

هماهنگ‌سازی بهینه کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر جهت کنترل بزرگراهی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

شهریار افندی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
هاجر حاج‌محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نوید کلانتری، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۱۰ - پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۲۰

چکیده

بزرگراه‌های درون شهری یکی از تسهیلات زیربنایی هستند که در جابه‌جایی‌های روزانه نقش مهمی دارند. مدیریت صحیح آمد و شد با بهره‌گیری از وسایل مختلف کنترل ترافیک در این بزرگراه‌ها، می‌تواند جریان روان و یکنواخت را به وجود آورد که در کاهش تأخیرها و افزایش ظرفیت جریان بسیار مؤثر باشد. کنترل رمپ و اعمال سرعت مجاز متغیر دو شیوه از کارآمدترین ابزار برای کنترل بزرگراهی هستند که در سال‌های اخیر تحقیقات و مطالعات زیادی روی تأثیر آنها بر جریان انجام شده و این موضوع را به یکی از مباحث روز تبدیل کرده است. از این رو در این مقاله یک مدل ابتکاری جهت هماهنگ‌سازی و بهینه‌سازی مقادیر این دو کنترل‌کننده در یک شبکه بزرگراهی ارائه می‌شود. این مدل متشکل از یک مدل غیر خطی پیش‌بینی جریان ترافیک، برای محاسبه تابع هدف مدل و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای بهینه‌کردن مقادیر متغیرها است. مدل معرفی شده، سپس روی یک معبر فرضی بزرگراهی پیاده می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل، این حقیقت قابل درک است که کنترل‌کننده رمپ به تنهایی فقط در شرایطی که ازدحامی در مسیر اصلی وجود ندارد کارا است و با ایجاد تراکم و بالا رفتن نسبت حجم به ظرفیت در معبر اصلی، از میزان تأثیرگذاری آن کاسته می‌شود. در این حالت با به‌کار بردن سرعت مجاز متغیر در بالادست رمپ، هم به روان‌سازی و یکنواخت کردن جریان کمک می‌شود و هم کنترل‌کننده رمپ به بالاترین میزان تأثیرگذاری خود بر جریان معبر اصلی می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: هماهنگ‌سازی، کنترل‌کننده رمپ، سرعت مجاز متغیر

۱- مقدمه

ابزار کنترلی اول می‌پردازد. کنترل‌کننده رمپ، یکی از تسهیلات رایج در مدیریت بزرگراهی است. کنترل‌کننده رمپ در واقع چراغ کنترل‌کننده‌ای است که در خروجی رمپ‌ها نصب و با استراتژی‌های کنترلی مختلف، زمان‌بندی می‌شود. این ادعا به تدریج به اثبات رسیده است که کنترل‌کننده رمپ می‌تواند به‌طور مستقیم روی چگالی متوسط پایین دست رمپ تأثیر

در سال‌های اخیر، با توسعه استفاده از ابزارهای کنترل ترافیک، گام مهمی در جهت مدیریت بزرگراهی برداشته شده است. این کنترل‌کننده‌ها انواع مختلفی دارند که هر یک در بخش خاصی از یک بزرگراه کارایی دارد. از میان آنها می‌توان به کنترل‌کننده رمپ^۱، سرعت مجاز متغیر^۲، تابلوی پیام متغیر خبری^۳ و تابلوهای انتخاب مسیر^۴، اشاره کرد که این مقاله به‌طور خاص به بررسی دو

کنترل کننده رمپ با زمان ثابت می باشد، که در آن نرخ های کنترل رمپ برای زمان مشخصی از یک روز طراحی می شود (Schwartz and Tan, 1997). نقص این روش در حساسیت بالای آن نسبت به بی دقتی در پیش بینی تقاضای ترافیک، الگوی ترافیک و وقایع ناگهانی است. از دیگر کنترل های به کار رفته در این روش می توان به کنترل مبتنی بر هموارسازی^۱ اشاره کرد که در سال ۲۰۰۸ برای هماهنگ سازی کنترل رمپ ها و سرعت مجاز متغیر به کار گرفته و از مفاهیم هموارسازی در آن استفاده شد (Kamel and Benasser, 2008). دسته دوم شامل روش های متصل^۲ یا واکنشی^۳ است. در این دسته تصمیمات کنترلی بر پایه اطلاعات بهنگامی که از حسگرهای موجود در شبکه اخذ می شود، اتخاذ می گردد. این روش باعث می شود که شرایط ترافیکی شبکه تا حد امکان در حالتی که از قبل مشخص شده است، باقی بماند. الگوریتم واکنشی کنترل رمپ معرفی ماند استراتژی تقاضا- ظرفیت (Masher et al., 1995) در این دسته قرار دارند. عملکرد این دسته استراتژی ها به انتخاب مناسب پارامترهای کنترلی بستگی دارد. یک مثال دیگر برای این دسته کنترل ژنتیک- فازی می باشد که در سال ۲۰۰۷ ارائه گردید و از رویکرد کنترل فازی برای کنترل بزرگراهی در آن استفاده شد (Ghods, Liping and Rahimi-Kian, 2007). سوم سیستم های کنترل و پیش بینی^۴ (MPC) نامیده می شود، این روش ها در دو مرحله از داده های گذشته و بهنگام استفاده کرده و از آنها برای پیش بینی وضعیت آینده شبکه مورد مطالعه استفاده می کنند. هدف این روش یافتن کنترل بهینه در طول یک افق زمانی بر پایه تابع هدف از پیش تعیین شده می باشد. در این مدل ها وضعیت ترافیکی و تقاضای موجود شبکه به کنترل گر برمی گردد و مدل می تواند خطاهای موجود در پیش بینی و میزان عدم تطابق آن را اصلاح کند. با وجود کارایی بالای این دسته مدل ها، با بالا رفتن تعداد ورودی های کنترلی، دشواری محاسبات به شدت افزایش می یابد. در (Ghods, Liping and Rahimi-Kian, 2010) این استراتژی با استفاده از الگوریتم تئوری بازی ها جهت بهینه سازی متغیرهای کنترل بزرگراهی به کار رفته است. با توجه به دسته بندی و مروری بر مطالعات که در بالا به آن پرداخته شد، روش ارائه شده در این مقاله، در دسته دوم از استراتژی های ذکر شده قرار می گیرد که در بخش بعدی بیان خواهد شد.

بگذارد. علاوه بر این کنترل کننده رمپ تقاضای ترافیک از رمپ به معبر اصلی را هم کنترل می کند (Xiao-Yun, Tony and Qiu, 2010). سرعت مجاز متغیر، برای کنترل سرعت متوسط اتومبیل ها (یا رفتار رانندگان) در بزرگراه استفاده می گردد، که می تواند تکمیل کننده کنترل رمپ ها باشد. در واقع سرعت مجاز متغیر با یکسان سازی و کاهش اختلاف سرعت های وسایل نقلیه در مقاطع متفاوت، و همچنین کنترل نرخ ورود خودروها به گره های ترافیکی به روان سازی جریان کمک می کند (Xiao-Yun and Varaiya, 2010). هماهنگ سازی بین کنترل گره های مختلفی که در یک شبکه بزرگراهی عمل می کنند، بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال، کنترل کننده رمپ می تواند گره ترافیکی ایجاد شده در محدوده تحت تأثیر خود را رفع کند، در صورتی که ممکن است در اثر تغییراتی که در چگالی یا سرعت به وجود می آورد، موجب ایجاد گره های دیگری در نقاط دیگری از شبکه گردد. به همین خاطر در اکثر مطالعات انجام شده با تکیه بر هماهنگ سازی کنترل کننده های مختلف و متعدد در شبکه به طراحی آنها پرداخته می شود (Zhang and Levinson, 2004). این مقاله به ارائه یک روش ابتکاری جهت هماهنگ سازی بهینه کنترل کننده رمپ و سرعت مجاز متغیر در یک بزرگراه اختصاص دارد. ساختار مقاله حاضر به این صورت است که ابتدا در بخش ۲ به مروری بر مطالعات انجام شده در این رابطه پرداخته می شود. در بخش ۳ مسئله هماهنگ سازی کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر بیان و مدل پیشنهادی برای حل آن معرفی می گردد. در بخش ۴ اجزای این مدل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و روابط استفاده شده در مدل ارائه می شود. بخش ۵ مربوط به حل یک شبکه نمونه با مدل پیشنهادی می باشد و در بخش ۶ نتایج مدل سازی همراه با بحث و تحلیل تأثیر آن بر شبکه ارائه می گردد و در بخش ۷ جمع بندی و نتیجه گیری ارائه می شود.

۲- انواع روش های کنترل و هماهنگ سازی رمپ

و سرعت مجاز

استراتژی های مختلفی برای هماهنگ سازی این دو کنترل کننده در بزرگراه ها وجود دارد که به سه دسته کلی تقسیم می شوند. اولین استراتژی، استراتژی مفصل^۵ است که در آن از فقط داده های گذشته استفاده می شود. یک مثال خوب برای این استراتژی،

گره ترافیکی شود، محدودیت سرعت می‌تواند هنگام بروز ازدحام در قطعه‌ای از مسیر، با کاهش حجم ورودی به آن از شکست ترافیکی جلوگیری کند.

برای حل مسئله هماهنگ‌سازی کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر، مدلی مطابق شکل ۲ پیشنهاد می‌شود. در این راهکار از یک مدل زمان گسسته برای پیش‌بینی وضعیت جریان ترافیک در گام‌های زمانی مشخص، استفاده می‌شود. هدف این مدل یافتن نرخ کنترل رمپ و سرعت مجاز اعمالی به‌گونه‌ای است که حالت بهینه برای جریان ترافیک در بزرگراه حاصل شود. برای رسیدن به این حالت یک تابع هدف انتخاب می‌شود و الگوریتم به بهینه کردن (در این تحقیق کمینه کردن) آن می‌پردازد.

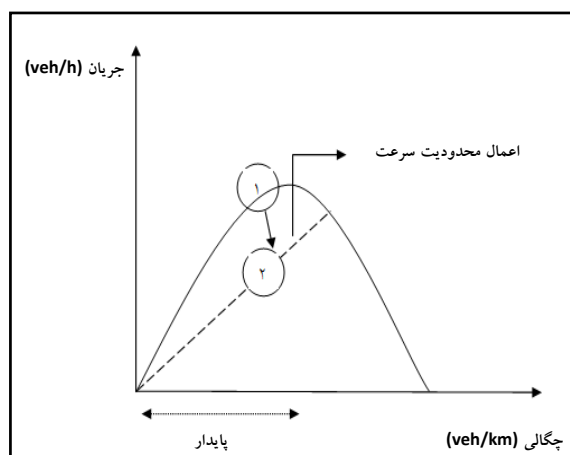
۴- اجزای مدل هماهنگ‌سازی بهینه

یکی از نیازهای اساسی برای طراحی سیستم‌های هوشمند ترافیکی، مدل‌سازی جریان ترافیک در مقیاس متوسط است. روند مدل‌سازی جریان ترافیک دارای سه سطح خردنگر، متوسط نگر، و کلان نگر است که بسته به نوع نگرش به شبکه مورد نظر، لازم است یکی از سطوح انتخاب گردد. اولین تئوری مدل‌سازی کلان‌نگر جریان ترافیک در یک بزرگراه در سال ۱۹۹۵ مطرح گردید که در آن تحقیق قوانین پایه‌ای موج شوکی ارایه و اساس مطالعات بعدی بر مدل جریان ترافیک پایه‌گذاری شد (Lighthill and Whitham, 1995). این مدل‌ها جریان ترافیک را به صورت یک جریان پیوسته مانند یک سیال در نظر می‌گیرند که مشخصات ویژه‌ای دارد. متغیرهای ترافیکی که برای بیان پویایی این سیال به کار می‌روند، سرعت متوسط $v(t,x)$ ، چگالی ترافیک $p(t,x)$ و جریان ترافیک یا حجم ترافیک $q(t,x)$ در زمان t و مکان x می‌باشد. در این مقاله از مدل کلان‌نگر متانت برای مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان ترافیک استفاده می‌شود. متانت یک ابزار مدل‌سازی جبری برای شبیه‌سازی جریان ترافیک در شبکه‌هایی با توپولوژی، انشعابات و رمپ‌های ورودی و خروجی مختلف می‌باشد. این مدل قابلیت شبیه‌سازی تمامی شرایط ترافیکی (آزاد، ازدحام و فوق اشباع) را دارد؛ و هم چنین در صورت تعریف شرایط خاصی مانند تصادف با تعیین محل، شدت و بازه زمانی، آثار کاهش ظرفیت آن را لحاظ می‌کند (Kotsialos et al., 2002).

۳- هماهنگ‌سازی کنترل‌کننده رمپ و سرعت

مجاز متغیر

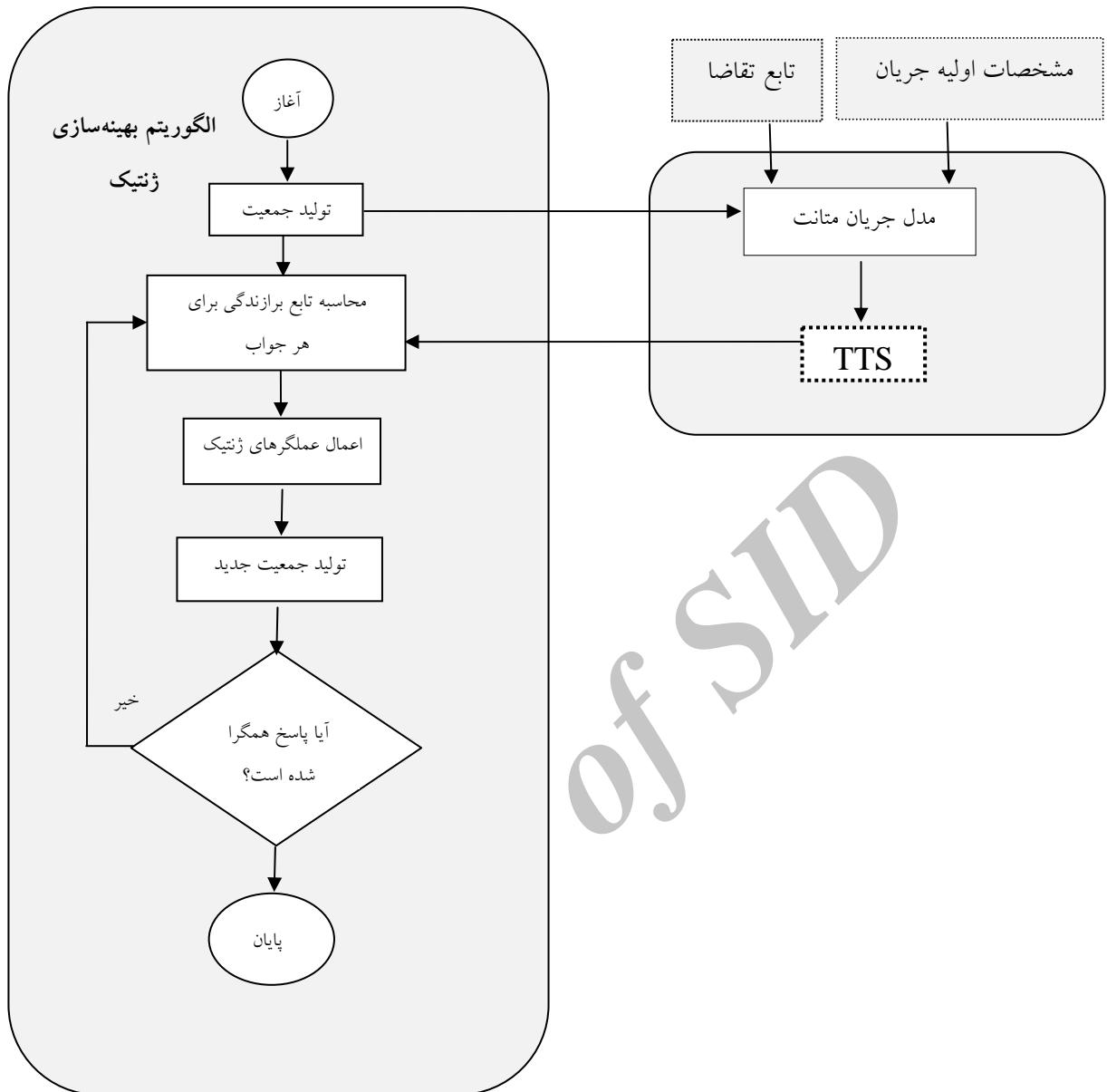
در شکل ۱، دیاگرام اساسی جریان - چگالی نشان داده شده است. ناحیه‌ای که در آن کنترل‌کننده رمپ بر جریان معبر تأثیرگذار است، در قسمت چپ دیاگرام، که قسمت پایدار نام دارد، قابل ملاحظه است. واضح است که اگر شرایط ترافیک بسیار سبک و یا بسیار متراکم باشد، کنترل‌کننده رمپ کارایی و الزامی نخواهد داشت. این کنترل‌گر در هنگام ازدحام، به دلیل آن‌که فضای کافی برای ورود اتومبیل‌های جدید به بزرگراه وجود ندارد، کارایی خود را به شدت از دست می‌دهد. استفاده از سرعت مجاز متغیر می‌تواند این عدم کارایی را کاهش داده و تأثیرگذاری کنترل‌کننده رمپ را بیشتر کند. همان‌گونه که در شکل ۱ نیز مشخص است، محدودیت سرعت موجب تغییر شکل دیاگرام از حالت ۱ به ۲ می‌شود. قرارگیری سرعت مجاز متغیر دقیقاً قبل از یک رمپ ورودی، می‌تواند جریان خروجی قطعه تحت کنترل سرعت مجاز را کاهش دهد و بدین طریق فضای بیشتری برای ملحق شدن ترافیک ورودی از رمپ به قطعه پدید آید. بنابراین، جریان در رمپ ورودی می‌تواند نزدیک به ظرفیت نگه داشته شود.



شکل ۱. دیاگرام اساسی جریان

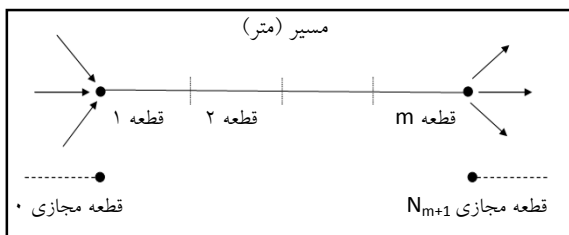
(Hegy, Schutter and Hellendoorn, 2004)

در این مقاله شرایطی بررسی می‌شود که در آن محدودیت سرعت روی معبر اصلی و محدودیت ورود از رمپ به بزرگراه روی رمپ‌های ورودی اعمال می‌گردد و در واقع این ایده دنبال می‌شود که هنگامی که کنترل‌کننده رمپ نمی‌تواند مانع از ایجاد



شکل ۲. مدل پیشنهادی جهت حل مسئله هماهنگ‌سازی بهینه کنترل ریمپ و سرعت مجاز متغیر

- سرعت متوسط $v_{m,i} (k) (km/h)$
 - حجم ترافیک یا خروجی $q_{m,i} (k) (veh/h)$
- که k نشانگر شماره بازه زمانی $t=kT$ و T طول گام زمانی برای شبیه‌سازی جریان ترافیک است (Hegy et al., 2005).



شکل ۳. مدل متانت، موقعیت خطوط و نقاط

مدل متانت شبکه مورد نظر را به صورت یک گراف متشکل از مسیرها (خطوط) و نقاط نشان می‌دهد. هر مسیر (خطوط) در این گراف خصوصیات یکسانی دارد و هیچ ریمپ ورودی، خروجی و تغییر اصلی در هندسه آن وجود ندارد. نقاط این گراف نشان‌دهنده تغییرات اصلی در هندسه خطوط (مانند ریمپ ورودی یا خروجی) هستند. شکل ۳ نشان‌دهنده نمونه‌ای از این گراف است. یک مسیر بزرگراه (m) به N_m قطعه با نشانگر (i) و طول $(l_{m,i})$ تقسیم می‌شود. n_m نیز تعداد خطوط مسیر m است. هر قطعه i از مسیر m دارای خصوصیات زیر می‌باشد:

- چگالی ترافیک $\rho_{m,i} (k) (veh/lane/km)$

۴-۱- معادلات خطوط

اولین رابطه مربوط به معادله حجم جریان است. خروجی هر قطعه برابر با چگالی و سرعت متوسط آن قطعه متناسب است (معادله ۱):

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k) n_m \quad (1)$$

که در آن n_m تعداد خطوط مسیر m است.

معادله ۲ بیانگر قانون بقای وسایل نقلیه در شبکه است. اختلاف ورودی از قطعه بالادست با خروجی قطعه، به علاوه چگالی آن در بازه زمانی قبلی، چگالی قطعه در بازه زمانی k را تشکیل می‌دهند:

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{l_{m,i}} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \quad (2)$$

برخلاف روابط ۱ و ۲ که بر پایه اصول فیزیکی استوار و قطعی هستند، معادلاتی که به بیان سرعت دینامیکی و رابطه سرعت مطلوب با چگالی می‌پردازند، ابتکاری هستند. رابطه ۳ سرعت متوسط قطعه را محاسبه می‌کند که شامل ۳ بخش است.

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \left(V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k) \right) + \frac{T}{l_{m,i}} v_{m,i}(k) \left(v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k) \right) - \frac{\vartheta T}{\tau l_{m,i}} \left(\frac{\rho_{m,i}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \varphi} \right) \quad (3)$$

قسمت اول این رابطه، قسمت آزادسازی^{۱۱} نام دارد و نشان‌دهنده تمایل رانندگان به رسیدن به سرعت مطلوب $V(\rho)$ است. قسمت بعدی، همرفت^{۱۱} یا جابه‌جایی می‌باشد که بیانگر افزایش (یا کاهش) سرعت در اثر ورود وسایل نقلیه از قطعه بالادست به قطعه مورد نظر است. قسمت آخر نیز نشان‌دهنده کاهش (افزایش) سرعت وسایل نقلیه در اثر تجربه رانندگان از افزایش (کاهش) چگالی در پایین دست قطعه مورد نظر است و قسمت پیش‌بینی^{۱۲} نام دارد. در این معادله τ و ϑ و φ پارامترهای مدل هستند.

رابطه سرعت با چگالی (دیگرام اساسی) در معادله ۴ آمده است.

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{free,m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}}\right)^{a_m}\right] \quad (4)$$

که در آن سرعت جریان آزاد مسیر m ، $v_{free,m}$ ، سرعت متوسطی است که وسایل نقلیه در صورت جریان آزاد ترافیکی دارند و $\rho_{crit,m}$ چگالی مسیر m در صورت بیشینه بودن جریان ترافیک است. a_m نیز پارامتر مدل می‌باشد.

برای در نظرگیری اثرات اعمال سرعت مجاز متغیر بر سرعت مطلوب، رابطه ۴ به صورت رابطه ۵ هنگامی که در قطعه مورد بررسی محدودیت سرعت اعمال شود، بسط پیدا می‌کند.

$$V(\rho_{m,i}(k)) = \min\left(v_{free,m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}}\right)^{a_m}\right], (1 + \alpha) v_{control,m,i}(k)\right) \quad (5)$$

که در آن $v_{control,m,i}(k)$ سرعت اعمال شده بر قطعه i از مسیر m در بازه زمانی k می‌باشد و $(1 + \alpha)$ ضریب عدم مطلوبیتی است که نشان‌دهنده عدم رعایت کامل سرعت مجاز اعمال شده توسط رانندگان می‌باشد.

مبدأهای شبکه با یک مدل ساده صف، مدل می‌شوند. طول صف در مبدأ $w_{0,0}$ ، به صورت معادله ۶ بیان می‌گردد.

$$w_0(k+1) = w_0(k) + T(d_0(k) - q_0(k)) \quad (6)$$

که در آن $d_0(k)$ تقاضای مبدأ 0 در بازه k می‌باشد. حجم خروجی از مبدأ 0 ، $q_0(k)$ ، به صورت کمترین مقدار سه عبارت زیر در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۷):

$$q_0(k) = \min\left\{d_0(k) + \frac{w_0(k)}{T}, r_0(k)Q_0, Q_0 \frac{\rho_{max,m} - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{max,m} - \rho_{crit,m}}\right\} \quad (7)$$

که به ترتیب نشانه ترافیک موجود در بازه زمانی k (مجموع تقاضا و طول صف)، بیشترین مقدار خروجی (در صورت وجود کنترل کننده با نرخ $r_0(k) \in [0,1]$) و بیشترین حجم جریان از رمپ به معبر اصلی با توجه به شرایط ترافیکی جریان معبر اصلی هستند.

و در آن Q_0 ظرفیت رمپ ورودی بر حسب veh/h تحت شرایط جریان آزاد و $\rho_{max,m}$ بر حسب (veh/lane/km) چگالی بیشینه مسیر m است.

۴-۲- معادلات گره‌ها

هنگامی که یک تغییر اصلی در پارامترهای خطوط رخ دهد یا یک تقاطع یا انشعاب در مسیر وجود داشته باشد، از گره برای بیان

۴-۳- تابع هدف

برپایه ساختار ارایه شده در بخش پیشین، فرمول‌بندی حل مسئله بهینه‌سازی در این بخش ارایه می‌گردد. مسئله بهینه‌سازی ذکر شده شامل دو دسته متغیر تصمیم زیر است:

۱. سرعت مجاز متغیر، $v_{control_i}(j)$ برای $j \in [k, \dots, k+N_p-1]$ و i نشانگر قطعاتی است که در آنها محدودیت سرعت اعمال شده است.

۲. نرخ کنترل رمپ، $r_o(j)$ برای $j \in [k, \dots, k+N_p-1]$ و o نشانگر رمپ‌های ورودی است که با کنترل‌کننده مواجه هستند.

تابع هدف در این مسئله به صورت کمینه ساختن زمان سفر کل وسایل نقلیه موجود در شبکه^{۱۳}، TTS، انتخاب می‌شود (رابطه ۱۳).

$$TTS = j(v_{control}, r) \quad (13)$$

$$= T \sum_{j=k}^{k+N_p-1} \{ \sum_{m,i} \rho_{m,i}(j) l_{m,j} n_m + \sum_o w_o(j) \} + \sum_{j=k}^{k+N_p-1} \{ \alpha_{ramp} \sum_o (r_o(j) - r_o(j-1))^2 + \alpha_{speed} \sum_i (\frac{v_{control_i}(j) - v_{control_i}(j-1)}{v_{free}})^2 \}$$

قسمت اول رابطه ۱۳ مربوط به معبر اصلی و طول صف رمپ‌های ورودی می‌باشد. قسمت دوم و سوم آن، که با دو ضریب غیر صفر α_{speed} و α_{ramp} وزن داده شده‌اند، برای در نظرگیری جریمه برای پرش‌های ناگهانی در نرخ کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر هستند.

۴-۴- الگوریتم بهینه‌سازی

برای یافتن جواب‌هایی که تابع هدف ذکر شده را کمینه نماید، نیاز است تا از یک روش بهینه‌سازی استفاده شود. بدیهی است که یافتن یک جواب که قیود مسئله را ارضا نماید آسان است اما مهم یافتن بهترین جواب است. با توجه به پیچیده بودن تابع هدف و غیرمحدب بودن آن و همچنین غیرخطی بودن قیود، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی (دقیق) کاری بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. در این شرایط با توجه به ماهیت مسئله و شناخت از نحوه عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری گوناگون، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده می‌شود. دلیل انتخاب این

تغییرات آن استفاده می‌شود. این گره یک قطعه مجازی در بالادست مسیر (هنگامی که بیش از یک خط ورودی وجود داشته باشد) و یا یک قطعه مجازی در پایین دست مسیر (هنگامی که بیش از یک خط خروجی وجود داشته باشد) ایجاد می‌کند. جریانی که وارد یک گره می‌شود بین خطوط خروجی مطابق رابطه ۸ و ۹ بین مسیرهای منشعب شده از آن تقسیم می‌شود.

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu} N_{\mu} \quad (8)$$

$$q_{m,0}(k) = \beta_n^m(k) \cdot Q_n(k) \quad (9)$$

که در آن $Q_n(k)$ مجموع کل جریان‌هایی است که در بازه زمانی k وارد گره می‌شود. β_n^m ضریب گردش جریان از گره به مسیر m می‌باشد و $q_{m,0}$ جریانی است که از گره n خارج و به مسیر m وارد می‌شود. هنگامی که گره n بیش از یک مسیر خروجی داشته باشد، یک قطعه مجازی درست در بالادست گره و پایین دست آخرین قطعه ورودی به گره تشکیل می‌شود که چگالی آن، $\rho_{m, N_{m+1}}(k)$ ، به صورت رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$\rho_{m, N_{m+1}}(k) = \frac{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu, 1}(k)^2}{\sum_{\mu \in O_n} \rho_{\mu, 1}(k)} \quad (10)$$

که در آن O_n مجموع مسیرهایی است که از گره خارج می‌شود. هنگامی که گره n بیش از یک مسیر ورودی داشته باشد، سرعت مجازی بالادست مسیر خروجی، m ، $v_{m,0}(k)$ از رابطه ۱۱ به دست می‌آید.

$$v_{m,0}(k) = \frac{\sum_{\mu \in I_n} v_{\mu, N_{\mu}}(k) \cdot q_{\mu, N_{\mu}}(k)}{\sum_{\mu \in I_n} q_{\mu, N_{\mu}}(k)} \quad (11)$$

با استفاده از روابط ۱-۱۱، معادله جریان به صورت غیرخطی مطابق رابطه ۱۲ به دست می‌آید.

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) \quad (12)$$

که در آن $x(k)$ بردار وضعیت سیستم، شامل نرخ جریان (k) $q_{m,i}$ ، سرعت $v_{m,i}(k)$ ، چگالی $\rho_{m,i}(k)$ و طول صف رمپ ورودی $w_o(k)$ است. $u(k)$ بردار متغیرهای کنترلی شامل نرخ‌های کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر است و $d(k)$ نیز بردار تقاضای سیستم در بازه زمانی k می‌باشد. برپایه $x(k)$ ، $u(k)$ و $d(k)$ وضعیت آینده سیستم یعنی $[x(k+1), \dots, x(k+N_p-1)]$ توسط مدل متانت به‌طور متوالی پیش‌بینی می‌شود.

در مقاله یاد شده از الگوریتم SQP برای حل استفاده و با اعمال سرعت مجاز و کنترل رمپ در شبکه، ۱۴ درصد بهبود در زمان کل سپری شده حاصل شده است. با اجرای مدل پیشنهادی در همان شبکه، بهبود ۱۹ درصد در تابع هدف انتخابی نسبت به حالت بدون کنترل کسب شد، که این نشانگر برتری مدل پیشنهادی نسبت به روش نام برده می‌باشد. در ادامه مدل روی شبکه‌ای وسیع‌تر و با تعداد متغیرهای بیشتر (مطابق شکل ۴) اجرا شد که این بخش به ارایه توضیحات این مدل‌سازی اختصاص دارد. شبکه شامل یک بزرگراه، دو رمپ ورودی کنترل‌شده و دو تابلوی سرعت مجاز متغیر در بالادست هر یک از رمپ‌ها می‌باشد. این شبکه شامل ۳ مبدأ (دو رمپ ورودی و یک مبدأ در ابتدای بزرگراه) و یک مقصد در انتهای بزرگراه می‌باشد. کل بزرگراه به ۳ مسیر L_1 ، L_2 و L_3 تقسیم می‌شود که هر کدام ۲ خط دارند. این مسیرهای L_1 و L_2 هر کدام به ۴ قطعه ۱ کیلومتری تقسیم می‌شوند و مسیر L_3 شامل ۲ قطعه ۱ کیلومتری می‌باشد. قطعات سوم از مسیرهای ۱ و ۲ مجهز به تابلوی سرعت مجاز متغیر هستند که به وسیله آنها محدودیت سرعت اعمال می‌گردد. برای جلوگیری از پس‌زدگی صف در رمپ‌های ورودی، بیشترین مقدار طول صف در این رمپ‌ها به ۱۵۰ وسیله نقلیه محدود شده است. مقادیر پارامترهایی که در مدل استفاده می‌شوند به شرح زیر است:

$$T=10 \text{ s}; \quad \tau=18 \text{ s}; \quad \varphi=40 \text{ veh/lane/km}; \quad \theta=60 \text{ km}^2/\text{h};$$

$$\rho_{\text{crit}}=33/5 \text{ veh/lane/km}$$

$$\rho_{\text{max}}=180 \text{ veh/lane/km}; \quad v_{\text{free,m}}=102 \text{ km/h}; \quad a_1=a_2=a_3=$$

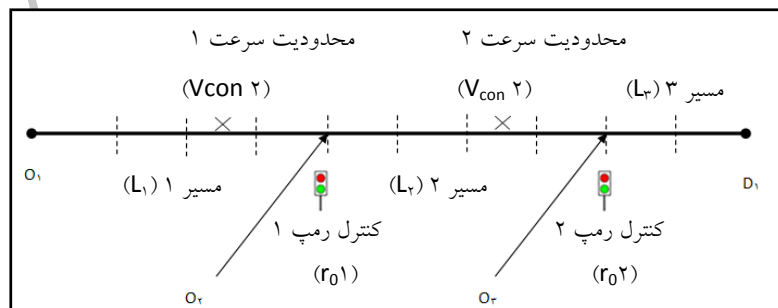
$$1/876; \quad \alpha_{\text{speed}} = \alpha_{\text{ramp}} = 0/1$$

الگوریتم را از میان الگوریتم‌های فراابتکاری، می‌توان توانایی این الگوریتم در به‌دست آوردن جواب خوب برای مسایل غیرخطی سخت^{۱۴} به دلیل داشتن ماهیت تصادفی و همچنین سرعت معقول این الگوریتم در همگرایی دانست.

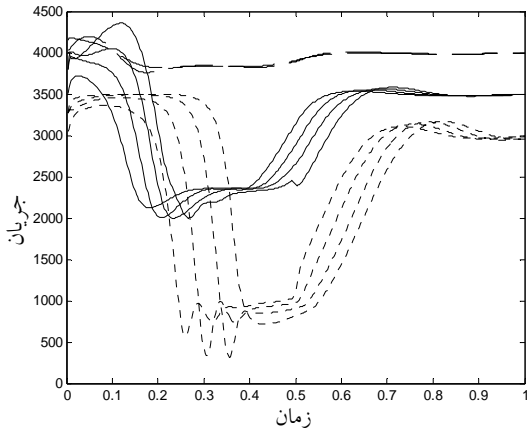
همان‌گونه که مراحل کار قبلاً در شکل ۲ نشان داده شده است، این الگوریتم در هر مرحله به تعداد مشخصی ماتریس $u(k)$ تصادفی تولید می‌کند. این ماتریس به همراه ماتریس $u(0)$ و $d(k)$ وارد مدل جریان منانت می‌شود. در مدل جریان تابع برازندگی هر دسته جواب محاسبه و به الگوریتم ژنتیک باز می‌گردد. در این الگوریتم، با توجه به تابع برازندگی هر جواب، عملگرهای ژنتیک (ترکیب و جهش) روی اعضا اعمال شده و نسل بعدی تولید می‌شود. این عملگرها شامل ترکیب میان دو عضو جمعیت بر اساس احتمال ترکیب و عملگر جهش می‌باشد که برای جلوگیری از ثابت ماندن برخی اعضای جمعیت در تکرارهای متوالی، به کار می‌رود. این دو عملگر نقش مهمی در کیفیت جواب نهایی و بالا بردن قدرت جستجوی الگوریتم دارند. این روند تا هنگامی که شرایط همگرایی الگوریتم ارضا گردد، ادامه دارد و در انتها خروجی الگوریتم جوابی متشکل از سرعت‌های مجاز و نرخ‌های کنترل رمپ در گام‌های زمانی k خواهد بود که تابع هدف را کمینه می‌کند.

۵- مطالعه موردی

در این قسمت مدل ارایه شده در بخش پیشین روی یک شبکه فرضی پیاده می‌شود. در این تحقیق ابتدا شبکه‌ای مطابق با شبکه در نظر گرفته شده در (Heghy, Shutter and Hallendroon, 2004) جهت اعتبارسنجی مدل بررسی گردید.

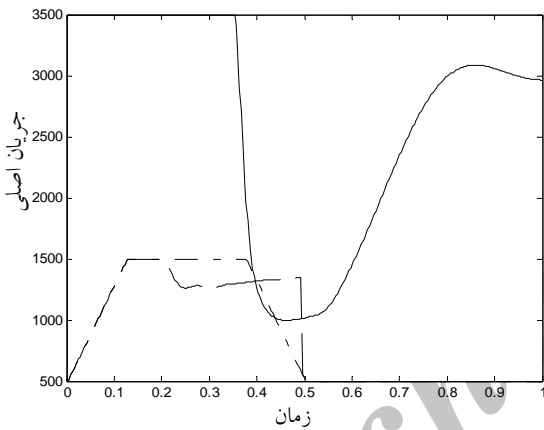


شکل ۴. شکل شماتیک شبکه مورد بررسی

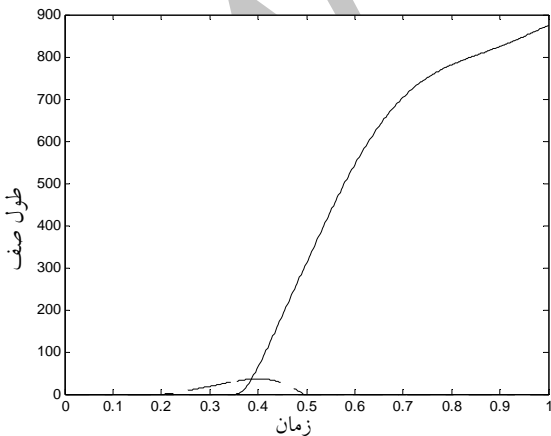


شکل ۷. نمودار جریان- زمان برای ۳ مسیر شبکه (حالت اول)

- مسیر ۱ (شامل ۴ قطعه) مبدأ O_1
- مسیر ۲ (شامل ۴ قطعه) مبدأ O_2
- مسیر ۳ (شامل ۲ قطعه) مبدأ O_3



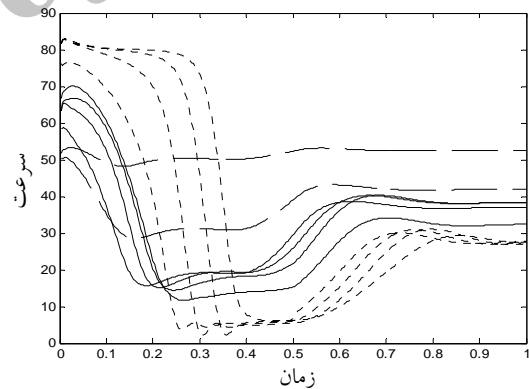
شکل ۸. نمودار جریان - زمان برای ۳ مبدأ شبکه (حالت اول)



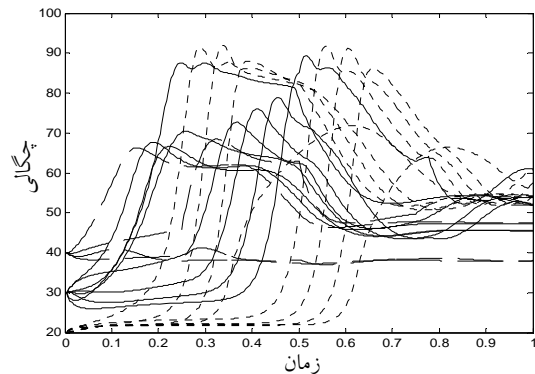
شکل ۹. نمودار طول صف برای ۳ مبدأ (حالت اول)

تابع تقاضا برای این مطالعه به این صورت است که مبدأ O_1 تقاضایی ثابت و نزدیک به ظرفیت دارد که مقدار آن (3500 veh/h) دارد. برای دو رمپ O_2 و O_3 تقاضای متغیری انتخاب شده است که مقدار اولیه آن (500 veh/h) می باشد. سپس طی ۳۰ دقیقه نخست به (1500 veh/h) می رسد و پس از آن دوباره به همان مقدار اولیه افت می کند.

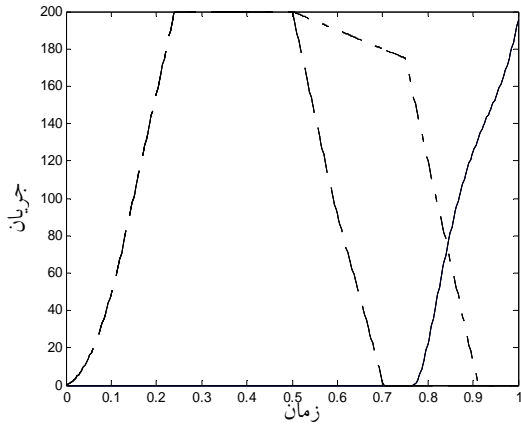
برای مطالعه تأثیرات کنترل کننده رمپ و سرعت مجاز متغیر بر شبکه، سه سناریوی متفاوت تعریف می شود. اولین سناریو مربوط به حالتی است که کنترل کننده ای در شبکه وجود ندارد و سناریوی "بدون کنترل" نام دارد. دومین حالت فقط شامل کنترل کننده رمپ می باشد و سومین سناریو دربردارنده هر دو کنترل یعنی هم سرعت متغیر و هم کنترل کننده رمپ می باشد. اشکال مربوط به شبیه سازی این سه حالت یعنی حالت بدون کنترل (اشکال ۵ تا ۹)، فقط کنترل رمپ (اشکال ۱۰ تا ۱۴) و کنترل رمپ و سرعت مجاز متغیر (اشکال ۱۵ تا ۱۹) در ادامه آمده است. این اشکال شامل سرعت (شکل های ۵ و ۱۰ و ۱۵)، چگالی (شکل های ۶ و ۱۱ و ۱۶)، جریان (شکل های ۷ و ۱۲ و ۱۷)، جریان از سه مبدأ مختلف (شکل های ۸ و ۱۳ و ۱۸) و طول صف (شکل های ۹ و ۱۴ و ۱۹) برای این سه حالت هستند.



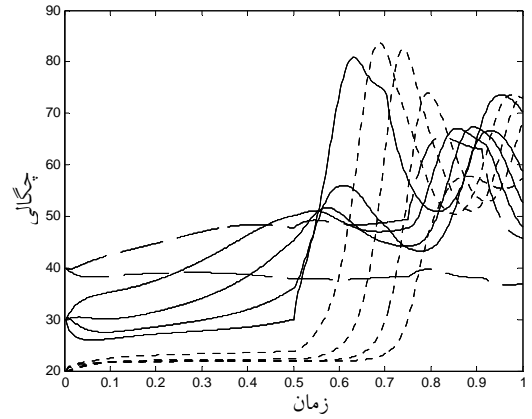
شکل ۵. نمودار سرعت - زمان برای ۳ مسیر شبکه (حالت اول)



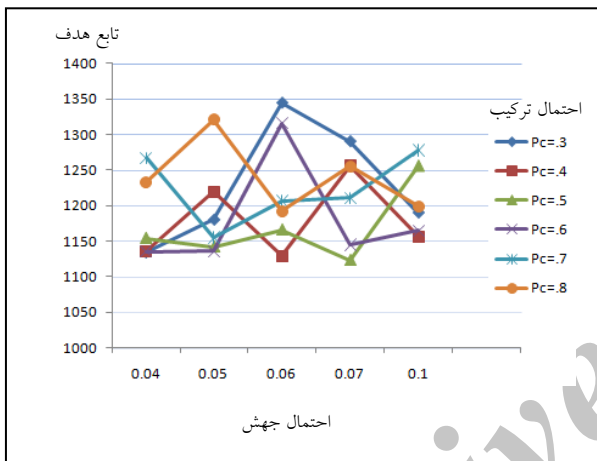
شکل ۶. نمودار چگالی - زمان برای ۳ مسیر شبکه (حالت اول)



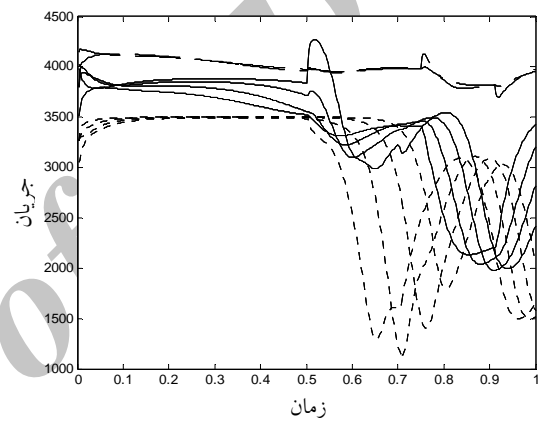
شکل ۱۹. نمودار طول صف برای ۳ مبدأ (حالت سوم)



شکل ۱۶. نمودار چگالی- زمان برای ۳ مسیر شبکه (حالت سوم)

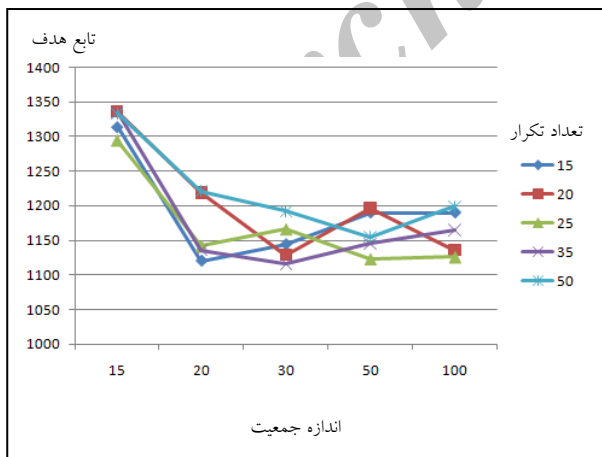


شکل ۲۰. تحلیل حساسیت پارامتر احتمال ترکیب و احتمال جهش



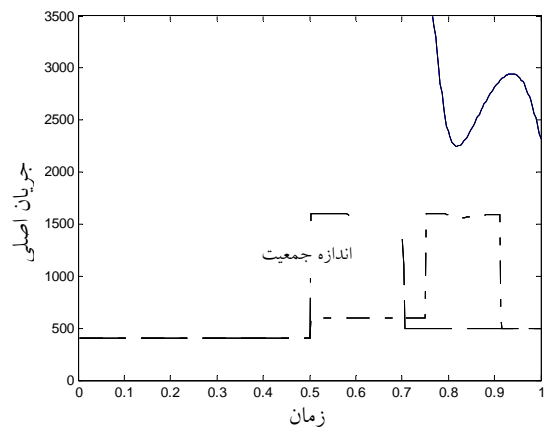
شکل ۱۷. نمودار جریان- زمان برای ۳ مسیر شبکه (حالت سوم)

مسیر ۱ (شامل ۴ قطعه) مبدأ O_1
 مسیر ۲ (شامل ۴ قطعه) مبدأ O_2
 مسیر ۳ (شامل ۲ قطعه) مبدأ O_3



شکل ۲۱. تحلیل حساسیت پارامتر اندازه جمعیت و تعداد تکرار

به صورت دو بعدی



شکل ۱۸. نمودار جریان- زمان برای سه مبدأ شبکه (حالت سوم)

۱-۵- تحلیل حساسیت

همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد، دو عملگر ترکیب و جهش در الگوریتم ژنتیک این مدل استفاده شده است. این دو عملگر نقش مهمی در کیفیت جواب نهایی و بالا بردن قدرت جستجوی الگوریتم دارند، از این رو برای یافتن بهترین مقادیر برای احتمال ترکیب (Pc) و احتمال جهش (Pm) تحلیل حساسیت برای آنها انجام شده و نتیجه آن در شکل ۲۰ (به صورت دو بعدی) نشان داده شده است. مقدار تابع هدف بهینه (کمینه) به ازای $Pc=0/5$ و $Pm=0/04$ حاصل می‌شود. همچنین برای یافتن اندازه جمعیت بهینه و تعداد تکرار نیز بایستی تحلیل حساسیت صورت گیرد که در شکل ۲۱ این تحلیل صورت گرفته است. الگوریتم ژنتیک در این مسئله با تعداد تکرار ۲۰ و اندازه جمعیت ۳۰ به بهترین جواب خود می‌رسد.

برای آنالیز حساسیت مدل نسبت به ابعاد شبکه و تعداد رمپ، می‌توان مطالعه موردی انجام شده برای اعتبارسنجی مدل روی شبکه‌ای با ۲ مسیر، ۶ قطعه، ۱ رمپ ورودی و ۱ سرعت مجاز را، با شبکه‌ای وسیع‌تر بیان شده در این بخش (شکل ۴) مقایسه کرد. همان‌گونه که در ابتدای این بخش نیز ذکر شد، در شبکه کوچک‌تر بهبود ۱۴ درصد در تابع هدف به دست می‌آید، حال آن‌که برای شبکه بزرگ‌تر بیان شده در این بخش بهبود تابع هدف ۲۱ درصد می‌باشد. می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با بزرگ‌تر شدن شبکه و تعداد کنترل‌کننده‌ها در آن، مدل کارایی بهتری پیدا می‌کند.

۶- بحث

همان‌گونه که از شکل‌های وضعیت شبکه در بخش قبل نیز قابل درک است، در حالت بدون کنترل با افزایش تقاضای رمپ‌ها در ۳۰ دقیقه ابتدای شبیه‌سازی، چگالی در قطعات متصل به این رمپ‌ها افزایش یافته و موجب ایجاد یک گره ترافیکی در این نقاط می‌شود. با به‌کار بردن کنترل رمپ در سناریوی دوم، تا حدودی از این آشفتگی کاسته می‌شود، اما هنوز هم با بالا رفتن تقاضا در رمپ‌ها می‌توان ناکارایی کنترل رمپ را به خوبی با توجه به وضعیت چگالی قطعات مسیر دید. در انتها با به‌کار بردن سرعت مجاز متغیر همراه با کنترل رمپ، این آشفتگی پس از طی ۳۰ دقیقه ابتدایی به حالت پایدار مبدل می‌گردد. در جدول ۱ اعداد مربوط به زمان کل سپری شده در شبکه (TTS) که به عنوان ملاکی برای بهینه‌سازی شبکه انتخاب شده است، آمده است. همان‌گونه که در جدول ۱ نیز آمده است، با به‌کار بردن همزمان سرعت مجاز متغیر و کنترل رمپ می‌توان به بهبود ۲۱ درصد در میزان زمان کل سپری شده در شبکه (نسبت به حالت بدون کنترل) دست یافت که این مقدار در مورد به‌کارگیری کنترل رمپ به تنهایی به ۱۲ درصد می‌رسد. مقادیر بهینه سرعت و نرخ اعمال شده در شبکه برای ۲ رمپ ورودی و ۲ سرعت مجاز بالادست آنها، که در هر ۱۵ دقیقه تغییر می‌کند در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۱. زمان کل سپری شده در شبکه برای سه سناریوی مختلف

	بدون کنترل	فقط کنترل رمپ	کنترل رمپ + سرعت مجاز متغیر
TTS (veh.h)	۱۴۰۳	۱۲۳۴	۱۱۳۶
درصد بهبود	-	٪۱۲	٪۲۱

جدول ۲. مقادیر نرخ بهینه رمپ برای حال فقط کنترل رمپ

فقط کنترل رمپ	۱۵ دقیقه اول	۱۵ دقیقه دوم	۱۵ دقیقه سوم	۱۵ دقیقه چهارم
رمپ ۱	۰/۲	۰/۵	۰/۶	۰/۸
رمپ ۲	۰/۲	۰/۹	۰/۳	۰/۴

جدول ۳. مقادیر نرخ بهینه رمپ و سرعت مجاز برای سناریوی سوم

کنترل رمپ + سرعت مجاز متغیر	۱۵ دقیقه اول	۱۵ دقیقه دوم	۱۵ دقیقه سوم	۱۵ دقیقه چهارم
رمپ ۱	۰/۲	۰/۲	۰/۸	۰/۳
رمپ ۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۵
سرعت مجاز ۱ (km/h)	۶۰	۴۰	۷۰	۹۰
سرعت مجاز ۲ (km/h)	۹۰	۴۰	۴۰	۵۰

3. Variable Message Sign (VMS)
4. Rout Choosing
5. Open Loop
6. Flatness-Based Control
7. Close Loop
8. Reactive
9. Model Predictive Control
10. Relaxation Term
11. Convection Term
12. Anticipation Term
13. Total Time Spend (TTS)
14. NP-hard

۷- نتیجه گیری

همان گونه که در مقدمه نیز گفته شد، امروزه توجه و تمرکز زیادی روی سیستم‌های کنترل بزرگراهی وجود دارد، زیرا که این سیستم‌ها با صرف هزینه و زمان به مراتب کمتر (نسبت به زیر ساخت‌ها) به روان‌سازی جریان و کاهش ازدحام و تراکم معابر کمک می‌کنند. نتایجی که با اجرای مدل پیشنهادی در این مقاله کسب شد حاکی از آن است که اولاً اجرای یک روش کنترلی بدون شک منجر به بهبود شاخص‌های ترافیکی (در اینجا زمان سفر کلی سپری شده) می‌شود؛ ثانیاً به کار بردن کنترل کننده رمپ به تنهایی فقط تا هنگامی که در شبکه تراکم وجود ندارد راه‌گشا می‌باشد. با بالا رفتن نسبت جریان به ظرفیت در معبر اصلی، فضا برای ملحق شدن وسایل نقلیه جدید از رمپ به بزرگراه کمتر و کمتر می‌شود تا جایی که کنترل رمپ کارایی خود را از دست داده و یک گره ترافیکی در محل رمپ ورودی به وجود می‌آید. نتیجه سوم این است که در این شرایط، با به کار بردن یک سرعت مجاز متغیر در بالادست رمپ، که به یکسان‌سازی و کاهش سرعت در آن منطقه می‌انجامد؛ می‌توان نرخ حجم ورودی به قطعه دارای رمپ را کنترل کرده و این باعث روان‌سازی دوباره جریان می‌گردد. در واقع نتایج مدل ارائه شده در این مطالعه نشان داد که می‌توان به‌طور مؤثر کنترل کننده رمپ و اعمال سرعت مجاز متغیر را با یکدیگر هماهنگ کرد. به عنوان مطالعات آتی محققان در نظر دارند برای افزایش دقت از مدل‌های خردنگر که قابلیت کالیبره شدن با وضعیت واقعی را بیشتر از مدل‌های متوسط‌نگر دارند، استفاده کنند.

۹- مراجع

- Ghods, A. H., Liping, F. and Rahimi-Kian, A. (2007) "A genetic-fuzzy control application to ramp metering and variable speed limits control", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December, Vol. 8, pp. 273-279.
- Ghods, A. H., Liping, F. and Rahimi-Kian, A. (2010) "An efficient optimization approach to real-time coordinated and integrated freeway traffic control", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December, Vol. 11, pp. 873-884.
- Hegyi, A., Schutter, B. and Hellendoorn, J. (2004) "Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December, Vol. 6, No. 1, pp. 102-112.
- Hegyi, A. Schutter, B. and H. Hellendoorn, J. (2005) "Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, December, Vol. 9, No. 5, pp. 267-272.
- Kamel, B. and Benasser, A. (2008) "Flatness based control of traffic flow for coordination of ramp metering and VSL", 11th International IEEE, Conference on Intelligent Transportation

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Ramp Metering (RM)
2. Variable Speed Limit (VSL)

- Schwartz, S. C. and Tan, H. (1997) "Integrated control of freeway entrance ramps by threshold regulation", IEEE conference on Decision and Control, Vol. 16, pp. 984-986.
- Xiao-Tun Lu, D. and Varaiya, P. (2010) "A new approach for combined freeway variable speed limits and coordinated ramp metering", IEEE, Vol. 2, pp. 156-161.
- Xiao-Yun Lu, Tony, Z. and Qiu, U. (2010) "Combining variable speed limits with ramp metering for freeway traffic control, American Control Conference", December.
- Zhang, L. and Levinson, H. (2004) "Ramp metering and capacity of active freeway bottleneck", 83rd TRB annual Meeting.
- Systems, Baijing, China, October 12-15, Vol. 10, pp. 142-148.
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Diakaki, C., Pavlis, Y. and Middleham, F. (2002) "Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, pp. 282-292.
- Lighthill, M. and Whitham, G. B. (1995) "On kinematic waves flood movement in long rivers", Proceedings of the Royal Society of London, series A, Mathematical and Physical Science, London, England, Vol. 220, No. 1178, pp. 281-316.
- Masher, D. P., Ross, D. W., Wong, P. J. and Tuan, P. L. (1995) "Guidelines for design and operating of ramp control systems", Stanford research institute report, California, NCHRP 3-22.

Archive of SID