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

روزبه ابرازی*، کارشناس ارشد تحقیق در عملیات، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
مهناز آقامحققی، دانشجوی کارشناسی ارشد علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
سید مهدی تشکری هاشمی، استاد تمام علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
*r.ebrazi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: آذر ۹۰ تاریخ پذیرش: آبان ۹۱

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 به دست آمده از شبیه سازی می‌توان به کاهش معنی دار ۱۰،۹۶ درصد در زمان تأخیر و کاهش ۹،۰۶ درصدی در مجموع زمان‌های سفر اشاره کرد.

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

۱ – مقدمه

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 تراکـــم‌های زیادی را تجربه می کنند. تراکم‌هایی که دائم به لحاظ وسعت و زمان در حال توسعه‌اند و ظرفیت زیر ساخت های موجود را به خصوص در ساعات اوج عبور و مرور، زمان‌هایی که بیش از هر زمان دیگری بهره برداری 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 تراکم ها و مشکلات ناشی از آن‌ها احداث زیرساخت های 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 آن ها و بالا بردن هزینه استفاده از خودروهای شخصی از طریق قیمت سوخت و مالیات‌های مربوط به اشغال خیابان ها 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 ترافیکی[1] گفته می‌شود.

کنترل محدودیت سرعت 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 [۱ ، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸].

کنترل محدودیت سرعت[2] در کشورهای مختلف نظیر هلند، انگلستان، آلمان، فنلاند، آمریکا و غیره مورد استفاده قرار گرفته است که مهم‌ترین این تجربیات مربوط به بزرگراه A2 [۹]، اوترخت و نوتردام [۱۰] هلند و M25 انگلستان [۱۱] است.

1-Dynamic traffic management
2-Variable Speed Limit

در بزرگراه A2 در هلنـــد بر اســـاس میانگین یک دقیقـه‌ای سرعت و حجم انـــدازه‌گیری شده توسط حسگـــرهای حلقه‌ای یک ایستگـاه اندازه گیری، محدودیت سرعت به ۹۰ یا ۷۰ کیلومتر در ساعت کاهش پیدا می کند. کنترل محدودیت سرعت در این بزرگراه سبب شد تا جریان ترافیکی یکنواخت‌تر، اختلاف سرعت بین گروه‌های مختلف وسایل نقلیه کمتر و سرفاصله‌ها 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 ۵۰٪ کاهش پیدا کند. در انگلستان و در بزرگراه M25 زمانی که جریان در حسگرهای حلقه‌ای در هر ایستگاه کنترلی به ۱۶۵۰ خودرو در هر ساعت در هر خط رسید، محدودیت سرعت به ۹۶,۵ کیلومتر (۶۰ مایل) در ساعت کاهش می‌یابد که از مهم‌ترین نتایج حاصله می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- تعداد برخوردهای خودروها ۱۰٪ کاهش پیدا کرد.۲- بزرگراهِ تحت کنترل سهم بیشتری در زمان سفر قابل اعتماد داشت. ۳- توزیع یکنواخت ترافیک بین تمامی خطوط مشاهده شد. ۴- توزیع یکنواخت سر فاصله‌ها مشاهده شد. ۵- سطح آلودگی هوا و صوت کاهش یافت. ۶ - 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 ۲ اهداف کلی، عملکرد و استراتژی‌های کنترل محدودیت سرعت بررسی می‌شود، سپس در بخش ۳ طرح کلی و انواع روش‌های کنترل محدودیت سرعت مرور می‌شود. در بخش ۴ 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 ۵ نتایج به دست آمده از مطالعه موردی بیان شده است.

۲ – 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 [۱۲] و کاهش نرخ تصادفات [۹] با تـوجه به همـاهنگ ســـازی و یکســـان سازی سرعت‌ها و سر فاصله‌ها [۱۳]، مصرف کاراتر انرژی و کاهش آلودگی هوا [۱۴] 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 آن ها می‌پردازیم.

۱.۲ – دانش مقدماتی

قبل از هر چیز در خصوص مفاهیمی چون موج ناگهانی، وضعیت ترافیکی پایدار[3]، نیم پایدار[4] و ناپایدار[5]، نمودار بنیادی، گلوگاه که مفاهیمی اساسی در ترافیک هستند توضیحاتی ارائه می‌دهیم [۱۵] .

موج ناگهانی– مفهوم موج ناگهانی اولین بار توسط لایتویل و وایتهام[6][۱۶، ۱۷] معرفی شد و به

کاهش ناگهانی سرعت به صورت پیش رونده در طول بزرگراه در پاسخ به اختلال‌ها و تغییرات وضعیت در سیستم ترافیکی نظیر تصادف در پایین دست بزرگراه اشاره دارد.

حالت های ترافیکی- حالت ترافیکی پایدار به وضعیت ترافیکی گفته می‌شود که تقاضای ترافیک به نحوی است که هر گونه اختلال (بدون توجه به بزرگی و یا کوچکی آن) بدون هیچ مداخله کنترلی، رفع می‌شود. حالت نیمه پایدار زمانی اتفاق می‌افتد که تقاضای ترافیک به نحوی است که ترافیکِ روان و موج‌های ناگهانی، هر یک می‌توانند برای مدت زمان طولانی ادامه پیدا کنند. در این حالت اختلال‌های کوچک در جریان ترافیک معمولاً رفع می‌شود، اما اختلال‌های بزرگ منجر به موج‌های ناگهانی می‌شود و اما حالت ناپایدار به وضعیتی گفته می‌شود که هر اختلالی در ترافیک موج‌های ناگهانی ایجاد کند.

نمودارهای بنیادی– ارتباط بین پارامترهای اساسی ترافیک مانند سرعت، چگالی و جریان توسط نمودارهایی (جریان – چگالی، سرعت - جریان و سرعت - چگالی) که به نمودارهای بنیادی معروف هستند ارائه می‌شود. این نمودارها از طریق جمع آوری داده‌های ترافیکی واقعی به دست می‌آیند.

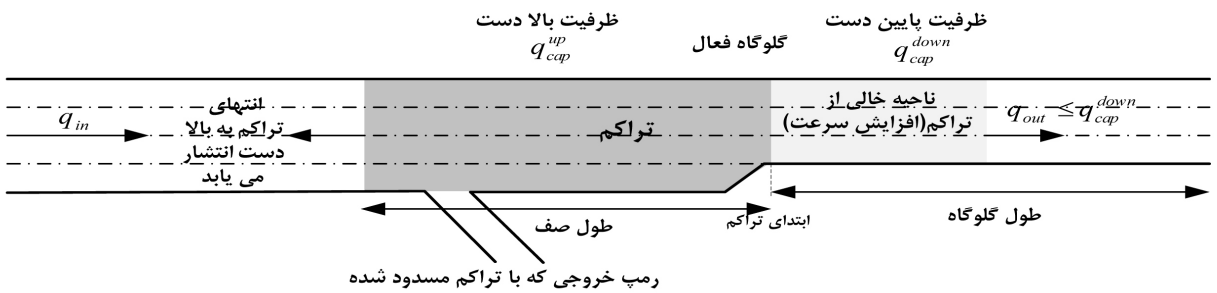
گلوگاه– یک گلوگاه در سطح بزرگراه مکانی است که ظرفیت قطعه بالادست آن، q_{cap}^{up}، از ظرفیت قطعه پایین دست آن، q_{cap}^{dow}، بیشتر باشد. گلوگاه‌ها می‌توانند به علت‌های زیر پدید آیند: ۱- طراحی زیر ساخت ۲- رویدادهایی تکرار شونده که منجر به کاهش ظرفیت می‌شوند مثل جریان‌های ورودی از رمپ های ورودی (شایع‌ترین علت) ۳- رویداد های غیر تکرار شونده مانند تصادفات ۴- وضعیت‌های ترافیکی خاص مثل پیچش[7] جریان‌های ترافیکی با مبدأ ها و یا مقاصد محلی متفاوت.

در توضیح مورد اخیر باید گفت ظرفیت نامی گلوگاه، q_{cap}^{dow} ، بیشترین مقدار جریانی است که از گلوگاه خارج می شود. چنانچه جریان ورودی، q_{in} ، (طبیعتا $q_{in} \leq q_{cap}^{up}$) از ظرفیت گلوگاه، q_{cap}^{dow}، بزرگ تر باشد گلوگاه فعال و تراکم تشکیل می‌شود. این تراکم با سرعت در خلاف جهت حرکت وسایل نقلیه در بخش بالادست[8] منتشر می شود و اثرات منفی بر روی ظرفیت و توان عملیاتی بزرگراه دارد. این اثرات شامل این موارد می شود [۷] :

۱ - افت ظرفیت در گلوگاه به میزان ۲۰-۵٪ از ظرفیت نامی آن

۲ - مسدود شدن رمپ های خروجی (شکل ۱).

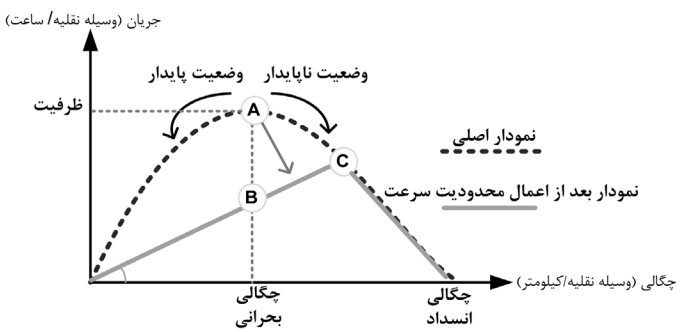
3- Stable
4- Metastable
5- Unstable
6- Lighthill and Whitham
7- Weaving
8- upstream



شکل ۱: فعال شدن گلوگاه و انتشار تراکم در بخش بالا دست

۲.۲ - عملکرد محدودیت سرعت و استراتژی‌های کنترل محدودیت سرعت

شکل ۲ 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 ۲: 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 [۲، ۱۸] مطابق شکل ۲ 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 عملکرد[9] می‌شود: ۱- وضعیت ترافیک به حالت ناپایدار تغییر نکند و یا اینکه تغییر وضعیت به حالت ناپایدار به تأخیر افتد.۲- 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 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.

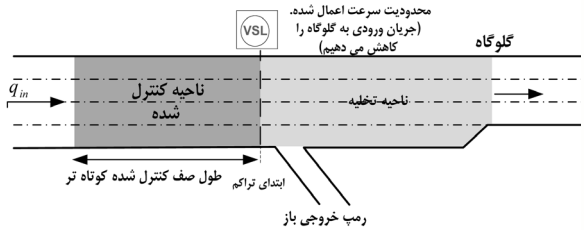
بر اساس عملکردهای توضیح داده شده برای کنترل محدودیت سرعت دو استراتژی کلی در زمینه‌ی استفاده از کنترل محدودیت سرعت وجود دارد:

۱- استراتژی همگن سازی[10]: 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 [۹، ۱۹، ۲۰، ۲۱]. 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 همگن سازی باعث ایجاد جریان ترافیک پایدارتر و ایمن‌تر می‌گردد [۲۲] 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.

9- Function
10- Homogenization

۲- استراتژی جلوگیری از تفکیک ترافیک [11]: این استراتژی بر جلوگیری از شکل گیری 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 [۴، ۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵]. 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 (۵۰۰ تا ۷۰۰ 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 آن ها را به تاخیر می اندازیم (شکل ۳). جلوگیری از وقوع پدیده افت ظرفیت منجر به بهبود نرخ جریان خروجی از گلوگاه و در نتیجه بهبود نرخ جریان خروجی از بزرگراه می شود (با فرض این‌که همه وسایل نقلیه از گلوگاه عبور می‌کنند) و مجموع زمان های سفر کاربران را نیز کاهش می دهد. دو سناریو کلی برای پیاده سازی این استراتژی وجود دارد، در سناریوی نخست تمامی قطعات بزرگراه و رمپ‌های ورودی آن با هم دیده می شود و از فعال شدن تمامی گلوگاه‌ها به صورت یکپارچه جلوگیری می‌شود و در سناریوی‌دوم تمرکز تنها بر روی یک گلوگاه است و کلیه اقدامات برای جلوگیری از فعال شدن آن یک گلوگاه است.

شکل ۳: جلوگیری از فعال شدن گلوگاه و افت ظرفیت از طریق اعمال محدودیت سرعت.



۳ - روش‌های کنترل محدودیت سرعت

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

۱- دریافت اطلاعات تاریخی یا لحظه‌ای ترافیک یا هر دو.

۲- 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 پیاده‌سازی می‌کنند، بررسی می‌شود.

11-Traffic Breakdown

۱.۳ - 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 شبیه‌سازی ماکروسکوپیک به نام METANET [۲۶، ۲۷] استفاده می‌کنند.

مدل METANET یک مدل جریان ترافیک است که بنا به ماهیت ماکروسکوپیک خود از متغیرهای جمعی [12] 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 [۲۸] 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 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 می گردد.

از جمله روش‌های مبتنی بر توسعه‌ی مدل METANET می‌توان به روش کنترلی مدل پیش بین (MPC[13]) که اولین بار توسط هِگی [۲۹] مطرح شد و روش مطرح شده توسط پاپامیچایل[14][۸] که در سامانه مدیریت ترافیکMTFC[15] مورد استفاده قرار گرفته است اشاره کرد. تفاوت روش‌های یاد شده عمدتاً به نحوه اعمال تأثیر محدودیت سرعت در مدل METANET بر می‌گردد.

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 [۱، ۸] 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 هِگی [۱، ۲] 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 [۶] از تئوری بازی

12- aggregated variables
13- Model Predictive Control
14- Papamichail
15- Mainstream traffic flow control

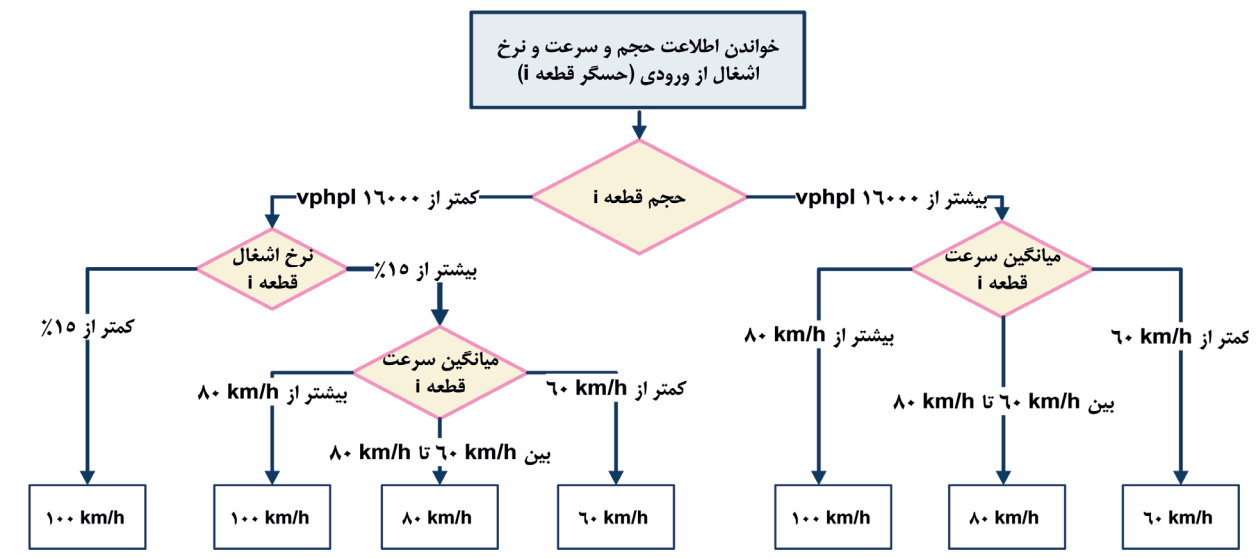
برای حل این مشکل استفاده کرده است. وی از شکل تغییر یافته یک الگوریتم معروف تکرار شونده به نام بازی ساختگی (FP[16])، که به بازی ساختگی نمونه (SFP[17])معروف است، استفاده کرده است. در این روش هر بازیگر (کنترل کننده محدودیت سرعت) استراتژی بهینه‌ی خود (محدودیت‌های مناسب سرعت) را با فرض اینکه بازیگرهای دیگر 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.

۲.۳ – 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 قُدس [۳۰] 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 کارائی کنترل کننده‌ی ژنتیک – فازیِ محدودیت سرعت و رمپ میترینگ، مقایسه‌ای بین مجموع زمان‌های سفر 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 ۳.۱۵ ٪ بهبود دهد.

۳.۳ – درخت منطق[18]

این روش کنترلی که توسط آلابی [۳۱] 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 اشغال[19]) برای تنظیم آستانه‌ها و میزان پارامترهای تصمیم گیری استفاده می‌شود و یک ساختار درختی برای تصمیم گیری در مورد محدودیت سرعت‌ها در وضعیت‌های مختلف ترافیکی شکل می گیرد. در نهایت از اطلاعات لحظه برای تشخیص حالت کنونی و در نهایت تصمیم گیری استفاده می‌شود. در واقع پیش بینی این روش در نحوه تنظیم شاخه‌های درخت تصمیم است.



شکل ۴: درخت تصمیم برای تعیین محدودیت سرعت قطعه i

16- Fictitious Play
17- Sample Fictitious Play
18- logic tree
19- occupancy

شکل ۴ نحوه‌ی عمل این الگوریتم را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای تصمیم گیری در این الگوریتم کنترلی بر اساس اصول مهندسی ترافیک انتخاب شده است.

٤ - الگوریتم پیشنهادی کنترل محدودیت سرعت و مطالعه موردی بر روی بزرگراه شهید صیاد شیرازی

مطالعه موردی بر روی ۲,۳۴ 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 ۳ 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 شبیه‌سازی‌ها این بزرگراه با ۴ خط در شبیه ساز در نظر گرفته شد. تراکم صبحگاهی ناشی از پس زدگی بارِ 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 ۵: نقشه تجهیزات و تقسیم بندی به قطعات برای کنترل با سامانه سرعت

در مدل شبیه‌ساز، این بخش از بزرگراه به ۴ قطعه ۵۰۰ متری تقسیم شد که این قطعات به لحاظ ساختار هندسی و وضعیت ترافیکی یک ریخت می‌باشند و متناظر با هر قطعه یک حسگر در نظر گرفته شد (شکل ۵).

۱.۴ - الگوریتم پیشنهادی برای کنترل محدودیت سرعت

از آن جا که پیاده سازی الگوریتم‌های پیچیده کنترلی نیاز به جمع آوری داده‌های مکانیزه و روند کالیبره کردن دقیق و حساسی دارند و نیز بهبود مشاهده شده از روش‌های مختلف تقریباً مشابه هستند، به علاوه 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 این جا 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 انداز[20] 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 ۱، چگالی قطعه دوم از حسگر ۲، جریان قطعه سوم از حسگر ۳، در هر ۲۰ ثانیه اندازه گیری می‌شود. وضعیت راه انداز اول زمانی تشخیص داده می‌شود که جریان قطعه سوم، که تقاضای ورودی به گلوگاه است، بیشتر از ۶۰۰ خودرو در ساعت (مطابق با سطح سرویس C) باشد. محدودیت سرعت‌های قطعات دوم و سوم جهت کنترل جریان ورودی به گلوگاه به میزان ۳۰ و ۴۰ کیلومتر در ساعت کاهش می‌یابند 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 ۸۰ کیلومتر در ساعت اعمال می شود. 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 ۶۰۰ خودرو در ساعت باشد ولی چگالی حسگر ۱ یعنی چگالی گلوگاه بیشتر از ۷۰ خودرو در کیلومتر باشد (معادل ۲۳ خودرو در کیلومتر در هر خط که آستانه ورود به سطح سرویس E است) و همچنین سرعت میانگین عبور خودروها از گلوگاه کمتر از ۷۰ کیلومتر باشد، الگوی محدودیت سرعت‌ها مطابق وضعیت قبلی به ترتیب برای قطعات سوم و دوم و اول به صورت ۴۰، ۳۰، ۸۰ خواهد بود. وضعیت اخیر زمانی اتفاق می‌افتد که تقاضای ورودی به گلوگاه متناسب ظرفیت آن است اما به دلیل تعاملِ 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 ۳ چگالی حسگر ۱، یعنی چگالی گلوگاه کمتر از ۷۰ خودرو در کیلومتر است که نشان از فعال نبودن گلوگاه دارد، در این حالت محدودیت سرعت‌های پیش‌فرض بزرگراه یعنی ۸۰ 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 پیش‌فرض 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

20- Trigger Condition

می‌شود که چگالی این دو ناحیه کمتر از ۴۰ خودرو در کیلومتر (معادل ۱۳ خودرو در کیلومتر، متناظر با سطح سرویس B) باشد.

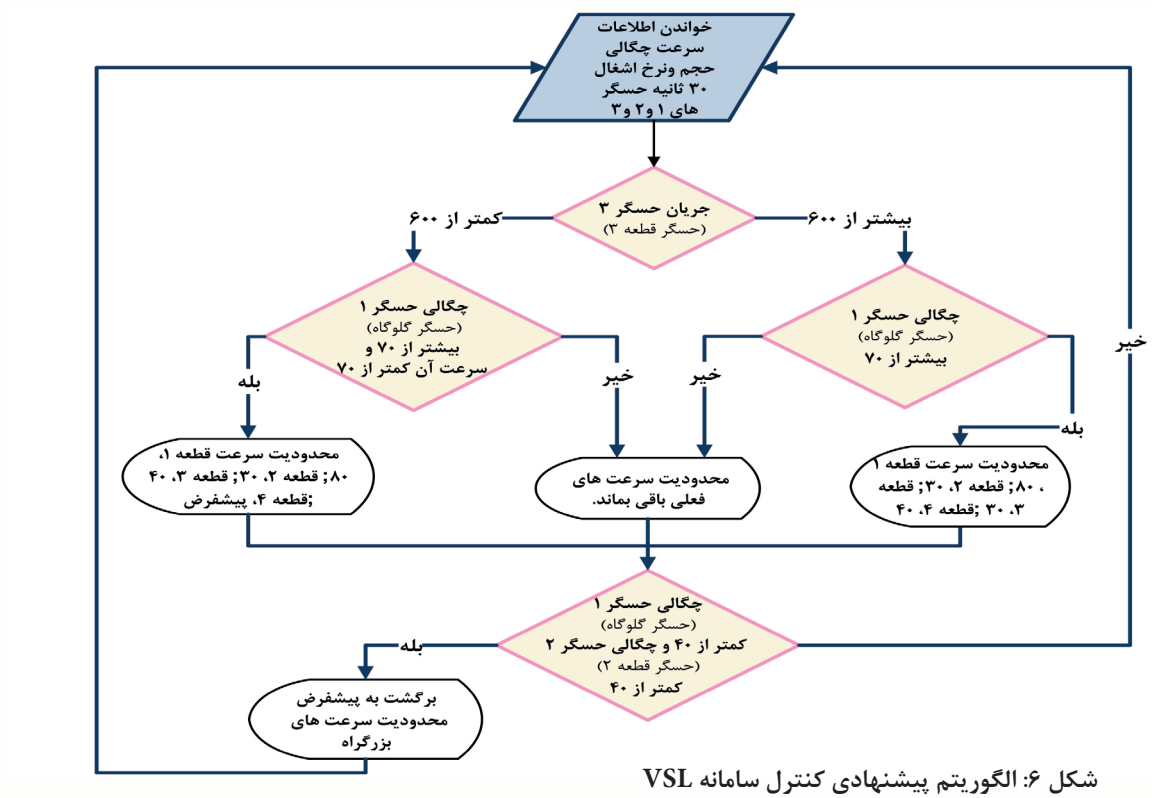
فلوچارت این الگوریتم در شکل ۶ نمایش داده شده است. طبیعی است آستانه‌های تعیین شده برای فعال سازی بر اساس اطلاعات دریافتی از حسگرها، جریان ترافیکی و چگالی، تحلیل داده‌های جمع آوری شده از ناحیه‌ی مورد مطالعه توسط GPS و نیز به صورت ابتکاری در شبیه ساز قابل تعیین و بهبود است. در الگوریتم اخیر آستانه با توجه به داده‌های جمع آوری شده در محل، سرعت‌های جمع آوری شده توسط GPS، جدول سطح سرویس [۳۲] و به صورت ابتکاری تعیین شده است.

۲.۴ - نتایج

به منظور ارزیابی کارائی الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای مختلف ترافیکی در ۱۰ بار اجرای الگوریتم در حالت فعال بودن الگوریتم پیشنهادی و بدون فعال سازی الگوریتم پیشنهادی اندازه گیری شده است. سپس معنی دار بودن اختلاف میانگین پارامترهای مختلف نمونه‌های گرفته شده به وسیله آزمون t سنجیده شد. خلاصه نتایج به دست آمده از شبیه سازی در جدول ۱ 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 سرعت‌ها را کنترل می‌کند، نشان می دهد. 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 معنی داری در مقایسه با حالت بدون کنترل و در سطح اطمینان ۹۵٪ داشته‌اند. کاهش ۸,۵۳٪ در مقدار چگالی که افزایش قدرت مانور رانندگان و بهبود سطح سرویس را نتیجه می‌دهد و افزایش ۹,۴۳٪ 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 ۱: نتایج پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

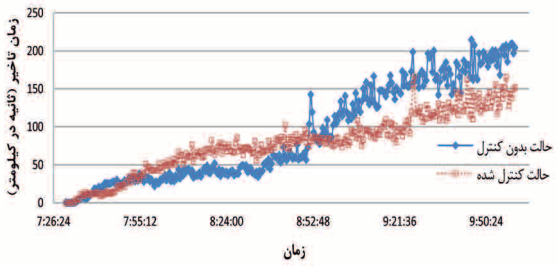
پارامترهای کارایی	حالت کنترل شده	حالت بدون کنترل	درصد تغییرات	مقدارتست- P T
زمان تأخیر	۱۲۹.۱۴	۱۴۵.۰۴	-۱۰,۹۶	۰.۰۴
چگالی متوسط	۴۳.۸۹	۴۷.۹۸	-۸,۵۳	۰.۰۴
جریان ترافیک	۳۶۵۹.۹	۳۶۳۲.۸	۰.۷۵	۰.۲۹
سرعت هارمونیک	۱۹.۵۶	۱۷.۸۸	۹.۴۳	۰.۰۴
حداکثر طول صف	۵۶.۹	۹۲.۴	-۳۸,۴۲	۰.۲۵
حداقل طول صف	۲.۲۳	۳.۴۴	-۳۴,۹۹	۰.۴۶
تعداد توقف‌ها	۲.۲۶	۳.۳۷	-۳۳	۰.۰۰
سرعت	۳۱.۴۵	۳۱.۵۹	-۰,۴۲	۰.۸۷
زمان توقف‌ها	۱۰۰.۵۷	۱۲۹.۹۵	-۲۲,۶۱	۰.۰۰
مجموع مسافت‌های طی شده	۱۵۴۰۹.۶۶	۱۵۲۱۹.۴۹	۱.۲۵	۰.۲۷
مجموع زمان سفر	۲۸۴۸۶۱۹	۳۱۳۲۵۱۲	-۹,۰۶	۰.۰۲
زمان سفر	۲۰۱.۹۷	۲۰۱.۹۷	-۷,۹۳	۰.۰۴



شکل ۶: الگوریتم پیشنهادی کنترل سامانه VSL

شکل ۷ نمودار میزان تأخیر (ثانیه در کیلومتر) یکی از اجراهای شبیه ساز را نشان می‌دهد. این نمودار نشانگر آن است که میزان تأخیر ها 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 ۷: 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: ۱- به منظور جلو گیری بالا بردن ایمنی بهتر است اختلاف محدودیت‌های سرعت اعمال شده در قطعات و یا زمان‌های متوالی از یک حد از پیش تعیین شده‌ای (مثلاً ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر در ساعت) تجاوز نکند. ۲- 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.

۵ – 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 چهار چوب کلی روش‌های کنترل سرعت به صورت مشروح بیان شد و روش‌های مختلف ارائه شده در مقالات شامل MPC، ژنتیک- فازی و درخت منطق بررسی شد. سپس از صورت تغییر یافته‌ای از روش کنترلی درخت منطق 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 ساده تر و سرعت تصمیم گیری 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.
- الگوریتم های درخت تصمیم قبلی جز همگن سازی سرعت و نیز کاهش خطر بروز تصادف، در پاره‌ای از موارد منجر به افزایش زمان سفر نیز می‌شد اما همان‌طور که از نتایج شبیه سازی مشخص شد این الگوریتم علاوه بر همگن سازی 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 شبیه ساز نشان از: ۱-کاهش ۱۰,۹۶ در زمان تأخیر و کاهش ۹,۰۶ در مجموع زمان های سفر ۲-کاهش ۸,۵۳ در میزان چگالی بزرگراه که قدرت مانور و رانندگی با سطح سرویس بالاتری را برای خودروها به همراه دارد. ۳- افزایش ۹,۴۳ سرعت هارمونیک که افزایش ایمنی مسیر و کاهش تعداد موج‌های ناگهانی و احتمالاً کاهش مصرف سوخت را به دنبال خواهد داشت.

به علاوه 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 پیاده‌سازی لزوم دقت در نحوه واکنش به تراکم‌های موقت برای جلوگیری از تأثیر منفی کنترل محدودیت سرعت است.

۶ – قدردانی

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

۷ – مراجع

1- Transportation Research C,2005, Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits , 13, 185–209, Elsevier.

2- Transportation Research Board,2003 , Optimal Co-ordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Wave, 1852, 167-174, Transportation Research Board of the National Academies.

3- Bertini, R., & Bogenberger, K, 2005, Impact of Driver Information System on Traffic Dynamics on a German Autobahn: Lessons for U.S. Applications. 12th World Congress.

4- Lu, X.-Y., Varaiya, P., Horowitz, R., Su, D., & Shladover, S. E,2010, 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.

5- Carlson, R. C., Papamichail, I., & Papageorgiou, M, 2010, Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Freeways using Variable Speed Limits. 13th

20- Smulders, S,1992, 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..
21- Hardman, E. J,1996, Motorway speed control strategies using SISTM,Eighth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 422, pp. 169–172.
22- Transportation Research Part B, 1990, Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs. Transportation Research , 24b .2, 111-132, Elsevier.
23- Automatica,1997,Traffic density control for automated highway systems. Automatica , 33.7, 1273–1285- Elsevier.
24- Lenz, H., Sollacher, R., & Lang, M,1999,Nonlinear speed-control for a continuum continuum. Proc. 14th World Cong. IFAC , Q, 67–72.
25- Lu, X.-Y., Qiu, T. Z., Varaiya, P., Horowitz, R., & Shladover, S. E,2010, Combining Variable Speed Limits with Ramp Metering for Freeway Traffic Control. American Control Conference, (pp. 2266-2271). Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA.
26- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., & Messmer, A,1999, Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control. the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), (pp. 621–644). Jerusalem.
27- Transportation Research Part A ,1990,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.
28- International Series in Operations Research & Management Science ,2010,Traffic Simulation with METANET. In J. Barceló (Ed.), Fundamentals of Traffic Simulation (pp. 399-430). New York Dordrecht Heidelberg London: Springer.
29- Hegyi, A., De Schutter, B., Hellendoom, H., & van den Boom, T,2002, Optimal Coordination of Ramp Metering and Variable Speed Control - An MPC Approach. the American Control Conference, (pp. 3600-3605). Anchorage, AK.
30- INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS MAGAZINE,2009,Adaptive FreeWay Ramp Metering and Variable Speed Limit Control:A Genetic-Fuzzy Approach. s.l. : IEEE.
31- Allaby, P., Hellinga, B., & Bullock, M,2006, 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.
32- Transportation Research Board, Highway Capacity Manual,2000, Published by the National Research Council, Washington DC.
International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, (pp. 513-518). Madeira Island, Portugal.
6- TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2010, An Efficient Optimization Approach to Real-Time Coordinated and Integrated Freeway Traffic Control. , 11.4, 873-884, IEEE.
7- Transportation Research Part C, 2010, Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks, 193–212, Elsevier.
8- Papamichail, I., Kampitaki, K., Papageorgiou, M., & Messmer, A,2008 , 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.
9- Van de Hoogen, E., & Smulders, S,1994, Control by variable speed signs: Results of the Dutch experiment, Control IEE Conf. Pub. 391, (pp. 145–149).
10- Van Toorenburg, J, 1983,Homogeniseren: effect van aangepaste adviessnelheden op de verkeersafwikkeling. Rijkswaterstaat, DienstVerkeerskunde, Rotterdam (in Dutch).
11- UK Highways Agency 2004, M25 Controlled Motorways: Summary Rep.
12- Transportation Research Board,2008, Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-Time Crash , 2078, 108-116, Transportation Research Board of the National Academies.
13- Transportation Research Part C,2006, Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety , 14, 213-228, Elsevier.
14- Wesseling, J., Hollander, K., Teeuwisse, S., Keuken, M., Spoelstra, H., Gense, R., et al,2003, Investigation of the Effects of the 80 /h Measure at the A13 on the Air Quality in Overschie. Technical Report.
15- American Physical Society(APS),1996, Experimental features and characteristics of traffic jams. Phys. Rev. E , 53 .2, 1297–1300.
16- PROCEEDINGS THE ROYAL OF SOCIETY,1995,On Kinematic Waves: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proc., of Royal Society , 229 .1178, 317-345,Royal Society.
17- Operation Research, 1956, Shock Waves on Highway , 4 .1, 42-51, JSTOR.
18- Transportation Research Board,2008, Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow , 2047, 37–48, Transportation Research Board of the National Academies.
19- Zackor, H. ,1979, Self-sufficient control of speed on freeways. Int.Symp. Traffic Control Systems, 2A, pp. 226–249. Berkeley, CA.