شناسایی مسائل ایمنی کاربران آسیب‌پذیر در معابر شهری و بهینه‌سازی راهکارها با ادغام روش‌های قواعد انجمنی و برنامه‌ریزی ریاضی

مقاله علمی – پژوهشی

علیرضا زارع، دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی- مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
نوید ندیمی*، دانشیار، بخش مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی- مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
سیدصابر ناصرعلوی، استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی- مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
وحید خلیفه، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: navidnadimi@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۲۲-۱

چکیده

در این مقاله، به تعیین راهکارهای بهینه جهت ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر راه‌ها در معابر درون‌شهری شهر تهران پرداخته شده است. کاربران آسیب‌پذیر راه شامل موتورسیکلت‌سواران، دوچرخه‌سواران و عابران پیاده می‌شوند. بدین منظور از داده‌های شهر تهران به عنوان پرجمعیت‌ترین شهر ایران با آمار بالای تصادفات منجر به فوت و جراحت کاربران آسیب‌پذیر، در دو سطح شدت جرحی برای سال ۱۳۹۹ و سطح شدت فوتی برای سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ استفاده شده است. هدف این پژوهش ارتقای ایمنی کاربران آسیب پذیر راه‌ها در معابر درون شهری، با یافتن الگویی بهینه برای تعیین راهکارهای مناسب است که شامل شناسایی عوامل خطرزا، تعیین راهکارهای مناسب، اجرای راهکارها و در نهایت ارزیابی و بهبود است. این اهداف در دو گام دنبال می‌شوند. ابتدا در گام اول، از تکنیک‌های داده‌کاوی جهت شناسایی عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بر تصادفات جرحی و فوتی و استخراج الگوها و قوانین مشخص تصادفات این گروه از کاربران استفاده می‌شود. سپس در گام دوم، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و با به کارگیری نتایج مرحله قبل در نظر است تا یک مدل جهت تعیین راهکارهای بهینه برای افزایش ایمنی این کاربران در هر منطقه شهری ارائه شود. نتایج مدل‌سازی کاوش قوانین انجمنی نشان می‌دهد که عوامل جوی مانند بارش و رطوبت تأثیر چشمگیری بر کنترل وسیله‌نقلیه و رفتار رانندگان دارند و تصادفات مرگبار بیشتر در روزهای غیرکاری و شرایط بارانی رخ می‌دهند. همچنین، عدم مصرف مشروبات الکلی و رعایت قوانین ترافیکی می‌تواند خطر تصادفات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. بهبود زیرساخت‌های ترافیکی و مدیریت شرایط جوی، به‌همراه ارتقاء رفتارهای ایمن رانندگی، از اقدامات کلیدی برای کاهش تصادفات به شمار می‌روند. نتایج برنامه‌ریزی ریاضی تأثیر مثبت راهکارهای آموزشی و ترویجی در کاهش تصادفات کاربران آسیب‌پذیر را نشان می‌دهد. به‌ویژه، بهبود روشنایی معابر و تقویت سیستم‌های زهکشی در شرایط بارانی، از راهکارهای حیاتی برای افزایش ایمنی ترافیک است.

واژه‌های کلیدی: کاربران آسیب‌پذیر راه، تصادفات، ایمنی، راهکارهای بهینه، معابر درون‌شهری

۱- مقدمه

تصادفات راه را می‌توان مجموعه‌ای از رویدادهای مرتبط مستقیم یا غیرمستقیم در نظر گرفت. این واقعه یک رویداد نادر و تصادفی است که موضوعی مهم در حوزه حوادث رانندگی و بهداشت عمومی به شمار می‌رود که به سه عامل راه و محیط، عامل انسانی و عامل وسیله‌نقلیه مرتبط می‌شوند. اصطلاح "«تصادف راه»" برای تاکید بر این نکته به کار می‌رود که این

حوادث اغلب قابل پیشگیری هستند و در اثر عواملی مانند سهل‌انگاری راننده، سرعت غیرمجاز، حواس پرتی یا مسمومیت ایجاد می‌شوند. برخلاف اصطلاح «حادثه» که به یک رویداد غیرقابل پیش‌بینی بدون تقصیر اشاره می‌کند، «تصادف راه» نقش خطای انسانی در ایجاد این حوادث و اهمیت تعیین مسئولیت برای آن‌ها را برجسته می‌کند. این تمایز در زمینه های قانونی برای تعیین مسئولیت و اطمینان از مسئولیت پذیری در قبال پیامدهای چنین تصادفات بسیار مهم است. کاربران آسیب‌پذیر راه به کاربرانی اتلاق می‌شود که بیشتر در معرض خطر و آسیب‌های ترافیکی هستند. این کاربران آسیب‌پذیر شامل عابران پیاده، دوچرخه‌سواران و موتورسیکلت‌سواران هستند زیرا به دلیل عدم محافظت در هر گونه برخورد با وسیله‌نقلیه، عدم محافظت با سپر خارجی و همچنین به دلیل وجود خصوصیاتی مانند سن، جنسیت، شغل و غیره در صورت وقوع حادثه، آسیب بیشتری نسبت به دیگران می‌بینند. استفاده از موتورسیکلت به عنوان یک وسیله حمل‌ونقل به انتخاب ارجح و در برخی موارد تنها انتخاب برای مسافران در اکثر مناطق روستایی و حومه شهری در بسیاری از کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. تصادفات ترافیکی به عنوان یک مشکل عمده بهداشت عمومی در سراسر جهان در نظر گرفته می‌شود که سالانه ۱/۲۷ میلیون نفر جان خود را از دست می‌دهند و بین ۲۰ تا ۵۰ میلیون نفر مجروح می‌شوند (World Health Organization, 2013). طبق آمار پزشکی قانونی کشور، طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹، تعداد نزدیک به ۵۰ هزار نفر فوتی و تعداد نزدیک به ۹۹۰ هزار مجروح ناشی از تصادفات رانندگی در سطح کشور گزارش شده است. علاوه بر این، گزارش‌ها حاکی از آن است که عابران پیاده حدود ۲۲ درصد از کل مرگ‌ومیرهای رخ داده در راه‌های جهان را تشکیل می‌دهند که در چند کشور در حال توسعه، این نسبت به دو سوم می‌رسد. به همین ترتیب، تصادفات رانندگی یکی از علل اصلی مرگ‌ومیر مردم ایران است. علاوه بر این، موتورسیکلت یک وسیله حمل‌ونقل محبوب در ایران است و متاسفانه در بخش قابل‌توجهی از تصادفات منجر به مرگ نیز دخیل است. بر اساس گزارش سازمان پزشکی قانونی ایران، سرنشینان موتورسیکلت در بخش قابل توجهی از تصادفات فوتی درگیر هستند. نسبت بالای مرگ‌ومیر و جراحات شدید در میان این گروه از کاربران راه نیاز به بررسی بیشتر در مورد ویژگی‌های تصادف آن‌ها دارد (سازمان پزشکی قانون کشور). با وجود تلاش‌های گسترده در سال‌های اخیر برای کاهش تلفات ناشی از تصادفات رانندگی، همچنان هزینه‌های هنگفتی مرتبط با این حوادث وجود دارد. این امر نشان‌دهنده نیاز مبرم به ادامه تحقیقات جامع در خصوص عوامل مؤثر بر تلفات و تدوین راهکارهای مؤثر برای بهبود ایمنی ترافیک است. شهر تهران، به‌عنوان یکی از پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای جهان و مرکز اصلی تردد و حمل‌ونقل ایران، با نرخ بالای تصادفات، به‌ویژه برای کاربران آسیب‌پذیر مانند عابران پیاده، موتورسواران و دوچرخه‌سواران، مواجه است. این تصادفات علاوه بر تلفات جانی و جراحات جدی، هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی سنگینی را به همراه دارد. شرایط خاص جوی و زیرساختی، به‌همراه تراکم جمعیت و ترافیک سنگین، ضرورت شناسایی عوامل خطرزا و طراحی مدلی بهینه برای تدوین و اجرای اقدامات مؤثر را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در نهایت، ارزیابی و بهبود مستمر این اقدامات برای کاهش تصادفات و ارتقای ایمنی در شهر تهران اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از روش‌های کاوش قواعد انجمنی و برنامه‌ریزی ریاضی بطور توأمان در تحلیل تصادفات ترافیکی، نوآوری اصلی این مقاله در شناسایی الگوهای پنهان و تدوین راهکارهای بهینه به شمار می‌آید. این روش‌ها با استخراج روابط پیچیده میان متغیرهای مختلف، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر و اجرای راهبردهای مؤثرتر را فراهم می‌سازند. به واقع این مقاله یک رویکرد ترکیبی دو مرحله‌ای جهت شناسایی عوامل موثر بر ایمنی کاربران آسیب‌پذیر (در مرحلهٔ اول با قواعد انجمنی) و تعیین راهکارهای بهینه جهت بهبود ایمنی (در مرحلهٔ دوم با مدل برنامه‌ریزی ریاضی و با کمک قواعد خروجی مرحلهٔ اول) ارائه می‌دهد. پارامترهای مدل‌سازی را می‌توان با توجه به شرایط منطقه‌ای، زمان و دیگر عوامل محیطی بومی‌سازی کرد تا متناسب با نیازهای خاص هر منطقه عمل کند. این رویکرد، درنهایت امکان ارائه راهکارهای مناسب جهت ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر را فراهم می‌سازد.

۲- پیشینه تحقیق

مونتلا و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ در ایتالیا، به تحلیل تصادفات دوچرخ برقی با روش درختان طبقه‌بندی و کشف قوانین حاکم بر اینگونه تصادفات پرداختند. نتایج تحلیل نشان داد که تصادفات دوچرخ برقی به شدت به چندین ترکیب از ویژگی‌های راه، محیط و رانندگان حساس هستند. همچنین تأکید می‌شود که شرایط روسازی نقش بسیار مهمی دارد به صورتی که روسازی لغزنده به طور قابل توجهی با تصادفات رابطه مستقیم داشت (Montella et al., 2012). ادیریسینگه و همکارانش در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴ در سریلانکا، به بررسی جراحات در تلفات کاربران آسیب‌پذیر راه پرداختند. یک مطالعه توصیفی گذشته‌نگر به بررسی سوابق موارد مرگ‌ومیر کاربران آسیب‌پذیر راه در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ در سریلانکا پرداخته بود. نتایج این مطالعه نشان داد که عابران پیاده، به‌ویژه سالمندان مرد، نسبت به سایر کاربران آسیب‌پذیر راه، بیشتر در معرض خطر قرار دارند. این گروه بیشتر در گذرگاه‌های راه دچار آسیب‌دیدگی می‌شوند و به طور قابل توجهی با آسیب‌های جمجمه، مغزی و مرگ ناشی از صدمات سر و جراحات متعدد مواجه هستند (Edirisinghe et al., 2014). رحمان و همکارانش در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹ در ایالات متحده، به تحلیل تصادفات کاربران آسیب‌پذیر راه در مناطق تحلیل ترافیک فلوریدا با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین پرداختند. نتایج نشان داد عواملی مانند راه‌های با محدودیت سرعت بالا، راه‌های دوطرفه با واسطه و شرایط نامساعد آب و هوایی به عنوان عامل افزایش شدت آسیب در تصادفات وسیله‌نقلیه موتوری و عابر پیاده شناسایی شدند (Rahman et al., 2019). سیواسانکاران و همکارانش در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای با استفاده از روش قواعد انجمنی به شناسایی الگوهای آسیب شدید عابران پیاده در کلان‌شهر چنای هند پرداختند. دستاورد مقاله اینگونه بود که عابران پیاده میانسال بیشتر در برابر تصادفات ترافیکی راه آسیب پذیرند و فراتررفتن از محدودیت سرعت به ویژه در بزرگراه‌ها منجر به تصادفات مرگبار در میان عابران پیاده می‌شود (Sivasankaran et al., 2020). بتولی و همکارانش در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۰ در کلرادو، به تحلیل عوامل شدت آسیب تصادف عابر پیاده پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که عوامل موثر در شدت آسیب شامل مجاورت تقاطع، شرایط نور و روشنایی، نوع و سرعت وسیله نقلیه، سن عابر پیاده، اختلال عابر پیاده و اختلال راننده توسط مصرف مواد مخدر یا الکل بودند (Batouli et al., 2020). داس و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۲۱ در ایالات متحده، به استخراج روند تصادفات مرگبار عابر پیاده در تقاطع ها پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که برخی از دسته‌های متغیر کلیدی مانند تاریکی در محل تقاطع‌ها با روشنایی، حرکت مستقیم خودرو، چرخش خودرو، خیابان‌های شهرداری محلی، محدوده سنی عابر پیاده از ۴۵ سال و بالاتر، عابر پیاده مرد، تقاطع‌ها در معابر شهرداری‌های محلی اغلب در قوانین تولید شده وجود دارند (Das et al., 2021). اکبری و همکارانش در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ در تایلند و ویتنام، به بررسی تأثیر کمپین ایمنی موتورسیکلت بر استفاده از کلاه‌ایمنی با استفاده از روش متاآنالیز پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که کمپین‌های اجرائی و آموزشی در مجموع مؤثرتر از انفرادی هستند. اجرای همراه با آموزش، استفاده از کلاه‌ایمنی را بسیار بیشتر از آموزش به تنهایی افزایش داد. به نظر رسید استفاده از اجرا و آموزش در کنار هم می‌تواند نقاط ضعف هر یک را به صورت جداگانه پوشش دهد و در نتیجه اثربخشی کمپین را افزایش دهد (Akbari et al., 2021). وانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای در ایالت‌های کارولینای شمالی و تنسی، به بررسی ایمنی کاربران آسیب‌پذیر راه و وسایل‌نقلیه باری پرداختند. از این مطالعات نتایجی حاصل شد که نشان می‌دهد، کاربران آسیب‌پذیر مسن‌تر در برابر صدمات شدید یا تلفات آسیب‌پذیرتر هستند و وجود الکل هم در کاربران آسیب‌پذیر و هم در رانندگان با شدت آسیب تصادفات مرتبط است (Wang et al., 2022). چامپاهوم و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۲۲ در تایلند، با استفاده از تحلیل مکاتبات چندگانه و رویکردهای رگرسیون لجستیکی ترتیبی به بررسی عوامل موثر بر شدت تصادفات موتورسیکلت در راه های شریانی تایلند پرداختند. نتایج به این صورت حاصل شد که عواملی نظیر سن موتورسواران، تعداد خطوط راه، رانندگان مسن‌تر و پوشیدن کلاه‌ایمنی دارای بیشترین تاثیر بر شدت تصادفات موتورسیکلت بودند (Champahom et al., 2022).

احمدحسین و همکارانش در سال ۲۰۲۳ با استفاده از الگوریتم یادگیری بدون نظارت در مطالعه‌ای به بررسی

الگوهای تصادف عابر پیاده در تقاطع‌های پرسرعت و بخش‌های راه در ایالت لوئیزیانا پرداختند. نتایج بدین صورت بود که تصادفات عابر پیاده در تقاطع های پرسرعت با عواملی مانند هندسه تقاطع، کنترل، ویژگی های راننده، عوامل مرتبط با عابر و شرایط روشنایی مرتبط است(Hossain et al., 2023). با مرور مطالعات پیشین، مشخص می‌شود که تحقیقات محدودی به‌طور خاص به ایمنی کاربران آسیب‌پذیر در ترافیک شهری تهران پرداخته‌اند. بیشتر پژوهش‌ها بر کشورهای دیگر با شرایط متفاوت متمرکز بوده‌اند و به عواملی مانند تراکم بالای جمعیت، ترافیک سنگین، و زیرساخت‌های ضعیف شهری تهران توجه کافی نشده است. همچنین، تاثیر شرایط جوی و ناکارآمدی سیستم‌های زهکشی تهران که در وقوع تصادفات نقش بسزایی دارند، کمتر بررسی شده است. این خلأ نشان‌دهنده نیاز به تحقیقاتی بومی برای ارائه راهکارهای بهینه در بهبود ایمنی ترافیک شهر تهران است.

۳- مواد و روش‌ها

هدف این پژوهش ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر راه‌ها در معابر درون‌شهری، با یافتن الگویی بهینه برای تعیین راهکارهای مناسب است که شامل شناسایی عوامل خطرزا، تعیین راهکارهای مناسب، اجرای راهکارها و در نهایت ارزیابی و بهبود است. این اهداف در دو گام دنبال می‌شوند. ابتدا در گام نخست، از استخراج قواعد انجمنی جهت شناسایی عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بر تصادفات جرحی و فوتی و استخراج الگوها و قوانین مشخص تصادفات این گروه از کاربران استفاده می شود. سپس در گام دوم، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و با به کارگیری نتایج مرحله قبل در نظر است تا یک مدل جهت تعیین راهکارهای بهینه برای افزایش ایمنی این کاربران در هر منطقه شهری ارائه شود.

۳-۱-داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های تصادفات شهر تهران به عنوان پایتخت ایران در دو سطح شدت تصادفات جرحی مربوط به سال ۱۳۹۹ با ۱۲۲۹۲ ردیف و سطح شدت فوتی مربوط به سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ با ۱۵۰۴ ردیف مورد استفاده قرار گرفت. همچنین داده‌های آب و هوایی شهر تهران طی این ۳ سال به داده‌ی تصادفات اضافه گردید (Irimo, 2023).

۳-۲- روش کاوش قواعد انجمنی

قوانین انجمنی به روابط بین آیتم‌های مختلف در مجموعه داده‌ها اشاره دارند. قوانین انجمنی اولین بار توسط راکش آگراوال، توماس ایمن، و آرون سوامی در سال ۱۹۹۳ (Agrawal et., 1993 al) معرفی شدند. این سه پژوهشگر در مقاله‌ای مفهوم قوانین انجمنی را مطرح کردند و الگوریتم آپریوری را به عنوان یک روش کارآمد برای استخراج این قوانین معرفی کردند. الگوریتم آپریوری به عنوان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های داده‌کاوی شناخته شده و از آن زمان تاکنون به طور گسترده در تحلیل داده‌های مختلف استفاده شده است.

این روابط معمولاً به صورت قوانین " اگر-آنگاه" نمایش داده می‌شوند و به این صورت بیان می‌شوند که " اگر یک مجموعه آیتم خاص مانند X خریداری شود، احتمالاً مجموعه آیتم دیگری نیز مانند Y خریداری خواهد شد." در اینجا، X و Y دو مجموعه از آیتم‌ها هستند که X به عنوان مقدم و Y به عنوان تالی شناخته می‌شوند. مقدم بخش اول قانون انجمنی است که شرط "اگر" را تشکیل می‌دهد. تالی بخش دوم قانون انجمنی است که نتیجه "آنگاه" را تشکیل می‌دهد. این قوانین به شکر زیر نمایش داده می‌شوند (Bhatia et al., 2019):

$$X \Rightarrow Y \quad (۱)$$

۳-۲-۱-شاخص پشتیبان

شاخص پشتیبان یکی از مهم‌ترین معیارها در تحلیل قوانین انجمنی است که می‌گوید که چند درصد از کل تراکنش‌ها شامل هر دو آیتم مقدم X و تالی Y هستند که در مدل‌سازی میزان ۶۰ درصد در نظر گرفته شده است. فرمول محاسبه شاخص پشتیبان به این صورت است:

$$Support = \frac{Frq\ (X,Y)}{N} \quad (۲)$$

N = تعداد کل تراکنش‌ها

Frq = فراوانی

۳-۲-۲- شاخص اطمینان

شاخص اطمینان در تحلیل قوانین انجمنی معیاری است که نشان می‌دهد که وقتی آیتم مقدم X رخ می‌دهد، چقدر احتمال دارد که آیتم تالی Y نیز رخ دهد که در مدل سازی میزان ۶۰ درصد در نظر گرفته شده است. فرمول محاسبه شاخص اطمینان به صورت زیر است.

$$Confidence = \frac{Frq\ (X,Y)}{Frq\ (X)} \quad (۳)$$

۳-۲-۳- شاخص لیفت

شاخص لیفت در تحلیل قوانین انجمنی معیاری است که نشان می‌دهد که احتمال وقوع تالی Y در صورت وقوع مقدم X چقدر بیشتر یا کمتر از حالت تصادفی است که در مدل‌سازی روابط با لیفت بالای ۱ استفاده شده است.

لیفت = ۱ : مقدم X و تالی Y مستقل از یکدیگر هستند.

لیفت > ۱ : وقوع مقدم X احتمال وقوع تالی Y را افزایش می‌دهد که به آن رابطه مثبت گویند.

لیفت < ۱ : وقوع مقدم X احتمال وقوع تالی Y را کاهش می‌دهد که به آن رابطه منفی گویند.

$$Lift = \frac{Confidence\ (X \rightarrow Y)}{P\ (X)} \quad (۴)$$

P = احتمال وقوع

۳-۲-۴- شاخص پوشش

شاخص پوشش به درصد یا نسبتی از کل داده‌ها اشاره دارد که آیتم‌های مقدم X یک قانون را برآورده می‌کنند. این شاخص نشان می‌دهد که چه درصدی از مجموعه داده‌ها شامل آیتم‌های مقدم X هستند.

$$Coverage = \frac{Frq\ (X)}{N} \quad (۵)$$

۳-۳- روش برنامه‌ریزی ریاضی

برنامه‌ریزی ریاضی یک روش علمی برای حل مسائل پیچیده است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند بهترین راهکارها را با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و تابع هدف مختلف پیدا کنند. در اینجا تابع هدف می تواند به دنبال کمینه کردن هزینه‌ها، زمان، یا تلفات و یا بیشینه کردن ایمنی، سود، یا کارایی باشد. در کنار تابع هدف، قیودی تعریف می‌شوند که نشان‌دهنده محدودیت‌های واقعی مانند بودجه، زمان، یا منابع در دسترس هستند. اقدامات مختلفی مانند بهبود وضعیت روشنایی

خیابان‌ها، نصب چراغ‌های راهنمایی، استفاده از علائم مناسب، اعطای طرح‌های تشویقی به راکبان و سرنشینان موتورسیکلت و دوچرخه‌سواران، ایجاد کمپین‌های آموزشی و غیره به عنوان گزینه‌های بهبود ایمنی مطرح شدند. در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، هر یک از این اقدامات به صورت متغیرهایی تعریف می‌شوند که بر مبنای هزینه، تاثیرگذاری بر کاهش تصادفات، تعداد تصادفات کاربران آسیب‌پذیر و محدودیت‌های مالی هر منطقه مدل‌سازی می‌شوند. تابع هدف این مدل با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود و ارزیابی اثر هر راهکار، به بیشینه‌سازی تأثیرات مثبت راهکارهای ارتقای ایمنی معابر می‌پردازد. هدف اصلی، دستیابی به حداکثر کارایی در بهبود ایمنی کاربران آسیب‌پذیر راه، در چارچوب قیود تعریف‌شده است که به صورت تعریف می‌گردد (Sinha, 2006).

$$W = Max \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{5} \sum_{k=1}^{4} (X_{i,j,k} * F_{i,j,k} * C_i * E_i) \quad (٦)$$

W = تابع هدف

$X_{i,j,k}$ = راهکار دسته‌ی iام در دسته‌ی مناطق جغرافیایی jام در حالت زمانی k که درصورتیکه راهکار اجرا شود، مقدار یک و درصورتیکه راهکار اجرا نشود، مقدار صفر می‌گیرد.

$F_{i,j,k}$ = فراوانی تصادفی که راهکار دسته‌ی iام می‌تواند آن را در دسته‌ی مناطق جغرافیایی jام در حالت زمانی k برطرف کند.

C_i = هزینه تصادفات طبق جدول ۳

E_i = ضرایب تاثیر راهکار در کاهش تصادف مربوطه طبق جدول ۱

i = دسته‌بندی راهکارها طبق جدول ۱

j = دسته‌بندی مناطق شهر تهران بر اساس موقعیت جغرافیایی طبق جدول ۲

k = حالت‌های زمانی بر اساس بارش و زمان طبق جدول ۳

طبق جدول ۱، راهکارهای بهبود ایمنی آورده شده‌اند. این راهکارها به دلیل تناسبی که با یکدیگر داشتند، در یک دسته مشابه قرار گرفتند. همچنین ضرایب تاثیر راهکارهای هر دسته جهت کاهش زمان اجرای مدل و کم شدن متغیر تصمیم به طور میانگین لحاظ گردید. این ضرایب بدین معناست که اگر راهکار مورد نظر اجرا شود چند درصد در کاهش تصادفات نقش دارد. هزینه اجرایی راهکار جهت سهولت به صورت میلیون‌ریال (عدد هزینه در یک میلیون‌ریال ضرب شود) تبدیل گردید (Elvik & Vaa, 2009).

جدول ۱. ضرایب تاثیر راهکار در کاهش تصادف مربوطه و هزینه راهکار (Elvik & Vaa, 2009)

ضرایب تاثیر راهکار در کاهش تصادف مربوطه E_i				
ردیف	راهکارهای مرتبط با انسان (دسته i =1)	جرحی	فوتی	هزینه اجرا به میلیون‌ریال B_i
۱	اعمال تخفیف بیمه‌ای برای رانندگان قانون مدار	۰/۳	۰/٤	۱۰/۰۰۰
۲	افزایش میزان جریمه نقدی و غیرنقدی	۰/۲	۰/۳	۱۱/۰۰۰
۳	اعمال نمره منفی	۰/٤	۰/۵۵	۱۱/۰۰۰
٤	بهبود کلاس‌های آموزش رانندگی و دریافت گواهینامه	۰/۳۵	۰/۲	۱۳/۰۰۰
۵	فرهنگ سازی رسانه‌ها	۰/۳۵	۰/۵	۹/۰۰۰
٦	نصب بنرهای آموزشی در نقاط پرتردد شهر	۰/٤۵	۰/۵۵	۲/۰۰۰
۷	طرح‌های تشویقی به راکبان و سرنشینان موتورسیکلت و دوچرخه‌سواران	۰/٦	۰/۵	٦/۰۰۰
۸	ایجاد کمپین‌های آموزشی (ایمن برانیم)	۰/۳۵	۰/٤۵	۷/۰۰۰
۹	نصب تابلوهای رعایت حق تقدم	۰/۱۵	۰/۱۵	۳/۰۰۰
AVG	میانگین	۰/۳۵	۰/٤	۸/۰۰۰
ردیف	راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید (دسته i =2)	جرحی	فوتی	هزینه اجرا به میلیون‌ریال B_i
۱۰	استفاده از چراغ‌های LED کم مصرف	۰/۳۵	۰/۵	۱٤/۰۰۰

۱۱	استفاده از چراغ‌های دارای پنل خورشیدی	۰/۳	۰/۶	۱۰/۰۰۰
۱۲	استفاده از علائم و خطوط شب‌نما	۰/۳	۰/٤	۲۰/۰۰۰
۱۳	استفاده از رویه با سنگدانه‌های روشن‌تر در روکش آسفالت	۰/۱	۰/۲	۳۰/۰۰۰
۱٤	استفاده از علائم چشم گربه‌ای	۰/۲۵	۰/٤	۷/۰۰۰
۱۵	استفاده از حصار نورشکن برای حذف نور مزاحم	۰/۲	۰/۳	٦/۰۰۰
AVG	میانگین	۰/۲۵	۰/٤	۱٤/۵۰۰
ردیف	راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی (دسته i =3)	جرحی	فوتی	هزینه اجرا به میلیون‌ریال B_i
۱٦	افزایش اصطکاک سطحی راه	۰/٤	۰/۳	۲٤/۰۰۰
۱۷	نصب سیستم‌های زهکشی	۰/۲۵	۰/۲	۲۲/۰۰۰
۱۸	بهبود وضعیت جداول تخلیه آب	۰/۳	۰/۲	۱۹/۰۰۰
۱۹	ایجاد شیارهای زهکشی	۰/۱۵	۰/۱	۱۷/۰۰۰
۲۰	پاکسازی مسیرهای تخلیه آب	۰/۳	۰/۲	۱٤/۰۰۰
۲۱	نصب سنگ فرش‌های ضد لغزش برای عابران	۰/٤	۰/۲	۱۸/۰۰۰
AVG	میانگین	۰/۳	۰/۲	۱۹/۰۰۰

طبق جدول ۲، مناطق ۲۲گانه‌ی شهر تهران جهت سهولت مدل‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی به ۵ دسته بر اساس موقعیت جغرافیایی منطقه‌های تهران تقسیم شدند. در ضرایب تناسب تقسیم بودجه، مناطق دسته شمالی به عنوان دسته پایه در نظر گرفته شد تا تعداد راهکارهای اجرایی که در هر دسته مناطق جغرافیایی می‌خواهند اجرا شود متناسب با ضریبی از تعداد راهکارهای اجرایی در مناطق دسته شمالی باشند. این ضرایب بر اساس موقعیت جغرافیایی منطقه و سطح محرومیت در نظر گرفته شد. محروم‌ترین مناطق جغرافیایی از نظر امکانات مناطق دسته جنوبی بودند که بیشترین ضریب را به خود اختصاص دادند.

به طور مثال ضریب تقسیم بودجه برای دسته‌ی مناطق جنوبی ۲/۸ می‌باشد؛ یعنی تعداد راهکارهای اجرایی در مناطق جنوبی باید ۲/۸ برابر تعداد مناطق شمالی (دسته مناطق پایه) باشد تا حدودی جبران کمبود زیرساخت‌های ایمنی در این دسته مناطق شود. جمع بودجه ایمنی مناطق هر دسته در جدول نیز آورده شد. این بودجه جهت سهولت به صورت میلیون‌ریال تبدیل گردید (Tehran, 2023).

جدول ۲. دسته‌بندی مناطق بر اساس موقعیت جغرافیایی و بودجه دسته‌ها

ردیف	دسته‌بندی مناطق بر اساس موقعیت جغرافیایی j	ضریب تناسب تقسیم بودجه (شمالی پایه)	جمع بودجه ایمنی مناطق هر دسته به میلیون‌ریال S_j
۱	شمالی (پایه): ۱، ۲، ۳ و ۵	۱	۲۷۱/۱۳۰
۲	شرقی: ٤، ۷، ۸، ۱۳ و ۱٤	۱/۸	۳۱۸/۱۹۹
۳	جنوبی: ۱۵، ۱٦، ۱۷، ۱۹ و ۲۰	۲/۸	۲۳۸/۷٦٦
۴	مرکزی: ٦، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲	۱/٦	۲٦٦/۸۲۲
۵	غربی: ۱۸، ۲۱ و ۲۲	۱/۷	۲۱٤/٤۳۳
جمع بودجه ایمنی شهر تهران به ریال		۱/۳۰۹/۳۵۲	

طبق جدول ۳، هزینه تصادفات رانندگی برای سطح شدت جرحی به طور میانگین ۲۴۰۰ میلیون ریال معادل ۲۴۰ میلیون‌تومان فرض گردید. هزینه تصادفات برای سطح شدت فوتی معادل دیه کامل انسان به مقدار ۱۵۰۰۰ میلیون‌ریال معادل ۱/۵ میلیاردتومان در نظر گرفته شد (آیتی، ۱۳۸۴).

جدول ۳. هزینه تصادفات (آیتی، ۱۳۸۴)

هزینه تصادفات به میلیون‌ریال C_i	
تصادفات جرحی	۲/۴۰۰
تصادفات فوتی	۱۵/۰۰۰

طبق جدول ٤، حالت‌های زمانی بر اساس بارش و زمان شبانه‌روز به ٤ حالت بدون بارش و هنگام روز، حالت بدون بارش و هنگام شب، حالت بارش‌دار و هنگام روز و حالت بارش‌دار و هنگام شب دسته‌بندی شدند. حالت بدون بارش و هنگام روز، بهترین حالت به لحاظ دید، قابلیت رویت و عدم لغزندگی سطح راه برای تردد کاربران در سطح شهر می‌باشد.

جدول ٤. حالت‌های زمانی

ردیف	حالت‌های زمانی k	تفسیر
۱	k = 1	حالت بدون بارش و هنگام روز
۲	k = 2	حالت بدون بارش و هنگام شب
۳	k = 3	حالت بارش‌دار و هنگام روز
٤	k = 4	حالت بارش‌دار و هنگام شب

محدودیت‌های مدل‌سازی بهینه به صورت زیر تعریف می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که راهکارهای پیشنهادی در چارچوب منابع و شرایط موجود قابل اجرا هستند. محدودیت اول (رابطه ۷) بدین معنا است که حاصلضرب راهکارهای هر دسته‌ی مناطق جغرافیایی شهر تهران در هزینه اجرای راهکارها بایستی از میزان بودجه ایمنی اختصاص یافته به آن دسته‌ی منطقه کمتر باشد. به عبارت بهتر، هزینه‌ی راهکارها باید متناسب با بودجه‌ی ایمنی دسته‌ی مناطق و کمتر از آن باشد. محدودیت‌های دوم (رابطه ۸) تا چهارم (رابطه ۱۱) بدین معنا است که حاصلضرب راهکارهای هر دسته ی مناطق جغرافیایی شهر تهران در هزینه اجرای راهکارها بایستی با توجه به جدول ۲ متناسب با ضریب تناسب تقسیم بودجه اجرا شوند:

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{5}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,j,k} * B_i\right) < S_j \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=2}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,2,k} * B_i\right) \le 1.9 * \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,1,k} * B_i\right) \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=3}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,3,k} * B_i\right) \le 2.9 * \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,1,k} * B_i\right) \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=4}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,4,k} * B_i\right) \le 1.7 * \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,1,k} * B_i\right) \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=5}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,5,k} * B_i\right) \le 1.8 * \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4}\left(X_{i,1,k} * B_i\right) \quad (۱۱)$$

B_i = هزینه اجرا راهکار طبق جدول ۱ S_j = بودجه ایمنی هر دسته مناطق جغرافیایی طبق جدول ۲

همچنین سایر محدودیت های مدل سازی در قالب الزام و اجبار استفاده از راهکارها بر پایه شرایط منطقه، شرایط زمانی و شرایط آب و هوایی و همچنین با توجه به الگوهای استخراج شده در مرحله مدل سازی کاوش قوانین انجمنی در قالب جدول ۵ آورده شده‌اند. برای برخی محدودیت ها بر اساس الگوهای استخراج شده از جدول ۸ و ۹ که در بخش نتایج آمده‌اند کمک گرفته و محدودیت‌هایی ارایه گردید. به طور مثال ردیف های ۱ تا ٤ با توجه به بارندگی که باعث آبگرفتگی معابر می شود و تردد کاربران را با مشکل مواجه می کند، الزام راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی دیده شده است. همچنین با توجه به ردیف های ۵ و ٦، جهت تشویق کاربران به رعایت قوانین و مقررات جهت افزایش ایمنی، راهکارهای مرتبط با انسان در نظر گرفته شده است. با توجه به ردیف های ۷ تا ۱۰، با توجه به تصادفات به وقوع پیوسته در هنگام شب جهت ارتقای روشنایی معابر از راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دیده استفاده شده است. این محدودیت ها به بهبود ارائه راهکارهای خروجی کمک می‌کنند.

جدول ۵. محدودیت‌های برنامه‌ریزی ریاضی

ش	محدودیت		تفسیر
	جرحی	فوتی	
۱	$X_{3,3,3} = 1$	$X_{3,3,3} = 1$	اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق جنوبی تهران و در هنگام بارندگی و روز
۲	$X_{3,3,4} = 1$	$X_{3,3,4} = 1$	اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق جنوبی تهران و در هنگام بارندگی و شب
۳	$X_{3,4,3} = 1$	-	اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق مرکزی تهران و در هنگام بارندگی و روز
٤	$X_{3,4,4} = 1$	-	اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق مرکزی تهران و در هنگام بارندگی و شب
۵	$X_{1,1,1} = 1$	$X_{1,1,1} = 1$	اجرای راهکارهای مرتبط با انسان در مناطق شمالی تهران و در هنگام عدم بارندگی و روز
٦	$X_{1,3,1} = 1$	$X_{1,3,1} = 1$	اجرای راهکارهای مرتبط با انسان در مناطق جنوبی تهران و در هنگام عدم بارندگی و روز
۷	$X_{2,2,2} = 1$	$X_{2,2,2} = 1$	اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق شرقی تهران و در هنگام عدم بارندگی و شب
۸	$X_{2,3,4} + X_{2,3,2} \geq 1$	$X_{2,3,4} + X_{2,3,2} \geq 1$	حداقل یکی از دو راهکار زیر اجرا شود: اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق جنوبی تهران و در هنگام بارندگی و شب اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق جنوبی تهران و در هنگام عدم بارندگی و شب
۹	$X_{2,5,2} + X_{2,5,4} \geq 1$	$X_{2,5,2} + X_{2,5,4} \geq 1$	حداقل یکی از دو راهکار زیر اجرا شود: اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق غربی تهران و در هنگام عدم بارندگی و شب اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق غربی تهران و در هنگام بارندگی و شب
۱۰	$X_{2,1,4} + X_{3,1,4} \geq 1$	$X_{2,1,4} + X_{3,1,4} \geq 1$	حداقل یکی از دو راهکار زیر اجرا شود: اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق شمالی تهران و در هنگام بارندگی و شب اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق شمالی تهران و در هنگام بارندگی و شب

٤- نتایج

ابتدا در این بخش، آمار توصیفی متغیرهای به کار رفته در داده های تصادفات فوتی و جرحی به همراه متغیرهای آب و هوایی در قالب جدول های ٦ و ۷ نشان داده شده است. به طور پیشفرض داده‌های آب و هوایی به همراه داده‌های تصادفات وجود نداشت. این داده ها از سامانه درخواست داده های هواشناسی کشور دریافت گردید و به داده های تصادفات اضافه شد. متغیرهای آب و هوایی شامل دما، رطوبت نسبی، جهت باد، سرعت باد، مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته و شاخص آلودگی هوا است. در تصادفات جرحی اهم متغیرها شامل منطقه شهرداری، موقعیت معبر، شرایط سطح راه، کاربری محل، وضعیت روشنایی و عامل انسانی موثر در تصادفات است. همچنین در تصادفات فوتی اهم متغیرها شامل منطقه شهرداری، محل فوت، وضعیت متوفی، وضعیت عابر پیاده، وضعیت روشنایی و علت تامه تصادفات است. همچنین در داده های آب و هوایی اهم متغیرها شامل میزان بارش و رطوبت نسبی در هر دو سطح شدت تصادفات است.

جدول ٦. آمار توصیفی داده تصادفات جرحی

نام متغیر	دسته‌بندی متغیرها	فراوانی	فراوانی نسبی (درصد)	شماره متغیر
منطقه شهرداری	۱	٤٦۳	۳/۸	۱
	۲	۸۷۹	۷/۲	۲
	۳	٦۲۳	۵/۱	۳
	٤	۹۲۲	۷/۵	٤
	۵	۷۸۳	٦/٤	۵
	٦	۹۳۱	۷/٦	٦
	۷	٦۲۱	۵/۱	۷
	۸	۳٦٤	۳	۸
	۹	۳۹۷	۳/۲	۹
	۱۰	٤۷۰	۳/۸	۱۰
	۱۱	۷۳۸	٦	۱۱
	۱۲	۸۱۸	٦/۷	۱۲
	۱۳	۲۵٤	۲/۱	۱۳
	۱٤	۳۳٦	۲/۷	۱٤
	۱۵	۷۸۱	٦/٤	۱۵
	۱٦	٤۲۳	۳/٤	۱٦
	۱۷	۳۲۷	۲/۷	۱۷
	۱۸	۵۵۸	٤/۵	۱۸
	۱۹	٤۸۹	٤	۱۹
	۲۰	٦۰۳	٤/۹	۲۰
	۲۱	۳۱۹	۲/٦	۲۱
	۲۲	۱۹۳	۱/٦	۲۲
ناحیه شهرداری	۱	۲۵۵۰	۲۰/۷	۱
	۲	۲٦۷۲	۲۱/۷	۲
	۳	۲۲۱٤	۱۸	۳
	٤	۱۵۹۳	۱۳	٤
	۵	۱۲٦۰	۱۰/۳	۵
	٦	۱۰۷۹	۸/۸	٦
	۷	٤۹۵	٤	۷
	۸	۲۳۱	۱/۹	۸
	۹	۱۷٤	۱/٤	۹
	۱۰	۲٤	۰/۲	۱۰
نوع معبر	بزرگراه	۲۳۸۲	۱۹/٤	۱
	خیابان اصلی	۸۵۰۷	٦۹/۲	۲
	خیابان فرعی	٦۷۷	۵/۵	۳
	نامعلوم	۳۱٤	۲/٦	٤
	سایر موارد	٤۱۲	۳/٤	۵

نام متغیر	دسته‌بندی متغیرها	فراوانی	فراوانی نسبی (درصد)	شماره متغیر
موقعیت معبر	راه مستقیم	۷۳۸۳	٦۰/۱	۱
	تقاطع	۱٦٥۲	۱۳/٤	۲
	مسیر ویژه (BRT)	۲٦۷	۲/۲	۳
	میدان	۲۲٦	۱/۸	٤
	نامعلوم	۲٤۷٦	۲۰/۱	٥
	موارد	۲۸۸	۲/۳	٦
شرایط سطح راه	خشک	۱۲۰۳٥	۹۷/۹	۱
	تر	۲٥۷	۲/۱	۲
بازه سرعت مجاز معبر	کمتر مساوی ۳۰ کیلومتر بر ساعت	۳۱۱٤	۲٥/۳	۱
	۳۱ تا ٥۰ کیلومتر بر ساعت	۳٦۳۹	۲۹/٦	۲
	٥۱ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت	۲۰۰۰	۱٦/۳	۳
	بزرگتر مساوی ۸۱ کیلومتر بر ساعت	۳۱۸	۲/٦	٤
	نامعلوم	۳۲۲۱	۲٦/۲	٥
کاربری محل	مسکونی	٦۲۸٥	٥۱/۱	۱
	غیرمسکونی	۱۱٥٤	۹/٤	۲
	اداری، تجاری	٤٤۹۰	۳٦/٥	۳
	سایر موارد	۳٦۳	۳	٤
وضعیت روشنایی	روز	۸۱٥۱	٦٦/۳	۱
	شب	۳٥۲۳	۲۸/۷	۲
	هنگام طلوع یا غروب	٦۱۸	٥	۳
وضعیت هوا	صاف	۱۱۹۷٥	۹۷/٤	۱
	بارانی	۱۹۹	۱/٦	۲
	ابری	۱۱۸	۱	۳
نوع برخورد	برخورد وسیله‌نقلیه با موتورسیکلت	۷۱۹٦	٥۸/٥	۱
	برخورد وسیله‌نقلیه با عابر	۲۹۷۳	۲٤/۲	۲
	برخورد موتورسیکلت با عابر	۱۱۳٦	۹/۲	۳
	برخورد موتورسیکلت با موتورسیکلت	۸۲٦	٦/۷	٤
	سایر موارد (واژگونی، لغزش و غیره)	۱٦۱	۱/۳	٥
عامل انسانی موثر در تصادفات	عجله و شتاب بی مورد	۷٥۲۳	٦۱/۲	۱
	بی توجهی به مقررات	۱٥۱٥	۱۲/۳	۲
	ندارد	۲٤۲۸	۱۹/۸	۳
	سایر موارد	۸۲٦	٦/۷	٤
علت تامه تصادف	نامعلوم	٤۰۹٦	۳۳/۳	۱
	عدم توجه به جلو	۳٤۹۸	۲۸/٥	۲
	عدم رعایت حق تقدم	۱۱٦۲	۹/٥	۳
	تغییر مسیر ناگهانی	۹۹٥	۸/۱	٤
	حرکت در خلاف جهت و حرکت با دنده عقب	۷۹۱	٦/٤	٥
	سایر موارد	۱۷٥۰	۱٤/۲	٦
	کاری	۹٦۳۰	۷۸/۳	۱

نام متغیر	دسته‌بندی متغیرها	فراوانی	فراوانی نسبی (درصد)	شماره متغیر
روز هفته	غیرکاری	۲۶۶۲	۲۱/۷	۲
بازه زمانی	صبح	۱۴۷۰	۱۲	۱
	میان‌روز	۱۳۱۴	۱۰/۷	۲
	ظهر	۲۳۵۱	۱۹/۱	۳
	عصر	۳۳۳۱	۲۷/۱	۴
	شب	۲۸۵۰	۲۳/۲	۵
	نیمه‌شب	۹۷۶	۷/۹	۶
ماه تصادف	فروردین	۴۱۰	۳/۳	۱
	اردیبهشت	۹۹۴	۸/۱	۲
	خرداد	۱۰۷۲	۸/۷	۳
	تیر	۱۲۳۶	۱۰/۱	۴
	مرداد	۱۲۲۹	۱۰	۵
	شهریور	۱۳۱۶	۱۰/۷	۶
	مهر	۱۱۳۳	۹/۲	۷
	آبان	۹۸۵	۸	۸
	آذر	۷۲۲	۵/۹	۹
	دی	۱۰۰۶	۸/۲	۱۰
	بهمن	۱۰۳۲	۸/۴	۱۱
	اسفند	۱۱۵۷	۹/۴	۱۲
دما بر حسب درجه سانتیگراد	کمتر-مساوی صفر درجه سانتیگراد	۱۱۱	۰/۹	۱
	(۰-۱۰]	۲۹۵۵	۲۴	۲
	(۱۰-۲۰]	۳۷۰۴	۳۰/۱	۳
	(۲۰-۳۰]	۴۲۸۱	۳۴/۸	۴
	بیشتر از ۳۰ درجه سانتیگراد	۱۲۴۱	۱۰/۱	۵
رطوبت نسبی بر حسب درصد	[۰-۲۰]	۱۴۴۸	۱۱/۸	۱
	[۲۱-۴۰]	۵۶۱۳	۴۵/۷	۲
	[۴۱-۶۰]	۳۳۹۹	۲۷/۷	۳
	[۶۱-۸۰]	۱۶۱۵	۱۳/۱	۴
	[۸۱-۱۰۰]	۲۱۷	۱/۸	۵
جهت باد بر جسب درجه	[۰-۶۰]	۷۹۶	۶/۵	۱
	[۶۱-۱۲۰]	۱۰۰۵	۸/۲	۲
	[۱۲۱-۱۸۰]	۱۵۰۷	۱۲/۳	۳
	[۱۸۱-۲۴۰]	۲۲۰۲	۱۷/۹	۴
	[۲۴۱-۳۰۰]	۵۹۳۶	۴۸/۳	۵
	[۳۰۱-۳۶۰]	۸۴۶	۶/۹	۶
سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه	[۰-۵]	۱۰۹۲۵	۸۸/۹	۱
	[۶-۱۰]	۱۲۰۲	۹/۸	۲
	[۱۱-۱۵]	۱۲۱	۱	۳
	[۱۶-۲۰]	۴۴	۰/۳	۴

نام متغیر	دسته‌بندی متغیرها	فراوانی	فراوانی نسبی (درصد)	شماره متغیر
مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته بر حسب میلی‌متر	[۰–۱۰)	۱۱۹۵۱	۹۷/۲	۱
	[۱۰–۲۰)	۲۳۱	۱/۹	۲
	[۲۰–۳۰)	۷۵	۰/٦	۳
	بیشتر از ۳۰ میلی‌متر	۳۵	۰/۳	٤
شاخص آلودگی هوا	[۰–۵۰]: پاک	۲۲۸	۱/۹	۱
	[۵۱–۱۰۰]: قابل قبول	۷٦۸۹	٦۲/٦	۲
	[۱۰۱–۱۵۰]: ناسالم برای گروه‌های حساس	۳۷۹۳	۳۰/۹	۳
	[۱۵۱–۲۰۰]: ناسالم	۵۸۲	٤/۷	٤

جدول ۷. آمار توصیفی داده تصادفات فوتی

نام متغیر	دسته‌بندی متغیرها	فراوانی	فراوانی نسبی (درصد)	شماره متغیر
سال تصادف	سال ۱۳۹۷	۵٤۰	۳۵/۹	۱
	سال ۱۳۹۸	٤۸۹	۳۲/۵	۲
	سال ۱۳۹۹	٤۷۵	۳۱/٦	۳
منطقه شهرداری	۱	٤۵	۳	۱
	۲	۱۱۷	۷/۸	۲
	۳	٤٦	۳/۱	۳
	٤	۱۵۳	۱۰/۲	٤
	۵	۱۰۲	٦/۸	۵
	٦	٦۵	٤/۳	٦
	۷	٦۳	٤/۲	۷
	۸	٤۳	۲/۹	۸
	۹	۲٤	۱/٦	۹
	۱۰	٤۵	۳	۱۰
	۱۱	٤۱	۲/۷	۱۱
	۱۲	٦۲	٤/۱	۱۲
	۱۳	٤۹	۳/۳	۱۳
	۱٤	٦۷	٤/۵	۱٤
	۱۵	۱۰۸	۷/۲	۱۵
	۱٦	۵۲	۳/۵	۱٦
	۱۷	۳۸	۲/۵	۱۷
	۱۸	۸۲	۵/۵	۱۸
	۱۹	۱۰۳	٦/۸	۱۹
	۲۰	۸۷	۵/۸	۲۰
	۲۱	۷۳	٤/۹	۲۱
	۲۲	۳۹	۲/٦	۲۲
نوع معبر	بزرگراه	۷۳٦	٤۸/۹	۱
	خیابان اصلی	۵۸۳	۳۸/۸	۲
	تقاطع	۲۲	۱/۵	۳
	خیابان فرعی	۵۹	۳/۹	٤

	میدان	۲۱	۱/٤	٥
	سایر موارد	۸۳	٥/٥	٦
روز هفته	کاری	۱۱٥۳	۷٦/۷	۱
	غیرکاری	۳٥۱	۲۳/۳	۲
ماه تصادف	فروردین	۹۷	٦/٤	۱
	اردیبهشت	۱۳٥	۹	۲
	خرداد	۱۲۳	۸/۲	۳
	تیر	۱۲۸	۸/٥	٤
	مرداد	۱۳٥	۹	٥
	شهریور	۱٥۰	۱۰	٦
	مهر	۱۲۱	۸	۷
	آبان	۱۰۳	٦/۸	۸
	آذر	۱۳۰	۸/٦	۹
	دی	۱۱۱	۷/٤	۱۰
	بهمن	۱٤٥	۹/٦	۱۱
	اسفند	۱۲٦	۸/٤	۱۲
بازه زمانی	صبح	۱۹۷	۱۳/۱	۱
	میان‌روز	۱۲۸	۸/٥	۲
	ظهر	۱۹۷	۱۳/۱	۳
	عصر	۳۱٥	۲۰/۹	٤
	شب	۳٦۸	۲٤/٥	٥
	نیمه‌شب	۲۹۹	۱۹/۹	٦
محل فوت	بیمارستان و منزل	۹۱۰	٦۰/٥	۱
	در حین انتقال به بیمارستان	۱۰۸	۷/۲	۲
	در محل حادثه	٤۸٦	۳۲/۳	۳
وضعیت متوفی هنگام تصادف	عابرپیاده	۸۰٥	٥۳/٥	۱
	راکب موتورسیکلت	٦۱٥	٤۰/۹	۲
	سرنشین موتورسیکلت	۸٤	٥/٦	۳
وضعیت عابرپیاده	معمولی	۱۳۹۰	۹۲/٤	۱
	تبعه خارجی	۳٦	۲/٤	۲
	خیابان گرد و معتاد	٤٥	۳	۳
	کارگر شهرداری و تبعه خارجی	۳۳	۲/۲	٤
وضعیت عبور عابرپیاده	خارج از گذرگاه	۲۹۷	۱۹/۷	۱
	روی گذرگاه	۱۰۱	٦/۷	۲
	زیر پل عابرپیاده	۷٤	٤/۹	۳
	نامعلوم	۱۰۳۲	٦۸/٦	٤
وضعیت روشنایی هنگام تصادف	روز	۷۱۸	٤۷/۷	۱
	شب	٦٤۰	٤۲/٦	۲
	نامعلوم	۸٤	٥/٦	۳
	هنگام طلوع یا غروب	٦۲	٤/۱	٤

نوع وسیله‌نقلیه	برخورد با سواری	۷۲۳	٤۸/۱	۱
	برخورد با موتورسیکلت	٦۱۷	٤۱	۲
	برخورد با عابرپیاده	۱٦٤	۱۰/۹	۳
متواری	شده	۲٤٥	۱٦/۳	۱
	نشده	۱۲٥۹	۸۳/۷	۲
مشروبات الکلی	بله	۱۸	۱/۲	۱
	خیر	۱٤۸٦	۹۸/۸	۲
خط ویژه	بله	٥۳	۳/٥	۱
	خیر	۱٤٥۱	۹٦/٥	۲
علت تامه تصادف	عدم توجه به جلو	۷۲٥	٤۸/۲	۱
	عدم توانایی در کنترل وسیله‌نقلیه	۲٤٥	۱٦/۳	۲
	تغییر مسیر ناگهانی	۱۱۲	۷/٤	۳
	عدم رعایت حق تقدم	۹٤	٦/۳	٤
	حرکت در خلاف جهت و حرکت با دنده عقب	٦٦	٤/٤	٥
	نامعلوم	۱۰٤	٦/۹	٦
	سایر موارد	۱٥۸	۱۰/٥	۷
دما بر حسب درجه سانتیگراد	کمتر–مساوی صفر درجه سانتیگراد	۱٥	۱	۱
	(۱۰–۰]	٤٦٥	۳۰/۹	۲
	(۲۰–۱۰]	۳٤۷	۲۳/۱	۳
	(۳۰–۲۰]	٤٤٦	۲۹/۷	٤
	بیشتر از ۳۰ درجه سانتیگراد	۲۳۱	۱٥/٤	٥
رطوبت نسبی بر حسب درصد	[۲۰–۰]	۲۷۸	۱۸/٥	۱
	[٤۰–۲۱]	۷۸۷	٥۲/۳	۲
	[٦۰–٤۱]	۳۰۸	۲۰/٥	۳
	[۸۰–٦۱]	۱۰۷	۷/۱	٤
	[۱۰۰–۸۱]	۲٤	۱/٦	٥
جهت باد بر جسب درجه	[٦۰–۰]	۹۸	٦/٥	۱
	[۱۲۰–٦۱]	۱۱٦	۷/۷	۲
	[۱۸۰–۱۲۱]	۲۲۸	۱٥/۲	۳
	[۲٤۰–۱۸۱]	۳۰٥	۲۰/۳	٤
	[۳۰۰–۲٤۱]	٦٥۷	٤۳/۷	٥
	[۳٦۰–۳۰۱]	۱۰۰	٦/٦	٦
سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه	[٥–۰]	۱۱۳۹	۷٥/۷	۱
	[۱۰–٦]	۳۲۸	۲۱/۸	۲
	[۱٥–۱۱]	۳٤	۲/۳	۳
	[۲۰–۱٦]	۳	۰/۲	٤
مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته بر حسب میلی‌متر	(۱۰–۰]	۱٤٦٦	۹۷/٥	۱
	(۲۰–۱۰]	۲۹	۱/۹	۲
	(۳۰–۲۰]	۸	۰/٥	۳

	بیشتر از ۳۰ میلی‌متر	۱	۰/۱	٤
شاخص آلودگی هوا	[۰-۵۰]: پاک	۸۹	۵/۹	۱
	[۵۱-۱۰۰]: قابل قبول	۱۰٤۳	٦۹/۳	۲
	[۱۰۱-۱۵۰]: ناسالم برای گروه‌های حساس	۳٤٦	۲۳	۳
	[۱۵۱-۲۰۰]: ناسالم	۲٦	۱/۷	٤

در این قسمت، بخشی از قوانین خاص استخراج شده از طریق مدل‌سازی کاوش قواعد انجمنی در قالب جدول ۸ برای تصادفات جرحی و جدول ۹ برای تصادفات فوتی ارائه می‌گردد که به تفسیر جدول پرداخته می‌شود. این قوانین به این دلیل انتخاب شدند که حالت‌های خاص‌تری از الگوهای تصادفات را نشان دادند که بتوان جهت ارائه راهکارهای بهینه در مدل برنامه‌ریزی ریاضی از آنان بهره برد. همچنین الگوهایی که در آنان به بازه زمانی، رفتارهای پر خطر عدم رعایت حق تقدم و عجله و شتاب بی‌مورد و همچنین میزان بارندگی اشاره شده بود نیز به عنوان بخشی از قوانین استخراج شده انتخاب شدند. با استفاده از مدل‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی و تعریف دقیق تابع هدف، به همراه اعمال محدودیت‌های مرتبط، راهکارهای خروجی در نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو در جدول ۱۰ به دست آمد.

جدول ۸. قوانین خاص استخراج شده تصادفات جرحی

ردیف	قوانین (اگر ⬅ آنگاه)	پشتیبان	اطمینان	پوشش	لیفت	تعداد
۱	سرعت باد تا ۱۵ متر بر ثانیه، محل تصادف مسیر ویژه BRT، سطح راه خشک، هوای صاف ⬅ کاربری محل اداری-تجاری	۰/۷۳۰۳٤	۰/۸٦٦٦۷	۰/۸٤۲۷	۱/۰۵۱۸۲	۱۹۵
۲	بازه سرعت مجاز معبر در تمامی سرعت‌ها، عامل انسانی عجله و شتاب بی مورد ⬅ سطح راه خشک	۰/٦۰۱۷۷	۱	۰/٦۰۱۷۷	۱/۰۰۸۹۳	۱۳٦
۳	سرعت باد تا ۲۰ متر بر ثانیه، محل تصادف خیابان اصلی، علت تامه عدم رعایت حق تقدم ⬅ هوای صاف	۰/٦٦۵۲۳	۰/۹٦۸٦۷	۰/٦۸٦۷۵	۱/۰۰۲۳۱	۷۷۳
٤	سرعت باد تا ۲۰ متر بر ثانیه، هوای صاف، علت تامه عدم رعایت حق تقدم، هنگام روز ⬅ سطح راه خشک	۰/٦۵۳۱۸	۰/۹۷۸۰۹	۰/٦٦۷۸۱	۱/۰۰۲۲٤	۷۵۹
۵	مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته بیشتر از ۲۰ میلیمتر، راه مستقیم، روز هفته غیرکاری ⬅ بازه سرعت مجاز معبر بیشتر از ۵۰ کیلومتر بر ساعت	۰/٦	۰/۹۲۳۰۸	۰/٦۵	۱/۲۳۰۷۷	۱۲
٦	دما بین صفر تا ۲۰ درجه سانتیگراد، روز هفته غیرکاری، هنگام شب ⬅ بازه سرعت مجاز معبر بیشتر از ۵۰ کیلومتر بر ساعت	۰/٦	۰/۸۵۷۱٤	۰/۷	۱/۱٤۲۸٦	۱۲
۷	مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته بیشتر از ۲۰ میلیمتر، راه مستقیم، بازه سرعت مجاز معبر بیشتر از ۵۰ کیلومتر بر ساعت، روز هفته غیرکاری ⬅ رطوبت نسبی بیشتر از ٦۰ درصد	۰/٦	۱	۰/٦	۱/۲۵	۱۲
۸	رطوبت نسبی بیشتر از ٦۰ درصد، سرعت باد تا ۱۰ متر بر ثانیه، مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته بیشتر از ۲۰ میلیمتر، روز هفته غیرکاری ⬅ هنگام شب	۰/٦	۰/۷۵	۰/۸	۱/۰۷۱٤۳	۱۲
۹	مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، راه مستقیم، ٤ ماه پایانی سال، هوای ناسالم ⬅ برخورد وسیله‌نقلیه با عابر	۰/٦۱۱۱۱	۰/۸۸	۰/٦۹٤٤٤	۱/۲۱۸٤٦	۲۲
۱۰	سرعت باد تا ۱۰ متر بر ثانیه، مجموع بارش در ۲٤ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، راه مستقیم، ٤ ماه پایانی سال، هوای ناسالم ⬅ برخورد وسیله‌نقلیه با عابر	۰/٦۱۱۱۱	۰/۸۸	۰/٦۹٤٤٤	۱/۲۱۸٤٦	۲۲

نتایج نشـــان می‌دهد که شـــرایط جوی مانند ســـرعت باد، رطوبت و میزان بارش، تأثیر مستقیم بر کنترل وسیله نقلیه و دید رانـنـدگـان دارند. به‌ویژه این عوامل در راه‌های خیس و لغزنده، خطر لغزش و کـاهش کنترل را افزایش می‌دهنـد. تفـاوت میان هوای صـاف و بارانی نیز بر رفتار رانندگان تأثیر دارد؛ در هوای صـــاف، رفتارهای پرخطر مانند عجله بیشـــتر دیده می‌شـــود. زیرساخت‌های ترافیکی مانند مسیرهای ویژه BRT، خیابان‌های اصـلی، تقاطع‌ها و میدان‌ها نیز بر وقوع تصـادفات تأثیرگذارند. برای مثال، مسـیرهای BRT به‌علت سـرعت بالای اتوبوس‌ها، شـــرایط خطرناکی ایجاد می‌کنند. رفتارهای انســـانی مانند عدم رعـایـت حق تقدم و عجله در شـــرایط جوی عادی و راه‌های خشـک بیشـتر به چشم می‌آید، زیرا رانندگان در این شرایط به راه اعتماد بیشـــتری دارند. ترکیب عواملی مانند شـــرایط جوی مسـاعد، مناطق پرتردد، و روزهای کاری نیز خطر تصـادفات را افزایش می‌دهد. زمان و مکان وقوع تصـــادف، همراه با عواملی مانند ســـرعت مجاز، الگوهای پیچیده‌تری از حوادث را شـــکل می‌دهنـد. همچنین برخورد وســـیلـه‌نقلیه با عابر پیاده یکی از حوادث جـدی اســـت کـه تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شـــرایط جوی و محیطی قرار می‌گیرد. تحلیل‌های انجام‌شـــده نشان می‌دهد که این تصادفات بیشتر در زمان‌هایی با بارش‌های سنگین، هوای ناسالم و سرعت بالای باد رخ می‌دهند.

جدول ۹. قوانین خاص استخراج شده تصادفات فوتی

ردیف	قوانین (اگر ⬅ آنگاه)	پشتیبان	اطمینان	پوشش	لیفت	تعداد
۱	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، روز هفته غیرکاری، فوت در بیمارستان و منزل، عدم مصرف مشروبات الکلی، عدم حضور در خط ویژه ⬅ عابر پیاده معمولی	۰/۶۲۰۹۷	۰/۹۷۴۶۸	۰/۶۳۷۱	۱/۰۱۵۶۴	۷۷
۲	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، روز هفته کاری، فوت در محل حادثه، عابر پیاده معمولی، عدم حضور در خط ویژه ⬅ عدم مصرف مشروبات الکلی	۰/۶۶۲۶۵	۰/۹۹۰۹۹	۰/۶۶۸۶۷	۱/۰۳۴۶۲	۱۱۰
۳	دما بیشتر از صفر درجه سانتیگراد، مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، عابر پیاده معمولی ⬅ هنگام شب	۰/۶۱۲۹	۰/۶۵۵۱۷	۰/۹۳۵۴۸	۱/۰۶۸۹۷	۱۹
۴	روز هفته غیرکاری، متواری نشده، هوای پاکیزه ⬅ عدم مصرف مشروبات الکلی	۰/۸۰۶۴۵	۱	۰/۸۰۶۴۵	۱/۰۳۳۳۳	۲۵
۵	سرعت باد تا ۱۵ متر بر ثانیه، روز هفته غیرکاری، عابر پیاده معمولی، هنگام شب ⬅ دما بیشتر از صفر درجه سانتیگراد	۰/۶۱۲۹	۱	۰/۶۱۲۹	۱/۰۳۳۳۳	۱۹
۶	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، روز هفته غیرکاری، عابر پیاده معمولی، هنگام شب ⬅ دما بیشتر از صفر درجه سانتیگراد	۰/۶۱۲۹	۱	۰/۶۱۲۹	۱/۰۳۳۳۳	۱۹
۷	سرعت باد تا ۱۵ متر بر ثانیه، مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، روز هفته غیرکاری، هنگام شب، هوای پاکیزه ⬅ عابر پیاده معمولی	۰/۶۱۲۹	۱	۰/۶۱۲۹	۱/۰۳۳۳۳	۱۹
۸	فوت در بیمارستان و منزل، عابر پیاده معمولی، برخورد با موتورسیکلت ⬅ متواری نشده	۰/۶	۰/۹۵۹۰۲	۰/۶۲۵۶۴	۱/۰۱۶۳۵	۱۱۷
۹	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، فوت در بیمارستان و منزل، عابر پیاده معمولی، برخورد با موتورسیکلت، هوای پاکیزه ⬅ متواری نشده	۰/۶	۰/۹۵۹۰۲	۰/۶۲۵۶۴	۱/۰۱۶۳۵	۱۱۷

۱۰	رطوبت نسبی بیشتر از ۲۰ درصد، مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، متوفی راکب موتورسیکلت، عابر پیاده معمولی، برخورد با موتورسیکلت، عدم مصرف مشروبات الکلی، عدم حضور در خط ویژه، هوای پاکیزه ⬅ متواری نشده	۰/۶	۰/۹۶۶۹۴	۰/۶۲۰۵۱	۱/۰۲۴۷۵	۱۱۷
۱۱	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۲۰ میلیمتر، متوفی عابر پیاده، عبور عابر خارج از گذرگاه، هوای پاکیزه ⬅ عدم حضور در خط ویژه	۰/۶۰۴۹۴	۰/۹۷۰۳	۰/۶۲۳۴۶	۱/۰۰۷۶۲	۹۸
۱۲	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۳۰ میلیمتر، برخورد با سواری، عدم حضور در خط ویژه ⬅ متوفی عابر پیاده	۰/۶۲۲۲۲	۰/۹۳۳۳۳	۰/۶۶۶۶۷	۱/۰۵	۲۸
۱۳	مجموع بارش در ۲۴ ساعت گذشته تا ۲۰ میلیمتر، فوت در بیمارستان و منزل، متواری نشده، عدم حضور در خط ویژه، علت تامه عدم رعایت حق تقدم ⬅ عابر پیاده معمولی	۰/۶۲۵	۱	۰/۶۲۵	۱/۰۳۲۲۶	۲۰

نتایج تحلیل تصادفات فوتی نشان می‌دهد که عوامل مختلفی مانند شرایط جوی، زمان وقوع، رفتار رانندگان و نوع عابرین بر تصادفات منجر به فوت تأثیر دارند. بسیاری از این تصادفات در شرایط بارانی و رطوبت بالای ۲۰ درصد رخ داده‌اند، به‌ویژه زمانی که فرد متواری نشده است. در این تصادفات، عدم مصرف مشروبات الکلی به‌عنوان یک عامل کاهنده خطر برجسته شده است. تصادفات در روزهای غیرکاری و شب‌ها بیشتر به وقوع می‌پیوندند، که ممکن است به دلیل تردد بالای عابرین و رفتارهای پرخطر رانندگان در این زمان‌ها باشد. همچنین، موتورسواران در شرایط بارانی و سرعت باد کمتر از ۲۰ متر بر ثانیه بیشتر در معرض تصادفات مرگبار قرار دارند. همچنین علت تامه تصادفات مربوط به رفتار انسانی مانند عدم رعایت حق تقدم باعث تصادفات منجر به فوت عابران پیاده شده است. عدم رعایت بهبود زیرساخت‌های راه، مدیریت شرایط جوی و نصب علائم هشداردهنده در شرایط بارانی می‌تواند به کاهش تصادفات کمک کند. تابع هدف شامل رابطه ۶ و محدودیت‌های ذکر شده شامل روابط ۷ تا ۱۱ و جدول ۵ جهت مدل‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی در نرم‌افزار لینگو جهت ارائه راهکارهای بهینه به منظور افزایش ایمنی کاربران آسیب پذیر تعریف گردیدند. این نرم‌افزار با قابلیت‌های پیشرفته‌اش، امکان تجزیه و تحلیل جامع و حل مسائل بهینه‌سازی را فراهم می‌کند. لینگو با تحلیل جامع این داده‌ها، به شناسایی بهینه‌ای از راهکارها می‌پردازد که حداکثر اثرگذاری را در بهبود ایمنی داشته و در عین حال با محدودیت‌های بودجه‌ای و سایر قیدهای تعریف‌شده در مدل، سازگاری کامل دارد. با ورود داده‌های مربوط به راهکارها، هزینه‌ها و محدودیت‌ها، لینگو به شناسایی بهینه راهکارها برای هر دسته منطقه از تهران کمک خواهد کرد.

جدول ۱۰. راهکارهای خروجی افزایش ایمنی

ردیف	جرحی	فوتی	تفسیر
۱	$X_{1,1,1}$	$X_{1,1,1}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ۱
۲	$X_{1,1,2}$	$X_{1,1,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ۲
۳	$X_{1,1,4}$	-	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ۴
۴	-	$X_{1,1,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ۳
۵	$X_{1,2,1}$	$X_{1,2,1}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۲ در حالت زمانی ۱
۶	$X_{1,2,2}$	$X_{1,2,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۲ در حالت زمانی ۲
۷	$X_{1,2,3}$	$X_{1,2,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۲ در حالت زمانی ۳

۸	$X_{1,3,1}$	$X_{1,3,1}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ۱
۹	$X_{1,3,2}$	$X_{1,3,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ۲
۱۰	$X_{1,3,3}$	$X_{1,3,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ۳
۱۱	$X_{1,4,1}$	$X_{1,4,1}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ۱
۱۲	$X_{1,4,2}$	$X_{1,4,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ۲
۱۳	$X_{1,4,3}$	-	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ۳
۱٤	$X_{1,5,1}$	$X_{1,5,1}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ۱
۱۵	$X_{1,5,2}$	$X_{1,5,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۱ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ۲
۱٦	$X_{2,1,2}$	$X_{2,1,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ۲
۱۷	$X_{2,1,4}$	$X_{2,1,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۱ در حالت زمانی ٤
۱۸	$X_{2,2,2}$	$X_{2,2,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۲ در حالت زمانی ۲
۱۹	$X_{2,2,4}$	$X_{2,2,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۲ در حالت زمانی ٤
۲۰	$X_{2,3,2}$	$X_{2,3,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ۲
۲۱	$X_{2,4,2}$	$X_{2,4,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ۲
۲۲	$X_{2,4,4}$	$X_{2,4,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ٤
۲۳	$X_{2,5,2}$	$X_{2,5,2}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ۲
۲٤	$X_{2,5,4}$	$X_{2,5,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۲ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ٤
۲۵	$X_{3,3,3}$	$X_{3,3,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ۳
۲٦	$X_{3,3,4}$	$X_{3,3,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ۳ در حالت زمانی ٤
۲۷	-	$X_{3,4,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ۳
۲۸	-	$X_{3,4,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ٤ در حالت زمانی ٤
۲۹	-	$X_{3,5,3}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ۳
۳۰	-	$X_{3,5,4}$	اجرای راهکارهای دسته ۳ در مناطق دسته ۵ در حالت زمانی ٤

طبق جدول ۱۰، نرم‌افزار لینگو ۳۰ راهکار افزایش ایمنی ارائه داد. به دلیل تعداد بالای برخی از تصادفات در منطقه و حالت زمانی خاص، راهکارهای مرتبط با آن‌ها نیز در مدل شناسایی شده‌اند. با این وجود، برخی راهکارهای خاص نیز به دست آمده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد. با توجه به ردیف‌های ۳ ، ٤، ۷، ۱۰ و ۱۳ با توجه به تعداد بالای تصادفات در مناطق شمالی تهران هنگام بارندگی، چه در شب و چه در روز، اجرای راهکارهای انسانی مانند افزایش میزان جریمه نقدی و غیرنقدی و اعمال نمره منفی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، در مناطق جنوبی و مرکزی تهران طی روزهای بارانی، بهبود کلاس‌های آموزش رانندگی و دریافت گواهینامه، نصب بنرهای آموزشی در نقاط پرتردد شهر و اعطای طرح‌های تشویقی به راکبان و سرنشینان موتورسیکلت و دوچرخه‌سواران می‌تواند به کاهش تصادفات و ارتقاء فرهنگ ایمنی کمک کند. با توجه به ردیف‌های ۱۷، ۲۰، ۲۲ و ۲٤، اجرای راهکارهای مربوط به بهبود روشنایی و افزایش دید در مناطق شمالی و مرکزی تهران در هنگام بارندگی و شب، شامل استفاده از حصار نورشکن برای حذف نور مزاحم و نصب علائم و خطوط شب‌نما می‌باشد. این تدابیر نه تنها به بهبود روشنایی و وضوح در شرایط بارانی کمک می‌کند، بلکه با هدایت عابران پیاده و افزایش ایمنی، احساس امنیت بیشتری را در شب‌های بارانی به ارمغان می‌آورد. در مناطق جنوبی و غربی تهران، در هنگام بارندگی و شب، استفاده از چراغ‌های LED کم‌مصرف و چراغ‌های دارای پنل خورشیدی به‌ویژه اهمیت دارد. این روشنایی به‌طور قابل‌توجهی دید را افزایش داده و خطرات ناشی از تصادفات را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، این

نوع نورپردازی می‌تواند به کاهش آثار جرم و دزدی در شب کمک کند. نور بهتری که این چراغ‌ها فراهم می‌کنند، نه‌تنها موجب افزایش آگاهی عابران و ساکنان می‌شود، بلکه حس امنیت بیشتری را نیز در فضای عمومی ایجاد می‌کند و در نتیجه می‌تواند مانع از وقوع جرم‌های احتمالی گردد. با توجه به ردیف‌های ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۰ در هنگام بارندگی و روز، اجرای راهکارهای مربوط به شرایط آب و هوایی در مناطق جنوبی، مرکزی و غربی تهران شامل افزایش اصطکاک سطحی راه، نصب سیستم‌های زهکشی و بهبود وضعیت جداول تخلیه آب است. این اقدامات به جلوگیری از لغزندگی و بهبود تخلیه آب کمک کرده و ایمنی بیشتری را برای عابران فراهم می‌کند. در هنگام بارندگی و شب، در این سه منطقه، اجرای راهکارهایی نظیر افزایش اصطکاک سطحی، نصب سیستم‌های زهکشی، ایجاد شیارهای زهکشی، پاکسازی مسیرهای تخلیه آب و نصب سنگ فرش‌های ضد لغزش برای عابران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این تدابیر می‌توانند به کاهش خطر تصادفات و ایجاد احساس امنیت بیشتر در تردد عابران کمک کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تعیین راهکارهای بهینه جهت ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر راه‌ها در معابر درون‌شهری شهر تهران پرداخته شده است. بدین منظور از داده‌های شهر تهران به عنوان پرجمعیت‌ترین شهر ایران با آمار بالای تصادفات منجر به فوت و جراحت کاربران آسیب‌پذیر، در دو سطح شدت جرحی برای سال ۱۳۹۹ و سطح شدت فوتی برای سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ استفاده شده است. هدف مقاله ابتدا در گام اول، از تکنیک‌های استخراج قواعد انجمنی جهت شناسایی عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بر تصادفات جرحی و فوتی و استخراج الگوها و قوانین مشخص تصادفات این گروه از کاربران استفاده می‌شود. سپس در گام دوم، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و با به کارگیری نتایج مرحله قبل در نظر است تا یک مدل جهت تعیین راهکارهای بهینه برای افزایش ایمنی این کاربران در هر منطقه شهری ارائه شود. نتایج مدل‌سازی کاوش قوانین انجمنی نشان می‌دهد که عوامل جوی مانند بارش و رطوبت تأثیر زیادی بر کنترل وسیله‌نقلیه و رفتار رانندگان دارند. تصادفات مرگبار غالباً در شرایط بارانی و روزهای غیرکاری رخ می‌دهند که به افزایش تردد عابران و رفتارهای پرخطر رانندگان مرتبط است. عدم مصرف مشروبات الکلی و رعایت قوانین ترافیکی نیز به‌طور چشمگیری خطر تصادفات را کاهش می‌دهد. همچنین علت تامه تصادفات مربوط به رفتار انسانی مانند عدم رعایت حق تقدم باعث تصادفات منجر به فوت عابران پیاده شده است. بنابراین، بهبود زیرساخت‌های ترافیکی و مدیریت شرایط جوی، به همراه ارتقاء رفتارهای ایمن رانندگی، می‌تواند به کاهش تصادفات کمک کند. همچنین نتایج برنامه‌ریزی ریاضی نشان داد که بخش عمده‌ای از تصادفات کاربران آسیب‌پذیر راه با اجرای راهکارهای آموزشی و ترویجی کاهش یافته‌اند. اعمال جریمه‌های نقدی و غیرنقدی و ارائه پاداش به رانندگان قانون‌مدار، نقش کلیدی در این کاهش داشته است. همچنین، تحلیل‌ها حاکی از آن است که بیشترین تصادفات در هنگام شب و شرایط بارندگی رخ داده‌اند؛ ازاین‌رو، بهبود روشنایی معابر و تقویت سیستم‌های زهکشی در زمان بارندگی از جمله راهکارهای حیاتی و مؤثر برای کاهش تصادفات در این شرایط به شمار می‌روند. ادغام روش‌های کاوش قواعد انجمنی و برنامه‌ریزی ریاضی در تحلیل تصادفات ترافیکی، نوآوری اصلی این تحقیق به شمار می‌آید. این رویکرد با شناسایی الگوهای پنهان و تدوین راهکارهای بهینه، امکان استخراج روابط پیچیده میان متغیرهای مختلف را فراهم کرده و بستر تصمیم‌گیری دقیق‌تر و اجرای مؤثرتر راهبردها را مهیا می‌سازد. در این پژوهش، یک چارچوب ترکیبی دو مرحله‌ای ارائه شده است؛ در مرحله نخست، عوامل مؤثر بر ایمنی کاربران آسیب‌پذیر با استفاده از قواعد انجمنی شناسایی می‌شوند و در مرحله دوم، با بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی ریاضی و خروجی‌های مرحله اول، راهکارهای بهینه برای بهبود ایمنی تدوین می‌گردند. این روش قابلیت بومی‌سازی پارامترهای مدل‌سازی را دارد، به‌گونه‌ای که می‌توان آن را بر اساس شرایط منطقه‌ای، زمانی و سایر عوامل محیطی تنظیم کرد تا نیازهای خاص هر منطقه را پوشش دهد. نتیجه این رویکرد، ارائه راهکارهایی کاربردی و اثربخش برای ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر خواهد بود. در این پژوهش، روشی جامع برای بهینه‌سازی راهکارها با هدف ارتقای ایمنی کاربران آسیب‌پذیر ارائه شده است. از سوی دیگر، مطالعات آینده می‌توانند از این روش‌ها به عنوان پایه‌ای برای پژوهش‌های تکمیلی بهره گیرند و آن‌ها را متناسب با اهداف و شرایط خاص خود توسعه دهند.

٦- مراجع

-آیتی، اسماعیل (۱۳۸٤). هزینه تصادفات ترافیکی ایران. *انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.*

-جدول بودجه مصوب شهر تهران (۱٤۰۳).

-تارنمای سازمان پزشکی قانونی کشور (۱٤۰۳).

-سامانه درخواست داده‌های هواشناسی (۱٤۰۲).

-Agrawal, R., Imieliński, T., & Swami, A. (1993). Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. *ACM SIGMOD Record*, *22*(2). **doi.org/10.1145/170036.170072**

-Akbari, M., Lankarani, K. B., Tabrizi, R., Vali, M., Heydari, S. T., Motevalian, S. A., & Sullman, M. J. M. (2021). The effect of motorcycle safety campaign on helmet use: A systematic review and meta-analysis. In *IATSS Research*, Vol. 45, Issue 4, Elsevier B.V. 513–520.

doi.org/10.1016/j.iatssr.2021.06.001

-Batouli, G., Guo, M., Janson, B., & Marshall, W. (2020). Analysis of pedestrian-vehicle crash injury severity factors in Colorado 2006–2016. *Accident Analysis and Prevention*, *148*. **doi.org/10.1016/j.aap.2020.105782**

-Bhatia, P., (2019). Data Mining and Data Warehousing Principles and Practical Techniques, *Cambridge University Press,* 229-237.

-Champahom, T., Wisutwattanasak, P., Chanpariyavatevong, K., Laddawan, N., Jomnonkwao, S., & Ratanavaraha, V. (2022). Factors affecting severity of motorcycle accidents on Thailand's arterial roads: Multiple correspondence analysis and ordered logistics regression approaches. *IATSS Research*, *46*(1), 101–111. **doi.org/10.1016/j.iatssr.2021.10.006**

-Das, S., Tamakloe, R., Zubaidi, H., Obaid, I., & Alnedawi, A. (2021). Fatal pedestrian crashes at intersections: Trend mining using association rules. *Accident Analysis and Prevention*, *160*. **doi.org/10.1016/j.aap.2021.106306**

-Edirisinghe, P. A. S., Kitulwatte, I. D. G., & Senarathne, U. D. (2014). Injuries in the vulnerable road user fatalities; a study from Sri Lanka. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, *27*, 9–12. **doi.org/10.1016/j.jflm.2014.07.002**

-Elvik, R., & Vaa, T. (2009). The handbook of road safety measures - Part II general Propouse, policy instruments. *Elsevier*, 148–256.

-Hossain, A., Sun, X., Mahmud Zafri, N., & Codjoe, J. (2023). Investigating pedestrian crash patterns at high-speed intersection and road segments: Findings from the unsupervised learning algorithm. *International Journal of Transportation Science and Technology*.

doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.04.007

-Montella, A., Aria, M., D'Ambrosio, A., & Mauriello, F. (2012). Analysis of powered two-wheeler crashes in Italy by classification trees and rules discovery. *Accident Analysis and Prevention*, *49*, 58–72. **doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.025**

-Rahman, M. S., Abdel-Aty, M., Hasan, S., & Cai, Q. (2019). Applying machine learning approaches to analyze the vulnerable road-users' crashes at statewide traffic analysis zones. *Journal of Safety Research*, *70*, 275–288.

doi.org/10.1016/j.jsr.2019.04.008

-Sinha, S. M. (n.d.). Mathematical Programming: Theory and Methods.

-Sivasankaran, S. K., Natarajan, P., & Balasubramanian, V. (2020). Identifying Patterns of Pedestrian Crashes in Urban Metropolitan Roads in India using Association Rule Mining. *Transportation Research Procedia*, *48*, 3496–3507. **doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.102**

-Wang, J., Parajuli, S., Cherry, C. R., McDonald, N. C., & Lyons, T. (2022). Vulnerable road user safety and freight vehicles: A case study in North Carolina and Tennessee. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *15*.

doi.org/10.1016/j.trip.2022.100650

-World Health Organization. (2015). Global status report on road safety.

Identifying Safety Issues of Vulnerable Road Users in Urban Streets and Optimizing Countermeasures through the Integration of Association Rule Mining and Mathematical Programming Methods

Alireza Zare, M.Sc., Student, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Navid Nadimi, Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Seyed Saber Naser Alavi, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Vahid Khalife, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

E-mail: navidnadimi@uk.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

This paper focuses on determining optimal countermeasures to enhance the safety of vulnerable road users in urban streets of Tehran. Vulnerable road users include motorcyclists, cyclists, and pedestrians. To achieve this, data from Tehran, the most populous city in Iran with a high rate of fatal and injury-causing crashes involving vulnerable users, is utilized. The data covers two levels of crash severity: injury-related crashes for the year 2020 and fatal crashes for the years 2018 to 2020. The objective of this research is to improve the safety of vulnerable road users by identifying an optimal pattern for determining appropriate countermeasures, which includes identifying risk factors, implementing countermeasures, and continuously evaluating and improving them. The research follows two main steps. In the first step, data mining techniques are used to identify factors and parameters influencing injury and fatal crashes and to extract specific patterns and rules related to these crashes. In the second step, mathematical programming is employed to use the results from the previous phase to develop a model for determining optimal countermeasures for enhancing the safety of vulnerable road users in each urban area. The results of association rule mining indicate that weather conditions, such as rainfall and humidity, significantly affect vehicle control and driver behavior, with fatal crashes occurring more frequently on non-working days and during rainy conditions. Additionally, adherence to traffic regulations and avoidance of alcohol consumption are key factors in reducing the risk of crashes. Improving traffic infrastructure and managing weather conditions, along with promoting safer driving behaviors, are essential actions for reducing crashes. Mathematical programming results highlight the positive impact of educational and promotional countermeasures in reducing crashes involving vulnerable road users. Specifically, improving street lighting and enhancing drainage systems during rainy conditions are critical countermeasures for increasing traffic safety.

Keywords: Vulnerable Road Users (Vrus), Crashes, Safety, Optimal Countermeasures, Urban Streets