مدیریت سرعت در شرایط نامساعد جوی:
مروری بر رویکردها و ارائه الگوی تلفیقی

مقاله علمی - مروری

*مجید حبیبی نوخندان (نویسنده مسئول)، دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
محمد رضا میری قلعه نوی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mhabibi@rimas.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه۲۵۲-۲۴۱

چکیده

مدیریت سرعت در شرایط نامساعد جوی یکی از چالش‌های اساسی در ایمنی راه‌های برون‌شهری است. سالانه هزاران فقره تصادف جاده‌ای در کشورهای مختلف به دلیل عدم تطابق سرعت با شرایط جوی رخ می‌دهد که به تلفات جانی و خسارات مالی سنگین می‌انجامد. در این مقاله، رویکردهای گوناگون مدیریت سرعت در شرایط آب‌وهوایی نامساعد شامل سیستم‌های حد سرعت فصلی، سیستم‌های حد سرعت متغیر متعارف (VSL) و نسل جدید سیستم‌های حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به وضع هوا (WRVSL) بر پایه مرور منابع بررسی و مقایسه شده است. تجربه فنلاند در کاهش ۲۰ کیلومتر بر ساعتی سرعت زمستانی جاده‌های روستایی، کاهش قابل‌توجه تصادفات را در سطوح یخ‌زده و برفی نشان داده است؛ با این حال، محدودیت اصلی سیستم‌های فصلی، ناتوانی در پاسخ به تغییرات لحظه‌ای شرایط جوی است. یافته‌های مرور حاضر نشان می‌دهد در شرایط جوی نامساعد، افزون بر کاهش سرعت متوسط، پراکندگی سرعت میان رانندگان نیز به‌شدت افزایش می‌یابد که خود عاملی کلیدی در بروز تصادفات زنجیره‌ای است. سیستم‌های WRVSL مبتنی بر نظریه قابلیت‌اطمینان می‌توانند با تعیین سرعت‌هایی که هم ایمن و هم برای رانندگان قابل‌قبول باشند، این چالش را مدیریت کنند. بر پایه یافته‌های این مطالعه، مدل تلفیقی حداکثر سرعت هوشمند فصلی ترکیبی از چارچوب فصلی با منطق واکنش‌گرا به شرایط لحظه‌ای به‌عنوان چارچوبی مفهومی و راهکاری بالقوه برای جاده‌های برون‌شهری کشور پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حد سرعت متغیر، مدیریت سرعت، شرایط نامساعد جوی، ایمنی راه‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند

۱-مقدمه

ایمنی راه‌ها یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع مدرن است و سالانه هزینه‌های هنگفتی را به سیستم‌های بهداشت، بیمه و اقتصاد کشورها تحمیل می‌کند. بر اساس آمار سازمان جهانی بهداشت، سالانه بیش از ۱,۳ میلیون نفر در تصادفات جاده‌ای جان خود را از دست می‌دهند و ۲۰ تا ۵۰ میلیون نفر نیز دچار مصدومیت می‌شوند. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تصادفات جاده‌ای، سرعت غیرمجاز یا نامتناسب با شرایط جاده است؛ این رابطه بنیادین میان سرعت و ریسک تصادف از دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد مطالعه قرار گرفته است (Solomon, ۱۹٦٤). این مسئله در شرایط نامساعد جوی نظیر بارش برف، باران شدید، مه‌گرفتگی و سطوح یخ‌زده، ابعاد جدی‌تری پیدا می‌کند. شرایط جوی نامساعد از دو جهت بر ایمنی تردد تأثیر می‌گذارد: از یک سو، کاهش دید و ضریب اصطکاک، کاهش سرعت را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد؛ از سوی دیگر، رفتار متفاوت رانندگان در چنین شرایطی به افزایش پراکندگی سرعت می‌انجامد که خود عاملی تعیین‌کننده در بروز تصادفات زنجیره‌ای است (Downey, ۲۰۱۵; Forbes et al., ۲۰۱۲). بر اساس مطالعات انجام‌شده، در جاده‌های روستایی که سرعت غیرمجاز رواج بیشتری دارد،

ریسک تصادف در شرایط نامساعد جوی به‌شدت افزایش می‌یابد.

۲- پیشینه تحقیق

مدیریت سرعت یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش تصادفات جاده‌ای شناخته می‌شود. در چند دهه اخیر، رویکردهای مختلفی برای مدیریت سرعت در شرایط گوناگون جوی و ترافیکی توسعه یافته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیستم‌های حد سرعت فصلی، حد سرعت متغیر و حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به وضع هوا از جمله این رویکردها هستند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند (VDOT, ۲۰۲٤; Solomon, ۱۹٦٤).

فنلاند به‌عنوان یکی از پیشگامان رویکرد فصلی، از سال ۱۹۸۹ با کاهش سرعت جاده‌های اصلی در فصول سرد سال، موفق به کاهش قابل‌توجه تصادفات در سطوح یخ‌زده و برفی شده است (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۰). با این حال، ماهیت ایستای این روش امکان پاسخگویی به تغییرات لحظه‌ای و غیرمنتظره وضع هوا را نمی‌دهد. در سال‌های اخیر، پیشرفت فناوری‌های حسگری، ارتباطات و پردازش داده، امکان طراحی سیستم‌های پویاتری نظیر VSL و WRVSL را فراهم کرده است که می‌توانند سرعت مجاز را بر اساس شرایط لحظه‌ای تنظیم کنند (VDOT, ۲۰۲٤).

در سطح داخلی نیز مطالعاتی به بررسی تجربی رابطه میان شرایط جوی و سرعت جریان ترافیک پرداخته‌اند. برای نمونه، بهادری و همکاران با استفاده از مدل رگرسیون خطی و بر پایه داده‌های ساعتی گردآوری‌شده از آزادراه تهران–قم، تأثیر بارش باران، مه‌گرفتگی، ابری بودن هوا، دما و حجم ترافیک را بر سرعت جریان تحلیل کردند و کاهش معنادار سرعت را در شرایط نامساعد جوی نشان دادند (Bahadori et al., ۲۰۱۹). با وجود این شواهد تجربی امیدوارکننده، تا زمان تدوین این مقاله، مطالعه یا طرح داخلی مشخصی که به‌طور خاص به طراحی و پیاده‌سازی سیستم حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به آب‌وهوا یا سیستم حد سرعت فصلی در جاده‌های کشور پرداخته باشد، شناسایی نشد؛ این خلأ پژوهشی، انگیزه اصلی مقاله حاضر است.

هدف اصلی این مقاله، مرور جامع رویکردهای مختلف مدیریت سرعت در شرایط نامساعد جوی و بررسی قابلیت تلفیق آن‌ها در قالب یک سیستم کارآمد است. در این راستا، اهداف فرعی زیر دنبال می‌شود:

–بررسی سیستم‌های حد سرعت فصلی و تجربه موفق فنلاند

–مرور سیستم‌های حد سرعت متغیر متعارف و کاربردهای آن‌ها

–تحلیل سیستم‌های حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به آب‌وهوا و رویکردهای نظری حاکم بر آن‌ها

–ارائه چارچوبی برای تلفیق رویکردهای موجود در قالب سیستم حداکثر سرعت هوشمند فصلی، متناسب با شرایط اقلیمی، زیرساختی و رفتاری کشور

۳- روش مطالعه

این مقاله در قالب یک مطالعه مروری با رویکرد مروری–تحلیلی تدوین شده است. لازم به تأکید است که این مطالعه یک مرور نظام‌مند کامل با گزارش‌دهی از نوع PRISMA نیست؛ با این حال، به‌منظور افزایش شفافیت، جامعیت و تکرارپذیری فرایند گردآوری منابع، مراحل جست‌وجو، غربالگری و انتخاب منابع به‌صورت گام‌به‌گام گزارش می‌شود.

برای گردآوری منابع بین‌المللی، پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل Transportation Research Record، Accident Analysis & Prevention، Transportation Research Journal of Transportation Safety & Security جست‌وجو شدند. کلیدواژه‌های جست‌وجو ترکیبی از عبارات variable speed limit، weather–responsive speed limit، seasonal speed limit، speed management adverse weather و reliability–based speed limit با استفاده از عملگرهای بولی AND/OR بود. بازه زمانی جست‌وجو از سال ۱۹٦٤ (نخستین مطالعات بنیادین رابطه سرعت و تصادف) تا سال ۲۰۲٦ در نظر گرفته شد تا هم مبانی نظری کلاسیک و هم آخرین دستاوردهای فناورانه پوشش داده شود.

علاوه بر منابع بین‌المللی، برای شناسایی مطالعات داخلی مرتبط، پایگاه‌های علمی داخلی نظیر پژوهشنامه حمل‌ونقل، سیویلیکا و پایگاه اطلاعات علمی ایران (گنج) نیز با کلیدواژه‌های حد سرعت متغیر، سرعت هوشمند فصلی و تأثیر شرایط جوی بر سرعت جست‌وجو شدند.

جست‌وجوی اولیه در پایگاه‌های یادشده، مجموعه‌ای از رکوردهای بالقوه مرتبط را بازیابی کرد. در گام نخست غربالگری، عنوان و چکیده هر رکورد بر اساس ارتباط موضوعی مستقیم با حد سرعت متغیر/ واکنش‌گرا به وضع هوا بررسی و موارد نامرتبط و موارد تکراری میان پایگاه‌ها حذف شدند. در گام دوم، متن کامل رکوردهای باقی‌مانده بر اساس معیارهای ورود و خروج زیر ارزیابی شد:

معیارهای ورود: (الف) ارتباط مستقیم با موضوع مدیریت سرعت در شرایط جوی نامساعد؛ (ب) انتشار در نشریات دارای داوری تخصصی یا گزارش‌های رسمی نهادهای معتبر (نظیرTRB، NCHRP، FHWA)؛ (ج) در دسترس بودن چکیده یا متن کامل.

معیارهای خروج: (الف) عدم ارتباط مستقیم با موضوع؛ (ب) عدم وجود داوری تخصصی.

پس از اعمال این دو مرحله غربالگری، در مجموع ۲۶ منبع واجد شرایط شامل ۲۱ منبع در نسخه نخست مقاله و ۵ منبع تکمیلی که در بازنگری حاضر برای تقویت پشتوانه علمی مقاله افزوده شد، برای تدوین این مقاله انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. این فرایند دومرحله‌ای (غربالگری عنوان/چکیده و سپس متن کامل بر پایه معیارهای ورود/خروج تصریح‌شده) برای هر پژوهشگر دیگری با همان کلیدواژه‌ها و پایگاه‌ها قابل تکرار است.

به‌منظور شفافیت روش‌شناختی لازم است تصریح شود که یافته‌های گزارش‌شده در بخش‌های ٤ تا ٦ این مقاله (از جمله ارقام کاهش تصادفات در جداول ۱ و ۲، و رابطه (۱) مربوط به رویکرد مبتنی بر ریسک) به‌طور مستقیم برگرفته از مطالعات پیشین استناد شده‌اند و یافته تجربی این پژوهش محسوب نمی‌شوند. در مقابل، چارچوب تلفیقی «حداکثر سرعت هوشمند فصلی» ارائه‌شده در بخش ۷ –شامل معماری چهارمؤلفه‌ای پیشنهادی، رابطه (۲) و محدوده‌های سرعت جدول ۳ حاصل تحلیل و ترکیب مفهومی نویسنده(گان) بر پایه یافته‌های مرورشده است و تاکنون از طریق داده میدانی، شبیه‌سازی یا پایلوت اعتبارسنجی نشده است. از این رو، در سراسر مقاله، این مدل و پیامدهای مورد انتظار آن به‌عنوان یک چارچوب پیشنهادی و فرضیه قابل‌آزمون معرفی می‌شوند.

۳-۱-مبانی نظری مدیریت سرعت

رابطه سرعت و ایمنی

رابطه بین سرعت و ایمنی یکی از مباحث بنیادین در مهندسی راه و ترافیک است. مطالعات گسترده‌ای در سراسر جهان نشان داده‌اند که میان افزایش سرعت و افزایش احتمال وقوع تصادف و شدت آن، رابطه مستقیم وجود دارد (Solomon, ١٩٦٤). این رابطه را می‌توان از دو منظر بررسی کرد:

الف) رابطه سرعت با احتمال تصادف: با افزایش سرعت، زمان واکنش راننده کاهش و فاصله توقف افزایش می‌یابد که خود عاملی تعیین‌کننده در بروز تصادفات است. همچنین، افزایش سرعت میدان دید راننده را کاهش داده و خطاهای ادراکی را افزایش می‌دهد.

ب) رابطه سرعت با شدت تصادف: انرژی جنبشی خودرو با مجذور سرعت رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین هرچه سرعت بالاتر باشد، انرژی آزادشده در برخورد و شدت جراحات وارده به سرنشینان بیشتر خواهد بود. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش ۱ کیلومتر بر ساعت در سرعت متوسط می‌تواند احتمال تصادف را تا ۳ درصد و شدت تصادفات را تا ۵ درصد افزایش دهد (Solomon, ١٩٦٤; Forbes et al., ٢٠١٢).

۳-۲-پراکندگی سرعت و نقش آن در تصادفات

یکی از مفاهیم کلیدی در مدیریت سرعت، پراکندگی سرعت است؛ یعنی اختلاف بین سرعت وسایل نقلیه مختلف در یک جریان ترافیکی. هرچه پراکندگی سرعت بیشتر باشد، احتمال برخورد از عقب و تغییرمسیرهای ناگهانی افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده‌اند که پراکندگی سرعت گاه حتی از میانگین سرعت نیز عامل مؤثرتری در بروز تصادفات است (Forbes et al., ٢٠١٢; Lee et al., ٢٠٠٦).

در شرایط جوی نامساعد، پراکندگی سرعت به‌شدت افزایش می‌یابد: برخی رانندگان با کاهش قابل‌توجه سرعت خود احتیاط بیشتری نشان می‌دهند، در حالی که برخی دیگر با حفظ سرعت بالا ریسک‌پذیری بیشتری بروز می‌دهند. این ناهمگونی رفتاری، زمینه‌ساز تصادفات زنجیره‌ای می‌شود که اغلب با تلفات سنگین همراه‌اند. یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت سرعت، مسئله پذیرش از سوی رانندگان است. تحقیقات نشان داده‌اند رانندگان تمایل دارند سرعتی را برگزینند که با شرایط محیطی و توانایی‌های خودشان سازگار باشد (Forbes et al., ٢٠١٢).

این سرعت که به «سرعت انتخابی راننده» معروف است، معمولاً بر اساس ترکیبی از عوامل زیر تعیین می‌شود:

- ویژگی‌های هندسی راه (عرض، شعاع قوس، شیب)
- شرایط جوی و وضعیت سطح جاده
- تراکم ترافیک و رفتار سایر رانندگان
- محدودیت‌های قانونی سرعت (تابلوهای راهنمایی و رانندگی)
-تجربه و ویژگی‌های شخصیتی راننده

اگر محدودیت سرعت اعمال‌شده بسیار کمتر از سرعت انتخابی راننده باشد، احتمال تخطی از آن افزایش می‌یابد. بنابراین، یک سیستم مدیریت سرعت کارآمد باید سرعتی را پیشنهاد دهد که ضمن تأمین ایمنی، از نظر رانندگان نیز قابل‌قبول باشد.

٤- سیستم‌های حد سرعت فصلی

سیستم‌های حد سرعت فصلی بر این فرض استوارند که در فصول سرد سال، به دلیل کاهش دما، افزایش بارش و کاهش ضریب اصطکاک، ایمنی تردد کاهش می‌یابد و بنابراین باید حداکثر سرعت مجاز کاهش یابد. این سیستم‌ها بر اساس تقویم و با رویکردی ایستا عمل می‌کنند؛ در تاریخ مشخصی از سال (معمولاً آغاز پاییز یا زمستان)، سرعت مجاز کاهش می‌یابد و در پایان فصل به حالت اولیه بازمی‌گردد.

فنلاند نخستین کشوری بود که این رویکرد را به‌صورت سراسری اجرا کرد. ایده تغییر سرعت مجاز بر اساس فصل، نخستین بار طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۸۹ در فنلاند مطالعه شد. نتایج مثبت این مطالعه دوساله، به اجرای سراسری این طرح در پاییز ۱۹۸۹ انجامید. بر اساس این طرح، سرعت مجاز در جاده‌های اصلی روستایی مستعد تصادف، به میزان ۲۰ کیلومتر بر ساعت کاهش یافت؛ برای نمونه، سرعت مجاز در جاده‌های اصلی از ۱۰۰ به ۸۰ کیلومتر بر ساعت و در جاده‌های شریانی از ۸۰ به ٦٠ کیلومتر بر ساعت کاهش یافت (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۰; Forbes et al., ۲۰۱۲).

٤-١- اثربخشی سیستم‌های فصلی

ارزیابی‌های انجام‌شده بر روی سیستم فصلی فنلاند نشان داد که این اقدام در کاهش تصادفات مرگبار، به‌ویژه در سطوح یخ‌زده و برفی، بسیار مؤثر بوده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از تأثیرات این سیستم بر ایمنی جاده‌ها را نشان می‌دهد (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۰).

جدول ۱. تأثیر سیستم حد سرعت فصلی بر تصادفات در فنلاند

نوع تصادف	کاهش تصادفات (درصد)
تصادفات مرگبار در جاده‌های یخ‌زده	۲۵ تا ۳۰ درصد
تصادفات جرحی در جاده‌های برفی	۱۵ تا ۲۰ درصد
تصادفات خسارتی در شرایط بارش	۱۰ تا ۱۲ درصد

یکی از دستاوردهای مهم این طرح، پذیرش عمومی نسبتاً بالای آن پس از اجرای کامل بود. نظرسنجی‌های انجام‌شده نشان داد بیش از ۷۰ درصد رانندگان با این طرح موافق بوده و آن را برای افزایش ایمنی ضروری می‌دانستند.

٤-٢- محدودیت‌های سیستم‌های فصلی

با وجود اثربخشی قابل‌توجه، سیستم‌های حد سرعت فصلی محدودیت‌های ذاتی دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

الف) عدم انعطاف‌پذیری: در یک روز زمستانی با جاده خشک و آفتابی، اعمال محدودیت سرعت زمستانی می‌تواند به کاهش کارایی ترافیک و کاهش پذیرش از سوی رانندگان بینجامد.

ب) عدم پاسخگویی به تغییرات لحظه‌ای: شرایط جوی در طول یک فصل می‌تواند به‌شدت متغیر باشد؛ یک روز ممکن است با بارش سنگین برف همراه باشد و روز دیگر کاملاً آفتابی و خشک باشد. سیستم‌های فصلی نمی‌توانند به این تغییرات پاسخ دهند.

ج) نادیده‌گرفتن سایر مخاطرات جوی: این سیستم‌ها صرفاً بر اساس فصل عمل می‌کنند و پدیده‌هایی نظیر مه‌گرفتگی

تابستانی، باران‌های سیل‌آسا یا طوفان‌های شن را در نظر نمی‌گیرند.

د) اثرات اقتصادی: اعمال محدودیت سرعت در روزهای مساعد می‌تواند زمان سفر را افزایش و بهره‌وری اقتصادی را کاهش دهد.

۵- سیستم‌های حد سرعت متغیر (VSL)

سیستم‌های حد سرعت متغیر (VSL) که با نام سیستم‌های مدیریت سرعت پویا نیز شناخته می‌شوند، سرعت مجاز را بر اساس شرایط لحظه‌ای ترافیک، آب‌وهوا، وضعیت سطح جاده و وقایع خاص تنظیم می‌کنند. این سیستم‌ها با ترکیب حسگرهای پیشرفته، شبکه‌های ارتباطی، الگوریتم‌های پردازش داده و تابلوهای پیام‌رسان دیجیتال، تغییرات سرعت را اعمال می‌کنند (Forbes et al., ۲۰۱۲; Zhong et al., ۲۰۲۲).

سیستم‌های VSL را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد.

الف) سیستم‌های VSL مبتنی بر ترافیک: عمدتاً برای مدیریت ترافیک در لحظات اوج ترافیک و جلوگیری از شکست جریان ترافیک در گلوگاه‌ها طراحی شده‌اند؛ با کاهش سرعت وسایل نقلیه در بالادست گلوگاه، از ایجاد تراکم و کاهش شدید ظرفیت جلوگیری می‌کنند.

ب) سیستم‌های VSL مبتنی بر شرایط محیطی: با دریافت داده‌های لحظه‌ای از وضع هوا و سطح جاده، سرعت مجاز را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنند که با شرایط محیطی سازگار باشد.

۵-۲- اثربخشی سیستم‌های VSL

مطالعات متعددی اثربخشی سیستم‌های VSL را در بهبود ایمنی و افزایش توان عملیاتی تأیید کرده‌اند. جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج برخی از این مطالعات را نشان می‌دهد (Zhong et al., ۲۰۲۲).

جدول ۲. اثربخشی سیستم‌های VSL در مطالعات مختلف

محققین	سال	نوع سیستم	کاهش تصادفات
Lee و همکاران	۲۰۰۶	VSL مبتنی بر ترافیک	۱۴ تا ۲۰ درصد
Saha و همکاران	۲۰۱۵	VSL مبتنی بر شرایط جوی/هندسه جاده	کاهش معنادار در محورهای کوهستانی
Allaby و همکاران	۲۰۰۷	VSL مبتنی بر شرایط جوی	۲۵ تا ۳۰ درصد
Park و Yadlapati	۲۰۱۵	VSL واکنش‌گرا به آب‌وهوا	۳۰ تا ۴۰ درصد
Yasanthi و Mehran	۲۰۲۲	WRVSL مبتنی بر قابلیت‌اطمینان	۳۵ تا ۴۵ درصد

سیستم‌های VSL نه تنها تصادفات را کاهش می‌دهند، بلکه با ایجاد یکنواختی در سرعت وسایل نقلیه، پراکندگی سرعت را نیز کاهش داده و روان‌سازی ترافیک را بهبود می‌بخشند (Zhong et al., ۲۰۲۲).

۵-۱- محدودیت‌های سیستم‌های VSL

با وجود مزایای فراوان، سیستم‌های VSL با محدودیت‌هایی نیز مواجه‌اند:

الف) هزینه‌های زیرساختی: نصب و راه‌اندازی سیستم‌های VSL نیازمند سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در حسگرها، تابلوهای دیجیتال و سیستم‌های ارتباطی است.

ب) پیچیدگی عملیاتی: مدیریت و نگهداری این سیستم‌ها نیازمند نیروی متخصص و آموزش‌دیده است.

ج) وابستگی به داده‌های دقیق: عملکرد سیستم‌های VSL به دقت داده‌های ورودی (ترافیک، آب‌وهوا، وضعیت جاده) وابسته است و هرگونه خطا در داده‌ها می‌تواند به تصمیمات نادرست بینجامد (Sharif et al., ۲۰۲۱).

د) عدم پذیرش رانندگان: در برخی موارد، رانندگان به محدودیت‌های سرعت اعلام‌شده توسط سیستم‌های VSL اعتماد نکرده و از آن تبعیت نمی‌کنند (Park & Yadlapati, ۲۰۱۵; Qiu & Nixon, ۲۰۲۰؛ همچنین ر.ک. Long et al., ۲۰۱۲ در خصوص منابع نارضایتی رانندگان از این سیستم‌ها).

٦-سیستم‌های حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به وضع هوا (WRVSL)

پیشرفت فناوری‌های حسگری و سیستم‌های اطلاعاتی، امکان طراحی سیستم‌های VSL را فراهم کرده که به‌طور مستقیم به وضعیت جوی واکنش نشان می‌دهند. این سیستم‌ها که با نام WRVSL شناخته می‌شوند، نسل جدیدی از سیستم‌های مدیریت سرعت هستند که با استفاده از داده‌های لحظه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی جاده‌ای، سنسورهای سطح جاده، رادارهای هواشناسی و دوربین‌های نظارتی، سرعت مجاز را به‌صورت پویا تنظیم می‌کنند (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۲; Yasanthi et al., ۲۰۲۲; VDOT, ۲۰۲٤).

ویژگی‌های اصلی سیستم‌های WRVSL عبارت‌اند از:

۱) واکنش‌گرایی لحظه‌ای: این سیستم‌ها می‌توانند در کسری از ثانیه به نوسانات جوی واکنش نشان دهند.

۲) پیش‌بینی‌کنندگی: برخی از سیستم‌های پیشرفته WRVSL از مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت وضع هوا برای پیش‌بینی شرایط آتی و اعمال تغییرات سرعت استفاده می‌کنند.

۳) تطبیق‌پذیری مکانی: این سیستم‌ها می‌توانند برای هر بخش از جاده به‌صورت مجزا سرعت تعیین کنند و نیازی به اعمال یکنواخت سرعت در کل مسیر ندارند.

٤) یکپارچگی با سایر سیستم‌ها: سیستم‌های WRVSL می‌توانند با سایر سیستم‌های مدیریت ترافیک و راهداری (مانند سیستم‌های هشدار، کنترل رمپ و مدیریت تصادفات) یکپارچه شوند (Carlson et al., ۲۰۱۰ ؛Zhong et al., ۲۰۲۲).

٦-۱- رویکردهای نظری در طراحی WRVSL

٦-۱-۱-رویکرد مبتنی بر قابلیت‌اطمینان

جدیدترین رویکرد در طراحی سیستم‌های WRVSL، مبتنی بر نظریه قابلیت‌اطمینان است. در این رویکرد، سرعت مجاز بر اساس دو معیار اصلی تعیین می‌شود (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۲; Yasanthi et al., ۲۰۲۲; FHWA, ۲۰۲۲).

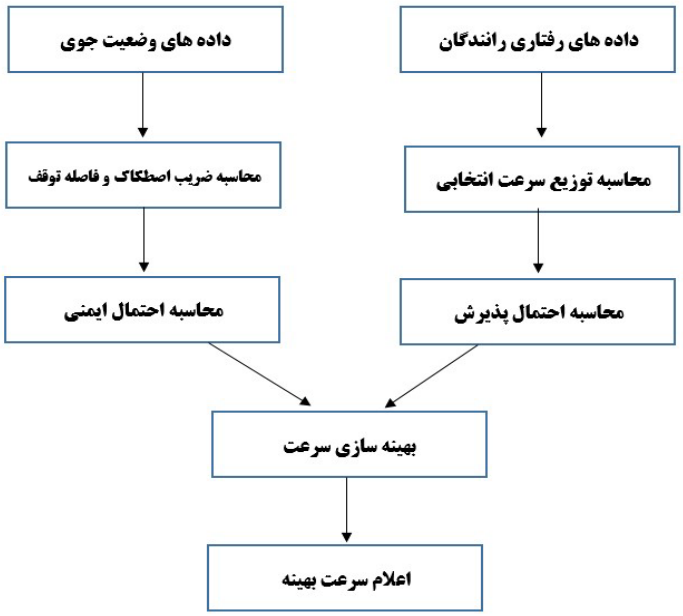
معیار اول – احتمال ایمنی

احتمال اینکه سرعت برای جلوگیری از برخورد از عقب کافی باشد. این معیار با استفاده از مدل‌های فاصله توقف و ضریب اصطکاک محاسبه می‌شود.

معیار دوم – احتمال پذیرش

احتمال اینکه سرعت توسط رانندگان رعایت شود. این معیار با استفاده از توزیع سرعت انتخابی رانندگان محاسبه می‌شود.

در این رویکرد، سرعت مطلوب سرعتی است که مجموع وزن‌دار احتمال ایمنی و احتمال پذیرش را بیشینه کند. شکل ۱ نمودار شماتیک این رویکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۱. رویکرد قابلیت‌اطمینان در تعیین سرعت بهینه (بر اساس ترکیب احتمال ایمنی و احتمال پذیرش)

۶-۱-۲- رویکرد مبتنی بر ریسک

در رویکرد مبتنی بر ریسک، هدف این است که سطح ریسک در شرایط نامساعد جوی، معادل سطح ریسک در شرایط ایده‌آل باشد (Hegyi et al., ۲۰۰۵; Ali & Adnan, ۲۰۲۱). ابتدا، سرعت مرجع بر اساس صدک ۸۵ سرعت مشاهده‌شده در شرایط ایده‌آل تعیین می‌شود؛ سپس با در نظر گرفتن کاهش ضریب اصطکاک و کاهش دید ناشی از شرایط نامساعد، این سرعت مرجع تعدیل می‌شود. رابطه (۱) فرمول کلی تعدیل سرعت در این رویکرد را نشان می‌دهد که مستقیماً از ادبیات موضوع اقتباس شده است.

(۱)

$$V_{adj} = V_{ref} \cdot \sqrt{(\mu_{actual} / \mu_{ref})} \cdot \sqrt{(D_{actual} / D_{ref})}$$

که در آن: V_{adj}: سرعت تعدیل‌شده (کیلومتر بر ساعت)؛ V_{ref}: سرعت مرجع در شرایط ایده‌آل (کیلومتر بر ساعت)؛ μ_{actual}: ضریب اصطکاک در شرایط فعلی (بی‌بعد)؛ μ_{ref}: ضریب اصطکاک در شرایط ایده‌آل (بی‌بعد)؛ D_{actual}: فاصله دید در شرایط فعلی (متر)؛ D_{ref}: فاصله دید در شرایط ایده‌آل (متر).

۶-۲- اثربخشی سیستم‌های WRVSL در شرایط خاص

- شرایط مه‌آلودگی

مه‌آلودگی یکی از مخاطره‌آمیزترین پدیده‌های جوی برای تردد جاده‌ای است. کاهش شدید دید در شرایط مه، احتمال برخوردهای زنجیره‌ای را به‌شدت افزایش می‌دهد. یک مطالعه شبیه‌سازی نشان داده است که استفاده از سیستم VSL مبتنی بر دید در شرایط مه می‌تواند تعداد برخوردها را تا ۵۹ درصد کاهش دهد (Ban, ۲۰۲۵). همچنین مشخص شده است که اعمال محدودیت سرعت به‌صورت موضعی (صرفاً در بخش‌های مه‌گرفته) نسبت به اعمال سراسری، ضمن حفظ مزایای ایمنی، کاهش کمتری در سرعت متوسط ایجاد می‌کند (Ban, ۲۰۲۵).

- بارش برف و یخ‌زدگی

در شرایط بارش برف و یخ‌زدگی، ضریب اصطکاک سطح جاده به‌شدت کاهش می‌یابد. سیستم‌های WRVSL با دریافت داده‌های دمای سطح جاده، ضخامت لایه یخ و میزان بارش، سرعت مجاز را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنند که با شرایط تطابق داشته باشد. مطالعات نشان داده‌اند این سیستم‌ها می‌توانند تصادفات در شرایط زمستانی را تا ۴۰ درصد کاهش دهند (Yasanthi et al., ۲۰۲۱; Hadi et al., ۲۰۲۳).

- بارندگی شدید

باران شدید نیز با کاهش دید، افزایش خطر آب‌گرفتگی و کاهش اصطکاک، ایمنی تردد را به خطر می‌اندازد. سیستم‌های WRVSL با استفاده از داده‌های شدت بارش و وضعیت زهکشی جاده، سرعت مناسب را تعیین می‌کنند (FHWA, ۲۰۲۲; Ali & Adnan, ۲۰۲۱).

۷- تلفیق رویکردها: پیشنهاد حداکثر سرعت هوشمند فصلی

مرور ادبیات نشان می‌دهد سیستم‌های حد سرعت فصلی با وجود اثربخشی، فاقد انعطاف‌پذیری لازم هستند. از سوی دیگر، سیستم‌های WRVSL که به‌طور کامل مبتنی بر داده‌های لحظه‌ای عمل می‌کنند، ممکن است با چالش‌هایی در هزینه‌های زیرساختی و پیچیدگی عملیاتی مواجه شوند. به نظر می‌رسد ترکیب این دو رویکرد، راهکاری کارآمد برای بسیاری از جاده‌های برون‌شهری کشور باشد.

افزون بر این، با توجه به تفاوت‌های اقلیمی (نظیر نوسانات دمایی شدید و بارش برف در محورهای کوهستانی البرز و زاگرس)، زیرساختی (نظیر پوشش محدود شبکه حسگرهای جاده‌ای در بسیاری از محورهای برون‌شهری کشور) و رفتاری (الگوهای متفاوت پذیرش محدودیت سرعت توسط رانندگان ایرانی نسبت به کشورهایی مانند فنلاند و کانادا که پیکربندی چارچوب‌های مرورشده از آن‌ها استخراج شده)، تعمیم مستقیم پارامترهای گزارش‌شده در ادبیات بین‌المللی (جداول ۱ و ۲) به شرایط داخلی روا نیست. به همین دلیل، چارچوب پیشنهادی زیر از ابتدا با فرض نیاز به کالیبراسیون بومی طراحی شده است، نه با فرض تعمیم مستقیم نتایج خارجی؛ این ملاحظه در معماری پیشنهادی و در پیشنهادهای کاربردی به‌صورت مشخص لحاظ شده است.

- معماری سیستم پیشنهادی

پیشنهاد می‌شود سیستم «حداکثر سرعت هوشمند فصلی» بر اساس چهار مؤلفه اصلی زیر طراحی شود:

۱) چارچوب فصلی: در آغاز فصل سرد (مثلاً اول آذرماه)، حداکثر سرعت مجاز در جاده‌های برون‌شهری مستعد، به‌صورت پایه کاهش می‌یابد (مثلاً از ۱۱۰ به ۹۰ کیلومتر بر ساعت)، مشابه تجربه موفق فنلاند (Yasanthi & Mehran, ۲۰۲۰). این کاهش پایه باید به‌صورت جداگانه و بر اساس داده‌های اقلیمی و سوابق تصادفات هر محور به‌ویژه محورهای کوهستانی و برف‌گیر کشور مانند کرج-چالوس، هراز و آزادراه تهران-قم کالیبره شود و نمی‌توان مقدار واحدی را برای همه جاده‌های کشور در نظر گرفت.

۲) واکنش‌گرایی هوشمند: در این چارچوب فصلی، سرعت مجاز به‌صورت پویا و بر اساس داده‌های لحظه‌ای وضعیت جاده و آب‌وهوا، در یک بازه منطقی تنظیم می‌شود. جدول ۳ محدوده سرعت‌های قابل اعمال در شرایط مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. محدوده سرعت‌های پیشنهادی در سیستم حداکثر سرعت هوشمند فصلی (مقادیر اولیه/پیشنهادی)

وضعیت جوی	سرعت پایه (کیلومتر بر ساعت)	محدوده قابل‌تنظیم (کیلومتر بر ساعت)
روز آفتابی و خشک	۹۰	۸۵ تا ۹۵
باران ملایم	۹۰	۸۰ تا ۹۰
باران شدید	۹۰	۷۰ تا ۸۵
برف‌ریزه	۹۰	۷۰ تا ۸۵
برف سنگین	۹۰	۶۰ تا ۷۵
مه خفیف (دید ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر)	۹۰	۷۰ تا ۸۵
مه غلیظ (دید کمتر از ۲۰۰ متر)	۹۰	۶۰ تا ۷۵
یخ‌زدگی سطح جاده	۹۰	۵۰ تا ۷۰

لازم به ذکر است که محدوده‌های فوق، مقادیر اولیه و پیشنهادی (Preliminary/Indicative Values) هستند، این مقادیر با ترکیب دو منبع برآورد شده‌اند: (الف) منطق مهندسی رابطه (۱) که کاهش سرعت را متناسب با کاهش ریشه‌دوم ضریب اصطکاک و فاصله دید نسبت به شرایط ایده‌آل تعیین می‌کند؛ و (ب) دامنه کاهش سرعت/تصادف گزارش‌شده در مطالعات مشابه (جداول ۱ و ۲).

۳) الگوریتم مبتنی بر شواهد: برای تعیین سرعت بهینه در هر لحظه، از رویکرد قابلیت‌اطمینان استفاده می‌شود. رابطه (۲) تابع هدف این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$\text{Maximize } P(V) = \alpha \cdot P_safety(V) + (1 - \alpha) \cdot P_compliance(V) \quad (۲)$$

$P_safety(V)$: احتمال ایمنی در سرعت V

$P_compliance(V)$: احتمال پذیرش در سرعت V

α: ضریب وزنی (بین صفر و یک) که اهمیت نسبی ایمنی و پذیرش را تعیین می‌کند

۴) زیرساخت داده: سیستم از داده‌های زیر برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند:

- داده‌های هواشناسی از ایستگاه‌های هواشناسی جاده‌ای سازمان هواشناسی

– داده‌های وضعیت سطح جاده از سنسورهای تعبیه‌شده در جاده
– داده‌های ترافیکی از سامانه‌های ترددشمار
– داده‌های رفتار رانندگان از مطالعات میدانی

– مزایای مورد انتظار سیستم پیشنهادی (فرضیات قابل‌آزمون)

۱) ایمنی بالاتر: انتظار می‌رود با ترکیب رویکرد فصلی و واکنش‌گرایی لحظه‌ای، سطح ایمنی نسبت به هر یک از دو رویکرد به‌تنهایی بهبود یابد.
۲) کارایی اقتصادی بالاتر: با پرهیز از اعمال محدودیت‌های غیرضروری در روزهای مساعد درون فصل سرد، انتظار می‌رود زمان سفر نسبت به سیستم فصلی صرف کاهش یابد.
۳) پذیرش بالاتر: با منطقی‌تر بودن محدودیت‌ها و تطابق آن‌ها با شرایط واقعی، احتمال دارد رانندگان تمایل بیشتری برای تبعیت از سرعت‌های اعلام‌شده نشان دهند.
٤) قابلیت اجرای تدریجی: این سیستم می‌تواند در گام نخست با اتکا به چارچوب فصلی کم‌هزینه و سپس با توسعه تدریجی لایه واکنش‌گرا، پیاده‌سازی شود.

– نوآوری، مزیت نسبی، فرضیات و محدودیت‌های کاربردی مدل

نوآوری: برخلاف سیستم‌های فصلی که کاملاً ایستا هستند و سیستم‌های WRVSL کامل که به شبکه گسترده حسگر و زیرساخت ارتباطی لحظه‌ای در طول مسیر نیاز دارند، مدل «حداکثر سرعت هوشمند فصلی» یک لایه پایه فصلی کم‌هزینه (قابل‌اجرا با تابلوهای ثابت یا متناوب) را با یک لایه واکنش‌گرای محدود به بازه‌های از پیش‌تعیین‌شده (جدول ۳) ترکیب می‌کند. این معماری دولایه، نیاز به سرمایه‌گذاری زیرساختی گسترده در گام نخست را کاهش می‌دهد و امکان توسعه تدریجی از فصلی ساده به‌سوی واکنش‌گرای کامل را فراهم می‌سازد.
مزیت نسبی نسبت به روش‌های موجود: نسبت به سیستم فصلی صرف، مزیت اصلی مدل پیشنهادی پاسخگویی به نوسانات لحظه‌ای درون‌فصلی است (برای نمونه، تمایز میان یک روز آفتابی زمستانی و یک روز برفی). نسبت به سیستم WRVSL کامل، مزیت اصلی آن هزینه پیاده‌سازی کمتر در گام آغازین است، زیرا بازه‌های تغییر سرعت از پیش با چارچوب فصلی محدود شده‌اند و نیاز به شبکه حسگری تراکم بالا در سرتاسر مسیر کاهش می‌یابد.
فرضیات مدل: (۱) در دسترس‌بودن حداقلی داده‌های هواشناسی جاده‌ای و وضعیت سطح جاده برای هر محور پایلوت؛ (۲) ثبات نسبی الگوی رفتاری رانندگان ایرانی با مفروضات نظریه قابلیت‌اطمینان که عمدتاً از داده‌های کشورهای دیگر استخراج شده و باید در مطالعه پایلوت راستی‌آزمایی شود؛ (۳) همکاری بین‌سازمانی مؤثر میان سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، سازمان هواشناسی و پلیس راه برای تبادل داده‌های لحظه‌ای.
محدودیت‌های کاربردی: این مدل در شکل کنونی صرفاً یک چارچوب مفهومی است و کاربرد عملیاتی آن مستلزم طی مراحل کالیبراسیون پارامترها (α و محدوده‌های جدول ۳)، است. همچنین این مدل در حال حاضر برای جاده‌های برون‌شهری با الگوی مشخص تغییرات فصلی به‌ویژه محورهای کوهستانی و برف‌گیر طراحی شده و تعمیم آن به بزرگراه‌های شهری یا مناطق با اقلیم یکنواخت، نیازمند بررسی جداگانه است.

۸–نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویکردهای مختلف مدیریت سرعت در شرایط نامساعد جوی شامل سیستم‌های حد سرعت فصلی، سیستم‌های حد سرعت متغیر متعارف و سیستم‌های حد سرعت متغیر واکنش‌گرا به آب‌وهوا مرور شد. یافته‌های اصلی این مطالعه مروری که مستقیماً از ادبیات مرورشده استخراج شده‌اند عبارت‌اند از:
–سیستم‌های حد سرعت فصلی با وجود اثربخشی در کاهش تصادفات زمستانی، به دلیل ماهیت ایستا، نمی‌توانند به تغییرات لحظه‌ای شرایط جوی پاسخ دهند.
–سیستم‌های VSL متعارف عمدتاً بر مدیریت ترافیک متمرکزند و همیشه تأثیر مستقیم بر وضعیت جوی ندارند.
–سیستم‌های WRVSL با بهره‌گیری از داده‌های لحظه‌ای می‌توانند سرعت را به‌صورت پویا تنظیم کنند، اما هزینه‌های زیرساختی و پیچیدگی عملیاتی آن‌ها قابل‌توجه است.
–رویکردهای مبتنی بر قابلیت‌اطمینان و ریسک، دو رویکرد نظری مهم در طراحی سیستم‌های WRVSL هستند که هرکدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.
–بر پایه یافته‌های فوق، تلفیق رویکرد فصلی با منطق واکنش‌گرایی لحظه‌ای در قالب سیستم حداکثر سرعت هوشمند

فصلی بر اساس یافته‌های ادبیات موجود، پتانسیل بهبود مدیریت سرعت در شرایط نامساعد جوی را دارد.

- پیشنهادات کاربردی و آتی

بر اساس یافته‌های این مطالعه، پیشنهادات زیر برای بهبود مدیریت سرعت در جاده‌های کشور ارائه می‌شود:

۱) اجرای پایلوت: پیشنهاد می‌شود سیستم حداکثر سرعت هوشمند فصلی به‌صورت پایلوت بر روی یکی از محورهای کوهستانی و برف‌گیر کشور (مانند محور کرج-چالوس یا هراز) با همکاری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، سازمان هواشناسی و پلیس راه، طراحی و اجرا شود. مدت اجرای پایلوت حداقل یک دوره یک‌ساله کامل (شامل یک فصل سرد و یک فصل گرم) باشد تا امکان ارزیابی جامع فراهم شود.

-توسعه زیرساخت داده: ایجاد بستری برای دریافت یکپارچه داده‌های هواشناسی (از ایستگاه‌های جاده‌ای، سازمان هواشناسی و ماهواره‌ها) و داده‌های ترافیکی برای پشتیبانی از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری ضروری است؛ همچنین باید زیرساخت ارتباطی مناسب برای انتقال لحظه‌ای داده‌ها فراهم شود.

-بومی‌سازی الگوریتم‌ها: الگوریتم‌های تعیین سرعت مبتنی بر رویکرد قابلیت‌اطمینان یا ریسک، باید با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی خاص کشور و رفتارهای رانندگان ایرانی بومی‌سازی شوند. برای این منظور، انجام مطالعات میدانی گسترده برای تعیین پارامترهای رفتاری رانندگان ضروری است.

-آموزش و فرهنگ‌سازی: موفقیت هر سیستم مدیریت سرعت به‌شدت به پذیرش رانندگان وابسته است؛ بنابراین برنامه‌های آموزش و فرهنگ‌سازی برای آشنایی رانندگان با مزایای این سیستم و نحوه تبعیت از سرعت‌های اعلام‌شده ضروری است.

-ارزیابی مستمر: انجام مطالعات ارزیابی هزینه-فایده و ارزیابی اثربخشی ایمنی به‌صورت مستمر، برای سنجش عملکرد سیستم و بهبود مستمر آن الزامی است.

-تدوین دستورالعمل ملی: پس از موفقیت پایلوت، دستورالعمل فنی و اجرایی برای استقرار سیستم در سایر محورهای مستعد کشور تدوین شود.

-مطالعه دقیق‌تر بر روی تعیین ضریب وزنی (α) در تابع هدف الگوریتم قابلیت‌اطمینان برای شرایط مختلف اقلیمی، از طریق تحلیل حساسیت و داده‌های میدانی.

- بررسی تأثیر سیستم‌های VSL بر رفتار رانندگان در بلندمدت و امکان کاهش اثر عادت‌پذیری.

-مطالعه یکپارچه‌سازی سیستم‌های WRVSL با سایر فناوری‌های حمل‌ونقل هوشمند مانند سیستم‌های هشدار برخورد و کنترل تطبیقی سرعت.

-توسعه مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت برای بهبود دقت سیستم‌های WRVSL.

-اعتبارسنجی تجربی مدل «حداکثر سرعت هوشمند فصلی» از طریق شبیه‌سازی ترافیکی و مطالعه پایلوت میدانی در بستر جاده‌های کشور.

۹-مراجع

- بهادری، ع.، ممدوحی، امیررضا و سرکار، علیرضا (۱۳۹۸). مدل‌سازی سرعت رانندگی در شرایط مختلف آب‌وهوایی (مطالعه موردی: آزادراه تهران-قم). *فصلنامه پژوهشنامه حمل و نقل*، سال ۱۷، شماره ۲، ۳۲-۲۱.

- Ali, M.S., & Adnan, M. (2021). Improving safety and efficiency of highways under adverse weather conditions using variable speed limits. *Journal of Transportation Safety,* 13(2), 155-175.

- Allaby, P., Hellinga, B., & Bullock, M (2007).Variable speed limits: Safety and operational impacts of a candidate system for freeway applications. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 4(8), 671-680.

- Ban, J(2025).Simulation-based assessment of operational strategies for visibility-responsive variable speed limits [Master's thesis]. New Jersey Institute of Technology.

-Carlson, R.C., Papamichail, I., Papageorgiou, .M., & Messmer, A. (2010). Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks. *Transportation Research Part C* 18(2), 193-212.

- Downe(2015). Weather-Responsive Variable Speed Limits)FHWA-HOP-15-007) , Federal Highway Administration.

-Federal HighwayAdministration. (2022) Automating Variable Speed Limits Using Weather, Traffic and Friction Data Report No. -FHWA-HRT-22.

-Forbes, G., Gardner, T., & McGee, H. .(2012). Methods and Practices for Setting Speed Limits NCHRP Report(807), *Transportation Research Board*.

- Sharif, H., Ozbay, K., & Morgul, E.F(2021). Variable speed limits for weather-responsive traffic management: A review of recent advances. Transport Reviews4(41), 435-485 .
Solomon, D. (1964). Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver, and Vehicle. Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce
Virginia Department of Transportation .(2024). -Operational and Safety Effects of the I95 Variable Speed Limit System in Fredericksburg, Virginia. *VDOT Research Report*.
Yasanthi, R.G.N., & Mehran, B. (2022). A reliability-based weather-responsive variable speed limit system to improve the safety of rural highways. Accident Analysis & Prevention 177, 106855.
-Yasanthi, R.G.N., Mehran, B., & Alhajyaseen, W.K.M(2022). A reliability based weather-responsive variable speed limit system. *Accident Analysis & Prevention*, 177.
-Yasanthi, R.G.N., Mehran, B., & Alhajyaseen, W.K.M. (2021). A reliability based weather-responsive variable speed limit system to improve the safety of rural highways. Accident Analysis & Prevention164, 106477.
-Yasanthi, R.G.N., & Mehran, B. (2020). Weather-responsive variable speed limit systems: A review. *Transportation Research Record,* (10)2674, 345-356.
-Zheng, F., Liu, J., & Li, X. (2020). A review of variable speed limit control for freeway traffic management. *Transportation Research Part C 116,* 102635.
-Zhong, L., Zhang, Y., & Wu, J. (2022). Variable speed limits for freeway safety under adverse weather conditions: A review. *Journal of Advanced Transportation*.
-Hadi, M., Xiao, Y., & Faghih, A. (2023). Feasibility study of variable speed limits for traffic and weather management in Florida-961-977.Florida Department of Transportation
-Hegyi, A., De Schutter, B., & Hellendoorn, H (2009). Model predictive control for optimal . coordination of ramp metering and variable speed limits. *Transportation Research Part C* (3), 185-209.
- .Lee, C., Hellinga, B., & Saccomanno, F (2006). Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C14(3),* 213-228.
- Long, S., Gentry, L., & Bham, G.H.(2012). Driver perceptions and sources of user dissatisfaction in the implementation of variable speed limit systems. *Transport Policy 23,* 1-7.
-National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2026). NCHRP Research Report 1176, Real-Time Warnings and Variable Speed Limits Safety and Travel Reliability During Weather Events. Washington, DC. *The National Academies Press*
-Park, S., & Yadlapati, S. (2015). Development and evaluation of a weather-responsive variable speed limit system. *Transportation Research Record, 2489,* 75-84.
- Qiu, T.Z., & Nixon, W. (2020). Weather responsive variable speed limits for rural highways in cold regions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 34(2).
-Rämä, P. (1999). Effects of weather controlled variable speed limits and warning signs on driver behavior. *Transportation Research Record* (1689), 53-59.
- Saha, P., Ahmed, M.M., & Young, R.K (2015). Safety effectiveness of variable speed limit system in adverse weather conditions on challenging roadway geometry. Transportation Research Record2521(1), 45-53.

Speed Management under Adverse Weather Conditions: A Review of Approaches and Presentation of an Integrated Model

Majid Habibi Nokhandan, *Associate Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences, Tehran, Iran.*
Mohammadreza Miri Ghalenoei, M.Sc., Grad., Semnan University, Semnan, Iran.

E-mail: habibi3558@gmail.com

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
Speed management under adverse weather conditions is a fundamental challenge for rural highway safety. Each year, thousands of road crashes worldwide are attributed to a mismatch between vehicle speed and prevailing weather conditions, resulting in substantial loss of life and economic damage. This narrative-analytical review examines and compares the main approaches to speed management under adverse weather, including seasonal speed-limit systems, conventional Variable Speed Limit (VSL) systems, and the newer generation of Weather-Responsive Variable Speed Limit (WRVSL) systems, drawing on a structured review of the international and Iranian literature. Finland's experience with a 20 km/h seasonal reduction in rural highway speed limits has produced a marked reduction in crashes on icy and snow-covered pavements. The review further indicates that, under adverse weather, not only does average speed decline, but speed dispersion among drivers increases sharply - a factor that is itself a key contributor to chain-reaction crashes. Reliability-theory-based WRVSL systems, which set speeds that are simultaneously safe and acceptable to drivers, offer a promising means of addressing this challenge. Building on these findings, this paper proposes an integrated conceptual model, the "Seasonal Smart Maximum Speed" system, which combines a static seasonal baseline with a dynamic, reliability-based response to real-time conditions, as a potential strategy for Iran's rural highways. The proposed model has not yet undergone field or simulation validation in Iran; its expected benefits are therefore presented as testable hypotheses rather than established outcomes.

Keywords: Variable Speed Limit, Speed Management, Adverse Weather Conditions, Road Safety, Intelligent Transportation Systems