فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و چهارم، شماره ۹۷، تابستان ۱۴۰۳، ص. ۹۸-۸۳

طراحی تقاطع‌های ایمن: بررسی تأثیر هشدارهای دیداری و شنیداری بر تخلف عبور عابر پیاده از چراغ‌قرمز با استفاده از محیط واقعیت مجازی (VR)

سجاد مظلوم، کارشناسی ارشد، دستیار پژوهشی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران

نوید خادمی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: navid.khademi@ut.ac.ir

امیرمحمد ذبیح پور، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

ایمنی عابران به‌عنوان اعضای آسیب‌پذیر راه‌ها یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های دنیای حمل‌ونقل محسوب می‌شود. فناوری واقعیت مجازی (VR) به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بررسی ادراک و رفتار انسان در محیط‌های کنترل شده، فراگیر و بدون ریسک در حال ظهور است. این مطالعه از فناوری VR برای بررسی اثربخشی هشدارهای پیشگیرانه دیداری و شنیداری برای عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار، تحت شرایط محیطی و ترافیکی متفاوت استفاده کرد. به‌طور خاص، این مطالعه چهار نوع سیگنال عابر پیاده شامل چراغ عابر معمولی، دیوار لیزری، خط عابر پیاده بصری و سیگنال صوتی را آزمایش کرد. برای تحلیل روابط بین نوع سیگنال عابر پیاده و رفتار تخلف، یک مدل معادلات ساختاری (SEM) با دو متغیر میانجی پنهان - آگاهی محیطی و درک خطر - توسعه داده شد. درمجموع ۲۴۵ شرکت‌کننده در آزمایش‌ها شرکت کردند و از تقاطع‌های شبیه سازی شده VR که به سیگنال‌های پیشنهادی مجهز شده بودند عبور کردند و سناریوهای مختلف محیطی و ترافیکی را تجربه کردند. داده‌های رفتاری (تخلف افراد) به‌طور مستقیم از شبیه‌ساز و داده‌های پرسشنامه‌ای از افراد برداشت شد. یافته‌ها نشان داد که تجهیز تقاطع‌ها به هشدارهای کمکی می‌تواند درک خطر و آگاهی محیطی عابران پیاده را بهبود بخشد و درنتیجه تخلف عابران پیاده را کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده از سیگنال‌های بصری به‌ویژه در شب و در بین مردان در کاهش تخلفات نویدبخش بودند. همچنین این مطالعه ارتباطی منفی بین درک خطر و آگاهی محیطی افراد با تخلف عابران یافت. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی و استفاده از چراغ‌های عابر هوشمند به‌منظور ارتقای ایمنی عابران مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی عابران؛ واقعیت مجازی (VR)، رفتار عبور از خیابان، هشدارهای بصری و صوتی، ادراک، فهم و رفتار

۱. مقدمه

نگرانی در مورد ایمنی عابران پیاده در سراسر جهان از اهمیت بالایی برخوردار است. عابران پیاده به دلیل سطح پایین محافظت فیزیکی در مقایسه با سرنشینان خودرو، کاربران آسیب‌پذیر راه محسوب می‌شوند. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۱۸، بیش از نیمی از کل تلفات ناشی از تصادفات جاده‌ای در سطح جهانی شامل کاربران آسیب‌پذیر جاده، ازجمله موتورسیکلت‌سواران (۲۳٪)، عابران پیاده (۲۲٪) و دوچرخه‌سواران (۵٪) بوده است. همچنین حدود ۷۳ درصد از تلفات عابران پیاده در مناطق شهری رخ می‌دهد. آمار سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران نشان می‌دهد که تهران، پایتخت ایران، در سال ۱۳۹۹ با فراوانی بالای تصادفات جاده‌ای با میانگین ۱۷۰۰ مورد در روز روبرو بوده است که منجر به مصدومیت تقریبی ۷۰ نفر در روز می‌شود. علاوه بر این، این شهر به‌طور متوسط هر دو روز شاهد سه مورد مرگ‌ومیر ناشی از تصادفات است. بخش قابل‌توجهی از تلفات جاده‌ای در تهران، معادل ٤۳٪، مربوط به عابران پیاده است. سهم قابل‌توجهی از تلفات عابران پیاده، به‌طور خاص ٤۵٪، در خیابان‌های اصلی رخ می‌دهد، درحالی‌که ۵٪ از تلفات در معابر محلی گزارش‌شده است. اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا بیان می‌کند که زیرساخت‌های عابر پیاده باید برای اطمینان از ایمنی، آسایش و رفاه عابران پیاده ساخته و بهبود یابند.

آسیب‌ها و تصادفات منجر به فوت عابران پیاده ماهیت چندعاملی دارند و تحت تأثیر عوامل محیطی و رفتاری، ازجمله پیکربندی تقاطع، شرایط محیطی و رفتار عابران پیاده و سایر کاربران راه قرار می‌گیرند. عابران پیاده توانایی منحصربه‌فردی در تغییر سریع مسیر خود دارند. این انعطاف‌پذیری درحالی‌که به آن‌ها مانور پذیری بیشتری در محیط‌های پویا ارائه می‌دهد، می‌تواند به رفتارهای پرخطرتر در جاده منجر شود. به‌خوبی اثبات‌شده است که رفتار پرخطر عابران پیاده عامل اصلی تصادفات مرتبط با عابران پیاده است.

احتمال وقوع تصادفات عابران پیاده در محل عبور از خیابان بیشتر است و برخورد بین عابران پیاده و وسایل نقلیه به‌ویژه در گذرگاه‌های عابر پیاده شایع است. کینگ و همکاران[1] دریافتند که خطر تصادف عابران پیاده در عبور غیرمجاز حدود هشت برابر بیشتر است. ازاین‌رو، چراغ‌های راهنمایی عابر پیاده نقش حیاتی در هدایت عابران پیاده هنگام عبور از خیابان، به‌ویژه در تقاطع‌های شلوغ دارند. برای بهبود تسهیلات عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار، می‌توان از علائم کمکی مانند علائم صوتی برای ارائه اطلاعات کافی قابل‌دسترسی برای همه عابران پیاده استفاده کرد.

این مطالعه استفاده از هشدارهای پیشگیرانه بصری و شنیداری در تقاطع‌های شهری برای عابران پیاده را بررسی می‌کند و تأثیر آن‌ها بر رفتار عابران پیاده را از طریق استفاده از فناوری واقعیت مجازی (VR) در یک محیط کنترل‌شده و فراگیر تجزیه‌وتحلیل می‌کند. هشدارهای بصری و شنیداری از طریق چهار نوع چراغ راهنمایی عابر پیاده نشان داده می‌شوند: چراغ راهنمایی معمولی، دیوار لیزری، خط عابر پیاده بصری و سیگنال صوتی. این مطالعه شرایط محیطی و ترافیکی را برای درک جامع‌تر چگونگی تأثیر سیگنال‌های پیشنهادی بر رفتار عابران پیاده در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، این مطالعه به دنبال بررسی مکانیسمی است که از طریق آن هشدارهای پیشنهادی ما بر رفتار عبور عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار تأثیر می‌گذارد. درنهایت، این تحقیق با تکیه بر سنجش‌های پرسشنامه‌ای و برداشت‌شده از شبیه‌ساز، به دنبال ایجاد دستورالعمل‌های طراحی کاربردی و جامع برای ارتقای چراغ‌های راهنمایی عابر پیاده به‌منظور کاهش خطر تصادفات عابران پیاده در تقاطع‌های چراغ‌دار است.

به‌طور خلاصه، این مطالعه با پاسخ به سؤالات پژوهشی زیر به ادبیات ایمنی عابران پیاده کمک می‌کند:

الف) آیا سیگنال‌های پیشنهادی تحت شرایط محیطی مختلف و محیط‌های ترافیکی گوناگون بر رفتار عابران پیاده تأثیر می‌گذارد؟

ب) اینکه آیا درک ریسک و آگاهی محیطی تأثیر نوع چراغ بر رفتار تخلف از چراغ را میانجیگری[۲] می‌کنند؟

۲. ادبیات پژوهش و چارچوب نظری

۲-۱ تأثیر چراغ عابر پیاده بر تخلف عابران

از دیدگاه شناختی، در چارچوب ادغام مبادی اطلاعاتی[۳]، ورودی های حسی که اطلاعات تکمیلی ارائه می‌دهند، احتمال پردازش آن اطلاعات را افزایش می‌دهند. استفاده از چندین شیوه‌ی حسی در انتقال اطلاعات تضمین می‌کند که عدم توانایی یک کانال حسی برای جلب‌توجه مانع انتقال اطلاعات نمی‌شود. به‌طورکلی، همگرایی اطلاعات حسی ابهامات موجود در پردازش و تفسیر اطلاعات را کاهش می‌دهد. بااین‌حال، کارایی ورودی‌های حسی همچنین به‌وضوح، ارتباط و زمان‌بندی اطلاعات ارائه‌شده بستگی دارد.

مهم‌ترین ابزار برقراری ارتباط اطلاعات با عابران پیاده در تقاطع‌ها چراغ‌های راهنمایی عابر پیاده است. تحقیقات قبلی پرده از تأثیر بالقوه علائم کمکی (بصری یا شنوایی) بر بهبود رعایت چراغ راهنمایی توسط عابران پیاده و ایمنی آن‌ها برداشته است. چندین مطالعه اثر مثبت نصب سیگنال‌های شمارش معکوس عابران پیاده را بر کاهش تخلف عابران پیاده نشان داده‌اند. بروسو و همکاران[۴] رفتار نقض چراغ‌قرمز عابران پیاده را در تقاطع‌های کانادا موردمطالعه قراردادند و بر اهمیت ارائه سیگنال‌های مناسب عابر پیاده، ازجمله نمایشگرهای شمارش معکوس تأکید کردند. دیپندل و همکاران[۵] رفتار عابران پیاده را در تقاطع‌های چراغ‌دار در بلژیک مشاهده کرد و دریافت که علائم کمکی با نشانه‌های بصری یا شنوایی تأثیر مثبتی بر تخلف عابران پیاده دارند. وی همچنین بیان کرد که پنهان بودن گذرگاه‌های عابر پیاده می‌تواند عدم رعایت سیگنال توسط عابران پیاده را افزایش دهد. این موضوع پرسش پژوهش زیر را در چارچوب تحلیلی نشان داده‌شده در شکل ۱ مطرح می‌کند:

پرسش پژوهش ۱: آیا نوع چراغ راهنمایی به‌طور مستقیم بر تخلفات عبور از چراغ‌قرمز عابران پیاده تأثیر می‌گذارد؟

۲-۲ تأثیر چراغ عابر پیاده بر درک خطر عابران

معرفی سیگنال‌های جدید در محیط عابران پیاده می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی نحوه‌ی تعامل عابران پیاده با محیط اطراف و انتخاب مسیرشان را تغییر دهد. همان‌طور که توسط خاتون و همکاران[۶] تأیید شده است، عوامل محیطی راه در سطح ریسک درک شده افراد مؤثر است. درک ریسک به‌عنوان یک عامل کلیدی در تصمیم‌گیری کاربران جاده مطرح شده است و به‌عنوان ارزیابی ذهنی فرد از شدت خطر در یک موقعیت خاص شناخته می‌شود که نشان‌دهنده توانایی عابران پیاده برای قضاوت در مورد ویژگی ها و شدت یک ریسک خاص است. ازنظر تئوری، تأثیر عوامل محیطی بر رفتار پرخطر مستقیم نیست، بلکه توسط درک ریسک میانجی‌گری می‌شود. افراد تصمیمات خود را بر اساس درک ریسک پایه‌گذاری می‌کنند و رفتار خود را برای کاهش خطرات احتمالی تصادف تنظیم می‌کنند. چندین مطالعه ارتباط بین محیط جاده، درک ریسک عابران پیاده و رفتار عبور عابران پیاده را شناسایی کرده‌اند. به‌طور خاص، کوان و همکاران[۷] ارتباط بین محیط جاده، درک ریسک و رفتار عبور را بررسی کردند و دریافتند که درک ریسک عابر پیاده رابطه بین ویژگی‌های محیطی جاده‌ها و رفتارهای ناایمن عبور را میانجی‌گری می‌کند. با گنجاندن درک ریسک به‌عنوان عاملی در تحلیل ایمنی عابران پیاده، محققان می‌توانند بینش ارزشمندی در مورد درک ریسک عابران پیاده و فرآیند تصمیم‌گیری به دست آورند. این دانش سپس می‌تواند طراحی و اجرای اقدامات مقابله‌ای مؤثر را که ایمنی عابران پیاده را افزایش می‌دهد، راهنمایی کند.

در این مطالعه، سطح ریسک درک شده عابران پیاده با استفاده از سه مورد اقتباس‌شده از پژوهش هی و همکاران[۸] سنجیده می شود:

سؤال ۱: چقدر از خطرات ترافیک آگاه هستید؟/ سؤال ۲: چقدر نگران تصادف هستید؟/ سؤال ۳: چقدر احساس امنیت می‌کنید؟

و پرسش پژوهش زیر موردبررسی قرار می‌گیرد:

پرسش پژوهش ۲: درک ریسک چگونه اثر انواع سیگنال بر تخلفات عبور از چراغ‌قرمز عابران پیاده را میانجیگری می‌کند؟

۲-۳ تأثیر چراغ عابر پیاده بر آگاهی محیطی عابران

بهره‌مندی تقاطع‌ها از علائم کمکی همچنین می‌تواند سطح آگاهی عابران پیاده را افزایش دهد. عابران پیاده نسبت به محیط اطراف خود، به‌ویژه علائم عابر پیاده و محرک‌های هشداردهنده، حساس‌تر می‌شوند. این افزایش آگاهی می‌تواند منجر به درک بهتر محیط ترافیک و عواقب احتمالی تخلف شود. کوگنت و همکاران[۹] با استفاده از رویکرد کیفی، مدل آگاهی محیطی را برای عبور از خیابان عابران تطبیق دادند که در آن آگاهی محیطی عابر پیاده بر رفتار او تأثیرگذار است. آن‌ها دریافتند که عوامل محیطی، ازجمله پیکربندی تقاطع، بر آگاهی محیطی عابر پیاده و تصمیم‌گیری برای عبور از خیابان تأثیر می‌گذارد. مطالعات قبلی به بررسی آگاهی محیطی عابران پرداخته و نشان داده‌اند که آگاهی محیطی عابران پیاده در عبور از خیابان در مواردی همچون استفاده از تلفن همراه، مختل می‌شود.

این تحقیق از روش رتبه‌بندی آگاهی محیطی (SART) که توسط تیلور[۱۰] توسعه‌یافته است، استفاده می‌کند. آگاهی از موقعیت با استفاده از دو سؤال اندازه‌گیری می‌شود:

سؤال ۱: چقدر اطلاعات (در مورد ترافیک، فازهای سیگنال و سایر جزئیات تقاطع) در این تقاطع به دست آورده‌اید؟

سؤال ۲: اطلاعاتی (در مورد ترافیک، فازهای سیگنال و سایر جزئیات تقاطع) که در این تقاطع به دست آورده‌اید چقدر خوب است؟

و پرسش پژوهش زیر در شکل ۱ مطرح می‌شود:

پرسش پژوهش ۳: آگاهی از موقعیت چگونه اثر نوع سیگنال بر تخلفات عبور از چراغ‌قرمز عابران پیاده را میانجیگری می کند؟

۲-٤ نقش تعدیلگری[۱۱] جنسیت، زمان روز و حجم ترافیک

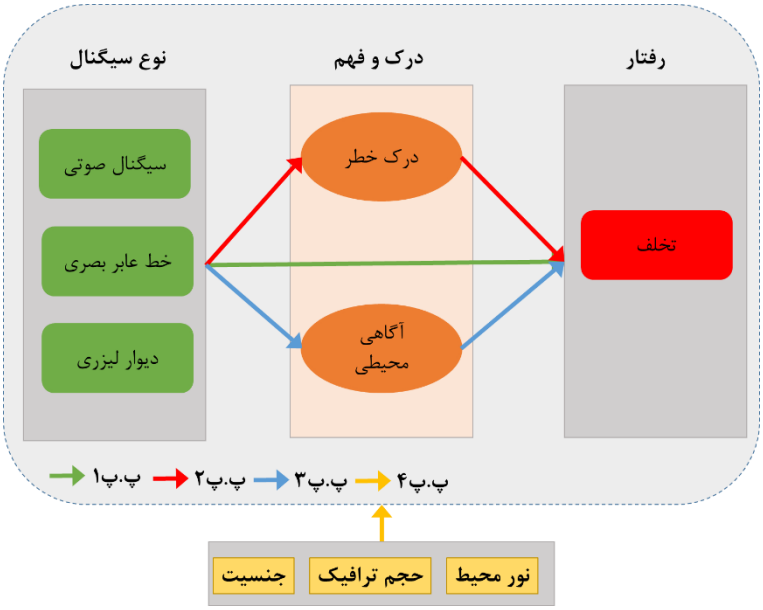
تحقیقات قبلی یافته‌های متناقضی در مورد نقش جنسیت در رفتار غیرقانونی عبور عابر پیاده گزارش کرده‌اند. درحالی‌که برخی مطالعات نشان داده‌اند که مردان نسبت به زنان نرخ تخلف بالاتری دارند. سایر مطالعات نتوانسته‌اند تمایزهای قابل‌توجهی بین دو جنس را شناسایی کنند.

همچنین پژوهش‌ها نشان داده‌شده‌اند که شرایط ترافیک نقش مهمی در تخلفات عابران پیاده دارد. چندین مطالعه شواهدی را ارائه کردند که همبستگی مثبتی بین کاهش حجم ترافیک و افزایش موارد تخلف عابران پیاده وجود دارد. این نشان می‌دهد که وجود شکاف در ترافیک وسایل نقلیه باعث می‌شود عبور از خیابان آسان‌تر و ایمن‌تر شود و عابران تمایل بیشتری به نادیده گرفتن چراغ داشته باشند. این مسئله به برهم‌کنش پیچیده بین رفتار عابران پیاده و محیط ترافیک تأکید می‌کند.

آمار سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران در سال ۱٤۰۰ نشان می دهد که حوادث عابران پیاده در تهران الگوی زمانی متمایزی دارند، به‌طوری‌که ۱۳ درصد در ساعات شلوغ صبح (۸:۰۰ صبح تا ۱۲:۰۰ بعدازظهر)، به دنبال آن ۱٤ درصد در بعدازظهر (۱۲:۰۰ بعدازظهر تا ٤:۰۰ بعدازظهر)، ۱۷ درصد در عصر (٤:۰۰ بعدازظهر تا ۸:۰۰ بعدازظهر) و ۲٦ درصد در اواخر شب (۸:۰۰ بعدازظهر تا ۱۲:۰۰ بعدازظهر) رخ می‌دهد. قابل‌توجه است که تقریباً ٤۰ درصد از حوادث عابران پیاده در شب اتفاق می‌افتد. یکی از عوامل مؤثر در تصادفات عابران پیاده، تخلف است. مطالعات قبلی ارتباطی بین فرکانس تخلفات عابران پیاده و نور محیط را نشان داد. به‌طور خاص، طبق گفته وانگ و همکاران[۱۲]، میزان تخلفات در ساعات شبانه روند صعودی دارد.

بنابراین، پرسش پژوهش به شرح زیر است:

پرسش پژوهش ٤: جنسیت، نور محیط و حجم ترافیک چگونه مسیرهای بین متغیرهای تحقیق را تعدیل می‌کنند؟



شکل ۱. چارچوب مدل‌سازی پژوهش

۳. روش پژوهش

۳-۱ شرکت‌کنندگان

درمجموع ۲٤٥ نفر در این پژوهش شرکت کردند. این نمونه شامل ۱٤۸ مرد و ۹۷ زن در سنین ۱۸ تا ٤۰ سال است. از این تعداد، ۱٦٥ نفر از شرکت‌کنندگان سابقه استفاده از شبیه‌ساز واقعیت مجازی (VR) را داشتند. افراد به‌طور داوطلبانه در آزمایش شرکت کردند، بنابراین هیچ‌گونه پاداشی دریافت نکردند.

۳-۲ محیط شبیه‌سازی و سناریوها

محیط شبیه‌سازی این پژوهش با استفاده از موتور بازی‌سازی یونیتی[۱۳] ساخته شد که در شکل ۲ نشان داده‌شده است. این محیط از یک تقاطع شهری دوطرفه و بخش‌هایی از جاده با زیرساخت‌ها و مبلمان شهری تشکیل‌شده است. این محیط شامل یک تقاطع با خیابان‌های دوطرفه (۲,۷٥ متر عرض هر لاین) با یک گذرگاه عابر پیاده و یک خط‌کشی دوبل زرد در وسط جاده بود. سایر اجزای محیط، مانند مبلمان شهری و ساختمان‌های مجاور، با یک پیاده‌رو از مسیر جداشده‌اند (شکل ۲ ب را ببینید). محیط شبیه‌سازی‌شده به‌واسطه‌ی عینک واقعیت مجازی مدل اچ تی سی وایو پرو آی (HTC VIVE Pro Eye) که مجهز به کیت وایرلس بود به شرکت‌کنندگان نمایش داده شد.

شکل ۲. تصاویر محیط شبیه‌سازی؛ الف) محیط شبیه‌سازی‌شده در واقعیت مجازی، ب) محیط مجازی از دید شرکت‌کننده

سناریوهای این پژوهش بر اساس ترکیبی از دو سطح حجم ترافیک (کم/زیاد)، دو سطح نور محیط (روز/شب) و چهار سطح نوع سیگنال عابر پیاده (سیگنال معمولی، سیگنال صوتی، خط عابر پیاده بصری و دیوار لیزری) در مجموعاً ۱۶ حالت ساخته‌شده‌اند.

شکل ۳ سیگنال‌های پیشنهادی عابران پیاده را در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد. توضیح این سیگنال‌ها در اینجا آمده است:

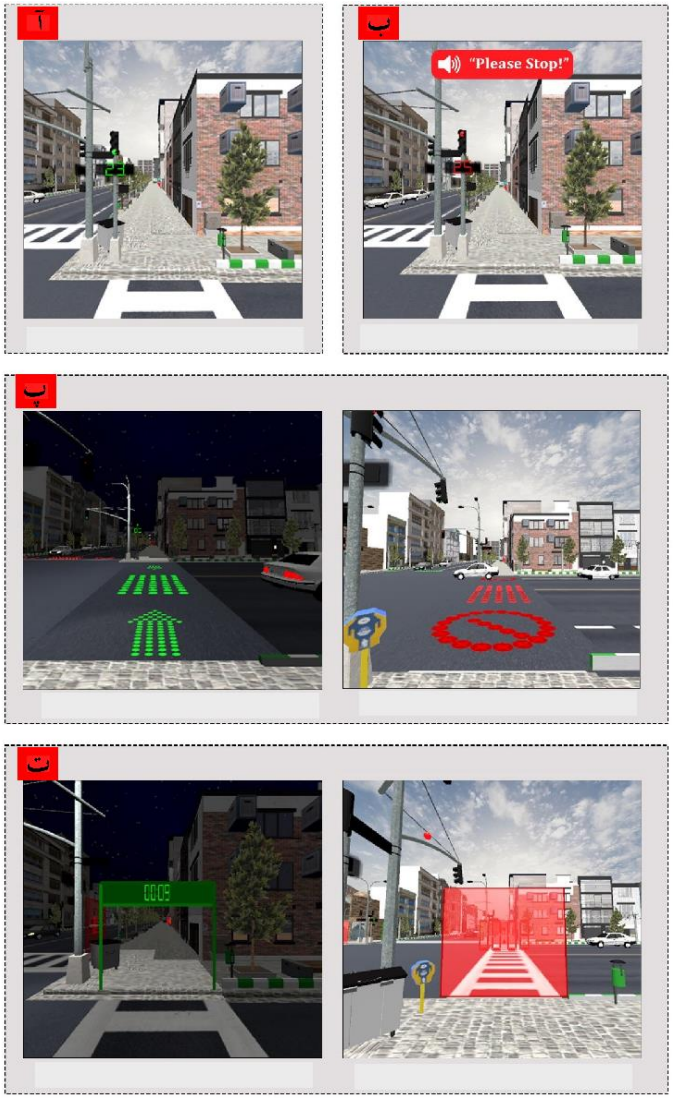
الف) سیگنال معمولی (شکل ۳ الف): شبیه به سیگنال‌های متعارف مشاهده‌شده در تقاطع‌های شهری است.

ب) سیگنال صوتی (شکل ۳ ب): یک پیام صوتی با عبارت «لطفاً توقف کنید!» به زبان فارسی در فاز قرمز چراغ پخش می‌کند. این پیام روی حجم ۹۰ دسی‌بل تنظیم‌شده بود که ناحیه‌ای کروی به شعاع ۱۰ متر با مرکزیت جدول کنار جاده را در برمی‌گیرد. قابل‌ذکر است که میانگین سطح صدا در تقاطع‌ها ۸۵ دسی‌بل است؛ بنابراین، پیام ۹۰ دسی‌بل حتی در سناریوهای ترافیک بالا به‌راحتی قابل‌تشخیص خواهد بود.

ج) سیگنال خط عابر پیاده بصری (شکل ۳ پ): این سیگنال شامل چراغ‌های LED کار گذاشته‌شده درون زمین است که با یک فلش سبز که اجازه عبور را می‌دهد یا یک علامت توقف قرمز که بر اساس فاز چراغ حرکت را ممنوع می‌کند، نمایش داده می‌شود. چراغ‌های LED عرض ۲٫۵ متر (برابر با عرض گذرگاه عابر پیاده) را پوشش می‌دهند و مشابه چراغ‌های به‌کاررفته در چراغ‌های عادی ترافیکی است. خط عابر پیاده بصری کل طول گذرگاه عابر پیاده را پوشش می‌دهد تا در هرلحظه برای عابران پیاده قابل‌مشاهده باشد و تأثیر ثابتی بر عبور عابران پیاده داشته باشد. این چراغ‌های راهنمایی درون زمینی در تقاطع‌های محدودی مانند سئول، کره جنوبی اجراشده است.

د) دیوار لیزری (شکل ۳ ت): یک مانع قرمز (عرض = ۲٫۵ و ارتفاع = ۲٫۵ متر) را در فاز قرمز سیگنال نمایش می‌دهد و با سبز شدن سیگنال، یک ورودی سبز را نشان می‌دهد. جنس ن مشابه سیگنال معمولی و خط عابر پیاده بصری است، بااین‌حال شفاف است تا مانع دید عابران پیاده (به‌ویژه در فاز قرمز) نشود.

همچنین مجهز به تایمر دوطرفه برای نمایش زمان باقی‌مانده تا تغییر فاز است.



شکل ۳. سیگنال‌های پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی؛ الف) چراغ معمولی عابر، ب) سیگنال صوتی، پ) خط عابر بصری، ت) دیوار لیزری

۳-۳ فرآیند آزمایش

در بدو ورود شرکت‌کنندگان رضایت‌نامه‌ی شرکت در پژوهش را امضا کرده و آموزش‌های اولیه را برای حرکت در محیط مجازی دریافت کردند. سپس شرکت‌کنندگان دوربین واقعیت مجازی را بر سر گذاشته و در محیط آشنایی قرار گرفتند تا شیوه‌ی حرکت در محیط را تمرین کنند. شرکت‌کنندگان سپس به پرسشنامه‌ای درباره مشخصات فردی پاسخ دادند و دستورالعمل‌های مربوط به نحوه‌ی انجام آزمایش را دریافت کردند. در محیط گرم کردن، شرکت‌کنندگان برای یک‌بار کل آزمایش را تمرین کردند تا اجرای صحیح آن را بیاموزند و تأثیر تازگی محیط مجازی بر رفتارشان را به حداقل برسانند. آزمایش شامل عبور از یک تقاطع به‌منظور رسیدن به ایستگاه اتوبوس در طرف دیگر خیابان بود. از آن‌ها خواسته شد تا حد امکان مطابق با رفتار دنیای واقعی خود عمل کنند و به آن‌ها هشدار داده شد که هرگونه تصادف با خودروها منجر به اتمام آزمایش می‌شود. سپس افراد در محیط تست اصلی قرار گرفتند. برخلاف مرحله‌ی

گرم کردن، در آزمایش واقعی، شرکت‌کنندگان برای تکمیل آزمایش محدود به زمان تعیین‌شده هستند تا رفتار واقعی آن‌ها شبیه‌سازی شود. این زمان برابر با مدت‌زمان انجام آزمایش در مرحله‌ی قبل بود. پس از انجام آزمایش اصلی افراد پرسشنامه‌ی مربوط به درک خطر و آگاهی محیطی را تکمیل کرده و از آن‌ها قدردانی به عمل آمد.

۳-٤ جمع‌آوری داده

داده‌های جمع‌آوری‌شده در این پژوهش از دو روش برداشت از شبیه‌ساز و پرسشنامه به دست آمد. رفتار تخلف عابر با استفاده از کد نویسی با زبان سی شارپ (C#) به‌طور مستقیم از محیط شبیه‌سازی استخراج شد. همچنین بخشی از داده‌ها با استفاده از پرسشنامه قبل و بعد از آزمایش‌ها، به دست آمد. علاوه بر سؤالات مربوط به ویژگی‌های فردی، شرکت‌کنندگان پرسشنامه‌های درک خطر و آگاهی محیطی که با مقیاس لیکرت ۵ درجه‌ای (از ۱: کاملاً مخالفم تا ۵: کاملاً موافقم) اندازه‌گیری شد را پر کردند (سؤالات در بخش ۲-۲ و ۲-۳ عنوان‌شده است).

۳-۵ روش تحلیل داده‌ها

برای ارزیابی مدل پیشنهادی، ابتدا تحلیل عاملی تأییدی[۱٤] انجام شد. برای سنجش برازش داده‌ها به مدل، شاخص‌های برازش مدل ازجمله ریشه دوم میانگین مربعات استاندارد باقیمانده[۱۵] (SRMR) و شاخص برازش نرمال شده[۱٦] (NFI) محاسبه شدند. مقادیر SRMR کمتر از ۰,۰۸ و NFI بالاتر از ۰,۹۰ نشان‌دهنده برازش مناسب مدل هستند.

روایی و قابلیت اطمینان پرسشنامه با استفاده از آلفای کرونباخ و قابلیت اطمینان مرکب[۱۷] (CR) ارزیابی شد. مقادیر آلفای کرونباخ و CR بیشتر از ۰,۷ نشان‌دهنده انسجام داخلی خوب سازه‌های پرسشنامه است. برای اطمینان از روایی همگرا[۱۸]، بارهای عاملی باید بیشتر از ۰,۵ و میانگین واریانس استخراج‌شده[۱۹] (AVE) نیز باید از ۰,۵ بیشتر باشد.

برای بررسی هم‌زمان روابط متقابل بین متغیرهای پنهان[۲۰] و متغیرهای نشانگر[۲۱] آن‌ها (مدل اندازه‌گیری[۲۲]) و روابط بین متغیرهای پنهان و متغیرهای آشکار (مدل ساختاری[۲۳]) از مدل‌سازی معادلات ساختاری[۲٤] (SEM) با رویکرد حداقل مربعات نسبی[۲۵] (PLS) با استفاده از نرم‌افزار اسمارت پی ال اس[۲٦] نسخه ۳,۲,۸ استفاده شد.

٤. تحلیل داده‌ها

٤-۱ مدل اندازه‌گیری

نتایج نشان داد که مدل به‌خوبی با داده‌ها برازش دارد ($SRMR = 0.087,\ NFI = 0.777$). شاخص‌های ارزیابی روایی و پایایی پرسشنامه، ازجمله بارهای عاملی، آلفای کرونباخ، CR و AVE در جدول ۱ ارائه‌شده است. ازآنجاکه تمامی بارهای عاملی بزرگ‌تر از ۰,٦۷٤ و مقادیر AVE بزرگ‌تر از ۰,۵ هستند، مدل از اعتبار همگرای خوبی برخوردار است. علاوه بر این، با توجه به مقادیر آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از ۰,۷ و مقادیر CR بزرگ‌تر از ۰,۸، مدل پیشنهادی از انسجام داخلی خوبی برخوردار است.

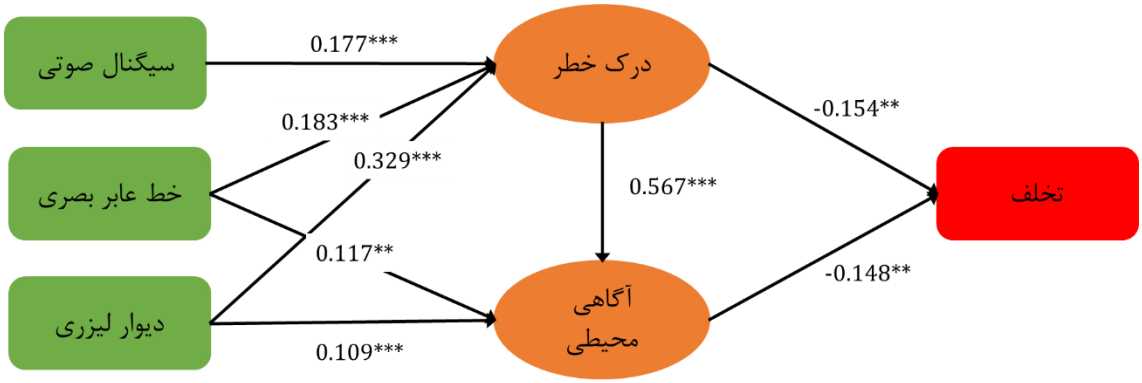
جدول ۱. نتایج تحلیل عاملی تأییدی، روایی و پایایی پرسشنامه

متغیر	پرسش‌ها	بار عاملی	α	CR	AVE
درک خطر	پرسش ۱	۰,٦۷٤	۰,۷٤۵	۰,۸۱۰	۰,۵۹۰
	پرسش ۲	۰,۸۷٦			
	پرسش ۳	۰,۷٤۰			
آگاهی محیطی	پرسش ۱	۰,۸۵۸	۰,۷۲٦	۰,۸۷۸	۰,۷۸۳
	پرسش ۲	۰,۹۱۱			

٤-٢ مدلسازی معادلات ساختاری

نتایج برآوردهای مدل SEM در شکل ٤ ارائه شده است. ضرایب مسیر نیز در جدول ٢ ارائه شده است. نتایج به‌طور عمده نشان داد که درک خطر و آگاهی محیطی، رابطه بین سیگنال و تخلف عابر پیاده را میانجیگری می‌کنند. طبق نتایج، درک خطر $(\beta = -0.154)$ و آگاهی محیطی $(\beta = -0.148)$ پیش‌بینی کننده‌های معنی‌داری از تخلف هستند. همچنین، درک خطر به‌طور قابل‌توجهی بر آگاهی محیطی تأثیر می گذارد$(\beta = 0.567)$. علاوه بر این، سیگنال صوتی$= \beta)$ 0.177)، خط عابر پیاده بصری $(\beta = 0.183)$ و دیوار لیزری‌تاثیر $(\beta = 0.329)$ مثبتی بر درک خطر دارند. به‌طور مشابه، خط عابر پیاده بصری $(\beta = 0.117)$ و دیوار لیزری $(\beta = 0.109)$تأثیر مثبتی بر آگاهی محیطی دارند.

از منظر اثرات غیرمستقیم، مشخص شده است که آگاهی محیطی رابطه بین درک خطر و رفتار تخلف را میانجیگری می‌کند. علاوه بر این، سیگنال صوتی، خط عابر پیاده بصری و دیوار لیزری به‌طور غیرمستقیم از مسیر درک خطر بر آگاهی محیطی افراد تأثیر می‌گذارد. همچنین، سیگنال صوتی، خط عابر پیاده بصری و دیوار لیزری از طریق درک خطر و آگاهی محیطی تأثیر غیرمستقیم قابل‌توجهی بر تخلف دارند. بر اساس این نتایج دیوار لیزری، خط عابر پیاده بصری و سیگنال صوتی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر افزایش درک خطر و آگاهی از موقعیت شرکت‌کنندگان و درنتیجه کاهش تخلفات آن‌ها داشت.



شکل ٤. نتایج (ضریب مسیر و معناداری) مدلسازی معادلات ساختاری

جدول ٢. اثر مستقیم، غیرمستقیم و کل آیتم‌های مدل

آیتم	اثر مستقیم		اثر غیرمستقیم		اثر کل	
	ضریب مسیر استاندارد	مقدار آماره‌ی T	ضریب مسیر استاندارد	مقدار آماره‌ی T	ضریب مسیر استاندارد	مقدار آماره ی T
سیگنال صوتی ← درک خطر	٠,١٧٧	٢,٢٧٧	–	–	٠,١٧٧	٢,٢٧٧
سیگنال صوتی ← آگاهی محیطی	–	–	٠,١	٢,٢٤٤	٠,١	٢,٢٤٤
سیگنال صوتی ← تخلف	–	–	−٠,٠٤٢	٢,٨١٣	−٠,٠٤٢	٢,٨١٣
دیوار لیزری ← درک خطر	٠,٣٢٩	٤,٤٦٩	–	–	٠,٣٢٩	٤,٤٦٩
دیوار لیزری ← آگاهی محیطی	٠,١٠٩	٢,٧٩٣	٠,١٨٦	٤,٢٢٢	٠,٢٩٦	٤,٥٧٨
دیوار لیزری ← تخلف	–	–	−٠,٠٩٤	٣,١٣٩	−٠,٠٩٤	٣,١٣٩
درک خطر ← آگاهی محیطی	٠,٥٦٧	١١,٣٢٦	–	–	٠,٥٦٧	١١,٣٢٦
درک خطر ← تخلف	−٠,١٥٤	٢,٠٣٥	−٠,٠٨٤	٢,٩٥٩	−٠,٢٣٨	٣,٩٢٨

آیتم	اثر مستقیم		اثر غیرمستقیم		اثر کل	
آگاهی محیطی ← تخلف	-۰,۱٤۸	۲,۹۱٤	-	-	-۰,۱٤۸	۲,۹۱٤
سیگنال بصری ← درک خطر	۰,۱۸۳	۲,۸۹٤	-	-	۰,۱۸۳	۲,۸۹٤
سیگنال بصری ← آگاهی محیطی	۰,۱۱۷	۲,٤۳٦	۰,۱۰٤	۲,٦۳٤	۰,۲۲۱	۳,٥۲۷
سیگنال بصری ← تخلف	-	-	-۰,۰٦۱	۲,٤٤٦	-۰,۰٦۱	۲,٤٤٦

٤-۳ آنالیز متغیرهای تعدیلگر

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده‌شده است، جنسیت، زمان روز و حجم ترافیک اثر تعدیل‌کننده بر روابط مدل دارند. نتایج نشان داد که جنسیت رابطه‌ی میان آگاهی محیطی و تخلف را تعدیل می‌کند $(\beta = -0.119)$. علاوه بر این، جنسیت تأثیر دیوار لیزری $(\beta = 0.593)$ و گذرگاه عابر پیاده بصری $(\beta = 0.188)$ بر آگاهی محیطی را تعدیل می‌کند.

در رابطه با زمان روز، نتایج نشان می‌دهد که ارتباط بین هر دو متغیر پنهان (درک خطر $(\beta = -0.258)$ و آگاهی محیطی $(\beta = -0.132)$) و تخلف توسط این متغیر تعدیل می‌شود. همچنین، حجم ترافیک بر رابطه‌ی بین درک خطر و آگاهی محیطی اثر تعدیل‌کننده دارد $(\beta = -0.124)$. علاوه بر این، حجم ترافیک بر ضریب مسیر میان دیوار لیزری و درک خطر به‌عنوان تعدیل‌کننده عمل می‌کند$(\beta = -0.487)$.

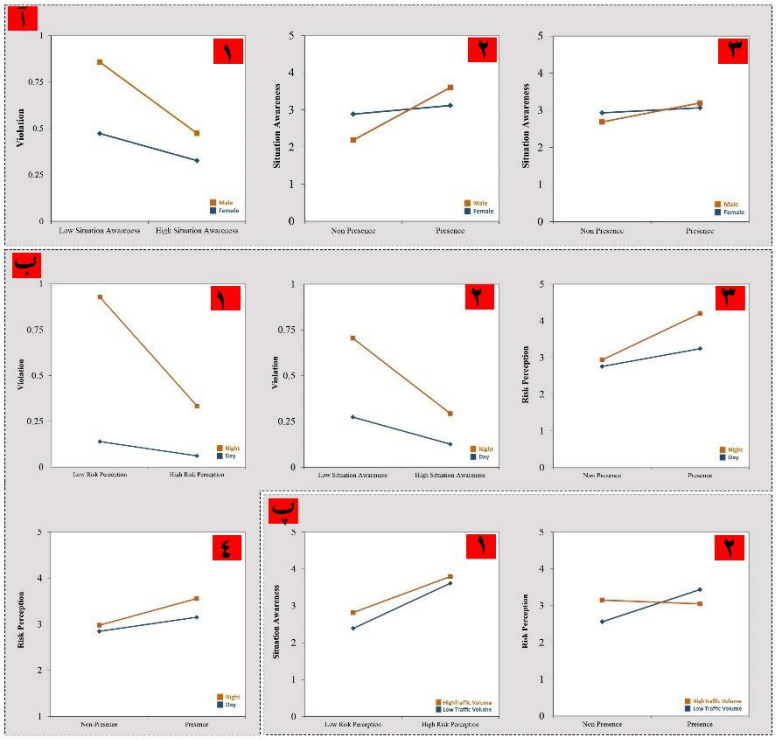
شکل ۵ تحلیل شیب[۲۷] مربوط به اثر تعدیل‌کننده جنسیت، زمان روز و حجم ترافیک بر مدل را نشان می‌دهد. شکل ۵ الف (۱) نشان می‌دهد که تأثیر آگاهی از موقعیت بر تخلف در مردان نسبت به زنان بیشتر است. بااین‌حال، زنان نسبت به مردان با همان سطح آگاهی از موقعیت، کمتر مرتکب تخلف می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۵ الف (۲، ۳) نشان داده‌شده است، دیوار لیزری و گذرگاه عابر پیاده بصری در افزایش آگاهی محیطی مردان نسبت به زنان مؤثرتر هستند. درحالی‌که در صورت نبود دیوار لیزری و گذرگاه عابر پیاده بصری، مردان نسبت به زنان آگاهی از موقعیت کمتری دارند، افزودن این علائم باعث می‌شود مردان نسبت به زنان آگاهی محیطی بالاتری داشته باشند.

همچنین نشان داده‌شده است که شرایط محیطی و ترافیکی بر روابط مدل اثر تعدیل‌کننده دارند. شکل ۵ ب (۱، ۲) نشان می دهد که تأثیر درک خطر و آگاهی از موقعیت بر تخلف در شب نسبت به روز بیشتر است. در همان سطح از درک خطر یا آگاهی از موقعیت، شرکت‌کنندگان در شب نسبت به روز بیشتر احتمال دارد که از سیگنال عبور کنند. علاوه بر این، زمان روز همچنین بر تأثیر تجهیز تقاطع با دیوار لیزری و گذرگاه عابر پیاده بر درک خطر (شکل ۵ ب (۳، ٤)) تعدیل می‌کند. تأثیر وجود علائم بصری بر افزایش درک خطر در شب نسبت به روز قوی‌تر است. در رابطه با شرایط ترافیک، حجم ترافیک بالا تأثیر درک خطر بر آگاهی از موقعیت افراد را ضعیف می‌کند. با همان سطح درک خطر، شرکت‌کنندگان در ترافیک بالا آگاهی از موقعیت بالاتری داشتند (شکل ۵ ج (۱)). علاوه بر این، وجود دیوار لیزری تأثیر قوی‌تری بر درک خطر شرکت‌کنندگان در حجم ترافیک پایین دارد (شکل ۵ ج (۲)). علی‌رغم داشتن درک پایین‌تر از خطر زمانی که حجم ترافیک کم است، افراد با اضافه شدن دیوار لیزری در حجم ترافیک پایین، احساس خطر بیشتری را درک کردند.

جدول ۳. نتایج تحلیل تعدیل گری بر روابط معادلات ساختاری

تعدیل گر	آیتم	مقدار اثر تعدیل گر	مقدار آماره‌ی t	معناداری
روز یا شب	دیوار لیزری← درک خطر	۰,۳۹۱	۲,۲٥۳	<۰,۰۱
	خط عابر بصری← درک خطر	۰,۱۳٦	۲,۱۲۱	<۰,۰۱
	درک خطر ← تخلف	-۰,۲٥۸	۲,٤۷۹	<۰,۰۱

	آگاهی محیطی ← تخلف	-۰,۱۳۲	۳,۹۱۸	<۰,۰۰۱
حجم ترافیک	دیوار لیزری← درک خطر	-۰,٤۸۷	۳,٦۱۲	<۰,۰۰۱
	درک خطر ← آگاهی محیطی	-۰,۱۲٤	۳,۹۲۷	<۰,۰۰۱
جنسیت	دیوار لیزری← آگاهی محیطی	۰,۵۹۳	۳,۹۳۲	<۰,۰۰۱
	سیگنال بصری← آگاهی محیطی	۰,۱۸۸	۳,۹۲٤	<۰,۰۰۱
	آگاهی محیطی ← تخلف	-۰,۱۱۹	۲,۸۹٦	<۰,۰۰۱



شکل ۵. تحلیل شیب متغیرهای تعدیلگر (تخلف :violation، درک خطر :Risk perception، آگاهی محیطی :Situation awareness)

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از یک محیط واقعیت مجازی (VR) شبیه‌سازی‌شده و کنترل‌شده و با هدف ارائه‌ی راهکارهای مهندسی برای افزایش ایمنی عابران در تقاطع‌های چراغ‌دار شهری اقدام به معرفی سه نوع سیگنال خط عابر پیاده‌ی بصری، صوتی و دیوار لیزری و بررسی تأثیر این سیگنال‌ها بر میزان تخلف عابران در مقایسه با چراغ عادی عابر پیاده کرد. میزان اثربخشی این سیگنال‌ها در شرایط محیطی متفاوت شامل روز و شب و سطوح متفاوت حجم ترافیک بررسی شد تا بتوان بهترین سیگنال را برای شرایط محیطی مقتضی پیشنهاد داد. بعلاوه اثر متغیرهای دموگرافیک بر اثربخشی سیگنال‌ها بررسی شد. همچنین این پژوهش تلاش کرد تا علاوه بر بررسی نوع تأثیرات این سیگنال‌ها بر رفتار تخلف عابران، مکانیسم اثرگذاری هرکدام از سیگنال‌های پیشنهادی بر تخلف را بررسی کند.

یافته‌های مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد افزایش آگاهی محیطی و درک خطر بر تخلف عابران تأثیرگذار است. این دو تقریباً تأثیر مستقیم یکسانی بر تخلف داشتند، هرچند درکل افزایش درک خطر تأثیر بیشتری بر کاهش تخلف عابران دارد. بعلاوه یافته‌ها نشان داد که میزان خطر درک شده در تقاطع بر افزایش آگاهی محیطی افراد تأثیر قابل‌توجهی دارد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که اضافه کردن هر یک از سیگنال‌های صوتی، خط عابر پیاده‌ی بصری و دیوار لیزری به تقاطع‌ها در مقایسه با سیگنال عادی در کاهش تخلفات مؤثر است. ازآنجاکه تخلف عابران یکی از عوامل اصلی تصادفات عابران به شمار می‌آید، اضافه کردن این سیگنال‌ها به تقاطعات موجب افزایش ایمنی عابران می‌شود. تأثیر دیوار لیزری در کاهش تخلفات نسبت به سایر سیگنال‌ها بیشتر بود. این مسئله می‌تواند به علت نوع طراحی دیوار لیزری باشد که به عابران هشدار جدی می‌دهد و به‌عنوان مانعی در برابر حرکت آن‌ها عمل می‌کند.

بعلاوه افراد در تقاطع‌ها مجهز به سیگنال‌های پیشنهادی خطر درک شده‌ی بالاتری در مقایسه با تقاطع‌های عادی داشتند. این امر از دو جنبه حائز اهمیت است: نخست آنکه منطبق با پژوهش‌های پیشین میزان خطر درک شده بر رفتار تخلف عابر تأثیرگذار است و افزایش درک خطر موجب کاهش تخلف عابران می‌شود و ثانیاً ازآنجاکه یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزایش درک خطر با افزایش آگاهی محیطی افراد ارتباط قوی و مستقیمی دارد فلذا افزایش درک خطر در تقاطع‌ها به‌طور غیرمستقیم موجب افزایش آگاهی محیطی عابران نیز می‌شود. مورد آخر ازآنجا مورد اهمیت است که آگاهی محیطی با ایمنی عابران رابطه‌ی مستقیم دارد بنابراین حتی اگر افراد مرتکب تخلف نیز بشوند با افزایش درک خطر در تقاطع‌ها و به‌موجب آن افزایش آگاهی محیطی، ایمنی آنان ارتقا می‌یابد. از روی دیگر سیگنال‌های ارائه‌شده به‌طور مستقیم نیز باعث افزایش آگاهی محیطی شرکت‌کنندگان شد؛ بنابراین به‌طور خلاصه، افزودن سیگنال‌ها باعث شد تا نرخ تخلف افراد کاهش و درک خطر و آگاهی محیطی آن‌ها افزایش پیدا کند.

برخلاف سیگنال صوتی، سیگنال بصری و دیوار لیزری علاوه بر افزایش آگاهی محیطی از طریق افزایش درک خطر، به‌طور مستقیم نیز باعث افزایش آگاهی محیطی افراد شدند. این مسئله به ماهیت افزایش آگاهی محیطی عابران در تقاطع‌های شهری اشاره دارد. سیگنال صوتی با افزایش خطر درک شده برای افراد در تقاطع‌ها موجب افزایش آگاهی محیطی عابران می‌شود؛ درحالی‌که افزایش آگاهی محیطی در اثر سیگنال بصری و دیوار لیزری علاوه بر تأثیر از طریق افزایش درک خطر به‌طور مستقیم نیز بر افزایش آگاهی محیطی عابران تأثیر می‌گذارد. یکی از عواملی که موجب این اثر مستقیم می‌شود، ذات سیگنال‌هاست که موجب جلب‌توجه عابران به تقاطع و آنچه در آن رخ می‌دهد، می‌شود.

همچنین یافته‌ها نشان داد تأثیر سیگنال‌ها بر میزان تخلف عابران وابسته به شرایط محیطی است. درحالی‌که افراد تحت تأثیر سیگنال صوتی عملکرد تخلف تقریباً یکسانی داشتند، دیوار لیزری در حجم‌های ترافیک پایین تأثیر بیشتری در کاهش تخلف داشتند. عابران عموماً در حجم‌های ترافیک بالا خطر بیشتری احساس می‌کنند و تبعا توجه بیشتری نیز دارند؛ اضافه کردن سیگنال دیوار لیزری به تقاطع‌ها موجب ایجاد حس خطر در عابران می‌شود که می‌تواند در بهبود رفتار آن‌ها مؤثر باشد.

بر اساس نتایج پژوهش تأثیر سیگنال خط عابر بصری و دیوار لیزری بر افزایش درک خطر عابران در شب بیشتر از روز است. یک علت برای این مسئله ویژگی‌های دیداری این سیگنال‌ها است که مبتنی بر نور هستند که باعث دید بیشتر آن‌ها در شب می‌شود. بعلاوه، تأثیر سیگنال‌ها بر میزان تخلف عابران در مردان و زنان نیز متفاوت است. سیگنال بصری و دیوار لیزری در افزایش درک خطر در مردان مؤثرتر از زنان بود.

افزایش درک خطر در شب تأثیر بیشتری بر کاهش تخلفات داشت. در شب به دلیل کمبود نور، دید افراد به محیط کاهش می‌یابد و به‌طور طبیعی توانایی تشخیص و شناسایی جزئیات کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود که افراد به مخاطرات و تهدیدها در محیط اطرافشان حساس‌تر شوند. در این شرایط، افزایش درک خطر به‌ویژه اهمیت پیدا می‌کند؛ زیرا افراد نیاز به تمرکز بیشتری دارند تا به‌طور دقیق‌تر محیط را ارزیابی کنند و به تشخیص مخاطرات پیش‌آمده در ترافیک بپردازند. به‌طور مشابه افزایش آگاهی محیطی در شب تأثیر بیشتری بر کاهش تخلفات

داشت. در شب به دلیل کمبود نور، دید افراد به محیط کاهش می‌یابد و نیاز به تمرکز و توجه بیشتر برای تشخیص و شناسایی موارد اطراف افزایش می‌یابد. برای رفع نیازهای افراد به اطلاعات دقیق ترافیکی، افزایش آگاهی محیطی به‌ویژه اهمیت پیدا می‌کند تا افراد به‌طور کامل از وضعیت محیط اطراف خود مطلع شوند. در شب، حس امان افراد به دلیل تاریکی و کمبود نور کاهش می‌یابد. افزایش آگاهی محیطی به افراد اطمینان می‌دهد که درک بهتری از وضعیت محیط اطراف خواهند داشت و به علت کاهش حس ناامنی، تمایل به رعایت قوانین ترافیکی و اقدامات ایمن‌تر را افزایش می‌دهند. بعلاوه در شب به دلیل کمبود نور، افراد باید به‌طور فعال‌تر توجه کنند تا به اطلاعات محیط اطراف دست پیدا کنند. افزایش آگاهی محیطی می‌تواند تمرکز افراد را بر موارد مهم‌تر و تغییراتی که ممکن است به‌طور ناگهانی رخ دهد، جلب کند.

تأثیر آگاهی محیطی بر تخلف در میان زنان و مردان متفاوت است. افزایش آگاهی محیطی تأثیر بیشتری بر کاهش تخلف در زنان نسبت به مردان داشت. زنان به‌طور عمومی ممکن است حساسیت بیشتری به محیط اطرافشان داشته باشند و نیاز به اطلاعات دقیق‌تر از محیط داشته باشند. افزایش آگاهی محیطی می‌تواند به افزایش حس امنیت و توجه به اطراف منجر شود و زنان را به رفتارهای ایمن‌تر ترغیب کند. همچنین زنان به دلیل تمایل به تشخیص دقیق‌تر وضعیت‌ها و تغییرات اطراف، ممکن است به اطلاعات بصری و محیطی بیشتری توجه کنند. افزایش آگاهی محیطی به زنان کمک می‌کند تا بهتر از تغییرات در محیط پیش‌آمده آگاه شوند و به‌موقع واکنش نشان دهند.

علی‌رغم دستاوردهای متعددی که مطالعه حاضر به همراه دارد، خالی از محدودیت نیز نیست. این مطالعه از واقعیت مجازی استفاده کرد که سیگنال پیشنهادی شبیه به واقعیت را در معرض دید شرکت‌کنندگان قرار داد؛ بااین‌حال، برای بررسی بیشتر تأثیرات این سیگنال‌ها، توصیه می‌کنیم با پیاده‌سازی آن‌ها در مناطق آزمایشی، تحقیقات بیشتری انجام دهیم. علاوه بر این، این سیگنال‌ها ممکن است مزایای دیگری برای گروه‌های خاصی از عابران پیاده مانند عابران حواس‌پرت داشته باشد که می‌تواند تحقیقات آتی را جهت‌دهی کند. درنهایت، برای اطمینان از بهینه‌سازی تصمیم‌گیری و تخصیص منابع، تحقیقات بیشتری برای بررسی قابلیت اقتصادی گزینه‌های پیشنهادی و اثربخشی رویکرد ارزیابی پروژه انتخاب‌شده، موردنیاز است.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. King et.al.
2. Mediation
3. Multisensory integration
4. Brosseau et.al.
5. Diependaele et.al.
6. Khatoon et.al.
7. Kwon et.al.
8. He et.al.
9. Cœugnet et.al.
10. Taylor
11. Moderation
12. Wang et.al.
13. Unity game engine
14. Confirmatory factor analysis
15. Standardized root mean square residual
16. Normed fit index
17. Composite reliability
18. Convergent validity
19. Average variance extracted
20. Latent variables
21. Indicator variables
22. Measurement model
23. Structural model
24. Structural equation modeling
25. Partial least square
26. SmartPLS
27. Slope analysis

۷. مراجع

– شهرداری تهران, "سالنامه آماری تصادفات و تلفات ترافیکی شهر تهران," ۱۴۰۰.

psychology and behaviour, vol. 21, pp. 159-172, 2013.

– K. Diependaele, "Non-compliance with pedestrian traffic lights in Belgian cities," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 67, pp. 230-241, 2019.

– S. A. Arhin and E. C. Noel, "Impact of countdown pedestrian signals on pedestrian behavior and perception of intersection safety in the District of Columbia," in 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2007: IEEE, pp. 337-342.

– K. Lipovac, M. Vujanic, B. Maric, and M. Nesic, "The influence of a pedestrian countdown display on pedestrian behavior at signalized pedestrian crossings," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 20, pp. 121-134, 2013.

– E. Paschalidis, I. Politis, S. Basbas, and P. Lambrianidou, "Pedestrian compliance and cross walking speed adaptation due to countdown timer installations: A self report study," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 42, pp. 456-467, 2016.

– M. Khatoon, G. Tiwari, and N. Chatterjee, "Impact of grade separator on pedestrian risk taking behavior," Accident Analysis & Prevention, vol. 50, pp. 861-870, 2013.

– C. D. Egan, "Children's gaze behaviour at real-world and simulated road crossings," 2012.

– D. C. Schwebel and L. A. McClure, "Using virtual reality to train children in safe street-crossing skills," Injury prevention, vol. 16, no. 1, pp. e1-e1, 2010.

– WHO, "Global status report on road safety 2018," 2018. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684

– NHTSA, "Traffic Safety Facts 2012 Data," U.S. Department of Transportation, National Highway Transportation Safety Administration, 2014.

– [Online]. Available: https://trafficorg.tehran.ir/Portals/0/documents/amar/%D8%B3%D8%A7%D9%84%D9%86%D8%A7%D9%85%D9%87%201400-.pdf

– FHWA, "Pedestrian Facilities Users Guide," 2022. [Online]. Available: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/01102/01102.pdf

– B. C. de Lavalette, C. Tijus, S. Poitrenaud, C. Leproux, J. Bergeron, and J.-P. Thouez, "Pedestrian crossing decision-making: A situational and behavioral approach," Safety science, vol. 47, no. 9, pp. 1248-1253, 2009.

– M. J. King, D. Soole, and A. Ghafourian, "Illegal pedestrian crossing at signalised intersections: incidence and relative risk," Accident Analysis & Prevention, vol. 41, no. 3, pp. 485-490, 2009.

– Y. Gu, D. E. Angelaki, and G. C. DeAngelis, "Neural correlates of multisensory cue integration in macaque MSTd," Nature neuroscience, vol. 11, no. 10, pp. 1201-1210, 2008.

– M. Brosseau, S. Zangenehpour, N. Saunier, and L. Miranda-Moreno, "The impact of waiting time and other factors on dangerous pedestrian crossings and violations at signalized intersections: A case study in Montreal," Transportation research part F: traffic

– D. Mukherjee and S. Mitra, "A comparative study of safe and unsafe signalized intersections from the view point of pedestrian behavior and perception," Accident Analysis & Prevention, vol. 132, p. 105218, 2019.

– S. B. Sitkin and A. L. Pablo, "Reconceptualizing the determinants of risk behavior," Academy of management review, vol. 17, no. 1, pp. 9-38, 1992.

– L. Sjöberg, B.-E. Moen, and T. Rundmo, "Explaining risk perception," An evaluation of the psychometric paradigm in risk perception research, vol. 10, no. 2, pp. 665-612, 2004.

– J.-H. Kwon, J. Kim, S. Kim, and G.-H. Cho, "Pedestrians safety perception and crossing behaviors in narrow urban streets: An experimental study using immersive virtual reality technology," Accident Analysis & Prevention, vol. 174, p. 106757, 2022.

– S. Rankavat and G. Tiwari, "Pedestrians risk perception of traffic crash and built environment features–Delhi, India," Safety science, vol. 87, pp. 1-7, 2016.

– A. Villaveces et al., "Pedestrians' perceptions of walkability and safety in relation to the built environment in Cali, Colombia, 2009–10," Injury prevention, vol. 18, no. 5, pp. 291-297, 2012.

– C. Zhang, F. Chen, and Y. Wei, "Evaluation of pedestrian crossing behavior and safety at uncontrolled mid-block crosswalks with different numbers of lanes in China," Accident Analysis & Prevention, vol. 123, pp. 263-273, 2019.

– M. C. Diógenes, L. A. Lindau, and L. d. S. de Transportes–LASTRAN, "Risk perception of pedestrians at midblock crossings in Brazil," in Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research (WCTR), 2010, pp. 1-19.

– G. Lee, Y. Park, J. Kim, and G.-H. Cho, "Association between intersection characteristics and perceived crash risk among school-aged children," Accident Analysis & Prevention, vol. 97, pp. 111-121, 2016.

– Y. He et al., "Safety of micro-mobility: Riders' psychological factors and risky behaviors of cargo TTWs in China," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 80, pp. 189-202, 2021.

– S. Cœugnet, B. Cahour, and S. Kraiem, "Risk-taking, emotions and socio-cognitive dynamics of pedestrian street-crossing decision-making in the city," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 65, pp. 141-157, 2019.

– E. Kim, H. Kim, Y. Kwon, S. Choi, and G. Shin, "Performance of ground-level signal detection when using a phone while walking," Accident Analysis & Prevention, vol. 151, p. 105909, 2021.

– G. S. Larue and C. N. Watling, "Acceptance of visual and audio interventions for distracted pedestrians," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 76, pp. 369-383, 2021.

– R. M. Taylor, "Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design," in Situational awareness: Routledge, 2017, pp. 111-128.

– M. Jamali-Dolatabad, H. Sadeghi-Bazargani, and P. Sarbakhsh, "Predictors of fatal outcomes in pedestrian accidents in Tabriz Metropolis of Iran: application of PLS-DA method," Traffic

– J. N. Schmitz, "The effects of pedestrian countdown timers on safety and efficiency of operations at signalized intersections," 2011.

– J. Wang, H. Huang, P. Xu, S. Xie, and S. Wong, "Random parameter probit models to analyze pedestrian red-light violations and injury severity in pedestrian–motor vehicle crashes at signalized crossings," Journal of Transportation Safety & Security, vol. 12, no. 6, pp. 818-837, 2020.

– B. G. Kang and B. S. Kim, "A Study on Cognitive Error Validation for LED In-Ground Traffic Lights Using a Digital Twin and Virtual Environment," Mathematics, vol. 11, no. 17, p. 3780, 2023.

– J. F. Hair, G. T. M. Hult, C. M. Ringle, and M. Sarstedt, A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). Sage publications, 2021.

– C. Fornell and D. F. Larcker, "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error," Journal of marketing research, vol. 18, no. 1, pp. 39-50, 1981.

– H. Zhou, S. B. Romero, and X. Qin, "An extension of the theory of planned behavior to predict pedestrians' violating crossing behavior using structural equation modeling," Accident Analysis & Prevention, vol. 95, pp. 417-424, 2016.

injury prevention, vol. 20, no. 8, pp. 873-879, 2019.

– F. M. Poó, R. D. Ledesma, and R. Trujillo, "Pedestrian crossing behavior, an observational study in the city of Ushuaia, Argentina," Traffic injury prevention, vol. 19, no. 3, pp. 305-310, 2018.

– T. Rosenbloom, "Crossing at a red light: Behaviour of individuals and groups," Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 12, no. 5, pp. 389-394, 2009.

– A. Dommes, M.-A. Granié, M.-S. Cloutier, C. Coquelet, and F. Huguenin-Richard, "Red light violations by adult pedestrians and other safety-related behaviors at signalized crosswalks," Accident Analysis & Prevention, vol. 80, pp. 67-75, 2015.

– G. Ren, Z. Zhou, W. Wang, Y. Zhang, and W. Wang, "Crossing behaviors of pedestrians at signalized intersections: observational study and survey in China," Transportation research record, vol. 2264, no. 1, pp. 65-73, 2011.

– M. M. Hamed, "Analysis of pedestrians' behavior at pedestrian crossings," Safety science, vol. 38, no. 1, pp. 63-82, 2001.

– D. Yagil, "Beliefs, motives and situational factors related to pedestrians' self-reported behavior at signal-controlled crossings," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 3, no. 1, pp. 1-13, 2000.

– K. Yoneda, N. Suganuma, R. Yanase, and M. Aldibaja, "Automated driving recognition technologies for adverse weather conditions," IATSS research, vol. 43, no. 4, pp. 253-262, 2019.