

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها^۱

محمد پورمحمدتقی^۲، محمدرضا احدی^۳

از صفحه ۹ تا ۳۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۵

چکیده

زمینه و هدف: بهبود در بهره‌وری و افزایش ایمنی در بخش‌های مختلف آزادراه‌ها به‌عنوان یک اولویت در جوامع حمل‌ونقلی شناخته می‌شود. با توجه به این مهم، سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر، توجه بسیاری را به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید جهت مدیریت جریان‌های ترافیکی در آزادراه‌ها به خود جلب نموده است. از آنجایی که سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر، توانایی پاسخگویی و اعمال تغییرات بر اساس شرایط مختلف ترافیکی و آب‌وهوایی را دارا است، می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای راهبردهای استاتیکی کنترل سرعت (تابلوهای ایستای کنترل سرعت) در راه‌ها باشد. این سیستم به‌منظور کاهش اختلاف سرعت و تطبیق جریان ترافیک در بخش‌های خطرناک راه‌ها، کاهش نرخ تصادفات جلو-عقب و افزایش ایمنی ترافیک طراحی گردیده است.

روش: در این پژوهش به لحاظ هدف و نوع کاربرد و برای تحلیل عملکرد مسیر از روش شبیه‌سازی استفاده شده است. این مطالعه جهت ارزیابی تأثیر سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در هنگام وقوع تصادفات رانندگی و انسداد مسیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه قم-تهران و با توجه به پارامترهای رفتاری رانندگان در ایران انجام و از طریق نرم‌افزار ایسمان مدل‌سازی شده است.

یافته‌ها: با توجه به اعمال سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت به‌عنوان حداکثر سرعت مجاز در ۵ کیلومتر توسط تابلوی کنترل سرعت مجاز متغیر، به‌دلیل انسداد مسیر در بالادست در اثر وقوع تصادف، شاهد کاهش ۴ ساعتی زمان سفر کل وسایل نقلیه در مدت‌زمان مدل‌سازی هستیم. به‌عبارت‌دیگر بر اساس نتایج شبیه‌سازی (تک کنترل سرعت مجاز متغیر)، میزان تأخیر ۳/۵ درصد، توقف ۱۹ درصد، زمان سفر ۱/۵ درصد و تولید آلاینده‌ها ۱/۵ درصد کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری: استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در مسیرهای حادثه‌خیز، تأثیر مثبتی در شاخص‌های تأخیر، زمان سفر، توقف و تولید آلاینده‌ها می‌گذارد. از آنجا که افزایش میزان بهره‌وری در تمامی سیستم‌ها دارای اهمیت است، می‌توان دریافت که استفاده از این سیستم در مسیرهای حادثه‌خیز، جهت افزایش ایمنی و بهبود عملکرد مسیر با توجه به کاهش میزان زمان سفر، مصرف سوخت، تصادفات ثانویه و تولید آلاینده‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: کنترل سرعت مجاز متغیر، تصادف، افزایش بهره‌وری، ایمنی، مدیریت ترافیک.

۱. این مقاله از پایان‌نامه‌ای در رشته مهندسی عمران-برنامه‌ریزی حمل‌ونقل (۱۳۹۸) مقطع کارشناسی ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران استخراج شده است. استاد راهنمای این پژوهش، دکتر محمدرضا احدی می‌باشد.

۲. کارشناسی ارشد مهندسی عمران، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران،

Pmt.mohammad@yahoo.com

۳. دکتری تخصصی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشیار، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (نویسنده مسئول)،

M.ahadi@bhrc.ac.ir

مقدمه

با توجه به آمار سالنامه آماری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ شاهد افزایش ۴۰ درصدی در تعداد کل مسافرین جابه‌جاشده از مرزهای جاده‌ای کشور (وسایل نقلیه، ترانزیت، پیاده و متفرقه) و همچنین شاهد افزایش ۵۰ درصدی در تعداد تصادفات برون‌شهری در سطح کشور بوده‌ایم. گسترش روزافزون جمعیت و استفاده از اتومبیل به‌عنوان جزئی جدایی‌ناپذیر از زندگی موجب شده است که شاهد افزایش تردد و به‌تبع آن، افزایش میزان حوادث باشیم. حوادث جاده‌ای و انسداد مسیرهای عبور و مرور به‌صورت جمعی علاوه بر خسارات مستقیم جانی و مالی برای افراد و جامعه موجب خسارات غیرمستقیم بسیاری برای آن‌ها خواهد بود. با افزایش تقاضای حمل‌ونقل در شبکه‌های حمل‌ونقلی، بهبود بهره‌وری عملیاتی و ایمنی در بخش‌های آزادراه به‌عنوان یک اولویت برای سازمان‌های حمل‌ونقل تشخیص داده شده است. یکی از راهکارهای مدیریت جریان ترافیک، استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند^۱ است؛ استفاده از این سیستم سبب بهینگی زیرساخت‌های حمل‌ونقلی و افزایش راندمان و کارایی آن‌ها می‌گردد. استفاده از راهبردهای کنترلی در حمل‌ونقل به‌منظور افزایش بهره‌وری و جلوگیری از اتلاف زمان، انرژی، حفظ محیط‌زیست و... است؛ به همین جهت نیازمند استفاده از مکانیسم‌ها و الگوریتم‌هایی هستیم تا میزان اتلاف در موارد ذکرشده را تا حد اکثر میزان ممکن کاهش داده و موجب افزایش بهره‌وری و حرکت به‌سمت توسعه پایدار شویم. در این پژوهش با مدل‌سازی یک مسیر پرحادثه، مزایای استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر^۲ را هنگام وقوع تصادفات رانندگی و انسداد مسیر در برابر نبود این سیستم به‌صورت (قبل و بعد) بیان می‌نماییم. لذا مسئله اساسی این پژوهش،

1. Intelligent Transportation System

2. Variable Speed Limit (VSL)

این است که آیا استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در نقاط حادثه‌خیز (به دلیل تشکیل صف و ایجاد ترافیک پیش از محل تصادف) باعث بهبود در میزان تأخیر کل وسایل نقلیه، چگالی، سرعت و زمان سفر به عنوان پارامترهای ترافیکی و کاهش میزان تولید آلاینده‌ها به عنوان پارامتر زیست‌محیطی می‌گردد؟ و همچنین آیا شاهد کاهش میزان تصادفات و افزایش ایمنی هستیم؟

پیشینه و مبانی نظری

پژوهش‌های فراوانی در جهت بررسی تأثیرات استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت مجاز متغیر در آزادراه‌ها و راه‌های برون‌شهری با توجه به سناریوهای تعریف‌شده انجام گرفته است. در تمامی موارد با توجه به نوع پیاده‌سازی شاهد بهبود در عملکرد جریان ترافیک بوده‌ایم.

محدودیت سرعت متغیر به عواملی از جاده که در طول زمان متغیر است، بستگی دارد. شرایط ترافیکی، محیطی یا جوی، دید و تابع خطرات تصادف، از مهم‌ترین عوامل مؤثر تعیین محدودیت سرعت است. علاوه بر آن، محدودیت سرعت متغیر زمانی مفیدتر و مؤثرتر خواهد بود که عوامل تأثیرگذار مناسب و محل استقرار صحیح برای آن در نظر گرفته شود و نیز می‌توان آن را به صورت اخباری و هشدار و یا به صورت اعمال قانون بیان کرد. البته با توجه به بررسی اثرات می‌توان به این نتیجه رسید که اگر به صورت اعمال قانون باشد، بازدهی بیشتری نسبت به زمانی که به صورت اخباری بیان شود دارد (بهزادی، بهزاد، حسن‌پور و بابائی دهکردی، ۱۳۹۲: ۳).

با نصب تابلوهای سرعت متغیر و کنترل دقیق سرعت مجاز، تعداد تصادفات به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و نصب این علائم، اقتصادی می‌باشد (ضامنیان، ۱۳۹۱: ۵). پژوهش‌های میدانی نشان داده که استفاده از تابلوهای سرعت مجاز متغیر منجر به

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

کاهش واریانس سرعت و ایمنی بیشتر می‌شود در مطالعات شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، کاهش ۱۱ تا ۲۵ درصدی در احتمال تصادفات مشاهده شده است. تأثیر میزان پاسخ رانندگان به تابلوهای سرعت مجاز نیز بر نتایج شبیه‌سازی بررسی و چنین نتیجه‌گیری شده است که به‌علت سطح بالای پیروی رانندگان از تابلوهای سرعت مجاز متغیر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی از سطح اطمینان بالایی برخوردار است (مرادی و برزگر گنجی، ۱۳۹۰: ۷).

سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر، یکی از موفق‌ترین سیستم‌ها در مهندسی ترافیک جهت مدیریت شرایط ترافیک در طول گرفتگی، حوادث، ساخت‌وساز جاده و آب‌وهوای نامساعد می‌باشد. جهت افزایش اثرات و کارایی سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر نیازمند انتخاب مکان مناسب هستیم. در آزادراه تهران - قم فقط در فصول سرما آن‌هم به‌علت شرایط جوی نیازمند نصب و محدودکردن سرعت هستیم و بقیه ماه‌ها دارای ارجحیت کمتر می‌باشد؛ ولی جاده هراز در تمام ماه‌ها نیازمند نصب این تابلوها و قراردادن آن در کل مسیر و محدودکردن سرعت است. این مسیر در فصول سرما به‌علت شرایط جوی بد با توجه به کاهش تردد نیز به محدودکردن سرعت نیاز دارد. این کار، کاهش تصادفات و روانی در جریان را در طول مسیر و در نتیجه احترام به قوانین و تبعیت بیشتر مردم از سرعت مجاز را در پی خواهد داشت (مهماندار، حسن‌پور، بابائی دهکردی و جعفریان، ۱۳۹۴: ۱۰).

صرف‌نظر از اقدامات خاص مانند نصب گارد ریل، ایجاد خاکریز کنار آبروها و... اقداماتی مانند رنگ‌آمیزی خطوط افقی، اجرای شیار لرزاننده، نصب تابلوهای محدودیت سرعت و جهت‌نما ضمن هزینه پایین، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در ایمنی دارد (دیواندری و موسوی، ۱۳۹۸: ۳۱).

سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند ترافیکی، تلفات ناشی از تصادفات رانندگی در بزرگراه‌های شهر تهران را به صفر رسانده است. عامل اصلی ۸۵ درصد از

تصادفات مرگبار، سرعت غیرمجاز است. عامل سرعت در ازدیاد یا کاهش ریسک تصادفات مرگبار، نقش عمده و کلیدی دارد (عصاریان‌نژاد و مهری، ۱۳۹۵: ۳۰).

اسمولدرز^۱ (۱۹۹۰: ۱۲۰) اسمولدرز از دیدگاه‌های مختلف روی تأثیرات استفاده از تکنولوژی VSL بر شبکه راه‌ها در شرایط مختلف استفاده نمود و اثرات آن را در شرایط مختلف و تحت پارامترهای گوناگون بررسی نمود. در این روش‌ها، تصمیم‌گیری‌های در لحظه VSL بر اساس آستانه‌های پیشنهادی جریان ترافیک، سطح اشغال یا سرعت متوسط تغییر می‌یافت. اهداف اصلی این روش‌ها، هماهنگ‌سازی اختلاف سرعت و تثبیت جریان ترافیک بوده و این مطالعات به‌خوبی تأثیر سیستم‌های VSL در هماهنگی ترافیک و افزایش قابل‌توجه ایمنی را نشان داد.

استفاده از سیستم VSL در بخش‌هایی که سرعت جریان کم است و یا هنگام تراکم، همچنین استفاده از این سیستم به‌صورت ناگهانی در جهت تغییر سرعت، هیچ مزیتی را در بر نخواهد داشت و می‌بایست سرعت در جهت نیل به اهداف VSL در روندی کاهشی، هر دقیقه ۸ کیلومتر بر ساعت کاهش یابد (عبدل اتری، دیلمور و دیندسا^۲، ۲۰۰۶: ۳۳۸).

سیستم‌های VSL به‌نگام می‌توانند پتانسیل تصادفات را در زمان سفرهای طولانی‌تر کاهش دهند. سیستم‌های VSL تنها کاهش قابل‌توجهی در احتمال تصادف را برای شرایط غیرمتراکم فراهم می‌کنند. باین‌حال، در مطالعات هیچ مزیت ایمنی قابل‌توجهی با استفاده از VSL برای شرایط متراکم مشاهده نشد (عبدل اتری و دیندسا^۳، ۲۰۰۷: ۱).

1. Stef Smulders

2. Mohamed Abdel-Aty, Jeremy Dilmore, Albinder Dhindsa

3. Mohamed Abdel-Aty, Albinder Dhindsa

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

نتایج شبیه‌سازی شبکه‌های پیش‌بینی شده نشان داد که تأثیر سرعت‌های اعمالی توسط VSL در حجم‌های مختلف تقاضای ترافیک و شرایط رعایت مقررات توسط رانندگان متفاوت است (پارک و یادلاپاتی^۱، ۲۰۰۳: ۵۸).

از نتایج تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی دریافت شد که الگوریتم‌های VSL می‌توانند توان عملیاتی در محل مورد مطالعه و کاهش تاخیرات کل وسایل نقلیه را بهبود بخشند. همچنین کاهش واریانس سرعت به‌طور غیرمستقیم به بهبود کلی ایمنی در محل مورد بررسی کمک کند (پی وی لین، کانگ و چنگ^۲، ۲۰۰۴: ۱۵۵).

در مطالعه‌ای، تأخیر به‌عنوان یکی از برهم‌زنندگان تراکم و ترافیک برشمرده شد. هگی و همکارانش، طرح MPC را با استفاده از مدل پیش‌بینی ترافیک ماکروسکوپیک METANET در جهت کنترل پویایی ترافیک در یک مدل فعال به کار بستند (هگی، شوتر و هلندورن^۳، ۲۰۰۵: ۱۱۲).

این مطالعات، مزایای کنترل یکپارچه VSL و کنترل ورود و خروج به رمپ را نشان دادند. بدین صورت که بازده جریان ترافیک می‌تواند به‌طور قابل توجه هنگامی که اقدامات کنترل VSL با کنترل ورود و خروج به رمپ هماهنگ شود، بهبود یابد (کارلسون، پاپامیشیل، پاپاجئورجئوس و مسمر^۴، ۲۰۱۰: ۲۳۸).

تأثیر سیستم VSL بر رفتار جریان ترافیکی کل در مدل کمی پیشنهادشده در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. بازده جریان ترافیک به‌طور قابل ملاحظه‌ای، هنگامی که از سیستم VSL استفاده می‌گردد بهبود می‌یابد (پاپامیشیل، کامپیتاکی، پاپاجئورجیو و مسمر^۵، ۲۰۰۸: ۱۴۰۸۴).

1. PARK, B, Yadlapati, S S.

2. Pei-Wei Lin , Kyeong-Pyo Kang & Gang-Len Chang

3. Andreas Hegyi, Bart De Schutter and J. Hellendoorn

4. Rodrigo C. Carlson, Ioannis Papamichail, Markos Papageorgiou, Albert Messmer

5. Ioannis Papamichail, Katerina Kampitaki, Markos Papageorgiou and Albert Messmer

میزان رعایت و توجه به مقررات وضع شده توسط VSL به ۶۰ درصد خواهد رسید. انتشار آلاینده‌های وسایل نقلیه، به‌ویژه اکسید نیتروژن، با سرعت‌بالا ارتباط زیادی دارد و اگر میزان ترافیک در سطوح مناسبی نگهداری شود، تولید آلاینده‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. علاوه‌براین، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول توقف و شرایط ترافیک زیاد بیشتر از شرایط جریان آزاد خواهد بود (لیو، لین، ونگ و یانگ^۱، ۲۰۱۷: ۱).

از روش MPC برای ارزیابی تأثیر کنترل محدودیت سرعت پویا در کاهش انتشار کربن دی اکسید، مصرف سوخت و زمان سفر استفاده کردند. نتیجه مطالعاتشان بدین گونه بود که کاهش کل زمان سپری شده^۲ (صرف شده) به‌تنهایی نمی‌تواند باعث کاهش انتشار آلاینده‌ها گردد (زگیه، شوتر، هلندورن و برونس^۳، ۲۰۱۰: ۵۳۹۲).

کاسترو شاخص واحدی را به نام شتاب انباشته‌شده مثبت^۴ توسعه داد که بر اساس شتاب انباشته‌شده در یک بخش (تغییرات سریع لحظه‌ای) بود. نتیجه مطالعات نشان داد که کمی افزایش ظرفیت در توان عملیاتی، تأثیر مثبتی روی کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد، اما TTS را افزایش می‌دهد (کاسترو و مونزون^۵، ۲۰۱۳: ۱۱۷).

برخی مطالعات نیز اثربخشی VSL را در کاهش خطر تصادفات، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف سوخت نشان داد (سوریگوئره، ترون و روساس^۶، ۲۰۱۳: ۷۸).

با ارائه مدل کنترل خودروهای عبوری از تقاطع در تقاطع‌های شهری^۷ و بهینه‌سازی مسیرهای عبوری برای جلوگیری از تصادفات و بررسی اثرات مثبت آن بر عبور و مرور و محیط‌زیست پرداختند. این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم VSL، اگر

1. Pu Lyu, Yongjie Lin, Lei Wang, and Xianfeng Yang

2. Total Time Spent (TTS)

3. Solomon Kidane Zegeye, Bart De Schutter, Hans Hellendoorn, and Ewald Breunese

4. Positive Accumulated Acceleration (PAA)

5. Alvaro Garcia-Castro, Andres Monzon

6. F. SORIGUERA, J. M. TORNE and D. ROSAS

7 Cooperative Vehicle Intersection Control (CVIC)

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

به‌درستی عمل کند، ممکن است یک راه‌حل امیدوارکننده در جهت برآورده‌کردن نیازهای عبور و مرور و حفظ محیط‌زیست باشد (لی، پارک، مالاکورن و سو^۱، ۲۰۱۳: ۱۹۳).

استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت مجاز متغیر به‌صورت قابل‌توجهی سرعت متوسط را کاهش می‌دهد؛ اما هیچ تأثیر پایداری بر تغییر یا اختلاف سرعت ندارند. به‌علاوه، با توجه به ماهیت منحصربه‌فرد هندسه کنارگذر مورد مطالعه، از جمله هندسه زمین (ناحیه) و آب‌وهوا، پاسخ (عکس‌العمل) رانندگان در این سیستم VSL شبیه و یا قابل‌تعمیم به سیستم‌های VSL دیگر نیست (الفارسون، شانکار و وئو^۲، ۲۰۰۵: ۶۹). سرعت متوسط و تنوع سرعت در نتیجه استفاده از VSL کاهش می‌یابد. با این حال، سرعت فقط ۲ بار در روز متغیر بود (۶۵ مایل بر ساعت در شب و ۵۵ مایل بر ساعت از ۷ صبح تا ۶ عصر). با این حال توزیع سرعت به‌دست آمده شامل شرایط متراکم و همچنین شرایط غیرمتراکم است. بنابراین توزیع‌ها تنها نشانگر پاسخ رانندگان به محدودیت سرعت تعیین شده نیستند (مک مورتری، سایتو، ریفکین و هیت^۳، ۲۰۰۹: ۱).

در سال ۱۹۹۲ میلادی، یک بخش ۲۰ کیلومتری از بزرگراه A2 بین آمستردام و اوترخت در هلند به یک سیستم محدودیت سرعت متغیر مجهز شد. این سیستم اجازه می‌داد سرعت برای هر خط به‌صورت جداگانه تنظیم و به‌طور پیوسته از ۱۲۰ تا ۹۰ کیلومتر در ساعت یا ۷۰ کیلومتر در ساعت کاهش یابد. به‌طور متوسط سرعت پس از اجرای VSL کاهش می‌یابد. این مطالعه نشان می‌دهد که نشانه‌های سرعت توسط رانندگان مورد موافقت قرار گرفته است (لی و عبدل اتری، ۲۰۰۸: ۵۵).

1. Joyoung Lee, Byungkyu (Brian) Park, Kristin Malakorn, Jaehyun (Jason) So

2. Gudmundur F. Ulfarsson, Venkataraman N. Shankar, Patrick Vu.

3. Thomas McMurtry, Mitsuru Saito (Corresponding Author, Matt Riffkin, Suellen Heath

4. Chris Lee, Mohamed Abdel-Aty

گرومتر، ما و تاپانی^۱ (۲۰۱۵: ۱۷۳) به بررسی تأثیرات وجود سیستم VSL در محیط خودروهای متصل به هم پرداختند؛ به گونه‌ای که در محیط مورد بررسی تمام وسایل از جمله خودروهای عبوری و زیرساخت‌ها باهم در تعامل باشند. این اطلاعات اولیه، رانندگان را قادر می‌سازد تا به آرامی سرعت خود را کاهش داده و در نتیجه ثبات جریان ترافیک برقرار و انتشار آلاینده‌ها از آگروز کاهش یابد. علاوه بر این، تکنولوژی CV^۲ می‌تواند کیفیت و وضوح داده‌های ترافیک را بهبود بخشد.

تجربه بین‌المللی نشان می‌دهد که محدودیت‌های سرعت دینامیکی^۳ در بزرگراه‌ها و محیط‌هایی با سرعت بالا با سرعت در محدوده ۱۱۰ یا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت مؤثر است. به عبارت دیگر مطالعات در مورد سرعت پایین و محدودیت سرعت پیشنهادی هیچ‌گونه تفاوت ظرفیت و سطح خدمات را ارائه نمی‌دهد (نیسان و کارل ال^۴، ۲۰۰۷: ۱۰۰).

اقدامات مدیریت ترافیک، زمانی که اضمحلال در ترافیک اتفاق افتاده است، نمی‌تواند روی وضعیت صف تأثیری بگذارد. بدین معنی که وقتی سرعت ۴۵ کیلومتر بر ساعت توسط الگوریتم شناسایی خودکار تصادفات تشخیص داده می‌شود و سرعت پیشنهادی در راه به ۷۰ کیلومتر بر ساعت کاهش می‌یابد، پیشاپیش برای جلوگیری از اضمحلال (فروپاشی) در ترافیک خیلی دیر شده است. بنابراین مهم است که قبل از تشکیل صف‌ها، جریان را هماهنگ نماییم. هشدار تشکیل صف همراه با سرعت پیشنهادی در این مرحله عمدتاً با هدف کاهش خطر تصادفات ثانویه در انتهای صف است که در آن ترمز اتفاق می‌افتد (کرنر و بوریس^۵، ۲۰۱۳).

1. Ellen Grumert, Xiaoliang Ma, Andreas Tapani

2. Connected Vehicle

3. Dynamic Speed Limit (DSL)

4. Nissan, Albania, Bang, Karl L.

5. Kerner, Boris S

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

لین، دو الگوریتم برخط را برای کنترل VSL در بخش مشخصی از بزرگراه مطرح نمود. اولین الگوریتم شامل به حداقل رساندن طول صف در مقابل محل انسداد و به‌روزرسانی محدودیت‌های سرعت با توجه به اهداف کنترل سرعت و رعایت نسبت رانندگان بود. دومین الگوریتم نیز شامل حداکثر کردن توان عملیاتی در محل انسداد (محل مورد بررسی) و تعیین محدودیت‌های سرعت با حل یک مسئله برنامه‌نویسی خطی می‌باشد (لین، کنگ و چنگ^۱، ۲۰۰۴: ۱۵۵).

VSLها ممکن است برای کاهش جریان اصلی راه، حل ترافیک و یا تأخیر و جلوگیری از فعال‌شدن (انسداد) تنگناها استفاده شوند. دو مدل مکانیسم در VSLها در جهت کاهش جریان اصلی وجود دارد: مکانیسم اول، زمانی که VSLها روی قطعه‌ای از آزادراه تحت تراکم بحرانی قرار دارند که یک انتقال به وضعیت ترافیکی جدید به وجود می‌آید، با حفظ جریان مشابه در سرعت کمتر و تراکم بیشتر. در طول این انتقال، افزایش تراکم منجر به کاهش موقت جریان اصلی می‌شود. مکانیسم دوم، VSLهای زیر بحرانی منجر به یک نمودار اساسی می‌شوند که دارای ظرفیت پایین‌تر با VSLهای کمتر است (کارلسون، پاپامیشل، پاپاجورجیو و مسمر^۲، ۲۰۱۰: ۲۴۰).

تحت محدودیت سرعت مشخص، هنگامی که تراکم در مجاورت (نزدیکی) تنگنا بالاتر از مقادیر بحرانی افزایش یابد، صف از بالادست تنگنا تشکیل می‌شود که ظرفیت تنگنا را کاهش می‌دهد. افت ظرفیت باعث می‌شود پویایی جریان ترافیک در تنگنا بسیار ناپایدار شود که برای کنترل توسط VSL و حفظ نرخ بالای جریان دشوار است. هر دو روش کنترلی VSL، مبتنی بر بازخورد محلی و مبتنی بر MPC برای به‌حداکثر رساندن سرعت جریان در تنگناها با توجه به اثرات کاهش ظرفیت پیشنهاد شده است و برخی از این روش‌ها، بهبود قابل توجهی در تحرک در هر دو شبیه‌سازی

1. Pei-Wei Lin, Kyeong-Pyo Kang, And Gang-Len Chang

2. Rodrigo C. Carlson, Ioannis Papamichail, Markos Papageorgiou, Albert Messmer

ماکروسکوپیکی و میکروسکوپی نشان دادند (مورالیدهاران و هوروویتز^۱، ۲۰۱۵: ۵۳۲).

گودآل^۲ (۲۰۱۷: ۱۱) وقوع تصادفات ثانویه، زمان بندی های زمانی و حجم ترافیکی یکپارچه بزرگراهها را تحلیل نمود. نتایج نشان داد که ۹/۲ درصد از تمامی برخوردهای خودروها، دومین برخورد برای دیگر تصادفات و ۶/۲ درصد از این برخوردها، سومین برخورد برای تصادفات اولیه هستند.

حوادث ثانویه را می توان بر اساس امواج شوک ترافیکی شناسایی کرد و مطالعه ونگ در رابطه با تصادفات ثانویه مرتبط با تصادف اولیه و شوک های ناشی از آن بود. نتایج نشان داد که تصادفات ثانویه در بزرگراه های کالیفرن^۳ ۱/۰۸ درصد از کل تصادفات را تشکیل می دهد (ونگ، ژی، لیو، فنگ و راگلند^۳، ۲۰۱۶: ۲۰۱).

خونداکر و خاتان^۴ (۲۰۱۵: ۱۵۹) الگوریتم کنترل VSL را برای به حداکثر رساندن رفت و آمد به صورت پیوسته (به منظور بهبود تراکم)، ایمنی (به منظور ارتقای ریسک تصادفات) و مزایای زیست محیطی در محیط وسایل نقلیه متصل به هم^۵، زمان کل سفر (TTT^۶) و زمان برخورد (TTC^۷) که برای اندازه گیری تحرک و ایمنی استفاده می شود، معرفی نمودند. نتایج پژوهش ها نشان داد که استفاده از سیستم VSL می تواند کاهش ۲۰ درصدی در TTT و بهبود ۶ تا ۱۱ درصدی در ایمنی و کاهش ۵ تا ۱۶ درصدی مصرف سوخت کل را به دست آورد.

تعدادی پژوهشگر، مدل کنترل جامع VSL را برای کاهش تأخیر سفر (به منظور بهبود تراکم) و احتمال خطرات بالقوه تصادفات در مناطق کاری (تعیین شده) در

1. Ajith Muralidharan, Roberto Horowitz

2. Noah J. Goodall

3. Junhua Wang a, Wenjing Xie a, Boya Liu a, Shou'en Fang, David R. Ragland

4. Bidoura Khondaker, Lina Kattan

5. Connected Vehicle Environment

6. Total Travel Time

7. Time to Collision

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

آزادراه بررسی نمودند. اهداف پژوهش آن‌ها، کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌وسیله کاهش تأخیر کل سفر و نرخ تصادفات بالقوه بود (لیو، لین، ونگ و یانگ^۱، ۲۰۱۷: ۵). بورو در پژوهش‌های خود دریافت که استفاده از VSL و اعمال مقررات به‌صورت جدی (استفاده از دوربین‌های ثبت تخلفات) باعث کاهش بسیاری در تعداد تصادفات (۲۸ درصد در طول ۱۸ ماه) می‌شود. تأثیر این امر نه تنها به تطبیق شرایط (آرام‌سازی) جریان ترافیک از طریق فاصله‌های طولانی‌تر کمک نمود، بلکه باعث کاهش تعداد تغییرات خط در هنگام شرایط متراکم شد (بورو^۲، ۱۹۹۷).

لی از VSL برای کاهش پتانسیل تصادفات استفاده نمود. به‌جای داشتن ۲ مکان برای تأثیر در سرعت ترافیک، ۱۲ مایل توسط VSL ۲۴ در هر دو قسمت بالادست و پایین‌دست برای معرفی VSL مورد بررسی قرار گرفت. همچنین محدودیت‌های سرعت کاهش، افزایش یا به‌طور هم‌زمان برای بررسی همه موارد احتمالی کاهش و افزایش می‌یابد (به ترتیب بالادست و پایین‌دست) (لی، هلینگا، ساکومانو^۳، ۲۰۰۴). تابلو محدودیت سرعت متغیر (VSL^۴)، سیستمی است شامل تابلوها (نشانه‌های) دینامیکی^۵ که در طول یک راه مستقر شده‌اند و از طریق سیستم‌های ارتباطی به یک مرکز مدیریت ترافیک متصل می‌باشند. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته می‌توان دریافت که در مکان‌های بسیار پر ازدحام سیستم‌های VSL قادر به کاهش پتانسیل تصادفات تا ۲۵ درصد می‌باشند. همچنین سیستم‌های VSL قادر به کاهش قابل توجه پتانسیل تصادفات در زمان‌های خلوت (سرعت بالا) می‌باشند؛ اما در زمان‌های پیک، این تأثیر جزئی خواهد بود.

1. Pu Lyu, Yongjie Lin, Lei Wang and Xianfeng Yang

2. P Borrough

3. Chris Lee, Bruce Hellinga, and Frank Saccomanno

4. Variable-Speed Limit Sign

5. Dynamic Message Signs (DMSs)

با توجه به نتایج مطالعات انجام گرفته، تأثیر سرعت‌های اعمالی توسط VSL در حجم‌های مختلف تقاضای ترافیک، طول شبکه و شرایط رعایت مقررات توسط رانندگان متفاوت است؛ همچنین بازده جریان ترافیک به‌طور قابل ملاحظه‌ای با توجه به کاهش TTT و مصرف سوخت و بهبود در ایمنی، هنگامی که از سیستم VSL استفاده می‌گردد، بهبود می‌یابد. بنابراین مهم است که قبل از تشکیل صف‌ها، جریان را هماهنگ نماییم. هشدار تشکیل صف همراه با سرعت پیشنهادی در این مرحله عمدتاً با هدف کاهش خطر تصادفات ثانویه در انتهای صف است که در آن، ترمز اتفاق می‌افتد. با توجه به مطالعات جهانی انجام گرفته بر اساس مدل‌های کشورهای دیگر که در آن‌ها رفتار رانندگان متفاوت‌تر از ایران می‌باشد و همچنین خلأ انجام پژوهش‌های مشابه بر اساس شرایط انسانی (از نظر پذیرش و رعایت قوانین) و محیطی، ما را بر آن داشت که این مطالعه را بر اساس شرایط رفتاری رانندگان از نظر پذیرش و رعایت قوانین و نحوه رانندگی در ایران کالیبره نموده و از نظر ترافیکی و محیط زیستی بدان بپردازیم. بدین ترتیب در این پژوهش با توجه به اینکه انتخاب محل تابلوی VSL به منظور افزایش اثرات و کارایی مورد اهمیت می‌باشد، با دریافت آمار تصادفات مسیر از دفتر ایمنی وزارت راه و شهرسازی به بررسی محل مناسب جهت استقرار تابلو با توجه به شرایط محیطی، رفتار رانندگان و... پرداخته شد.

روش

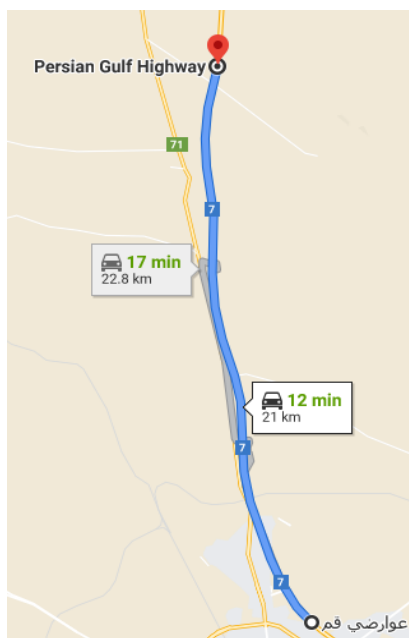
این مطالعه از نظر هدف و نوع، کاربردی و بر مبنای انجام تحلیل عملکرد مسیر، در دو حالت تجربی و تحلیلی در واقعیت امکان پذیر نیست؛ بهترین روش برای انجام این تحلیل، استفاده از روش شبیه‌سازی است؛ زیرا یکی از این دو حالت در وضع موجود قابل درک است، اما برای بررسی حالت دوم که در واقعیت وجود ندارد می‌توان ابتدا وضعیت موجود را شبیه‌سازی و به‌طور کامل کالیبره کرد و سپس روی مدل

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

ساخته‌شده، گزینه موردنظر را پیاده و نتایج آن‌ها را باهم مقایسه نمود. به این ترتیب می‌توان از طریق شبیه‌سازی وضع موجود یک ناحیه در یکی از نرم‌افزارهای ترافیکی و تطبیق کامل مدل شبیه‌سازی‌شده (کالیبره کردن) با واقعیت میدانی، هرگونه تغییر در وضعیت عرضه و تقاضا را قبل از اجرا در واقعیت روی مدل شبیه‌سازی اعمال نمود و نتایج آن را با وضعیت موجود مقایسه نمود.

ساخت مدل (با استفاده از نرم‌افزار ایمنان): اطلاعاتی که به‌عنوان ورودی مدل در محیط نرم‌افزار تعریف شده‌اند، عبارتند از:

- ۱- ترسیم فضای فیزیکی مسیر با استفاده از نقشه هوایی
- مسیر مورد مطالعه به طول ۲۱ کیلومتر از عوارضی قم تا رستوران مهتاب به سمت تهران با توجه به آمار تصادفات بالا انتخاب گردیده است.



شکل ۱. محدوده محل مورد مطالعه

۲- ویرایش مشخصات هندسی مسیر

جدول ۱. مشخصات هندسی مسیر

| نوع شانه راه | حداکثر سرعت مجاز مسیر | سرعت جریان آزاد | جداشدگی از ترافیک محلی | نوع منطقه | عرض شانه راه | عرض خطوط | تعداد خطوط | نوع راه |
|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|-----------|--------------|----------|------------|---------|
| شانه آسفاته | ۱۲۰ km/h | ۱۱۰ km/h | بله | هموار | ۱ m | ۳/۶۵ m | ۳ | آزادراه |

۳- تعریف مشخصات پایه‌ای وسایل نقلیه

جدول ۲. مشخصات وسیله نقلیه و نحوه رعایت قوانین توسط رانندگان

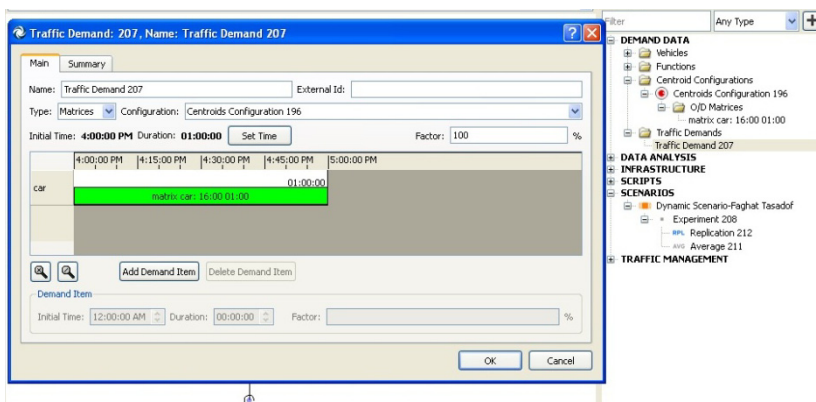
| نام | متوسط | انحراف | حداقل | حداکثر | واحد |
|--------------------------|-------|--------|-------|--------|------------------------|
| طول وسیله نقلیه | ۴ | ۰/۵ | ۳/۴ | ۴/۶ | متر |
| عرض وسیله نقلیه | ۲ | ۰ | ۲ | ۲ | متر |
| حداکثر سرعت | ۱۱۰ | ۱۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | کیلومتر در ساعت |
| حداکثر شتاب | ۲ | ۱ | ۱ | ۳ | متر/ثانیه ^۲ |
| شتاب نرمال کاهش | ۱۰ | ۵ | ۵ | ۱۵ | متر/ثانیه ^۲ |
| شتاب نرمال افزایش | ۱۰ | ۵ | ۵ | ۱۵ | متر/ثانیه ^۲ |
| پذیرش سرعت | ۱/۹ | ۰/۵ | ۱/۴ | ۲/۷ | بدون واحد |
| کمترین فاصله وسایل نقلیه | ۴ | ۱ | ۳ | ۵ | متر |
| پذیرش قوانین | ۷۰ | ۱۰ | ۶۰ | ۸۰ | درصد |

میزان حساسیت در تغییر ناگهانی خط ۱ در نظر گرفته شد.

۴- تعریف فازبندی مقطع انتخاب شده در مسیر و زمان بندی عبور: مقطع مورد نظر در ۳ فاز مورد بررسی قرار می گیرد که شامل مدل سازی و عبور جریان ترافیک از مسیر بدون وقوع تصادف، مدل سازی و عبور جریان ترافیک هنگام وقوع تصادف، انسداد مسیر و تشکیل صف، مدل سازی و عبور جریان ترافیک هنگام وقوع تصادف و انسداد مسیر با مدیریت و اعمال سیستم VSL در پایین دست مسیر است (با تعیین محل بهینه نصب تابلو VSL).

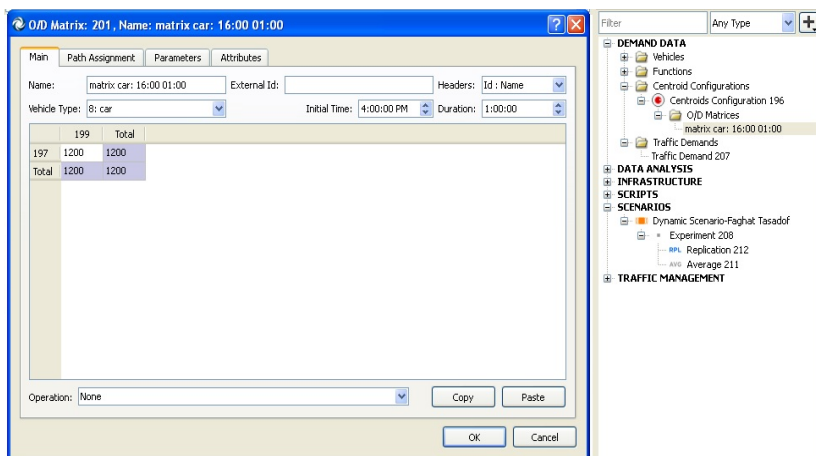
تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

مدت‌زمان مدل‌سازی ۱ ساعت می‌باشد و تمام شرایط شامل وقوع تصادف، عملیات امداد و بازگشایی مسیر در مدت‌زمان ۱ ساعت تعریف‌شده در مدل‌سازی به وقوع می‌پیوندد.



شکل ۲. تعریف زمان‌بندی عبور شامل طول چرخه و زمان کل در نرم‌افزار ایسمان

۵- تعریف تقاضای ترافیکی به تفکیک ماتریس مبدأ - مقصد انواع وسایل نقلیه میزان خودروهای عبوری در مسیر ۱۲۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت با توجه به متوسط آمار موجود در سالنامه آماری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای محاسبه و اعمال گردید.



شکل ۳. تعریف ماتریس مبدأ - مقصد در نرم‌افزار ایسمان

بررسی روش تجزیه و تحلیل مدل و انجام شبیه‌سازی: در ارتباط با نحوه تجزیه و تحلیل داده‌ها، دو گام اساسی پیموده شد:

۱- نرم‌افزار ایمنان بر اساس دو مدل اساسی تعقیب خودرو و مدل تغییر خط، مدل‌های شبیه‌سازی را می‌سازد. به منظور کالیبره نمودن مدل با استفاده از ضرایب توصیه شده در آیین‌نامه اصول کالیبراسیون نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک، دو مدل تعقیب خودرو و تغییر خط برای شرایط موجود اصلاح شدند.

* مدل تعقیب خودرو مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد:

- بر اساس تعداد وسیله نقلیه: حداکثر تعداد وسایل نقلیه برای تعقیب خودرو در دو خط در نظر گرفته شده است که برای مدل‌سازی تأثیر خطوط مجاور در مدل تعقیب خودرو استفاده می‌شود.

- بر اساس بیشترین فاصله: حداکثر فاصله با خودرو جلویی (برحسب متر) در مدل تعقیب خودرو در دو خط.

- بر اساس بیشترین اختلاف سرعت: بیشترین اختلاف سرعت (به کیلومتر در ساعت) بین یک خط و خط مجاور در مدل تعقیب خودرو در دو خط.

- بر اساس بیشترین اختلاف سرعت در رمپ: بیشترین اختلاف سرعت (به کیلومتر در ساعت) بین خط اصلی و خط روی رمپ در مدل تعقیب خودرو در دو خط.

- بر اساس اختلاف سرعت: در تعریف اختلاف سرعت می‌توان اختلاف مطلق یا نسبی را در نظر گرفت.

* مدل تغییر خط مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد:

- بر اساس درصد سبقت: نشان‌دهنده درصد سرعتی است که یک وسیله نقلیه تصمیم به سبقت می‌گیرد و مقدار

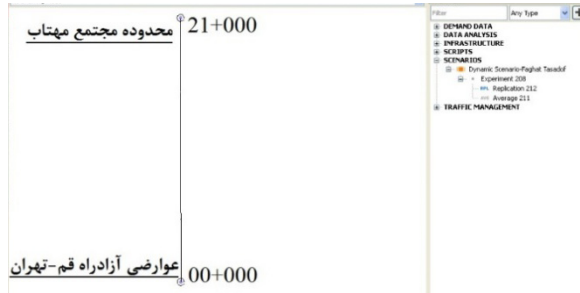
آن، بیشتر از صفر و کوچک‌تر مساوی با یک می‌باشد. این آیتم برای مدل‌سازی تصمیم سبقت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

۲- پس از ویرایش مشخصات مربوط به مدل‌های تجزیه و تحلیل نرم‌افزار، هرکدام از سناریوها برای مدت یک ساعت اختصاص یافت و به منظور بالارفتن دقت مدل با تعریف ۳ دقیقه به‌عنوان زمان پرشدن (گرم‌شدن)^۱ از اتلاف زمان شبیه‌سازی در ابتدای شبیه‌سازی جلوگیری شد.

انتخاب موقعیت مورد مطالعه: آزادراه قم - تهران به‌عنوان یکی از راه‌های مهم و ترانزیتی کشور به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. پارامترهای اساسی دیگری همچون همواری مسیر، میزان چگالی و تراکم خودروهای عبوری و نیز امکان انعطاف سرعت با توجه به عرض مسیر و تعداد خطوط عبوری مدنظر قرار گرفت، لیکن از میان دو آزادراه تهران - قم و تهران - کرج که دارای شرایط مذکور هستند، بنا به اشباع مطالعات و تعدد بالای پژوهش‌ها در مسیر تهران - کرج، وجود تعداد ۲ Detector های فعال بیشتر در محور قم، ماهیت بین‌شهری سفرهای آزادراه تهران - قم، امکان انعطاف سرعت در مسیر تهران - قم با حداکثر سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و نرمال‌بودن تراکم و چگالی خودروهای عبوری در این محور، محور قم - تهران انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. محدوده موردنظر از ابتدای عوارضی قم تا ۲۱ کیلومتر به‌سمت تهران (مجتمع خدماتی مهتاب) را در بر می‌گیرد.

با توجه به بالا بودن میانگین تصادفات در ۲۱ کیلومتر مسیر مورد مطالعه نسبت به میانگین تصادفات کل مسیر، اهمیت مکانی این محل مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۴. ترسیم محور آزادراه تهران - قم در نرم افزار ایسمان

جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های ترافیکی حجم تردد و ترافیک توسط DETECTOR های نصب‌شده در دو نقطه عوارضی قم و مجتمع خدماتی مهتاب جمع‌آوری و مدل گردیده است. حجم تردد ساعتی از رستوران مهتاب و حجم تردد ساعتی از عوارضی قم در هر ساعت تعداد وسایل نقلیه عبوری به‌طور میانگین ۱۲۰۰ در نظر گرفته شده است. داده‌های هندسی شامل عرض راه، تعداد خطوط، عرض خطوط و... بوده و محور مستقیم با شیب صفر و عرض راه استاندارد در نظر گرفته شده است. برداشت اطلاعات محور موردنظر به‌صورت بازه‌های یک‌ساعتی از ۱۳۹۶/۰۶/۰۱ تا ۱۳۹۶/۰۷/۰۱ (دارای بیشترین متوسط تعداد تصادفات سالانه) انجام گرفته و حجم ساعت اوج از میان اطلاعات برداشت‌شده استخراج گردید. علت انتخاب بازه موردنظر، پیداکردن روند جریان ترافیک به‌منظور مدل‌سازی ساعات عادی و اوج می باشد.

شبیه‌سازی وضع موجود: یکی از مهم‌ترین مراحل در انجام پژوهش، شبیه‌سازی وضع موجود است؛ چراکه میزان دقت خروجی حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای موردنظر کاملاً به دقت شبیه‌سازی وضع موجود بستگی دارد.

سناریوی شماره ۱، وضع موجود بدون وقوع تصادف: در این سناریو، اطلاعات شمارش حجم مربوط به وسایل نقلیه سبک شامل سواری شخصی و تاکسی و

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

وسایل نقلیه سنگین شامل ناوگان اتوبوس‌رانی در سناریو (به‌صورت هم‌سنگ با سواری) وارد شده است.

سناریوی شماره ۲، وضع موجود با فرض وقوع تصادف: در این سناریو، اطلاعات شمارش حجم مانند سناریوی قبل محاسبه می‌شود. روند شبیه‌سازی در مدت زمان ۱ ساعت به شرح زیر است:

❖ هنگام وقوع تصادف، سه حالت انسداد کل مسیر، انسداد ۲ خط و انسداد ۱ خط برای مسیر در نظر گرفته شده است.

❖ این سناریو از ساعت ۴ الی ۵ (ساعت فرضی در نرم‌افزار بدون تأثیر در مدل‌سازی) اتفاق افتاده و مسیر از ساعت ۴:۱۵ الی ۴:۳۵ در اثر وقوع تصادف به‌کلی در ۳ خط مسدود می‌گردد. سپس ساعت ۴:۳۵ یکی از خطوط توسط عوامل امدادی بازگشایی شده و در ساعت ۴:۴۰ خط بعدی و در ۴:۴۵ کلیه خطوط مسدود شده در مسیر بازگشایی می‌گردند.

❖ در جهت شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر شرایط می‌بایست سناریوی وقوع تصادف را مشابه شرایط واقعی در نظر گرفت؛ بدین منظور، ۳ حالت برای وضعیت مسیر هنگام وقوع تصادف در نظر گرفته شده است. تصادف در ۱۵ کیلومتری از ابتدای مسیر موردنظر (عوارضی قم - تهران) به وقوع می‌پیوندد. پس از وقوع تصادف در نقطه ذکر شده از مسیر، ۳ خط عبوری در نرم‌افزار به مدت ۲۰ دقیقه مسدود می‌گردند. پس از ۲۰ دقیقه از انسداد مسیر، یک خط از مسیر مطابق تعریف بازگشایی می‌گردد. سپس در ۵ دقیقه بعدی، خط بعدی و به‌همراه آن در ساعت ۴:۴۵ طبق تعریف سناریو، مسیر پس از ۳۰ دقیقه انسداد بازگشایی می‌گردد. در جهت هرچه واقعی‌تر شدن مدل شبیه‌سازی شده، ناحیه‌ای در محل تصادف تعیین گردیده تا حداکثر سرعت مجاز عبوری از آن ۵۰ کیلومتر در ساعت باشد؛ زیرا طبق مشاهدات میدانی، سرعت عبوری وسایل نقلیه از کنار محل تصادفات آرام است.

یافته‌ها

یافته‌های شبیه‌سازی برای سناریوهای وقوع تصادف و عدم وقوع آن: در پایان شبیه‌سازی این ۲ سناریو، خلاصه شاخص‌های اساسی شامل تأخیر، سرعت، زمان سفر، میزان توقف‌ها، تراکم و میزان تولید آلاینده‌ها در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌گردد، پس از وقوع تصادف میزان تأخیر ۲۳۴۳٪ افزایش، سرعت ۲۳/۶۵٪ کاهش، زمان سفر ۵۲/۳۲٪ افزایش، تراکم ۵۲/۲۷٪ افزایش و میزان تولید آلاینده‌ها ۳۸/۷۶٪ افزایش می‌یابد.

جدول ۳. مقادیر پدمست‌آمده شاخص‌های اساسی برای محور در دو سناریوی مورد تعریف

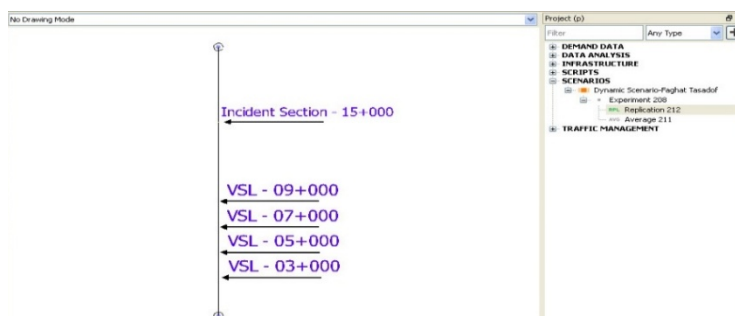
| سناریوی دوم | سناریوی اول | |
|-------------|-------------|-------------------------------------|
| ۱۸/۳۲ | ۰/۷۵ | تأخیر (ثانیه/کیلومتر) |
| ۸۲ | ۱۰۷/۴ | سرعت (کیلومتر/ساعت) |
| ۵۱/۱۲ | ۳۳/۵۶ | زمان سفر (ثانیه/کیلومتر) |
| ۰/۱۵ | ۰ | میزان توقف‌ها (وسیله نقلیه/کیلومتر) |
| ۵/۶۸ | ۳/۷۳ | تراکم (وسیله نقلیه/کیلومتر) |
| ۱۶۷/۵۹ | ۱۲۰/۷۸ | میزان تولید آلاینده‌ها (کیلوگرم) |

تحلیل حساسیت: در این بخش به منظور مقایسه عملکرد کارایی VSL در برابر شرایط مختلف و بررسی درستی محل قرارگیری تابلو کالیبراسیون صحیح محل تصادف و فاصله مناسب قرارگیری تابلو VSL، میزان سرعت تعیین شده جهت نمایش روی تابلوی VSL، تغییر میزان حجم ترافیک و تحلیل حساسیت انجام گرفته است. همان‌طور که از نتایج مقایسه‌ای در جداول مشاهده می‌گردد، میزان اپتیمم مقادیر اعمال شده در مدل برای پارامتر سرعت، ۷۰ کیلومتر بر ساعت و برای فاصله قرارگیری VSL از محل تصادف کیلومتر ۵ (۱۰ کیلومتر تا محل تصادف) می‌باشد.

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

جدول ۴. تحلیل حساسیت در صورت تغییر محل تابلوی VSI

| زمان سفر | توقف‌ها | زمان توقف‌ها | سرعت | Nox | HC | CO | تراکم | تأخیر | محل تابلوی VSL |
|----------|---------|--------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|----------------|
| ۵۰/۸۳ | ۰/۱۶ | ۱۴/۹۱ | ۸۲/۵۵ | ۲/۴۵ | ۱۲/۰۴ | ۱۵۱/۶ | ۵/۶ | ۱۷/۹۲ | ۰۳+۰۰۰ کیلومتر |
| ۵۰/۵۴ | ۰/۱۳ | ۱۴/۷۸ | ۸۲/۷۶ | ۲/۴۴ | ۱۲/۰۲ | ۱۵۰/۸۹ | ۵/۶ | ۱۷/۷۳ | ۰۵+۰۰۰ کیلومتر |
| ۵۱/۰۱ | ۰/۱۶ | ۱۵/۲۵ | ۸۲/۱۱ | ۲/۴۸ | ۱۲/۱۱ | ۱۵۲/۵ | ۵/۷ | ۱۸/۲ | ۰۷+۰۰۰ کیلومتر |
| ۵۰/۸۶ | ۰/۱۶ | ۱۵/۲۱ | ۸۲/۴ | ۲/۴۵ | ۱۲/۱ | ۱۵۱/۳ | ۵/۷ | ۱۸/۰۵ | ۰۹+۰۰۰ کیلومتر |



شکل ۵. نحوه تحلیل حساسیت تغییر محل تابلوی VSL در محیط ایمنان

جدول ۵. تحلیل حساسیت در صورت تغییر سرعت تابلوی VSI

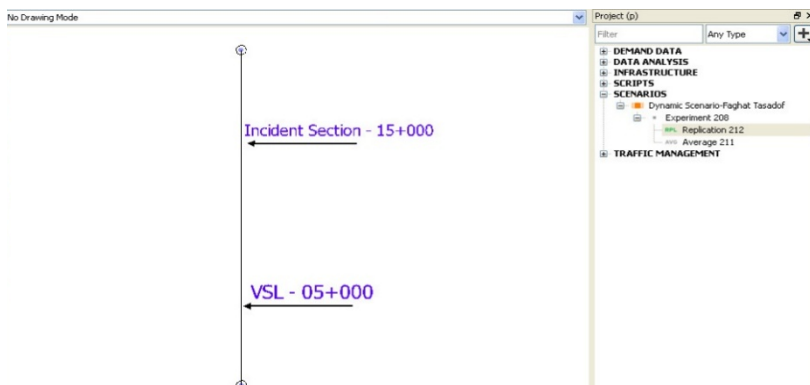
| زمان سفر | توقف‌ها | زمان توقف‌ها | سرعت | Nox | HC | CO | تراکم | تأخیر | مقادیر سرعت |
|----------|---------|--------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------------------|
| ۵۱/۰۶ | ۰/۱۶ | ۱۴/۹ | ۸۲/۱ | ۲/۵ | ۱۲/۱ | ۱۵۳/۱ | ۵/۸ | ۱۸/۲۵ | ۶۰ کیلومتر بر ساعت |
| ۵۰/۵۴ | ۰/۱۳ | ۱۴/۷۸ | ۸۲/۷۶ | ۲/۴۴ | ۱۲/۰۲ | ۱۵۰/۸۹ | ۵/۶ | ۱۷/۷۳ | ۷۰ کیلومتر بر ساعت |
| ۵۰/۸۲ | ۰/۱۵ | ۱۵/۲۵ | ۸۲/۵ | ۲/۴۶ | ۱۲/۱ | ۱۵۱/۵ | ۵/۷ | ۱۸/۰۲ | ۸۰ کیلومتر بر ساعت |
| ۵۰/۹۵ | ۰/۱۶ | ۱۵/۳ | ۸۲/۳ | ۲/۴۸ | ۱۲/۱ | ۱۵۲ | ۵/۷ | ۱۸/۱۴ | ۹۰ کیلومتر بر ساعت |

جدول ۶. تحلیل حساسیت در صورت تغییر حجم

| مقادیر حجم | تأخیر | تراکم | CO | HC | Nox | سرعت | زمان توقفها | زمان توقفها | زمان سفر |
|--------------------------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------------|-------------|----------|
| ۵۰ درصد ماتریس با VSL | ۱۴/۶۸ | ۲/۶ | ۶۸/۹ | ۵/۶ | ۱/۱ | ۸۷/۱ | ۱۳/۱ | ۰/۰۸ | ۴۷/۶ |
| ۵۰ درصد ماتریس بدون VSL | ۱۴/۷۹ | ۲/۸ | ۷۵/۳ | ۶ | ۱/۲ | ۸۶/۸ | ۱۳/۳ | ۰/۰۷ | ۴۷/۷ |
| ۷۵ درصد ماتریس با VSL | ۱۶/۶۱ | ۴/۱ | ۱۰۸/۸ | ۸/۸ | ۱/۷ | ۸۴/۶ | ۱۴/۴ | ۰/۱۳ | ۴۹/۴۴ |
| ۷۵ درصد ماتریس بدون VSL | ۱۶/۸۲ | ۴/۴ | ۱۱۶/۴ | ۹/۴ | ۱/۹ | ۸۴/۴ | ۱۴/۶ | ۰/۱۲ | ۴۹/۶۵ |
| ۱۰۰ درصد ماتریس با VSL | ۱۷/۷۳ | ۵/۶ | ۱۵۰/۸۹ | ۱۲/۰۲ | ۲/۴۴ | ۸۲/۷۶ | ۱۴/۷۸ | ۰/۱۳ | ۵۰/۵۴ |
| ۱۰۰ درصد ماتریس بدون VSL | ۱۸/۳۲ | ۵/۷ | ۱۵۲/۹ | ۱۲/۲ | ۲/۵ | ۸۲ | ۱۵/۴ | ۰/۱۶ | ۵۱/۱۲ |
| ۱۲۵ درصد ماتریس با VSL | ۲۰/۲۴ | ۷/۴ | ۲۰۰/۱ | ۱۵/۸ | ۳/۳۲ | ۷۹/۵ | ۱۶/۵۱ | ۰/۲ | ۵۳/۰۴ |
| ۱۲۵ درصد ماتریس بدون VSL | ۲۰/۵۹ | ۷/۴ | ۲۰۱/۳ | ۱۵/۹ | ۳/۳۶ | ۷۹/۱۵ | ۱۷/۰۲ | ۰/۲ | ۵۳/۰۴ |
| ۱۵۰ درصد ماتریس با VSL | ۲۱/۶۷ | ۹/۱ | ۲۵۰/۱ | ۱۹/۵ | ۴/۲۲ | ۷۷/۷ | ۱۷/۴۴ | ۰/۲۴ | ۵۴/۴۶ |
| ۱۵۰ درصد ماتریس بدون VSL | ۲۱/۵۷ | ۹/۱ | ۲۴۸/۹ | ۱۹/۴۶ | ۴/۲ | ۷۷/۸ | ۱۷/۴۱ | ۰/۲۲ | ۵۴/۳۸ |

شبیه‌سازی سناریوی وقوع تصادف و استفاده از سیستم VSL: سناریوی این مرحله از شبیه‌سازی مربوط به استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر است. با توجه به اینکه شرایط شبیه‌سازی در سناریوی وقوع تصادف با این سناریو مشابه می‌باشد، تنها نحوه مدل‌سازی VSL را در این سناریو تشریح می‌نماییم.

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها



شکل ۶. تصویر مدل شبیه‌سازی‌شده در حالت استفاده از سیستم VSL

با توجه به شکل ۶ و آنالیز حساسیت صورت گرفته در جهت جانمایی و تغییرات سرعت تابلوی VSL، ۵ کیلومتر جهت جانمایی این تابلو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت جهت نمایش روی آن انتخاب گردید. این تابلو، ۱۰ کیلومتر با محل حادثه فاصله داشته و حداکثر میزان سرعت مجاز را به میزان ۵۰ کیلومتر بر ساعت کاهش می‌دهد. اعمال کاهش سرعت در تابلوی VSL با توجه به شرایط مدل‌سازی در ساعت ۱۷:۰۴ دقیقه (۲ دقیقه پس از وقوع تصادف) فعال شده و حداکثر سرعت مجاز ۷۰ کیلومتر بر ساعت روی آن برای همه انواع وسیله نقلیه اعمال می‌گردد.

مقایسه سناریوی وقوع تصادف بدون استفاده از سیستم VSL و سناریوی تعریف‌شده بر اساس استفاده از این سیستم در ادامه، جزئیات این مقایسه به تفکیک هریک از شاخص‌ها با یکدیگر مقایسه و درصد تغییرات بیان گردیده است.

جدول ۷. مقادیر تأخیر محاسبه‌شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابلوی VSL

| | | |
|--------|--------------|----------------------------|
| ۱۸،۳۲ | VSL بدون | شاخص تأخیر (ثانیه/کیلومتر) |
| ۱۷،۷۳ | VSL با | |
| ٪-۳،۲۲ | درصد تغییرات | |

جدول ۸. مقادیر چگالی محاسبه شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابوی VSL

| | | |
|--------|----------|----------------------------------|
| ۵/۷ | بدون VSL | شاخص چگالی (وسیله نقلیه/کیلومتر) |
| ۵/۶ | VSL با | |
| ٪-۱/۷۵ | | درصد تغییرات |

جدول ۹. مقادیر سرعت محاسبه شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابوی VSL

| | | |
|-------|----------|--------------------------|
| ۸۲ | بدون VSL | شاخص سرعت (کیلومتر/ساعت) |
| ۸۲/۸۷ | VSL با | |
| ٪۰/۹۴ | | درصد تغییرات |

جدول ۱۰. مقادیر زمان سفر محاسبه شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابوی VSL

| | | |
|--------|----------|-------------------------------|
| ۵۱/۱۳ | بدون VSL | شاخص زمان سفر (ثانیه/کیلومتر) |
| ۵۰/۵۴ | VSL با | |
| ٪-۱/۱۵ | | درصد تغییرات |

جدول ۱۱. مقادیر توقف های محاسبه شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابوی VSL

| | | |
|---------|----------|---------------------------------|
| ۰/۱۶ | بدون VSL | شاخص توقف (وسیله نقلیه/کیلومتر) |
| ۰/۱۳ | VSL با | |
| ٪-۱۸/۷۵ | | درصد تغییرات |

جدول ۱۲. مقادیر تولید آلاینده های محاسبه شده برای ۲ سناریوی با و بدون استفاده از تابوی VSL

| | | |
|--------|----------|---|
| ۱۶۷/۶ | بدون VSL | شاخص تولید آلاینده ها (CO, Nox, HC) (کیلوگرم) |
| ۱۶۵/۳ | VSL با | |
| ٪-۱/۳۷ | | درصد تغییرات |

بحث و نتیجه گیری

در مطالعات مرتبط با مسائل بهینه سازی، ایمنی و... در برنامه ریزی حمل و نقل و همچنین پیشینه پژوهش، مزایای بسیاری از سیستم های حمل و نقل هوشمند برشمرده

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

شده است؛ با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش که نتایج مطالعات پیشین را تأیید می‌نماید، درمی‌یابیم که استفاده و پیاده‌سازی سیستم VSL موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی کل شامل کاهش زمان سفر، تصادفات، کاهش توقف‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی و... می‌شود؛ بدین منظور پس از شناخت مسیر و بررسی میزان تصادفات و همچنین مدل‌نمودن شرایط رفتاری رانندگان در ایران به بررسی نتایج پرداخته شد.

در صورت استفاده از سیستم VSL به‌تنهایی (و نه به‌صورت VSL‌های ترکیبی) در کل مسیر ذکرشده شاهد کاهش ۴ درصدی در میزان تأخیر، ۲ درصدی در میزان تولید آلاینده‌ها، ۱/۵ درصدی زمان سفر و ۱۹ درصدی در میزان توقف‌ها در مدت‌زمان مدل‌سازی (۱ ساعت) خواهیم بود. نتایج ذکرشده در این پژوهش مطابق مطالعات خوندان و خاتان (۲۰۱۵) و لیو و همکاران (۲۰۱۷) کاهش زمان سفر کل، بهبود در ایمنی و کاهش مصرف سوخت، همچنین کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌وسیله کاهش تأخیر کل سفر و نرخ تصادفات را در صورت استفاده از سیستم VSL به دست می‌آورد. مطابق پژوهش‌های انجام‌شده توسط عبدالتری و همکاران (۲۰۰۷) نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این واقعیت است که سیستم‌های VSL تنها کاهش قابل توجهی در احتمال تصادف را برای شرایط غیرمترکم (قبل از تشکیل صف) فراهم می‌کنند و در شرایط مترکم (پس از انسداد مسیر و تشکیل صف) مزیت قابل توجهی را ارائه نمی‌دهند.

اقدامات مدیریت ترافیک، زمانی که اضمحلال در ترافیک اتفاق افتاده است نمی‌تواند روی وضعیت صف تأثیری بگذارد. وقتی سرعت پس از تشکیل صف کاهش پیدا می‌کند، پیشاپیش برای جلوگیری از اضمحلال (فروپاشی) در ترافیک خیلی دیر شده است. بنابراین مهم است که قبل از تشکیل صف‌ها، جریان را هماهنگ نماییم. هشدار تشکیل صف همراه با سرعت پیشنهادی در این مرحله عمدتاً

با هدف کاهش خطر تصادفات ثانویه در انتهای صف است که در آن، ترمز اتفاق می‌افتد که در پژوهش بدان توجه شده است و مطالعات کرنر و بوریس (۲۰۱۳) نیز این موضوع را تصدیق می‌نمایند.

همچنین با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان دریافت که اگر میزان ترافیک در سطوح مناسبی نگهداری شود، تولید آلاینده‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. علاوه بر این، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول توقف و شرایط ترافیک زیاد، بیشتر از شرایط جریان آزاد خواهد بود که نتایج پژوهش لیو و همکاران (۲۰۱۷) و سوریگوئره و همکاران (۲۰۱۳) را تأیید می‌نمایند.

پژوهش‌های بسیاری در جهان، تأثیرات مثبت سیستم‌های اعمال مقررات پویا^۱ در مقایسه با حالت ایستا^۲ را در شرایط مختلف بررسی نموده‌اند. نتایج حاصل از مدل‌سازی در این پژوهش با توجه به هزینه راه‌اندازی پایین سیستم VSL بیانگر تأثیرات مثبتی در شاخص‌های تأخیر، زمان سفر، توقف و تولید آلاینده‌ها می‌باشد و نتایج مطالعات پاپامیشیل و همکاران (۲۰۰۸) را تأیید می‌نمایند.

از آنجاکه افزایش میزان بهره‌وری در تمامی سیستم‌ها دارای اهمیت است، از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از این سیستم به‌خصوص در راه‌های مهم ترانزیتی و متفاوت از نظر شرایط آب‌وهوایی، نتایج مطلوبی را در خصوص افزایش ایمنی و بهره‌وری با توجه به کاهش میزان زمان سفر، مصرف سوخت و کاهش تصادفات ثانویه شاهد خواهیم بود.

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

پیشنهادها

با توجه به لزوم و خواست نهادهای متولی در جهت کاهش و کنترل سرعت در مسیرهای برون‌شهری، مخصوصاً در نزدیکی نقاط حادثه‌خیز، یافته‌های این پژوهش با توجه به هزینه راه‌اندازی پایین در مقایسه با هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از وقوع تصادفات می‌تواند این نهادها را در جهت استفاده از سیستم مذکور هرچه بیشتر ترغیب نماید.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی به شرح زیر اعلام می‌گردد:

- تحلیل و ارزیابی تأثیرات استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر ترکیبی متصل به هم (Integrated VSL) در پارامترهای ترافیکی هنگام وقوع تصادفات رانندگی؛

- مقایسه و محاسبه مزایای اقتصادی استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت مجاز متغیر در مسیرهای برون‌شهری؛

- طراحی الگوریتم جانمایی تابلوهای VSL با توجه به نقاط حادثه‌خیز در راه‌های برون‌شهری؛

- تحلیل و ارزیابی میزان کاهش تصادفات ثانویه با توجه به پیاده‌سازی سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در آزادراه برون‌شهری.

سپاس‌گزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع‌شده در دانشکده فنی و مهندس دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران استخراج گردیده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مدیریت، معاونین و کارشناسان مرکز تدوین مقررات ایمنی حمل‌ونقل، پدافند غیرعامل و مدیریت بحران معاونت حمل‌ونقل و وزارت راه و شهرسازی، مسئولان پژوهشی دانشکده فنی و

مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران و هیئت داوران پایان نامه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری رساندند، اعلام نمایند.

منابع

- ضامیان، حسن. (۱۳۹۱). ارزیابی عملکرد تابلوهای سرعت متغیر در ارتقای ایمنی راه‌های کشور (مطالعه موردی محور هراز). یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، civilica.com/doc/155029
- مرادی، حمید؛ برزگر گنجی، محمد مهدی. (۱۳۹۰). مقایسه مطالعات ارزیابی عملکرد تابلوهای سرعت مجاز متغیر VSL بر نرخ تصادفات. دومین کنفرانس ملی تصادفات جاده‌ای، سوانح ریلی و هوایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، civilica.com/doc/132616
- دیواندری، حسن؛ موسوی، ابوذر. (۱۳۹۸). ارائه مدل تأثیر انجام اقدامات ایمنی کم هزینه بر شدت و تعداد حوادث ترافیکی مطالعه موردی: (محور ملایر - جوکار). فصلنامه علمی راهور، سال هشتم، (۲۹)، ۲۳۱-۲۵۷، talar.jrl.police.ir/issue_3546_12491.html
- عصاریان‌نژاد، حسین؛ مهری، تقی. (۱۳۹۵). بررسی نقش سامانه‌های هوشمند در کاهش تلفات انسانی در بزرگراه‌های شهر تهران. فصلنامه علمی راهور، سال پنجم، (۱۸)، ۳۷-۷۳، talar.jrl.police.ir/issue_2046_2049.html
- بهزادی، غلامعلی؛ بهزاد، رضا؛ حسن‌پور؛ محمدزمان؛ بابائی دهکردی، حمید. (۱۳۹۲). مدیریت ترافیک و اعمال بهتر قوانین با استفاده از تابلوهای سرعت مجاز متغیر (VSL). سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک، civilica.com/doc/259703
- مهماندار، محمدرضا؛ حسن‌پور، محمدزمان؛ بابائی دهکردی، حمید؛ جعفریان، محمدحسن. (۱۳۹۴). اعمال بهتر قوانین با مکان‌یابی تابلوهای سیستم محدودیت

تأثیر استفاده از سیستم کنترل سرعت مجاز متغیر در افزایش بهره‌وری حمل‌ونقل در آزادراه‌ها

سرعت متغیر بر اساس عوامل متغیر راه (Variable Speed Limits). چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، معاونت و سازمان حمل‌ونقل ترافیک، civilica.com/doc/419737

- Abdel-Aty M., J. Dilmore, and A. Dhindsa. (2006). Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident Anal. Prev.*, vol. 38, no. 2, pp. 335–345. doi:10.1016/j.aap.2005.10.010.
- Abdel-Aty, M., Dhindsa, A. (2007). Coordinated use of variable speed limits and ramp metering for improving safety on congested freeways. In: *86th TRB Annual Meeting*, Washington, DC. trid.trb.org/view/800882.
- Borrough, P. (1997). Variable Speed Limits Reduce Crashes Significantly in the U.K. *The Urban Transportation Monitor*, March 14. www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/pubs.cfm.
- Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., and Messmer, A. (2010). Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering. *Transp. Sci.*, 44(2), 238–253. doi.org/10.1287/trsc.1090.0314
- Castro, A.G. Monzon, A. (2013). Variable speed limits. Review and development of an aggregate indicator based on floating car data. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'13)*, Riga, Latvia, pp. 117–127. <https://core.ac.uk/download/pdf/148668721.pdf>.
- Goodall, N.J. (2017). Probability of secondary crash occurrence on freeways with the use of private-sector speed data. *Transp. Res. Rec.* 2635, 11–18. doi.org/10.3141/2635-02.
- Grumert, E., Ma, X., Tapani, A. (2015). Analysis of a cooperative variable speed limit system using microscopic traffic simulation. *Transp. Res. Part C* 52, 173–186. doi:10.1016/j.trc.2014.11.004.
- Hegyi, A., De Schutter, B., Hellendoorn, J. (2005). Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 6 (1), 102–112. doi: 10.1109/TITS.2004.842408.
- Kerner, Boris S. (2013). *Fundamental Empirical Features of Traffic Breakdown*. TEC. trid.trb.org/view/1251641.
- Khondaker, B., Kattan, L. (2015). Variable speed limit: a microscopic analysis in a connected vehicle environment. *Transp. Res. Part C: Emerg.*

Technol. 58, 146–159. doi.org/10.1016/j.trc.2015.07.014.

– Lee, C., and Abdel-Aty, M. (2008). Testing effects of warning messages and variable speed limits on driver behavior using driving simulator. *Transportation Research Record 2069, Transportation Research Board, Washington, DC*, 55–64. doi.org/10.3141/2069-08.

– Lee, C., Hellinga, B., Saccomanno, F. (2004). Assessing safety benefits of variable speed limits. In: *Presented at the 83rd TRB Annual Meeting, (Paper No. 04-4835)*. doi.org/10.3141/1897-24.

– Lee, J., Park, B., Malakorn, K., So, J. (2013). Sustainability assessments of cooperative vehicle intersection control at an urban corridor. *Transport. Res. Part C* 32, 193–206. doi:10.1016/j.trc.2012.09.004.

– Lin P. W., K. P. Kang, and G. L. Chang. (2004). Exploring the effectiveness of variable speed limit controls on highway work-zone operations. *J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 155–168. doi.org/10.1080/15472450490492851.

– Lyu, P., Lin, Y., Wang, L., Yang, X. (2017). Variable speed limit control for delay and crash reductions at freeway work zone area. *J. Transp. Eng., Part A: Systems*. 143 (12), 04017062. doi:10.1061/JTEPBS.0000099.

– McMurtry, T., Saito, M., Riffkin, M., and Heath, S. (2009). Variable speed limit signs: Effects on speed and speed variation in work zones. Paper No. 09-0486, *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC*.

https://www.workzonesafety.org/files/documents/database_documents/Publication9947.pdf

– Muralidharan and R. Horowitz. (2015). Computationally efficient model predictive control of freeway networks. *Transp. Res. Part C, Emerg. Technol.*, vol. 58, pp. 532–553. doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.029

– Nissan, A. (2007). Evaluation of Impacts of the Motorway Control System (MCS) in Stockholm. TRITA-TEC-RR 07-005, *Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*. (16) 100-109. [https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-impacts-of-the-motorway-control-Nissan-](https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-impacts-of-the-motorway-control-Nissan-Bang/cc4fee1b6b1f792abeb4ef09113a154fab3b423f)

[Bang/cc4fee1b6b1f792abeb4ef09113a154fab3b423f](https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-impacts-of-the-motorway-control-Nissan-Bang/cc4fee1b6b1f792abeb4ef09113a154fab3b423f).

– Papamichail, I., Kampitaki, K., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2008). Integrated ramp metering and variable speed limit control of freeway traffic flow. In: *17th IFAC World Congress, Seoul, Korea*. doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02384

– Park, B.K., Yadlapati, S.S. (2004). Development and testing of variable speed limit logics at work zones using simulation. In: *Proceedings of 82nd*

- TRB Annual Meeting*, Washington, DC.
doi.org/10.1080/15472450490492851.
- Pei-Wei, L., Kyeong-Pyo, K., Gang-Len, G. (2004). Exploring the effectiveness of variable speed limit controls on highway work-zone operations. *J. Intell. Transport. Syst.* 8 (3), 155–168. doi.org/10.1080/15472450490492851.
- Smulders, S. (1990). Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transport. Res. Part B: Methodology.* 24 (2), 111–132. doi.org/10.1016/0191-2615(90)90023-R.
- Soriguera, F., Torné, J.M., Rosas, D. (2013). Assessment of dynamic speed limit management on metropolitan freeways. *J. Intell. Transport. Syst.: Technol.Plann. Oper.* 17 (1), 78–90. doi.org/10.1080/15472450.2012.719455.
- Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., and Vu, P. (2005). The effect of variable message and speed limit signs on mean speeds and speed deviations. *Int. J. Veh. Inf. Commun. Syst.*, 1(1–2), 69–87. doi:10.1504/IJVICS.2005.007586.
- Wang, J., Xie, W., Liu, B., Fang, S., Ragland, D.R. (2016). Identification of freeway secondary accidents with traffic shock wave detected by loop detectors. *Safety. Sci.* 87, 195–201. doi.org/10.1016/j.ssci.2016.04.015.
- Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, H., Breunese, E. (2010). Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control. In: Proceedings of the American Control Conference, *St. Louis, Missouri*, pp. 5392–5397. doi: 10.1109/ACC.2009.5159942