



## ارائه مدل بهینه‌سازی تردد با رویکرد کاهش آلودگی هوا (مطالعه‌ی موردی پل صدر تهران)

ترکان علیسلطانی<sup>۱</sup>، مجید شفیع‌پور مطلق<sup>۲\*</sup>، خسرو اشرفی<sup>۳</sup>، میقات حبیبیان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، مهندسی محیط‌زیست (آلودگی هوا)، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی محیط‌زیست (آلودگی هوا)، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
<sup>۳</sup> دانشیار، مهندسی محیط‌زیست (آلودگی هوا)، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
<sup>۴</sup> استادیار، برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### تاریخچه داوری:

دریافت:  
بازنگری:  
پذیرش:  
ارائه آنلاین:

### کلمات کلیدی:

آلودگی هوا  
انتشار از خودروها  
بهینه‌سازی ترافیک  
مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی  
مدیریت تقاضای حمل و نقل

**خلاصه:** دستیابی به کم‌ترین میزان انتشار آلاینده‌های شهری مستلزم مدیریت صحیح منابع آلاینده با هدف نزدیک شدن به سیستم بهینه‌ی جریان ترافیک می‌باشد. مدیریت تردد از شیب‌راه‌ها از طریق کنترل هوشمند جریان ورودی از جمله اقدامات تاثیرگذار مدیریت تقاضای حمل و نقل در پایداری جریان اصلی بزرگراه است. در این پژوهش سعی شده‌است تا با مدل‌سازی جریان ترافیک ورودی به بزرگراه صدر شرایط پایدار و در نتیجه آلاینده‌ی کمتر مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌سازی حجم بهینه‌ی تردد از شیب‌راه‌های ورودی با حفظ سطح سرویس مطلوب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی و روش سیمپلکس انجام یافته‌است. سپس مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها ناشی از تردد حجم بهینه با نرم افزار IVE انجام شده‌است. نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها به دلیل پایداری جریان ترافیک، نمایان‌گر کمترین میزان انتشار است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تغییر برنامه زمان‌بندی صحیح برای اعمال محدودیت‌های دسترسی و برنامه انسداد متداول در شیب‌راه‌ها در مسیر شرق به غرب منجر به حفظ پایداری ترافیک، تردد در سطح سرویس مطلوب و کاهش انتشار آلاینده‌ی کربن مونواکسید و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب به میزان ۵۴ و ۲۵ درصد خواهد شد. هم‌چنین در مسیر غرب به شرق پل صدر اعمال سیکل مناسب پایش شیب راه در شیب‌راه‌های ورودی مدرس باعث پایداری ترافیک در عرشه‌ی اصلی پل و کاهش میزان انتشار آلاینده‌ی کربن مونواکسید و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب به میزان ۴۲ و ۴۱ درصد خواهد شد.

### ۱- مقدمه

[۲]. در این راستا سعی می‌گردد تا برای کاهش آلودگی هوا تا حد امکان جریان ترافیک پایدار باشد. با توجه به مطلوبیت شرایط پایدار، چه از نظر کاربران (رانندگان و مسافران) و چه از نظر گردانندگان سیستم، تنظیم میزان چگالی به گونه‌ای که باعث جریان روان و با سرعت بالا گردد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳]. امروزه مدیریت تقاضای حمل و نقل به طور گسترده در راستای کنترل پیامدهای ناشی از حمل و نقل اتخاذ شده و اعمال آن خصوصا در قالب اتخاذ روش‌هایی در راستای کاهش تراکم ترافیک منجر به کاهش مشکلاتی از قبیل آلودگی هوا می‌گردد [۴]. امروزه مدیریت ترافیک نه تنها نیاز ضروری کلان‌شهرها است بلکه در شهرهای با جمعیت

برنامه‌ریزی صحیح جهت مدیریت حمل و نقل و ترافیک تاثیر مثبت و بسزایی در عملکرد ترافیک معابر و در نتیجه کاهش آلودگی هوای شهرها خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد پایداری جریان ترافیک بر میزان انتشار آلاینده‌های هوا تاثیر زیادی دارد [۱]. از اینرو، مدیریت ترافیک با هدف بهبود شرایط تردد و در نتیجه کاهش میزان انتشار آلاینده‌های هوا از ابزارهای مهم و تاثیرگذار مدیریت تقاضای حمل و نقل می‌باشد. به عبارتی مدیریت تقاضای حمل و نقل به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا از منابع حمل و نقلی جامعه استفاده کاراتری گردد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shafiepour@ut.ac.ir /

shafiepourm@yahoo.com

مدل IVE<sup>۱</sup> به تهیه فهرست انتشار روزانه منابع متحرک پرداختند و ضرایب انتشار انواع آلاینده‌ها را به‌دست آوردند [۹]. در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۲ آلاینده‌های منتشر شده از وسایل نقلیه برای ساعت اوج صبحگاهی در مناطق ۲۲ گانه تهران با استفاده از نرم افزار IVE انجام گرفت که نتایج آن از تولید ۲۴۴.۴۵ تن در ساعت آلاینده CO حکایت داشت که از این میزان حدود ۲۵ درصد ناشی از انتشار آلاینده در زمان روشن کردن موتور خودروها بود [۱۰].

مدیریت شیب‌راه‌ها تاثیر زیادی در جریان ورودی به مسیر بزرگراهی و حفظ پایداری جریان دارد. از اینرو تاثیر پایش شیب‌راه‌ها بر پایداری جریان ترافیک و انتشار آلاینده‌ها اخیراً مورد توجه پاره‌ای از مطالعات قرار گرفته‌است. برای مثال مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۸ به بررسی تاثیر استراتژی‌های پایش شیب‌راه‌ها<sup>۲</sup> بر میزان انتشار آلاینده‌ها در مسیر بزرگراهی انجام شده‌است. در این مطالعه تاثیر اعمال استراتژی‌های کنترل شیب‌راه به دو روش یکپارچه و منفرد<sup>۳</sup> بر بهبود تحرک و جریان روان ترافیک بررسی شده‌است. نتایج مطالعه نشان داده است استراتژی پایش شیب‌راه به روش یکپارچه نسبت به روش منفرد از نظر میزان انتشار آلاینده‌ها و جابه‌جایی ارجحیت دارد [۱۱]. در مطالعات زیادی تاثیر اعمال سیاست‌های مختلف مدیریت تقاضا در کاهش انتشار آلاینده‌های هوا مورد توجه قرار گرفته‌است. برای مثال پژوهشی تحت عنوان «بهینه‌سازی ترافیک: رویکردی نوین برای کنترل آلودگی هوا در مناطق شهری چین» انجام شده‌است. در این مطالعه به کاهش انتشار آلاینده‌های هوا به میزان ۲۴-۶۵ درصد در نتیجه‌ی تغییر روش مدیریت تقاضا و افزایش سرعت مجاز در معابر پرداخته شده‌است [۱۲]. هم‌چنین در مطالعه‌ای در لندن میزان کاهش انتشار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژون، ذرات معلق، مونواکسید کربن و ازن تحت طرح قیمت‌گذاری تردد در ترافیک بررسی شد و نتایج نشان داد در اثر اعمال این طرح آلاینده‌های بررسی شده در سطح شهر کاهش می‌یابند [۱۳]. کرمانشاه و همکاران نیز اثر به کارگیری چهار سیاست مدیریت تقاضای حمل‌ونقل را برای شهر شیراز در کاهش تولید آلاینده‌های هوا در دوره‌ی زمانی کوتاه مدت بررسی نموده‌اند [۶]. مطالعه‌ای دیگر تحت عنوان تاثیر اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل بر آلودگی هوای شهری

کمتر نیز نقش مهمی ایفا می‌کند [۵]. ساماندهی و بهسازی ترافیک معابر یکی از ابزارهای مدیریت ترافیک است که می‌تواند با استفاده از ظرفیت‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم‌های موجود، موجب کاهش تاخیر و تراکم ترافیک در شهرها شود [۶]. بهینه‌سازی مولفه‌های پایداری جریان ترافیک و الگوی حاکم بر آن، ارتباط مستقیمی با میزان انتشار آلاینده‌های حاصل از تردد خودروها دارد. به طور کلی روش‌های اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا به منظور کاهش حجم ترافیک به دو دسته‌ی سیاست‌های بازدارنده یا دفعی و سیاست‌های تشویقی یا جذبی تقسیم‌بندی می‌شوند. غالباً سیاست‌های جذبی بر طبقه‌های حمل و نقل همگانی موثر بوده و سیاست‌های دفعی بر طبقه‌های شخصی اثر گذارند [۷]. اتخاذ این سیاست‌های بازدارنده، می‌تواند شامل اعمال محدودیت‌ها و ممنوعیت‌های دسترسی در نقاط مختلف شبکه مانند انسداد مسیرهایی با ترافیک زیاد باشد. برای مثال، انسداد مسیره‌ای دسترسی و اعمال محدودیت تردد در شیب‌راه‌های پل صدر در شهر تهران، در ساعات مختلف شبانه‌روز، به منظور کنترل جریان ورودی در روی پل صدر و تونل نیایش از نمونه‌های سیاست‌های بازدارنده‌ی مدیریت ترافیک می‌باشد. در واقع مدیریت شیب‌راه یک روش مدیریت ترافیک در جهت کاهش تراکم ترافیک، با هدف افزایش بازدهی، بهبود زمان سفر و ایمنی است و بر اساس یک برنامه و منطق مشخص، ورود وسایل نقلیه به بزرگراه را محدود می‌کند [۳]. نتایج تحقیقات (در ایالت جنوبی آمریکا) نشان می‌دهد که شیب‌راه ورودی باید حداقل توان نگهداری ۵ درصد از ترافیک اوج همان شیب‌راه را داشته باشد [۸]. به طور کلی کنترل شیب‌راه به چند طریق قابل تقسیم است: ۱- کنترل کامل شیب‌راه، ۲- کنترل موضعی شیب‌راه و ۳- کنترل متغیر شیب‌راه [۳]. به کارگیری روش مناسب جهت کنترل شیب‌راه بستگی به ظرفیت آن شیب‌راه در نگهداری خودروهای ورودی از آن را دارد.

مطالعات زیادی در خصوص اهمیت تاثیر منابع متحرک در انتشار آلودگی هوای شهری انجام شده‌است. در پاره‌ای از این مطالعات به تخمین میزان انتشار ناشی از ناوگان شهری و مقادیر ضرایب انتشار پرداخته شده‌است. برای نمونه در سال ۲۰۰۹ در یک پروژه تیمی شهر پکن از چین به علت دارا بودن بزرگترین ناوگان حمل و نقل و تعداد خودروها از میان دیگر شهرها انتخاب شد و با استفاده از

1 International Vehicle Emission model

2 Ramp metering

3 Integrated and isolated ramp metering

استفاده شده است [۱۸].

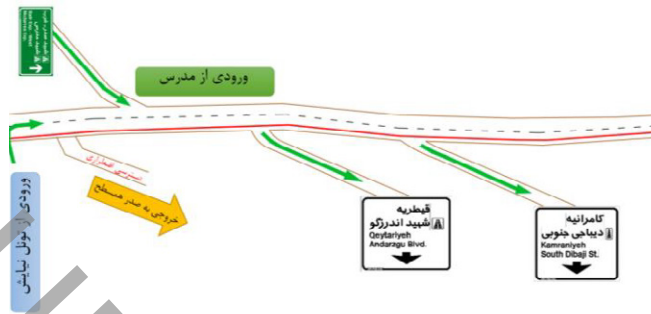
از مرور سابقه تحقیقات صورت گرفته چنین برمی آید که تمرکز بیشتر مطالعات پیشین بر تأثیرات الگوهای ترافیکی بر آلودگی هوا و اعمال روش‌های مدیریت تقاضا و تأثیر آن بر انتشار آلاینده‌ها بوده است. اما بهینه‌سازی جریان ورودی از شیب‌راه‌ها در نتیجه‌ی مدیریت تقاضا و با رویکرد کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از تردد و تلفیق آن مدیریت زیست‌محیطی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از اینرو در این مطالعه سعی شده است کمترین میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از تردد در نتیجه‌ی اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا و جریان بهینه‌ی ورودی از شیب‌راه‌های پل صدر در هر دو مسیر شرق به غرب و غرب به شرق مدلسازی شود. در ادامه پس از معرفی محدوده مورد مطالعه به مبانی مدل ترافیکی و مدل تخمین انتشار و سپس به بحث در رابطه با نتایج پژوهش و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## ۲- مطالعه‌ی موردی

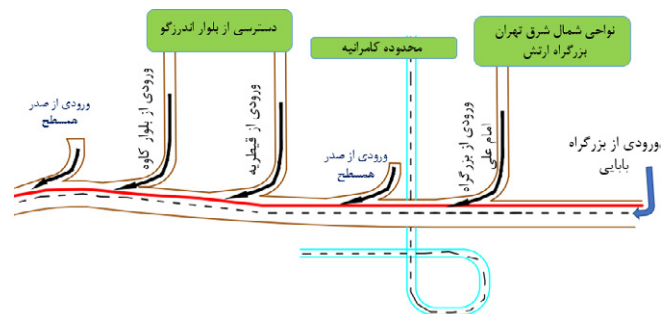
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش پل صدر در شهر تهران می‌باشد. پل صدر دارای یک مسیر شرق به غرب (منتهی به تونل نیایش) و یک مسیر غرب به شرق (با خروج از تونل نیایش) می‌باشد که طول این پل با احتساب شیب‌راه‌های دسترسی آن به ۱۱ کیلومتر می‌رسد. در هر مسیر دو خط عبور و یک خط تردد اضطرار وجود دارد. در این پژوهش تردد در هر دو جهت فوق بررسی شده است. دسترسی‌ها در مسیر شرق به غرب پل شامل ورودی بزرگراه شهید بابایی، ورودی بزرگراه امام علی، ورودی از بزرگراه صدر همسطح در محدوده‌ی خیابان کامرانیه، بلوار قیطره، بلوار کاوه و ورودی بزرگراه صدر همسطح در نزدیکی تونل نیایش می‌باشد. در مسیر غرب به شرق پل صدر ورودی بزرگراه مدرس، خروجی بزرگراه صدر همسطح و خروجی‌های بلوار قیطره و خیابان کامرانیه-دیباچی در میانه‌ی پل وجود دارد. شکل ۱ و شکل ۲ نشان دهنده‌ی وضعیت شیب‌راه‌های ورودی و خروجی در هر دو مسیر پل صدر می‌باشد.

هوشمندسازی پل طبقاتی در راستای اجرای طرح مدیریت معابر بزرگراهی، بهینه‌سازی جریان ترافیک، کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا توسط شرکت کنترل ترافیک انجام شد. در پل صدر عملیات مدیریت شیب‌راه در پنج شیب‌راه فرعی شامل ورودی‌های بلوار کاوه، بلوار قیطره، خیابان صیاد شیرازی و بزرگراه امام علی (ع)

انجام شده است. در این مطالعه با استفاده از مدل پویایی سیستم در یک بازه‌ی زمانی ۲۰ ساله تأثیر اعمال سیاست‌های مستقل و همزمان بر میزان انتشار در شهر مشهد بررسی شده است [۱۴]. هم‌چنین دیباچ و همکاران به بررسی تأثیر سیاست قیمت‌گذاری در سفرهای کاری به محدوده‌ی مرکزی شهر تهران و تأثیر آن بر میزان انتشار آلاینده‌ها پرداختند و نتایج نشان داد با افزایش بهای ورودی به محدوده‌ی مرکزی شهر، تمایل افراد به استفاده از سواری شخصی کاهش یافته در نتیجه میزان آلاینده‌های منتشر شده توسط آن کاهش می‌یابد [۱۵]. حبیبیان و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر سیاست قیمت‌گذاری بر انتشار آلاینده‌ها در محدوده‌ی مرکزی شهر اصفهان پرداختند. در این مطالعه ماتریس تقاضای حمل و نقل بر شبکه حمل و نقلی با نرم‌افزار EMME/2 تخصیص داده شده و اثربخشی قیمت‌گذاری‌های مختلف بر میزان انتشار آلاینده‌ها بررسی شده است [۴]. در مطالعه‌ی دیگر استفاده از مدل لاجیت چندگانه به بررسی تمایل استفاده‌کنندگان از موتورسیکلت‌های با سوخت گازوئیل در صورت اعمال سیاست‌های بازدارنده در خصوص استفاده از این موتورسیکلت‌ها در محدوده‌ی مرکزی شهر پرداخته شده است [۱۶] به دلیل پیچیدگی عوامل تأثیرگذار در سیستم‌های حمل‌ونقلی و تفاوت میزان تأثیر هر یک در انتشار آلاینده‌های هوا، در پاره‌ای از مطالعات به ارزیابی گزینه‌های حمل‌ونقل و تأثیرگذار با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته شده است. به عنوان مثال در مطالعه‌ی به ارزیابی گزینه‌های مختلف سیستم حمل و نقل شهر تهران جهت کاهش آلودگی هوا پرداخته است. در این مقاله ابتدا تمامی پارامترهای موثر و مهم در آلودگی هوا توسط یک سیستم حمل‌ونقل شهری مطرح نموده و روشی جهت تعیین این آلودگی ارائه شده است. خصوصیات سیستم حمل‌ونقل در این تحقیق بر اساس اطلاعات سیستم حمل‌ونقل شهر تهران توسعه یافته، که در این خصوص گزینه‌های مختلفی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۷]. هم‌چنین ارژنگ و همکاران در سال ۱۳۹۲ تحقیقی تحت عنوان «ارایه یک مدل MCDM برای آلودگی هوا در شهر تهران» را ارائه دادند. در این پژوهش یک مدل به منظور شناسایی ساختاردهی و اولویت‌بندی عوامل موثر بر آلودگی هوا در شهر تهران ارائه شده است که از نوع توصیفی پیمایشی می‌باشد و در آن به منظور شناسایی عوامل موثر بر آلودگی هوا از روش دلفی



شکل ۲. موقعیت شیب‌راه‌های پل صدر در مسیر غرب به شرق  
Fig 2. Locations of ramps in West to East direction of Sadr Overpass



شکل ۱. موقعیت شیب‌راه‌های پل صدر مسیر شرق به غرب  
Fig 1. locations of ramps in East to West direction of Sadr Overpass

جدول ۱. برنامه‌ی چرخه‌های پایش شیب‌راه‌های پل صدر

Table 1. Ramp metering signal plans in Sadr Overpass

ردیف	سیکل‌های پایش شیب‌راهه	عبور یک خودرو به ازای هر چراغ سبز
۱	برنامه چراغ راهنمایی ۱ (چرخه: سبز/زرد/قرمز)	۳۰ ثانیه: ۷/۲/۳
۲	برنامه چراغ راهنمایی ۲ (چرخه: سبز/زرد/قرمز)	شانزده ثانیه: ۱۱/۲/۳
۳	برنامه چراغ راهنمایی ۳ (چرخه: سبز/زرد/قرمز)	بیست و چهار ثانیه: ۱۹/۲/۳
۴	برنامه چراغ راهنمایی ۴ (چرخه: سبز/زرد/قرمز)	سی ثانیه: ۲۵/۲/۳

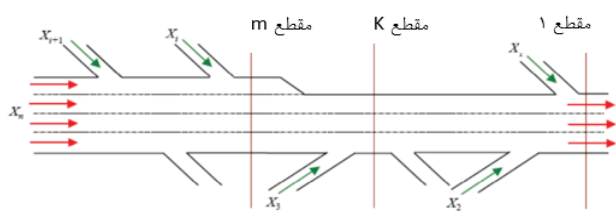
بررسی داده‌های نرخ تردد خودروها نشان می‌دهد در مسیر شرق به غرب پل صدر، بیشترین حجم ترافیک در شبانه‌روز در ساعات ۸ الی ۹ می‌باشد. این در حالی است که حجم بیشینه ترافیک در مسیر غرب به شرق پل صدر در شبانه‌روز در ساعات ۱۶ الی ۱۷ می‌باشد. به منظور کاهش ترافیک در شیب‌راه‌های ورودی پل صدر در بعضی از ساعات محدودیت‌ها و ممنوعیت‌های تردد اعمال می‌شود. در نتیجه‌ی اعمال محدودیت‌های دسترسی، در مسیر شرق به غرب در تمامی ساعات شبانه‌روز دسترسی شیب‌راه‌های همسطح به روی پل صدر و تونل نیایش مسدود می‌باشد. همچنین در مسیر غرب به شرق شیب‌راه‌های ورودی به صدر همسطح در تمامی ساعات مسدود است و خودروها می‌بایست از طریق شیب‌راه‌های کامرانیه و قیطریه از روی پل خارج شوند.

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، پل صدر تهران به علت وجود شیب‌راه‌های متعدد در هر دو مسیر شرق به غرب و غرب به شرق و پیچیدگی

در عرشه شمالی و ورودی بزرگراه مدرس در عرشه جنوبی انجام شده‌است و هدف آن ایجاد تعادل میان ظرفیت بزرگراه و تقاضای تردد در شیب‌راه‌ها می‌باشد. چهار برنامه برای کنترل شیب‌راه‌ها وجود دارد. هر یک از این برنامه‌ها شامل سه چرخه‌ی چراغ سبز، زرد و قرمز می‌باشد. چرخه اول ۱۲ ثانیه می‌باشد و ۳ ثانیه سبز، ۲ ثانیه زرد و ۷ ثانیه آخر قرمز است. لازم به ذکر است چرخه چراغ زرد برای پل صدر حذف شده‌است و زمان آن به چرخه چراغ سبز اضافه شده‌است [۱۹]. زمان کمترین برنامه متناسب با حجم ترافیک، دوازده ثانیه و زمان بیشترین چرخه‌ی کنترل شیب‌راه‌ها، سی ثانیه می‌باشد. سیکل‌های پایش شیب‌راهه در پل صدر در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

سرعت مجاز در سرتاسر پل ۷۰ کیلومتر بر ساعت است. همچنین تردد خودروهای سنگین و موتورسیکلت بر روی پل صدر و تونل نیایش ممنوع بوده در نتیجه ناوگان مورد تردد در پل صدر صرفاً شامل خودروهای سواری می‌باشد. ترکیب ناوگان عبوری در پل صدر با پایش اطلاعات ترافیکی از تردد شمارها به مدت یک ماه در شکل ۳ نشان داده شده‌است [۱۹].



شکل ۴. نمای شماتیک شیب‌راه‌های ورودی و خروجی از مسیر بزرگراهی

Fig.4. Schematic view of multiple ramps of a highway

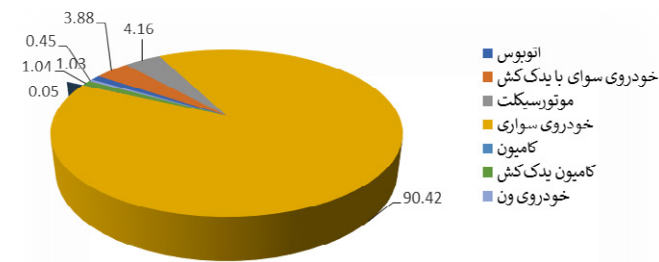
دارد. به منظور کاهش میزان آلاینده‌های تولید شده لازم است تا حجم ترافیک ورودی از شیب‌راه‌های ورودی به نحوی باشد تا باعث جریان پایدار بر روی عرشه اصلی پل شده و در نتیجه الگوی توقف-حرکت کمتری در طول پل حاکم باشد. تا آلاینده‌های خروجی از خودروها کمتر شود.

برای بدست آوردن حجم ترافیک مناظر با کمترین انتشار آلاینده‌های هوا از ورودی‌های پل صدر در هر دو مسیر غرب به شرق و شرق به غرب، از مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی، استفاده شده‌است. در واقع جواب‌های مدل فوق، ترکیب خطی بهینه‌ی حجم تردد ورودی از شیب‌راه‌ها با حفظ سطح خدمت دهی مطلوب است که باعث ایجاد آلاینده‌ی کمتری در نتیجه تردد خودروها می‌شود.

برنامه‌ریزی ریاضی یکی از قوی‌ترین ابزارهای بهینه‌سازی است و معروف‌ترین روش در این خانواده، برنامه‌ریزی خطی است، که مدل آن شامل مناسب‌ترین ترکیب از منابع محدود برای رسیدن به هدف موردنظر بر اساس روابط خطی بین عوامل و پارامترهاست [۳]. در مسائل واقعی، به علت تعدد شیب‌راه‌های ورودی و خروجی در طول بزرگراه، ابزار قوی مانند بهینه‌سازی جهت تحلیل مسایل می‌تواند استفاده شود. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی مدل هندسی متداول در این دسته از مسائل است. مقاطع مختلف چنین بزرگراهی در مسائل واقعی حجم ترافیک متفاوتی دارند. لذا پایداری جریان در طول مسیر اصلی اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در نتیجه با اعمال محدودیت صحیح و مهندسی روی حجم ورودی از شیب‌راه‌ها و دستیابی به ترکیب مناسب با حفظ سطح خدمت‌دهی مطلوب، بهینه‌سازی حجم کل جریان مسیر اصلی تابع هدف می‌باشد.

تابع هدف در این گونه مسائل مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۳]:

$$\max x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (1)$$



شکل ۳. ترکیب ناوگان عبوری در پل صدر تهران

Fig.3. fleet combination of Sadr Overpass

جریان ورودی (به عنوان تابعی از تعدد شیب‌راه‌های ورودی و خروجی) و همچنین اهمیت آن به عنوان اصلی‌ترین شریان شرق به غرب شهر تهران جهت مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های ناشی از تردد انتخاب شده‌است. شیب‌راه‌های ورودی و خروجی پل صدر به علت کنترل حجم ترافیک با محدودیت‌های دسترسی در بعضی از ساعات شبانه‌روز همراه است. از اینرو حجم ترافیک معینی در نتیجه‌ی اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا در روی پل جریان می‌یابد. میزان انتشار آلاینده‌ها ناشی از نرخ تردد در وضعیت کنونی با نرم‌افزار IVE مدل‌سازی شد. سپس وضعیت ترافیک و نحوه‌ی تردد بهینه در پل صدر با بررسی پارامترهای ترافیکی و هندسی منطقه مذکور مدل‌سازی شده و در نتیجه به پیشنهاد سناریو بهینه‌ی تردد از منظر کاهش انتشار ناشی از تردد خودروها پرداخته شده‌است. برای بررسی وضعیت تردد بهینه در پل صدر از مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی استفاده شد. مدل ریاضی تردد در پل صدر با استفاده از روش سیمپلکس که یک رویکرد ریاضی و یک فن کلی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی است، حل شد. در این روش ابتدا مدل وارد یک جدول می‌شود و سپس یک سری مراحل ریاضی بر روی جدول اجرا می‌گردد [۲۰]. در ادامه مبانی مدل بهینه‌سازی و مدل تخمین انتشار بررسی شده‌است.

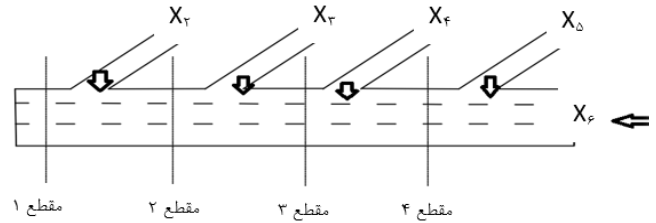
### ۱-۳-۱ مدل بهینه‌سازی ریاضی تردد با رویکرد کاهش آلودگی هوا

طراحی مدل بهینه‌ی تردد جهت دستیابی به ترکیب مناسبی از حجم ورودی به بخش بزرگراهی و سطح خدمت مطلوب و دستیابی به کمترین میزان انتشار ناشی از تردد انجام شده‌است. حجم تردد خودروها در پل صدر در هر دو مسیر مورد مطالعه، به دلیل وجود شیب‌راه‌های ورودی و خروجی متعدد در طول پل اهمیت زیادی

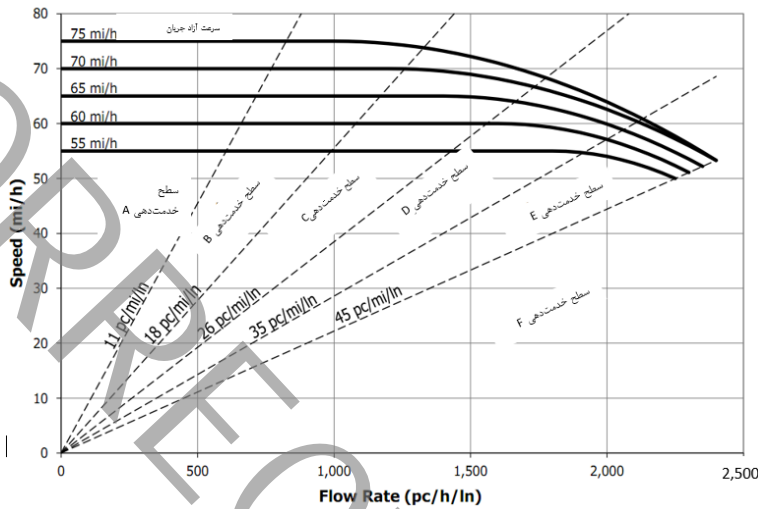
جدول ۲. سهم وسایل نقلیه ورودی از معبر J و عبوری از مقطع K در مسیر شرق به غرب پل صدر

Table 2. Share of traffic entering J passage and passing k section in East to West direction of Sadr Overpass

J					A <sub>jk</sub>	K
۶	۵	۴	۳	۲		
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲
۱	۱	۱			۳	۳
۱	۱				۴	۴



شکل ۵. نمای شماتیک رویکرد شرق به غرب پل صدر تهران  
Fig.5. Schematic view of ramps in East to West direction of Sadr Overpass



شکل ۶. سطح سرویس بزرگراهها  
Fig.6. Level of service in highways

B<sub>k</sub>: ظرفیت بخش بزرگراهی k

D<sub>j</sub>: تقاضای ساعتی در شیب راهه ورودی j

بدین ترتیب، پارامترهای مساله شامل سهم وسایل (A<sub>kj</sub>)، ظرفیت (B<sub>k</sub>) و تقاضا (D<sub>j</sub>) می شود، که برای حل مساله، باید گردآوری یا برآورد شود.

رویکرد شرق به غرب پل صدر شش ورودی دارد که در مقطع قبل از پل که مقطع بحرانی است همگرا می شوند. این ورودی ها عبارتند از ورودی بلوار کاوه (X<sub>۲</sub>)، ورودی بلوار قیطره (X<sub>۳</sub>)، ورودی بزرگراه صدر غرب در محدوده قیطره (X<sub>۴</sub>)، ورودی بزرگراه امام علی (X<sub>۵</sub>) و ورودی بزرگراه شهید بابایی (X<sub>۶</sub>). شکل ۵. نمای شماتیک ورودی های پل صدر مسیر شرق به غرب را نشان می دهد.

به دلیل عدم وجود شیب راهه های خروجی در مسیر شرق به غرب، سهم عبور وسایل نقلیه از تمامی مقاطع برابر عدد ۱ می باشد. بنابراین

$$\max \sum_{j=1}^n X_j \quad (2)$$

.St

$$\sum_{j=1}^n A_{kj} X_j \leq B_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$X_j \leq D_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$X_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

که در آن:

X<sub>j</sub>: حجم وسایل نقلیه ورودی به سیستم بزرگراهی از معبر (بخش اصلی و شیب راهه)

A<sub>kj</sub>: سهمی از وسایل نقلیه که از معبر j وارد سیستم بزرگراهی

شده و از مقطع k خارج می شوند

عملی ترافیک و میزان رضایت رانندگان از این شرایط را توصیف می‌کند و به عواملی از جمله سرعت و زمان سفر بستگی دارد [۲۲]. به نحوی که سطح خدمت‌دهی A بیانگر بهترین شرایط (حرکت به صورت آزادانه و با سرعت دلخواه)، سطح E نشان دهنده بیشترین حجم قابل عبور پایدار و سطح خدمت‌دهی F نشان دهنده بدترین شرایط ترافیکی (توقف و حرکت) است و زمانی اتفاق می‌افتد که نرخ تقاضا بیشتر از ظرفیت باشد. به عبارت دیگر سطح خدمت E ظرفیت راه را نشان می‌دهد. در نتیجه متناسب با سرعت مجاز برای هر خط تردد و هر مقطع، ظرفیت مقطع در سطح خدمت E به دست آمده است. همچنین برای به دست آوردن ظرفیت مقطع در بخش بزرگراهی از شکل ۵ استفاده شده و متناسب با سطح دسترسی E و سرعت مجاز در معابر، عدد مربوطه در جدول ۳ آورده شده است. در مسیر شرق به غرب پل صدر، در بخش بزرگراهی از سمت شرق و بزرگراه شهید بابایی دو خط تردد و یک خط به عنوان خط اضطرار تعریف شده است. سرعت مجاز در هر خط در محدوده مذکور، ۷۰ کیلومتر بر ساعت معادل ۴۳.۴۹ مایل بر ساعت است. بنابراین طبق جدول فوق و متناسب با سطح خدمت E ظرفیت هر خط برابر ۱۸۵۰ و در مجموع ظرفیت مقطع مشخص شده ۳۷۰۰ خودرو بر ساعت است. اعداد مربوط به تقاضای شیب‌راهه‌ها و ظرفیت مقطع تعریف شده به ترتیب در جداول ۴ و ۳ آورده شده است.

بنابراین معادله‌های حاکم بر شیب‌راهه‌ها و جریان اصلی مطابق روابط (۶) تا (۱۶) برای این مطالعه با استفاده از اعداد جداول فوق مطابق زیر نوشته می‌شود.

تابع هدف برای رویکرد شرق به غرب پل صدر مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$\max x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \quad (6)$$

S.T.

$$x_6 + x_5 \leq 3700 \quad (7)$$

$$x_4 + x_5 + x_6 \leq 5700 \quad (8)$$

$$x_6 + x_5 + x_4 + x_3 \leq 5700 \quad (9)$$

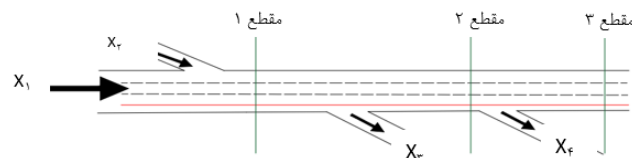
$$x_6 + x_5 + x_4 + x_3 + x_2 \leq 5700 \quad (10)$$

$$x_6 \leq 4400 \quad (11)$$

جدول ۳. ظرفیت مقاطع در مسیر شرق به غرب پل صدر

Table 3. Capacity of sections in East to West direction of Sadr Overpass

۴	۳	۲	۱	K
۵۷۰۰	۵۷۰۰	۵۷۰۰	۳۷۰۰	B <sub>k</sub>



شکل ۷. پلان شماتیک مسیر غرب به شرق پل صدر

Fig.7. Schematic view of ramps in West to East direction of Sadr Overpass

شیب‌راهه‌های ورودی بلوار کاوه، بلوار قیصریه، بزرگراه شهید بابایی و بزرگراه امام علی (ع) به عنوان J های مدل ریاضی و مقطع‌های فرض شده بعد از هریک از این شیب‌راهه‌ها، معرف k در این پژوهش می‌باشد. لذا جدول ۲۰ به عنوان جدول A<sub>jk</sub> در این پژوهش تهیه شد. شیب‌راهه‌ی ۱ که ورودی از بزرگراه صدر همسطح می‌باشد، به دلیل طراحی شدن آن برای دسترسی اضطراری و عدم امکان تردد از آن در شرایط عادی کاملاً مسدود فرض شده است. در این پژوهش به علت عدم دسترسی به میزان تقاضای شیب‌راهه‌ها، از ظرفیت آن‌ها به عنوان حد بالای تقاضا استفاده شده است. لذا نتایج مدل برنامه‌ریزی خطی در این پژوهش، بیشینه‌ی حجم تردد ممکن با حفظ سطح سرویس مطلوب را ارائه می‌دهد.

برای بدست آوردن ظرفیت راه‌ها از شکل ۶ [۲۱] که نشان دهنده‌ی سطح سرویس بزرگراه‌ها می‌باشد، استفاده گردید که در آن به طور خلاصه حدود چگالی‌های توصیه شده در کتاب راهنمای ظرفیت راه‌ها ۲۰۱۰ (HCM) در سطح سرویس‌های مختلف نشان داده شده است و طبق آن شش سطح خدمت‌دهی تعریف شده در سرعت‌های مختلف مرزبندی شده‌اند و متناسب با هر سطح خدمت‌دهی نرخ جریان برای هر خط از بزرگراه به دست می‌آید. در این پژوهش مسیر شرق به غرب پل صدر، دارای دو خط عبور و یک خط برای دسترسی اضطراری می‌باشد.

سطح خدمت‌دهی یک معیار سنجش کیفی است که شرایط

جدول ۵. ظرفیت مقاطع در مسیر غرب به شرق پل صدر  
Table 5. Capacity of sections in West to East direction of Sadr Overpass

۳	۲	۱	K
۳۷۰۰	۳۷۰۰	۳۹۰۰	B <sub>k</sub>

جدول ۷. سهم وسایل نقلیه ورودی از معبر J و عبوری از مقطع k در مسیر غرب به شرق پل صدر

Table 7. Share of traffic entering J passage and passing k section in East to West direction of Sadr Overpass

J <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>	
۱	۱	k <sub>1</sub>
۰/۸۱	۰/۷۵	k <sub>2</sub>
۰/۹۲	۰/۶۸	k <sub>3</sub>

جدول ۴. تقاضای شیب راهه ها در مسیر شرق به غرب پل صدر  
Table 4. Demand rate in ramps of East to West of Sadr Overpass

شماره پل	شماره شیب	شماره تقاطع	شماره تقاطع	شماره تقاطع	شماره تقاطع
۶	۵	۴	۳	۲	I
۴۴۰۰	۲۱۰۰	۱۰۵۰	۷۰۰	۷۰۰	Dj

جدول ۶. تقاضای شیب راهه در مسیر غرب به شرق پل صدر

Table 6. Demand rate in ramps of West to East of Sadr Overpass

مدرس	تونل نیایش	شیب راهه
۲	۱	I
۱۳۰۰	۵۷۰۰	Dj

مسیر فوق، دو خط تردد وجود دارد که سرعت مجاز در هر یک ۵۰ کیلومتر بر ساعت (معادل ۳۱ مایل بر ساعت) است. بنابراین ظرفیت هر خط در قسمت مذکور ۱۳۰۰ و در مجموع ۲۶۰۰ خودرو بر ساعت می باشد. شیب راهه‌ی ورودی از بزرگراه مدرس نیز در مسیر غرب به شرق با سرعت مجاز ۵۰ کیلومتر بر ساعت و یک خط تردد برابر ۱۳۰۰ خودرو بر ساعت است. بنابراین در مجموع ظرفیت مقطع ۱ (مقطع همگرایی این دو جریان و افزایش مقطع عرضی پل) برابر ۳۹۰۰ خودرو بر ساعت است. مقطع ۲ و ۳ در مسیر غرب به شرق با سرعت مجاز ۷۰ کیلومتر بر ساعت و دو خط تردد و یک خط تردد اضطراری (برای محاسبه ظرفیت خط اضطرار ملاک طراحی نمی باشد) برابر ۳۷۰۰ خودرو بر ساعت است. جداول ۵ و ۶ با استفاده از داده‌های ظرفیت مقاطع در ادامه آورده شده است.

به دلیل سهم بالای حجم وسایل نقلیه عبوری و عدم امکان پلاک خوانی تمامی خودروهای عبوری، سهم وسایل نقلیه‌ی عبوری از مقاطع ۱ و ۲ در رویکرد غرب به شرق پل صدر، به روش شمارش پلاک خوانی خودروی شاخص در ساعت ۱۶ الی ۱۷ (بیشینه‌ی ترافیک عصرگاهی)، بدست آمده است. بدین منظور خودروی پراید با بیشترین فراوانی (به طور میانگین حدود ۱۷ درصد کل ناوگان سواری) به عنوان خودروی شاخص فرض شده است. اطلاعات مربوط به سهم خودروهای عبوری از هر مقطع و درصد تخلیه خودروها در

$$x_5 \leq 2100 \quad (12)$$

$$x_4 \leq 1050 \quad (13)$$

$$x_3 \leq 700 \quad (14)$$

$$x_2 \leq 700 \quad (15)$$

$$z=2,3,4,5,6, x_j \geq 0 \quad (16)$$

در مسیر غرب به شرق پل صدر نیز، شیب راهه‌ی ورودی بزرگراه مدرس در ابتدای پل با  $X_p$  و شیب راهه‌های خروجی بلوار قیطریه و خیابان کامرانیه در ادامه پل به ترتیب با  $X_p$  و  $X_p$  نشان داده شده است. شکل ۷. نمای شماتیک مسیر غرب به شرق پل صدر را نشان می دهد.

برای به دست آوردن ظرفیت بخش بزرگراهی و شیب راهه‌های ورودی و خروجی به پل صدر در مسیر غرب به شرق با در نظر گرفتن سرعت مجاز در هر مقطع از بزرگراه، ظرفیت آن مقطع به عنوان حد بالای تقاضا و متناسب با سطح خدمت E با استفاده از شکل ۳ محاسبه شده است. بدین منظور سرعت مجاز در هر مقطع و شیب راهه از مسیر غرب به شرق پل صدر، طبق شکل ۵. برای طراحی مدل برنامه ریزی خطی استفاده شده است.

طبق شکل ۵، در مقطع ورودی تونل نیایش به پل صدر در



جدول ۸. فایل ناوگان در مدل IVE  
Table 8. Fleet file in IVE model

نوع کاربری خودرو	سخت	وزن موتور	نوع سیستم سوخت رسانی	نوع تهویه محفظه میل-لنگ	کاتالیزت	سن خودرو (کیلومتر پیمایش شده)
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	کاربراتور	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ <sup>۱</sup>	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	کمتر از ۷۹ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	کاربراتور	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	بین ۸۰ تا ۱۶۱ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	کاربراتور	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	بیشتر از ۱۶۱ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	کمتر از ۷۹ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	بین ۸۰ تا ۱۶۱ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی	بیشتر از ۱۶۱ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی به همراه بازگرداندن گاز خروجی <sup>۱</sup>	کمتر از ۷۹ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی به همراه بازگرداندن گاز خروجی	بین ۸۰ تا ۱۶۱ هزار کیلومتر
خودروهای سواری	بنزین	متوسط	سیستم پاشش سوخت چند نقطه‌ای	شیر تهویه مثبت محفظه میل لنگ	سیستم کاتالیتیکی سه راهی به همراه بازگرداندن گاز خروجی	بیشتر از ۱۶۱ هزار کیلومتر

<sup>۱</sup>EGR, <sup>۲</sup>PCV

$$0/75x_1 + 0/81x_2 \leq 3700 \quad (19)$$

$$0.68x_1 + 0.92x_2 \leq 3700 \quad (20)$$

$$x_1 \leq 2600 \quad (21)$$

$$x_2 \leq 1300 \quad (22)$$

$$j=1,2, x_j \geq 0 \quad (23)$$

جدول ۷ آورده شده است.

بدین ترتیب قیود معادله‌های حاکم بر مسیر غرب به شرق به منظور حفظ جریان پایدار، به منظور طراحی مدل برنامه‌ریزی خطی ریاضی از جداول فوق استخراج و به صورت رابطه (۱۷) تا (۲۳) نوشته می‌شود.

$$\max x_1 + x_2 \quad (17)$$

ST.

برای بدست آوردن جواب های بهینه مسئله فوق از روش

$$x_1 + x_2 \leq 3900 \quad (18)$$

جدول ۹. مقایسه حجم تردد از مدل خطی ریاضی و حجم تردد فعلی

Table 9. Comparison of flow rate in Mathematical Linear Model and current flow rate

مسیر مورد بررسی	حجم ترافیک به دست آمده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی (خودرو بر ساعت)	حجم ترافیک فعلی (خودرو بر ساعت)
رویگرد شرق غرب پل صدر	۳۹۰۰	۴۸۹۰
رویگرد غرب به شرق پل صدر	۲۷۹۵	۳۴۹۰

جدول ۱۰. مقایسه جریان ورودی از شیب‌راهی مدرس

Table 10. Comparison of entrance flow rates in Modarres Ramp

شیب‌راهی ورودی از مدرس در مسیر غرب به شرق	حجم تردد (خودرو بر ساعت)
متوسط حجم ترافیک در ساعت اوج در وضعیت کنونی	۶۹۲ خودرو بر ساعت
نتایج مدل برنامه‌ریزی ریاضی تردد برای شیب‌راهی بزرگراه مدرس	۴۷۸ خودرو بر ساعت

سیمپلکس استفاده شده است.

۲-۳- مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها

به منظور تخمین کمترین میزان انتشار از حجم تردد بهینه در پل صدر از مدل IVE استفاده شده است. در این مدل به منظور تخمین انتشار اطلاعات مربوط به فایل موقعیت و فایل ناوگان تهیه شده است. برای تهیه فایل ناوگان تعیین نوع فناوری خودروهای مورد تردد حائز اهمیت است. هم‌چنین جمع‌آوری اطلاعاتی شامل عنوان ناوگان، نوع سوخت (بنزین، گازوئیل، پروپان، CNG، و...)، سیستم سوخت‌رسانی (کاربراتور، تزریق تک نقطه ای و...)، نوع و ویژگی‌های وسایل نقلیه، درصد توزیع وسایل نقلیه مورد نظر، نوع استفاده از سیستم تهویه مطبوع ضروری است. تعیین سن خودروها برای تهیه فایل ناوگان در نرم افزار IVE مورد نیاز است. نرم افزار IVE سن خودروها را بر اساس کیلومتر پیمایش شده خودروها حساب می‌کند. محدوده دسته بندی به سه گروه تقسیم می‌شود که دسته اول زیر ۸۰، دسته دوم ۸۰ تا ۱۶۰ و دسته سوم مقادیر بیش از ۱۶۰ هزار کیلومتر می‌باشند. طبق اطلاعات بدست آمده سهم خودروهای سواری زیر ۵ سال حدود ۵۲ درصد، خودروهای بین ۵ تا ۱۰ سال، ۲۰ درصد و ۲۶ درصد بقیه را خودروهای بالای ۱۰ سال تشکیل داده است [۲۳]. هم‌چنین برای

ناوگان تاکسی، این نسبت برای خودروهای زیر ۵ سال، بین ۵ تا ۱۰ سال و بالای ۱۰ سال به ترتیب ۳۶ درصد، ۴۱ درصد و ۲۱ درصد می‌باشد [۲۳]. بر این اساس، فایل ناوگان به صورت جدول ۸ تهیه شد. به منظور تعیین اطلاعات مربوط به فایل موقعیت در مدل IVE، از حجم تردد حاصل از مناسب‌ترین ترکیب خطی شیب‌راه‌ها طبق نتایج مدل بهینه‌سازی ریاضی استفاده شده است. برای اطلاعات مربوط به سوخت مصرفی بر اساس نتایج پایش و آنالیز انجام شده میزان بنزن موجود در بنزین بین ۰/۴۶ تا ۲/۵۶ درصد حجمی متغیر است و متوسط گوگرد ppm ۱۱۴/۷۴ است. هم‌چنین میزان گوگرد موجود در دیزل بین ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm است [۲۴]. لذا مقادیر فوق به عنوان ورودی در قسمت‌های مربوط به مشخصات سوخت وارد شده است. در این پژوهش الگوی رانندگی در نرم‌افزار، برای حالت تنش متوسط در طول پل صدر لحاظ شده است. با توجه به این که منطقه مورد مطالعه اتوبان است و فرض بر این است که موتور خودروها در حین رانندگی از نور روشن نمی‌شوند، از محاسبات مرتبط با این الگوی رانندگی صرف نظر شده است.

۴- یافته‌ها

در این پژوهش حجم ترافیک بهینه، به دلیل استفاده از ظرفیت

جدول ۱۱. نتایج میزان انتشار از مدل سازی IVE برای مسیر شرق به غرب صدر

Table 11. Results of emission rates via IVE model in East to West direction

میزان انتشار آلاینده‌های معیار (کیلوگرم بر ساعت)					مسیر شرق به غرب
CO	VOC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	
۱۵۴/۹۹	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۷۲	۰/۱۳	نتایج به دست آمده از مدل سازی با حجم تردد بهینه
۳۳۷/۵۸	۸/۰۱	۲۷/۳۶	۱/۰۸	۰/۲۱	نتایج مدل سازی از مقادیر واقعی تردد
۵۴	۳۱	۲۵	۳۳	۴۳	درصد بهبود میزان انتشار

جدول ۱۲. نتایج میزان انتشار از مدل سازی IVE برای مسیر غرب به شرق بل صدر

Table 12. Results of emission rates via IVE model in West to East direction

میزان انتشار آلاینده‌های معیار (کیلوگرم بر ساعت)					مسیر غرب به شرق
CO	VOC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	
۱۱۴/۰۳	۳/۴۳	۱۰/۵۶	۰/۳۹	۰/۰۹	نتایج به دست آمده از مدل سازی با حجم تردد بهینه
۱۹۷/۹۵	۶/۰۴	۱۷/۹۴	۰/۶۹	۰/۱۴	نتایج مدل سازی از مقادیر واقعی تردد
۴۲	۴۳	۴۱	۴۳	۳۵	درصد بهبود میزان انتشار

شیب‌راهه‌ها و کنترل هوشمند جریان ورودی به روی پل، باعث حفظ پایداری جریان بر روی پل خواهد شد. متوسط حجم تردد خودروها از شیب‌راهه‌ی بزرگراه مدرس در ساعت اوج ترافیک عصر (۱۶ الی ۱۷) برابر ۶۹۲ خودرو بر ساعت می‌باشد. ترکیب جریان ورودی از تونل نیایش با شیب‌راهه‌ی بزرگراه مدرس باعث ایجاد مقطع بحرانی و ترافیک سنگین در ابتدای پل می‌شود. از اینرو، اعمال چرخه‌ی کنترل هوشمند در شیب‌راهه‌ی بزرگراه مدرس و کاهش جریان ورودی به حدود ۴۷۸ خودرو بر ساعت منجر به پایداری جریان روی پل در این مسیر خواهد شد.

نتایج کمترین میزان انتشار ممکن از تردد در مسیر شرق به غرب و غرب به شرق به ترتیب در جداول ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد انتشار مونوکسیدکربن در مسیر شرق به غرب پل صدر در شرایطی که محدودیت تردد به مدت یک ساعت در اوج ترافیک در شیب‌راهه‌ی بلوار کاوه انجام شود، به میزان ۵۴ درصد کاهش می‌یابد.

همچنین در مسیر غرب به شرق مقایسه نتایج میزان انتشار از مدل سازی شرایط کنونی و شرایط حاصل از برنامه‌ریزی ریاضی خطی نشان می‌دهد اعمال برنامه‌ی کنترل هوشمند در شیب‌راهه‌ی ورودی بزرگراه مدرس و کاهش میزان جریان ورودی به میزان ۳۰ درصد

شیب‌راهه‌ها به عنوان حد بالای تقاضا، برای ساعات اوج ترافیک در هر دو رویکرد غرب به شرق و شرق به غرب به دست آمده‌است. به منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل از مدل برنامه‌ریزی، با اطلاعات مربوط به شرایط کنونی تردد، مدل سازی میزان انتشار با حجم تردد فعلی در ساعت اوج ترافیک، در هر یک از مسیرهای رفت و برگشت پل صدر انجام شده‌است.

در رویکرد شرق به غرب پل صدر، حجم ترافیک به دست آمده از هر یک از شیب‌راهه‌های ورودی به روی عرشه‌ی اصلی پل صدر از روش مدل برنامه‌ریزی خطی تردد مطابق جدول ۸ به دست آمد. نتایج مدل بهینه‌سازی تردد به دلیل لحاظ کردن قیود مربوط تقاضای شیب‌راهه‌ها، نشان دهنده‌ی بیشینه حجم ترافیک ممکن با حفظ سطح خدمت‌دهی مطلوب می‌باشد. در روند حل معادله‌ی بهینه‌سازی تردد، حجم ورودی از شیب‌راهه‌ی کاوه صفر به دست آمده‌است. بدین معنا که انسداد مسیر فوق در ساعت ۷ الی ۸ صبح تاثیر مثبتی در حفظ جریان پایدار بر روی پل و انتشار آلاینده‌های کمتر خواهد داشت.

در رویکرد غرب به شرق پل صدر، نتایج به دست آمده طبق جدول ۱۰ از مدل برنامه‌ریزی خطی نشان می‌دهد حجم تردد از شیب‌راهه‌ی بزرگراه مدرس در صورت اعمال چرخه‌ی مناسب پایش

جریان کنونی در ساعت اوج ترافیک باعث کاهش ۴۲ درصد انتشار آلاینده‌ی مونواکسیدکربن می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری و جمع بندی

نتایج این پژوهش نشان داد به منظور دستیابی به کمترین میزان انتشار ممکن حاصل از تردد خودروهای بنزینی در پل صدر در مسیر شرق به غرب، مدیریت تقاضای حمل و نقل از طریق سیاست‌های بازدارنده مانند اعمال محدودیت دسترسی از شیب‌راهه‌ی بلوار کاوه در ساعت اوج ترافیک با حفظ سطح خدمت‌دهی مطلوب در عین حداکثر بهره‌وری از ظرفیت پل تاثیرگذار است. به طوری که در نتیجه‌ی اعمال محدودیت دسترسی در این مسیر و در ساعت اوج ترافیک آلاینده ذرات معلق به عنوان آلاینده شاخص ۴۳ درصد و آلاینده‌ی مونواکسیدکربن ۵۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در مسیر غرب به شرق اقدامات مدیریت شیب‌راهه و کنترل هوشمند جریان ورودی با اعمال برنامه‌ی مناسب پایش شیب‌راهه از بین چهار چرخه متداول در برنامه، در شیب‌راهه‌ی بزرگراه مدرس باعث پایداری جریان ترافیک روی پل و در نتیجه کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها به میزان ۳۵ درصد در انتشار ذرات معلق و ۴۲ درصد در انتشار مونواکسیدکربن می‌گردد. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند به مدیران شهری در اعمال سیاست‌های صحیح تردد در پل صدر و انتخاب برنامه مناسب انسداد روتین شیب‌راهه‌های دسترسی به آن به منظور کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از تردد، خصوصا در روزهای با شاخص آلاینده‌ی ناسالم کمک کند.

در این پژوهش تابع هدف کمینه کردن میزان انتشار ناشی از تردد در پل صدر در نتیجه‌ی استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی با محدودیت بقای جریان ترافیک در مقاطع دیگر می‌باشد. از اینرو پژوهش‌های بیشتری با ارائه مدل‌های ریاضی و دیگر روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از طرفی اعمال اقدامات مدیریت تقاضای حمل و نقل در هر یک از شیب‌راهه‌های ورودی می‌تواند منجر به تغییر الگوی تردد از معابر اطراف شود. به علت اعمال محدودیت‌های دسترسی و انحراف تقاضا از شیب‌راهه‌ی مربوطه به روی پل صدر، مقاطع موازی جهت دسترسی به پل زیر بار ترافیک خواهند رفت. به این صورت که خودروهایی که برای ورود به روی پل در صف ورودی به شیب‌راهه منتظر هستند، به دلیل افزایش زمان

تاخیر منصرف شده و از صف خارج شوند. در نتیجه حجم ترافیک به مقاطع بالقوه دیگر منتقل می‌گردد. این موضوع ممکن است به مرور باعث تغییر تقاضای تردد از شیب‌راهه‌ی مذکور شود. ولی کاهش حجم ترافیک و برقراری پایداری جریان ترافیک در روی پل و به دنبال آن کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها که تمرکز اصلی مطالعه بر روی آن بوده‌است، در درصد زیادی از خودروهای عبوری نسبت به خودروهایی که مسیرهای جایگزین را انتخاب کرده‌اند، تاثیرگذار است. همچنین اعمال محدودیت دسترسی برای بخشی از استفاده‌کنندگان وسایل نقلیه در این مسیر می‌تواند باعث ترغیب آن‌ها به استفاده از وسایل نقلیه عمومی گردد و یا بخش دیگر به تغییر زمان سفر خود به ساعات دیگری در نتیجه‌ی اعمال محدودیت‌ها در ساعت اوج ترافیک که به توزیع ترافیک در ساعات دیگر و کاهش میزان انتشار در ساعات بحرانی منجر می‌شود، روی آورند. از طرفی مدل‌سازی وضعیت ترافیک و تخمین میزان انتشار در شبکه اطراف می‌تواند به برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

در این پژوهش، به علت عدم وجود اطلاعات به روز از ناوگان عبوری از روی پل صدر، سهم خودروهای دوگانه‌سوز و درصد کم خودروهای با سیستم سوخت‌رسانی پاشش مستقیم سوخت، این موارد در تخمین میزان انتشار بررسی نشده‌است. از اینرو لحاظ کردن این موارد در فایل ناوگان مدل تخمین انتشار، می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منجر شود.

در مدل‌سازی تخمین انتشار آلاینده‌های ناشی از تردد و محاسبه‌ی جریان ورودی، شیب‌راهه‌های دسترسی به صدر همسطح در هر دو رویکرد شرق به غرب و غرب به شرق پل صدر، به دلیل طراحی آن‌ها برای شرایط اضطراری بررسی نشده‌است. پژوهش‌های بیشتر با در نظر گرفتن رفتار رانندگان در شرایط بحرانی و استفاده از این شیب‌راهه‌ها می‌تواند در تسهیل مدیریت ترافیک در شرایط بحران تاثیرگذار باشد. همچنین مدل‌سازی میزان انتشار آلاینده‌ها در این پژوهش در فصل سرد که غالبا بحران آلودگی هوا تشدید می‌گردد، انجام گرفته‌است. از آنجا که در این فصول غالبا از سیستم تهویه‌ی مطبوع استفاده نمی‌شود، تاثیر سیستم تهویه‌ی مطبوع در خودروها صفر در نظر گرفته شده‌است. از اینرو مطالعات بیشتری در خصوص مدل‌سازی میزان انتشار با در نظر گرفتن استفاده از سیستم تهویه در خودروها در

- [8] J. Robinson, P. Gary Ramp metering status in North America: 1995 update., Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, (1995).
- [9] H. Oliver, K. Gallagher, M. Li, K. Qin, J. Zhang, H. Liu, K. He, In-use vehicle emissions in China: Beijing study, 2009.
- [10] M. Shafie-Pour, A. Tavakoli, On-Road Vehicle Emissions Forecast Using IVE Simulation Model, International Journal of Environmental Research, (2)7 376-367 (2013).
- [11] J. Du, Q. Li, F. Qiao, Impact of Different Ramp Metering Strategies on Vehicle Emissions Along Freeway Segments, 2018.
- [12] L. Huan, H. Kebin, Traffic Optimization: A New Way for Air Pollution Control in China's Urban Areas, Environmental Science & Technology, (2012) (11)46 5661-5660.
- [13] R.W. Atkinson, B. Barratt, B. Armstrong, H.R. Anderson, S.D. Beevers, I.S. Mudway, D. Green, R.G. Derwent, P. Wilkinson, C. Tonne, F.J. Kelly, The impact of the congestion charging scheme on ambient air pollution concentrations in London, Atmospheric Environment, 5500-5493 (2009) (34)43.
- [14] M. Habibian, M. Ostad Jafari, Assessing the role of transportation demand management policies on urban air pollution: A case study of Mashhad, Iran, in: U.S.-Iran Symposium on Air Pollution in Megacities, National Academies of Sciences and Engineering, Beckman Center in Irvine, CA, 5-3th Sep, CA, USA., 2013.
- [15] S. Dibaj, M. Habibian, Effect of cordon pricing on air pollution (Case study: commuting trips to the central part of Tehran), in: The 3rd National Conference On Air & Noise Pollution Management, Sharif University of Technology, 14 January 15 - 2015 January 2015.
- [16] M. Shojaei Zade, M. Habibian, A. Bakhtiari, Gasoline-powered motorcycles and air pollution restriction: A stated preference survey on commuter's willingness to use shared electric motorcycles, in: 98th Transportation Research Board (Trb) Annual Meeting,

سایر فصول می‌تواند به نتایج جامع‌تر منجر شود.


## ۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت کنترل ترافیک تهران و مرکز کنترل ترافیک تونل نیایش و بزرگراه طبقاتی شهید صدر که با در اختیار گذاشتن اطلاعات ترافیکی پل صدر در پیشبرد این پژوهش نقش داشته‌اند، اعلام می‌نماید.

## ۷- منابع

- [1] K. Ahn, H. Rakha, A field evaluation case study of the environmental and energy impacts of traffic calming, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 424-411 (2009) (6)14.
- [2] M. Habibian, A. Rezaei, Accounting for systematic heterogeneity across car commuters in response to multiple TDM policies: case study of Tehran, Transportation, 700-681 (2017) (4)44.
- [3] A.R. Mamdouhi, B. Shirgir, Z. Ebadi Shivyari, Optimization of Highway Traffic Performance by Ramp Metering Control Method Using Mathematical Model, in: 11th International Railway Transportation Conference, Railway Transportation Association, 2009.
- [4] M. Habibian, K. Khanali, M. Shanazari, Assessing the effect of cordon pricing policy on emission reduction benefit in central Isfahan, in, 2018.
- [5] M. Khalili, H. Khaksar, A. Khorashahi, Controlling city traffic using aimsun simulation software, in: 5th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, 2010.
- [6] M. Kermanshah, H. Pourzahedi, H. Zarei, Assessment of Transport Demand Management Policies to Improve Urban Traffic Situation, Conference on the Economic Dimension of Transportation and Urban Transport, Tehran, 2011
- [7] M. Habibian, M. Kermanshah, Policies to reduce car usage for work trips to central part of the city of Tehran, in: Seminar On Dimensions Of Urban Transportation, Iran , 23 October 2013

- Washington, D.C. : Transportation Research Board, c2010 , -2010.
- [22] A. Rasooli, M. Safarzade, Optimized traffic managment by intelligent acquisition of tolls in intra-city passages (case study Sadr Overpass), in: first conference of Intelligent Transportation Systems in Tehran, the Ministry of Transportation and Road Administration, 2013.
- [23] M. Mir Mohammadi, Effects of public transportation development on reducing air pollution in terms of indicators, Report of Study and Planning Organazation of Tehran, 2016.
- [24] M. Naderi, V. Hosseini, Monitoring the quality of gasoline and diesel fuel in Tehran, Technical Report of the Air Quality Control Company, 2014-2011.
- United States, 2018.
- [17] S. Afandizadeh Zargari, M. Hajian, Evaluation of different options of transportation system in Tehran to reduce air pollution, International Journal of Industrial Engineering and Production Management, (3)12 116-101 (2001).
- [18] P. Arzhang, N. Hamidi, Providing an MCDM model for air pollution in Tehran, in: Second National Conference on Air Pollution and Sound Management, Sharif University of Technology, 2012.
- [19] Tehran Traffic Control Company - Tehran Municipality, in.
- [20] A. Azar, Operational Research (1) (Public Administration, Business, Accounting), 1964.
- [21] HCM 2010 : highway capacity manual, Fifth edition.

<p>چگونه به این مقاله ارجاع دهیم</p> <p><i>Alisoltani T., Shafiepour M., Ashrafi KH., Habibian M. (2020). A Traffic Optimization Model Considering Air Pollution Reduction (Case Study: Sadr Overpass). Amirkabir J. Civil Eng.,52(10): 1-14.</i></p> <p>DOI: <a href="https://doi.org/10.22060/ceej***">10.22060/ceej***</a></p>	
---	--