مکانیابی دوربینهای ورودی محدوده زوج و فرد با رویکرد پوشش بیشینه تخلفات

هومن آل‌نوری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، و پژوهشگر، پژوهشگاه حمل‌ونقل طراحان پارسه، تهران، ایران

سید مهدی مشکانی(مسئول مکاتبات)، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، و پژوهشگر، پژوهشگاه حمل‌ونقل طراحان پارسه، تهران ایران

محمود صفارزاده، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت‌مدرس، و رئیس پژوهشگاه حمل‌ونقل طراحان پارسه، تهران، ایران

سعید شرافتی‌پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، وپژوهشگر، پژوهشگاه حمل‌ونقل طراحان پارسه، تهران، ایران

E-mail: s.mehdi.meshkani@gmail.com

دریافت: ۹۲/۱۰/۳ پذیرش:۹۳/۰۲/۲۸

چکیده:

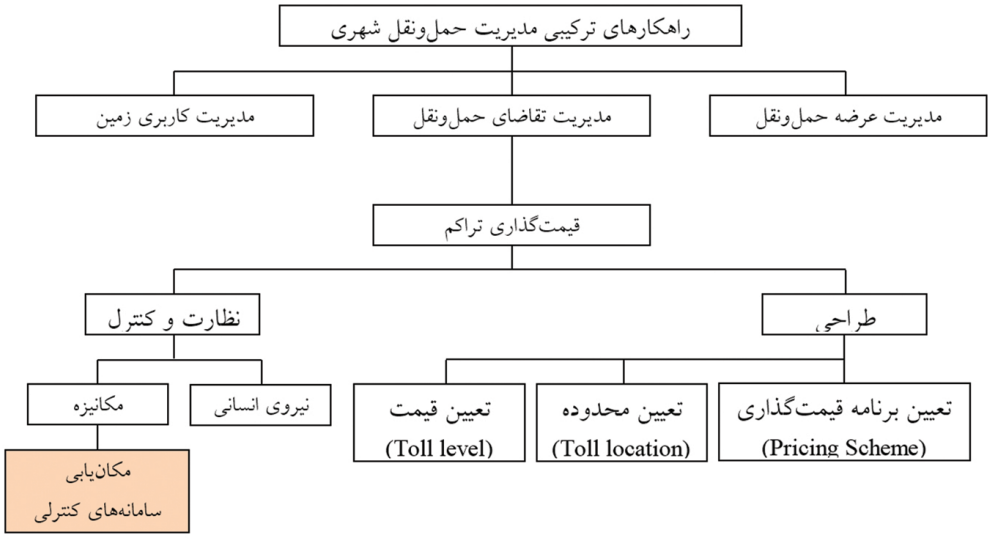
ایجاد محدودیت تردد وسایل‌نقلیه شخصی در مناطق پرتراکم شهری به عنوان یکی از راهکارهای مدیریت تقاضای ترافیک و یکی از روش‌های مرسوم کاهش آلودگی به شمار می‌رود. اگرچه اجرای طرح ممنوعیت تردد براساس شماره پلاک (طرح زوج یا فرد) در شهر تهران، در راستای اعمال مدیریت تقاضای ترافیک بوده و توسط نیروهای انسانی در محل معابر ورودی محدوده صورت می‌گیرد، اما مشکلاتی از قبیل انعطاف‌پذیری کم نیروهای انسانی و تعداد قابل توجه تخلفات به دلیل خطای انسانی، لزوم استفاده از دوربین جهت کنترل مکانیزه معابر ورودی محدوده را بیش از پیش می‌نماید. در این پژوهش، نویسندگان سعی کرده‌اند با هدف بیشینه کردن پوشش تخلفات، اقدام به مکانیابی این نوع دوربین‌ها جهت کنترل مکانیزه محدوده نمایند. مدل ارائه شده در این پژوهش از نوع صفر و یک بوده و محدودیت‌های مختلفی از جمله محدودیت بودجه، تعداد نیروی انسانی و تعداد حداقل معابر در هر رده عملکردی در نظر گرفته شده است. پس از حل این مدل با استفاده از الگوریتم شاخه و کران، از آنجا که تعداد معابر تحت پوشش کنترل مکانیزه متناسب با هزینه تخصیص داده شده است، تحلیل حساسیتی نیز بر روی هزینه و میزان پوشش تخلفات ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت هزینه‌ها نشانگر افزایش چشمگیر تخلفات پوشش داده شده تا هزینه تقریبی حدود ۶/۵۵ هزار میلیارد ریال و کاهش روند پوشش تخلفات پس از این محدوده است. این تحلیل و میزان پوشش تخلفات به ازای هزینه‌های مختلف تخصیص داده شده می‌تواند گامی‌موثر در جهت تسهیل تصمیم‌گیری مدیران به منظور تخصیص بودجه برای اجرای این طرح باشد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تقاضا، پلاک، دوربین، بودجه، الگوریتم شاخه و کران

۱. مقدمه

رشد شتابان اقتصادی و جمعیتی کلانشهرها و افزایش مالکیت خودرو در کنار محدودیت زیرساختهای حمل‌ونقل شهری و ناکارآمدی حمل‌ونقل همگانی در کلانشهرها موجب گردیده است که استفاده از خودروهای شخصی افزایش یابد. برنامه‌ریزان حمل‌ونقل با درک عوارض نامطلوب این پدیده در زندگی شهری و آثار گسترده اقتصادی- اجتماعی- زیست محیطی آن، سیاستهای گوناگونی را برای کنترل و کاهش عوارض این پدیده بکار گرفته‌اند که تحت عنوان سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل است [Shahamat, et al.2004]. یکی از مهم‌ترین راهکارهایی که در این زمینه مطرح است، استفاده از روش‌های قیمت‌گذاری تراکم در معابر شهری است. موضوعات مختلفی در زمینه قیمت‌گذاری تراکم مطرح هستند که با توجه به شکل (۱) می‌توان آنها را به دو گروه کلی طراحی و نظارت و کنترل تقسیم کرد. در بخش طراحی، مهم‌ترین سوالات مربوط به سه موضوع تعیین برنامه قیمت‌گذاری، تعیین محدوده قیمت‌گذاری و تعیین هزینه عبورومرور در محدوده است؛ در حالی که در بخش نظارت و کنترل، به ملزومات و مسائل مطرح در ضمانت‌های اجرایی طرح قیمت‌گذاری تراکم پرداخته می‌شود که مطالعات جاری نیز در این گروه قرار می‌گیرد.

شهر تهران به عنوان پایتخت و بزرگ ترین کلانشهر ایران دارای پیشینه‌ای طولانی در زمینه اعمال محدودیت‌های ترافیکی و قیمت‌گذاری تراکم است. به عنوان مثال، طرح ترافیک شهر تهران از سالها پیش با اعمال محدودیت برای ورود خودروها به مناطق مرکزی شهر آغاز شده و در سال‌های اخیر با تغییرات زیادی روبرو بوده است که غالباً در جهت توسعه، برطرف نمودن کاستی‌ها و پیشرفت طرح حرکت می‌کند. همچنین، از حدود یک دهه قبل، به دلیل افزایش تراکم و بحرانی‌شدن موضوع آلودگی هوای شهر تهران، طرح محدودیت عبورومرور خودروها براساس شماره پلاک (طرح زوج یا فرد) به موازات حلقه محدوده طرح ترافیک و در منطقه‌ای گسترده‌تر اجرا گردیده است. در راستای کنترل محدوده طرح ترافیک، سیاست‌های گوناگونی اجرایی می‌شود که موثرترین روش در جهت تأثیرگذاری بیشتر و لزوم ضمانت اجرایی، کنترل مکانیزه محدوده قیمت‌گذاری تراکم است. در همین‌راستا، با توجه به سوابق مثبت مکانیزاسیون طرح ترافیک، کنترل مکانیزه محدوده طرح زوج یا فرد شهر تهران با هدف افزایش کنترل وسایل‌نقلیه ورودی و کاهش ورود غیرمجاز به محدوده پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱. نمودار انواع راهکارهای مدیریت حمل‌ونقل شهری و قیمت‌گذاری تراکم

به‌طور کلی، مهم‌ترین معضلاتی که نیاز به تغییر شرایط کنترل محدوده طرح زوج یا فرد و حرکت از سوی کنترل بصری به سمت کنترل مکانیزه را ایجاب می‌نماید، شامل دشواری کنترل محدوده طرح توسط نیروی انسانی به سبب گستردگی محدوده، عدم انعطاف‌پذیری نیروی انسانی در زمینه اعمال استراتژی‌های قیمت‌گذاری متناسب با ساعت ورودی به محدوده و یا مسافت پیموده‌شده در محدوده و عدم رعایت عدالت اجتماعی در استفاده کاربران از معابر شهری با توجه به هزینه‌های یکسان اعمالی است.

در این پژوهش، نویسندگان با هدف پوشش حداکثری تخلفات و کاهش ورود غیرمجاز به محدوده طرح زوج یا فرد، اقدام به مکانیابی دوربین‌های مکانیزه معابر ورودی این محدوده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و روش‌های بهینه‌سازی کرده اند. از این رو در بخش دوم، پیشینه اجرای طرح محدودیت تردد وسایل‌نقلیه شخصی براساس شماره پلاک، انواع مطالعات انجام‌شده پیرامون مکانیابی دوربین‌های مکانیزه در صنعت حمل‌ونقل و الگوریتم شاخه و کران به عنوان روش حل مساله مرور گردیده است؛ در بخش سوم، روش‌شناسی این پژوهش تشریح شده و پس از تعیین ورودیها و ساختار مدل، متغیرهای تصمیم و تابع هدف و محدودیتها معرفی شده است. در بخش چهارم، پس از معرفی نمونه مطالعه موردی(طرح زوج یا فرد شهر تهران)، معابر ورودی محدوده معرفی و تابع هدف تعریف شده در بخش پیشین، با توجه به محدودیتها حل شده و جواب بهینه با توجه به هزینه تخصیص‌داده شده، تعیین گردیده و برای هزینه‌های متفاوت، تحلیل حساسیت انجام شده است. در نهایت پس از جمع‌بندی، پیشنهاداتی در زمینه مطالعات آتی ارائه شده است. از آن جا که در مطالعات مکانیابی تجهیزات ترافیکی عمدتاً به مکانیابی شمارنده‌های ترافیکی و دوربین‌های کنترل سرعت پرداخته شده است، در این مطالعه سعی گردیده به این نوع مطالعات از بعد دیگر نگریسته شود و مطالعه‌ای پیرامون مکانیابی دوربین‌های کنترل ورودی محدوده انجام گیرد.

۲. مرور ادبیات

اجرای محدودیت تردد وسایل‌نقلیه‌شخصی براساس شماره پلاک، اگرچه در ایران (تهران) سابقه‌ای هشت ساله دارد (۲۰۰۵)، اما اجرای این طرح در سایر کشورها پیشینه طولانی داشته و به عنوان مثال اجرای این طرح در کشور نیجریه (لاگوس) به ۳۶ سال پیش (۱۹۷۷)، در کشور مکزیک (مکزیکوسیتی) به ۲۴ سال پیش (۱۹۸۹)، در کشور برزیل (سائوپائولو) به ۱۸ سال پیش (۱۹۹۵)، در کشور کلمبیا (بوگوتا) به ۱۳ سال (۲۰۰۰) پیش باز می‌گردد و کشور چین (پکن)، تنها کشوری است که پس از ایران (۲۰۰۸) اقدام به اجرای این طرح نموده است.

بررسی نتایج حاصل از اجرای این طرح در شهر لاگوس نشان از اثربخشی این طرح در سالیان ابتدایی طرح دارد، به نحوی که تراکم ترافیک در ساعات اوج تردد در این شهر کاهش یافته و سرعت تردد وسایل‌نقلیه در محدوده طرح با افزایش مواجه شده است. با گذشت چندین سال از اجرای طرح، افزایش خرید خودروهای ثانویه و سایر وسایل‌نقلیه (موتورسیکلت و مینی‌بوس) موجب افزایش تراکم ترافیک در محدوده طرح شده است [Amini , Mo-jaradi, 2006]. اجرای طرح محدودیت ۲۰ درصدی وسایل‌نقلیه در شهر مکزیکوسیتی نیز در ابتدا موجب موفقیت‌های چشمگیر بوده و موجب کاهش میزان آلاینده‌ها گردیده است، اما نتایج اجرای بلندمدت طرح نشان از افزایش نرخ مالکیت وسایل‌نقلیه شخصی به موجب خرید خودروهای ثانویه با شماره پلاک متفاوت و فزونی یافتن هزینه‌های اجتماعی طرح بر منافع آن دارد [Davis, 2006; Eskeland et al. 1997]. بررسی نتایج محدودیت ۲۰ درصدی وسایل‌نقلیه در شهر سائوپائولو در اولین سال طرح، نشان از کاهش تولید ۵۳۰ تنی منوکسیدکربن و افزایش ۲۰ درصدی سرعت تردد اتوبوس‌ها در شبکه و همچنین افزایش ۲ درصدی تعداد سفرهای انجام شده با اتوبوس دارد، ولی پس از اجرای مجدد طرح در سالیان آینده و در بازه زمانی اوج تردد، سهم استفاده از وسایل‌نقلیه

عمومی‌با ۱۲ درصد کاهش و استفاده از وسایل‌نقلیه شخصی با ۳ درصد افزایش داشته است و در واقع، اجرای طرح با شکست مواجه شده است [Jacobi, 1999 ;Charles, 2013]. اجرای طرح محدودیت ۵۰ درصدی تردد وسایل‌نقلیه شخصی در پکن همزمان با برگزاری المپیک تابستانی سال ۲۰۰۸ و نظارت محدوده با استفاده از دوربین‌های نظارت تصویری در نهایت موجب کاهش ۴۵ درصدی وسایل‌نقلیه در حال تردد و ممنوعیت تردد ۳۰۰ هزار وسلیه‌نقلیه آلاینده در این شهر شد؛ نتایج مثبت اجرای طرح در زمان برگزاری مسابقات المپیک متصدیان شهری را برآن داشت که پس از المپیک طرح را با اعمال محدودیت ۲۰ درصدی ادامه دهند [Saffarzadeh et al. 2013]. اعمال محدودیت تردد ۴۰ درصدی وسایل‌نقلیه در شهر بوگوتا در دو بازه ساعت اوج تردد نیز همگام با بکارگیری سیاستهای تکمیلی (روزهای بدون خودرو، توسعه حمل‌ونقل عمومی‌و شبکه دوچرخه) موجب بهبود وضعیت تردد در این شهر و در نتیجه موجب افزایش ۵۸ درصدی سرعت تردد در شبکه، کاهش ۲۸ درصدی تصادفات، کاهش زمان سفر به میزان یک ساعت و در نهایت موجب کاهش ۱۰ درصدی آلودگی هوا گردیده است [Baltes et al. 2006; Mahendra, 2008]. در نهایت می‌توان دریافت اجرای این طرح در کشورهای مجری بجز چین، همراه با کنترل بصری توسط نیروی انسانی بوده است و مسئولین شهر مکزیکوسیتی نیز قصد دارند تا در آینده‌ای نزدیک از این دوربین‌ها برای کنترل ورود به محدوده طرح استفاده کنند. مطالعات آل‌نوری و همکاران (۱۳۹۰) نشان می‌دهد با توجه به وقوع بیش از ۵۲٪ تخلفات ورود به محدوده طرح زوج یا فرد شهر تهران از طریق معابر بزرگراهی و عدم اعمال نقش بازدارندگی مناسب برای جریمه‌های در نظر گرفته شده، کنترل مکانیزه محدوده امری گریز ناپذیر خواهد بود [Alenoori et al. 2012].

مطالعات صفارزاده و همکاران نیز بیانگر این موضوع است که در صورت اجرای کنترل مکانیزه محدوده، منافع حاصل از طرح به نسبت هزینه‌های انجام شده در حدود ۳۵ برابر است که بیانگر توجیه اقتصادی طرح همگام با توجیه فنی آن در بازه عمر مفید تجهیزات است [Saffarzadeh et al. 2013].

علاوه بر بررسی سابقه اجرای محدودیت تردد وسایل‌نقلیه براساس شماره پلاک وسایل‌نقلیه، لازم است تا مروری نیز بر مطالعات انجام‌شده در زمینه مکانیابی دوربین‌های کنترل مکانیزه در صنعت حمل‌ونقل داشته باشیم. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد تاکنون مطالعاتی در زمینه مکانیابی این نوع دوربین‌ها جهت کنترل محدوده انجام نشده است و از این رو در این بخش سایر مطالعات مشابه مدنظر قرار گرفته است. مطالعات فاضلی‌فر و همکاران (۱۳۹۰) که پیرامون مکانیابی نصب دوربین‌های کنترل سرعت در راه‌های برونشهری به منظور کاهش تصادفات انجام شده است، منجر به شناسایی نقاط پرمخاطره با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و تخصیص دو نوع دوربین ثابت و یا متحرک به این محدوده گردیده است [Fazelifar, et al. 2013]. فدایی نایینی و همکاران (۱۳۹۱) نیز در مطالعات خود به بررسی مکانیابی شمارنده‌های ترافیکی به منظور بیشینه‌سازی پوشش مسیرها پرداخته‌اند که در این مطالعه نیز دو مدل بهینه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است؛ در مدل ابتدایی، با اضافه نمودن محدودیت بودجه بحث بیشینه‌سازی پوشش مسیرها بررسی شده و در مدل دوم، بیشینه‌سازی تعداد مسیرها و کمینه‌سازی تعداد دوربین‌ها مدنظر قرار گرفته است[Fadaei et al. 2013]. سالاری و همکاران (۲۰۱۰) نیز در پژوهشی به تخصیص بهینه شناساگرهای نقطه‌ای مانند شناساگرهای حلقوی جهت کمینه‌سازی خطای اندازه‌گیری عملکرد این شناساگرها پرداخته و برای بهینه‌سازی مکان این شناساگرها در طول محورهای آزادراهی از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و برای حل آن از تکنیک شاخه و کران بهره گرفته‌اند. آزمایش‌های عددی در طول محورهای آزادراهی نشان می‌دهد که این مدل مکانیابی برای تخصیص شناساگرهای حلقوی جهت افزایش دقت تخمین سفر با موفقیت همراه بوده است [Salari

.[et al. 2010

سان و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی اقدام به مکانیابی شمارنده‌های ترافیکی با استفاده از مدل بهینه سازی کلونی مورچگان کرده‌اند. در این مقاله، مدل بهینه‌سازی با دو تابع هدف ارائه شده که در سطح اول به بیشینه کردن پوشش تعداد جفت مبدا- مقصدها پرداخته و در سطح دوم، تعداد ایستگاه‌های شمارش ترافیک را کمینه می‌کند [Sun et al. 2010]. همچنین کیم و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی به مکانیابی شمارنده‌های ترافیک برای تخمین ماتریس سفر مبدا- مقصد پرداخته‌اند که در مطالعات ایشان، مدل بهینه‌سازی به منظور انتخاب مسیرهای بهینه جهت برآورد ماتریس مبدا-مقصد به صورت کمان مبنا و مسیرمبنا مورد بررسی قرار گرفته است و برای حل این مدل نیز از سه الگوریتم متفاوت GA، GAS و BB استفاده شده است [Kim, et al. 2003]. یانگ و همکاران (۲۰۰۳) نیز در پژوهشی به بررسی موضوع مکانیابی بهینه شمارشگر ترافیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند که در این پژوهش مساله مکانیابی به صورت دینامیکی فرموله شده و موضوع زمان و مکان بهینه نصب شمارشگرهای ترافیک با هدف بیشینه‌سازی پوشش زوج مبداء- مقصدها مورد توجه قرار گرفته است که البته در این بین محدودیت بودجه نیز وجود دارد[Yang, et al. 2003]. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد با توجه به توجیه فنی و اقتصادی طرح بنابر مطالعات انجام شده، لزوم مکانیزاسیون کنترل ورود به محدوده امری اجتناب‌ناپذیر است، از این رو براساس پیشینه مطالعات و متدولوژی مورداستفاده در تحقیق در عملیات سعی شده است تا این طرح با استفاده از متغیرهای تأثیرگذار و در دسترس با برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل شود و با استفاده از روش شاخه و کران مدل تعریف‌شده، حل گردد. از آنجا که با توجه به تحقیقات انجام شده درباره مبحث مکانیابی به طور مشخص، تحقیقاتی در زمینه دوربین‌های کنترلی صورت نپذیرفته است، از این رو این بخش از مطالعه نیز می‌تواند به عنوان نوآوری پژوهش مدنظر قرار گیرد.

با توجه به آن که در این پژوهش، مدل با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله شده و با استفاده از الگوریتم شاخه و کران[1] حل گردیده است، ارائه توضیح مختصری پیرامون روش حل مسئله امری ضروری خواهد بود. الگوریتم شاخه و کران، در سال ۱۹۶۰ توسط دوئینگ و لند معرفی شده است و در سال ۱۹۶۵ برای اولین بار، این رویه محاسباتی توسط داکین بکار گرفته شد. هر مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، در واقع یک مسئله برنامه‌ریزی خطی است که محدودیت‌های عدد صحیح بودن متغیرهای تصمیم به آن اضافه می‌شود. بنابراین منطقه موجه برنامه‌ریزی عدد صحیح جزئی از منطقه موجه مسئله است. به این ترتیب رابطه زیر در مسائل با تابع هدف Max برقرار است:

$$Z^*_{ILP} \leq Z^*_{LP}$$

به طور کلی الگوریتم «شاخه و کران» یک رویه جستجو است که منطقه موجه برنامه‌ریزی خطی را برای اعداد صحیح به طور پی در پی به مناطق کوچک‌تر تقسیم و امکان وجود جواب‌های عدد صحیح را در آن مناطق بررسی می‌کند.

به این ترتیب، هر مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح با این روش، به طور سیستماتیک از حل متوالی تعدادی از مسائل فرعی حل می‌شود. در روش شاخه و کران، با انجام هر انشعاب دو مسئله جدید تعریف شده که نسبت به مسئله قبل دارای یک محدودیت اضافی است. در صورتی که مسئله دومتغیره باشد، به دست آوردن جواب بهینه مسائل با حل ترسیمی‌انجام می‌گیرد، اما روش ترسیمی، توانایی حل مسائل فرعی با بیش از دو متغیر را نداشته و برای حل این گونه مسائل باید از روش سیمپلکس، روش تحلیل حساسیت و یا استفاده از شیوه تغییر متغیر بهره جست [Mehregan,2009].

۳. روش‌شناسی

در این بخش، ساختار مدل بهینه‌سازی جهت پوشش حداکثری تخلفات در معابر ورودی محدوده طرح زوج یا فرد معرفی می‌شود.

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، هدف کلی مدل بهینه‌سازی ارئه شده، تعیین مکان دوربینها به نحوی است که حداکثر پوشش تخلفات حاصل شود. در ادامه ابتدا ورودیهای مساله بهینه‌سازی ارائه شده، سپس ساختار مدل تشریح شده و در بخش بعدی، مدل تعریف شده با استفاده از روش شاخه و کران که پیش از این شرح داده شد، حل گردیده است.

۳-۱ ورودیهای مدل

ورودیهای مساله بهینه‌سازی عبارتند از تعداد تخلف در هریک از معابر ورودی محدوده زوج و فرد (T_i^2)، تعداد خطوط هریک از معابر ورودی محدوده زوج و فرد (این متغیر خود مبین دو متغیر تعداد دوربین مورد نیاز برای هریک از معابر ورودی محدوده (n_i) و تعداد نیروی انسانی موردنیاز برای هریک از این معابر ($\acute{n}_i$) است)، نرخ کاهش تخلفات با استفاده از نیروی انسانی(β)، نرخ کاهش تخلفات با استفاده از کنترل مکانیزه (α)، نرخ تورم سالیانه بر حسب درصد (I)، هزینه خریداری و نصب تجهیزات کنترل مکانیزه بر حسب ریال (C_1)، هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری تجهیزات کنترل مکانیزه بر حسب ریال (C_2)، هزینه سالیانه نیروی انسانی بر حسب ریال (C_3)، طول عمر تجهیزات کنترل مکانیزه (m)، حجم ورودی به محدوده از طریق معابر شریانی درجه ۱ (بزرگراهی) (E_f)، حجم ورودی به محدوده از طریق معابر شریانی درجه ۲ (E_α)، حجم ورودی به محدوده از طریق معابر جمع‌کننده، پخش‌کننده و محلی (E_l)، سرعت طرح تردد میانگین در معابر شریانی درجه ۱ (بزرگراهی) (E_f)، سرعت طرح تردد میانگین در معابر شریانی درجه ۲ (V_α) و سرعت طرح تردد میانگین در معابر جمع‌کننده پخش‌کننده و محلی (V_l) است.

در این بین با توجه به مجهول بودن میزان بودجه تخصیص‌یافته (B-ریال)، مدل این پژوهش با استفاده از بودجه‌های متفاوت اجرا شده و یک تحلیل حساسیت در مورد نتایج و با استفاده از هزینه صورت گرفته است.

۳-۲ ساختار مدل

با توجه به اینکه هدف مساله، مکانیابی دوربینهای معابر ورودی محدوده زوج و فرد است و از آنجا که در یک معبر مشخص تنها دو حالت نصب دوربین و عدم نصب دوربین وجود دارد، بنابراین مدل بهینه‌سازی ساخته شده از نوع صفر و یک عدد صحیح[۳] است. در ادامه اجزای مختلف مدل بهینه‌سازی شامل متغیر تصمیم، تابع هدف و محدودیتها تشریح خواهد شد.

۳-۲-۱ متغیر تصمیم

متغیر تصمیم مدل بهینه‌سازی ساخته شده از نوع صفر و یک است که عدد یک برای این متغیر نشان‌دهنده نصب دوربین در معبر و عدد صفر بیانگر عدم نصب دوربین (کنترل بصری توسط نیروی انسانی) است.

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر دوربین در معبر i نصب شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

۳-۲-۲ تابع هدف

همان‌طور که اشاره شد تابع هدف مساله، ایجاد پوشش حداکثری تخلفات و انجام روند مکانیابی به نحوی است که معابر با بیشترین میزان تخلفات مکانیزه گردد. لازم به ذکر است که در صورت عدم قرارگیری دوربین در یک معبر، آن معبر توسط نیروی انسانی کنترل خواهد شد. تابع هدف ساخته شده (رابطه ۱) شامل دو بخش است که بخش اول مربوط به پوشش تخلفات توسط دوربینهای مکانیزه و بخش دوم مربوط به پوشش تخلفات توسط نیروی انسانی است.

(۱)

$$\boldsymbol{Max\ Z} = \left(\sum_{i=1}^{79} \boldsymbol{y_i} \times \boldsymbol{T_i} \times \boldsymbol{\alpha} + \sum_{i=1}^{79} (\boldsymbol{1} - \boldsymbol{y_i}) \times \boldsymbol{T_i} \times \boldsymbol{\beta}\right)$$

۳-۲-۳ محدودیتها

در این مساله سه نوع محدودیت وجود دارد که محدودیت نوع اول مربوط به حداکثر هزینه تخصیص داده شده جهت اجرای مکانیزاسیون، محدودیت نوع دوم تعیین کننده حداقل تعداد مکانیزاسیون در معبر با رده عملکردی خاص و محدودیت نوع سوم

تعیین‌کننده حداکثر تعداد نیروی انسانی مورداستفاده برای کنترل بصری است.

۳-۲-۳-۱ محدودیت نوع اول

آشکار است که متصدیان شهری برای اجرای هر نوع پروژه در سطح شهر همواره با محدودیت بودجه مواجه اند. در این پژوهش محدودیت بودجه به عنوان اصلی‌ترین دغدغه مدیران شهری در محدودیتها گنجانده شده است. بنابراین هزینه‌های مرتبط با تهیه، نصب و نگهداری تجهیزات مکانیزاسیون و همچنین هزینه‌های مرتبط با نیروی انسانی در بازه زمانی مورد نظر به عنوان محدودیت اول (رابطه ۲) در نظر گرفته شده است. هزینه‌های مذکور همواره باید مقادیر کمتری نسبت به بودجه تخصیص داده شده، داشته باشند.

(۲)

$$\sum_{i=1}^{79} \boldsymbol{n_i y_i} \times \left(\boldsymbol{C_1 + C_2 \times \frac{(1+I)^{m-1}}{I}} \right) + \sum_{i=1}^{79} \boldsymbol{2\acute{n}_i (1 - y_i)} \times \boldsymbol{C_3} \times \boldsymbol{\frac{(1+I)^{m-1}}{I}} \leq \boldsymbol{B}$$

همان‌طورکه در رابطه ۲ مشاهده می‌شود، هزینه‌های مربوطه شامل دو بخش است که در بخش اول هزینه‌های خرید و نصب تجهیزات (C_1) و نگهداری تجهیزات در طول بازه مورد نظر ($C_2 \times \frac{(1+I)^{m-1}}{I}$) در نظر گرفته شده و در بخش دوم هزینه‌های مرتبط با نیروی انسانی در طول همین بازه ($C_3 \times \frac{(1+I)^{m-1}}{I}$) منظور شده است. لازم به ذکر است هزینه‌های نیروی انسانی تنها مربوط به دستمزد آنهاست و هزینه‌های غیرمستقیمی‌را که براثر آلودگی هوا و آلودگی صوتی برای سلامت ایشان هزینه می‌گردد، شامل نمی‌شود. ضریب ۲ در بخش دوم این محدودیت، بیانگر لزوم تغییر شیفت این نیروها برای کنترل محدوده (ساعت ۶:۳۰ الی ۱۹:۰۰) و مبین تعداد نوبت کاری است.

۳-۲-۳-۲ محدودیت نوع دوم

به منظور توزیع تجهیزات مکانیزاسیون در مرز ورودی محدوده و پوشش تمامی‌معابر با رده‌های عملکردی متفاوت و جلوگیری از تمرکز نصب تجهیزات بر روی معابر با رده عملکردی خاص، در این محدودیت حداقل تعداد دوربین برای هر رده عملکردی تعیین گردید.

اعمال این محدودیت بر تابع هدف سبب وزن‌دهی به معابر تحت مطالعه براساس حجم تردد و سطح عملکردی معابر می‌شود؛ به بیان دیگر، معابر گوناگون از لحاظ عملکرد، حجم عبوری و میزان تخلف رخ داده، وزن‌دهی می‌شوند که در صورت عدم اعمال این محدودیت تنها براساس تعداد تخلفات و تعداد خط دوربین‌ها نصب می‌شدند. از این رو، نسبتی برای توزیع تجهیزات کنترل مکانیزه در معابر با توجه به حجم تجمعی ورودی هر رده عملکردی خاص (E) و همچنین سرعت طرح تردد میانگین این نوع معابر(V) تعیین شده است که این نسبت برای رده‌های عملکردی بزرگراهی (F) (۱۵ عدد)، شریانی درجه ۲ (α) (۲۱ عدد)، جمع‌کننده و پخش‌کننده (l) (۴۳ عدد) در رابطه‌های ۳ تا ۵ نمایش داده است.

$$\sum_{i=1}^{15} y_i \geq 15 \left[\frac{V_f E_f}{V_f E_f + V_a E_a + V_l E_l} \right] \quad (۳)$$

$$\sum_{i=16}^{35} y_i \geq 21 \left[\frac{V_a E_a}{V_f E_f + V_a E_a + V_l E_l} \right] \quad (۴)$$

$$\sum_{i=36}^{79} y_i \geq 43 \left[\frac{V_l E_l}{V_f E_f + V_a E_a + V_l E_l} \right] \quad (۵)$$

۳-۲-۳-۳ محدودیت نوع سوم

به علت هزینه‌های سنگین ثانویه که کنترل بصری محدوده ورودی طرح به سلامت و آینده نیروهای راهنمایی و رانندگی تحمیل می‌کند، سعی شده تا محدودیتی نیز در زمینه استفاده از حداکثر تعداد نیروی انسانی مورداستفاده اعمال شود که مانند رابطه (۶) است.

$$\sum_{i=1}^{79} n' \leq 50 \quad (۶)$$

۴. مطالعه موردی (محدوده طرح زوج یا فرد شهر تهران)

شهر تهران به عنوان پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر کشور، دارای

پیشینه طولانی در زمینه اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا و ایجاد محدودیت تردد برای وسایل‌نقلیه شخصی است، به طوری که اولین سیاستهای مدیریت تقاضا از سال ۱۳۵۸ اجرایی شده است. از این سال به بعد، سایر الگوهای محدودیت تردد نیز به اجرا درآمده است که از جمله این الگوها می‌توان به ایجاد مسیر ویژه تردد اتوبوس، ممنوعیت تردد وسایل‌نقلیه تک‌سرنشین، ممنوعیت تردد وسایل‌نقلیه شخصی غیرمجاز در محدوده مرکزی شهر (طرح ترافیک) و ممنوعیت تردد وسایل‌نقلیه سنگین در بازه‌های زمانی معین از شبانه‌روز اشاره کرد.

تمامی‌این اقدامات به منظور کاهش تقاضای تردد وسایل‌نقلیه شخصی در محدوده مرکزی شهر و کنترل آلودگی هوا و سهولت تردد اعمال شده است. از این رو با توجه به عدم پاسخگویی سایر طرحها و همچنین وقوع پدیده وارونگی دما، از آذر ماه سال ۱۳۸۴، معاونت حمل‌ونقل‌وترافیک شهر تهران با کمک نیروهای راهنمایی و رانندگی اقدام به اجرای طرح ممنوعیت تردد وسایل‌نقلیه شخصی بر اساس شماره پلاک وسایل‌نقلیه (طرح زوج یا فرد) کرد. در این طرح، خودروها براساس آخرین شماره سمت راست پلاک خود شایستگی ورود به محدوده را پیدا می‌کردند، به‌نحوی که خودروهایی که عدد سمت راست پلاک آنها زوج بود در روزهای شنبه، دوشنبه و چهارشنبه و خودروهایی که عدد سمت راست پلاک آنها فرد بود در روزهای یکشنبه، سه‌شنبه و پنج‌شنبه می‌توانستند به محدوده طرح زوج یا فرد وارد شوند. این طرح در ابتدا محدوده‌ای به مساحت ۷۴ کیلومترمربع در سطح شهر تهران را پوشش می‌داد که شامل محدوده‌ای بود که از شمال به بزرگراه رسالت- حکیم، از غرب به بزرگراه چمران- نواب، از جنوب به بزرگراه بعثت و از شرق به بزرگراه بسیج، خیابان ۳۰ متری نیروی هوایی، خیابان امامت و خیابان آیت محدود می‌گردید و دارای ۱۲۱ نقطه ورودی بود که توسط کنترل بصری مامورین نیروی انتظامی‌کنترل می‌شد. این طرح پس از اجرای آزمایشی در زمستان سال ۱۳۸۴، از ابتدای اسفندماه سال ۱۳۸۴ تا پانزدهم فروردین ماه سال ۱۳۸۵ به حالت تعلیق درآمد و پس از تعطیلات نوروزی سال ۱۳۸۵، اجرای آن مجدداً از سر گرفته شد [Alenoori et al. 2012] . با توجه به رشد فزاینده استفاده از وسایل‌نقلیه شخصی و در نتیجه، افزایش آلاینده‌های وسایل‌نقلیه، شهر تهران در نیمه دوم سال ۱۳۸۹، دوباره شاهد افزایش شدت آلاینده‌های شهری به سطح هشدار بود که در نتیجه این افزایش، افراد بسیاری جان خود را از دست داده و یا به بیمارهای ناشی از آلودگی‌های هوا مبتلا شدند. از این رو، با توجه به شرایط بحرانی بوقوع پیوسته، از سی‌ام آذرماه سال ۱۳۸۹، طرح تردد زوج یا فرد به مدت دو هفته در کل شهر تهران اجرایی شده و در نهایت محدوده این طرح از ابتدای اسفندماه به ۱۲۰ کیلومترمربع افزایش یافت.

محدوده جدید دارای ۹۷ نقطه ورودی بوده و محدوده شمالی آن به بزرگراه همت- زین‌الدین و محدوده شرقی آن به بزرگراه باقری- بسیج محدود می‌شود. لازم به ذکر است، کنترل ورود و خروج کماکان برعهده نیروی انسانی است[Alenoori et al. 2013]. با توجه به آن که در اجرای طرح کنونی، استفاده از نیروی انسانی موجب کاهش استفاده از وسایل‌نقلیه شخصی غیرمجاز به نحو مطلوب نشده است و معابر بزرگراهی نیز که بیشترین حجم تردد در شهر از طریق این نوع معابر انجام می‌گیرد، با استفاده از روش کنترل بصری بخوبی پوشش داده نمی‌شود، در نتیجه در این پژوهش پیشنهاد گردیده است تا به منظور کنترل مبادی ورودی محدوده طرح زوج یا فرد، ترکیبی از تجهیزات مکانیزاسیون و مامورین نیروهای انسانی با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های تعریف‌شده در مکان مناسب خود جانمایی شوند. اطلاعات نوع و تعداد خطوط عملکردی مبادی ورودی محدوده طرح زوج یا فرد در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است تعداد خطوط ذکر شده در این جدول، تعداد خطوط عملکردی یک معبر و یا باریک‌ترین مقطع معبر است که با کنترل این نقطه قادر به کنترل احجام ورودی به معبر خواهیم بود.

جدول ۱. اطلاعات مبادی ورودی محدوده طرح زوج یا فرد

ردیف	نام معبر	رده عملکردی	خط	ردیف	نام معبر	رده عملکردی	خط
۱	بزرگراه کردستان	شریانی درجه ۱	۳	۳۶	خیابان هنگام	شریانی درجه ۲	۲
۲	بزرگراه آفریقا	شریانی درجه ۱	۳	۳۷	خیابان جلفا	جمع و پخش‌کننده	۴
۳	بزرگراه مدرس	شریانی درجه ۱	۳	۳۸	خیابان شهید عراقی	جمع و پخش‌کننده	۲
۴	بزرگراه حقانی	شریانی درجه ۱	۳	۳۹	خیابان افشاری	جمع و پخش‌کننده	۱
۵	بزرگراه صیاد شیرازی	شریانی درجه ۱	۳	۴۰	خیابان گلزار	جمع و پخش‌کننده	۱
۶	بزرگراه امام علی(ع)	شریانی درجه ۱	۴	۴۱	خیابان والائیان	جمع و پخش‌کننده	۲
۷	خروجی وفادار	شریانی درجه ۱	۲	۴۲	سی‌متری اردیبهشت	جمع و پخش‌کننده	۲
۸	بزرگراه خاوران	شریانی درجه ۱	۴	۴۳	خیابان صابونیان	جمع و پخش‌کننده	۲
۹	خیابان شهید بروجردی	شریانی درجه ۱	۷	۴۴	خیابان بخارایی	جمع و پخش‌کننده	۲
۱۰	بزرگراه رسالت	شریانی درجه ۱	۴	۴۵	خیابان ۱۹۶ غربی	جمع و پخش‌کننده	۳
۱۱	خیابان دماوند	شریانی درجه ۱	۴	۴۶	خیابان دردشت	جمع و پخش‌کننده	۲
۱۲	بزرگراه محلاتی	شریانی درجه ۱	۳	۴۷	خیابان شهیدثانی	جمع و پخش‌کننده	۲
۱۳	بزرگراه‌آهنگ	شریانی درجه ۱	۴	۴۸	خیابان سعدی	جمع و پخش‌کننده	۲
۱۴	بزرگراه جلال آل احمد	شریانی درجه ۱	۳	۴۹	خیابان ائمه‌اطهار	جمع و پخش‌کننده	۳
۱۵	بزرگراه حکیم	شریانی درجه ۱	۳	۵۰	خیابان زمزم	جمع و پخش‌کننده	۳
۱۶	خیابان شیخ بهایی	شریانی درجه ۲	۲	۵۱	۳۵ متری ولیعصر	جمع و پخش‌کننده	۳
۱۷	خیابان شیرازی	شریانی درجه ۲	۲	۵۲	میدان حق‌شناس	جمع و پخش‌کننده	۲
۱۸	خیابان توانیر	شریانی درجه ۲	۲	۵۳	خیابان اسکندری	جمع و پخش‌کننده	۱
۱۹	خیابان گاندی	شریانی درجه ۲	۲	۵۴	خیابان محبوب مجاز	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۰	استاد حسن بنا	شریانی درجه ۲	۲	۵۵	خیابان شکوفه	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۱	خیابان هنگام	شریانی درجه ۲	۲	۵۶	خیابان دامپزشکی	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۲	خیابان سراج	شریانی درجه ۲	۲	۵۷	خیابان آذربایجان	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۳	خیابان ۱۷ شهریور	شریانی درجه ۲	۲	۵۸	خیابان چنگیزی	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۴	خیابان شهید رجائی	شریانی درجه ۲	۳	۵۹	خیابان ارومیه	جمع و پخش‌کننده	۳
۲۵	خیابان دشت آزادگان	شریانی درجه ۲	۳	۶۰	خیابان فرصت شیرازی	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۶	خیابان فرجام	شریانی درجه ۲	۲	۶۱	خیابان گلبار	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۷	خیابان جانبازان	شریانی درجه ۲	۳	۶۲	خیابان باقرخان	جمع و پخش‌کننده	۲
۲۸	سی‌متری نیروهوایی	شریانی درجه ۲	۲	۶۳	خیابان شهید کاشی	محلی	۲
۲۹	خیابان پیروزی	شریانی درجه ۲	۴	۶۴	خیابان هاشم‌آباد	محلی	۲
۳۰	خیابان هلال‌احمر	شریانی درجه ۲	۲	۶۵	خیابان عباسی	محلی	۲
۳۱	خیابان کمیل	شریانی درجه ۲	۲	۶۶	خیابان ذوالفقاری	محلی	۲
۳۲	خیابان امام‌خمینی	شریانی درجه ۲	۲	۶۷	بوستان ماهونیا	محلی	۱
۳۳	خیابان جمهوری اسلامی	شریانی درجه ۲	۳	۶۸	خیابان مرسلی	محلی	۳
۳۴	خیابان آزادی	شریانی درجه ۲	۳	۶۹	خیابان دارابی	محلی	۳
۳۵	خیابان دکترفاطمی	شریانی درجه ۲	۳	۷۰	خیابان شهید اسم زمانی	محلی	۲

ادامه جدول ۱- اطلاعات مبادی ورودی محدوده طرح زوج یا فرد[۴]

ردیف	نام معبر	رده عملکردی	خط	ردیف	نام معبر	رده عملکردی	خط
۷۱	خیابان سفیدکوه	محلی	۲	۷۶	شهید معصومی	محلی	۲
۷۲	خیابان مهربار	محلی	۲	۷۷	کوچه قطب	محلی	۱
۷۳	خیابان گلستان	محلی	۲	۷۸	خیابان جوانمرد	محلی	۱
۷۴	خیابان دهم فروردین	محلی	۲	۷۹	کوچه گلچین	محلی	۲
۷۵	برادران اکبری	محلی	۲				

جدول۲. اطلاعات احجام ورودی و میزان تخلفات به تفکیک رده عملکردی معابر [Parseh Transportation Research Institute, 2012]

ردیف	نوع معبر	تعداد معابر	حجم وسایل‌نقلیه	حجم تخلفات
۱	شریانی درجه ۱(بزرگراهی)	۱۵	۵۴۳۰۵۱	۱۵۶۵۷۳
۲	شریانی درجه ۲	۲۰	۲۱۶۲۴۶	۵۸۶۶۹
۳	جمع‌کننده پخش‌کننده و محلی	۴۴	۲۴۴۹۹۴	۶۳۱۰۸

جدول۳. اطلاعات سرعت طرح معابر به تفکیک رده عملکردی[Standard of classification of urban roads, 2012]

ردیف	نوع معبر	محدوده سرعت طرح (کیلومتر بر ساعت)	مقادیر پیشنهادی (کیلومتر بر ساعت)
۱	شریانی درجه ۱ (بزرگراهی)	۸۰ تا ۱۰۰	۹۰
۲	شریانی درجه ۲	۵۰ تا ۷۰	۶۰
۳	جمع‌کننده پخش‌کننده	۴۰ تا ۷۰	۴۵
	محلی	۳۰ و کمتر	

۴-۱ جمع‌آوری اطلاعات

به منظور حل مدل تعریف‌شده برای مساله مکانیابی و انجام مطالعه موردی شهر تهران نیاز به در اختیارداشتن مجموعه‌ای از اطلاعات است که این اطلاعات را می‌توان به دو دسته کلی اطلاعات ترافیکی و اطلاعات هزینه‌ای تقسیم‌بندی کرد.

۴-۱-۱ اطلاعات ترافیکی

به منظور تعیین حجم ورودی و حجم تخلفات در هریک از مبادی که در بخش تابع هدف و محدودیت نوع اول به آنها اشاره شد، نیازمند جمع‌آوری اطلاعات دقیق خواهیم بود. از این رو به منظور جمع‌آوری اطلاعات مربوط به حجم تردد در معابر ورودی محدوده طرح زوج یا فرد، آمار و اطلاعات این ورودیها در دو روز متوالی میان هفته (دوشنبه و سه‌شنبه) و در مدت اجرای طرح با استفاده از آماربرداری دستی در معابر محلی، جمع‌کننده و پخش‌کننده و شریانی برداشته شده است؛ لازم به ذکر است که با توجه به حجم زیاد معابر بزرگراهی و عدم دقت کافی در آماربرداری دستی این نوع معابر، اطلاعات حاصل در این معابر با استفاده از ضبط فیلم و شمارش نیروی انسانی در دفتر حاصل شده است. حجم تجمعی معابر به تفکیک رده عملکردی معابر در جدول ۲ نمایش داده شده است. همان طور که در محدودیت نوع دوم مشاهده شد به منظور توزیع مناسب دوربین‌ها، علاوه بر در اختیار داشتن حجم ورودیها، نیازمند مقادیر سرعت طرح این معابر نیز هستیم که این اطلاعات به تفکیک رده عملکردی معابر در جدول ۳ نمایش داده شده است. جهت تعیین اثربخشی استفاده از تجهیزات مکانیزاسیون در مبادی ورودی محدوده طرح زوج یا فرد لازم است تا نرخ کاهش تخلفات

این تجهیزات و همچنین نرخ کاهش تخلفات ناشی از کنترل بصری تعیین شود. جهت تعیین نرخ کاهش تخلفات با استفاده از تجهیزات مکانیزه، اطلاعات پیش‌بینی حجم قبل و بعد از مکانیزاسیون محدوده طرح زوج یا فرد در جدول ۴ نمایش داده شده است. این جدول، با اشاعه الگوی مکانیزاسیون محدوده طرح ترافیک به محدوده طرح زوج یا فرد بدست آمده است و با استفاده از این جدول، نرخ کاهش تخلفات بر اثر اجرای طرح مکانیزاسیون قابل تعیین خواهد بود. پس از وارد کردن اطلاعات و انجام محاسبات مربوطه نرخ کاهش تخلفات براساس کنترل مکانیزه برابر با ۴۰/۵۶ درصد به دست می‌آید. لازم به ذکر است اطلاعات مربوط جهت تعیین نرخ کاهش تخلفات نیز با استفاده از کنترل بصری براساس نتایج آماربرداری و در صورت حضور مستمر نیروی انسانی برآورد گردیده است که این میزان برابر با ۲۳/۴ درصد است.

۴-۱-۲ اطلاعات هزینه

پس از تعیین اطلاعات ترافیکی، جهت تعیین تعداد دوربین‌ها لازم است تا اطلاعاتی پیرامون هزینه خرید، نصب و نگهداری تجهیزات و همچنین هزینه نیروی انسانی جمع‌آوری گردد. از این رو با توجه به اخذ نظرات کارشناسان شرکت کنترل ترافیک شهر تهران مبنی بر قابلیت پوشش دو خط توسط هریک از دوربین‌ها و با فرض پوشش هریک از خطوط ورودی توسط یک مامور راهنمایی رانندگی، تعداد دوربین‌ها و یا افراد موردنیاز برای کنترل محدوده ورودی طرح با توجه به تابع هدف و هزینه تخصیص داده شده تعیین خواهد شد. از این رو در جدول شماره ۵، اطلاعات مرتبط با هزینه خرید، نصب و نگهداری دوربین‌های ورودی بر مبنای اطلاعات سال ۱۳۹۱ ارائه شده است. با توجه به آن که اطلاعات مربوط به تجهیزات در جدول ۴ مرتبط با هزینه‌های سال ۱۳۹۱ است، از این رو پس از تعیین نرخ تورم ۱۲ ماهه شاخص کالاهای غیرخوراکی و خدماتی(منتهی به شهریور ماه) از مرکز آمار ایران که برابر با ۲۹/۴درصد است، اطلاعات هزینه‌ای این بخش به روز شده است و از آن‌جا که هزینه سالیانه نیروی انسانی در سال ۱۳۹۱ معادل با هزینه حداقل حقوق این سال برآورد شده بود، این اطلاعات نیز به روز گردیده و به حداقل حقوق سال ۱۳۹۲ تبدیل شده است. اطلاعات مرتبط با هزینه‌های سال ۱۳۹۲ در جدول ۶ نمایش داده شده است. در نهایت، لازم به ذکر است با توجه به اخذ نظرات کارشناسان شرکت کنترل ترافیک شهر تهران مبنی بر عمر مفید ۱۰ ساله این تجهیزات، محاسبات در این پروژه نیز برای بازه ۱۰ ساله انجام گرفته است.

جدول ۴. پیش‌بینی آمار حجم مطالعات قبل و بعد مکانیزاسیون گستره زوج و فرد به تفکیک جبهه [Tarrahan Parseh Transportation Research Institute, 2012]

جبهه	قبل از مکانیزاسیون			بعد از مکانیزاسیون		
	حجم کل ترافیک	تعداد کل تخلفات	درصد تخلف	حجم کل ترافیک	تعداد کل تخلفات	درصد تخلف
شمال	۳۹۰۷۵۶	۱۱۷۰۶۸	٪۳۰	۱۷۱۹۳۲	۲۱۱۱۹	٪۱۲
جنوب	۱۵۸۴۰۳	۴۰۹۸۹	٪۲۶	۶۹۶۹۷	۷۳۹۴	٪۱۱
شرق	۱۴۱۴۰۹	۳۵۷۳۸	٪۲۵	۶۲۲۲۰	۶۴۴۷	٪۱۰
غرب	۳۱۳۷۲۳	۸۴۵۵۶	٪۲۷	۱۳۸۰۳۸	۱۵۲۵۴	٪۱۱
جمع	۱,۰۰۴,۲۹۱	۲۷۸,۳۵۰	٪۲۸	۴۴۱,۸۸۸	۵۰,۲۱۴	٪۱۱

جدول ۵. اطلاعات هزینه‌ای پژوهش در سال ۱۳۹۱ [Tarrahan Parseh Transportation Research Institute, 2012]

ردیف	نوع هزینه	هزینه (ریال)
۱	هزینه خرید و نصب تجهیزات	۷۸۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه	۱۲۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	هزینه سالیانه نیروی انسانی	۴۷,۸۴۴,۰۰۰

۴-۲ ارائه نتایج

به دلیل آن که در محاسبه تعداد دوربین موردنیاز و مکان مناسب استفاده از دوربین‌ها، پارامتر هزینه بسیار اثرگذار است، در این بخش با فرض هزینه‌ای معادل با ۶۵۰ میلیارد ریال مدل ارائه‌شده با الگوریتم شاخه و کران حل گردیده و نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. همان طور که در بخش سوم تشریح شد، عدد ۱ نشان‌دهنده استفاده از دوربین در این معبر و عدد صفر نمایشگر استفاده از نیروی انسانی است، از این رو با استفاده از جدول ۷ می‌توان دریافت باتوجه به بودجه درنظرگرفته‌شده، از بین ۷۹ معبر ورودی خیابانهای سراج، شهید عراقی، دردشت، سعدی، ذوالفقاری، بوستان ماهونیا و شهید معصومی‌با استفاده از نیروی انسانی و مابقی معابر با استفاده از دوربین کنترل خواهند گردید.

همان طور که دیده می‌شود، در گام اول تمامی‌معابر بزرگراهی و ۲۰ معبر از ۲۱ معبر شریانی درجه ۲ پوشش داده شده است و ۶ معبر دیگر که از معابر جمع‌کننده پخش‌کننده و محلی است، توسط نیروی راهنمایی رانندگی کنترل خواهند شد. با استفاده از این دوربین‌ها تعداد تخلفات پوشش‌داده شده به ۱۱۱۶۹۰مورد خواهد رسید. از آنجا که در این بخش نتایج ارائه‌شده تنها براساس یک هزینه معین است، در بخش بعد تحلیل حساسیت روی هزینه‌های مختلف انجام شده و برای هر هزینه، تعداد تخلفات پوشش‌داده شده معین خواهد شد.

۴-۳ تحلیل حساسیت

باتوجه به آن که تعداد دوربین و میزان پوشش تخلفات به طور مستقیم با هزینه این نوع تجهیزات رابطه دارد، از این رو تحلیل حساسیتی بر روی هزینه‌های مختلف تخصیص‌داده شده از سوی مدیران شهری انجام شده تا تعداد نیروی انسانی و دوربین مورداستفاده در هرحالت

جدول ۶. اطلاعات هزینه‌ای پژوهش در سال ۱۳۹۲

ردیف	نوع هزینه	هزینه (ریال)
۱	هزینه خرید و نصب تجهیزات	۱,۰۰۹,۳۲۰,۰۰۰
۲	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه	۱۵۵,۲۸۰,۰۰۰
۳	هزینه سالیانه نیروی انسانی	۵۸,۴۵۰,۰۰۰

جدول ۷. نتایج حاصل از حل مدل با هزینه ۶۵۰ میلیارد ریال

معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین	معبر	دوربین
۱	۱	۱۳	۱	۲۵		۱	۱	۳۷	۱	۴۹	۱	۶۱	۱	۷۳	۱
۲	۱	۱۴	۱	۲۶		۱	۱	۳۸	۰	۵۰	۱	۶۲	۱	۷۴	۱
۳	۱	۱۵	۱	۲۷		۱	۱	۳۹	۱	۵۱	۱	۶۳	۱	۷۵	۱
۴	۱	۱۶	۱	۲۸		۱	۱	۴۰	۱	۵۲	۱	۶۴	۱	۷۶	۰
۵	۱	۱۷	۱	۲۹		۱	۱	۴۱	۱	۵۳	۱	۶۵	۱	۷۷	۱
۶	۱	۱۸	۱	۳۰		۱	۱	۴۲	۱	۵۴	۱	۶۶	۰	۷۸	۱
۷	۱	۱۹	۱	۳۱		۱	۱	۴۳	۱	۵۵	۱	۶۷	۰	۷۹	۱
۸	۱	۲۰	۱	۳۲		۱	۱	۴۴	۱	۵۶	۱	۶۸	۱		
۹	۱	۲۱	۱	۳۳		۱	۱	۴۵	۱	۵۷	۱	۶۹	۱		
۱۰	۱	۲۲	۰	۳۴		۱	۱	۴۶	۰	۵۸	۱	۷۰	۱		
۱۱	۱	۲۳	۱	۳۵		۱	۱	۴۷	۱	۵۹	۱	۷۱	۱		
۱۲	۱	۲۴	۱	۳۶		۱	۱	۴۸	۰	۶۰	۱	۷۲	۱		

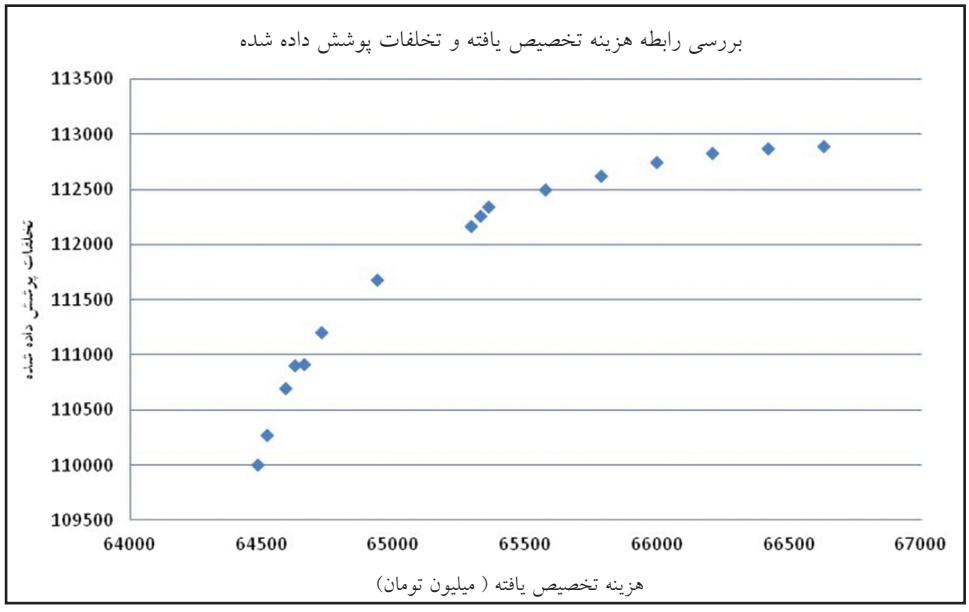
مشخص گردد. با استفاده از حل این مدل براساس تخصیص بودجه‌های گوناگون می‌توان دریافت با تخصیص هزینه‌ای معادل با ۶۶۶۲۶۶۵۰۰۰۰۰ ریال، تمامی‌معابر محدوده به دوربین مجهز خواهند گردید و ۱۱۲۸۹۶ مورد از تخلفات پوشش داده خواهد شد. لازم به ذکر است حداقل هزینه این پروژه با فرض محدودیت‌های تعریف‌شده در بخش روش‌شناسی برابر با ۶۴۴۸۲۷۲۰۰۰۰۰ ریال است که برای مکانیزه نمودن کنترل ۶۳ معبر از ۷۹ معبر صرف خواهد شد و موجب پوشش ۱۱۰۰۱۵ موردی تخلفات می‌گردد. دلیل آن که تنها ۱۶ معبر (۳۶ نفر) با استفاده از نظارت بصری کنترل خواهند گردید و سایر معابر محلی نیز تحت پوشش دوربین قرار گرفته‌اند آن است که محدودیت تعریف‌شده نوع دوم در این مدل، محدودیتی الزام‌آور بوده و با کاهش هزینه‌ها این محدودیت، موجب غیرموجه‌شدن محدوده جواب‌ها خواهد گردید.

از این رو نمایی از تغییرات تعداد میزان تخلفات پوشش داده شده به نسبت هزینه تخصیص داده شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است با افزایش هزینه‌ها در گام‌های ابتدایی تغییرات زیادی در حجم تخلفات پوشش داده شده به وقوع خواهد پیوست، به طوری‌که با افزایش بودجه از ۶۴۵۰۰۰ میلیون ریال به ۶۵۵۰۰۰ میلیون ریال، پوشش تخلفات به میزان ۲/۵۷ درصد افزایش خواهد یافت در حالی که با افزایش بودجه از ۶۵۵۰۰۰ میلیون ریال به ۶۶۵۰۰۰ میلیون ریال، میزان پوشش تخلفات تنها به میزان ۰/۴۴ درصد افزایش خواهد یافت.

۵. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

تهران به عنوان پایتخت و کلانشهری با بیشترین تعداد سفرهای روزانه درون‌شهری در ایران، پس از اعمال سیاست‌های گوناگون مدیریت تقاضای حمل‌ونقل رو به سوی کنترل و قیمت‌گذاری محدوده مرکزی و پرتراکم شهر آورده است. نتایج مثبت اجرای طرح قیمت‌گذاری محدوده طرح ترافیک و کنترل ورود به این محدوده، مدیران شهری را بر آن داشت تا با توجه به افزایش تراکم ترافیک در سایر مناطق شهری و بحرانی شدن وضعیت آلودگی هوای شهر تهران اقدام به معرفی حلقه‌ای بزرگ تر از طرح ترافیک کنونی، با عنوان محدوده طرح زوج یا فرد کنند.

تجارب مثبت اجرای کنترل مکانیزه طرح ترافیک و وقوع معضلاتی همچون دشواری کنترل محدوده توسط نیروی انسانی به سبب گستردگی محدوده، عدم انعطاف‌پذیری نیروی انسانی در زمینه اعمال



شکل۲. نمودار بررسی رابطه هزینه تخصیص یافته و تخلفات پوشش داده شده

استراتژی‌های قیمت‌گذاری متناسب با ساعت ورودی به محدوده و یا مسافت پیموده‌شده در محدوده، ایجاد فرصت مناسب برای تخلف برخی رانندگان در هنگام ثبت تخلفات از سوی نیروی کنترلی و اثربخشی کوتاه‌مدت این طرح در سایر کشورها، تصمیم‌گیران را برآن خواهد داشت تا کنترل محدوده دوم را نیز با استفاده از کنترل مکانیزه برعهده گیرند.

در این پژوهش، نویسندگان با هدف پوشش حداکثری تخلفات و کاهش ورود غیرمجاز به محدوده طرح، اقدام به مکانیابی دوربین‌های مکانیزه معابر ورودی این محدوده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و روش‌های بهینه‌سازی کرده اند.

از این رو پس از مروری بر پیشینه اجرای طرح محدودیت تردد وسایل‌نقلیه شخصی براساس شماره پلاک و انواع مطالعات انجام‌شده پیرامون مکانیابی دوربین‌های مکانیزه در صنعت حمل‌ونقل، ورودی‌ها، ساختار مدل، متغیرهای تصمیم و تابع هدف و محدودیت‌ها معرفی شده و الگوریتم شاخه و کران به عنوان روش حل مساله انتخاب گردیده است.

تابع هدف تعریف شده براساس وقوع تخلف در هریک از معابر و در جهت افزایش پوشش تخلفات تعریف شده است که به منظور اثربخشی هریک از روش‌های کنترل مکانیزه و دستی، نرخ کاهش تخلفات تعیین گردیده است. به منظور حل مساله، محدودیت‌های موجود به سه دسته محدودیت بودجه با توجه به هزینه تجهیزات و نیروی انسانی، محدودیت تعداد دوربین در هر رده عملکردی از معابر با توجه به تعداد ورودی، حجم عبوری و سرعت میانگین تردد و همچنین محدودیت نیروی انسانی با توجه به تعداد پیشنهادی تعریف شده است. در ادامه، پس از تشریح محدوده مطالعه موردی (طرح زوج یا فرد)، معابر ورودی محدوده معرفی و تابع هدف با توجه به محدودیت‌ها حل گردیده است و جواب بهینه با توجه به هزینه تخصیص‌داده شده، تعیین گردیده است و برای هزینه‌های متفاوت، تحلیل حساسیت انجام شده است.

تحلیل حساسیت انجام‌گرفته نشان می‌دهد با تخصیص هرچه بیشتر بودجه تا سقف حدود ۶۵۵ میلیارد ریال، میزان پوشش تخلفات تفاوت محسوسی را شاهد خواهد بود حال آن که پس از این میزان، با افزایش هزینه‌ها میزان پوشش تخلفات شاهد رشد چشمگیری نخواهد بود.

در این پژوهش نویسندگان اقدام به مکانیابی دوربین‌های کنترل مکانیزه معابر ورودی محدوده طرح کرده و راهکارهای کاهش ورود غیرمجاز به محدوده طرح را بررسی کنند و با استفاده از این تحلیل‌ها ابزاری مناسب برای تخصیص بودجه در اختیار مدیران شهری قرار دهند.

با توجه به وسعت محدوده طرح زوج یا فرد که بخش قابل توجهی از مساحت محدوده مرکزی شهر تهران را دربر می‌گیرد، نقاط مبداء و مقصد تعداد قابل توجهی از سفرهای شهروندان درون این محدوده قرار گرفته و سفرها و تخلفات را به سفرهای درون محدوده‌ای تبدیل می‌کند. براین اساس، پیشنهاد می‌شود تا جهت کاهش این نوع تخلفات، داخل محدوده طرح زوج یا فرد نیز در جهت مکانیابی دوربین‌های کنترلی مورد مطالعه مکانیابی جهت مطالعات آتی قرار گیرد. به این ترتیب با پوشش مناسب کل محدوده و در پی آن کاهش تخلفات، طرح مدیریت عرضه در محدوده مرکزی پایتخت به اهداف خود نزدیک تر خواهد شد.

۶. سپاسگزاری

از کارشناسان شرکت کنترل ترافیک شهر تهران که نویسندگان را در تهیه اطلاعات این مقاله یاری دادند، سپاسگزاری می‌شود.

۷. پی‌نوشت‌ها

1-Branch-and-Bound-

۲- i شماره مربوط به هر معبر است

3- Binary Integer Model

۸. مراجع

– آل‌نوری، ه.، میربها، ب و ادیب‌فر، ع. (۱۳۹۱)" بررسی فنی اقتصادی محدوده زوج و فرد شهر تهران"، یازدهمین کنفرانس حمل‌ونقل و ترافیک، تهران.

– امینی، ب و مجردی، م. (۱۳۸۵) "بررسی وارزیابی طرح تردد نوبتی شهرتهران"، هفتمین کنفرانس حمل‌ونقل و ترافیک، تهران.

– پژوهشکده حمل و نقل طراحان پارسه (۱۳۹۱) "تاثیر مکانیزاسیون بر کنترل وسعت محدوده طرح زوج و فرد شهر تهران"، گزارش فنی، شرکت کنترل ترافیک شهرداری تهران، تهران.

– پژوهشکده حمل‌ونقل طراحان پارسه (۱۳۹۱) "مطالعات توجیهی مکانیزاسیون محدوده طرح زوج و فرد شهر تهران"، گزارش فنی، شرکت کنترل ترافیک شهرداری تهران، تهران

– سازمان ملی استاندارد (۱۳۹۰) " استاندارد طبقه‌بندی معابر شهری"، کرج، سازمان ملی استاندارد

– شهامت، ج.، زیاری، ح. و احمدی‌نژاد، م. (۱۳۸۴)" مدیریت تقاضا در حمل و نقل شهری"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی عمران، تهران.

– فاضلی‌فر، ع.، منبتی، ا. و سیدحسینی، س.م. (۱۳۹۱) "مدل مکانیابی نصب دوربینهای کنترل سرعت در راههای برون شهری"، یازدهمین کنفرانس حمل و نقل و ترافیک، تهران.

– فدایی نایینی، م.، قطعی، م. و تشکری هاشمی، س. م.(۱۳۹۱) "ارائه دو مدل جدید برای مساله مکانیابی شمارنده های ترافیکی به منظور بیشینه سازی پوشش مسیرها: مطالعه موردی بزرگراه‌های تهران"، یازدهمین کنفرانس حمل و نقل و ترافیک، تهران.

– مرکز آمار ایران(۱۳۹۲) "آمارهای برگرفته از مرکز آمار ایران"، website: http://www.amar.org.ir.

- مهرگان، محمدرضا (۱۳۸۹) "پژوهش عملیاتی، برنامه‌ریزی خطی و کاربردهای آن"، نشر کتاب دانشگاهی، ویراست چهارم.

- Baltes, M. R. , Barrios, J. C. , Cain, A. , Darido, G. and Rodriguez, P. (2006) "Applicability of Bogota's TransMilenio BRT (Bus Rapid Transit) System to the United States" , Technical Report, Center for Urban Transportation Research, Federal Transit Administration, Washington, DC.

- Charles, R. R. (2013) "Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints", Research in Transportation Economics, Vol. 40, Issue 1, April, pp. 56–65.

- Davis, L.W. (2006) "The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City", Journal of Political Economy, vol. 116, No. 1, pp. 38-79.

- Eskeland, G. and Feyzioglu, T. (1997) "Rationing can backfire: The day without a car in Mexico City", The World Bank Economic Review, Vol.11, pp. 383-408.

- Jacobi, P., Segura, D. B. and Kjellén , M. (1999),"Governmental responses to air pollution: summary of a

study of the implementation of Rodízio in SãoPaulo" Environment and Urbanization, Vol. 11, No. 1, April, pp.79-88.

- Kim, H., Chang, S. and Chung, H. (2003) "Selection of the optimal traffic counting locations for estimating origin-destination trip matrix", Journal Of The Eastern Asia Society For Transportation Studies, Vol.5. p. 1353-1365

- Mahendra, A. (2008) "Vehicle restrictions in four Latin American cities: Is congestion pricing possible?", Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal, Volume 28 (1), pp. 105-133.

- Saffarzadeh, M., Alenoori, H. and Mirbaha, B. (2013)" Technical and economical evaluation of using ITS technologies for enforcment of plate number rationing in Tehran" ,WCTR, Rio de Janeiro, Brazil.

- Salari, A., Faturechi, R. Seyedabrishami, S. and Yargholi, E. (2010) "A new traffic counting program for intercity roads based on integer", 17th ITS World Congress, Busan.

- Sun, D., Chang, Y. Zhang, L. and Peng, Z. (2011) "An ant colony optimization model for traffic counting location problem", 90th Annual Meeting of The Transportation Research Board.

- Yang, C., Chen, A. and Chootinan, P. (2003) "Traffic counting location planning using genetic algorithms", Journal of The Eastern Asia Society For Transportation Studies, Vol.5. pp.898-913.