب طولی و عرضی راه، زاویه قوس و شعاع قوس در محدوده بروز تصادفات واژگونی موردبررسی قرار گرفت. از مدل لوجیت چندگانه به‌منظور بررسی متغیرها استفاده گردید. نتایج نشان داد سرعت مجاز در محدوده راه‌های مختلف به تناسب شرایط طرح هندسی راه و نوع وسایل نقلیه مورداستفاده بایستی انتخاب گردد [Alrejjal & Ksaibati, 2022b]. در یک بررسی دیگر به اثر بادهای شدید در بروز تصادفات واژگونی در راه‌های ایالت وایومینگ پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد سرعت باد با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به امتداد وسیله نقلیه بیشترین میزان تأثیر را در بروز تصادفات داشته است [Alrejjal & Ksaibati, 2022a].

در پژوهشی دیگر متغیرهایی نظیر شدت تصادف (خسارتی، جزئی و KSI)، لگاریتم تردد وسایل نقلیه سبک، لگاریتم تردد وسایل نقلیه سنگین، سرعت مجاز، عرض راه روسازی شده، عرض راه روسازی نشده، انحنای مسیر، تعداد تقاطعات در طول مسیر، نوع کاربری محل، اصطکاک جانبی راه، شرایط کناره راه (نظیر خندق، خاک‌برداری، خاک‌ریزی و ...)، زمان وقوع تصادف و شب و روز بودن، جنسیت، سن و تحصیلات راننده، استفاده از کمربند ایمنی حین رانندگی، دسته‌بندی نوع وسیله نقلیه مورداستفاده و نقص لاستیک وسیله نقلیه در شدت تصادفات واژگونی موردبررسی قرار گرفت. مدل‌سازی داده‌ها با کمک روش پرابیت ترتیبی تعمیم‌یافته با اثرات تصادفی انجام شد [Anarkooli et al., 2017]. در پژوهشی دیگر به بررسی شدت مختلف تصادفات وسایل نقلیه سنگین با بهره‌گیری از مدل لوجیت ترتیبی با پارامترهای تصادفی پرداخته شد. در این پژوهش، متغیرها شامل: شدت تصادفات، عکس‌العمل راننده، گروه سنی راننده، شرایط راننده در حین بروز تصادف، حواس‌پرتی راننده در هنگام بروز تصادف، موانع دید در محدوده بروز تصادف، نقص توانایی در رویت مناسب اجزای راه حین سانحه، تعداد وسایل نقلیه درگیر، شرایط سطح رویه راه، شیب سطح رویه راه، شرایط آب و هوایی و شرایط روشنایی محدوده حین بروز سانحه موردبررسی قرار گرفتند [Azimi et al., 2020]. در یک پژوهش دیگر به بررسی اثرات خصوصیات جوی (بارانی و برفی)، زاویه انحراف و دوران خودرو، شرایط ناهمواری راه، شیب طولی راه، نرخ شتاب‌گیری و کاهش شتاب، ضریب اصطکاک جانبی راه و نیز سرعت مجاز اعلان‌شده راه پرداخته شد [Chen et al., 2009].

در یک بررسی تحقیقاتی دیگر به ارزیابی الگوهای مختلف شدت تصادفات واژگونی با کمک مدل ماشین برداری پشتیبان (SVM) پرداخته شد. متغیرهای ارزیابی‌شده در این مطالعه شامل: شرایط روشنایی مسیر راه، شرایط آب‌وهوایی، شیب و انحنای مسیر مورد تردد، تعداد وسایل نقلیه درگیر در تصادف، اصطکاک رویه راه، میزان شدت خسارت وارده به وسیله نقلیه، زمان و موقعیت بروز تصادف، گواهینامه رانندگی راننده، رویه دار بودن یا نبودن راه، شرایط سطح رویه راه، شیوه کنترل ترافیکی محدوده، تعداد خطوط عبوری، نوع وسیله نقلیه، نوع مانور حرکتی وسیله نقلیه در زمان سانحه، جنسیت، تحصیلات و سن راننده مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد مدل SVM به شکل مناسب می‌تواند به بررسی شدت تصادفات مختلف بپردازد [Chen et al., 2016]. در مطالعه‌ای دیگر با کمک

متغیرهای شرایط راننده، وسیله نقلیه و تصادفات واقعه به پیش-بینی شدت تصادفات با کمک مدل رگرسیون لجستیک پرداخته شد. بررسی متغیرها با کمک تکنیک Odds ratio به تفکیک هر متغیر صورت گرفت. بررسی‌های این مقاله نشان داد استفاده از خودروهای ایمن می‌تواند به شکل مناسبی موجب کاهش تصادفات واژگونی گردد. به‌طوری‌که نتایج نشان داد خودروهایی که کمربند ایمنی آن‌ها مزاحم راننده بوده و یا طرح آن‌ها مناسب و راحت نیست، احتمال شدت جراحات وارده به راننده در اثر تصادف واژگونی را تا ۱۰ برابر افزایش می‌دهد [Conroy et al., 2006].

در بررسی دیگر خصوصیات راننده و محیط پیرامون رانندگی در وقوع تصادف واژگونی خودروهای سواری و تریلرهای سبک موردبررسی قرار گرفت. در این مطالعه سن و جنسیت راننده، طرح هندسی راه، شرایط رویه راه و شرایط آب‌وهوایی نشان داد تریلرهای سبک ریسک دو برابری در تصادفات واژگونی دارند [Farmer & Lund, 2002]. در یک بررسی تحقیقاتی دیگر به مدل‌سازی شدت تصادفات در معابر برون‌شهری با در نظر گرفتن اثر ناهمگونی مشاهده نشده و نیز سن راننده پرداخته شد. در این مطالعه از روش لوجیت ترکیبی استفاده گردید و میزان ناهمگونی مشاهده نشده برای سه گروه سنی شامل: ۱۶-۲۴ سال، ۲۵-۶۵ سال و بیشتر از ۶۵ سال موردبررسی قرار گرفت. در این مطالعه متغیرهایی شامل: گروه سنی راننده، جنسیت راننده، الگوی رانندگی راننده، محدودیت در رانندگی، تعداد سرنشینان، نوع خودرو، نوع راه، تعداد خطوط عبوری، نوع و عرض شانه سمت چپ، نوع و عرض شانه سمت راست، نوع میانه راه، عرض میانه، نوع توپوگرافی منطقه، سرعت مجاز مورد تردد، پلان هندسی راه، پروفیل طولی راه، طول قطعه و AADT، شرایط آب و هوایی و شرایط روشنایی مسیر در تحلیل‌ها در نظر گرفته شدند. بررسی‌ها نشان داد متغیرهای مهم در بروز تصادفات واژگونی در هریک از این سه سطح سنی مختلف با یکدیگر متفاوت‌اند [Gong & Fan, 2017].

در یک مطالعه به بررسی سطوح شدت مختلف تصادفات واژگونی در کشور درحال‌توسعه ایران پرداخته شد. در این مطالعه سن راننده، تحصیلات وی، نوع تصادف واژگونی رخ‌داده، وزن وسیله نقلیه، شرایط ترمز ABS، نقص فنی وسیله نقلیه، طبقه‌بندی نوع راه، شرایط رویه راه، شرایط طرح هندسی رویه راه، تعداد خطوط عبوری، سرعت مجاز تردد از راه، فصل وقوع سانحه و شرایط روشنایی راه در زمان بروز سانحه موردبررسی قرار گرفت. در این پژوهش از مدل آستانه تصادفی با پارامترهای سلسله مراتبی تصادفی از نوع پرابیت ترتیبی جهت آنالیز متغیرها استفاده گردید. نتایج نشان داد متغیرها شامل: تحصیلات راننده، سیستم ترمز وسیله نقلیه (ABS)، وجود قوس در مسیرهای مورد تردد و سرعت مجاز اعلامی راه بیشترین میزان اهمیت را داشته است [Rahimi et al., 2020]. در یک بررسی دیگر به بررسی فاکتورهای مؤثر در بروز سوانح در ایالات متحده آمریکا پرداخته شد. متغیرهای موردبررسی در این مطالعه عبارت از پرتاب سرنشین از وسیله نقلیه به خارج، سرعت مجاز، نوع ترافیک عبوری، زمان وقوع سانحه، استفاده از کمربند ایمنی، طرح هندسی راه، سرعت تردد، شیب راه، یدک‌کشی، شرایط روشنایی مسیر، نقص لاستیک، شرایط سطح رویه راه، موقعیت بروز تصادف واژگونی، سن خودرو، درون‌شهری/برون‌شهری بودن تصادف، سن راننده، سابقه تصادف راننده، میزان نقض سرعت قبلی راننده، شرایط ایربگ خودرو، نوع روسازی راه، روز هفته، جنسیت راننده، سابقه رانندگی در حال مسمومیت، منطقه بروز تصادف، تعداد خطوط عبوری، شرایط آب‌وهوایی، استفاده از الکل و مواد دارویی و حواس‌پرتی راننده بودند. به‌منظور بررسی متغیرها از مدل لوجیت ترتیبی تعمیم‌یافته استفاده گردید. بررسی‌ها نشان داد پرتاب سرنشین به خارج از خودرو، عدم استفاده از کمربند ایمنی، تردد با سرعت بالا، مقادیر بالاتر سرعت مجاز اعلامی، واژگونی در محدوده‌های میانه و کناره راه، موج موج بودن زمین، سیاه بودن سطح رویه راه و برون‌شهری بودن موقعیت سانحه متغیرهای مهم می‌باشند [Khan & Vachal,

[2020]. در پژوهشی دیگر به بررسی فاکتورهای مختلف تأثیرگذار در شدت تصادفات واژگونی جاده‌های حومه شهری نامیبیا با بهره‌گیری از مدل لوجیت ترکیبی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد زمان وقوع تصادف در اواخر هفته، شرایط محدودیت تردد و نیز نوع وسیله نقلیه از نوع مینی‌بوس در شدت تصادفات واژگونی نقش دارند [Bullard et al., 2023]. در پژوهشی دیگر به بررسی رویه دار بودن یا نبودن راه در بروز تصادفات واقعه در محورهای برون‌شهری با بهره‌گیری از مدل رگرسیون پارامتر تصادفی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد بازه سنی میان-سال راننده، نوع تصادف واژگونی واقعه و نیز تعداد تصادفات واقعه در مسیر مستقیم در شدت تصادفات واقعه نقش داشتند [Obadi et al., 2023]. از دیگر پژوهش‌ها می‌توان به ابداع یک روش برنامه‌ریزی تردد و تغییر خط وسیله نقلیه نیمه سنگین خودران به‌منظور جلوگیری از عارضه واژگونی اشاره نمود. بررسی‌ها نشان داد بهره‌گیری از مدل منحنی خطی گاوسی بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند این مهم را تحقق بخشد و به‌خوبی مدل مربوطه عمل نماید [Zhan et al., 2024].

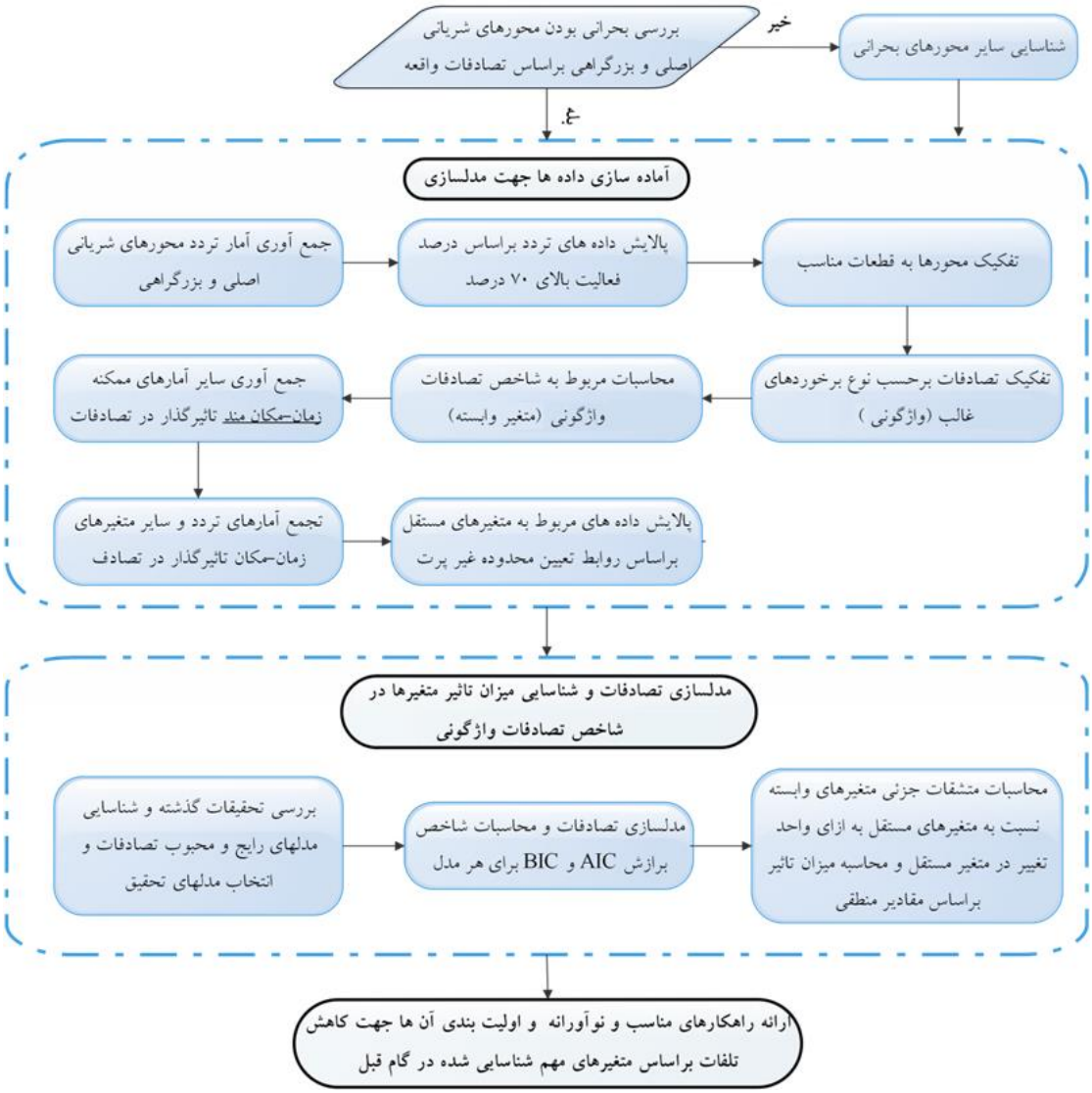
آنچه اشاره گردید، در خصوص مطالعات خارج از کشور بود. در خصوص مطالعات داخلی می‌توان به مواردی که در ادامه آمده است اشاره نمود. در پژوهشی از طریق رویکرد سلسله مراتبی، عوامل مؤثر در تصادفات واژگونی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد معیار عامل انسانی و زیر معیار مربوط به آن شامل سابقه و سن راننده و نیز شعاع قوس‌ها و نیز ناحیه بازیابی قوس‌ها از عوامل مهم در تصادفات واژگونی به شمار می‌روند [اسدی و همکاران، ۱۳۹۸]. در پژوهشی دیگر به بررسی اثر استفاده از دوربین‌های ثبت سرعت سیار توسط پلیس در مقایسه با دوربین-های ثبت سرعت سازمان راهداری محور آزادراهی زنجان-قزوین در کاهش احتمالی تصادفات واژگونی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد دوربین‌های ثبت سرعت سازمان راهداری و سامانه سیار پلیس‌راه به ترتیب تأثیر ۴۲٪ و ۴۰٪ در کاهش احتمالی تصادفات واژگونی داشته‌اند [حاجی حسینلو و همکاران، ۱۳۹۵]. در مطالعه دیگری به مدل‌سازی تصادفات واژگونی با هدف شناسایی محورهای پرخطر استان ایلام پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد هرچه تعداد تصادفات در محورهای استان کمتر باشد، تعداد تصادفات واژگونی حادث‌شده در محورهای استان بیشتر است [شمسی، ۱۳۹۴]. در پژوهشی دیگر سعی شد تا پارامترهایی از هندسه مسیر نظیر قوس و نیز لاستیک خودروها در مدل‌سازی تصادفات واژگونی محورهای استان ایلام موردبررسی قرار گیرد. در این پژوهش از مدل رگرسیون لجستیک جهت پردازش داده‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد متوسط ترافیک روزانه، نوع طرح هندسی (مسیر مستقیم یا قوس) و میزان تحصیلات راننده در شدت وقوع تصادفات تأثیر فروانی خواهند داشت [اسدی و فتاحی، ۱۳۹۳]. در پژوهشی دیگر به ارزیابی شدت صدمات وارده در اثر بروز تصادفات واژگونی در خودروهای داخلی و خارجی با بهره‌گیری از تحلیل توصیفی پرداخته شد و نحوه تأثیر پارامترهایی چون وزن، طول بدنه خودرو، حجم موتور، حداکثر سرعت و شتاب صفر تا صد مشخص گردید [قنوتی و همکاران، ۱۳۹۰]. در پژوهشی دیگر مشخص گردید عامل انسانی مهم‌ترین نقش در بروز تصادفات واژگونی را داشته است [مدقالچی و همکاران، ۱۳۸۸]. در مطالعه‌ای دیگر مشخص گردید احتمال وقوع واژگونی‌ها در ساعات اولیه صبح و خارج از محدوده فاصله ۱۵ کیلومتری شهرها بیشتر بوده و تجاوز از سرعت مجاز در دوره زمانی بعدازظهر و نه در شب‌ها باعث تشدید ریسک بروز تصادفات واژگونی می‌گردد. همچنین وسایل نقلیه باری و وانت‌ها ازنظر شدت تصادفات واژگونی در اولویت قرار داشته و بر اساس میزان نرخ تصادف، تعداد تصادفات واژگونی از یک تابع خطی برحسب سهم وسایل نقلیه مختلف از ترافیک جاده‌ای پیروی می‌کند [عبدوس، ۱۳۸۷].

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره گردید سعی شده است تا متغیرهای مختلف در بروز تصادفات واژگونی موردبررسی قرار

گیرد. لیکن تاکنون در هیچ‌یک از مطالعات به بررسی دانسیته انواع تقاطعات به تفکیک نوع تقاطع، دوربرگردان‌ها، پارکینگ-های کنار جاده، رمپ‌های دسترسی ورودی و خروجی و خصوصیات جریان ترافیک با جزئیات بالا نظیر متغیرهای انحراف استاندارد نقض سرعت وسایل نقلیه، وجود یا عدم وجود دوربین‌های کنترل سرعت و لحاظ مراحل اجرای دوربین کنترل سرعت و نیز خرابی رویه راه در سطوح شدت مختلف موردبررسی قرار نگرفته است. همچنین تعداد تصادفات در سطوح شدت مختلف در نظر گرفته نشده است. این مطالعه به تکمیل این خلأ تحقیقاتی پرداخته است و سعی نموده تا ضمن در نظر گرفت متغیرهای مختلف در بروز سوانح واژگونی، یک شاخص تصادف معرفی گردد که فراوانی و شدت تصادف به‌صورت توأم در نظر گرفته شود.

۳. روش پژوهش

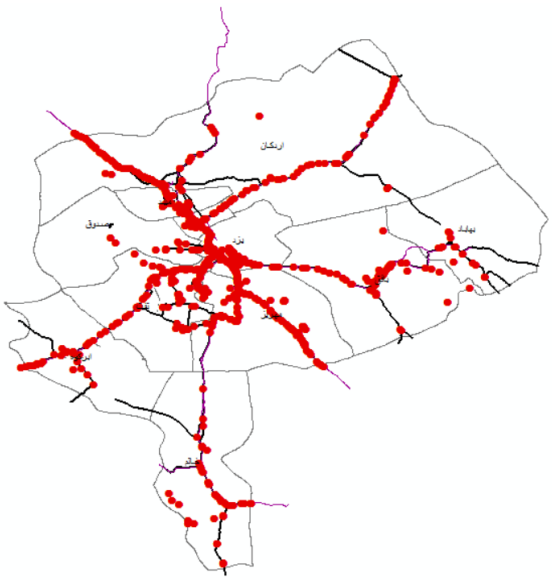
شکل (۱) فلوچارت روش تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در ابتدا قطعات بحرانی تصادفات واژگونی بر مبنای نقشه GIS تصادفات شناسایی شدند. در ادامه مراحل مطابق با فلوچارت روش تحقیق پیش برده شد که شامل آماده-سازی داده‌ها جهت مدل‌سازی تصادفات واژگونی و تفسیر نتایج پس از بررسی مدل‌ها بود.



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

۳-۱ محدوده موردمطالعه

در این مقاله تصادفات واژگونی برون‌شهری استان یزد موردبررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است تصادفات واژگونی در استان یزد سهم ۵۴ درصدی از کل تصادفات برون‌شهری را دارند. شکل (۲) شمایی از موقعیت پراکنش تصادفات در استان یزد را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، تصادفات در محورهای شریانی و کریدوری استان متمرکز شده‌اند و لذا در ادامه این قطعات موردبررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۲. پراکنش تصادفاتی واژگونی در معابر برون‌شهری استان یزد

۳-۲ جمع‌آوری داده

به‌منظور جمع‌آوری آمار و اطلاعات در ابتدا قطعات مهم‌تر شناسایی شدند. در ادامه منظور جلوگیری از خطای ناهمگونی خصوصیات راه در طول قطعه موردنظر، سعی شد تا محورها به قطعات همگن دسته‌بندی شوند. یکی از بخش‌های اطلاعاتی مهم در مدل‌سازی این مقاله، خصوصیات جریان ترافیک بود. ازاین‌رو سعی گردید تا از اطلاعات دستگاه‌های تردد شمار واقع در محورهای موردمطالعه که حاوی متغیرهایی نظیر متوسط تردد روزانه، درصد وسایل نقلیه سنگین، خصوصیات سرعت و درصد نقض آن و نیز خصوصیات فاصله طولی و درصد نقض آن است، استخراج و بهره‌برداری گردد. ازجمله نکات مهمی که بایستی توجه شود به‌منظور داشتن اطلاعات مناسب جهت آنالیز تصادفات لازم است تا درصد کارکرد دستگاه تردد شمار حداقل برابر با ۷۰ درصد باشد. بدین منظور آمار و اطلاعات مربوط به آن دسته از دستگاه‌های تردد شمار که از این آستانه کمتر بود در نظر گرفته نشد. درنهایت تعداد ۲۲ محور در قالب ۳۴ قطعه (بر مبنای تفکیک قطعات برحسب اطلاعات دستگاه‌های تردد شمار) شناسایی شدند.

در این تحقیق با توجه به اینکه تعداد ۳۴ قطعه موردبررسی قرار گرفته است، تعداد تصادفات محدودی در این قطعات حادث شده است. مثلاً برای سال ۲۰۱۵ تعداد تصادفات واقعه در هر قطعه در طول ۱ روز برابر با ۰/۰۷۰، در طول ۱ هفته برابر با ۰/۰۵، در طول ۱ ماه برابر با ۲/۲۰ و در طول فصل برابر با ۸/۸۲ بوده است. در این تحقیق به‌منظور بررسی مناسب تأثیر متغیرها مقیاس فصلی داده‌ها انتخاب گردید. دلیل این انتخاب دو دیدگاه کلی بود که اول: در نظر گرفتن تغییرات فصلی احتمالی الگوی ترافیکی و تصادفات و دوم: داشتن یک تعداد مناسبی از تصادفات به‌منظور بررسی سطوح مختلف شدت تصادفات بود. قابل‌ذکر است، اگر متوسط هریک از سطوح سه‌گانه را برابر با ۱ واحد در نظر بگیریم، تقسیم نمودن مقیاس ماهانه بر ۳ عدد ۰/۷۳ را نتیجه خواهد داد که کوچک‌تر از واحد است. این در حالی است که تقسیم نمودن عدد ۸/۸۲ بر ۳، مقدار ۲/۹۴ را نتیجه خواهد داد که مناسب بوده و بزرگ‌تر از واحد است؛ بنابراین مقیاس موردبررسی این تحقیق فصلی در نظر گرفته شد.

ازجمله دیگر موارد مهمی که در ساخت متغیر خروجی بایستی موردتوجه قرار بگیرد، مقوله شدت تصادفات است. روش‌های نسبتاً پیچیده‌ای وجود دارد که تعداد تصادفات در سطوح شدت مختلف را موردتوجه قرار می‌دهد. لیکن با توجه به محدوده بودن تعداد داده تصادفات در سطوح شدت مختلف در قطعات موردبررسی از شاخص تصادفات (P) استفاده گردید. شاخص فوق مورد تعریف و تائید مصوبه کمیسیون ایمنی راه‌های وزارت

راه و شهرسازی ایران است که ازآن‌جهت تعیین نقاط پر تصادف نیز استفاده می‌شود. شاخص تصادفات (P) مطابق رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$P = 2.74\left(\frac{I}{A \times T}\right) \quad (۱)$$

که در رابطه فوق، شاخص P تا دو رقم اعشار گرد می‌شود. همچنین I بیانگر فاکتور شدت (که توسط رابطه (۲) محاسبه می‌گردد) در دوره زمانی T برحسب سال است. به‌علاوه ضریب A بیانگر ضریب عملکردی قطعه موردنظر است که برای بزرگراه برابر با ۸، راه اصلی بین استان‌ها برابر با ۶، راه اصلی درون استانی برابر با ۴ و راه‌های فرعی برابر با ۲ است.

$$I = x + 3y + 9z \quad (۲)$$

که در رابطه فوق، x تعداد تصادفات خسارتی، y تعداد تصادفات جرحی و z تعداد تصادفات فوتی است.

متغیرهای مستقل شامل خصوصیات جریان ترافیک، خصوصیات راه مورد برداشت بود که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. متغیرهای مورداستفاده جهت مدل‌سازی تصادفات واژگونی

ردیف	متغیر موردنظر	واحد متغیر	نوع متغیر	کُد متغیر حین مدل‌سازی تصادفات
۱	شاخص خطر تصادفات واژگونی	تعداد	وابسته	rolloverci
۲	لگاریتم میزان متوسط روزانه کل تردد وسایل نقلیه در فصل موردبررسی (log(SADT))	لگاریتم تعداد	مستقل	LSADT
۳	درصد وسایل نقلیه سنگین در ترکیب ترافیک (فصلی)	٪	مستقل	HV
۴	عرض شانه سمت چپ	متر	مستقل	LeftShoulder
۵	عرض روسازی راه	متر	مستقل	PavementWidth
۶	عرض شانه سمت راست	متر	مستقل	RightShoulder
۷	شرایط سطح خرابی روسازی (۱: خیلی کم، ۲: کم، ۳: متوسط، ۴: زیاد، ۵: خیلی زیاد)	–	مستقل	PaveQual
۸	شرایط دوربین کنترل سرعت (۱: فاقد دوربین و پایه، ۲: دارای پایه، فاقد دوربین، ۳: دارای دوربین و پایه)	–	مستقل	SpeedCamera
۹	شرایط مجتمع خدماتی بین‌راهی (۰: فاقد مجتمع خدماتی بین‌راهی، ۱: دارای مجتمع خدماتی بین‌راهی)	–	مستقل	RestArea
۱۰	دانسیته رمپ خروجی	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	ExitRamp
۱۱	دانسیته رمپ ورودی	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	EntryRamp
۱۲	دانسیته تقاطعات سه‌راهی غیرکانالیزه‌شده	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	UnChanalizedT
۱۳	دانسیته تقاطعات سه‌راهی کانالیزه‌شده	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	ChanalizedT

ردیف	متغیر موردنظر	واحد متغیر	نوع متغیر	کُد متغیر حین مدل‌سازی تصادفات
۱۴	دانسیته تقاطعات چهارراه و یا میدان	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	IntersectionRandabout
۱۵	دانسیته دوربرگردان‌های خروجی	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	ExitUTurn
۱۶	دانسیته دوربرگردان‌های ورودی	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	EntryUTurn
۱۷	دانسیته تقاطعات غیرهمسطح	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	Interchange
۱۸	دانسیته پارکینگ‌های حاشیه راه	تعداد در واحد کیلومتر راه	مستقل	RoadSideParking
۱۹	متوسط سرعت وسایل نقلیه	kph	مستقل	MeanSpeed
۲۰	انحراف استاندارد سرعت وسایل نقلیه	kph	مستقل	STDSpeed
۲۱	متوسط درصد تخلف سرعت وسایل نقلیه	٪	مستقل	MeanSpeedVio
۲۲	انحراف استاندارد درصد تخلف سرعت وسایل نقلیه	٪	مستقل	STDSpeedVio
۲۳	متوسط درصد تخلف فاصله طولی		مستقل	MeanDistanceVio
۲۴	انحراف استاندارد درصد تخلف فاصله طولی	٪	مستقل	STDDistanceVio
۲۵	متغیر مربوط به کُد قطعه موردبررسی (تأثیر مکان قطعه در شبکه)	-*	مستقل	sectionid
۲۶	متغیر مربوط به فصل موردبررسی (تأثیر زمان قطعه در شبکه)	-*		timequa

۴. مدل‌سازی و تفسیر نتایج

جدول (۳) شمایی از نتایج مدل‌سازی و ضرایب متغیرها با کمک مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. به‌منظور انتخاب مدل بهینه بایستی مقادیر شاخص نکویی برازش آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردد. در این مقاله به‌منظور ارزیابی مدل‌ها از شاخص اطلاعات آکاییکه (AIC) و شاخص اطلاعات بیزین (BIC) استفاده گردید. روابط (۳) و (۴) چگونگی محاسبات شاخص‌های نکویی برازش فوق را نشان می‌دهند.

$$AIC = -2Log(L) + 2k \quad (۳)$$

$$BIC = -2Log(L) + klog(n) \quad (۴)$$

که در روابط اخیر، AIC و BIC به ترتیب شاخص‌های نکویی برازش آکاییکه و بیزین می‌باشند. همچنین L بیانگر بیشینه بزرگنمایی، k تعداد پارامترهای مدل (شامل پارامتر ثابت و نیز سایر متغیرهای مستقل مدل) و n تعداد نمونه موردمحاسبه آزمون است. مطابق تعریف هرچه مقادیر فوق کمتر باشند، مدل برازش شده بر داده‌ها انطباق بیشتری داشته و بهینه‌تر است [Akaike, 1974].

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۲) ملاحظه می‌گردد مُدل FENB با کمترین مقدار AIC و BIC به‌عنوان مدل بهینه برازش شده بر داده‌ها انتخاب می‌گردد. در مطالعات مهندسی ایمنی در حمل‌ونقل به‌منظور تصمیم‌سازی لازم است تا میزان

تأثیر هریک از متغیرها که البته هدف اصلی این تحقیق نیز است، موردمحاسبه قرار گیرد. بدین منظور می‌توان از تکنیک مشتق جزئی استفاده نمود. در این روش، میزان تأثیر هریک از متغیرهای مستقل در شاخص تصادفات واژگونی به‌عنوان متغیر وابسته، محاسبه می‌شود. در روند محاسبات، مشتق جزئی متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل موردنظر محاسبه‌شده و مقدار تغییر در خروجی (متغیر وابسته) به ازای ۱ واحد تغییر در متغیر مستقل به دست می‌آید به‌طوری‌که سایر متغیرها در وضعیت قبل و بعد در مقدار میانگین خودشان قرار دارند. این محاسبه با شاخصی تحت عنوان IRR در متون تحلیل آماری مطابق با رابطه (۵) تعریف می‌گردد [Halvorson et al., 2022].

$$IRR = \exp(\beta_1) = \frac{\lambda_{a+1}}{\lambda_a} \qquad (۵)$$

که در رابطه (۵)، IRR عبارت از نسبت تغییرات در متغیر وابسته به ازای تغییر واحد در متغیر مستقل، β_1 عبارت از ضریب متغیر مستقل اول و λ برابر با مقدار تابع توانی متغیر مستقل است.

عدد IRR، مقداری متعلق به بازه [۱، ۱-] دارد. هرچه مقدار فوق به ۱ یا ۱- نزدیک‌تر باشد نشانگر تأثیر بیشتر متغیر مستقل در متغیر وابسته موردبررسی است. در اینجا به‌منزله تأثیر بیشتر متغیر مستقل در شاخص تصادفات واژگونی است. خروجی محاسبات IRR در جدول (۴) ارائه گردیده است. همچنین تفسیر نتایج آن و توضیح در خصوص تغییرات مربوطه در ستون مقابل مقدار محاسباتی IRR آورده شده است.

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی و ارزیابی نتایج

ضرایب رگرسیونی مُدل‌های مختلف												
	Poisson	NB2	ZTP	ZTNB	ZIP		ZINB		REPoisson	RENB	FEPoisson	FENB
شرایط قیدی متغیر y*	خیر	خیر	خیر	خیر	If y=0	If y>0	If y=0	If y>0	خیر	خیر	خیر	خیر
LSADT	۰,۴۱۹۴	۰,۶۹۴۴	۰,۲۹۷۳	−۰,۱۶۵۹	−۰,۲۹۹	−۳,۷۳۰۵	−۰,۱۶	۴,۷۵۳۱	−۰,۵۱۶۵	۰,۸۹۴۵	۱,۰۳۴۹	۰,۲۸۴۸
HV	−۰,۰۰۶۵	−۰,۰۰۸۱	−۰,۰۱۵۵	−۰,۰۱۴۶	−۰,۰۱۵۵	−۰,۰۶۸۱	−۰,۰۱۳۶	−۰,۰۸۶۸	−۰,۰۰۵۷	۰,۰۱۲۹	−۰,۰۰۶۶۶	۰,۰۱۵۱
LeftShoulder	−۰,۰۵۴۱	−۰,۱۸۵۹	−۰,۰۶۷۸	−۰,۱۵۶۲	−۰,۰۶۸۵	۳,۲۳۰۴	−۰,۱۸۴۸	۴,۷۱۹۳	۰,۰۱۳۷	−۰,۱۱۰۲	−۵۹,۵۲۵	۰,۲۲۸۹
PavementWidth	۰,۰۱۱۲	۰,۰۲۷۹	۰,۱۹۰۶	۰,۲۳۳۳	۰,۱۹۲۵	−۰,۴۸۴۳	۰,۲۶۸۴	−۰,۴۸۷	۰,۰۲۲۷	−۰,۱۶۱۳	۷,۱۴۱۵۱	−۰,۱۴۳۲
RightSoulder	۰,۱۲۰۵	−۰,۳۱۸۸	−۰,۰۰۲۱	−۰,۱۹۵	−۰,۰۰۲۵	−۳,۸۴۴۴	−۰,۲۰۸۸	−۵,۶۲۲۵	−۰,۸۳۹۴	۰,۵۰۸	−۴۹,۷۱۶۷	۱,۷۱۱
Pavequal												
2	−۰,۸۱۱۲	−۰,۹۵۸۴	−۱,۰۳۳۷	−۱,۱۸	−۱,۰۳۴	۱۹,۴۹۰	−۱,۱۸۴۹	۱۸,۱۴۲	−۰,۷۱۵۸	−۰,۲۷۶۱	−۰,۷۰۷۸۸	−۰,۳۵۴۹
3	−۰,۷۴۷۰	−۱,۱۳۶۹	−۰,۷۱۰۲	−۰,۸۱۷۷	−۰,۷۱۱	۲۰,۵۷۷	−۰,۸۶۱	۱۹,۳۳۳	−۰,۹۴۴۸	−۰,۶۴۷۲	−۰,۹۶۲۴۴	−۰,۸۱۵۵
4	−۰,۵۱۴۴	−۰,۷۶۵۵	−۰,۶۸۰۸	−۰,۷۳۳۲	−۰,۶۷۹۵	۱۸,۲۳۸	−۰,۷۱۶۵	۱۶,۸۳۴	−۰,۳۹۱۹	−۰,۱۱۲۱	−۰,۵۵۸۳۲	−۰,۴۷۶۸
SpeedCamera												
2	۰,۲۹۶۰	۰,۱۹۹۴	۰,۱۸۸۷	۰,۱۰۲۸	۰,۱۸۸۲	−۱,۲۵۰۹	۰,۰۶۷۷	−۲,۶۴۳۴	۰,۳۲۳۸	۰,۳۷۴۷	۰,۳۲۹۱۴۱	۰,۳۶۸۷
3	۰,۰۲۰۷	۰,۱۴۶۵	−۰,۰۲۶۹	−۰,۱۰۸۲	−۰,۰۲۷۳	−۰,۶۸۰۹	−۰,۱۰۹۸	−۰,۹۶۰۲	۰,۱۰۸۹	−۰,۰۵۷۵	۰,۱۱۹۴۱۲	−۰,۰۴۷۹
RestArea	−۰,۰۶۱۷	−۰,۰۲۲۶	−۰,۱۶۲۶		−۰,۱۶۲۹	−۰,۲۸۸۱	−۰,۱۳۶۲	−۰,۲۲۴۵	−۰,۰۹۹۷	۰,۰۹۷۱	−۰,۰۳۲۹۲	۰,۱۸۵۱
ExitEntryRamp	۰,۴۹۵۶	۰,۳۱۲۴	۰,۴۵۶۹	−۰,۱۴۸۴	۰,۴۵۹	−۸,۸۴۴۲	۰,۴۰۰۴	−۴,۱۵۰۸	۰,۰۵۴۲	۰,۰۱۶۲	۰,۲۰۹۱۸	۰,۱۶۱۱
UnchanalizedT	−۰,۵۳۵۵	−۰,۵۶۲	−۰,۷۷۲۶	۰,۳۱۵۸	−۰,۷۷۱۵	۰,۵۸۶۵	−۰,۷۹۸۴	۲,۳۹۳۴	−۰,۷۴۱۹	۰,۲۹۱۲	۰,۰۰۰	۰,۸۴۱۵
ChanalizedT	۰,۹۴۸۶	۳,۷۱۰۷	−۰,۶۱۱۵	−۰,۸۲۷۲	−۰,۶۲۰۸	−۳۷,۲۰۳	۰,۱۶۵۳	−۴۷,۶۶۵	−۳,۸۹۶۵	۳,۳۲۶۹	۰,۰۰۰	−۴,۴۷۰۲
Inter~Randabout	−۵,۴۲۸۹	−۶,۳۱۳	−۱,۵۵۹۳	۰,۲۶۹۹	−۱,۵۴۶۷	۵,۸۹۱۲	۰,۷۸۷۲	۲,۹۱۲۹	−۲,۲۰۴	−۹,۰۷۵۴	۰,۰۰۰	−۱۶,۰۰۴
ExitEntryUTurn	۸,۵۶۴۱	۱۴,۱۳۲	−۰,۷۲۳۴	۰,۰۹۱۱	−۰,۷۳۷۷	−۳۳,۶۵۷	−۰,۳۷۹	−۷۶,۸۷۶	۱۱,۳۸۷	۱۹,۵۲۶۶	۹,۱۳۹۷۴۱	۱۵,۵۰۵

ضرایب رگرسیونی مُدل‌های مختلف											
	Poisson	NB2	ZTP	ZTNB	ZIP		ZINB		REPoisson	RENB	FEPoisson	FENB
Interchange	۱,۱۱۶۶	−۰,۳۸۵۷	۰,۸۹۵۲	۰,۳۴۴۱	۰,۸۹۶۶	−۲۵,۰۴	−۰,۰۸۰۹	−۲۵,۷۸۹	۴,۹۴۱۸	۲,۴۷۲	۰,۰۰۰	۷,۸۱۸۱
RoadsideParking	−۳,۵۸۰۴	−۴,۴۶۹۴	−۲,۷۹۴۵	−۰,۲۱۷۱	−۲,۷۸۹۵	۳۰,۵۱۴	−۳,۴۱۹۹	۳۹,۱۰۳	۰,۰۸۲۱	−۴,۴۱۴۵	۰,۰۰۰	−۸,۶۶۶۴
MeanSpeed	۰,۰۱۷۸	۰,۰۳۱۴	۰,۰۱۳۸	−۳,۴۹۹۱	۰,۰۱۳۸	−۰,۰۸۵	۰,۰۱۷	−۰,۱۵۲	۰,۰۱۲۶	۰,۰۲۴۷	۰,۰۰۷۰۴۸	۰,۰۰۵۴
MeanSpeedVio	−۰,۰۲۱۲	−۰,۰۳۲۳	−۰,۰۱۷۲	۰,۰۱۷۶	−۰,۰۱۷۲	۰,۰۹۶۵	−۰,۰۱۷۸	۰,۱۵۲۸	−۰,۰۰۷۶	−۰,۰۲۹۸	−۰,۰۰۳۰۹	−۰,۰۲۱۸
MeanDistanceVio	−۰,۰۲۹۱	−۰,۰۳۲۹	−۰,۰۰۶۳	−۰,۰۱۷۷	−۰,۰۰۶۴	۰,۰۶۸۹	−۰,۰۰۳۲	۰,۰۵۱۳	−۰,۰۳۴۶	−۰,۰۴۸۷	−۰,۰۲۵۸۲	−۰,۰۳۹۵
STDSpeed	−۰,۰۱۹۱	−۰,۰۰۵۲	−۰,۰۶۶۱	۰,۰۰۱	−۰,۰۶۷۱	−۰,۳۲۲	−۰,۰۷۱۹	−۰,۷۲۱۲	−۰,۰۳۲۴	−۰,۰۰۰۵	−۰,۰۳۵۶۷	−۰,۰۱۷۹
STDSpeedVio	۰,۰۹۸۴	۰,۱۰۸۵	۰,۰۷۸۹	−۰,۰۵۱۲	۰,۰۷۹۴	−۰,۰۸۵۵	۰,۰۸۵۸	۰,۰۷۷۸	۰,۰۹۲۵	۰,۰۸۹	۰,۰۹۶۶۲	۰,۰۹۹۹
STDDistanceVio	−۰,۰۸۱۷	−۰,۰۷۱۱	−۰,۰۱۴	۰,۰۷۳۳	−۰,۰۱۴	۰,۳۱۷۵	−۰,۰۲۷۲	۰,۴۰۸۲	−۰,۰۱۴۲	−۰,۰۳۴۸	−۰,۰۱۳۰۱	−۰,۰۰۲۷
Constant	۰,۴۹۴۹	−۰,۴۵۰۸	۳,۲۷۵	−۰,۰۲۷۷	۳,۲۶۶۸	۵,۸۴۱۲	۲,۵۷۹۴	۱۷,۱۲۱	۵,۱۹۹۶	−۴,۸۹۱۷	–	−۳,۴۴۱۷
alpha (α)	–	۱,۴۷۰۸	–	−۰,۳۹۵۶	–		۰,۳۹۵۴		۰,۸۲۶۰	–	–	–
AIC	۳۴۲۱,۰	۱۷۵۲,۲	۲۰۲۹,۹	۱۳۸۱,۴	۲۲۵۲,۴		۱۵۹۲,۹		۲۷۳۳,۴	۱۶۶۱,۹	۲۳۴۳,۷	۱۳۰۵,۷
BIC	۳۵۱۰,۱	۱۸۴۴,۸	۲۱۱۱,۲	۱۴۶۶,۰	۲۴۳۰,۶		۱۷۷۴,۷		۲۸۲۶,۱	۱۷۵۸,۲	۲۴۱۰,۵	۱۳۹۳,۶

* در اینجا متغیر y همان rolloverci یعنی شاخص خطر تصادفات واژگونی است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی میزان اثرگذاری متغیرها و تفسیر نتایج

متغیر	درصد تأثیر (٪) (IRR)	میزان تغییر در متغیر مستقل جهت محاسبه IRR
متغیرهای خصوصیات جریان ترافیکی		
لگاریتم میزان تردد فصلی معادل روزانه	۰/۱۱	افزایش ۱۰ درصدی تردد (محاسبه‌شده بر اساس تغییرات سه‌ساله)
درصد وسایل نقلیه سنگین	۰/۱۴	افزایش ۱ درصدی وسایل نقلیه سنگین
میانگین سرعت وسایل نقلیه عبوری	۰/۰۵	تغییر به ازای هر ۱ کیلومتر بر ساعت
میانگین درصد تخلف سرعت	-۰/۲	تغییر به ازای هر ۱ درصد تخلف سرعت
میانگین درصد تخلف فاصله طولی	-۰/۳۷	تغییر به ازای هر ۱ درصد تخلف فاصله طولی
انحراف استاندارد میانگین سرعت وسایل نقلیه	-۰/۱۷	تغییر به ازای هر ۱ کیلومتر بر ساعت افزایش در انحراف استاندارد متوسط سرعت
انحراف استاندارد میانگین درصد تخلف سرعت	-۰/۹۳	تغییر به ازای هر ۱ درصد افزایش در انحراف استاندارد میانگین درصد تخلف سرعت
انحراف استاندارد میانگین درصد تخلف فاصله طولی	-۰/۰۳	تغییر به ازای هر ۱ درصد افزایش در انحراف استاندارد میانگین درصد تخلف فاصله طولی
دوربین کنترل سرعت		
۲	۳/۴۲	تغییر نسبت به عدم نصب دوربین کنترل سرعت
۳	-۰/۴۴	تغییر نسبت به عدم نصب دوربین کنترل سرعت
متغیرهای خصوصیات راه و هندسه مسیر		
عرض شانه سمت چپ	۲/۱۳	افزایش ۱ متر عرض شانه چپ
عرض روسازی راه	-۱/۳۳	افزایش ۱ متر عرض روسازی
عرض شانه سمت راست	۱۵/۸۹	افزایش ۱ متر عرض شانه راست
سطح کیفی روسازی راه		
۲	-۳/۳	تغییر نسبت به سطح کیفی اولیه (بسیار عالی)
۳	-۷/۵۷	تغییر نسبت به سطح کیفی اولیه (بسیار عالی)
۴	-۴/۴۳	تغییر نسبت به سطح کیفی اولیه (بسیار عالی)
مجتمع خدماتی رفاهی بین‌راهی	۱/۷۲	تغییر نسبت به عدم وجود استراحتگاه بین‌راهی
دانسیته رمپ دسترسی (ورودی×خروجی)	۰/۱۶	تغییر به ازای ۱ واحد در توان دوم دانسیته رمپ‌ها
دانسیته سه‌راهی غیرکانالیزه‌شده	۱/۹۵	تغییر در میزان دانسیته به اندازه متوسط (۰/۲۴۹۵)
دانسیته سه‌راهی کانالیزه شده	-۰/۶۵	تغییر در میزان دانسیته به اندازه متوسط (۰/۰۱۵۷)
دانسیته تقاطعات هم‌سطح چهارراه-میدان	-۳/۶۳	تغییر در میزان دانسیته به اندازه متوسط (۰/۰۲۴۳)
دانسیته دوربرگردان (ورودی×خروجی)	۱۲	تغییر به ازای ۱ واحد در توان دوم دانسیته دوربرگردان‌ها

متغیر	درصد تأثیر (٪) (IRR)	میزان تغییر در متغیر مستقل جهت محاسبه IRR
دانسیته تقاطعات غیرهمسطح	۲/۳۵	تغییر در میزان دانسیته به اندازه متوسط (۰/۰۳۲۴)
دانسیته پارکینگ‌های کنار جاده‌ای	-۵/۶۶	تغییر در میزان دانسیته به اندازه متوسط (۰/۰۷۰۳)

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله بررسی تأثیر انواع متغیرهای مهم در تعداد و شدت تصادفات واژگونی راه‌های برون‌شهری با مطالعه موردی استان یزد بود. بدین منظور در ابتدا راه‌های برون‌شهری استان یزد به قطعات همگن که دارای خصوصیات راه و جریان ترافیک نزدیک به هم بودند تقسیم‌بندی شدند. در ادامه متغیرهای مربوط به این قطعات مورد برداشت میدانی/استخراج از پایگاه داده قرار گرفت که شامل متغیرهای مستقل و نیز آمار سه ساله تعداد و شدت تصادفات واژگونی مربوط به این قطعات بود. سپس به‌منظور داشتن تأثیر توأمان فراوانی و شدت تصادفات، شاخص تصادفات معرفی گردید و به‌عنوان متغیر وابسته در این پژوهش به کار گرفته شد. در ادامه نسبت به مدل‌سازی و مقایسه مدل‌های مختلف پرداخته شد و شاخص نکویی برازش این مدل‌ها شامل AIC و BIC مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد مدل FENB نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد. در ادامه میزان اهمیت هریک از متغیرها از طریق محاسبه شاخص IRR بر پایه محاسبات مشتق جزئی استخراج گردید. بررسی‌های این مقاله نشان داد متغیرهای عرض شانه سمت طرفین راه، دانسیته تقاطعات T شکل کانالیزه و غیرکانالیزه شده، دانسیته تقاطعات همسطح بیشترین میزان تغییر به ازای واحد تغییرات متغیر شاخص تصادفات واژگونی را دارند. از نتایج این مقاله می‌توان در تصمیم‌گیری‌های مهم حوزه ایمنی راه بهره برد.

۶. سپاسگزاری

پژوهشگران این مقاله از همکاری اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان یزد و نیز پلیس‌راه استان یزد جهت همکاری در خصوص ارائه آمار و اطلاعات تصادفات صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۷. مراجع

- اسدی، م. ج.، و فتاحی، ع. (۱۳۹۳) "مدل شدت تصادفات واژگونی بر پایه پارامترهای مؤثر طرح هندسی، جریان ترافیک و مشخصات جمعیتی راننده در بررسی موردی راه‌های شریانی استان ایلام"، سومین کنفرانس ملی تصادفات جاده‌ای، سوانح ریلی و هوایی، زنجان، ایران.

- اسدی، م. ج.، نصراللهی، ل. فتاحی، ع.، و عبدلی، ا. (۱۳۹۸) "بررسی عوامل مؤثر بر وقوع تصادفات واژگونی با استفاده از روش سلسله مراتبی"، دومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، ایران.

- حاجی حسینلو، م.، جزونقی، م.، خلجی، م. ح.، و شاددل، س. (۱۳۹۵) "تحلیل و مقایسه اثرات کاهنده تعداد تصادفات واژگونی در آزادراه‌های ایران با رویکرد استفاده از دوربین‌های ثبت سرعت سیار توسط پلیس در برابر دوربین‌های ثابت وزارت راه و شهرسازی (مطالعه موردی آزادراه زنجان-قزوین)"، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران، ایران.

- شمسی، ح. (۱۳۹۴) "مدل‌سازی رگرسیونی پیش‌بینی و شناسایی محورهای درخطر تصادفات واژگونی جاده‌های استان ایلام"، اولین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری، شیراز، ایران.

- قنوتی، م. ه.، نجف، پ.، و حبیبیان، م. (۱۳۹۰) "ارزیابی شدت تصادفات واژگونی خودروهای داخلی و خارجی در جاده‌های برون‌شهری"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران.

- عبدوس، ح. (۱۳۸۷) "بررسی متغیرهای تأثیرگذار بر تصادفات واژگونی در شبکه جاده‌ای ایران"، هشتمین کنفرانس مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک ایران، تهران، ایران.

- مدقالچی، ع.، بهشتی، س. ا. ح.، سجادی، س. م. و آقاخانی، م. ر. (۱۳۸۸) "تحلیل تصادفات ناشی از واژگونی وسایل نقلیه (مطالعه موردی استان زنجان در سال۸۵)"، اولین کنفرانس ملی تصادفات و سوانح جاده‌ای و ریلی، زنجان، ایران.

- Administration, N. H. T. S. (2021) “2020 Fatality Data Show Increased Traffic Fatalities During Pandemic”.

- Akaike, H. (1974) “A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control”, Vol. 19, No. 6, pp. 716-723. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705

- Alrejjal, A., Farid, A., & Ksaibati, K. (2021) “A correlated random parameters approach to investigate large truck rollover crashes on mountainous interstates”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 159, 106233. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106233

- Alrejjal, A., Farid, A., & Ksaibati, K. (2022) “Investigating factors influencing rollover crash risk on mountainous interstates”, Journal of Safety Research, Vol. 80, pp. 391-398. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.12.020

- Alrejjal, A., & Ksaibati, K. (2022a) “Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves”, International Journal of Transportation Science and Technology. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.01.001

- Alrejjal, A., & Ksaibati, K. (2022b) “Impact of mountainous interstate alignments and truck configurations on rollover propensity”, Journal of Safety Research, Vol. 80, pp -160-174. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.11.012

- Analysis, N. C. f. S. a. (2021) “Early estimates of motor vehicle traffic fatalities and fatality rate by sub-categories in 2020 (DOT HS 813 118). (Crash•Stats Brief Statistical Summary, Issue”.

- Anarkooli, A. J., Hosseinpour, M., & Kardar, A. (2017) “Investigation of factors affecting the injury severity of single-vehicle rollover crashes: A random-effects generalized ordered probit model”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 106, pp. 399-410. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.008

- Azimi, G., Rahimi, A., Asgari, H., & Jin, X. (2020) “Severity analysis for large truck rollover crashes using a random parameter ordered logit model” Accident Analysis & Prevention, Vol. 135, 105355. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105355

- Brumbelow, M. L., Teoh, E. R., Zuby, D. S., & McCartt, A. T. (2009) “Roof Strength and Injury Risk in Rollover Crashes”, Traffic Injury Prevention, Vol. 10, No. 3, pp. 252-265. https://doi.org/10.1080/15389580902781343

- Bullard, C., Jones, S., Adanu, E. K., & Liu, J. (2023) “Crash severity analysis of single-vehicle rollover crashes in Namibia: A mixed

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00010-0

- Fréchède, B., McIntosh, A. S., Grzebieta, R., & Bambach, M. R. (2011) "Characteristics of single vehicle rollover fatalities in three Australian states (2000–2007)", Accident Analysis & Prevention, Vol. 43, No. 3, pp. 804-812. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.028

- Funk, J. R., Cormier, J. M., & Manoogian, S. J. (2012) "Comparison of risk factors for cervical spine, head, serious, and fatal injury in rollover crashes", Accident Analysis & Prevention, Vol. 45, pp. 67-74. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.009

- Gloeckner, D. C., Moore, T. L. A., Steffey, D., Le-Resnick, H., Bare, C., & Corrigan, C. F. (2006) "Implications of vehicle roll direction on occupant ejection and injury risk. Annual proceedings", Association for the Advancement of Automotive Medicine, Vol. 50, pp. 155-170. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16968635 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3217470/

- Gong, L., & Fan, W. (2017) "Modeling single-vehicle run-off-road crash severity in rural areas: Accounting for unobserved heterogeneity and age difference", Accident Analysis & Prevention, Vol. 101, pp. 124-134. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.014

- Halvorson, M. A., McCabe, C. J., Kim, D. S., Cao, X., & King, K. M. (2022) "Making sense of some odd ratios: A tutorial and improvements to present practices in reporting and visualizing quantities of interest for binary and count outcome models", Psychol Addict Behav, Vol. 36, No. 3, pp. 284-295. https://doi.org/10.1037/adb0000669

logit approach", IATSS Research, Vol. 47, No. 3, pp. 318-324. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2023.07.002

- Chen, C., Zhang, G., Qian, Z., Tarefder, R. A., & Tian, Z. (2016) "Investigating driver injury severity patterns in rollover crashes using support vector machine models", Accident Analysis & Prevention, Vol. 90, pp. 128-139. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.011

- Chen, S. R., Cai, C. S., & Wolshon, B. (2009). "From Normal Operation to Evacuation: Single-Vehicle Safety under Adverse Weather, Topographic, and Operational Conditions", Natural Hazards Review, Vol.10, No. 2, pp. 68-76. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:2(68)

- Conroy, C., Hoyt, D. B., Eastman, A. B., Erwin, S., Pacyna, S., Holbrook, T. L., Vaughan, T., Sise, M., Kennedy, F., & Velky, T. (2006) "Rollover crashes: Predicting serious injury based on occupant, vehicle, and crash characteristics", Accident Analysis & Prevention, Vol. 35, No. 5, pp. 835-842. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.02.002

- El-Hennawy, H., El-Menyar, A., Al-Thani, H., Tuma, M., Parchani, A., Abdulrahman, H., Peralta, R., Asim, M., Zarour, A., & Latifi, R. (2014) "Epidemiology, causes and prevention of car rollover crashes with ejection", Annals of medical and health sciences research, Vol. 4, No. 4, pp. 495-502. https://doi.org/10.4103/2141-9248.139279

- Farmer, C. M., & Lund, A. K. (2002) "Rollover risk of cars and light trucks after accounting for driver and environmental factors", Accident Analysis & Prevention, Vol. 34, No. 2, pp. 163-173.

- Khan, I. U., & Vachal, K. (2020) “Factors affecting injury severity of single-vehicle rollover crashes in the United States”, Traffic Injury Prevention, Vol. 21, No. 1, pp. 66-71. https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1696962

- Obaid, I., Alnedawi, A., Aboud, G. M., Tamakloe, R., Zuabidi, H., & Das, S. (2023) “Factors associated with driver injury severity of motor vehicle crashes on sealed and unsealed pavements: Random parameter model with heterogeneity in means and variances”, International Journal of Transportation Science and Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 460-475. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.04.002

- Padmanaban, J., Moffatt, E. A., & Marth, D. R. (2005) “Factors Influencing the Likelihood of Fatality and Serious/Fatal Injury in Single-Vehicle Rollover Crashes”, SAE 2005 World Congress & Exhibition, Detroit Michigan, United States.

- Parenteau, C. S., & Shah, M. (2000) “Driver injuries in US single-event rollovers”, Society of Automotive Engineers, Paper 2000-01-0633.

- Parker, D. D., Ray, R. M., Moore, T. L. A., & Keefer, R. E. (2007) “Rollover Severity and Occupant Protection—A Review of NASS/CDS Data”, SAE Transactions, Vol. 116, pp. 464-471. http://www.jstor.org/stable/44687816

- Rahimi, E., Shamshiripour, A., Samimi, A., & Mohammadian, A. (2020) “Investigating the injury severity of single-vehicle truck crashes in a developing country”, Accident Analysis & Prevention, Vol. 137, 105444. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105444

- Viano, D. C., Parenteau, C. S., & Edwards, M. L. (2007) “Rollover injury: effects of near- and far-seating position, belt use, and number of quarter rolls”, Traffic Inj Prev, Vol. 8, No. 4, pp. 382-392. https://doi.org/http://10.1080/15389580701583379

- Zhan, H., Wang, G., Shan, X., & Liu, Y. (2024) “Risk-aware lane-change trajectory planning with rollover prevention for autonomous light trucks on curved roads’, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 211, 111126. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111126