

شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی (مطالعه موردی بزرگراه برون‌شهری مشهد-سبزوار-تهران)

مقاله علمی - پژوهشی

محسن رحمتی یامی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امین میرزا بروجردیان*، استادیار، دانشکده عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سید احسان سید ابریشمی، دانشیار، دانشکده عمران، گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: boroujerdian@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۲۲۲-۲۰۳

چکیده

تصادفات ترافیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده انسان‌ها، خود را به‌شکل یک پدیده خطرناک نشان داده‌است. تأثیر عوامل متعدد در بروز حوادث رانندگی با سهم‌های مختلف، کاهش پیامدهای ناشی از این واقعه ناخوشایند را در تحلیل وضعیت ایمنی با چالش مواجه کرده‌است. مدل‌های شبیه‌سازی پرداخت‌شده با در نظر گرفتن اثر برهمکنش عوامل مؤثر بر وقوع حوادث رانندگی نظیر خصوصیات رفتاری متنوع کاربران در تعامل با راه، توانایی بالقوه‌ای برای ارزیابی ایمنی تسهیلات ترافیکی در شرایط مختلف دارند. شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی به سبب تأثیر متفاوت آن‌ها متناسب با هدف مطالعه و همچنین محدودیت‌های محاسباتی، یکی از مراحل اساسی در فرایند پرداخت است. هدف از این مطالعه ارائه راهکاری به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی است. به‌همین‌منظور از میان ترددشمارهای استان خراسان رضوی، ۴ ترددشمار واقع در مسیرهای رفت‌وبرگشت محور مواصلاتی مشهد-سبزوار-تهران با ۲۳ تصادف و ۳۰۶ رکورد اطلاعات ترافیکی به‌عنوان نمونه‌های موردی پژوهش انتخاب شدند و با استنتاج اطلاعات هندسی از پایگاه‌های در دسترس، مدل ناحیه مورد مطالعه در نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی خردنگر SUMO ساخته شد. با اجرای منطقی مدل شبیه‌سازی بر روی نمونه تصادفات موردی گزینش‌شده در محورهای منتخب، پارامترهای مؤثر در مدل پیروی خودرو و همچنین مدل تغییر خط شناسایی و با تنظیم آن‌ها در سناریوهای متعدد، مدل شبیه‌سازی در محورهای موردی پژوهش به‌کمک شاخص‌های هدف مناسب ارزیابی ایمنی نظیر شاخص‌های تداخل ترافیکی، پرداخت و اعتبارسنجی شد. از میان تمام پارامترهای مدل شبیه‌سازی، پارامترهای کلی توزیع نرمال ضریب سرعت مجاز به ترتیب با میانگین و انحراف معیار استاندارد ۰/۹۵ و ۰/۱ و پارامترهای جزئی تغییر خط مشارکتی، پذیرش فاصله در مانور تغییر خط و همچنین تمایل به حرکت از سمت راست مسیر مؤثر شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: بزرگراه برون‌شهری، شبیه‌ساز خردنگر SUMO، شناسایی پارامترهای مؤثر، مدل شبیه‌سازی ارزیابی

ایمنی

۱- مقدمه

دلیل شناسایی، اولویت‌بندی و رفع حادثه‌خیزی قطعات پرتصادف یکی از مهم‌ترین برنامه‌های وزارت راه با توجه به محدودیت‌های اجرایی و بودجه‌ای آن است. شناسایی سهم عوامل مؤثر بر وقوع حوادث ترافیکی سبب‌شده تا استفاده از

نرخ مرگ‌ومیر بیشتر در رده سنی جوانان در تلفات ناشی از تصادفات ترافیکی هزینه بسیاری به کشورها، به‌خصوص کشورهای درحال توسعه تحمیل می‌کند (Global Burden of Disease Collaborative Network, 2018). به همین

نتایج حاصل از داده‌های تصادفات تکمیل می‌گردد. مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر^۶ می‌توانند قابلیت اطمینان ارزیابی ایمنی به‌کمک شاخص‌های تداخل ترافیکی را بهبود بخشند؛ اما باین‌حال همچنان استفاده از این راهکار چالش‌برانگیز است. ایده به‌کاررفته در اکثر مدل‌های شبیه‌سازی برگرفته از نظریه‌های ظرفیت و بهره‌وری تسهیلات ترافیکی است و توجه کمتری به ایمنی در ساخت مدل‌های آن شده‌است. البته مدل‌های شبیه‌سازی، به‌صورت کنترل‌شده توانایی بالقوه‌ای برای تولید اطلاعات دقیق از نحوه رفتار رانندگان در شرایط محیطی و تسهیلات ترافیکی متنوع دارند (Essa & Sayed, 2015). به همین دلیل همچنان مدل‌های شبیه‌سازی ایمنی در سطح خردنگر به‌کمک شاخص‌های تداخل ترافیکی همگام با بهبود مدل‌های رفتاری رانندگان درحال توسعه است؛ اما با وجود مطالعات انجام‌شده، همچنان خلأ تحقیقاتی قابل‌توجهی در زمینه کاربرد و استفاده از آن‌ها وجود دارد (Mahmud, Ferreira, Hoque, & Tavassoli, 2019). چالش اصلی در این روش، شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی و پرداخت آن بر اساس اطلاعات میدانی به‌نحوی است که مدل ساخته‌شده نشان‌دهنده رفتار واقعی جریان ترافیکی در همان محل باشد (Essa & Sayed, 2015). هدف اصلی این پژوهش، ارائه راهکاری به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی است که مدل شبیه‌ساز آن نیز، به‌کمک شاخص‌های هدف^۷ مناسب ارزیابی ایمنی برای قطعاتی از محورهای بزرگراهی برون‌شهری بر اساس اطلاعات ثبت‌شده توسط ترددشمارهای مکانیزه سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، پرداخت و اعتبارسنجی^۸ شده‌است.

۲- پیشینه تحقیق

مدل‌های شبیه‌سازی یکی از انواع خاص مدل‌های تحلیلی^۹ هستند که می‌توانند به‌صورت ریاضی و منطقی رفتار تسهیلات ترافیکی را در سطوح مختلف تحلیل، به‌صورت کمی شبیه‌سازی و توصیف کنند. روش‌های مختلفی برای دسته‌بندی کردن مدل‌های شبیه‌سازی وجود دارد؛ اما یکی از روش‌های متداول در طبقه‌بندی آن‌ها به سطوح جزئیاتی که هریک از مدل‌ها قادر به توصیف آن هستند، اشاره دارد. به‌طورکلی مدل‌های شبیه‌سازی از این منظر، به سه دسته مدل‌های خردنگر، میان‌نگر^{۱۰} و کلان‌نگر^{۱۱} به ترتیب از

مدل‌های آماری به یکی از روش‌های تحلیل وضعیت ایمنی در تسهیلات ترافیکی تبدیل شود. پیچیدگی در نظر گرفتن اثر برهمکنش عوامل مؤثر بر وقوع حوادث ترافیکی در زمان، کاربرد این دسته از مدل‌ها را در شناسایی، اولویت‌بندی و پیش‌بینی قطعات پرتصادف با چالش مواجه کرده‌است (Mannering & Bhat, 2014). مدل‌های شبیه‌سازی پرداخت‌شده با در نظر گرفتن اثر برهمکنش عوامل مؤثر بر وقوع حوادث ترافیکی نظیر خصوصیات رفتاری متنوع کاربران در تعامل با راه، توانایی بالقوه‌ای برای ارزیابی ایمنی تسهیلات ترافیکی در شرایط مختلف دارند. شناسایی پارامترهای مؤثر^۱ در مدل‌های شبیه‌سازی به‌سبب تأثیر متفاوت آن‌ها متناسب با هدف مطالعه و همچنین محدودیت‌های محاسباتی، یکی از مراحل اساسی در فرایند پرداخت^۲ است. ارزیابی ایمنی تسهیلات ترافیکی به‌طور سنتی از دیرباز با توجه به تعداد و شدت تصادفات مشاهده‌شده در قطعات مختلف راه، انجام می‌شده است. با وجود کاربرد و اهمیت داده‌های ثبت‌شده تصادفات، محدودیت‌های شناخته‌شده‌ی آن نظیر ثبت نادرست حوادث رانندگی و همچنین نامعلوم بودن زنجیره علل وقوع تصادفات، استفاده از این راهکار را با چالش مواجه کرده است (Imprialou & Qudus, 2019). از سویی دیگر، بدین‌سبب که لازم است تا ابتدا تعداد کافی تصادف پیش از انجام هرگونه اقدام اصلاحی به‌وقوع پیوندد؛ این رویکرد را در دسته رویکردهای واکنشی^۳ طبقه‌بندی می‌کنند. شاخص‌های جایگزین ارزیابی ایمنی^۴ در پاسخ به محدودیت‌های مذکور توسط محققان حوزه ایمنی راه پیشنهاد شده‌است. این شاخص‌ها با در نظر گرفتن نزدیکی زمانی و مکانی کاربران راه، معیاری کمی و هدفمند برای ارزیابی ایمنی تسهیلات ترافیکی بر اساس فراوانی و شدت، ارائه می‌کنند. به همین دلیل، این روش برخلاف روش‌های سنتی در دسته راهکارهای کنشی^۵ طبقه‌بندی شده و از دقت، سرعت، سهولت و قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های تصادفات برخوردار هست (Svensson, 1992). البته این راهکار نیز مشابه دیگر راهکارها کاستی‌هایی دارد؛ مثلاً ممکن است علت وقوع برخی از انواع تصادفات ریشه در خصوصیات جریان ترافیکی نداشته باشد. به همین دلیل، تحلیل زمانی و مکانی شاخص‌های جایگزین ارزیابی ایمنی به‌صورت تطبیقی با

عرضی خودروها و همچنین تأثیرپذیری آنها از خودروهای اطراف، باعث شده تا مدل‌سازی آنها بر پایه تئوری‌های مرسوم که در آنها فرض می‌شد خودرو پس‌رو صرفاً از خودرو پیش‌رو تأثیر می‌پذیرد؛ با چالش مواجه گردد (Mathew, Munigety, & Bajpai, 2015). نبود پایگاه داده معتبر از خط‌سیر^{۱۷} حرکتی خودروها در جریان‌های ترافیکی ناهمگن غیرخط‌مبنا نیز یکی دیگر از چالش‌های مشترک مطالعات در این زمینه است (Mathew et al., 2015). تقاطعات به‌دلیل داشتن سناریوهای تداخلی متنوع‌تر با فراوانی زیاد، بیشترین سهم را در بین تسهیلات ترافیکی در مطالعات شبیه‌سازی ایمنی با استفاده از شاخص‌های تداخل ترافیکی داشته‌است. بعد از آن، محورهای آزادراهی و بزرگراهی بیشترین فراوانی را در بین تسهیلات ترافیکی به خود اختصاص داده‌اند. میدان، راه‌های دوخطه دوطرفه، پارکینگ و خطوط ویژه از دیگر تسهیلاتی هستند که در مطالعات گذشته به ارزیابی ایمنی آنها در سناریوهای مختلف پرداخته شده‌است (Mahmud et al., 2019). به‌عنوان مثال، لی و همکاران اثر طرح‌های جایگزین در نحوه مدیریت خطوط حمل‌ونقل عمومی بر ایمنی در تقاطعات کنترل‌شده کانادا را با استفاده از شاخص‌های تداخل ترافیکی شبیه‌سازی شده که رابطه آنها با تصادفات به‌وقوع پیوسته مدل‌سازی شده‌بود؛ بررسی کردند (Li, Persaud, & Shalaby, 2017). مولی و همکاران نیز با مقایسه تعداد تداخل‌های شبیه‌سازی شده خودرو-خودرو و خودرو-عابرپیاده، اثر بهبود هندسه را بر ایمنی یک تقاطع کنترل‌شده ارزیابی کردند (Muley, Ghanim, & Kharbeche, 2018). سو و همکاران نیز میزان همبستگی بین تداخلات شبیه‌سازی شده با تصادفات به‌وقوع پیوسته در شبکه آزادراهی درون‌شهری را در دو حالت، با مدل دینامیکی خودرو^{۱۸} (به‌همراه اطلاعات حرکتی دقیق خودروها نظیر زوایای حرکتی) و بدون آن بررسی کردند (So, Park, Wolfe, & Dedes, 2015). عبدالاتی و وانگ نیز بر اساس تعداد تداخل‌های شبیه‌سازی شده اثر حداکثر سرعت مجاز متغیر^{۱۹} در بالادست و پایین‌دست ناحیه تداخلی^{۲۰} بزرگراهی (ورودی و خروجی متوالی) را بر روی ایمنی و عملکرد آن، بررسی کردند (Abdel-Aty & Wang, 2017). جوفری و همکاران نیز با استفاده از تداخلات شبیه‌سازی شده، وضعیت ایمنی و عملکردی طرح‌های اجرایی مختلف از ساخت میدان

بیشترین تا کمترین سطح پرداختن به جزئیات تقسیم می‌شوند. عملکرد واحدهای جزء ترافیکی (به‌عنوان مثال؛ خودروها) و رفتارهای مرتبط با آن در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر به‌کمک مدل‌های پایه‌ای دیگر نظیر مدل پیروی خودرو^۲، مدل تغییر خط^{۱۳} و مدل قبول فاصله^{۱۴} توصیف می‌شود که با تنظیم پارامترهای آنها می‌توان رفتار جریان ترافیکی در ناحیه مورد مطالعه را به واقعیت نزدیک نمود (Barcelo, 2010). حتی با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، همچنان مدل‌های شبیه‌سازی قادر به مدل‌سازی دقیق جهان واقعی نیستند. به همین دلیل برای دستیابی به اهداف مطالعه و همچنین افزایش دقت مدل شبیه‌سازی، شناخت و انتخاب صحیح پارامترها ضروری است. به‌طور کلی در انتخاب پارامترهای مدل شبیه‌سازی، اولویت انتخاب با ۴ دسته زیر نیست (عابدینی et al., ۱۳۹۲):

۱. پارامترهایی که به‌طور مستقیم قابل محاسبه هستند،
۲. پارامترهایی که مقادیر آنها در مطالعات پیشین برای موضوع مورد مطالعه مشخص شده‌است،
۳. پارامترهایی که اثرشان بر خروجی مطالعه ناچیز است،
۴. پارامترهایی که با داده‌های در دسترس، قابل پرداخت نیستند.

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی ایمنی در سطح خردنگر به‌کمک شاخص‌های تداخل ترافیکی به‌دلیل تحولات اخیر در بهبود مدل‌های رفتاری رانندگان و دستیابی به داده‌های وسایل نقلیه به‌صورت لحظه‌ای، توجهات زیادی به خود جلب کرده‌است. سابقه طولانی‌تر کشورهای توسعه‌یافته در استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی سبب شده تا ساخت، توسعه، پرداخت و کاربرد اغلب مدل‌های شبیه‌سازی ایمنی مربوط به جریان‌های ترافیکی همگن خط‌مبنا^{۱۵} در این کشورها باشد که در مقایسه با کشورهای درحال توسعه، از زیرساخت‌های پیشرفته‌تر و نظم بیشتری برخوردار هستند (Young, Sobhani, Lenné, & Sarvi, 2014). از سویی دیگر، مشکلات ایمنی ترافیکی در کشورهای درحال توسعه (World Health Organization, 2018) نیز سبب شده تا ساخت مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر برای جریان‌های ترافیکی ناهمگن غیرخط‌مبنا^{۱۶} به یکی از محورهای تحقیقاتی در مطالعات تبدیل گردد. خصوصیات رفتاری متفاوت جریان‌های ترافیکی ناهمگن غیرخط‌مبنا، به‌عنوان مثال حرکات

و رانندگی از جمله شاخص‌های هدف متداول در فرایند پرداخت و اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی است که غالباً به شیوه میدانی (استفاده از ناظر میدانی و فیلم‌برداری) از محدوده مورد مطالعه برداشت شده‌است (Mahmud et al., 2019). در برخی از مطالعات، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط اسا و سید (Essa & Sayed, 2015) از تجزیه و تحلیل خودکار با استفاده از فناوری‌های مرتبط با الگوریتم‌های ره‌گیری اشیاء^{۲۳} و بینایی رایانه‌ای^{۲۴} استفاده شده‌است. نتایج این روش برخلاف روش برداشت میدانی، تکرارپذیر بوده و از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار است (Essa & Sayed, 2015). در برخی دیگر از مطالعات نیز، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط داویس و همکاران (Davis, Hourdos, Xiong, & Chatterjee, 2011) از مجموعه داده‌های حقیقی وسایل نقلیه^{۲۵} که حاوی اطلاعات دقیق‌تری از نحوه رفتارهای رانندگی هست؛ استفاده شده‌است. هزینه، پیچیدگی زیاد و همچنین تعداد افراد مشارکت‌کننده کم از جمله مشکلات اصلی این داده‌ها عنوان شده‌است (Mahmud et al., 2019). داده‌های ثبت‌شده تصادفات، متداول‌ترین مجموعه داده استفاده‌شده در فرایند پرداخت و اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی است (Mahmud et al., 2019). در برخی از مطالعات، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط سبحانی و همکاران (Sobhani, Young, & Sarvi, 2013) از مجموعه داده‌های دقیق تصادفات^{۲۶} در توسعه چارچوبی برای تحلیل وضعیت ایمنی تسهیلات ترافیکی استفاده شده‌است. علی‌رغم برخی مزیت‌هایی که داده‌های ثبت‌شده تصادفات دارند؛ این داده‌ها با محدودیت‌های قابل‌توجهی، به‌خصوص در کشورهای درحال‌توسعه، مواجه هستند (Imprialou & Quddus, 2019). هدف از پرداخت مدل‌های شبیه‌سازی یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مدل به‌نحوی است که اختلاف خروجی مدل شبیه‌سازی با مشاهدات کمینه گردد. در فرایند اعتبارسنجی نیز، نتایج مدل شبیه‌سازی در شرایط مختلف با مقادیر بهینه پارامترها برای یک مجموعه داده مستقل ارزیابی می‌شود (Barcelo, 2010). در مطالعات متعددی، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط گو و همکاران (Goh et al.,

را در دو حالت نسبت حجم به ظرفیت (V/C) ثابت و همچنین نرخ جریان ورودی ثابت با یکدیگر مقایسه کردند (Giuffrè, Trubia, Canale, & Persaud, 2017). کافیسو و همکاران نیز با مدل‌سازی رابطه بین تعداد تداخلات شبیه‌سازی‌شده از نوع عقب به جلو و تغییر خط با تعداد تصادفات از نوع عقب به جلو و پهلو به پهلو، اثر طول ناحیه سبقت‌گیری و همگرایی را بر ایمنی ترافیک راه‌های برون‌شهری دو خطه دو طرفه بررسی کردند (Cafiso, D'Agostino, Kieć, & Bak, 2018). گو و همکاران نیز اثر ساخت راه حاشیه‌ای اختصاصی برای توقف اتوبوس بر ایمنی راه را به کمک شاخص‌های تداخل ترافیکی شبیه‌سازی شده بررسی کردند (Goh, Currie, Sarvi, & Logan, 2013). استفاده از نرم‌افزار پس‌پردازنده تحلیل تداخلات (SSAM)^{۲۱} سازمان مدیریت بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA)^{۲۲} که در مطالعات پیشین نتایج آن ارزیابی و اعتبارسنجی شده‌است (Gettman, Pu, Sayed, & Shelby, 2008) یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تحلیل تداخلات در مطالعات شبیه‌سازی خردنگر ایمنی است (Mahmud et al., 2019). سازگاری نرم‌افزار SSAM با خروجی خط‌سیر خودروها در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی VISSIM، PARAMICS و AIMSUN نیز سبب‌شده تا استفاده از این نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در مطالعات رایج‌تر باشد. مطالعات متعددی، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط گتمان و هد (Gettman & Head, 2001)، پیرامون مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خردنگر از منظر قابلیت‌های آن‌ها انجام شده‌است. برخی از مطالعات نیز، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط گتمان و همکاران (Gettman et al., 2008) نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خردنگر را از منظر توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی تداخلات ترافیکی بررسی کردند که از این نظر اختلاف قابل توجهی بین نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ترافیکی در حوزه مطالعات ایمنی وجود ندارد. محدودیت در اعمال تغییرات در مدل‌ها، تجاری بودن نرم‌افزارها و همچنین در نظر نگرفتن اثر شیب راه بر روی تعاملات بین وسایل نقلیه از جمله ایرادات مشترک نرم‌افزارهای مرسوم شبیه‌سازی خردنگر ایمنی در مطالعات است.

نرخ جریان ترافیک، ترکیب وسایل نقلیه، سرعت، هندسه مسیر، خصوصیات رفتاری رانندگان (زمان عکس‌العمل، نحوه شتاب‌گیری و غیره)، طول صف و زمان‌بندی چراغ راهنمایی

وسایل نقلیه کاربردی نیستند (Mahmud et al., 2017). علاوه بر این، هیچ شواهد روشنی برای استفاده از شاخص‌های تداخل ترافیکی با مقدار آستانه معین در تسهیلات ترافیکی به‌منظور تحلیل وضعیت ایمنی وجود ندارد (Mahmud et al., 2019).

۳- محدوده مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از پایگاه داده تصادفات استان خراسان رضوی، موقعیت تردد شمارهای مکانیزه برون‌شهری و همچنین اطلاعات ترافیکی تجمع‌شده در دامنه‌های ۵ تا ۱۵ دقیقه‌ای برای بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳/۰۳/۰۱ تا ۱۳۹۶/۰۱/۰۱ استفاده شده‌است. تاریخ، زمان و موقعیت مختصاتی تصادفات از مهم‌ترین عناوین ستون‌های موجود در پایگاه داده تصادفات استان خراسان رضوی است که از آن در هماهنگ‌سازی پایگاه‌های اطلاعاتی با یکدیگر استفاده شده‌است. زمان شروع و پایان شمارش، تعداد خودروهای شمارش‌شده در هر کلاس، متوسط سرعت وسایل نقلیه، متوسط سرفاصله زمانی وسایل نقلیه، تعداد تخلفات سرعت مجاز و همچنین تعداد تخلفات سرفاصله زمانی (کمتر از ۲ ثانیه) نیز از مهم‌ترین عناوین ستون‌های موجود در پایگاه اطلاعات ترافیکی ترددشمارهای مکانیزه برون‌شهری در استان خراسان رضوی است. با تخصیص تصادفات به نزدیک‌ترین ترددشمار تا شعاع ۱۵۰۰ متری، پایگاه داده تصادفات استان خراسان رضوی با پایگاه داده ترددشمارهای مکانیزه برون‌شهری هماهنگ‌سازی^{۳۴} شد. سپس به‌جهت اطمینان از وجود جریان ترافیکی غیرمنقطع^{۳۵} در ناحیه مورد مطالعه، از میان ترددشمارهایی با تعداد تصادفات بیشتر که در شعاع ۳ کیلومتری نواحی مسکونی، شهرک‌های صنعتی و ورودی-خروجی‌های پرتراфик قرار نداشتند؛ ۴ ترددشمار واقع در مسیرهای رفت و برگشت محور مواصلاتی مشهد-سبزوار-تهران با مجموعاً ۲۳ تصادف رخ داده در آن، به‌عنوان نمونه‌های موردی پژوهش انتخاب شدند. با استخراج اطلاعات جریان ترافیکی از ترددشمارهای تخصیص‌یافته به تصادفات بر اساس زمان وقوع آن در محورهای منتخب، داده‌های لازم برای پرداخت و

(El-Tantawy, Djavadian, و همکاران (Roorda, & Abdulhai, 2009) و همچنین پیردوانی و همکاران (Pirdavani, Brijs, Bellemans, & Wets, 2010) از انتقال پذیری در زمان به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی استفاده شده‌است. علی‌رغم سابقه طولانی‌تر پرداخت تک مرحله‌ای پارامترها در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی، استفاده از پرداخت چند مرحله‌ای پارامترها در مطالعات جدیدتر، نظیر مطالعه انجام‌شده توسط اسا و سید (Essa & Sayed, 2020) مرسوم‌تر است. پرداخت چند مرحله‌ای پارامترهای مدل شبیه‌سازی خردنگر ایمنی سبب افزایش دقت مدل شبیه‌سازی در بازسازی تداخلات بحرانی می‌شود (Essa & Sayed, 2015). پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر ایمنی نیز به روش‌های مختلفی نظیر بهینه‌سازی چندگانه پارامترها، به‌عنوان مثال مطالعه انجام‌شده توسط یانگ (Yang, 2012) و همچنین تحلیل حساسیت، به‌عنوان مثال مطالعه انجام‌شده توسط ماک و سیکینگ (Mak & Sicking, 2003) و اسا و سید (Essa & Sayed, 2015) شناسایی شده‌است. بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی شاخص‌های تداخل ترافیکی، تداخلات از نوع عقب به جلو خودرو-خودرو را بررسی کرده‌اند. شاخص زمان مانده تا برخورد (TTC)^{۳۶} نیز، متداول‌ترین شاخص تداخل ترافیکی استفاده‌شده در مطالعات پیشین است (Mahmud et al., 2019). این شاخص با ثابت فرض کردن سرعت، بسیاری از تداخلات احتمالی وسایل نقلیه را به‌دلیل اختلاف در شتاب و یا کاهش سرعت نادیده می‌گیرد (Mahmud, Ferreira, Hoque, & Tavassoli, 2017). فراوانی بیشتر مطالعات انجام‌شده بر روی تقاطعات نیز سبب‌شده تا شاخص زمان پس از عبور (PET)^{۳۸} دومین شاخص پر استفاده در مطالعات باشد. سرفاصله زمانی و مکانی (H)^{۳۹}، حداکثر شتاب کاهشی برای جلوگیری از تصادف (DRAC)^{۴۰}، شاخص پتانسیل تصادف (CPI)^{۴۱}، تراکم نایمن (UD)^{۴۲} و TIDSS^{۴۳} از دیگر شاخص‌های تداخل ترافیکی استفاده‌شده در مطالعات پیشین است (Mahmud et al., 2019). شاخص‌های تداخل ترافیکی اشاره‌شده، در شناسایی تداخلات ناشی از تغییر خط

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی آماده‌شد.

کمینه، میانگین و بیشینه تعداد تردد، ۱۲۰ دقیقه پیش از وقوع تصادفات در محورهای منتخب به ترتیب ۳۰۹، ۱۳۷۷ و ۳۰۹۶ تردد است که از ۳۰ دقیقه ابتدایی به منظور پیش‌آماده‌سازی^{۳۶} مدل شبیه‌سازی و از ۹۰ دقیقه انتهایی به منظور پرداخت و اعتبارسنجی استفاده شده‌است. همچنین به منظور یکسان‌سازی شیوه جمع‌آوری اطلاعات ترافیکی در نمونه تصادفات موردی از محورهای منتخب، از بازه‌های زمانی ۵ و ۱۵ دقیقه‌ای برحسب میزان تردد استفاده شده‌است. نمونه تصادفات موردی با ۶۰۰ تردد و کمتر در بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای و بقیه موارد در بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای جمع‌شد. موقعیت تردد شمارهای منتخب را بر روی نقشه نمایش می‌دهد. دایره رسم‌شده بر روی آن نیز که شعاعی معادل ۱۰ کیلومتر بر روی زمین دارد، ناحیه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مشخصات فنی خودروهای معادل در جریان ترافیکی نااهنگ نیز با استناد به اطلاعات ارائه‌شده توسط شرکت‌های سازنده و با در نظر گرفتن نحوه طبقه‌بندی آن‌ها مطابق با توضیحات سازمان راهداری، محاسبه و در مدل شبیه‌سازی استفاده شده‌است.

مدل‌های رفتاری آن، با توجه به تأثیرگذار بودن تغییرات شیب راه بر روی سرعت و عملکرد وسایل نقلیه به خصوص در جریان‌های ترافیکی ناهمگون، قابلیت‌های لازم را برای در نظر اثر شیب راه بر روی تعاملات بین وسایل نقلیه داشته‌باشد. علاوه بر این، اکثر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیکی استفاده‌شده در مطالعات پیشین از نوع تجاری بوده و با محدودیت در اعمال تغییرات مواجه هستند. به همین دلیل در این مطالعه از نرم‌افزار متن‌باز SUMO استفاده شده‌است که علاوه بر توسعه‌پذیری آسان، اثر تغییرات شیب راه نیز در مدل پیروی خودرو آن لحاظ شده‌است. توسعه نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر SUMO از سال ۲۰۰۰ و با هدف ارائه مجموعه‌ای متن‌باز به جامعه علمی، به منظور پیاده‌سازی و ارزیابی مدل‌های مختلف، آغاز شده‌است (Lopez et al., 2018). این نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر حاوی مدل‌های رفتاری متنوعی است که در ادامه درباره مدل‌های استفاده‌شده در این مطالعه، به اختصار توضیحاتی ارائه شده‌است. نیز فهرستی از پارامترهای قابل تنظیم مدل پیروی خودرو KraussPS در نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر SUMO آورده شده‌است.

مدل تغییر خط پیش‌فرض نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر SUMO که با نام اختصاری LC2013 نیز شناخته می‌شود، جزء مدل‌های کلاسیک قاعده‌مبنای^{۳۸} است که توسط Erdmann (2015) توسعه یافته‌است. این مدل در ساختار سلسله‌مراتبی خود، تغییر خط با هدف ورود به ناحیه گردش (تغییر خط راهبردی^{۳۹})، کمک به دیگر خودروها (تغییر خط مشارکتی^{۴۰})، سبقت‌گیری از وسیله نقلیه کندرو (تغییر خط راهکنشی^{۴۱}) و حفظ حرکت از سمت راست مسیر (تغییر خط مقرراتی^{۴۲}) را در نظر می‌گیرد (Erdmann, 2015). روابط و جزئیات بیشتر از نحوه مدل کردن رفتار تغییر خط رانندگان، در راهنمای کاربری نرم‌افزار آمده‌است. در جدول ۲ نیز فهرستی از پارامترهای قابل تنظیم مدل تغییر خط LC2013 در نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر SUMO آورده شده‌است.

۴- مدل شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی موضوعات مرتبط با مدل شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

۴-۱- انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی مناسب و

بررسی مدل‌های رفتاری آن

سرعت و واریانس سرعت یکی از پارامترهای مهم ترافیکی است که تأثیر مستقیمی بر روی شاخص‌های جایگزین ارزیابی ایمنی و پیامد تصادفات دارد (Archer, 2005). در انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی ترافیکی خردنگر دقت شد تا

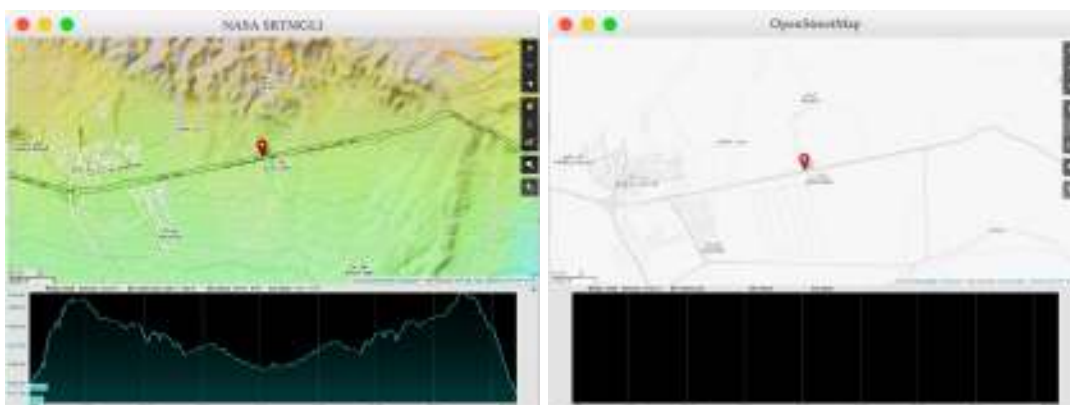


شکل ۱. موقعیت تردد شمارهای منتخب بر روی نقشه

جدول ۱. پارامترهای قابل تنظیم مدل پیروی خودرو KraussPS

| عنوان | توضیح | پیش فرض | دامنه |
|----------------|--|---------|--------------|
| speedFactor | میانگین توزیع نرمال ضریب سرعت مجاز راه | ۱/۰ | ≥ 0 |
| speedDev | انحراف معیار استاندارد ضریب سرعت مجاز راه | *۰/۱ | ≥ 0 |
| minGap | حداقل فاصله بین خودروهای متوالی در حالت سکون (m) | *۲/۵ | ≥ 0 |
| accel | حداکثر شتاب افزایشی خودرو (m/s^2) | *۲/۶ | ≥ 0 |
| decel | حداکثر شتاب کاهشی خودرو (m/s^2) | *۴/۵ | ≥ 0 |
| emergencyDecel | حداکثر شتاب کاهشی خودرو در شرایط اضطراری (m/s^2) | *۹/۰ | $\geq decel$ |
| sigma | شاخصی از خطای عملکردی رانندگان | ۰/۵ | [۰-۱] |
| tau | زمان عکس العمل راننده (s) | ۱/۰ | ≥ 0 |

* مقادیر پیش فرض برای وسایل نقلیه هر کلاس، متفاوت است.



ب) پس از اضافه کردن اطلاعات ارتفاعی

الف) پیش از اضافه کردن اطلاعات ارتفاعی

شکل ۲. شماتیک نقشه OpenStreetMap

جدول ۲. پارامترهای قابل تنظیم مدل تغییر خط LC2013

| عنوان | توضیح | پیش فرض | دامنه |
|------------------|--|---------|-------|
| lcStrategic | شاخصی از تمایل رانندگان به تغییر خط راهبردی | ۱/۰ | >= ۰ |
| lcCooperative | شاخصی از تمایل رانندگان به تغییر خط تعاونی | ۱/۰ | [۰-۱] |
| lcSpeedGain | شاخصی از تمایل رانندگان به تغییر خط با هدف کسب سرعت بیشتر | ۱/۰ | >= ۰ |
| lcKeepRight | شاخصی از تمایل رانندگان برای حرکت از سمت راست مسیر | ۱/۰ | >= ۰ |
| lcOvertakeRight | احتمال نقض قانون در سبقت‌گیری از سمت راست مسیر | ۰/۰ | [۰-۱] |
| lcOpposite | شاخصی از تمایل رانندگان برای سبقت‌گیری از سمت مقابل مسیر در راه‌های جدانشده | ۱/۰ | >= ۰ |
| lcLookaheadLeft | ضریبی برای تنظیم فاصله دید در مواقعی که لازم است از سمت چپ مسیر سبقت صورت بپذیرد | ۲/۰ | >= ۰ |
| lcSpeedGainRight | ضریبی برای تنظیم تقارن یا عدم تقارن انتخاب سمت راست یا چپ مسیر با هدف کسب سرعت | ۰/۱ | >= ۰ |
| lcAssertive | تمایل رانندگان به پذیرش فواصل کمتر یا بیشتر در خط هدف | ۱/۰ | >= ۰ |
| lcSigma | شاخصی از خطای عملکردی رانندگان در حفظ مسیر عرضی خودرو | ۰/۰ | [۰-۱] |

نامرتب از آن حذف گردید. سپس به جهت افزایش پوشش اطلاعات ارتفاعی در نقشه، گره‌های مجازی به‌نحوی که کمان‌های نقشه افزوده شد که در آن حداکثر طول هر قطعه از ۵۰ متر بیشتر نگردد. در ادامه به کمک برنامه اختصاصی نوشته‌شده به زبان برنامه‌نویسی پایتون، اطلاعات ارتفاعی از پروژه مأموریت عارضه‌نگاری رادار شاتل (SRTM)^{۴۳} قرائت و به گره‌های نقشه اضافه گردید. مأموریت عارضه‌نگاری رادار شاتل (SRTM)، کامل‌ترین و دقیق‌ترین پروژه جهانی برای تعیین مدل رقوع ارتفاعی زمین^{۴۴} است که با تلاش مشترک ناسا (NASA)^{۴۵}، آژانس ملی اطلاعات مکانی آمریکا (NGA)^{۴۶} و همچنین سازمان هوا و فضای کشورهای آلمان (DLR)^{۴۷} و ایتالیا (ASI)^{۴۸} انجام شده است (Farr et al., 2007). شکل ۲ شماتیک نقشه اوپن‌استریت‌مپ را پیش و پس از اضافه کردن اطلاعات ارتفاعی نشان می‌دهد.

پس از اصلاح نقشه ناحیه مورد مطالعه، با تعریف وصله فابل مناسب ویژه تعیین حداکثر سرعت مجاز مسیر، نقشه مذکور به کمک ابزار جانبی NETCONVERT به شبکه قابل‌استفاده در نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی خردنگر SUMO تبدیل شد. سپس به جهت اطمینان از کارکرد صحیح مدل

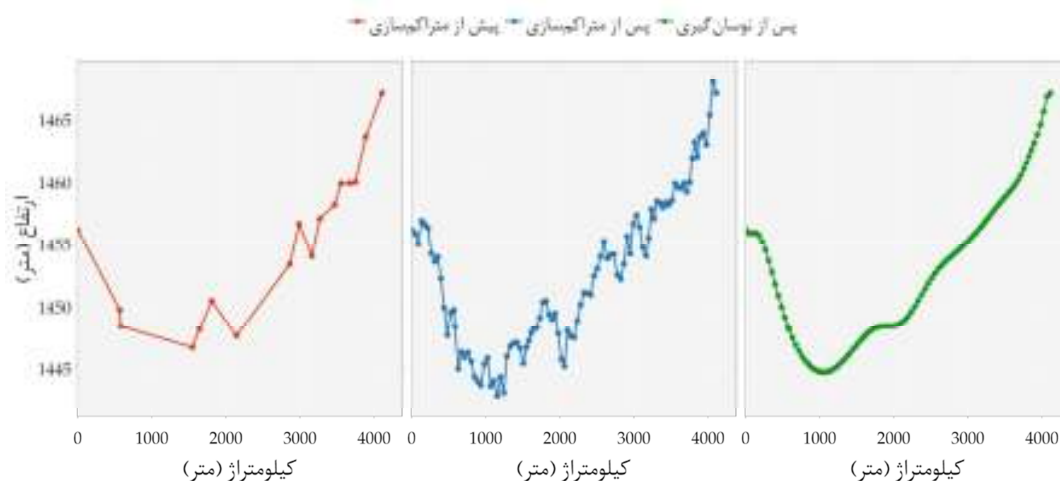
مدل قبول فرصت در شبیه‌سازی، غالباً زمانی معنا پیدا می‌کند که حداقل دو جریان ترافیکی در یک نقطه مشترک که به وسیله چراغ‌های راهنمایی و رانندگی کنترل نشده‌اند، با یکدیگر تلاقی پیدا کنند. با توجه به اینکه نمونه‌های موردی این پژوهش در بزرگراه‌های برون‌شهری با جریان‌های ترافیکی غیرمنقطع در ناحیه مورد مطالعه واقع شده‌اند، بنابراین استفاده از مدل قبول فرصت در اینجا موضوعیت ندارد؛ لذا از آوردن توضیحات تکمیلی پیرامون آن اجتناب می‌شود.

۴-۲- ساخت مدل شبیه‌سازی از محورهای منتخب

OpenStreetMap پروژه‌ای مشترک برای ایجاد نقشه قابل ویرایش و رایگان از جهان است که داده‌های آن داوطلبانه توسط کاربران به‌روزرسانی می‌شود. یکی از روش‌های ساخت مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار SUMO نیز، استفاده از شبکه‌های تعریف‌شده خارجی نظیر نقشه جهانی OpenStreetMap است. به‌همین منظور نقشه محدوده مورد مطالعه که با دایره‌ای به شعاع ۱۰ کیلومتر نشان داده شده‌است؛ از پایگاه اطلاعاتی این پروژه دریافت و اطلاعات

کنترل‌های لازم که شامل بررسی راهنمای کاربری نرم‌افزار، بازبینی مقادیر پیش‌فرض و مقادیر ورودی مدل و همچنین بررسی بصری نحوه کارکرد مدل از طریق خروجی‌های گرافیکی می‌شد، صورت پذیرفت. یکی از اشکالات اساسی که در این مرحله نمایان شد؛ افزایش و کاهش ناگهانی شتاب خودروهای شبیه‌سازی شده بود. اشکال مذکور به خاطر وجود کمان‌هایی با شیب غیریکنواخت و نوسانی در طول مسیر حرکت بوده‌است که ناشی از خطای تصادفی و نظام‌مند^۹ در پایگاه اطلاعات ارتفاعی پروژه مأموریت عارضه‌نگاری رادار شاتل (SRTM) است. به‌منظور کاهش نوسان‌های ناخواسته در تعیین ارتفاع گره‌های نقشه

کنترل‌های لازم که شامل بررسی راهنمای کاربری نرم‌افزار، بازبینی مقادیر پیش‌فرض و مقادیر ورودی مدل و همچنین بررسی بصری نحوه کارکرد مدل از طریق خروجی‌های گرافیکی می‌شد، صورت پذیرفت. یکی از اشکالات اساسی که در این مرحله نمایان شد؛ افزایش و کاهش ناگهانی شتاب خودروهای شبیه‌سازی شده بود. اشکال مذکور به خاطر وجود کمان‌هایی با شیب غیریکنواخت و نوسانی در طول مسیر حرکت بوده‌است که ناشی از خطای تصادفی و نظام‌مند^۹ در پایگاه اطلاعات ارتفاعی پروژه مأموریت عارضه‌نگاری رادار شاتل (SRTM) است. به‌منظور کاهش نوسان‌های ناخواسته در تعیین ارتفاع گره‌های نقشه



شکل ۳. نمودار مکان-ارتفاع برای قطعه‌ای از محور مورد مطالعه

۴-۳- انتخاب شاخص‌های هدف

زمانی در مطالعات شبیه‌سازی برای محورهای بزرگراهی برون‌شهری دارد. در این مطالعه علاوه بر پارامترهای فوق از بین داده‌های جمع‌آوری شده توسط ترددشمارهای مکانیزه برون‌شهری، تعداد تخلفات سرعت و همچنین تعداد تخلفات سرفاصله زمانی نیز به‌عنوان شاخص‌های هدف انتخاب شده‌اند.

شاخص‌های هدف، مجموعه‌ای از شاخص‌های برداشت‌شده از واقعیت هستند که از آن به‌عنوان معیاری برای حداقل کردن اختلاف مشاهدات با خروجی مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود. سادگی جمع‌آوری، حساسیت به شرایط ترافیکی، سازگاری با نحوه محاسبه در نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی و منطقی بودن آن از جمله معیارهایی است که در انتخاب شاخص‌های هدف، مهم و لازم عنوان شده‌است (خشایی‌پور et al, ۱۳۹۲). بررسی مطالعات گذشته نظیر مطالعه انجام‌شده توسط خشایی‌پور و همکاران (خشایی‌پور et al, ۱۳۹۲) و همچنین وندرلیچ و همکاران (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019)، نشان از مناسب بودن شاخص‌های هدف پرداخت متوسط سرعت و سرفاصله

۴-۴- انتخاب شاخص‌های نکویی برازش

شاخص‌های نکویی برازش، روش‌های ریاضی هستند که از آن برای تعیین اختلاف بین مشاهدات میدانی با نتایج مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود. تعیین اختلاف قابل قبول در این روش، قاعده مشخصی ندارد و برای هر مطالعه‌ای می‌تواند متفاوت از دیگری باشد (خشای پور et al., ۱۳۹۲). فهرستی از شاخص‌های نکویی که در این مطالعه برای پرداخت و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی از آن استفاده شده‌است، در جدول ۳ آمده‌است. آزمون‌های آماری کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ که در جدول ۳ به آن اشاره شده‌است؛ جزء آزمون آماری غیرپارامتری هستند که برای تعیین یکسان بودن توزیع تجربی دو یا چند مجموعه اعداد تصادفی مستقل به کار می‌روند. در قیاس با آزمون‌های آماری

پارامتری، این آزمون‌ها هیچ توزیع مشخصی را به‌عنوان توزیع جامعه در محاسبه شاخص آماری فرض نمی‌کنند. چنانچه شاخص آماری آزمون‌ها از مقدار بحرانی آن در سطح معنی‌داری α بیشتر گردد؛ فرض صفر آن‌ها که نشان‌دهنده یکسان بودن توزیع تجربی دو یا چند مجموعه اعداد تصادفی با یکدیگر است، در سطح معنی‌داری α رد می‌شود. همچنین مطالعات گذشته نشان می‌دهد که آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف در توزیع‌های یکنواخت (بدون دم ابتدایی و انتهایی) و آزمون آماری اندرسون-دارلینگ در توزیع‌های غیر یکنواخت (با دم ابتدایی و انتهایی) بهتر عمل می‌کند (Mohd Razali & Bee Wah, 2011).

جدول ۳. شاخص‌های نکویی برازش

| ش. | عنوان | رابطه | توضیحات |
|----|---|--|--|
| ۱ | جذر میانگین مربع خطاها ^۱ | $\sqrt{\frac{\sum_i (X_i - Y_i)^2}{n}}$ | |
| ۲ | قدر مطلق اختلاف کمینه‌ها | $ \min(X_i) - \min(Y_i) $ | $X_i =$ خروجی مدل شبیه‌سازی $Y_i =$ مشاهده |
| ۳ | قدر مطلق اختلاف بیشینه‌ها | $ \max(X_i) - \max(Y_i) $ | $n =$ تعداد مشاهدات |
| ۴ | قدر مطلق اختلاف میانگین‌ها | $ \text{mean}(X_i) - \text{mean}(Y_i) $ | |
| ۵ | قدر مطلق اختلاف انحراف معیارها | $ \text{std}(X_i) - \text{std}(Y_i) $ | |
| ۶ | آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف ^۲ | $\max_x F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x) $ | $F_{1,n}(x), F_{2,m}(x) =$ به ترتیب توزیع تجمعی تجربی اول (خروجی مدل شبیه‌سازی) و توزیع تجمعی تجربی دوم (نتیجه اندازه‌گیری میدانی) $n, m =$ به ترتیب تعداد اعداد تصادفی در مجموعه اول و دوم، است. |
| ۷ | آزمون آماری اندرسون-دارلینگ ^۳ | به مطالعه شولز و استفان رجوع شود (Scholz & Stephens, 1987) | |

^۱ Root Mean Square Error (RMSE)

^۲ Kolmogorov-Smirnov 2-sample statistic test

^۳ Anderson-Darling k-sample statistic test

با توجه به ناسازگاری ابعادی شاخص‌های نکویی برازش اشاره‌شده در جدول ۳، در این مطالعه از تابع تبدیل رابطه برای بی‌بعدسازی آن‌ها استفاده شده‌است. در این تابع تبدیل کمترین مقدار شاخص نکویی برازش رتبه‌ای با ارزش ۱ به خود اختصاص خواهد داد و بقیه مقادیر به نسب فاصله خود از کمترین مقدار، مقیاس خواهند شد. بدین ترتیب بیشینه شدن مجموع تمام شاخص‌های نکویی برازش تبدیل‌شده (تابع هدف مسئله)، باعث کمینه‌شدن مقدار واقعی آن‌ها که نشان از مطلوبیت دارد؛ می‌شود.

۴-۵- تعیین تعداد تکرارهای لازم

دلیل، یکبار اجرای مدل شبیه‌سازی برای پرداخت مدل شبیه‌سازی و یا ارزیابی طرح‌های جایگزین کافی نیست. برای تعیین حداقل تعداد تکرارهای لازم، پیشنهاد شده‌است

خروجی مدل‌های شبیه‌سازی وابسته به هسته عدد تصادفی است که از آن در تولید زنجیره اعداد تصادفی، برای مدل‌سازی تنوع رفتاری رانندگان، استفاده می‌شود. به همین

(Wunderlich et al., 2019)

$$N_{min} = \left(\frac{t_{n-1, \alpha/2} \times S}{\bar{X} \times \varepsilon} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن:

N_{min} = حداقل تعداد تکرارهای لازم مدل شبیه‌سازی،

n = تعداد تکرارهای اولیه مدل شبیه‌سازی،

\bar{X}, S = به ترتیب میانگین و انحراف معیار شاخص در تعداد تکرارهای اولیه مدل شبیه‌سازی

$t_{n-1, \alpha/2}$ = مقدار بحرانی توزیع t با $n-1$ درجه آزادی در سطح معنی‌داری α و

ε = خطای قابل‌پذیرش، است.

(al., 2019) در این مطالعه از ۱۲۵ تکرار به‌عنوان معیار استفاده شده‌است که نتایج مربوط به نحوه انتخاب حداقل تعداد تکرارهای لازم در جدول ۴ آورده شده‌است.

بررسی مطالعات مرتبط با مهندسی حمل‌ونقل در زمینه شبیه‌سازی، نشان از قابل قبول بودن بازه اطمینان ۹۵ درصد و حداقل خطای قابل‌پذیرش ۵ درصد دارد (Wunderlich et

جدول ۴. حداقل تعداد تکرارهای لازم (N_{min})

| شاخص‌های هدف پرداخت | n | ۲۵ | ۷۵ | ۱۲۵ |
|------------------------------|---------------|------|------|------|
| | α | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| | ε | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| متوسط سرفاصله زمانی (ثانیه) | | ۲۳ | ۲۲ | ۲۱ |
| متوسط سرعت (کیلومتر بر ساعت) | | ۱ | ۱ | ۱ |
| تعداد تخلفات سرعت | | ۱۱۰ | ۱۰۹ | ۱۰۵ |
| تعداد تخلفات سرفاصله زمانی | | ۱۰۶ | ۱۱۰ | ۱۰۵ |

۴-۶- انتخاب پارامترهای مؤثر

(به‌عنوان مثال ۵ دقیقه) تخمین زده شده‌بود، تکرار شد و در نهایت نمودار تغییرات پارامترها در مقابل شاخص‌های نکویی برازش ترسیم شد. شکل ۴ (الف) و شکل ۴ (ب) به ترتیب نمودار تغییرات پارامتر پرداخت speedFactor را در مقابل شاخص نکویی برازش جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) برای شاخص‌های هدف متوسط سرفاصله زمانی و سرعت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ (الف) نیز مشاهده می‌شود؛ بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی توزیع نمایی با تخمین جزئی است که کمترین خطا را در بین همه توزیع‌ها دارد. علاوه بر آن، همانطور که روند تغییرات نیز نشان می‌دهد، تغییر پارامتر پرداخت speedFactor تأثیر چندانی بر روی شاخص هدف متوسط سرفاصله زمانی ندارد. از سویی دیگر مطابق با شکل ۴ (ب)، نوع توزیع در تولید جریان ترافیکی بر روی شاخص هدف متوسط سرعت تأثیر ندارد؛ اما تغییرات پارامتر پرداخت speedFactor بر روی خطای مدل شبیه‌سازی قابل توجه است. شناسایی بهترین توزیع از میان توزیع‌های در نظر گرفته‌شده

در این مطالعه به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی، نخست پارامترهای مدل پیروی خودرو و تغییر خط نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی خردنگر SUMO که جزئیات آن به‌ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده‌است؛ در گام‌های منطقی حول مقدار پیش‌فرض برنامه گسسته‌سازی شد. سپس با تغییر پارامترها بدون در نظر گرفتن اثر تغییر توأم آن‌ها با یکدیگر، به‌جهت کاهش تعداد سناریوها، مدل شبیه‌سازی بر روی تعداد محدودی از نمونه تصادفات موردی در محورهای منتخب از استان خراسان رضوی که نماینده محور و تعداد تردد نیز بودند، اجرا شد. با توجه به جمع‌شدن اطلاعات ترافیکی در دامنه‌های زمانی ۵ تا ۱۵ دقیقه‌ای در پایگاه اطلاعات ترافیکی ترددشمارهای برون‌شهری استان خراسان رضوی، توزیع زمان دقیق ورود خودروها به شبکه در دسترس نبود. به همین دلیل، کل فرایند اجرای مدل شبیه‌سازی برای شناسایی پارامترهای مؤثر، برای دو توزیع یکنواخت و نمایی که پارامترهای توزیع هرکدام به دو روش کلی (به‌عنوان مثال ۱۲۰ دقیقه) و جزئی

در تولید جریان ترافیکی و همچنین شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی از موضوعات اصلی در تحلیل ۴۲۰ نمودار تهیه شده (۱۵ پارامتر پرداخت \times ۷ شاخص نکویی برازش \times ۴ شاخص هدف) است. در این مطالعه به منظور تسهیل مقایسه تطبیقی نتایج در شناخت بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی، از رابطه ۲ در رتبه‌دهی و کمی‌سازی اطلاعات نمودارها استفاده شده است.

$$DR_{kl} = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m 1 - \frac{\bar{x}_{ijkl} - \min(\bar{x}_{ijk})}{|\min(\bar{x}_{ijk})|} \quad (2)$$

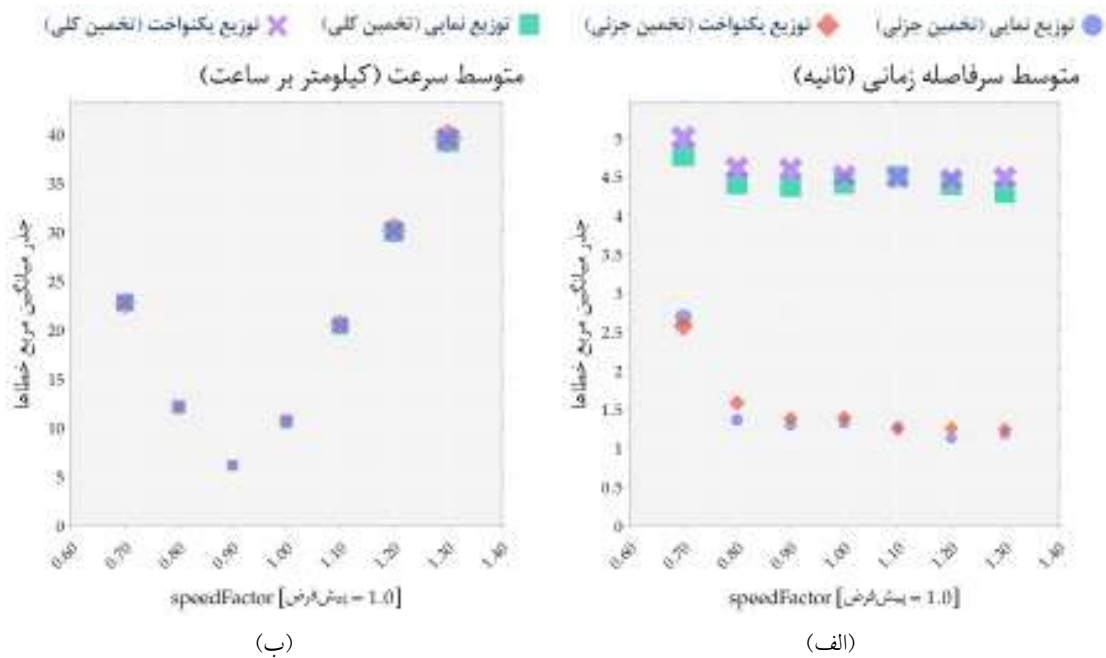
که در آن:

DR_{kl} = متوسط شاخص رتبه در شناسایی بهترین توزیع برای شاخص هدف k ام در توزیع l ام تولید جریان ترافیکی $[-inf, 1]$ ،

\bar{x}_{ijkl} = متوسط شاخص نکویی برازش l ام در پارامتر پرداخت k ام برای شاخص هدف k ام در توزیع l ام تولید جریان ترافیکی،

$\min(\bar{x}_{ijk})$ = حداقل متوسط شاخص نکویی برازش l ام در پارامتر پرداخت k ام برای شاخص هدف k ام در همه توزیع‌ها و

n, m = به ترتیب تعداد شاخص‌های نکویی برازش و تعداد پارامترهای پرداخت، است.



شکل ۴. نمودار تغییرات پارامتر پرداخت speedFactor در مقابل شاخص نکویی برازش جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) برای شاخص‌های هدف الف) متوسط سرفاصله زمانی (ثانیه) ب) متوسط سرعت (کیلومتر بر ساعت)

به ترتیب کمترین متوسط شاخص نکویی برازش در پارامترهای پرداخت (بهترین نتیجه) را داشته‌اند. به همین دلیل، در این مطالعه از توزیع نمایی در تولید جریان ترافیکی در مدل شبیه‌سازی استفاده شده‌است. با مشخص شدن بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی و با توجه به اینکه مؤثرترین پارامتر پرداخت ضریب تغییرات بیشتری دارد؛ از رابطه (۳) برای شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی استفاده شده‌است.

مطابق با رابطه ۳ بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی برای هر شاخص هدف (کمترین متوسط شاخص نکویی برازش در پارامترهای پرداخت)، رتبه‌ای با ارزش ۱ به خود اختصاص خواهد داد و دیگر توزیع‌ها نیز به نسبت فاصله خود از بهترین توزیع، امتیازدهی خواهند شد. جدول ۵ متوسط شاخص رتبه در شناسایی بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی (DR) را برای همه شاخص‌های هدف نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۵، دو توزیع یکنواخت و نمایی که پارامترهای آن‌ها در حالت جزئی تخمین زده شده‌است؛

$$PR_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{std(x_{ijk})}{mean(x_{ijk})} \quad (3)$$

که در آن:

PR_{jk} = متوسط شاخص رتبه در شناسایی پارامترهای مؤثر مدل شبیه‌سازی برای پارامتر پرداخت k ام در شاخص هدف k ام،
 x_{ijk} = مقدار شاخص نکویی برازش k ام در پارامتر پرداخت k ام برای شاخص هدف پرداخت k ام، و
 n = تعداد شاخص‌های نکویی برازش، است.

جدول ۵. متوسط شاخص رتبه در شناسایی بهترین توزیع در تولید جریان ترافیکی (DR)

| توزیع | | | | |
|------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| شاخص هدف پرداخت | یکنواخت (تخمین کلی) | یکنواخت (تخمین جزئی) | نمایی (تخمین کلی) | نمایی (تخمین جزئی) |
| متوسط سرفاصله زمانی (ثانیه) | -۳/۱۶۴ | ۰/۹۳۳ | -۲/۹۸۸ | ۰/۹۱۰ |
| متوسط سرعت (کیلومتر بر ساعت) | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۶۰ | ۰/۹۳۹ | ۰/۹۶۸ |
| تعداد تخلفات سرعت | ۰/۶۵۳ | ۰/۹۸۴ | ۰/۶۶۴ | ۰/۹۹۲ |
| تعداد تخلفات سرفاصله زمانی | ۰/۳۹۱ | ۰/۷۰۴ | ۰/۲۷۷ | ۰/۶۴۴ |
| میانگین (درصد) | -۲۹/۷ | ۸۹/۵ | -۲۷/۷ | ۸۷/۹ |

جدول ۶. متوسط شاخص رتبه در شناسایی پارامترهای مؤثر مدل شبیه‌سازی (PR) در توزیع نمایی (تخمین جزئی)

| شاخص هدف | | | | | |
|----------|----------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| میانگین | تعداد تخلفات سرفاصله زمانی | تعداد تخلفات سرعت | متوسط سرعت (کیلومتر بر ساعت) | متوسط سرفاصله زمانی (ثانیه) | پارامتر پرداخت |
| ۵/۵۳ | ۶/۳۰ | ۱/۹۸ | ۲/۷۵ | ۱۱/۰۸ | accel |
| ۲/۳۵ | ۱/۱۸ | ۲/۴۳ | ۰/۳۸ | ۵/۴۰ | decel |
| ۱/۵۸ | ۰/۵۸ | ۰/۹۰ | ۰/۱۰ | ۴/۷۵ | emergencyDecel |
| ۱۵/۴۰ | ۱۴/۴۳ | ۲۵/۳۸ | ۱۱/۹۰ | ۹/۸۸ | lcAssertive |
| ۱۶/۷۷ | ۱۳/۱۰ | ۳۰/۶۵ | ۱۳/۵۰ | ۹/۸۳ | lcCooperative |

| | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| lcKeepRight | ۱۱/۰۵ | ۱/۵۵ | ۱۲/۸۰ | ۶/۷۸ | ۸/۰۵ |
| lcOvertakeRight | ۵/۵۵ | ۰/۱۸ | ۱/۳۰ | ۰/۸۳ | ۱/۹۷ |
| lcSpeedGain | ۶/۳۸ | ۰/۶۰ | ۵/۴۰ | ۲/۲۳ | ۳/۶۵ |
| lcSpeedGainRight | ۴/۳۵ | ۰/۱۰ | ۱/۵۸ | ۰/۵۳ | ۱/۶۴ |
| lcStrategic | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| minGap | ۵/۰۵ | ۰/۳۳ | ۲/۱۵ | ۱/۰۵ | ۲/۱۵ |
| sigma | ۱۱/۵۰ | ۷/۷۸ | ۴/۰۸ | ۱۷/۱۸ | ۱۰/۱۴ |
| speedDev | ۸۵/۳۵ | ۲۴/۹۰ | ۱۳/۳۰ | ۱۴/۵۸ | ۳۴/۵۳ |
| speedFactor | ۲۶/۷۵ | ۳۹/۶۸ | ۴/۸۳ | ۵۲/۷۸ | ۳۱/۰۱ |
| tau | ۱۵/۹۸ | ۱۲/۰۳ | ۳۹/۸۰ | ۱۴/۷۳ | ۲۰/۶۴ |

توزیع در تولید جریان ترافیکی و همچنین پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی، در این قسمت نتایج مربوط به پرداخت مدل شبیه‌سازی در دو مرحله بر اساس پارامترهای پرداخت کلی^{۵۰} و جزئی^{۵۱} آورده شده‌است. پارامترهای پرداخت کلی به آن دسته از پارامترهای قابل تنظیم مدل‌های شبیه‌سازی گفته می‌شود که علاوه بر تأثیر زیاد بر روی شاخص‌های نکویی برازش، جامع‌تر بوده و لزوماً محدود به ناحیه مورد مطالعه نیست. در مقابل، پارامترهای پرداخت جزئی علاوه بر تأثیر کمتر بر روی شاخص‌های نکویی برازش، خصوصیات رفتاری متناظر با آن نیز وابستگی بیشتری با ناحیه مورد مطالعه دارد (Wunderlich et al., 2019). در فرایند پرداخت از تمام ۲۳ نمونه تصادف موردی به وقوع پیوسته در شعاع ۱۵۰۰ متری ترددشمارهای برون‌شهری محورهای منتخب در استان خراسان رضوی استفاده شده‌است. همچنین در ساخت سناریوهای ممکن از نحوه تنظیم پارامترهای مؤثر، اثر تغییر توأم آن‌ها با یکدیگر نیز در نظر گرفته شده‌است.

۴-۷-۱- مرحله اول

در مرحله اول با تنظیم پارامترهای پرداخت کلی speedFactor و speedDev در سناریوهای مختلف و میانگین‌گیری نتایج حاصل از اجرای مدل شبیه‌سازی در نمونه تصادفات موردی به‌وقوع پیوسته در محورهای منتخب، بهترین سناریو ممکن با بیشینه کردن تابع هدف مسئله که نشان از مطلوبیت دارد؛ به‌ترتیب با مقادیر ۰/۹۵ و ۰/۱۰ انتخاب شد.

جدول ۶ متوسط شاخص رتبه را در شناسایی پارامترهای مؤثر مدل شبیه‌سازی (PR) در توزیع نمایی با تخمین جزئی نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۶، به ترتیب پارامترهای speedDev، speedFactor، tau، lcCooperative، lcAssertive و sigma تأثیر بیشتری بر روی شاخص‌های نکویی برازش دارند. در مراجع مختلف، استفاده از پارامترهایی که به‌طور مستقیم بر روی زمان عکس‌العمل رانندگان و یا نقص عملکردی آن‌ها تأثیر می‌گذارد؛ مورد نكوهش قرار گرفته‌است. در واقع، هرچند تغییر این پارامترها تأثیر فراوانی بر روی نتایج شاخص‌های نکویی برازش دارد؛ اما این تغییر می‌تواند منجر به بروز رفتارهای غیرواقعی در رانندگان شود (Archer, 2005). به همین دلیل، در این مطالعه از انتخاب پارامترهای tau و sigma که به‌طور مستقیم بر روی زمان عکس‌العمل رانندگان و همچنین نقص عملکردی آن‌ها تأثیر می‌گذارد، صرف نظر شده‌است.

۴-۷-۲- پرداخت مدل شبیه‌سازی

فرایند پرداخت نیازمند حل یک مسئله بهینه‌سازی است که به دانش کافی برای انتخاب تابع هدف و روش حل مناسب آن، احتیاج دارد. در مراجع متعدد پیمودن روند تعیین هدف، انتخاب پارامترهای پرداخت، انتخاب شاخص‌های هدف، انتخاب شاخص‌های نکویی برازش و تعیین تعداد تکرارهای لازم توصیه شده‌است که پیشتر در بخش‌های قبلی به آن پرداخته‌شد (Wunderlich et al., 2019). با انتخاب بهترین

۴-۷-۲- مرحله دوم

پس از پرداخت پارامترهای کلی، پارامترهای جزئی *lcCooperative*، *lcAssertive* و *lcKeepRight* نیز به طور مشابه، پرداخت گردید. تفاوت اصلی در فرایند پرداخت پارامترهای کلی با پارامترهای جزئی در این است پرداخت پارامترهای جزئی، سناریو بهینه می‌تواند در هر ترددشمار متفاوت از دیگری باشد. بهینه‌ترین سناریو ممکن از نحوه تنظیم پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی در جدول آمده است.

جدول ۷. مقادیر پارامترهای مؤثر مدل شبیه‌سازی پرداخت شده در هر ترددشمار

| پارامتر پرداخت | ترددشمار | | | |
|----------------|----------|------|-------|-------|
| | ۱۰۱ | ۱۰۵۱ | ۱۰۹۰۱ | ۱۰۹۵۱ |
| speedFactor | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ |
| speedDev | ۰/۱۰ | ۰/۱۰ | ۰/۱۰ | ۰/۱۰ |
| lcKeepRight | ۱/۷۵ | ۰/۷۵ | ۱/۵۰ | ۱/۵۰ |
| lcAssertive | ۰/۵۰ | ۱/۰۰ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ |
| lcCooperative | ۱/۰۰ | ۰/۷۵ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ |

۴-۸- اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

فرض صفر هر دو آزمون آماری در بازه اطمینان ۹۵ درصد رد شده‌است که موارد ذیل از دلایل اصلی این اختلاف است: در فرایند پرداخت و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی به منظور ارائه مدلی جامع‌تر، از تمام تصادفات به‌وقوع‌پیوسته در ترددشمارهای منتخب استفاده شده‌است. لذا، به منظور پیشینه‌شدن تابع هدف مسئله ممکن است برخی تصادفات و یا ترددشمارها نسبت به حالت بهینه خود، انحراف نسبتاً بیشتری نشان دهد. در این مطالعه، از سرعت مجاز آیین‌نامه راهنمایی و رانندگی برای تعیین سرعت مجاز مسیر در مدل شبیه‌سازی استفاده شده و تخطی از آن نیز، به‌عنوان تخلف سرعت در نظر گرفته شده‌است. این در حالی است که شاخص سرعت و معیار تخطی از آن در ترددشمارهای مکانیزه برون‌شهری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای در محل تنظیم شده و حدود مشخص و یکسانی در همه ترددشمارها ندارد. فارغ از خطای تصادفی و نظام‌مند ترددشمارهای مکانیزه برون‌شهری، سرفاصله زمانی و تعداد تخلفات مربوط به عدم رعایت آن بر اساس سرعت دو خودرو متوالی در یک خط و با فرض ثابت بودن آن تعیین می‌شود. در مدل شبیه‌سازی از زمان دقیق عبور خودرو در تعیین سرفاصله زمانی استفاده شده‌است.

به ارزیابی مدل شبیه‌سازی با داده‌های مستقل از فرایند پرداخت، اعتبارسنجی گفته می‌شود که به دو روش مشاهده‌ای و آماری قابل انجام است. در روش اول، سعی می‌شود تا به طور کیفی شباهت پویانمایی حاصل از شبیه‌سازی با واقعیت سنجیده شود. در روش دوم، مشابه با آنچه در فرایند پرداخت به آن اشاره شد، از شاخص‌های نکویی برازش و همچنین آزمون‌های آماری برای بررسی کمی شباهت مدل شبیه‌سازی با واقعیت استفاده می‌شود (Hollander & Liu, 2008). برای این منظور، در این مطالعه از ۱۱ تصادفات به‌وقوع‌پیوسته در شعاع ۱۵۰۰ متری تا ۲۵۰۰ متری ترددشمارهای واقع در محورهای منتخب استان خراسان رضوی، برای اعتبارسنجی استفاده شده‌است که نتایج حاصل از آن برای شاخص‌های هدف متوسط سرفاصله زمانی، متوسط سرعت، تعداد تخلفات سرعت و تعداد تخلفات سرفاصله زمانی به ترتیب در جدول ۸ آمده‌است. مطابق با نتایج اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی، خروجی مدل از منظر شاخص‌های نکویی برازش استفاده‌شده در این مطالعه قابل قبول به نظر می‌رسد که نشان از مناسب بودن روش معرفی شده در شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل شبیه‌سازی دارد. با این حال، در موارد معدودی

۵- نتیجه گیری

شناسایی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی به سبب تأثیر متفاوت آن‌ها متناسب با هدف مطالعه و همچنین محدودیت‌های محاسباتی، یکی از مراحل اساسی در فرایند پرداخت است. در این مطالعه با تحلیل نتایج حاصل از اجرای محدود مدل شبیه‌سازی، رابطه‌ای به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر در مدل‌های شبیه‌سازی ارائه شد.

جدول ۸. نتایج اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی برای شاخص‌های هدف انتخاب‌شده از منظر شاخص‌های نکویی برازش

| ترددشمار | قدر مطلق اختلاف کمینه‌ها خطاها | قدر مطلق اختلاف بیشینه‌ها | قدر مطلق اختلاف میانگین‌ها | قدر مطلق اختلاف انحراف معیارها | آزمون آماری کولموگروف- اسمیرنف | p-value آزمون آماری کولموگروف- اسمیرنف | آزمون آماري اندرسون- دارلینگ | p-value آزمون آماري اندرسون- دارلینگ | |
|------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|---|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| | | | | | | | | | جذر میانگین مربع خطاها |
| متوسط سرفاصله زمانی (ثانیه) | | | | | | | | | |
| ۳۱۳۱۰۱ | ۰/۸۲ | ۰/۲۱ | ۱/۵۶ | ۰/۴۷ | ۰/۵۰ | ۰/۱۷ | ۰/۹۶۳ | -۱/۰۰ | ۰/۲۵۰ |
| ۳۱۳۱۵۱ | ۲/۳۵ | ۰/۱۷ | ۵/۴۰ | ۱/۰۷ | ۲/۰۱ | ۰/۱۹ | ۰/۸۵۴ | -۰/۸۶ | ۰/۲۵۰ |
| ۳۱۵۷۰۱ | ۰/۶۳ | ۰/۰۹ | ۰/۹۶ | ۰/۴۶ | ۰/۳۶ | ۰/۲۸ | ۰/۸۵۵ | -۰/۶۵ | ۰/۲۵۰ |
| ۳۱۵۷۵۱ | ۱/۸۵ | ۰/۱۱ | ۳/۹۴ | ۱/۰۰ | ۱/۴۴ | ۰/۱۹ | ۰/۹۰۳ | -۰/۸۰ | ۰/۲۵۰ |
| متوسط سرعت (کیلومتر بر ساعت) | | | | | | | | | |
| ۳۱۳۱۰۱ | ۹/۷۳ | ۱۲/۸ | ۵/۹۰ | ۹/۲۹ | ۱/۹۴ | ۰/۹۸ | ۰/۰۰۱ | ۱۴/۲۰ | ۰/۰۰۱ |
| ۳۱۳۱۵۱ | ۴/۶۸ | ۷/۰۰ | ۳/۴۰ | ۲/۸۷ | ۳/۲۳ | ۰/۷۲ | ۰/۰۳۸ | ۶/۶۵ | ۰/۰۶۲ |
| ۳۱۵۷۰۱ | ۴/۷۱ | ۶/۲۷ | ۲/۴۰ | ۴/۲۹ | ۱/۳۰ | ۰/۹۶ | ۰/۰۰۱ | ۹/۱۲ | ۰/۰۰۱ |
| ۳۱۵۷۵۱ | ۴/۴۹ | ۷/۱۳ | ۲/۹۰ | ۲/۸۲ | ۲/۴۴ | ۰/۷۰ | ۰/۰۳۹ | ۳/۴۸ | ۰/۰۴۵ |
| تعداد تخلفات سرعت | | | | | | | | | |
| ۳۱۳۱۰۱ | ۹/۵۹ | ۴/۱۴ | ۱۴/۸۰ | ۷/۳۴ | ۴/۹۱ | ۰/۶۵ | ۰/۰۹۸ | ۶/۳۶ | ۰/۰۵۳ |
| ۳۱۳۱۵۱ | ۵/۹۱ | ۳/۹۵ | ۲/۶۵ | ۳/۳۰ | ۰/۳۹ | ۰/۶۱ | ۰/۴۰۵ | ۸/۳۳ | ۰/۱۲۶ |
| ۳۱۵۷۰۱ | ۳/۸۴ | ۳/۴۳ | ۳/۳۷ | ۲/۶۳ | ۲/۰۰ | ۰/۶۷ | ۰/۰۳۴ | ۳/۹۱ | ۰/۰۱۶ |
| ۳۱۵۷۵۱ | ۲/۳۶ | ۱/۴۷ | ۳/۱۰ | ۱/۰۰ | ۱/۱۸ | ۰/۴۱ | ۰/۵۴۱ | ۱/۲۵ | ۰/۱۶۷ |
| تعداد تخلفات سرفاصله زمانی | | | | | | | | | |
| ۳۱۳۱۰۱ | ۱۱/۶۰ | ۸/۲۰ | ۱۰/۲۰ | ۱۰/۳۰ | ۰/۹۱ | ۰/۶۳ | ۰/۱۴۳ | ۵/۸۵ | ۰/۰۸۴ |
| ۳۱۳۱۵۱ | ۶/۰۹ | ۱/۵۰ | ۸/۸۰ | ۴/۷۸ | ۲/۸۲ | ۰/۶۴ | ۰/۱۵۹ | ۶/۲۸ | ۰/۰۹۲ |
| ۳۱۵۷۰۱ | ۳/۹۹ | ۳/۸۳ | ۳/۵۷ | ۳/۴۳ | ۰/۶۰ | ۰/۶۷ | ۰/۰۹۹ | ۳/۲۶ | ۰/۰۷۱ |
| ۳۱۵۷۵۱ | ۱/۵۱ | ۱/۷۳ | ۰/۸۷ | ۰/۹۹ | ۰/۳۲ | ۰/۶۱ | ۰/۱۳۲ | ۲/۹۷ | ۰/۰۹۷ |

خط LC2013 در نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی خردنگر SUMO، مدل شبیه‌سازی خردنگر با هدف تحلیل وضعیت

سپس با شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر شناسایی‌شده از مدل پیروی خودرو KraussPS و مدل تغییر

8. Validation
9. Analytical models
10. Mesoscopic
11. Macroscopic
12. Car-Following model
13. Lane-Changing model
14. Gap-Acceptance model
15. Homogeneous lane-based traffic flows
16. Heterogeneous non-lane-based traffic flows
17. Trajectories
18. Vehicle dynamics model
19. Variable Speed Limit (VSL)
20. Weaving section
21. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)
22. Federal Highway Administration (FHWA)
23. Feature tracking algorithms
24. Computer vision techniques
25. Naturalistic driving data sets
26. In-depth crash study reports
27. Time to Collision (TTC)
28. Post Encroachment Time (PET)
29. Headway (H)
30. Maximum Deceleration Rate to Avoid the Crash (DRAC)
31. Crash Potential Index (CPI)
32. Unsafe Density (UD)
33. Time Integrated Difference of Space distance and Stopping distance (TIDSS)
34. Synchronization
35. Uninterrupted traffic flow
36. Warm-up
37. Collision avoidance
38. Rule-based
39. Strategic lane-change
40. Cooperative lane-change
41. Tactical lane-change
42. Regulatory lane-change
43. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
44. Digital Elevation Model (DEM)
45. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
46. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)
47. Agenzia Spaziale Italiana (ASI)
48. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
49. Systematic
50. Global parameters
51. Local parameters

۸- مراجع

- خشایب پور، م.، محمدعلی، آ.، شریعت‌مهمینی، ا.، یزدان‌پناه، ح.، کلاتری، ن.، و عبادی‌شیویاری، ز.

ایمنی راه‌های بزرگراهی برون‌شهری، به‌کمک داده‌های حاصل از ترددشمارهای مکانیزه سازمان راهداری پرداخت و اعتبارسنجی شد. خلاصه نتایج اصلی این پژوهش:

- به ترتیب، توزیع یکنواخت و نمایی که پارامترهای آن در بازه‌های زمانی جزء تخمین‌زده شده‌است؛ در تولید جریان ترافیکی نتایج بهتری از واقعیت در مدل شبیه‌سازی تولید می‌کنند.

- مدل پیروی خودرو KraussPS در نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی خردنگر SUMO، به‌سبب در نظر گرفتن اثر شیب بر روی تعاملات بین وسایل نقلیه، برای ارزیابی ایمنی مناسب شناخته‌شد.

- از میان پارامترهای موجود در مدل پیروی خودرو KraussPS، پارامترهای کلی توزیع نرمال شاخص ضریب سرعت مجاز به ترتیب با میانگین (speedFactor) و انحراف معیار استاندارد (speedDev) ۰/۹۵ و ۰/۱ مؤثر شناخته‌شدند.

- از میان پارامترهای موجود در مدل تغییر خط LC2013، پارامترهای جزئی شاخص تغییر خط مشارکتی (lcCooperative)، پذیرش فاصله در مانور تغییر خط (lcAssertive) و همچنین تمایل به حرکت از سمت راست مسیر (lcKeepRight) مؤثر شناخته‌شدند.

۶- سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد گروه راه‌وترابری دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس استخراج شده‌است. نگارندگان مراتب تقدیر و تشکر صمیمانه خود را از مسئولان پژوهشی و هیئت داوران پایان‌نامه اعلام می‌نمایند. همچنین بدین‌وسیله از همکاری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای کشور در ارائه داده‌های پژوهش؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Effective calibration parameters
2. Calibration
3. Reactive approaches
4. Surrogate Safety Measures (SSMs)
5. Proactive approaches
6. Microscopic simulation models
7. Calibration target parameters

- Essa, M., & Sayed, T., (2015), "Simulated traffic conflicts: do they accurately represent field-measured conflicts?", *Transportation research record*, 2514(1), pp.48-57.
- Essa, M., & Sayed, T., (2020), "Comparison between Surrogate Safety Assessment Model and Real-Time Safety Models in Predicting Field-Measured Conflicts at Signalized Intersections", *Transportation Research Record*, 0361198120907874.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... & Seal, D., (2007), "The shuttle radar topography mission", *Reviews of geophysics*, 45(2).
- Gettman, D., & Head, L., (2003), "Surrogate safety measures from traffic simulation models", *Transportation Research Record*, 1840(1), pp.104-115.
- Gettman, D., Lili, P., Sayed, T., & Shelby, S., (2008), "Surrogate Safety Assessment Model and Valid ation (Final Report FHWA-HRT-08-051)", *Federal Highway Administration*.
- Giuffrè, T., Trubia, S., Canale, A., & Persaud, B., (2017), "Using microsimulation to evaluate safety and operational implications of newer roundabout layouts for European Road networks", *Sustainability*, 9(11), 2084.
- Global Burden of Disease Collaborative Network, (2018), "Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Results", *Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME)*.
- Goh, K. C., Currie, G., Sarvi, M., & Logan, D., (2013), "Exploring bus lane safety impacts using traffic microsimulation", In *Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, 36th, Brisbane, Queensland, Australia.
- Hollander, Y., & Liu, R., (2008), "The principles of calibrating traffic microsimulation models", *Transportation*, 35(3), pp.347-362.
- Imprialou, M., & Quddus, M., (2019), "Crash data quality for road safety research: current state and future directions", *Accident*
- (۱۳۹۲)، "دستورالعمل نحوه بکارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان ترافیک در انجام مطالعات ساماندهی ترافیک. تهران، آوای فهیم.
- عبادینی، م.، خشایی‌پور، م.، کلاتری، ن.، شریعت‌مهمی، ا.، عبادی‌شویباری، ز.، یزدان‌پناه، ح.، و محمدعلی، آ.، (۱۳۹۲)، "ارایه دستورالعمل نحوه شبیه‌سازی"، کالیبراسیون و اعتبارسنجی نرم‌افزار Aimsun. تهران، آوای فهیم.
- Abdel-Aty, M., & Wang, L., (2017), "Implementation of variable speed limits to improve safety of congested expressway weaving segments in microsimulation", *Transportation research procedia*, 27, pp.577-584.
- Archer, J., (2005), "Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections (Doctoral dissertation, KTH).
- Barceló, J., (2010), "Fundamentals of traffic simulation, Vol. 145, pp. 439, New York, Springer.
- Cafiso, S., D'Agostino, C., Kieć, M., & Bak, R., (2018), "Safety assessment of passing relief lanes using microsimulation-based conflicts analysis", *Accident Analysis & Prevention*, 116, pp.94-102.
- Davis, G. A., Hourdos, J., Xiong, H., & Chatterjee, I., (2011), "Outline for a causal model of traffic conflicts and crashes", *Accident Analysis & Prevention*, 43(6), pp.1907-1919.
- El-Tantawy, S., Djavadian, S., Roorda, M. J., & Abdulhai, B., (2009), "Safety evaluation of truck lane restriction strategies using microsimulation modeling", *Transportation research record*, 2099(1), pp.123-131.
- Erdmann, J., (2015), "SUMO's lane-changing model", In *Modeling Mobility with Open Data*, pp. 105-123, Springer, Cham.

Procedia computer science, 130, pp.255-262.

- Pirdavani, A., Brijs, T., Bellemans, T., & WETS, G., (2010), "Evaluation of traffic safety at un-signalized intersections using microsimulation: a utilization of proximal safety indicators.

- Scholz, F. W., & Stephens, M. A., (1987), "K-sample Anderson-Darling tests", Journal of the American Statistical Association, 82(399), pp.918-924.

- So, J., Park, B., Wolfe, S. M., & Dedes, G. (2015), "Development and validation of a vehicle dynamics integrated traffic simulation environment assessing surrogate safety", Journal of computing in civil engineering, 29(5), 04014080.

- Sobhani, A., Young, W., & Sarvi, M. (2013), "A simulation based approach to assess the safety performance of road locations", Transportation research part C: emerging technologies, 32, pp.144-158.

- Svensson, A., (1992), "Further development and validation of the Swedish traffic conflicts techniques", Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University, Lund, Sweden.

- World Health Organization. (2018), "Global Status Report on Road Safety", Geneva, World Health Organization.

- Wunderlich, K. E., Vasudevan, M., & Wang, P. (2019). TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version (No. FHWA-HOP-18-036). United States. Federal Highway Administration.

-Yang, H., (2012), "Simulation-based evaluation of traffic safety performance using surrogate safety measures (Doctoral dissertation)", Rutgers University-Graduate School-New Brunswick).

- Young, W., Sobhani, A., Lenné, M. G., & Sarvi, M., (2014), "Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modeling", Accident Analysis & Prevention, 66, pp.89-103.

Analysis & Prevention, 130, pp.84-90.

- Li, L., Persaud, B., & Shalaby, A., (2017), "Using micro-simulation to investigate the safety impacts of transit design alternatives at signalized intersections", Accident Analysis & Prevention, 100, pp.123-132.

- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., ... & Wießner, E., (2018), "Microscopic traffic simulation using sumo. In 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 2575-2582, IEEE.

- Uchida, N., Kawakoshi, M., Tagawa, T., & Mochida, T., (2010), "An investigation of factors contributing to major crash types in Japan based on naturalistic driving data", IATSS research, 34(1), pp.22-30.

- Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S., & Tavassoli, A., (2019), "Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment". IATSS research, 43(1), pp.27-36.

- Mak, K. K., & Sicking, D., (2003), "Roadside safety analysis program (RSAP): engineer's manual (Vol. 492)", Transportation Research Board.

- Mannering, F. L., & Bhat, C. R., (2014), "Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions", Analytic methods in accident research, 1, pp.1-22.

- Mathew, T. V., Munigety, C. R., & Bajpai, A., (2015), "Strip-based approach for the simulation of mixed traffic conditions", Journal of Computing in Civil Engineering, 29(5), 04014069.

- Razali, N. M., & Wah, Y. B., (2011), "Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests", Journal of statistical modeling and analytics, 2(1), pp.21-33.

- Muley, D., Ghanim, M., & Kharbeche, M. (2018), "Prediction of Traffic Conflicts at Signalized Intersections using SSAM",

Identification of the Most Effective Calibration Parameters in Safety Micro simulation Models (Case Study: Mashhad-Sabzevar-Tehran Suburban Highway)

Mohsen Rahmati Yami, M.Sc. Grad., Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Amin Mirza Boroujerdian, Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Seyed Ehsan Seyed Abrishami, Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: boroujerdian@modares.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Traffic accidents, as one of the most important threats to human beings, have shown themselves as a dangerous phenomenon. The impact of various factors on the incidence of accidents with different contributions has made it difficult to reduce the consequences of this unpleasant event in the safety analysis. Calibrated simulation models by taking into account the interaction effects of factors such as various behavioral characteristics of users in interaction with road have the potential to assess the safety performance of traffic facilities in different situations. Identifying the effective calibration parameters in simulation models due to their different impacts according to the purpose of the study as well as computational constraints is one of the essential steps in the calibration process. This study aims to provide a solution to identify the effective calibration parameters in the safety microscopic simulation model. For this purpose, 4 detectors located at the Mashhad-Sabzevar-Tehran route and vice versa with 23 accidents and 306 traffic records were selected as case studies and by deriving geometric information from available databases, the simulation model of the study area was built in the SUMO microscopic simulation software. By logically executing the simulation model on selected accidents, the effective calibration parameters in the car-following model, as well as the lane-changing model, were identified and by adjusting them in multiple scenarios, the simulation model in the case study routes was calibrated and validated with the use of the safety effective calibration target parameters such as Surrogate Safety Measures (SSMs). Among all the parameters of the simulation model, the global parameters of the normal distribution of permissible speed coefficient index with a mean and standard deviation of 0.95 and 0.10, respectively, and also local parameters of the cooperative, assertive and keep right lane-changing indexes were identified as effective.

Keywords: SUMO Microscopic Simulation Software, Identification of The Most Effective Calibration Parameters, Safety Microscopic Simulation Model, Suburban Highway