مجله علمی - پژوهشی
«عمران مـــــدرس»
دوره چهاردهم، ویژه نامه، تابستان ۱۳۹۳

توسعه مدل برنامه‌ریزی خطی جهت کنترل بهینه رمپ‌ها: مطالعه موردی بزرگراه شهید همت

امیررضا ممدوحی*[۱]، علیرضا بازرگانی[۲]، محمود صفارزاده[۳]، محمدحسین نوروزعلیایی[٤]

۱- استادیار گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

۲- کارشناس‌ارشد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

۳- استاد گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

٤- کارشناس‌ارشد برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

armamdoohi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۰/۱۱] **تاریخ پذیرش:** [۱۳۹۲/۱۲/۱۵]

چکیـده- کنترل رمپ در بزرگراه‌های شهری یکی از سیاست‌های کنترل ترافیک کاراست که می‌تواند وضعیت ازدحام بزرگراه‌ها را با محدود کردن تعداد خودروهای ورودی به بزرگراه بهبود بخشد. چالش اصلی این استراتژی، تعیین نرخ‌های بهینه ورود وسایل نقلیه به تفکیک رمپ‌های مختلف به مسیر اصلی است به گونه‌ای که منجر به حداکثر حجم تردد در مسیر اصلی شود. در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی جهت کنترل بهینه رمپ‌ها با توجه به محدودیت ظرفیت مسیر اصلی و محدودیت طول صف در رمپ‌های ورودی توسعه یافته است. هدف اصلی این تحقیق پیاده‌سازی و اجرای مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه‌یافته برای یک نمونه واقعی و پرازدحام در شهر تهران و بررسی چالش‌ها و آثار آن است. در عملیات میدانی نسبتاً وسیع شامل گردآوری داده‌های حجم تردد بزرگراه شهید همت تهران رویکرد شرق به غرب حد فاصل بزرگراه مدرس تا خروجی بزرگراه شهید چمران و رمپ‌های در این محدوده در مدت ۳ ساعت، حدود ۱۵۰۰۰ خودروی عبوری شمارش شدند. نتایج اجرای مدل برای این محدوده نشان‌دهنده بهبود سطح سرویس مسیر اصلی از F به E و افزایش سرعت در مقاطع اصلی آزادراه بین ۱۸ و ۲٤ کیلومتر در ساعت و همچنین کاهش زمان سفر در مسیر اصلی به مقدار ۹ دقیقه است.

واژگان کلیدی: کنترل رمپ؛ بهینه‌سازی؛ برنامه‌ریزی خطی

۱- مقدمه

بزرگراه‌ها از جمله معابر با بخش عمده‌ای از سفرهای درون‌شهری هستند، که کیفیت جابه‌جایی نیز در آنها از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا نحوه مدیریت جریان بزرگراه‌ها می‌تواند نقش عمده‌ای در روان‌سازی جریان ترافیک درون‌شهری ایفا نماید. در این میان، رمپ‌های ورودی بزرگراه‌ها به عنوان مبادی ورودی خودروها به جریان اصلی بزرگراه دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. کنترل رمپ به عنوان یکی از سیاست‌های مؤثر مدیریت رمپ‌های ورودی توسعه زیادی یافته، که از رویکردهای مؤثر آن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی است. هدف این روش‌ها بیشینه کردن جریان ورودی به بزرگراه بوده، به طوری که جریان مسیر اصلی از محدوده ظرفیت بزرگراه تجاوز نکند [۱].

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی برای کنترل بهینه رمپ‌ها با دو رویکرد مختلف توسعه داده شده‌اند. رویکرد اول با هدف کمینه کردن تأخیر در جریان

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

بزرگراه بوده، در حالی که در رویکرد دوم تابع هدف، بیشینه کردن جریان ورودی بزرگراه است به طوری که جریان مسیر اصلی از محدوده ظرفیت تجاوز نکند. یکی از مهمترین انتقاداتی که به رویکرد دوم سیاست کنترل رمپ وارد است، تأخیر به‌وجودآمده در رمپ‌ها به دلیل صف تشکیل‌شده ناشی از اجرای این سیاست است. از دیگر انتقاداتی که در کنترل رمپ با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مطرح است، مسأله برابری[1] بین رمپ‌های ورودی است، چرا که در اعمال این استراتژی ممکن است به برخی از رمپ‌ها اجازه عبور بیشتری نسبت به سایر رمپ‌ها داده شود. هدف رویکرد دوم، بیشینه کردن جریان ورودی به بزرگراه بوده که ممکن است باعث به وجود آمدن نرخ‌های کنترلی شود که جریان ورودی برخی از رمپ‌ها را کمتر و برخی دیگر را بیشتر محدود کند [۲].

در این مقاله سعی شده است یک مدل برنامه‌ریزی خطی جهت بهینه‌سازی جریان ورودی به بزرگراه توسعه یابد، به طوری که طول صف تشکیل‌شده در رمپ‌های ورودی از حد ظرفیت رمپ‌ها تجاوز نکند و در عین حال از ظرفیت انباره رمپ‌ها به طور کامل استفاده گردد. هدف اصلی این تحقیق پیاده‌سازی و اجرای مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای یک نمونه واقعی و پرازدحام در شهر تهران و بررسی چالش‌ها و آثار آن است. در بخش‌های بعدی ابتدا به مروری بر ادبیات تحقیق و سپس متدولوژی تحقیق و نمونه موردی و چگونگی گردآوری داده‌های تحقیق پرداخته می‌شود. در انتها نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارایه خواهند شد.

۲- ادبیات تحقیق

کنترل رمپ همواره یکی از کاراترین روش‌های کنترل و بهبود وضعیت ترافیک آزادراه‌ها از اوایل دهه ۱۹۶۰ بوده است [۳]. به منظور ارزیابی عملکرد و کارایی نتایج حاصل از اجرای کنترل رمپ، معیار استاندارد و ثابتی وجود ندارد. جدول ۱ خلاصه‌ای از فواید گزارش‌شده از اجرای کنترل رمپ در نقاط مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱: برخی فواید کنترل رمپ در ایالات متحده [۵،۴و ۶]

محل	معیار عملکردی	زمان تقریبی اجرا یا ارزیابی
پورتلند، اورگان	کاهش ۴۳ درصدی تصادفات در ساعت اوج	۱۹۸۱
مینیاپولیس، مینسوتا	کاهش ۳۸ درصدی در تصادفات ساعت اوج	اجرای اولیه در ۱۹۷۰ ارزیابی در ۱۹۸۹
سیاتل، واشینگتون	کاهش ۳۴ درصدی در نرخ تصادفات	۱۹۸۱ تا ۱۹۸۷
دنور، کالرادو	کاهش ۵۰ درصدی تصادفات از پشت و از کنار	۱۹۸۱ تا ۱۹۸۹
دترویت، میشیگان	کاهش کل تصادفات تا ۵۰ درصد کاهش تصادفات منجر به جرح تا ۷۱ درصد	۱۹۸۴
لانگ آیلند، نیویورک	کاهش ۱۵ درصدی نرخ تصادفات	۱۹۹۱
لوس آنجلس	ایجاد تعادل بین کارایی و برابری	۲۰۰۹
نیوجرسی	بهبود ۲۰ درصدی خروجی کل سیستم	۲۰۰۸

استراتژی‌های کنترل رمپ به دو دسته تقسیم می‌شود: کنترل رمپ محلی[2] یک بخش مجزا از شبکه را با یک رمپ ورودی تحلیل کرده و کنترل‌گر به تغییرات در شرایط محلی پاسخ می‌دهد و کنترل

۱. Equity

۲. Local Metering

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

رمپ یکپارچه یا هماهنگ[1] به هماهنگی تعدادی رمپ ورودی می‌پردازد [۳].

آلینا[2] یک الگوریتم کنترل محلی خطی است که به صورت بازخوردی عمل می‌کند. در این روش، نرخ کنترل به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سطح اشغال پایین‌دست از یک مقدار سطح اشغال معین کمتر شود [۷]. آلینا به عنوان یک استراتژی کنترل رمپ لوپ بسته، توسط پاپاجورجیا و همکاران در سال ۱۹۹۱ ابداع شده است. در رابطه اصلی این الگوریتم برای هر بازه زمانی T (مثلاً T=۶۰sec) داریم (رابطه ۱):

$$u(k) = u(k-1) + K_R[\hat{O} - O_{out}(k)] \qquad (1)$$

در این رابطه:

$u(k)$: نرخ کنترل در بازه زمانی k

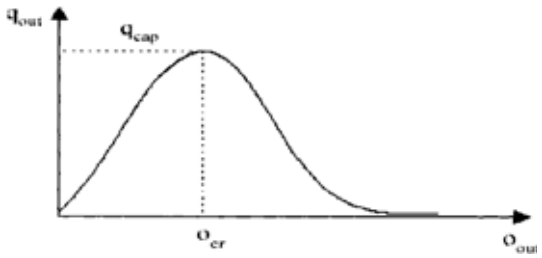
$O_{out}(k)$: سطح اشغال اندازه‌گیری‌شده در بازه زمانی k

K_R: ضریب تبدیل واحد با مقدار ثابت

$\hat{O}$: یک مقدار معین (مطلوب) برای سطح اشغال پایین‌دست.

معمولاً $\hat{O} = O_{cr}$ در نظر گرفته می‌شود که در این صورت، جریان آزادراه نزدیک به ظرفیت خود q_{cap} عمل خواهد کرد (شکل ۱).

مقدار معین $\hat{O}$ ممکن است در زمان‌های مختلف تغییر کند. در نتیجه می‌توان آلینا را در قالب یک سیستم کنترل سلسله مراتبی با مقادیر معین هر یک از رمپ‌ها که در زمان واقعی به دست آمده‌اند و با استفاده از یک کاربر و یا یک روش یکپارچه‌سازی استفاده کرد [٤].



شکل ۱: دیاگرام اساسی جریان ترافیک

الگوریتم‌های هماهنگ نسبت به الگوریتم‌های محلی در مقابله با کاهش ظرفیت ناشی از تأخیر دارای انعطاف‌پذیری بیشتری می‌باشند [۸]. یکی از الگوریتم‌های هماهنگ، الگوریتم پاسخگوی ترافیک گلوگاه[3] می‌باشد. این الگوریتم از نرخ کنترل محلی (با استفاده از داده‌های گذشته) و یک نرخ کنترل گلوگاهی استفاده می‌کند که از حجم ترافیک در پایین‌دست رمپ به دست می‌آید. برای این منظور ابتدا باید نرخ تجمع خودروها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شود [۹].

$$u_i(t+1) = \left(q_{in(i)}(t) + q_{on(i)}(t)\right) - \left(q_{out(i)}(t) - q_{off(i)}(t)\right) \qquad (2)$$

در این رابطه:

$u_i(t+1)$: کاهش حجم مورد نیاز در بالادست رمپ برای مقطع i، در بازه زمانی بعدی

$q_{in(i)}(t)$: حجم ثبت‌شده توسط شناسگرهای بالادست رمپ (مسیر اصلی) در ۱ دقیقه گذشته

$q_{on(i)}(t)$: حجم واردشده به مقطع از محل رمپ‌های ورودی در یک دقیقه گذشته

$q_{out(i)}(t)$: حجم ثبت‌شده توسط شناسگرهای پایین‌دست رمپ (مسیر اصلی) در یک دقیقه گذشته

$q_{off(i)}(t)$: حجم خارج‌شده از مقطع از محل رمپ‌های خروجی در یک دقیقه گذشته

در الگوریتم برنامه‌ریزی خطی (یوشینو[4] و همکاران) ابتدا یک تابع هدف به همراه تعدادی معادلات شرطی به گونه‌ای تعریف می‌شود که تابع هدف بهینه گردد. مدل برنامه‌ریزی خطی از متغیرهای از پیش تعیین‌شده و لحظه‌ای و همچنین پارامترهای قابل تنظیم و ضرایب وزنی برای رمپ‌ها جهت تعیین نرخ‌های کنترل بهینه تمامی رمپ‌ها استفاده می‌کند [۳].

در مطالعه‌ی منگ[5] و همکاران، شاخصی ابتکاری برای برابری بین رمپ‌ها تعریف گردید و مدلی چندهدفه جهت بهینه‌سازی چندهدفه این شاخص و کارایی سیستم توسعه داده شد. همچنین از یک

۱. Coordinated Metering
۲. ALINEA
۳. Bottleneck
٤. Yoshino
٥. Meng

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

مدل جابه‌جایی سلولی[1] ویژه جهت اعمال استراتژی کنترل رمپ استفاده شد [۵].

۳- متدولوژی تحقیق

مدل پیشنهادی این تحقیق مبتنی بر مدل‌های یوشینو [۳] و مسر[2] [۱۰] است، با این تفاوت که در مدل یوشینو طول صف بیشینه در رمپ‌ها لحاظ نشده و در مدل مسر نرخ‌های کنترل ورودی متأثر از ظرفیت ناحیه همگرایی می‌باشند. در مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی جهت اعمال کنترل رمپ، تابع هدف بیشینه‌سازی خودروهای ورودی به سیستم با توجه به محدودیت‌های عملکردی و طرح هندسی است. محدودیت‌های مدل فوق عبارتند از ظرفیت مقاطع در مسیر اصلی، طول صف در رمپ‌های ورودی و مقادیر مرزی برای نرخ کنترل.

۳-۱- فرض‌های تحقیق

در این تحقیق، فرض‌های زیر در نظر گرفته می شو ند :

۱- در جریان ترافیک مسیر اصلی هیچگونه انسداد ناشی از تصادف وجود ندارد و روابط اساسی ترافیک برای جریان، سرعت و چگالی بر محدوده حاکم است.

۲- هریک از خودروها از محل توقف به صورت مجزا و با رعایت قاعده اولین ورودی، اولین خروجی[3] عبور می‌کنند.

۳- برای به دست آوردن ظرفیت انباره رمپ، با توجه به ترکیب خودروهای عبوری از سیستم، طول هر خودرو با احتساب سرفاصله در توقف، ۷ متر در نظر گرفته شده است.

٤- یک بازه زمانی عبارت است از بازه زمانی گردآوری داده توسط کاربر. به عنوان مثال، در صورتی که داده‌ها در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای گردآوری شده‌اند، تعداد بازه‌های زمانی برای هر ساعت گردآوری داده ۱۲ عدد خواهد بود.

جهت ارزیابی میزان بهبود حاصل از اعمال کنترل از سطح سرویس و سرعت مسیر اصلی به عنوان معیار عملکردی استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به عدم دسترسی به سرعت مسیر اصلی در مقاطع بحرانی قبل و بعد از کنترل، برای به دست آوردن سرعت از رابطه گرین‌برگ استفاده شده است [۱۱].

۳-۲- مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی

با توجه به فرض‌های بخش قبل، مدل برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر توسعه داده شده است:

۱. تابع هدف:

$$Maximize\ Z = \sum_{k=1}^{W}\sum_{i=1}^{N} X_i(k) \qquad (۳)$$

در تابع هدف فوق:

$X_i(k)$: نرخ کنترل رمپ ورودی i در بازه زمانی k (متغیر تصمیم)

i : اندیس رمپ‌های ورودی کنترل‌شده $i=1,\dots,N$

k : اندیس بازه زمانی $k=1,\dots,W$

N : تعداد رمپ‌های ورودی کنترل‌شده

W : تعداد بازه‌های زمانی کنترل

۲. محدودیت‌ها

۱- محدودیت ظرفیت مقاطع بزرگراه

$$\sum_{i=1}^{N} A_{ij}(k)X_i(k) \le B_j(k) \qquad j = 1,\dots,L \qquad (٤)$$

در رابطه فوق:

A_{ij} : بخشی از جریان ترافیک ورودی از رمپ i که از مقطع j در مسیر اصلی عبور می‌کند.

$B_j(k)$: ظرفیت مقطع j در بازه زمانی k

j : اندیس مقاطع مسیر اصلی

L : تعداد مقاطع مسیر اصلی

این محدودیت تضمین می‌کند که جریان ترافیک در تمام مقاطع مسیر بزرگراه (j) از ظرفیت مقاطع تجاوز نکند.

۱. Cell Transition Model

۲. Messer

۳. First In First Out

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

۲- محدودیت حداکثر طول صف

$$R_i(k)=T_i(k)-X_i(k) \quad (۵)$$

$$Q_i(k)=۱/H\ R_i(k) \quad (۶)$$

$$T_i(k+۱)=D_i(k+۱)+R_i(k) \quad (۷)$$

$$Q_i(k)\leq U_{i,}max \quad (۸)$$

در روابط فوق:

$R_i(k)$: تقاضای سرویس‌دهی‌نشده در رمپ i در بازه زمانی k

$T_i(k)$: تقاضای کل در رمپ i در بازه زمانی k

$$T_i(k) = D_i(k) + HQ_i(k-۱)$$

$Q_i(k)$: تعداد خودرو در صف رمپ ورودی i در بازه زمانی k، خودروهای منتقل‌شده به بازه زمانی k + ۱ (veh)

H : تعداد بازه‌های زمانی بر واحد زمان (۱/ hr)

$U_{i,max}$: ظرفیت انباره رمپ i برای جای دادن خودروهای در صف (veh)

$D_i(k)$: تقاضای جدید به‌وجودآمده در رمپ در بازه زمانی k

۳- محدودیت‌های حدی (مرزی) نرخ کنترل

$$X_{i,min}\leq X_i\leq X_{i,max} \quad ,T_i(k) \quad (۹)$$

در این محدودیت، حدود بالا و پایین نرخ کنترل تعیین می‌شود. با توجه به تعریف ظرفیت (حداکثر تعداد خودرویی که در یک ساعت می‌تواند از یک مقطع از راه عبور کند)، این کمیت نامزد مناسبی برای حد بالای نرخ کنترل است، ولی باید به نکات زیر در این ارتباط توجه داشت [۱۲].

۱. با توجه به اینکه ممکن است تقاضای یک رمپ مقداری کمتر از ظرفیت باشد، در صورت استفاده از ظرفیت ممکن است نرخ کنترل به‌دست‌آمده از مدل بیش از تقاضای رمپ باشد و یا به عبارتی $D_i\leq X_i\leq C_i$.

۲. با توجه به محدودیت ظرفیت مقطع اصلی، نرخ رمپ‌های دیگر که متأثر از یکدیگرند نیز کاهش یافته و در نتیجه باعث می‌شود نرخ یک رمپ بیش از تقاضا (بدون کنترل) و نرخ رمپ دیگر بسیار کمتر از تقاضا (نرخ کاملاً محدودکننده) شود. بنابراین این نرخ سبب تشکیل صف طولانی و پس‌زدگی جریان می‌گردد و مغایر با قاعده برابری بین کاربران است.

۳. بر اساس قواعد برنامه‌ریزی خطی، هر قدر مرز محدودیت‌ها گسترش یابد، جواب مدل بهترخواهد شد. از طرفی در صورتی که تقاضا کمتر از ظرفیت باشد، تعیین ظرفیت به عنوان مرز محدودیت باعث جواب بهتری خواهد شد.

حد پایین نرخ کنترل باید به گونه‌ای باشد که از به وجود آمدن نرخ‌های بسیار کم و کاملاً محدودکننده جلوگیری شود، زیرا منجر به تأخیر قابل توجه در رمپ خواهند شد [۱۳].

٤- نمونه موردی

به منظور پیاده‌سازی و اجرای مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی برای یک نمونه واقعی و پرازدحام در شهر تهران و بررسی چالش‌ها و آثار آن، بزرگراه شهید همت رویکرد شرق به غرب حد فاصل بزرگراه مدرس تا خروجی بزرگراه شهید چمران و رمپ‌های این محدوده به عنوان نمونه موردی انتخاب گردید (شکل ۲).

٤-۱- شرح آمارگیری

همانطور که در شکل ۳ (تصویر شماتیک) مشاهده می‌شود، پنج رمپ ورودی و چهار رمپ خروجی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد، که به همراه مسیر اصلی و رمپ خروجی بزرگراه مدرس، تشکیل یازده ایستگاه آمارگیری (جدول ۲) جهت برداشت داده از طریق دوربین فیلمبرداری می‌دهد. آمارگیری روز سه‌شنبه ۱۹ مرداد ۱۳۸۹ از ساعت ۱۷ الی ۲۰ جهت برداشت سه نوع داده انجام شد:

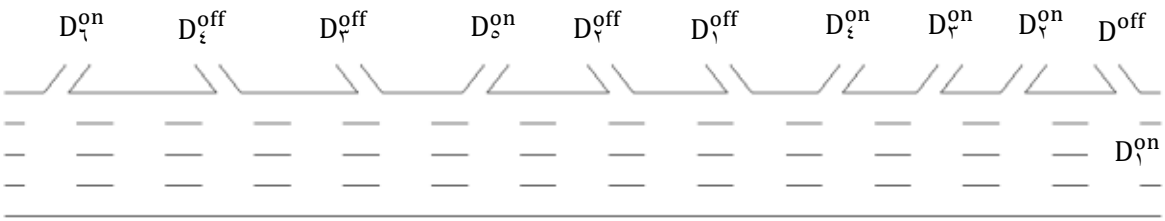
۱. حجم تردد در هر یک از رمپ‌های ورودی و خروجی و مسیر اصلی در محل ورود به محدوده.

۲. سهم خودروهای باقیمانده در مقاطع مختلف مسیر اصلی به تفکیک رمپ ورودی.

۳. مشخصات هندسی و فیزیکی، مانند عرض خط، تعداد خط و طول رمپ‌های ورودی.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

شکل ۲ : تصویر هوایی محدوده مورد مطالعه (بزرگراه شهید همت رویکرد شرق به غرب، حد فاصل بزرگراه مدرس تا خروجی بزرگراه چمران)



شکل ۳ : *تصویر شماتیک از موقعیت رمپ‌های ورودی و خروجی محدوده مورد مطالعه*

جدول ۲ : موقعیت ایستگاه‌های آمارگیری

شماره ایستگاه	موقعیت ایستگاه	نوع داده مورد نیاز	
		تردد	پلاک‌خوانی
۱	بزرگراه همت قبل از رمپ خروجی مدرس	بله	بله
۲	رمپ خروجی بزرگراه مدرس	بله	بله
۳	رمپ ورودی بزرگراه مدرس جنوب	بله	بله
٤	رمپ ورودی بزرگراه مدرس شمال	بله	بله
٥	رمپ ورودی بزرگراه افریقا	بله	بله
٦	رمپ خروجی بزرگراه کردستان	بله	بله
۷	رمپ خروجی خیابان شیخ بهایی	بله	بله
۸	رمپ ورودی خیابان شیخ بهایی	بله	بله
۹	رمپ خروجی بزرگراه چمران شمال	بله	بله
۱۰	رمپ خروجی بزرگراه چمران جنوب	بله	بله
۱۱	رمپ ورودی بزرگراه چمران شمال	بله	خیر

٤-۲- نتایج شمارش حجم

داده‌های تردد به تفکیک وسیله نقلیه، شامل سواری و وانت، تاکسی، مینی‌بوس، اتوبوس واحد، اتوبوس غیر واحد، کامیون و موتور و دوچرخه برداشت شده و برای تعیین حجم همسنگ سواری، از جدول ۳ استفاده شد [١٤].

جدول ۳ : ضرایب همسنگ سواری شهر تهران [١٤]

نوع وسیله نقلیه	ضریب همسنگ سواری
سواری و وانت	۱
تاکسی	۱/۲
مینی‌بوس	۲
اتوبوس واحد	۵/۵
اتوبوس غیر واحد	۲/۵
وسایل نقلیه سنگین (کامیون)	٤
دوچرخه و موتور	۰/۳

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

حجم ساعتی ایستگاه‌های آمارگیری به تفکیک بازه زمانی در جدول ٤ ارایه شده است.

٤-۳- مشخصات فیزیکی محدوده

به منظور تعیین فضای انباره رمپ‌های ورودی نیاز به طول و عرض رمپ مورد نظر؛ و جهت تعیین ظرفیت مسیر اصلی، نیاز به تعداد خط و عرض این مسیر است، که با استفاده از گزارش «اطلاعات فیزیکی معابر شهر تهران» و نرم‌افزار google earth برآورد گردید [١٤]. خلاصه‌ای از این اطلاعات در شکل ٤ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

جدول ٤ : احجام ساعتی ایستگاه‌های مسیر (نتایج آمارگیری)

ایستگاه	بازه زمانی		
	١٦:٣٠ تا ١٧:٣٠	١٧:٣٠ تا ١٨:٣٠	١٨:٣٠ تا ١٩:٣٠
بزرگراه همت قبل از رمپ خروجی مدرس	٦٦٩٨	٧٠٧١	٧٤٦٤
رمپ خروجی مدرس	٣٤١٢	٣٣٤٣	٣٣٩٣
رمپ ورودی مدرس جنوب	١٨٥٠	٢٠٢٠	٢١٦٣
رمپ ورودی مدرس شمال	٢٧٥٥	٢٥٧٧	٢٦٦٣
رمپ ورودی افریقا	١٨٦٧	١٨٧٢	١٥٠٦
رمپ خروجی کردستان	١٤٠٨	١٤٤١	١٣٩٨
رمپ خروجی شیخ بهائی	١٧٩	٢١٩	٢٠١
رمپ ورودی شیخ بهائی	١٩٣٤	١٩٤١	١٩٥٦
رمپ خروجی چمران شمال	٦١٥	٦٠٤	٦٢٧
رمپ خروجی چمران جنوب	٥٧٥	٩٠٩	٧٦٨
رمپ ورودی چمران شمال	٢٣١١	٢٢٤٦	٢٢٩٥

فضای انباره رمپ‌های ورودی با توجه به میانگین فضای مورد نیاز هر خودرو در صف با استفاده از رابطه ١٠ (و با فرض میانگین سرفاصله خودروها ٧ متر ≈ میانگین طول خودروها ٦/١١ متر + فاصله جدایی ٠/٧٥ متر) محاسبه می‌شود. خلاصه نتایج این محاسبات در جدول ٥ نشان داده شده است.

$$U = \frac{\text{طول رمپ}}{٧} * \text{تعداد خطوط عبور} \qquad (١٠)$$

جدول ٥ : فضای انباره رمپ‌های ورودی

رمپ	حجم انباره (خودرو)
همت قبل از پل فجر	٢٠٦٠
مدرس جنوب	٣١٥
مدرس شمال	١١٨
آفریقا	٩٨
شیخ بهایی	٣٢
چمران شمال	٢٠١

٤-٤- ماتریس ضرایب مبدأ- مقصد

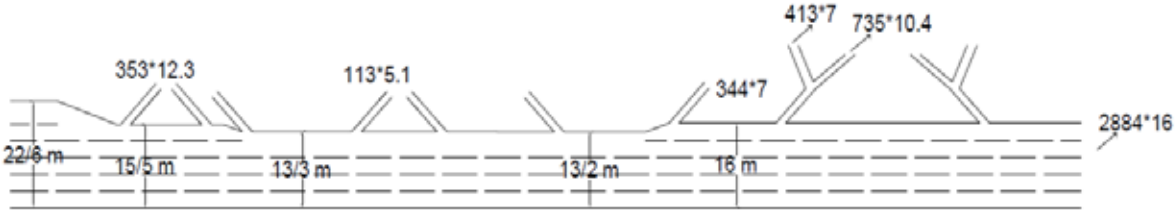
در مدل برنامه‌ریزی خطی، مقاطع بحرانی مقاطع با بیشترین جریان بوده که ممکن است در آن‌ها تقاضا فراتر از ظرفیت رود. این مقاطع پس از رمپ‌های ورودی و قبل از رمپ خروجی قرار دارند. در محدوده مورد مطالعه در مجموع ٣ مقطع بحرانی وجود دارد که باید در آنها حجم مسیر کنترل شود (شکل ٥). ظرفیت مقاطع بحرانی برابر ٥٢٧ خودرو در ساعت در متر در نظر گرفته شده است [١٤].

برای به دست آوردن ماتریس ضرایب مبدأ- مقصد (A_{ij}) برای این مقاطع لازم است محل ورود و خروج تمامی خودروهایی که وارد سیستم می‌شوند معین شود و تعداد آن‌ها نیز شمارش شود. برای این منظور از پلاک‌خوانی خودروهای ورودی و خروجی استفاده گردید که با توجه به عدم دسترسی به سیستم‌های پلاک‌خوانی خودکار، پلاک‌خوانی به صورت دستی انجام شد. نتایج حاصل از روش فوق در جدول ٦ ارایه شده است.

جدول ٦: ماتریس ضرایب مبدأ- مقصد در بازه زمانی ١٦:٣٠ تا ١٧:٣٠

A_{ij}		رمپ ورودی					
		١	٢	٣	٤	٥	٦
مقاطع بحرانی	١	٠/٤٩١	١	١	١	٠	٠
	٢	٠/٣٤٠	٠/٨٩٩	٠/٨٩٩	٠/٩٤٠	١	٠
	٣	٠/٢٥٢	٠/٨	٠/٨٢٣	٠/٨٤٩	٠/٩٨١	١

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]



شکل ٤: مشخصات فیزیکی محدوده مورد مطالعه[١٤]

٥- نتایج مدل

برای حل مدل پیشنهادی، احجام شمارش‌شده در بازه‌های زمانی ساعتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور فرض می‌شود در هر ساعت ١٢ سیکل چراغ وجود داشته باشد و نرخ‌های کنترل برای بازه‌های ٥ دقیقه‌ای تعیین می‌شوند. از اینرو مقدار H در این سناریو برابر با ١٢ است. همچنین ظرفیت مقاطع برای بازه‌های ٦٠ دقیقه‌ای منظور می‌شوند. به عنوان مثال، با فرض ظرفیت پایه ٥٢٧ خودرو در ساعت در خط در متر، ظرفیت دوره‌ای مقطع ١ برابر است با:

$$C = ١٣.٢ * ٥٢٧ = ٦٩٥٦ \, veh/_{\mathrm{hr}} \qquad (١١)$$

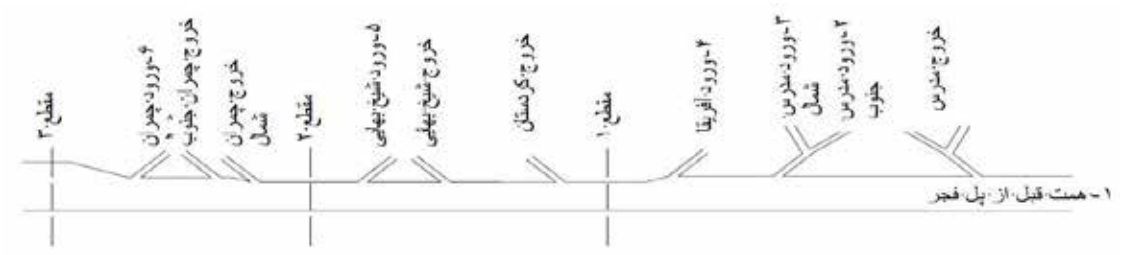
محدودیت‌های مرزی نرخ‌های کنترل نیز به صورت رابطه ١٢ است.

$$D_i(k) + R_i(k-١) - HU_i \le X_i(k) \le D_i(k) + R_i(k-١) \qquad (١٢)$$

در رابطه فوق، با توجه به اینکه تقاضا در بازه‌های زمانی اولیه از حجم انباره صف کمتر است، مقدار کمینه نرخ کنترل منفی خواهد شد که صفر لحاظ می‌شود. لازم به ذکر است که تقاضای سرویس داده‌نشده در هر بازه زمانی به تقاضای بازه زمانی بعدی افزوده می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از اجرای مدل در جدول ٧ نشان داده شده است. همچنین، مقادیر سمت چپ محدودیت‌ها در بازه زمانی ١٦:٣٠ تا ١٧:٣٠ به شرح جدول ٨ است. همانطور که در جدول ٨ ملاحظه می‌شود، محدودیت‌های اول و سوم به حد خود نرسیده‌اند (قیمت سایه این محدودیت‌ها برابر صفر است). این بدان معناست که به منظور بهبود وضعیت فعلی محدوده مطالعه، تعریض و افزایش ظرفیت مقاطع اول و سوم در اولویت قرار ندارد. اما مقدار سمت چپ محدودیت دوم در حالت مرزی بوده و قیمت سایه آن برابر با ١/١ است. این بدان معناست که افزایش ظرفیت مقطع دوم به میزان ١ خودرو در ساعت منجر به افزایش جواب بهینه به میزان ١/١ خودرو در ساعت خواهد شد. به عبارت دیگر، افزایش عرض این معبر به مقدار ١٠ سانتیمتر منجر به افزایش بهره‌وری سیستم به تعداد ٦٠ خودرو در ساعت خواهد شد. همچنین با فرض ثابت بودن عرض معبرهای ١ و ٣، در صورتی که مقدار سمت راست محدودیت ٢، به میزان ١٤٤ واحد (معادل ٢٧ سانتیمتر عرض معبر) افزایش یابد، قیمت سایه آن صفر شده و مقدار جواب بهینه ١٦٠ واحد افزایش می‌یابد.

از آنجا که تقاضا در مقاطع بحرانی ١ و ٢ بیش از ظرفیت بوده و پس از اجرای مدل، این تقاضا برابر با ظرفیت مقطع می‌شود، سطح سرویس این مقاطع از F به E بهبود یافته است. به منظور تعیین سرعت مقاطع راه اصلی قبل از اعمال کنترل با استفاده از رابطه اساسی ترافیک و روابط گرین‌برگ، باید چگالی مقاطع قبل از کنترل تعیین شود. با توجه به نمودار چگالی- حجم (شکل ٦)، زمانی که تقاضا از ظرفیت یک مقطع فراتر رود (شاخه دوم منحنی)، حجم عبوری نیز کاهش می‌یابد. در صورتی که مقدار کاهش حجم عبوری برابر تفاوت تقاضا وظرفیت فرض شود، سرعت در مقاطع مختلف به صورت جداول ٩، ١٠ و ١١ خواهد بود.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]



شکل ٤: مشخصات فیزیکی محدوده مورد مطالعه[١٤]

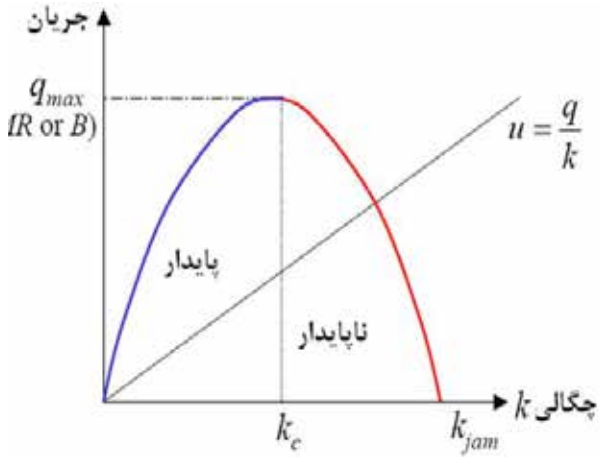
جدول۷: نتایج مدل برنامه‌ریزی خطی با حجم دوره‌ای و محدودیت طول صف برای ظرفیت پایه ۵۲۷ وسیله در ساعت در متر

ظرفیت مقاطع *RHS*	جهت	*X*٦	*X*٥	*X*٤	*X*٣	*X*٢	*X*١	متغیر	
		١	١	١	١	١	١	*Max*	
٦٩٥٦	≤	٠	٠	١	١	١	٠/٤٩١	محدودیت مقطع ١	
٧٠٠٨	≤	٠	١	٠/٩٤٠	٠/٨٩٩	٠/٨٩٩	٠/٣٤٠	محدودیت مقطع ٢	
١١٩٠٠	≤	١	٠/٩٨١	٠/٨٤٩	٠/٨٢٣	٠/٨٠٠	٠/٢٥٢	محدودیت مقطع ٣	
		٢٠١	٣٢	٩٨	١١٨	٣١٥	٢٠٦٠	ظرفیت انباره رمپ U_i	
مقدار جواب بهینه		٢٣١١	١٩٣٤	١٨٦٧	٢٧٥٥	١٨٥٠	٦٦٩٨	تقاضا D_i	بازه زمانی ١٦:٣٠ الی ١٧:٣٠
		٠	١٥٥٠	٦٩١	١٣٣٩	٠	٠	محدوده مرزی پایین	
		٢٣١١	١٩٣٤	١٨٦٧	٢٧٥٥	١٨٥٠	٦٦٩٨	محدوده مرزی بالا	
		٢٣١١	١٥٥٠	٦٩١	١٣٣٩	١٤٧٦	٦٦٩٨	نرخ کنترل X_i	
١٤٠٦٥		٠	٣٨٤	١١٧٦	١٤١٦	٣٧٤	٠	خودروهای سرویس داده نشده R_i	
مقدار جواب بهینه		٢٢٤٦	١٩٤١	١٨٧٢	٢٥٧٧	٢٠٢٠	٧٠٧١	تقاضا D_i	بازه زمانی ١٧:٣٠ الی ١٨:٣٠
		٢٢٤٦	٢٣٢٥	٣٠٤٨	٣٩٩٣	٢٣٩٤	٧٠٧١	تقاضای کل T_i	
		٠	١٩٤١	١٨٧٢	٢٥٧٧	٠	٠	محدوده مرزی پایین	
		٢٢٤٦	٢٣٢٥	٣٠٤٨	٣٩٩٣	٢٣٩٤	٧٠٧١	محدوده مرزی بالا	
		٢٢٤٦	١٩٤١	١٨٧٢	٢٥٧٧	٠	٢٩١٣	نرخ کنترل X_i	
١١٥٤٩		٠	٣٨٤	١١٧٦	١٤١٦	٢٣٩٤	٤١٥٨	خودروهای سرویس داده نشده R_i	
مقدار جواب بهینه		٢٢٩٥	١٩٥٦	١٥٠٦	٢٦٦٣	٢١٦٣	٧٤٦٤	تقاضا *Di*	بازه زمانی ١٨:٣٠ الی ١٩:٣٠
		٢٢٩٥	٢٣٤٠	٢٦٨٢	٤٠٧٩	٤٥٥٧	١١٦٢٢	تقاضای کل *Ti*	
		٠	١٩٥٦	١٥٠٦	٢٦٦٣	٧٧٧	٠	محدوده مرزی پایین	
		٢٢٩٥	٢٣٤٠	٢٦٨٢	٤٠٧٩	٤٥٥٧	١١٦٢٢	محدوده مرزی بالا	
		٢٢٩٥	١٩٥٦	١٥٠٦	٢٦٦٣	٧٧٧	١٥٩٩	نرخ کنترل X_i	
١٠٧٩٦		٠	٣٨٤	١١٧٦	١٤١٦	٣٧٨٠	١٠٠٢٣	خودروهای سرویس داده نشده R_i	

جدول۸: مقادیر سمت چپ برای بازه زمانی ١٦:٣٠ تا ١٧:٣٠

مقدار بیشینه سمت راست	قیمت سایه	*Slack*	مقدار سمت راست	مقدار سمت چپ	محدودیت
–	٠	١٦٠	٦٩٥٦	٦٧٩٥	مقطع ١
٧١٥٢	١/١	٠	٧٠٠٨	٧٠٠٨	مقطع ٢
–	٠	٣٥١٠	١١٩٠٠	٨٣٨٩	مقطع ٣

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]



شکل ٦: نمودار چگالی- حجم

جدول ۹: سرعت مقطع ۱ قبل و بعد از کنترل

تقاضای کل قبل از کنترل	$T = ۰.٤۹۱ * ٦٦۹۸ + ۱۸٥۰ + ۲۷٥٥ + ۱۸٦۷ = ۹۷٦۰ \ veh/_{hr}$
حجم عبوری با ظرفیت پایه ٥۲۷ وسیله در ساعت در متر	$F = ٦۹٥٦ - (۹۷٦۰ - ٦۹٥٦) = ٤۱٥۲ \ veh/_{hr}$
سرعت مقطع با استفاده از رابطه گرین‌برگ	$٤۱٥۲ = ۱۳.۲\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.٥۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S_{pre} = ۱۱ \ km/_{hr}$
حجم عبوری مقطع بعد از کنترل (نتایج جدول ۷)	$F = ۰.٤۹۱ * ٦٦۹۸ + ۱٤۷٦ + ۱۳۳۹ + ٦۹۱ = ٦۷۹٤ \ veh/_{hr}$
سرعت مقطع بعد از کنترل از رابطه گرین‌برگ	$٦۷۹٤ = ۱۳.۲\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.٥۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S = ۲۹ \ km/_{hr}$

جدول ۱۰: سرعت مقطع۲ قبل و بعد از کنترل

تقاضای کل قبل از کنترل	$T = ۰.۳٤ * ٦٦۹۸ + ۰.۸۹۹ * ۱۸٥۰ + ۰.۸۹۹ * ۲۷٥٥ + ۰.۹٤ * ۱۸٦۷ + ۱۹۳٤ = ۱۰۱۰٦ \ veh/_{hr}$
حجم عبوری با ظرفیت پایه ٥۲۷ وسیله در ساعت در متر	$F = ۷۰۰۸ - (۱۰۱۰٦ - ۷۰۰۸) = ۳۹۱۰ \ veh/_{hr}$
سرعت مقطع با استفاده از رابطه گرین‌برگ	$۳۹۱۰ = ۱۳.۳\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.٥۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S = ۱۰ \ km/_{hr}$
حجم عبوری مقطع بعد از کنترل (نتایج جدول ۷)	$F = ۰.۳٤ * ٦٦۹۸ + ۰.۸۹۹ * ۱٤۷٦ + ۰.۸۹۹ * ۱۳۳۹ + ۰.۹٤ * ٦۹۱ + ۱٥٥۰ = ۷۰۰۷ \ veh/_{hr}$
سرعت مقطع بعد از کنترل از رابطه گرین‌برگ	$۷۰۰۷ = ۱۳.۳\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.٥۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S = ۳٥ \ km/_{hr}$

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

جدول ۱۱: سرعت مقطع۳ قبل و بعد از کنترل

تقاضای کل قبل از کنترل	$T = ۰.۲۵۲ * ٦٦۹۸ + ۰.۸ * ۱۸۵۰ + ۰.۸۲۳ * ۲۷۵۵ + ۰.۸٤۹ * ۱۸٦۷ + ۰.۹۸۱ * ۱۹۳٤ + ۲۳۱۱ = ۱۱۲۲۸ \ veh/_{hr}$
حجم عبوری با ظرفیت پایه ۵۲۷ وسیله در ساعت در متر	با توجه به اینکه تقاضای کل کمتر از ظرفیت می‌باشد، همین مقدار به عنوان حجم عبوری فرض می‌شود
سرعت مقطع با استفاده از رابطه گرین‌برگ	$۱۱۲۲۸ = ۲۲.٦\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.۵۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S = ۵۱ \ km/_{hr}$
حجم عبوری مقطع بعد از کنترل (نتایج جدول ۷)	$F = ۰.۲۵۲ * ٦٦۹۸ + ۰.۸ * ۱٤۷٦ + ۰.۸۲۳ * ۱۳۳۹ + ۰.۸٤۹ * ٦۹۱ + ۰.۹۸۱ * ۱۵۵۰ + ۲۳۱۱ = ۸۳۸۸ \ veh/_{hr}$
سرعت مقطع بعد از کنترل از رابطه گرین‌برگ	$۸۳۸۸ = ۲۲.٦\left(۳۹.۲ * S * e^{\left(\frac{-S}{۳٦.۵۳}\right)}\right) \quad \rightarrow \quad S = ۷٦ \ km/_{hr}$

همانطور که مشاهده می‌شود، با اعمال استراتژی کنترل رمپ سرعت در مقاطع بحرانی مسیر اصلی بهبود قابل توجهی (۱۸ الی ۲٤ کیلومتر در ساعت) می‌یابد. همچنین زمان سفر به ازای هر خودرو با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه میانگین افزایش سرعت ۲۰ کیلومتر در ساعت در نظر گرفته شده است.

(۱۳)

$$T = \frac{X}{V} = \frac{۳}{۲۰} = ۰.۱۵ \ hr = ۹ \ min$$

٦- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به اهمیت کنترل رمپ به عنوان یک استراتژی مدیریت عرضه، در این تحقیق مدلی ریاضی برای این استراتژی با هدف بیشینه‌سازی خودروهای ورودی به بزرگراه با توجه به محدودیت‌های ظرفیت مقاطع در مسیر اصلی و طول صف در رمپ‌های ورودی توسعه پیدا کرد. به منظور پیاده‌سازی و اجرای مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی برای یک نمونه واقعی و پرازدحام در شهر تهران و بررسی چالش‌ها و آثار آن، بزرگراه شهید همت رویکرد شرق به غرب حد فاصل بزرگراه مدرس تا خروجی بزرگراه شهید چمران و رمپ‌های این محدوده به عنوان نمونه موردی انتخاب گردید. با توجه به پنج رمپ ورودی و چهار رمپ خروجی در محدوده مورد مطالعه به همراه مسیر اصلی و رمپ خروجی بزرگراه مدرس، یازده ایستگاه آمارگیری جهت برداشت داده (روز سه‌شنبه ۱۹ مرداد ۱۳۸۹ از ساعت ۱۷ الی ۲۰) از طریق دوربین فیلمبرداری شناسایی شدند. نتایج این تحقیق در ارتباط با مطالعه موردی به شرح زیر است:

۱. اعمال استراتژی کنترل رمپ با کاهش تقاضای ورود به مسیر اصلی باعث بهبود سطح سرویس مسیر اصلی از F به E و افزایش سرعت در مقاطع اصلی بزرگراه شهید همت به میزان ۱۸ تا ۲٤ کیلومتر در ساعت می‌گردد.

۲. در این استراتژی با وجود اینکه در رمپ‌های کنترل‌شده تأخیر به وجود می‌آید، افزایش سرعت در مسیر اصلی بزرگراه شهید همت منجر به کاهش زمان سفر در مسیر اصلی به مقدار ۹ دقیقه می‌گردد. با توجه به تقاضای نسبتاً بالای مسیر اصلی بزرگراه همت قبل از پل فجر و همچنین به دلیل وجود محدودیت فضای انباره رمپ در رمپ‌های مدرس شمال و مدرس جنوب، پیشنهاد می‌شود که کنترل رمپ‌های ورودی به این بزرگراه از بالادست پل فجر اعمال شود. همچنین به‌کارگیری متدولوژی ارائه‌شده در این پژوهش برای سایر نمونه‌های موردی و اثرسنجی کارایی آن می‌تواند به عنوان پیشنهادی برای برخی از مطالعات مرتبط در آینده مد نظر قرار گیرد.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]

مراجع

[۱] سلمانی زرنق، غلامحسین، امکان‌سنجی به‌کارگیری استراتژی کنترل رمپ در بزرگراه‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، تابستان ۱۳۸۰.

[2] H. Zhang, S.G. Ritchie and W. Recker, On the Optimal Ramp Control Problem: When does Ramp Metering Work, Transportation Research Board, Washington D.C. USA, 1995.

[3] I. Yasar, Development and Evaluation of Feedback-Based Freeway Ramp Metering Strategies, PhD Dissertation, New Jersey University, USA, 2006.

[4] Freeway Management and Operations Handbook, USA, 2005.

[5] Meng. Qiang, Khoo. Hooi ling, A Pareto-Optimization approach for a Fair Ramp Metering, TRB Part C, 2009.

[6] Chien. Steven. Optimization of Dynamic Ramp Metering with Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, Control and Intelligent Systems, 2008.

[7] M. Papageorgiou, H.S. Habib and J.M. Blosseville, ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-ramp Metering, Transportation Research Record, 1320, USA, 1990.

[8] Y. Stephanedes, Implementation of On-line Zone Control Strategies for Optimal Ramp Metering in the Minneapolis Ring Road, USA, 1994.

[9] L.N. Jacobsen, K. C. Henry and O. Mehyar, Real-Time Metering Algorithm for

[10] Centralized Control, Transportation Research Record 1232, USA, 1988.

[11] N.A. Chaudhary, Z. Tian, C. J. Messer, and C. Chu, Ramp Metering Algorithms and Approaches for Texas, FHWA/TX-05/0-4629-1, USA, 2004.

[12] C.J. Khisty and B.K. Lall, Transportation engineering: an introduction, Prentice Hall, USA, 2003.

[۱۳] ممدوحی، ا.ر. ، شیرگیر، ب. و عبادی شیویاری، ز.، بهینه‌سازی عملکرد ترافیکی بزرگ‌راه به روش مدیریت شیب‌راهه با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، شماره ۲، تهران، ایران، زمستان ۱۳۸۸.

[14] N.A. Chaudhary, T. Zongzhong, C.J. Messer, and C.L. Chu, Ramp Metering Algorithms and Approaches for Texas, FHWA/TX-05/0-4629-1, USA, 2004.

[۱۵] تعیین ظرفیت در شبکه خیابانی شهر تهران، گزارش مطالعات جامع حمل‌ونقل و ترافیک تهران، شرکت مطالعات جامع حمل ونقل و ترافیک تهران، ۱۳۸٦.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-25]