

روش‌های کنترل محدودیت سرعت به همراه مطالعه موردی بر روی بزرگراه صیاد شیرازی

روزبه ابرازی، کارشناس ارشد تحقیق در عملیات، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی
امیرکبیر¹

مهناز آقامحقیقی، دانشجوی کارشناسی ارشد علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر،
دانشگاه صنعتی امیرکبیر²

سید مهدی تشکری هاشمی، استاد تمام علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه
صنعتی امیر کبیر، رئیس پژوهشکده سیستم‌های حمل و نقل هوشمند دانشگاه صنعتی امیر کبیر³

¹r.ebrazi@aut.ac.ir, 66483344

²m.mohaqeq@aut.ac.ir, 66483344

³hashemi@aut.ac.ir, 02166406322

چکیده

بخشی از تراکم موجود در بزرگراه‌ها ناشی از رفتارهای خودمحور وسائل نقلیه‌ی شخصی جهت استفاده از زیر ساخت‌های موجود است و چنانچه این رفتارهای خودمحور از طریق تکنیک‌های مدیریت پویای ترافیک با رفتارهای قابل کنترل جایگزین شوند، بهبود قابل ملاحظه‌ای در وضعیت ترافیکی بزرگراه‌ها حاصل می‌گردد. یکی از تکنیک‌های جدید و کارای مدیریت پویای ترافیک، جهت کنترل جریان ترافیک بزرگراه‌ها، کنترل محدودیت سرعت است. در این مقاله نخست بیان می‌کنیم که چگونه کنترل محدودیت سرعت منجر به بهبود شرایط ترافیکی می‌شود، سپس مروری بر روش‌های کنترل محدودیت سرعت خواهیم داشت. مطالعه موردی بر روی بزرگراه صیاد شیرازی با استفاده از الگوریتمی پیشنهادی و در شبیه ساز AIMSUN صورت گرفته است. از مهم‌ترین نتایج بدست آمده از شبیه سازی می‌توان به کاهش معنی دار 10.96 درصد در زمان تأخیر و کاهش 9.06 درصدی در مجموع زمان‌های سفر اشاره کرد.

کلید واژه: کنترل ترافیک، مدیریت پویای ترافیک، کنترل محدودیت سرعت، سیستم‌های حمل و نقل هوشمند.

بزرگراه‌ها جزء مهم‌ترین راه‌های ارتباطی و حمل و نقل شهری و جاده‌ای به شمار می‌آیند. به دلیل افزایش چشمگیر مالکیت خودرو و افزایش تقاضا برای سفرهای درون شهری و برون شهری، بزرگراه‌های اقصی نقاط جهان روزانه تراکم‌های زیادی را تجربه می‌کنند. تراکم‌هایی که دائم به لحاظ وسعت و زمان در حال توسعه‌اند و ظرفیت زیر ساخت‌های موجود را به خصوص در ساعات اوج عبور و مرور، زمان‌هایی که بیش از هر زمان دیگری بهره‌برداری کامل از ظرفیت معابر مورد نیاز است، کاهش می‌دهند و مشکلات عمده‌ای از قبیل افزایش زمان‌های سفر، کاهش سطح ایمنی، افزایش مصرف سوخت و آلودگی‌های زیست محیطی را به همراه دارند.

یکی از راهکارهای موجود جهت مقابله با این تراکم‌ها و مشکلات ناشی از آن‌ها احداث زیرساخت‌های جدید به منظور افزایش ظرفیت معابر است که به دلیل هزینه‌های سنگین اقتصادی، زیست محیطی و کمبود فضا در مناطق شهری راه حل مناسبی به نظر نمی‌آید. راهکار دیگری که جهت مقابله با ترافیک وجود دارد؛ تشویق به استفاده از وسایل حمل و نقل عمومی مانند اتوبوس، مترو، ... با دادن اولویت عبور به آن‌ها و بالا بردن هزینه استفاده از خودروهای شخصی از طریق قیمت سوخت و مالیات‌های مربوط به اشغال خیابان‌ها است. این در حالی است که این روش نیز نیازمند برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و سرمایه‌گذاری‌های بلند مدت است. اما راهکار سوم استفاده از سیستم‌های کنترلی، ارتباطی و کامپیوتری به منظور بهره‌برداری هرچه بیشتر از زیرساخت‌ها و مسیرهای موجود است که به آن مدیریت پویای ترافیکی¹ گفته می‌شود.

کنترل محدودیت سرعت² یکی از کاراترین تکنیک‌های مدیریت پویای ترافیک به شمار می‌رود. کنترل محدودیت سرعت یک ابزار کنترلی ویژه جهت مدیریت رفتار جمعی رانندگان (سرعت جمعی وسایل نقلیه) در بزرگراه‌ها است که از طریق تعیین حدود مجاز سرعت در بزرگراه‌ها با توجه به شرایط متغیر وضعیت ترافیک، آب و هوا، تصادفات و مسائل ایمنی، آلودگی هوا و نیز نمایش این حدود روی تابلوهای متغیر خبری در مقاطع مختلف بزرگراه سعی در مدیریت وضعیت ترافیکی جریان اصلی دارد [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

کنترل محدودیت سرعت در کشورهای مختلف نظیر هلند، انگلستان، آلمان، فنلاند، آمریکا و غیره مورد استفاده قرار گرفته است که مهم‌ترین این تجربیات مربوط به بزرگراه A2 [9]، اوترخت و نوتردام [10] هلند و M25 انگلستان [11] است. در بزرگراه A2 در هلند بر اساس میانگین یک دقیقه‌ای سرعت و حجم اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حلقه‌ای یک ایستگاه اندازه‌گیری، محدودیت سرعت به 90 یا 70 کیلومتر در ساعت کاهش پیدا می‌کند. کنترل محدودیت سرعت در این بزرگراه سبب شد تا جریان ترافیکی یکنواخت‌تر، اختلاف سرعت بین گروه‌های مختلف وسایل نقلیه کمتر و

¹ Dynamic traffic management

² Variable Speed Limit

سر فاصله‌ها و موج‌های ناگهانی کوچک‌تر شوند. یکنواخت سازی جریان باعث شد تا ناپایداری در جریان ترافیک - که توسط تعداد کاهش‌های جدی سرعت اندازه گیری می‌شود - به طور معنی داری و به میزان 50% کاهش پیدا کند. در انگلستان و در بزرگراه M25 زمانی که جریان در حسگرهای حلقه‌ای در هر ایستگاه کنترلی به 1650 خودرو در هر ساعت در هر خط رسید، محدودیت سرعت به 96.5 کیلومتر (60 مایل) در ساعت کاهش می‌یابد که از مهم‌ترین نتایج حاصله می‌توان به این موارد اشاره کرد: 1- تعداد برخوردهای خودروها 10% کاهش پیدا کرد. 2- بزرگراه تحت کنترل سهم بیشتری در زمان سفر قابل اعتماد داشت. 3- توزیع یکنواخت ترافیک بین تمامی خطوط مشاهده شد. 4- توزیع یکنواخت سر فاصله‌ها مشاهده شد. 5- سطح آلودگی هوا و صوت کاهش یافت. 6- امکان رانندگی ساده‌تر به وجود آمد.

هدف از این مقاله مرور روش‌ها و ارائه نحوه تأثیر کنترل محدودیت سرعت و در نهایت مطالعه موردی در شهر تهران است. بر همین اساس نخست در بخش 2 اهداف کلی، عملکرد و استراتژی‌های کنترل محدودیت سرعت بررسی می‌شود، سپس در بخش 3 طرح کلی و انواع روش‌های کنترل محدودیت سرعت مرور می‌شود. در بخش 4 الگوریتم پیشنهادی برای کنترل محدودیت سرعت ارائه می‌شود و نتایج پیاده سازی این الگوریتم در مطالعات شبیه سازی بر روی بزرگراه صیاد مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش 5 نتایج بدست آمده از مطالعه موردی بیان شده است.

2- اهداف کلی و عملکرد اعمال محدودیت سرعت

به طور کلی هدف از اعمال استراتژی کنترل محدودیت سرعت، کاهش تراکم، کاهش زمان سفر، بهبود قابلیت اعتماد به زمان سفر، بهبود سطح سرویس، همگن سازی سرعت‌ها و کاهش توقف‌های ناگهانی، بهبود ایمنی [12] و کاهش نرخ تصادفات [9] با توجه به هماهنگ سازی و یکسان سازی سرعت‌ها و سر فاصله‌ها [13]، مصرف کاراتر انرژی و کاهش آلودگی هوا [14] است. در ادامه برای روشن شدن نحوه دستیابی به اهداف فوق مکانیزم‌های تأثیر کنترل محدودیت سرعت در وضعیت ترافیک بررسی می‌شوند. این بررسی نیازمند پاره‌ای دانش مقدماتی است که نخست به توضیح آن‌ها می‌پردازیم.

2-1- دانش مقدماتی

قبل از هر چیز در خصوص مفاهیمی چون موج ناگهانی، وضعیت ترافیکی پایدار³، نیم پایدار⁴ و ناپایدار⁵، نمودار بنیادی، گلوگاه که مفاهیمی اساسی در ترافیک هستند توضیحاتی ارائه می‌دهیم [15]

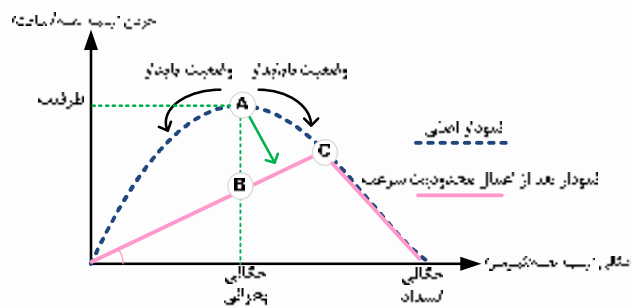
³ Stable

⁴ Metastable

⁵ Unstable

2-2- عملکرد محدودیت سرعت و استراتژی‌های کنترل محدودیت سرعت

شکل 2 نمودار بنیادی جریان- چگالی را نشان می‌دهد. مطابق شکل افزایش چگالی در یک بخش از بزرگراه، افزایش جریان (خروجی) از آن بخش را نتیجه می‌دهد (سمت چپ نقطه A). پس از آنکه در چگالی بحرانی، نقطه‌ی A، جریان به بیشترین مقدار خود (ظرفیت بزرگراه) می‌رسد، افزایش چگالی کاهش میزان جریان را در پی دارد که این به معنای شروع ایجاد تراکم و وضعیت ناپایدار ترافیکی (حالت توقف و حرکت) است. این کاهش جریان ادامه دارد تا اینکه در چگالی انسداد (چگالی راه بندان) مقدار جریان به صفر می‌رسد. بنابراین وضعیت ترافیک از چگالی صفر تا چگالی بحرانی پایدار و از چگالی بحرانی تا چگالی انسداد ناپایدار است.



شکل 2: نمودار بنیادی چگالی- جریان. شیب خطی که مبدأ را به نقطه‌ای روی نمودار متصل می‌کند معرف سرعت متوسط در وضعیت ترافیکی متناظر با آن نقطه است.

شایان ذکر است که در نمودار جریان- چگالی شیب خطی که مبدأ نمودار را به نقطه‌ای روی آن متصل می‌کند برابر سرعت متوسط در آن نقطه است. کنترل محدودیت سرعت شکل نمودار بنیادی را تغییر می‌دهد. فرض کنید حالت ترافیک در بخشی از بزرگراه در نقطه‌ی A قرار دارد. اگر محدودیت سرعت در این بخش اعمال شود، حالت ترافیک بجای نقطه‌ی A به مکانی بین نقاط C و B منتقل می‌شود و در واقع شیب خطی که مبدأ را به نقطه A متصل می‌کرد کاهش می‌یابد [2, 18]. مطابق شکل 2 چنین اقدام کنترلی، باعث کاهش نسبی جریان خروجی از ناحیه‌ی کنترل شده می‌گردد و در ضمن حالت پایداری ترافیک را حفظ می‌کند. حتی اگر تقاضای ترافیکی بالا باشد، حالت ترافیک در نهایت به نقطه‌ی C خواهد رسید. در واقع چگالی بحرانی به نقطه C منتقل می‌شود. پس می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اعمال محدودیت سرعت در یک بخش باعث دو عملکرد⁹ می‌شود: 1- وضعیت ترافیک به حالت ناپایدار تغییر نکند و یا اینکه تغییر وضعیت به حالت ناپایدار به تأخیر افتد. 2- کاهش نسبی جریان اتفاق افتد. باید توجه داشت که کنترل محدودیت سرعت در مواقعی که تقاضا بالاست و ظرفیت به حالت اشباع رسیده (چگالی انسداد) تأثیر چندانی در جلوگیری از حالت توقف و حرکت ندارد. به عبارت دیگر برای تأثیر مثبت کنترل محدودیت سرعت وضعیت ترافیک باید

⁹ Function

در حالت نیمه پایدار باشد، زیرا در وضعیت پایدار که اختلالات بدون دخالت سامانه‌های کنترلی رفع می‌شود و در حالت ناپایدار هر گونه محدودیت سرعت منجر به اختلال و موج ناگهانی در ترافیک می‌شود.

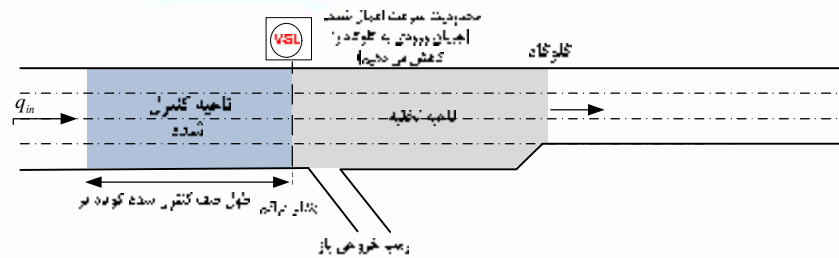
بر اساس عملکردهای توضیح داده شده برای کنترل محدودیت سرعت دو استراتژی کلی در زمینه‌ی استفاده از کنترل محدودیت سرعت وجود دارد:

1- استراتژی همگن سازی¹⁰: در این دیدگاه تاکید بر استفاده از کنترل محدودیت سرعت به عنوان ابزاری است که می‌تواند از طریق کاهش اختلاف سرعت و چگالی بین گروه‌های مختلف خودرو (خودروهای موجود در خطوط مختلف و یا قطعات متفاوت بزرگراه) به ایجاد یک جریان همگن و پایدار در بزرگراه‌ها بینجامد [9، 19، 20، 21]. در رویکرد همگن سازی معمولاً از مقادیر محدودیت‌های سرعت بیشتر از سرعت بحرانی (متوسط سرعت در چگالی بحرانی) استفاده می‌کنند. بنابراین این محدودیت سرعت‌ها جریان ترافیک را محدود نمی‌کنند بلکه به مقدار کمی متوسط سرعت را کاهش و چگالی کمی افزایش می‌دهند. بر طبق مشاهدات میدانی همگن‌سازی باعث ایجاد جریان ترافیک پایدارتر و ایمن‌تر می‌گردد [22] اما تأثیر زیادی در بهبود نرخ جریان ایجاد نمی‌کند. از دیگران نتایج گزارش شده برای این استراتژی بهبود کیفیت هوا به دلیل کاهش تعداد توقف‌ها و حرکت‌ها است.

2- استراتژی جلوگیری از تفکیک ترافیک¹¹: این استراتژی بر جلوگیری از شکل‌گیری چگالی‌های بالا در طول بزرگراه و به ویژه در مناطق گلوگاهی تمرکز دارد و به منظور کنترل جریان ورودی به ناحیه متراکم، اجازه استفاده از محدودیت سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی را نیز می‌دهد [4، 7، 23، 24، 25]. با استفاده از این استراتژی افزایش جریان‌های ترافیکی و کاهش زمان‌های سفر قابل دستیابی است. هر زمان که جریان ورودی گلوگاه از ظرفیت آن بزرگ‌تر شد، پیش از فعال شدن گلوگاه و تشکیل تراکم با اعمال محدودیت سرعت در فاصله مناسب از گلوگاه (500 تا 700 متر) جریان خروجی از بخش کنترل شده (جریان ورودی به گلوگاه) را به مقدار کافی کاهش می‌دهیم تا تقریباً برابر با ظرفیت گلوگاه شود ($q_{cap}^{down} \cong q_{in}$). به این ترتیب از تشکیل تراکم و افت ظرفیت جلوگیری کرده و یا وقوع آن‌ها را به تأخیر می‌اندازیم (شکل 3). جلوگیری از وقوع پدیده افت ظرفیت منجر به بهبود نرخ جریان خروجی از گلوگاه و در نتیجه بهبود نرخ جریان خروجی از بزرگراه می‌شود (با فرض اینکه همه وسایل نقلیه از گلوگاه عبور می‌کنند) و مجموع زمان‌های سفر کاربران را نیز کاهش می‌دهد. دو سناریو کلی برای پیاده سازی این استراتژی وجود دارد، در سناریوی نخست تمامی قطعات بزرگراه و رمپ‌های ورودی آن با هم دیده می‌شود و از فعال شدن تمامی گلوگاه‌ها به صورت یکپارچه جلوگیری می‌شود و در سناریو دوم تمرکز تنها بر روی یک گلوگاه است و کلیه اقدامات برای جلوگیری از فعال شدن آن یک گلوگاه است.

¹⁰ Homogenization

¹¹ Traffic Breakdown



شکل 3: جلوگیری از فعال شدن گلوگاه و افت ظرفیت از طریق اعمال محدودیت سرعت.

3- روش‌های کنترل محدودیت سرعت

به طور کلی چهار چوب روش‌های کنترل محدودیت سرعت به صورت زیر است.

- 1- دریافت اطلاعات تاریخی یا لحظه‌ای ترافیک یا هر دو
 - 2- استفاده از یک الگوریتم برای تعیین محدودیت‌های سرعت و دستورات کنترلی با توجه به اطلاعات کنونی سنسورها و یا وضعیت‌های پیش بینی شده
- در ادامه پاره‌ای از روش‌های پر اهمیت کنترل محدودیت سرعت را با توجه به این چهار چوب کنترلی و نوع استراتژی و سناریویی که پیاده سازی می‌کنند، بررسی می‌شود.

3-1- روش‌های مبتنی بر توسعه مدل شبیه سازی ترافیک METANET

این دسته از روش‌ها هم اطلاعات تاریخی و هم اطلاعات لحظه‌ای ترافیک را به کار می‌گیرد و از آن‌ها برای پیش بینی وضعیت آینده ترافیک با استفاده از یک مدل شبیه سازی ماکروسکوپیک به نام METANET [26, 27] استفاده می‌کنند.

مدل METANET یک مدل جریان ترافیک است که بنا به ماهیت ماکروسکوپیک خود از متغیرهای جمعی¹² برای توصیف رفتار رانندگان استفاده می‌کند. در این مدل، شبکه‌ی ترافیک به وسیله یک گراف جهت دار نشان داده می‌شود و هر کمان نشان دهنده امتداد بزرگراه است. هر یک از این کمان‌های بزرگراهی مشخصات یکنواختی دارند، یعنی نه رمپ ورودی نه رمپ خروجی و نه تغییر هندسی خاصی دارند و هنگامی که این تغییرات در مشخصات بزرگراه یا هندسه راه وجود داشته باشد یک نود در آن مکان اضافه می‌شود. برای مطالعه بیشتر راجع به این مدل شبیه ساز به [28] مراجعه شود.

این مدل بعدها برای لحاظ کردن اثر کنترل محدودیت سرعت در فرآیند شبیه سازی توسعه داده شد و از آن برای ساخت یک مدل ریاضی پویای پیش بین، که محدودیت‌های سرعت را در یک افق

¹² aggregated variables

زمانی به عنوان متغیرهای تصمیم دارد، استفاده گردید. در نهایت با استفاده از مدل ریاضی بدست آمده، مسئله کنترل محدودیت سرعت به صورت یک مسئله بهینه سازی حل می‌گردد. از جمله روش‌های مبتنی بر توسعه‌ی مدل METANET می‌توان به روش کنترلی مدل پیش بین (MPC¹³) که اولین بار توسط هگی [29] مطرح شد و روش مطرح شده توسط پاپامیچایل¹⁴ [8] که در سامانه مدیریت ترافیک MTFCC¹⁵ مورد استفاده قرار گرفته است اشاره کرد. تفاوت روش‌های یاد شده عمدتاً به نحوه اعمال تأثیر محدودیت سرعت در مدل METANET برمی‌گردد. از ویژگی‌های ممتاز روش‌های مبتنی بر توسعه مدل METANET نظیر MPC کنترل هماهنگ سرعت در مسیر اصلی بزرگراه با چندین رمپ ورودی به صورت یکپارچه است که برای مطالعه بیشتر در این زمینه خواننده می‌تواند به [1، 8] رجوع کند. اما در عمل به علت افزایش حجم محاسبات امکان پیاده سازی این روش‌ها در یک شبکه وسیع با زمان حل مناسب و کارا وجود ندارد. برای حل این مشکل هگی [1، 2] پیشنهاد می‌کند که شبکه ترافیکی به زیر شبکه‌های مجزایی تفکیک شود که کم‌ترین تعامل را با هم دارند. بدیهی است که در بسیاری از موارد امکان تفکیک بین قسمت‌های مختلف یک سیستم ترافیکی به علت تأثیرات متقابل، وجود ندارد. قدس [6] از تئوری بازی برای حل این مشکل استفاده کرده است. وی از شکل تغییر یافته یک الگوریتم معروف تکرار شونده به نام بازی ساختگی (FP¹⁶)، که به بازی ساختگی نمونه (SFP¹⁷) معروف است، استفاده کرده است. در این روش هر بازیگر (کنترل کننده محدودیت سرعت) استراتژی بهینه‌ی خود (محدودیت‌های مناسب سرعت) را با فرض اینکه بازیگرهای دیگر استراتژی شناخته شده‌ای را (که از پیشینه بازی‌های قبلی به دست آمده است) انتخاب کرده‌اند، تعیین می‌کند؛ بنابراین بازیگرها استراتژی‌های یکدیگر را به صورت تکرار شونده فرا می‌گیرند. مهم‌ترین ویژگی الگوریتم SFP امکان محاسبه موازی جهت یافتن بهترین پاسخ می‌باشد که سرعت محاسبات را با به‌کارگیری چند CPU افزایش می‌دهد. مقایسه دو روش MPC و SFP-MPC نشان می‌دهد زمان انجام محاسبات در SFP-MPC به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

3-2- روش‌های مبتنی بر آگاهی

یک رویکرد دیگر استفاده از روش‌های مبتنی بر آگاهی می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند به کمک سازوکار استنتاج، محدودیت‌های مناسب سرعت را از روی موقعیت فعلی یک سیستم ترافیکی تعیین کنند. در این راستا قدس [30] از کنترل فازی برای کنترل ورودی و محدودیت سرعت استفاده کرده است. در این روش جهت تطبیق فرآیند کنترل با تغییراتی که در سیستم ترافیکی به وقوع می‌پیوندد، الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه سازی بکار گرفته شده است. به منظور ارزیابی کارایی کنترل کننده‌ی ژنتیک - فازی محدودیت سرعت و رمپ میترینگ، مقایسه‌ای بین مجموع زمان‌های سفر

¹³ Model Predictive Control

¹⁴ Papamichail

¹⁵ Mainstream traffic flow control

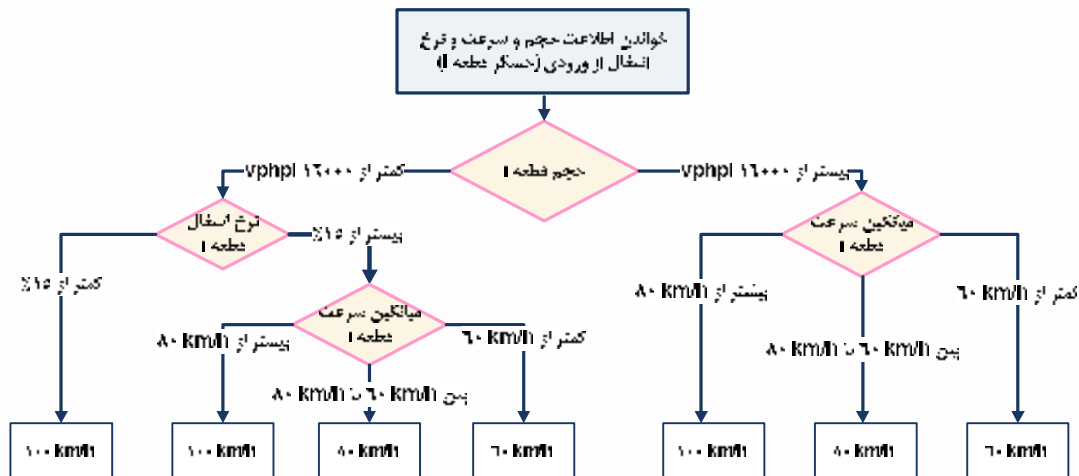
¹⁶ Fictitious Play

¹⁷ Sample Fictitious Play

کاربران بزرگراه زمانی که کنترل کننده فازی به کنترل محدودیت سرعت و نرخ ورود از رمپ می-پردازد و حالت بدون کنترل انجام شد. نتایج این مقایسه بیانگر آن است که کنترل محدودیت سرعت توانسته است با محدود کردن جریان ورودی به قسمت پر ترافیک (تقاطع بزرگراه و رمپ ورودی)، ازدحام را کاهش دهد و در نتیجه مجموع زمان‌های سفر کاربران را در مقایسه با حالت بدون کنترل به میزان 15.3% بهبود دهد.

3-3- درخت منطق¹⁸

این روش کنترلی که توسط آلابی [31] مطرح شده است، ساختارهای موجود در روش‌های اولیه به کار گرفته شده توسط آژانس‌های ترافیکی را با هم ترکیب می‌کند. در این روش ابتدا بزرگراه به مجموعه‌ای از قطعات تقسیم می‌شود، که هر قطعه دارای یک حسگر و تابلو متغیر خبری است و به صورت واحد عمل می‌کند. سپس از اطلاعات تاریخی هر قطعه (میانگین جریان، سرعت، و نرخ اشغال¹⁹) برای تنظیم آستانه‌ها و میزان پارامترهای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود و یک ساختار درختی برای تصمیم‌گیری در مورد محدودیت سرعت‌ها در وضعیت‌های مختلف ترافیکی شکل می‌گیرد. در نهایت از اطلاعات لحظه برای تشخیص حالت کنونی و در نهایت تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. در واقع پیش‌بینی این روش در نحوه تنظیم شاخه‌های درخت تصمیم است.



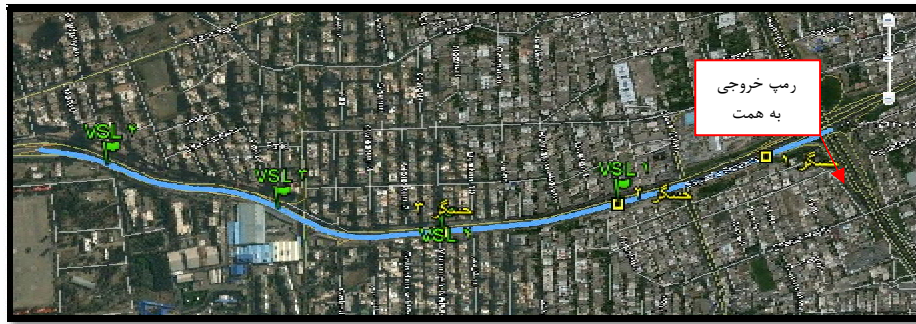
شکل 4: درخت تصمیم برای تعیین محدودیت سرعت قطعه 1

شکل 4 نحوه عمل این الگوریتم را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای تصمیم‌گیری در این الگوریتم کنترلی بر اساس اصول مهندسی ترافیک انتخاب شده است.

¹⁸ logic tree
¹⁹ occupancy

4- الگوریتم پیشنهادی کنترل محدودیت سرعت و مطالعه موردی بر روی بزرگراه صیاد

مطالعه موردی بر روی 2.34 کیلومتر از بزرگراه صیاد شیرازی مسیر شمال به جنوب، حد فاصل خیابان شهید مفتوحی تا رمپ خروجی به بزرگراه همت، با کمک شبیه ساز AIMSUN صورت گرفت. این قطعه از بزرگراه 3 خط عبوری دارد و یک خط شانه راه که در ساعات اوج عبور و مرور از این خط نیز به عنوان خط عبوری استفاده می‌شود؛ لذا برای واقعی‌تر شدن نتیجه شبیه سازی‌ها این بزرگراه با 4 خط در شبیه‌ساز در نظر گرفته شد. تراکم صبحگاهی ناشی از پس‌زدگی بار رمپ خروجی به بزرگراه همت منجر به ایجاد گلوگاه در ناحیه انتهایی این قطعه می‌شود و متعاقباً صف‌های طولانی و موج‌های ناگهانی پیش رونده به سمت بالادست شکل می‌گیرند.



شکل 5: نقشه تجهیزات و تقسیم بندی به قطعات برای کنترل با سامانه سرعت

در مدل شبیه‌ساز، این بخش از بزرگراه به 4 قطعه 500 متری تقسیم شد که این قطعات به لحاظ ساختار هندسی و وضعیت ترافیکی یک‌ریخت می‌باشند و متناظر با هر قطعه یک حسگر در نظر گرفته شد (شکل 5).

4-1- الگوریتم پیشنهادی برای کنترل محدودیت سرعت

از آنجا که پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیچیده کنترلی نیاز به جمع‌آوری داده‌های مکانیزه و روند کالیبره کردن دقیق و حساسی دارند و نیز بهبود مشاهده شده از روش‌های مختلف تقریباً مشابه هستند، بعلاوه بسیاری از نمونه‌های موفق و واقعی سامانه کنترل محدودیت سرعت (در مقابل تجربیات شبیه سازی) از استراتژی‌های ساده‌ای استفاده می‌کنند (نظیر استراتژی‌های استفاده شده در انگلستان و هلند)، در اینجا نیز الگوریتم کنترل محدودیت سرعت به کمک درخت تصمیم ارائه شده است. ایده اصلی الگوریتم کنترل میزان تقاضای ورود به گلوگاه و سپس مشخص کردن وضعیت فعلی گلوگاه، وضعیت فعال بودن و یا فعال نبودن آن با توجه به میانگین سرعت و چگالی، و در نهایت تصمیم‌گیری راجع به میزان محدودیت سرعت‌های تمامی قطعات بالادست گلوگاه به صورت یکپارچه است به نحوی که عملکرد بهینه گلوگاه، جلوگیری از فعال شدن و پدیده کاهش ظرفیت در آن، تضمین شود.

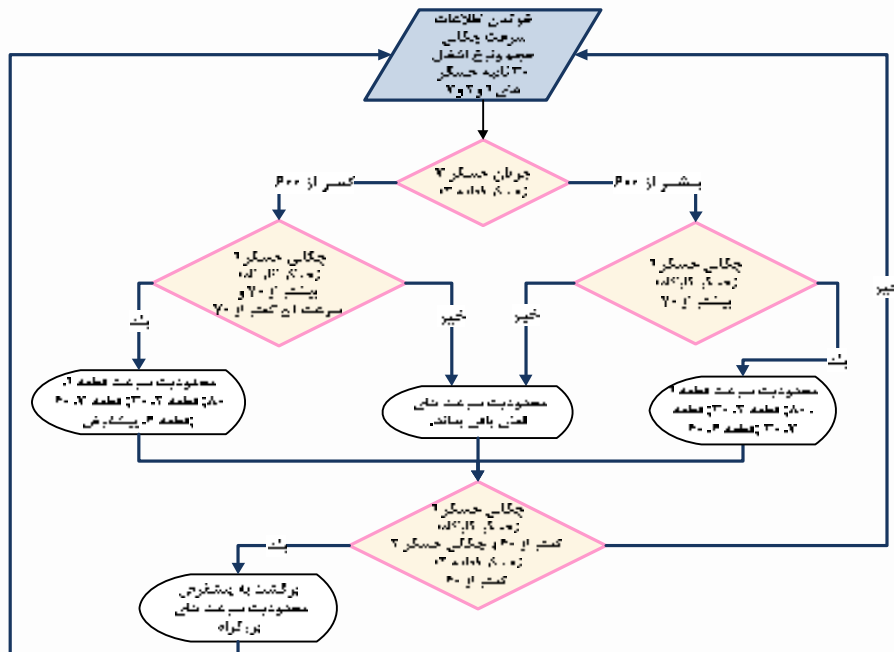
بر این اساس سه وضعیت راه انداز²⁰ برای کنترل محدودیت سرعت و یک وضعیت برای تشخیص بهبود جریان در الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است. برای شناسایی وضعیت موجود کمیت‌های سرعت میانگین و چگالی گلوگاه از حسگر 1، چگالی قطعه دوم از حسگر 2، جریان قطعه سوم از حسگر 3، در هر 20 ثانیه اندازه گیری می‌شود. وضعیت راه انداز اول زمانی تشخیص داده می‌شود که جریان قطعه سوم، که تقاضای ورودی به گلوگاه است، بیشتر از 600 خودرو در ساعت (مطابق با سطح سرویس C) باشد. محدودیت سرعت‌های قطعات دوم و سوم جهت کنترل جریان ورودی به گلوگاه به میزان 30 و 40 کیلومتر در ساعت کاهش می‌یابد و سپس در نزدیکی گلوگاه، یعنی قطعه اول، به منظور کاهش تراکم جریان و کاهش اختلال در عبور خودروها هنگام عبور از گلوگاه، محدودیت سرعت پیش فرض بزرگراه یعنی سرعت 80 کیلومتر در ساعت اعمال می‌شود. این الگوی کاهش سرعت در بالادست و افزایش سرعت در هنگام ورود به گلوگاه هم موجب کنترل جریان می‌شود و هم تراکم جریان ورودی به گلوگاه را به میزان چگالی بحرانی آن می‌رساند.

از طرف دیگر وضعیت راه انداز دوم زمانی تشخیص داده می‌شود که جریان در قطعه سوم کمتر از 600 خودرو در ساعت باشد ولی چگالی حسگر 1 یعنی چگالی گلوگاه بیشتر از 70 خودرو در کیلومتر باشد (معادل 23 خودرو در کیلومتر در هر خط که آستانه ورود به سطح سرویس E است) و همچنین سرعت میانگین عبور خودروها از گلوگاه کمتر از 70 کیلومتر باشد، الگوی محدودیت سرعت‌ها مطابق وضعیت قبلی به ترتیب برای قطعات سوم و دوم و اول به صورت 40، 30، 80 خواهد بود. وضعیت اخیر زمانی اتفاق می‌افتد که تقاضای ورودی به گلوگاه متناسب ظرفیت آن است اما به دلیل تعامل خودروها در گلوگاه تراکم ایجاد شده و منجر به فعال شدن آن شده است. وضعیت راه انداز سوم زمانی تشخیص داده می‌شود که صرف نظر از میزان تقاضای ورودی یعنی جریان در حسگر 3 چگالی حسگر 1، یعنی چگالی گلوگاه کمتر از 70 خودرو در کیلومتر است که نشان از فعال نبودن گلوگاه دارد، در این حالت محدودیت سرعت‌های پیش فرض بزرگراه یعنی 80 کیلومتر در ساعت اعمال می‌شود.

وضعیتی که در آن بهبود جریان تشخیص داده می‌شود زمانی به کار می‌آید که یکی از وضعیت‌های کاهش محدودیت سرعت قبلی، یعنی وضعیت‌های اول و دوم اتفاق افتاده و الگوریتم منتظر بهبود در جریان ترافیک و بازگشت به محدودیت سرعت‌های پیش فرض است. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که تراکم در قطعه بالاست گلوگاه (صف تقاضا برای گذشتن از گلوگاه) و نیز تراکم خود گلوگاه از بین برود. بر این اساس زمانی بهبود تشخیص داده می‌شود که چگالی این دو ناحیه کمتر از 40 خودرو در کیلومتر (معادل 13 خودرو در کیلومتر، متناظر با سطح سرویس B) باشد.

فلوچارت این الگوریتم در شکل 6 نمایش داده شده است. طبیعی است آستانه‌های تعیین شده برای فعال سازی بر اساس اطلاعات دریافتی از حسگرها، جریان ترافیکی و چگالی، تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از ناحیه‌ی مورد مطالعه توسط GPS و نیز به صورت ابتکاری در شبیه‌ساز قابل تعیین

و بهبود است. در الگوریتم اخیر آستانه با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده در محل، سرعت‌های جمع‌آوری شده توسط GPS، جدول سطح سرویس [32] و به صورت ابتکاری تعیین شده است.



شکل 6: الگوریتم پیشنهادی کنترل سامانه VSL

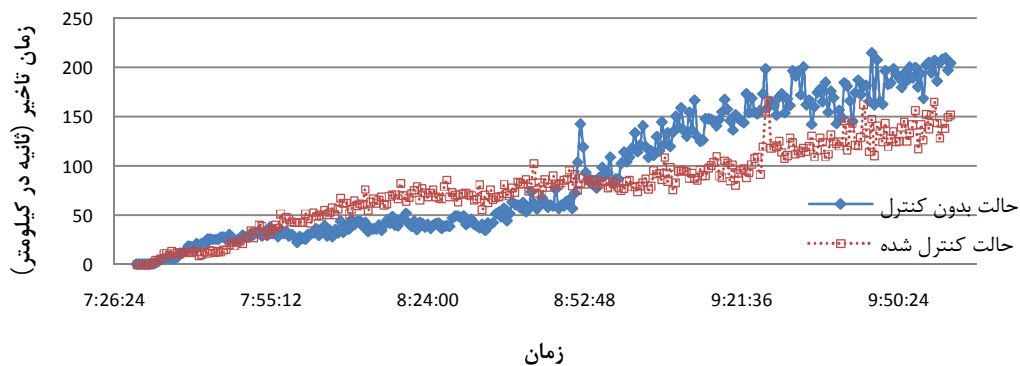
2-4- نتایج

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای مختلف ترافیکی در 10 بار اجرای الگوریتم در حالت فعال بودن الگوریتم پیشنهادی و بدون فعال سازی الگوریتم پیشنهادی اندازه‌گیری شده است. سپس معنی دار بودن اختلاف میانگین پارامترهای مختلف نمونه‌های گرفته شده به وسیله آزمون t سنجیده شد. خلاصه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در جدول 1 ارائه شده است. مقادیر مشخص شده در ستون دوم میزان پارامترهای ترافیکی را بدون اعمال کنترل محدودیت سرعت و ستون سوم این پارامترها را در زمانی که الگوریتم محدودیت سرعت را کنترل می‌کند، نشان می‌دهد. ستون چهارم جدول درصد تغییرات پارامترهای اندازه گرفته شده را در حالتی که الگوریتم پیشنهادی اجرا شده در مقایسه با حالت فعال نبودن کنترل نشان می‌دهد. پارامترهایی از ستون اول جدول که با رنگ آبی متمایز شده‌اند، اختلاف میانگین معنی‌داری در مقایسه با حالت بدون کنترل و در سطح اطمینان 95% داشته‌اند. کاهش 8.53% در مقدار چگالی که افزایش قدرت مانور رانندگان و بهبود سطح سرویس را نتیجه می‌دهد و افزایش 9.43% در سرعت هارمونیک ناشی از کاهش اختلاف سرعت بین گروه‌های مختلف وسایل نقلیه که منجر به بالا رفتن سطح ایمنی و کاهش تعداد موج‌های ناگهانی می‌شود از جمله نتایج حاصله می‌باشند.

جدول 1: نتایج پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

پارامترهای کارایی	حالت کنترل شده	حالت بدون کنترل	درصد تغییرات	P-مقدار تست T
زمان تأخیر	129.14	145.04	-10.96	0.04
چگالی متوسط	43.89	47.98	-8.53	0.04
جریان ترافیک	3659.9	3632.8	0.75	0.29
سرعت هارمونیک	19.56	17.88	9.43	0.04
حداکثر طول صف	56.9	92.4	-38.42	0.25
حداقل طول صف	2.23	3.44	-34.99	0.46
تعداد توقف‌ها	2.26	3.37	-33	0.00
سرعت	31.45	31.59	-0.42	0.87
زمان توقف‌ها	100.57	129.95	-22.61	0.00
مجموع مسافت‌های طی شده	15409.66	15219.49	1.25	0.27
مجموع زمان سفر	2848619	3132512	-9.06	0.02
زمان سفر	201.97	201.97	-7.93	0.04

شکل 7 نمودار میزان تأخیر (ثانیه در کیلومتر) یکی از اجراهای شبیه‌ساز را نشان می‌دهد. این نمودار نشانگر آن است که میزان تأخیرها در ابتدا نسبت به حالت بدون کنترل بیشتر بوده است، اما این امر سبب حفظ جریان در حالت پایدار شده است و اعمال کنترل محدودیت سرعت در ادامه منجر می‌شود میزان تأخیرها نسبت به حالت بدون کنترل کمتر شود.



شکل 7: نمودار زمان‌های تأخیر حالت بدون کنترل و کنترل شده برای یک‌بار اجرای شبیه ساز.

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته پیشنهاداتی برای پیاده سازی بهتر الگوریتم کنترلی ارائه می‌شود: 1- به منظور جلوگیری بالا بردن ایمنی بهتر است اختلاف محدودیت‌های سرعت اعمال شده در قطعات و یا زمان‌های متوالی از یک حد از پیش تعیین شده‌ای (مثلاً 10 تا 20 کیلومتر در ساعت) تجاوز نکند. 2- در غیاب کنترل محدودیت سرعت، تراکم‌های جزئی به سرعت از بین می‌روند در حالی که با فعالیت سامانه کنترلی در چنین شرایطی، به دلیل اعمال محدودیت سرعت تعیین شده برای مدت زمان طولانی‌تر از زمان لازم جهت رفع تراکم، افزایش زمان‌های سفر را مشاهده خواهیم کرد؛ لذا می‌باید شروطی به الگوریتم اضافه شود که از پاسخ فوری به تراکم‌های موقت جلوگیری شود.

5- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی کنترل محدودیت سرعت به عنوان یکی از تکنیک‌های جدید و کارای مدیریت پویای ترافیک پرداختیم. در ادامه مکانیزم‌های تأثیر آن بر ترافیک و چهارچوب کلی روش‌های کنترل سرعت به صورت مشروح بیان شد و روش‌های مختلف ارائه شده در مقالات شامل MPC، ژنتیک - فازی و درخت منطبق بررسی شد. سپس از صورت تغییر یافته‌ای از روش کنترلی درخت منطبق برای کنترل سرعت قطعه‌ای از بزرگراه صیاد شیرازی در محیط شبیه ساز استفاده شده است. مزیت‌های استفاده از این الگوریتم پیشنهادی شامل موارد زیر است:

- پیاده سازی آن نسبت به سایر الگوریتم‌های اشاره شده ساده‌تر و سرعت تصمیم‌گیری در آن بالا است، و نیز از شفافیت لازم برای کاربران مرکز کنترل ترافیک برخوردار می‌باشد.
- بر خلاف الگوریتم قبلی که از درخت تصمیم برای تعیین محدودیت سرعت‌ها برای قطعات مختلف بزرگراه به صورت جدا جدا استفاده می‌کردند، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله برای تمامی قطعات به صورت یکپارچه تصمیم‌گیری می‌کند.
- الگوریتم‌های درخت تصمیم قبلی جز همگن‌سازی سرعت و نیز کاهش خطر بروز تصادف، در پاره‌ای از موارد منجر به افزایش زمان سفر نیز می‌شد اما همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص شد این الگوریتم علاوه بر همگن‌سازی سرعت منجر به کاهش در مجموع زمان سفر نیز می‌شود.
- برای اولین بار از کنترل محدودیت سرعت برای کنترل گلوگاه ناشی از پس‌زدگی بار رمپ خروجی از بزرگراه استفاده شده است.

نتایج اولیه استفاده از شبیه‌ساز نشان از: 1- کاهش 10.96 در زمان تأخیر و کاهش 9.06 در مجموع زمان‌های سفر 2- کاهش 8.53 در میزان چگالی بزرگراه که قدرت مانور و رانندگی با سطح سرویس بالاتری را برای خودروها به همراه دارد. 3- افزایش 9.43 سرعت هارمونیک که افزایش ایمنی مسیر و کاهش تعداد موج‌های ناگهانی و احتمالاً کاهش مصرف سوخت را به دنبال خواهد داشت. بعلاوه مشاهده شد که کنترل محدودیت سرعت گرچه ممکن است در زمان‌هایی به طور نسبی منجر به افزایش میزان تأخیر و به طبع افزایش مدت زمان سفر شود اما در مجموع کاهش میزان تأخیر را سبب خواهد شود. از دیگر نتایج پیاده سازی لزوم دقت در نحوه واکنش به تراکم‌های موقت برای جلوگیری از تأثیر منفی کنترل محدودیت سرعت است.

6- قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت و پشتیبانی شرکت کنترل ترافیک تهران برای این کار تحقیقاتی کمال تشکر و قدردانی را دارند.



- Transportation Research C, , Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits , 13, 185–209, Elsevier.
- Transportation Research Board, , Optimal Coordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Wave, 1852, 167-174, Transportation Research Board of the National Academies.
- Bertini, R., & Bogenberger, K, , Impact of Driver Information System on Traffic Dynamics on a German Autobahn: Lessons for U.S. Applications. 12th World Congress.
- Lu, X.-Y., Varaiya, P., Horowitz, R., Su, D., & Shladover, S. E, , A New Approach for Combined Freeway Variable Speed Limits and Coordinated Ramp Metering. 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, (pp. 491-498). Madeira Island, Portugal.
- Carlson, R. C., Papamichail, I., & Papageorgiou, M, , Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Freeways using Variable Speed Limits. 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, (pp. 513-518). Madeira Island, Portugal.
- TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, , An Efficient Optimization Approach to Real-Time Coordinated and Integrated Freeway Traffic Control. , 11.4, 873-884, IEEE.
- Transportation Research Part C, , Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks, 193–212, Elsevier.
- Papamichail, I., Kampitaki, K., Papageorgiou, M., & Messmer, A, , Integrated Ramp Metering and Variable Speed Limit Control of Motorway Traffic Flow. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, (pp. 14084-14089). Seoul, Korea.
- Van de Hoogen, E., & Smulders, S, , Control by variable speed signs: Results of the Dutch experiment, Control IEE Conf. Pub. 391, (pp. 145–149).
- Van Toorenburg, J, , Homogeniseren: effect van aangepaste adviessnelheden op de verkeersafwikkeling. Rijkswaterstaat, DienstVerkeerskunde, Rotterdam (in Dutch).
- UK Highways Agency , M25 Controlled Motorways: Summary Rep.
- Transportation Research Board, , Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-Time Crash , 2078, 108-116, Transportation Research Board of the National Academies.
- Transportation Research Part C, , Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety , 14, 213-228, Elsevier.
- Wesseling, J., Hollander, K., Teeuwisse, S., Keuken, M., Spoelstra, H., Gense, R., et al, , Investigation of the Effects of the 80 km/h Measure at the A13 on the Air Quality in Overschie. Technical Report.
- American Physical Society(APS), , Experimental features and characteristics of traffic jams. Phys. Rev. E , 53 .2, 1297–1300.
- PROCEEDINGS THE ROYAL OF SOCIETY, , On Kinematic Waves: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proc., of Royal Society , 229 .1178, 317-345, Royal Society.
- Operation Research, , Shock Waves on Highway , 4 .1, 42-51, JSTOR.



- Transportation Research Board, , Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow , 2047, 37–48, Transportation Research Board of the National Academies.
- د- Zackor, H. , د د, Self-sufficient control of speed on freeways. Int.Symp. Traffic Control Systems, 2A, pp. 226–249. Berkeley, CA.
- Smulders, S, د د , Control by variable speed signs—The Dutch experiment. Inst. Elect. Eng. Sixth Int Conf. Road Traffic Monitoring and Control, (pp. 99–103). London, U.K..
- Hardman, E. J, د د , Motorway speed control strategies using SISTM, Eighth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 422, pp. 169–172.
- Transportation Research Part B, د د , Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs. Transportation Research , 24b .2, 111-132, Elsevier.
- Automatica, د د , Traffic density control for automated highway systems. Automatica , 33.7, 1273–1285- Elsevier.
- Lenz, H., Sollacher, R., & Lang, M, د د د, Nonlinear speed-control for a continuum continuum. Proc. 14th World Cong. IFAC , Q, 67–72.
- Lu, X.-Y., Qiu, T. Z., Varaiya, P., Horowitz, R., & Shladover, S. E, , Combining Variable Speed Limits with Ramp Metering for Freeway Traffic Control. American Control Conference, (pp. 2266-2271). Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA.
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., & Messmer, A, د د د, Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control. the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), (pp. 621–644). Jerusalem.
- Transportation Research Part A , د د , Modelling and realtime control of traffic flow on the southern part of Boulevard P'eriph'erique in Paris: Part I: Modelling, 24 .5, 345–359, Elsevier.
- International Series in Operations Research & Management Science , , Traffic Simulation with METANET. In J. Barceló (Ed.), Fundamentals of Traffic Simulation (pp. 399-430). New York Dordrecht Heidelberg London: Springer.
- د- Hegyi, A., De Schutter, B., Hellendoom, H., & van den Boom, T, , Optimal Coordination of Ramp Metering and Variable Speed Control - An MPC Approach. the American Control Conference, (pp. 3600-3605). Anchorage, AK.
- INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS MAGAZINE, د, Adaptive FreeWay Ramp Metering and Variable Speed Limit Control: A Genetic-Fuzzy Approach. s.l. : IEEE.
- Allaby, P., Hellinga, B., & Bullock, M, , Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for an Urban Freeway. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, (pp. 897-902). Toronto, Canada.
- Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, , Published by the National Research Council, Washington DC.



Variable Speed Limits: An Overview and the Case Study of “Sayad Shirazi” Highway

Roozbeh Ebrazi, Master of Operational Research, Department of Computing
Science and Mathematics, Amirkabir University of Technology
Mahnaz Aghamohaqeqi, Master of Computer Science, Department of
Computing Science and Mathematics, Amirkabir University of Technology
S. Mehdi Hashemi, Computer Science Professor, Department of Computing
Science and Mathematics, Amirkabir University of Technology

Abstract

Today the existing congestion in highways is mostly caused by vehicles' spontaneous ' behavior in order to use available infrastructures. If these spontaneous behaviors can be replaced by controllable behaviors by means of dynamic traffic management measures, there will be a significant improvement in highways' traffic condition. One of the most recent and efficient techniques of traffic management, for traffic flow control in highways, has been introduced as variable speed limits. This article aims to discuss how variable speed limits are used to improve the traffic condition, it also presents the methods of how this recently introduced technique works. In this article, “Sayad Shirazi” highway provides a case study for variable speed limits. we have evaluated our suggested algorithm with AIMSUN simulator. The most important results of this simulation are a noticeable 10.96 percent decrease in delay time, and a 9.06 percent decrease in total travel time.