

شناسایی عوامل مؤثر بر ایمنی ترافیک در محل تونل‌ها با استفاده از الگوهای رگرسیونی

شهریار رحیمی^۱، اسماعیل آیتی^۲، مهدی دوست پرست^۳

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، پردیس بین‌الملل، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد تمام، مرکز مطالعات فنی و اقتصادی ایمنی جاده‌ای، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

شناسایی مناطق حادثه خیز یکی از مهم‌ترین شاخه‌های مطالعات تصادفات می‌باشد. تونل‌ها، یکی از مهم‌ترین مکان‌های حادثه‌آفرین می‌باشد؛ زیرا در حالت کلی تونل‌ها از نظر مشخصات فیزیکی و عملکردی از سایر بخش‌های مسیر متفاوت است. هدف اصلی این پژوهش شناسایی الگوهای تصادفات وسایل نقلیه و عوامل مؤثر بر حوادث ترافیکی در محل تونل‌ها می‌باشد. در این پژوهش از الگوهای رگرسیون خطی، پواسون، دو جمله‌ای منفی و مدل‌های پر صفر (ZIP و ZINB) جهت مدل‌سازی تصادفات در محل تونل‌ها استفاده گردید. با استفاده از نتایج الگوها مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایمنی ترافیک تونل در مورد تصادفات خسارتی، جرحی و فوتی مورد شناسایی قرار گرفت. سپس مقایسه‌ای بین مدل‌ها انجام گرفت و الگوی بهینه در مورد هر گروه از تصادفات انتخاب گردید. در همین راستا در مورد تصادفات خسارتی استفاده از الگوی خطی و هرچه پراکندگی بیشتر شود مدل دو جمله‌ای منفی پیشنهاد می‌گردد. همچنین در مورد داده‌های با فراوانی صفر زیاد همچون تصادفات فوتی استفاده از مدل‌های پرفر صفر نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به خروجی الگوها نتیجه گرفته شد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصادفات عبارتند از: AADT در هر خط عبور، طول تونل، درصد وسایل نقلیه سنگین و تعداد خطوط عبور.

واژگان کلیدی: تصادفات ترافیکی، رگرسیون خطی، رگرسیون پواسون، رگرسیون دو جمله‌ای منفی، مدل‌های پرفر صفر

۱- مقدمه

۱۰۰ هزار نفر جمعیت، در رده پنجمین کشور دارای فراوانی خطرناک‌ترین جاده‌ها قرار می‌گیرد [۲]. براساس آمار رسمی دفتر ایمنی و ترافیک سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای ایران در سال ۹۲، ۱۷۹۹۷ نفر در تصادفات ترافیکی جان باخته‌اند؛ که از این تعداد، ۱۱۵۶۸ نفر معادل ۶۴٫۳ درصد از کل کشته‌شدگان، مربوط به تصادفات برون شهری بوده است [۳].

شناسایی پهنه‌های پرخطر و تحلیل داده‌های مربوطه برای درک فرایندهای موجود در این مناطق، برای تخصیص بهینه منابع به منظور ارتقا ایمنی، ضروری می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و عملکردی غیر معمول تونل‌ها بر خطر حوادث وسایل نقلیه و نوع تصادفات اثر گذار است. اگرچه تاکنون اطلاعات کمی در مورد تصادفات در محدوده تونل‌ها منتشر شده است. در همین راستا، تونل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق حادثه خیز شناسایی شده است [۴]. براساس آمار سال ۱۳۹۲ در ایران

سهم ایران از سوانح جاده‌ای، اسف بارتر از اکثر کشورها است به طوری که طبق برآورد صورت گرفته، هزینه تصادفات ترافیکی ایران در سال ۱۳۸۶ حدود ۱۸ هزار میلیارد تومان یعنی حدود ۷ درصد تولید ناخالص ملی کل کشور ایران در همان سال بوده است [۱]. تلفات ترافیکی یکی از مهم‌ترین علل مرگ و میر در تمامی کشورها، به خصوص در کشورهای در حال توسعه، است. بر اساس جدیدترین آمارها سالانه یک میلیون و ۳۰۰ هزار نفر در سراسر جهان بر اثر تصادفات جان خود را از دست می‌دهند و ۵۰ میلیون نفر مجروح و معلول می‌شوند. آمار سازمان بهداشت جهانی WHO^۱ در فاصله ۲۱ مارس ۲۰۱۰ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۱ میلادی نشان می‌دهد، ایران در گروه کشورهای دارای جاده‌های خطرناک (وضعیت قرمز) قرار دارد. ایران با داشتن نسبت ۳۳ نفر مرگ و میر به ازای هر

1 World Health Organization

یکی از جدیدترین پروژه‌ها که اخیراً انجام گرفته پژوهش کالیندو و همکاران در کشور ایتالیا برای تهیه مدل پیش‌بینی تصادفات ترافیکی در تونل‌ها بوده که بدین نتیجه رسیده که شدت و خسارت مالی و جانی در تونل‌ها به ازاء هر وسیله نقلیه-کیلومتر بسیار بیشتر است [۱۳]. مهمترین عوامل تصادفات طول تونل، AADT در هر خط عبور، تعداد خطوط عبوری و درصد وسایل نقلیه سنگین بوده‌اند که همگی رابطه‌ی مستقیمی با نرخ تصادفات دارند [۱۴].

در دو پژوهش که در ایران انجام شده است از روش سلسله مراتبی AHP، برای ارزیابی ایمنی استفاده شده است که مقدار زیادی به قضاوت مهندسی در تعیین عوامل تصمیم‌گیری چند معیاره مؤثر و ماتریس وزنی عوامل بستگی دارد. در تحقیق اول که سال ۱۳۹۰ و در دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان بر روی تونل‌های محور کرج - چالوس انجام گرفت، شش عامل به عنوان مهمترین عوامل در ایمنی محدوده‌ی تونل‌های راه مشخص شدند که عبارتند از: ۱- روشنایی ۲- علائم افقی ۳- قوس ۴- روسازی ۵- علائم عمودی ۶- زهکشی. [۱۵]. تحقیق دوم که سال ۱۳۹۱ و در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد همانند تحقیق قبل می‌باشد با این تفاوت که عوامل مؤثر به طور کلی به هفت گروه اصلی تقسیم شده‌اند، که عبارتند از: ۱- هندسه تونل و راه ۲- مدیریت و پایش ترافیک ۳- سیستم‌های مدیریت خدمات اضطراری و امداد و نجات ۴- مقاومت در برابر آتش سوزی ۵- سیستم‌های ارتباطی ۶- تهویه ۷- سیستم روشنایی و تامین برق [۱۶].

بنابراین در این پژوهش سعی خواهد شد، متغیرهایی از تونل‌ها که بر وقوع تصادفات مؤثرتر هستند، شناسایی شده و سپس با استفاده از الگوهای رگرسیونی رابطه‌ای بین وضعیت آن متغیرها و ایمنی محل تونل (تعداد تصادفات در محدوده‌ی تونل‌ها) به دست آید. این تلاش باعث خواهد گردید برای اولین بار در ایران الگویی که بتواند میزان ایمنی ترافیکی در محل تونل‌ها را تعیین نموده و میزان تصادفات را پیش‌بینی کند، به وجود آید. همچنین در این فرایند و با توجه به الگوهای خروجی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سوانح ترافیکی در محل تونل‌ها شناسایی خواهد گردید.

۲- روش‌شناسی پژوهش

تونل‌های مورد بررسی در این مقاله در ۳ استان خراسان رضوی، خراسان شمالی و گلستان واقع شده‌اند. مجموع طول تونل‌های واقع در محدوده‌ی مورد مطالعه ۳۷۹۹ متر بوده که بیشترین طول مربوط به تونل باجگیران واقع در استان خراسان رضوی با

۲۹۷ تونل به طول مجموعاً ۱۴۱۸۹۵ متر در حال بهره‌برداری می‌باشد، که از این تعداد ۲۱۱ تونل دارای روشنایی و ۷ تونل دارای سیستم تهویه هوا هستند [۳].

براساس تحقیقات انجام گرفته، اولین مطالعات ایمنی تونل بر روی تصادفات ترافیکی در تونل‌ها توسط کمیته پیارک در سال ۱۹۹۵ انجام شده است. این کمیته گزارش کرده است که: تونل‌ها به جز در موارد وجود اختلاف تراز عمودی یا افقی از سایر قسمت‌های باز جاده ایمن‌تر می‌باشند؛ تونل‌های با ترافیک دوطرفه باعث سوانح بیشتری از تونل‌های یک طرفه می‌شوند؛ نرخ متوسط تصادفات منجر به جرح ۸ و ۱۰ به ازاء ۱۰۸ وسیله نقلیه-کیلومتر برای به ترتیب از تونل‌های یک طرفه و دو طرفه می‌باشد [۵]. در مطالعه رفتار رانندگان در تونل‌ها ترنورس بدین نتیجه رسید که جابه‌جایی جانبی نسبت به دیوار نزدیک تر به وسیله نقلیه بیشتر است اگر این دیوار در سمت چپ رانندگان قرار داشته باشد [۶].

آمونسن و رینس نشان دادند که نرخ تصادفات ترافیکی که در ورودی تونل بیشتر است به تدریج با پیشروی در تونل کاهش می‌یابد و در همین راستا بدین نتیجه دست یافتند که شدت تصادفات به وقوع پیوسته در داخل تونل‌ها عموماً از شبکه راه‌ها بیشتر می‌باشد [۷]. لکه بدین نتیجه رسید که تصادفات در تونل‌های یک طرفه کمتر از سایر مناطق جاده است (حدوداً نصف)؛ همچنین نرخ تصادفات رابطه‌ی مستقیم با طول تونل و رابطه معکوس با وجود شانه دارند [۸]. سالویسبرگ ادعا کرده است که خطر وقوع تصادف در تونل‌های طولانی کمتر از تونل‌های کوتاه می‌باشد؛ و همچنین این خطر با افزایش مقدار متوسط ترافیک روزانه‌ی سالانه AADT^۱ و درصد وسایل نقلیه سنگین افزایش پیدا می‌کند [۹]. وشیتز و همکاران بدین نتیجه رسیدند که با استفاده از ابزارهای بهینه ارتباطی بین راننده و محیط تونل از طریق سیستم‌های هوشمند حمل و نقل (ITS)^۲ تصادفات کمتری مورد انتظار است [۱۰]. کرچر و اشتروم نشان دادند که رفتار رانندگان تحت تأثیر سطح روشنایی و روشنایی دیوارهای تونل است [۱۱].

تاکنون روشی یکنواخت و یکسان جهت ارزیابی ایمنی تونل در دنیا ارائه نشده است. در اکثر کشورها ایمنی تونل بوسیله‌ی مقررات و استانداردهای از پیش تعیین شده کنترل می‌گردد. بنابراین فقدان یک روش جامع، ساده و کاربردی جهت ارزیابی ایمنی در تونل کاملاً مشهود است [۱۲].

1 Average Annual Daily Traffic

2 Intelligent Transportation Systems

۱۰۸۰ متر طول می‌باشد و کوتاه‌ترین تونل واقع در محدوده‌ی مورد مطالعه تونل دومن‌نیم واقع در جاده بجنورد_اسفراین در استان خراسان شمالی به طول ۹۶ متر است.

متغیرهای ناوابسته‌ای که در مدل‌ها به کار گرفته خواهد شد متغیرهای مربوط به خصوصیات جریان ترافیکی شامل جهت ترافیک عبوری، ترافیک عبوری از هر خط (AADT per Lane) و درصد وسایل نقلیه سنگین، متغیرهای مربوط به طرح هندسی جاده شامل تعداد خطوط عبور، طول تونل، وضعیت شانه و وجود پیاده‌رو و متغیرهای مربوط به شرایط محیطی شامل وضعیت زهکشی و شرایط روشنایی می‌شوند.

محققان در الگوهای اولیه پیش‌بینی تصادفات تکنیک‌های خطی ساده چند متغیره را برای ایجاد رابطه‌ای بین مشخصات هندسی راه، ویژگی‌های ترافیکی و تصادفات پذیرفته بودند. مدل یا الگوهای رگرسیون خطی به صورت:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

می‌باشند که Y_i متغیر وابسته فراوانی و یا شدت تصادفات، X_1, X_2, \dots, X_k و متغیرهای مستقل (مشخصات هندسی مسیر و شرایط ترافیکی مسیر و ...) و ε عبارت خطا می‌باشد. در مدل‌های خطی، پاسخ یک تابع خطی از پارامترهای مجهول الگو یا ضرایب رگرسیون $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ است. بسیاری از مدل‌های رگرسیون خطی مرسوم، برای مدل‌سازی فراوانی و شدت تصادفات مناسب نیستند چراکه این مدل‌ها یا الگوها به شکلی می‌باشند که مانع محاسبه مقادیر منفی نمی‌شوند. پیش‌بینی مقادیر منفی ضرایب مدل یا الگو را غیرقابل اعتماد می‌سازد.

مدل پواسون به دلیل ماهیت گسسته، غیر منفی و گاهی اوقات نادر بودن تصادفات به کار گرفته می‌شود. در اغلب مواقع ضرایب تخمینی در مدل پواسون با استفاده از روش‌های درست نمایی ماکزیمم استاندارد تخمین زده می‌شود. در الگوی رگرسیون پواسون، مشاهده λ_i (مغیر وابسته، $i = 1, 2, \dots, N$) به عنوان یک متغیر تصادفی پواسون با میانگین λ_i مدل می‌شود. الگوی پواسون به صورت:

$$P(y_i) = \frac{(e^{-\lambda_i}) (\lambda_i)^{y_i}}{y_i!} \quad (2)$$

می‌باشد که $P(y_i)$ احتمال ۰، ۱، ۲، و ... و N بودن تعداد تصادفات در گذرگاه (تونل) i و λ_i پارامتر پواسون طبق تعریف زیر می‌باشد یا به عبارتی میانگین شرطی y_i برای متغیرهای مستقل آماری مشاهده شده، x_i ها از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$E(y_i | x_i) = \lambda_i = e^{x_i \beta} = e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)} \quad (3)$$

به عبارتی دیگر:

$$\log \lambda_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (4)$$

که در آن x_i مشخصات یا داده‌های مستقل تصادف و β ضرایب تخمینی می‌باشد.

ضرایب تخمینی در الگوی پواسون با استفاده از روش‌های درست نمایی ماکزیمم تخمین زده می‌شود. تابع رگرسیون پواسون به صورت زیر داده شده است:

$$L(\beta) = \prod_i \frac{\exp[-\exp(\beta x_i)] [\exp(\beta x_i)]^{y_i}}{y_i!} \quad (5)$$

یک ویژگی مهم توزیع پواسون این است که میانگین و واریانس توزیع باید با یکدیگر برابر باشند اما در همین راستا تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که بسته به داده‌های مشاهداتی این ادعا همیشه معتبر نیست و باید برای بانک‌های اطلاعاتی مختلف بررسی شود. در بعضی موارد، تصادفات به نحو قابل توجهی از فرض برابری میانگین با واریانس انحراف دارد و این می‌تواند خطای مهمی در پیش‌بینی نتایج مدل وارد کند. در صورتی که میانگین داده‌ها بیشتر از واریانس باشد، داده‌ها دارای پراکندگی کم و در صورتی که واریانس از میانگین بیشتر باشد، داده‌ها دارای پراکندگی زیاد می‌باشند [۱۷].

الگوی دو جمله‌ای منفی برای داده‌های با پراکندگی زیاد مناسب است زیرا این الگو محدودیت مساوی بودن میانگین با واریانس را ندارد. در همین جهت محدودیت و مشکل الگوی پواسون با اضافه شدن یک عبارت خطای توزیع شده‌ی گاما به آن تصحیح می‌گردد.

$$\log \lambda_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (6)$$

که در رابطه‌ی بالا ε ، عبارت خطای توزیع شده‌ی گاما برای همه‌ی متغیرها می‌باشد. اضافه شدن این عبارت، به الگو اجازه می‌دهد تا میانگین و واریانس با یکدیگر برابر نباشند:

$$\text{Var}[Y_i] = E[Y_i] [1 + E[Y_i] / \varphi] \quad (7)$$

در صورتی که مقدار $1/\varphi$ بیشتر از صفر بیشتر این امکان را به مدل می‌دهد که واریانس از میانگین بیشتر باشد. در همین راستا الگوی دو جمله‌ای منفی به صورت رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید [۱۷]:

$$F(y_i) = \frac{\Gamma(y_i + \varphi) \left[\frac{\lambda_i}{\lambda_i + \varphi} \right]^{y_i} \left[\frac{\varphi}{\lambda_i + \varphi} \right]^\varphi}{y_i! \Gamma(\varphi)} \quad (8)$$

اما مشکل دیگری که داده‌های تصادفات با آن رو به رو هستند، فزونی داده‌های صفر (به خصوص در مورد تصادفات فوتی) می‌باشد. برای برداشتن این مشکل پژوهشگران به الگوهای

می‌باشد. قابل مشاهده است که نرخ تلفات جانی در تونل‌ها در حدود ۲ برابر همین نرخ در مناطق باز جاده است. همچنین نرخ وقوع تصادفات خسارتی به ازاء هر کیلومتر از مسیر در مناطق باز جاده ۱۳,۱۱ نفر در هر کیلومتر و در تونل ۱۲,۱ نفر در هر کیلومتر می‌باشد. در همین راستا مطالعات انجام گرفته در ایتالیا نشان می‌دهد که نرخ تصادفات منجر به جراحت شدید (جرحی و فوتی) در تونل‌ها بین ۹,۳۱ تا ۲۰,۴۵ به ازاء هر ۱۰^۸ وسیله نقلیه-کیلومتر متغیر است در حالی که در مناطق باز جاده این مقدار ۸,۶۲ تا ۱۰,۱۴ به ازاء هر ۱۰^۸ وسیله نقلیه-کیلومتر متغیر است [۱۳]. از آن جا که شاخص اندازه‌گیری تصادفات متفاوت می‌باشد نمی‌توان این مقادیر را با نتایج این پژوهش مقایسه کرد. اما ارقام نشان می‌دهند که نسبت نرخ تلفات در تونل‌ها به نرخ تلفات در سایر مناطق، در هر دو پژوهش یکسان می‌باشد. که این امر نشان دهنده‌ی افزایش شدت تصادفات و در نتیجه افزایش تلفات در تونل‌ها می‌باشد. که مهم‌ترین عوامل این افزایش شدت وجود دیواره‌های کناره‌ی مسیر، احتمال آتش‌سوزی و محیط بسته‌ی تونل می‌باشد.

۳-۱- تصادفات خسارتی

در جدول (۱) مقایسه‌ای از پارامترهای نیکویی برازش هر الگو برای تصادفات خسارتی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیکویی برازش رگرسیون خطی بسیار مناسب است در حالی که شاخص‌های نیکویی برازش الگوهای پواسون و دو جمله‌ای منفی مناسب نمی‌باشند. بنابراین برای تهیه الگوی تصادفات خسارتی از رگرسیون خطی استفاده خواهد شد. همچنین در جدول (۱) ملاحظه می‌گردد که تفاوت الگوهای پواسون و دو جمله‌ای منفی ناچیز است که نشان‌دهنده‌ی برابر بودن تقریبی پراکندگی با میانگین داده‌ها است یا به عبارتی دیگر میزان پراکندگی در داده‌های تصادفات خسارتی بسیار کم می‌باشد.

بنابراین و با توجه به مطالب ذکر شده در فوق الگوی پیش‌بینی تصادفات خسارتی با استفاده از رگرسیون خطی به صورت زیر تهیه شد.

$$\text{Damageaccidents} = \dots * \text{AADT} / \text{Lane} \dots * \text{Length} + ۳.۳۹۱ \quad (۱۱)$$

رگرسیونی تازه‌ای برای در نظر گرفتن این داده‌های پرشمار صفر روی آوردند. اگر در گردآوری داده‌های تصادفات با داده‌های پرشمار صفر مواجه شویم، از توزیع پر صفر پواسون و دو جمله‌ای منفی (ZIP و ZINB) برای مدل‌سازی تصادفات استفاده می‌کنیم [۱۸].

داده‌های تصادفات معمولاً داده‌هایی دو سطحی می‌باشند که یک سطح آن اغلب بخش معینی از راه و سطح دیگر می‌تواند دوره زمانی معینی از سال باشد. اگر y_{ij} شمار تصادفات رخ داده در بخش i -ام از راه در دوره‌ی زمانی j -ام از سال، دارای توزیع پر صفر پواسون ZIP باشد، تابع جرم احتمال آن مانند زیر است:

$$P(y_{ij}) = \begin{cases} \omega_{ij} + (1 - \omega_{ij}) \exp(-\lambda_{ij}) & , y_{ij} = 0 \\ (1 - \omega_{ij}) \left(\frac{\exp(-\lambda_{ij}) \lambda_{ij}^{y_{ij}}}{y_{ij}!} \right) & , y_{ij} > 0 \end{cases} \quad (۹)$$

در رابطه‌ی فوق i از ۱ تا n و j از ۱ تا m که در آن n شمار بخش‌های راه و m شمار دوره‌های زمانی در سال می‌باشد. روشن است که برای $\omega_{ij} = 0$ ، الگوی رگرسیون پر صفر پواسون ZIP به الگوی رگرسیون پواسون تبدیل می‌شود.

از سوی دیگر اگر داده‌های تصادفات علاوه بر مشکل صفرهای زیاد، دچار پراکندگی زیاد نیز باشند مانند آنچه در مورد الگوهای رگرسیون دو جمله‌ای منفی بیان گردید، از مدل رگرسیون پر صفر دو جمله‌ای منفی (ZINB) استفاده می‌کنیم. یک متغیر شمارشی y_{ij} با توزیع پر صفر دو جمله‌ای منفی دارای تابع جرم احتمال زیر می‌باشد.

(۱۰)

$$P(y_{ij}) = \begin{cases} \omega_{ij} + (1 - \omega_{ij}) (1 + \lambda_{ij})^{-\alpha} & , y_{ij} = 0 \\ (1 - \omega_{ij}) \left(\frac{\Pi(y_{ij} + \frac{\alpha}{\lambda_{ij}})}{y_{ij}! \Pi(\frac{\alpha}{\lambda_{ij}})} \right) (1 + \alpha \lambda_{ij})^{-\alpha} \left(1 + \frac{1}{1 + \alpha \lambda_{ij}} \right)^{-y_{ij}} & , y_{ij} > 0 \end{cases}$$

روشن است که برای $\alpha = 0$ مدل رگرسیون پر صفر دو جمله‌ای منفی به رگرسیون پر صفر پواسون تبدیل می‌شود [۱۹]. در انتها لازم به ذکر است که الگوهای رگرسیون پر صفر پواسون و پر صفر دو جمله‌ای منفی در واقع ترکیبی از الگوهای پواسون و دو جمله‌ای منفی با الگوی می‌باشد که داده‌های صفر را مدل می‌کند.

۳- نتایج و بحث و بررسی

محاسبات در محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد که نرخ کشته شدگان به ازاء هر کیلومتر از مسیر در مناطق باز جاده ۱,۲۳ نفر در هر کیلومتر و در تونل ۲,۳۷ نفر در هر کیلومتر

جدول (۱) مقایسه الگوهای تصادفات خسارتی

دو جمله‌ای منفی	پواسون	رگرسیون خطی
۰,۵۳۴	۰,۵۳۳	۰,۸۹۲
۱۵,۲۴	۱۵,۱۷	—
۰,۲۲۱	۰,۲۱۵	—

جدول (۳) مقایسه الگوهای تصادفات فوتی و جرحی

دو جمله‌ای منفی پرفر	دو جمله‌ای منفی	پواسون پر صفر	پواسون	رگرسیون خطی
۰,۷۴۸۶	۰,۷۴۸۳	۰,۷۳۵۶	۰,۷۳۵۴	۰,۸۱۸
۲۱,۱۱۹۶۵۸	۲۱,۱۱۸۷۲۲	۲۱,۱۱۹۶۵۶	۲۱,۱۱۸۷۲۱	—
۰,۴۵۶۸	۰,۴۵۲۵	۰,۴۴۳۴	۰,۴۴۱۶	—

تونل بیشتر است؛ بنابراین با افزایش طول تونل تعداد تصادفات شدید و با تلفات جانی افزایش پیدا خواهد کرد.

۳-۳- ترکیب تصادفات فوتی و جرحی

در جدول (۲) مقایسه‌ای از پارامترهای نیکویی برازش هر الگو برای تصادفات آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نیکویی برازش رگرسیون خطی مناسب است. به علاوه رگرسیون‌های پواسون و دو جمله‌ای منفی و الگوهای پرفر نیز مدل‌های بسیار مناسبی ارائه کرده‌اند، که البته خروجی مدل رگرسیون دو جمله‌ای منفی پر صفر بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد. بنابراین جهت ساخت الگوی نهایی از رگرسیون خطی و رگرسیون دو جمله‌ای منفی پرفر استفاده خواهد شد. همچنین در جدول (۲) ملاحظه می‌گردد که تفاوت الگوهای پواسون و دو جمله‌ای منفی ناچیز است که نشان‌دهنده‌ی برابر بودن تقریبی پراکندگی با میانگین داده‌ها است یا به عبارتی دیگر میزان پراکندگی در داده‌های تصادفات فوتی نسبتاً کم می‌باشد. البته این اختلاف بیشتر از اختلاف موجود در قسمت‌های قبل می‌باشد. ضریب تعیین تصحیح شده مدل خطی تصادفات فوتی نسبت به تصادفات منجر به جراحت شدید کمتر می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی طبیعت تصادفی‌تر آن‌ها می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که مدل‌های پر صفر این دو الگو مقداری بهبود در نتایج و برازش مدل را نشان می‌دهند که می‌توان نتیجه گرفت مدل‌های پرفر برای مدل‌سازی تصادفات فوتی و جرحی و یا تعداد تلفات نتایج بهتری ارائه می‌کنند.

همان طور که مشاهده می‌شود دو عامل طول تونل و مقدار AADT در هر خط عبور مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر تصادفات خسارتی می‌باشند. تأثیر تغییرات AADT در هر خط عبور بر نرخ تصادفات بیشتر از تأثیر طول تونل می‌باشد که تأثیر تغییرات AADT در هر خط عبور بر نرخ تصادفات بیشتر از با طول تونل می‌باشد. این دو عامل در اکثر تحقیقات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که در بیشتر پژوهش‌های پیشین مقدار عبور و مرور وسایل نقلیه به عنوان مهم‌ترین عامل افزایش تصادفات شناسایی شده است (به عنوان مثال [۷] و [۱۴]). در پژوهش حاضر نیز این عامل به عنوان مهم‌ترین عامل افزایش تصادفات خسارتی شناسایی شده است.

در همین راستا اما در مورد طول تونل بحث زیاد انجام گرفته که نتایج بعضاً بر خلاف یکدیگر بوده است به عنوان مثال در مرجع [۷] طول تونل با تصادفات رابطه‌ی معکوس دارد در حالی که نتایج پژوهش مرجع [۱۴] نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم طول تونل با افزایش نرخ تصادفات می‌باشد. در پژوهش حاضر ملاحظه می‌شود که در مورد تصادفات خسارتی، طول تونل با تعداد تصادفات رابطه‌ی معکوس دارد، ولی همان گونه که در بخش‌های بعد این فصل ملاحظه خواهد شد، با افزایش شدت تصادفات و تبدیل تصادفات صرفاً خسارتی به تصادفات جرحی و فوتی این رابطه تغییر خواهد کرد و طول تونل با تعداد تصادفات رابطه‌ی مستقیم پیدا خواهد کرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به دست آمده در مورد طول تونل به نحوی با نتایج به دست آمده از هر یک از دو تحقیق فوق سازگار است. همچنین می‌توان گفت که از آنجا که براساس نتایج پژوهش [۷] احتمال وقوع تصادفات در منطقه‌ی میانی

در پژوهشی که در ایتالیا انجام شده است [۱۴]، پیاده‌رو به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته شده است که البته در مدل نهایی به دلایل آماری حذف شده است. در همین رابطه حتی با توجه به حذف از مدل، محقق وجود یا عدم وجود پیاده‌رو را یکی از عوامل مهم افزایش ایمنی تونل معرفی می‌کند. این ادعا با نتیجه پژوهش حاضر که در آن وضعیت پیاده‌رو رابطه‌ی معکوس با ایمنی راه یا به عبارتی این موضوع که وجود پیاده‌رو باعث افزایش تلفات می‌گردد، در تضاد می‌باشد. علت این امر می‌تواند این باشد که با بهبود وضعیت پیاده‌رو در تونل‌ها، عبور عابرین پیاده در محل بیشتر شده که همین عامل باعث افزایش ریسک تلفات خواهد شد. در زمینه‌ی ایمن سازی تونل‌ها جهت تردد عابرین پیاده پیشنهاد شده است که با تهیه روشنایی مناسب، تعبیه‌ی جدول و جان پناه، فضای مناسبی جهت عبور و مرور در نظر گرفته شود [۲۱].

اما پس از پیاده‌رو نوبت به بررسی تأثیر شانه بر ایمنی ترافیک در محل تونل‌ها می‌رسد. در اکثر تحقیقات ایمنی راه وضعیت شانه یا عرض شانه یا تغییر عرض شانه، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایمنی مسیر شناسایی شده‌اند. هرچه مقدار شانه عریض‌تر باشد و جنس رویه‌ی آن مرغوب‌تر باشد، باعث افزایش ایمنی ترافیک در مسیر می‌گردد. همچنین هرچه مقدار تغییرات شانه کمتر و یا یک‌نواخت‌تر باشد، بر ایمنی جاده تأثیر مطلوب‌تری دارد [۲۲]. وجود، عرض و وضعیت شانه به خصوص در محیط‌های با عرض محدود، همچون تونل‌ها و یا پل‌ها، بسیار مهم و اثرگذار بر روی تصادفات است [۲۳]. همان‌طور که در مدل خروجی رگرسیون دو جمله‌ای منفی پر صفر تصادفات فوتی ملاحظه می‌گردد، عرض شانه با تعداد تلفات رابطه‌ی معکوس دارد؛ یا به عبارتی افزایش شانه‌ی موجود در تونل به کاهش تصادفات احتمالی کمک خواهد نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر عواملی همچون خصوصیات جریان ترافیکی شامل جهت ترافیک عبوری، ترافیک عبوری از هر خط (AADT per Lane) و درصد وسایل نقلیه سنگین، متغیرهای مربوط به طرح هندسی جاده شامل تعداد خطوط عبور، طول تونل، وضعیت شانه و وجود پیاده‌رو و متغیرهای مربوط به شرایط محیطی شامل وضعیت زهکشی و شرایط روشنایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش از مدل‌های رگرسیون خطی، پواسون، دو جمله‌ای منفی، پواسون پر صفر و دو جمله‌ای منفی پر صفر، برای الگوسازی تصادفات استفاده گردید.

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصادفات منجر به مرگ و میر انسانی و ضرایب آن‌ها در مدل پیش‌بینی آورده شده است. رابطه ۱۲ (خروجی الگوی رگرسیون خطی) نمایان‌گر این است که تصادفات فوتی با مقدار درصد وسایل نقلیه سنگین و همچنین وجود یا عدم وجود پیاده‌رو رابطه‌ی مستقیم و با تعداد خطوط عبور رابطه‌ی معکوس دارد. با توجه به مقدار قدر مطلق نتیجه می‌شود که مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر تصادفات فوتی به ترتیب درصد وسایل نقلیه سنگین، تعداد خطوط و وضعیت پیاده‌رو مسیر می‌باشد.

(۱۲)

$$\text{Fatalaccidents} = ۱۰.۲۳ * \text{Sidewalk}$$

$$+۰.۱۹۴ * \text{heavyvehiclesratio} - ۱.۷۷۱ * \text{Number of lanes}$$

در رابطه‌ی به دست آمده از رگرسیون دو جمله‌ای منفی (فرمول ۱۳) ملاحظه می‌شود که تصادفات منجر به مرگ و میر با مقدار طول تونل و درصد وسایل نقلیه سنگین رابطه‌ی مستقیم و با عرض شانه رابطه‌ی معکوس دارند که به ترتیب طول تونل، عرض شانه و درصد وسایل نقلیه سنگین مهم‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر تصادفات فوتی می‌باشند. به علاوه قابل مشاهده است که سه عاملی که در مدل خطی به عنوان سه پارامتر اصلی تأثیرگذار بر تصادفات فوتی و جرحی در تونل‌ها شناسایی شد، در این الگو به عنوان عوامل اصلی شناسایی نشده‌اند و به جای تعداد خطوط و وضعیت پیاده‌رو دو عامل عرض شانه و طول تونل در این الگو جایگزین شده‌اند.

$$\text{Fatalaccidents} = ۱۰.۲۳ * \text{Length}$$

$$+۰.۱۹۴ * \text{heavyvehiclesratio} - ۱.۷۷۱ * \text{Shoulder}$$

(۱۳)

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو الگوی خطی و دو جمله‌ای منفی پر صفر روابط مناسبی ارائه کرده‌اند. با توجه به R^2 نه چندان متفاوت هر دو الگو، ارائه عوامل مناسب‌تر و همچنین اشکالات بیان شده برای الگوی خطی، الگوی رگرسیون دو جمله‌ای منفی پر صفر به عنوان الگوی پیش‌بینی نهایی تصادفات فوتی در محل تونل‌ها انتخاب خواهد شد. به طور کلی در تحقیقات اخیر توصیه شده است که جهت بررسی و شناخت عوامل مؤثر بر تصادفات منجر به فوت بهتر است از مدل‌های پر صفر و به خصوص در هنگام وجود پراکندگی زیاد از مدل‌های پر صفر دو جمله‌ای منفی استفاده شود [۲۰].

در مورد پیاده‌رو و اثر آن بر ایمنی ترافیک تحقیقات بسیار زیادی انجام شده است. اما اکثر این تحقیقات به دلیل اینکه در مناطق شهری انجام گرفته است، قابل رجوع نمی‌باشد. اما

- simulated road tunnel – a validation study, *Accident Analysis and Prevention*, 30 (4), 497–503.
7. F.H. Amundsen, and G. Ranes, 2000, Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (1), 3–11.
 8. K. Lemke, 2000, Road safety in tunnel, *Transportation Research Record 1740*, Paper No. 00-0155.
 9. U. Salvisberg, R. Allenbach, M. Cavegn, M. Hubacher, and S. Siegrist, 2004, *Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes*, BFU- Report, Bern. ISBN 3-908192-17-X.
 10. G. Vashitz, D. Shinar, and Y. Blum, 2008, In-vehicle information systems to improve traffic safety in road tunnels, *Transportation Research Part F*, 11, 61–74.
 11. K. Kircher, and C. Ahlstrom, 2012, The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 47, 153–161.
 12. J. Jönsson, , 2007, Combined qualitative and quantitative fire risk analysis-complex urban road tunnel, *Rapport*.
 13. C. Caliendo, and M.L. De Guglielmo, 2012, Accident rates in road tunnels and social cost evaluation, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 166-177.
 14. C. Caliendo, M.L. De Guglielmo, and M. Guida, 2013, A crash-prediction model for road tunnels, *Accident Analysis & Prevention*, 55, 107-115.

۱۵. کیامهر، ر.، احدی، م. و غزائی، ش.، ۱۳۹۰، ارزیابی وضعیت ایمنی تونلهای راه بروش سلسله مراتبی AHP مطالعه موردی محور کرج – چالوس، دومین کنفرانس ملی تصادفات جاده ای، سوانح ریلی و هوایی، زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

۱۶. حجازی، س. و سپهوند، س.، ۱۳۹۱، ارائه روشی جدید برای ارزیابی کمی ایمنی در تونل‌های راه، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

در همین زمینه برای تصادفات خسارتی مدل خطی و برای تصادفات جرحی و فوتی و میر انسان‌ها الگوی رگرسیون دو جمله‌ای منفی پر صفر به عنوان الگوی پیش‌بینی بهینه انتخاب گردید. با افزایش شدت تصادفات، به دلیل افزایش پراکندگی داده‌ها، توصیه می‌شود از الگوی دو جمله‌ای منفی و برای تصادفات فوتی با توجه به وجود داده‌های صفر زیاد، از مدل‌های پر صفر استفاده گردد. ملاحظه گردید که علیرغم توصیه به عدم استفاده از الگوی خطی در پژوهش‌های خارج از ایران، این مدل‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه جواب‌های مطلوبی ارائه کرده‌اند.

همچنین با توجه به خروجی‌های الگوهای آماری مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر هریک از انواع تصادفات ترافیکی در محل تونل‌ها شناسایی گردید که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصادفات عبارتند از: AADT در هر خط عبور، طول تونل، درصد وسایل نقلیه‌ی سنگین و تعداد خطوط عبور. با کاهش طول تونل تعداد تصادفات خسارتی افزایش می‌یافت، در حالی که با افزایش طول تونل، تصادفات با شدت زیاد (جرحی و فوتی) افزایش می‌یابد. پارامتر AADT در هر خط عبور یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش تعداد تصادفات است که البته با افزایش شدت تصادفات اثرگذاری آن کم می‌شود. رشد درصد وسایل نقلیه‌ی سنگین به خصوص در افزایش شدت سوانح و تعداد تلفات بسیار تأثیرگذار است. همچنین تعداد خطوط عبور با تعداد و شدت تصادفات احتمالی رابطه‌ی معکوس دارد.

۶- مراجع

۱. آیتی، ا.، ۱۳۹۰، هزینه تصادفات: تئوری و کاربرد، پژوهشکده حمل و نقل.
2. M. Peden, 2004, World report on road traffic injury prevention, World Health Organization Geneva.
۳. سالنامه آماری سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، ۱۳۹۲، ایران: وزارت راه و شهرسازی.
4. A. Sadeghi, E. Ayati, and M. Pirayesh Neghab, 2013, Identification and prioritization of hazardous road locations by segmentation and data envelopment analysis approach PROMET, *Traffic & Transportation*, 25(2), 127-136.
5. PIARC, Road safety in tunnels, 1995, PIARC Technical Committee C5 Road Tunnels, <http://www.piarc.org>.
6. J. Törnros, 1998, Driving behaviour in real and a

- features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis, *Accident Analysis & Prevention*, 34(2), 149-161.
21. R.E. Dewar, and P.L. Olson, 2007, Human factors in traffic safety, Lawyers & Judges Publishing Company.
22. C. Kloeden, et al., 1999, Severe and fatal car crashes due to roadside hazards, NHMRC Road Accident Research Unit, The University of Adelaide.
۲۳. آیتی، ا. و واحدی، ج.، ۱۳۸۶، ایجاد مدل شاخص ایمنی ترافیکی در محل پل‌ها در راه‌های ایران، نشریه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱) ۱۹، صفحات ۱۳۵-۱۵۱.
17. R.H. Myers, et al., 2012, Generalized Linear Models: with Applications in Engineering and the Sciences, Wiley.
18. D. Lord, S.P. Washington, and J.N. Ivan, 2005, Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory, *Accident Analysis & Prevention*, 37(1), 35-46.
۱۹. آیتی، ا. و عباسی، ا.، ۱۳۹۰، کاربرد مدل‌های رگرسیون پرفسر در مدل سازی تصادفات بزرگراه‌های درون شهری، مدرس عمران، ۱۱ (۴)، صفحات ۱-۱۵.
20. J. Lee, and F. Mannering, 2002, Impact of roadside

Identification of important traffic safety parameters in road tunnels

Sh. Rahimi¹, E. Ayati², M. Doustparast³

1- Ms.C Road and Transportation Student, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Professor, Techno-Economic Road Safety Research Center, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Faculty of Mathematics, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Tunnels are one of the most important accident-prone zones due to their physical and functional difference from open parts of the road whereas crash-prediction models for road tunnels have rarely been investigated. The main purpose of this study is to identify important parameters that affect the traffic safety in tunnels. In this paper, linear regression, Poisson regression, Negative binomial regression and Zero inflated regressions models are applied in order to obtain crash prediction models for property damage, serious injury and fatal accidents. The results show that the best model for property damage accidents is linear regression output. However, for fatal and injuries accidents, zero inflated regression's results are more dependable. This paper's suggested method appears to be useful for many applications such as the estimation of accident reductions due to improvement in existing tunnels and/or to modifications of traffic control systems, as well as for the prediction of accidents when different tunnel design options are compared. According to the final crash prediction models the most important safety characteristics of tunnels are: AADT per lane, tunnel length, heavy vehicles ratio, and number of lanes in tunnel.

key word: Traffic accidents, Linear regression, negative binomial regression, High-end models.