

مدل سازی عوامل مؤثر بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی در

مواجهه با بسته سیاست های مدیریت تقاضای حمل و نقل

(مطالعه موردی: حاشیه مرکز شهر تهران)

محمد بافنده، دانشجوی دکتری حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
محمود خانی الموتی، دانشجوی دکتری حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

میقات حبیبیان (مسئول مکاتبات)، دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: habibian@aut.ac.ir

امین معین الدینی، دکتری حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

مدیریت تقاضای حمل و نقل یکی از ابزارهای اصلی سیاست گذاران شهری برای کاهش ازدحام ترافیک، مصرف انرژی و پیامدهای زیست محیطی ناشی از استفاده گسترده از سواری شخصی است. با این حال، موفقیت این سیاست ها تا حد زیادی به واکنش رفتاری کاربران و تمایل آن ها به تغییر شیوه سفر وابسته است. این پژوهش با هدف بررسی اثر بسته سیاست های مدیریت تقاضای حمل و نقل بر تمایل به تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی انجام شده است. دو سیاست دفعی (قیمت گذاری ورود به محدوده و قیمت گذاری پارکینگ) و دو سیاست جذبی (کاهش زمان دسترسی و زمان سفر سیستم حمل و نقل همگانی) بررسی شدند. محدوده مطالعه، در حاشیه مرکز شهر تهران واقع شده و داده ها از طریق مصاحبه حضوری در این محدوده و در قالب آزمایش رجحان بیان شده جمع آوری گردید. در نهایت، بر اساس ۵۴۴ داده پاک سازی شده، یک مدل لوحیت برای بررسی عوامل مؤثر بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی توسعه یافت. نتایج مدل نشان داد که سیاست افزایش قیمت ورود به محدوده احتمال تغییر شیوه سفر از سواری شخصی به سایر شیوه ها را افزایش می دهد و کاهش زمان دسترسی به حمل و نقل همگانی اثر معناداری بر کاهش استفاده از سواری شخصی دارد. علاوه بر این، قرار داشتن فرد در گروه سنی ۳۵ تا ۵۴ سال، داشتن تحصیلات بیشتر از کارشناسی، داشتن شغل تمام وقت، بیشتر بودن مجموع ارزش خودروهای خانوار و داشتن پارکینگ اختصاصی در محل کار، احتمال تغییر شیوه سفر از سواری شخصی را کاهش می دهد. در مقابل، داشتن شغل دوم و مالکیت موتورسیکلت در خانوار، با احتمال بیشتر تغییر شیوه سفر همراه است.

واژه های کلیدی: بسته سیاستی، مدیریت تقاضای حمل و نقل تهران، تغییر شیوه سفر، مدل لوحیت

۱. مقدمه

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مشکل ازدحام ترافیک عمدتاً در ساعات اوج صبح و عصر و در محدوده‌های مرکزی شهرها بروز می‌یابد، درحالی‌که در سایر زمان‌ها و نواحی، سطح نارضایتی شهروندان به مراتب کمتر است. از این رو، در این پژوهش تمرکز بر مدیریت تقاضای استفاده از سواری شخصی برای سفرهای کاری شاغلان در محدوده مرکزی شهر تهران در ساعات اوج ترافیک قرار دارد.

هدف این مقاله، تحلیل عوامل واقعی^۱ مؤثر بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی در مواجهه با بسته‌ای از سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل در شهر تهران است. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصل از پرسش‌نامه و به کارگیری مدل لوجیت دوگانه، احتمال تغییر رفتار سفر کاربران در برابر اجرای بسته‌های سیاستی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود فرآیند طراحی و بازنگری سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل در کلان‌شهرها مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به موارد فوق پرسش‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

(۱) کدام یک از سیاست‌های مدیریت تقاضای مورد بررسی، اثر معناداری بر تغییر شیوه سفر کاربران دارند؟

(۲) عوامل واقعی مؤثر بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی در مواجهه با این سیاست‌ها کدام هستند؟

در ادامه این مقاله، در بخش ۲ ادبیات پژوهش بررسی می‌شود. بخش ۳ به روش‌شناسی اختصاص داشته و در این بخش، شیوه طراحی بسته سیاست‌ها، طرح آزمایش و توسعه مدل لوجیت، ارائه می‌شود. در بخش ۴، نتایج توسعه مدل و یافته‌های پژوهش بیان شده و در نهایت این مقاله در بخش ۶ (جمع‌بندی و نتیجه‌گیری) به پایان می‌رسد.

۲. ادبیات پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه مدیریت تقاضای حمل و نقل به بررسی اثر سیاست‌هایی نظیر قیمت‌گذاری، توسعه حمل و نقل همگانی، محدودیت تردد و سیاست‌های زیست‌محیطی بر رفتار سفر شهروندان پرداخته‌اند. این مطالعات با بهره‌گیری از رویکردهای

حمل و نقل یکی از نیازهای اساسی بشر برای انجام فعالیت‌هایی نظیر کار، تحصیل، خرید و تفریح است. با این حال، شیوه‌های مختلف حمل و نقل، علاوه بر ارائه خدمات جابه‌جایی، پیامدهای منفی متعددی از جمله آلودگی هوا، آلودگی صوتی، ازدحام ترافیک و مصرف منابع تجدیدناپذیر را به همراه داشته‌اند. بروز این پیامدها به‌ویژه در شهرها، به‌عنوان کانون‌های تمرکز جمعیت و فعالیت، بیانگر عدم مطلوبیت وضعیت موجود نظام حمل و نقل شهری است. از این رو، شناسایی و به کارگیری سیاست‌هایی که بتوانند این مشکلات را کاهش دهند، به یکی از چالش‌های اصلی برنامه‌ریزی حمل و نقل شهری تبدیل شده است.

امروزه ازدحام ترافیک در کلان‌شهرهای ایران، به‌ویژه شهر تهران، به معضلی جدی بدل شده است. شهر تهران با جمعیتی حدود ۹/۹ میلیون نفر و مساحتی برابر با ۷۵۱ کیلومتر مربع، روزانه میزبان ۲۰/۶ میلیون سفر سواره است که بخش قابل توجهی از آن‌ها در شرایط ترافیکی سنگین و سطوح خدمت پایین (E و F) انجام می‌شود. در راستای مقابله با این وضعیت، سیاست‌هایی نظیر قیمت‌گذاری ورود به محدوده‌های مرکزی شهر به اجرا درآمده است؛ با این حال، همچنان ازدحام ترافیک در این محدوده‌ها پابرجاست و کفایت سیاست‌های اعمال شده محل پرسش است.

از آنجاکه رفتار سفر شهروندان نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ازدحام ترافیک دارد، شناخت عوامل مؤثر بر این رفتار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شیوه‌های مختلف سفر سهم یکسانی در ایجاد پیامدهای منفی حمل و نقل ندارند. به‌عنوان مثال، استفاده از سواری شخصی نسبت به سامانه‌های حمل و نقل همگانی، هزینه‌های بیشتری از نظر ازدحام ترافیک به ازای هر مسافر جابه‌جا شده به شهر وارد می‌کند. بر این اساس، سیاست‌گذاران حمل و نقل همواره به دنبال طراحی و اجرای سیاست‌هایی بوده‌اند که بتوانند موجب کاهش استفاده از سواری شخصی و تغییر شیوه سفر شهروندان شوند.

تحلیلی متنوع، تلاش کرده‌اند عوامل مؤثر بر کاهش استفاده از سواری شخصی و افزایش استفاده از شیوه‌های حمل‌ونقل پایدار را شناسایی کنند. در بخشی از این مطالعات، از رویکردهایی همچون مدل‌های معادلات ساختاری و تحلیل‌های نگرشی برای بررسی روابط میان متغیرهای پنهان، نگرش شهروندان و سیاست‌های حمل‌ونقلی استفاده شده است. ازجمله این مطالعات می‌توان به پژوهش انجام‌شده توسط ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ اشاره نمود که در آن با استفاده از مدل معادلات ساختاری نشان دادند که درک شهروندان از اثربخشی سیاست‌ها، محل سکونت و دسترسی به حمل‌ونقل همگانی، تأثیر معناداری بر مقبولیت سیاست قیمت‌گذاری ورود به محدوده مرکزی دارد. همچنین تالر و همکاران در همان سال با به‌کارگیری مدل معادلات ساختاری در کشور اتریش، نشان دادند که عواملی نظیر عدالت ادراک‌شده، اعتماد به نهادهای حکمرانی و نگرش‌های زیست‌محیطی، نقش مهمی در مقبولیت سیاست‌های قیمت‌گذاری حمل‌ونقل ایفا می‌کنند. این دسته از مطالعات عمدتاً بر تحلیل روابط علی میان متغیرهای نگرشی و رفتاری تمرکز داشته و درک مناسبی از سازوکارهای نظری شهروندان ارائه می‌دهند.

درعین‌حال، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های حوزه مدیریت تقاضای حمل‌ونقل، به‌ویژه در زمینه تحلیل انتخاب‌های واقعی افراد، بر استفاده از مدل‌های انتخاب گسسته، به‌ویژه مدل‌های لوجیت، متمرکز بوده‌اند و این مدل‌ها به سبب توانایی بالا در تحلیل تصمیم‌های انتخابی، انعطاف‌پذیری در ورود متغیرهای فردی و سفر و قابلیت تفسیر مستقیم ضرایب، همواره به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارها در تحلیل رفتار سفر محسوب می‌شوند. در همین راستا، هارینگتون و همکاران در سال ۲۰۰۱ با استفاده از مدل پروبیت دوگانه، مقبولیت سیاست قیمت‌گذاری تراکم ترافیک را در شهر لس‌آنجلس بررسی کردند و نشان دادند که عواملی نظیر سطح هزینه، درآمد، مالکیت خودرو و ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی نقش تعیین‌کننده‌ای در مقبولیت

این سیاست دارند. خلیلی‌خواه و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ با بهره‌گیری از مدل لوجیت ترتیبی، به بررسی عوامل مؤثر بر مقبولیت افزایش قیمت بنزین در شهر تهران پرداختند و نشان دادند که متغیرهایی نظیر جنسیت، تحصیلات، تعداد افراد خانوار و الگوی سفر تأثیر معناداری بر مقبولیت این سیاست دارند.

در مطالعه‌ای دیگر، ابولیبده با استفاده از مدل لوجیت ترتیبی، عوامل مؤثر بر مقبولیت سیاست قیمت‌گذاری ورود به محدوده مرکزی شهر ابوظبی را بررسی کرده و نشان داد که زمان و مسافت سفر، سطح درآمد، وضعیت اشتغال و میزان هزینه پرداختی، ازجمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری شهروندان به شمار می‌روند. همچنین مرازی و همکاران در سال ۲۰۲۲ با به‌کارگیری مدل‌های لوجیت و پروبیت، تأثیر ویژگی‌های فردی و اقتصادی بر مقبولیت سیاست‌های کنترلی ترافیک در شهر حیدرآباد هند را موردبررسی قرار دادند. لئونگ و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۲۴ با استفاده از یک مدل انتخاب گسسته پویا نشان دادند که تصمیمات انتخاب شیوه سفر، تحت تأثیر انتظارات آینده و زنجیره سفرهای روزانه قرار دارد و تحلیل پویای رفتار سفر می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل ایفا کند. از دیگر مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به مطالعه انجام‌شده توسط معین‌الدینی و حبیبیان اشاره نمود که با بهره‌گیری از مدل لوجیت مختلط نشان دادند که ترکیب سیاست‌های قیمتی با بهبود خدمات حمل‌ونقل همگانی می‌تواند به‌طور معناداری مقبولیت اجتماعی سیاست‌ها را به‌ویژه در بین گروه‌های کم‌درآمد با افزایش مواجه کند. نتایج این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن ناهمگنی ترجیحات افراد در تحلیل سیاست‌های حمل‌ونقلی را برجسته می‌کند.

۳. روش پژوهش

در این بخش، روش پژوهش به‌منظور تحلیل عوامل عینی مؤثر بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی تشریح می‌شود. پژوهش شامل سه مرحله اصلی است: طراحی بسته سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل، طراحی پرسش‌نامه و جمع‌آوری

داده‌ها و در نهایت، توسعه مدل تمایل به تغییر شیوه سفر سواری شخصی. در ادامه این بخش، جزئیات هر یک از این مراحل تشریح شده است.

۳-۱ طراحی بسته سیاست‌های مدیریت تقاضای

حمل و نقل

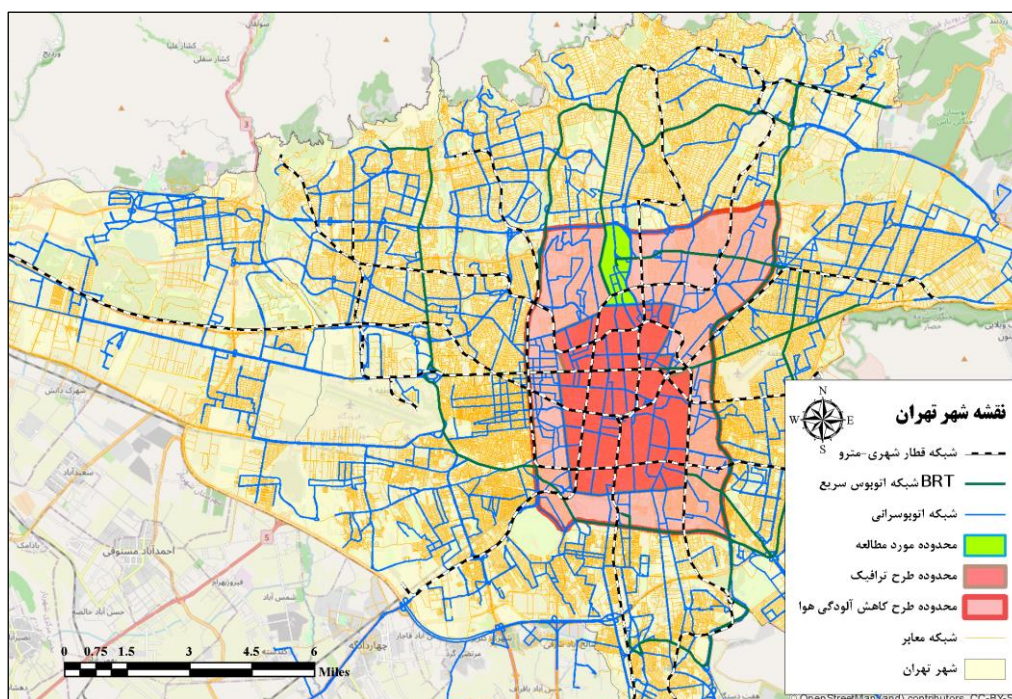
در این پژوهش، به منظور تحلیل تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی، بسته‌هایی از سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل طراحی شده است. فرآیند طراحی این بسته‌ها شامل تعیین محدوده مطالعه، شناسایی سیاست‌های بالقوه مؤثر بر کاهش استفاده از سواری شخصی و در نهایت انتخاب و ترکیب سیاست‌های قابل بررسی بر اساس ملاحظات اجرایی و شواهد تجربی مطالعات پیشین بوده است.

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش در بخش شمالی خارج از محدوده طرح ترافیک و بخش میانی محدوده طرح کاهش آلودگی هوای شهر تهران به مساحت تقریبی سه کیلومتر مربع واقع شده است. شکل ۱ محدوده مطالعه را نشان می‌دهد.

این محدوده به سه دلیل اصلی انتخاب شده است: نخست، سهم بالای جذب سفرهای شغلی نسبت به سایر نواحی شهر تهران؛

دوم، بروز ازدحام ترافیک شدید در ساعات اوج صبح، به گونه‌ای که زمان سفر در کمان‌های شبکه به طور متوسط به مراتب بیش از زمان سفر در جریان آزاد گزارش شده است؛ و سوم، وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در این ناحیه در مقایسه با میانگین شهر تهران بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا.

بر اساس مرور ادبیات پژوهش، سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل با تمرکز بر مؤلفه‌های هزینه و زمان سفر، به ویژه در قالب سیاست‌های ترکیبی، نقش مؤثری در تغییر شیوه سفر شهروندان ایفا می‌کنند. در این مطالعه، چهار سیاست اصلی شامل قیمت‌گذاری ورود به محدوده مطالعه، قیمت‌گذاری پارکینگ‌های حاشیه‌ای محدوده، کاهش زمان دسترسی به ایستگاه‌های حمل و نقل همگانی و کاهش زمان سفر با سیستم حمل و نقل همگانی مورد توجه قرار گرفته است. انتخاب این سیاست‌ها با توجه به سابقه اجرای آن‌ها در شهر تهران، امکان‌پذیری اجرایی، تمرکز تصمیم‌گیری در سطح شهرداری و همچنین شواهد تجربی مبنی بر اثربخشی سیاست‌های دفعی و جذبی در کاهش استفاده از سواری شخصی صورت گرفته است.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه در حاشیه مرکز شهر تهران

به منظور بررسی اثرات سیاست‌ها بر تغییر رفتار سفر، برای سه سیاست قیمت‌گذاری ورود به محدوده، قیمت‌گذاری پارکینگ و زمان سفر با حمل‌ونقل همگانی، سه سطح عملکرد متفاوت در نظر گرفته شد. همچنین برای سیاست کاهش زمان دسترسی به ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی، باتوجه به دامنه محدود تغییرات

و ملاحظات طراحی آزمایش، دو سطح تعریف گردید. ترکیب سطوح این سیاست‌ها منجر به شکل‌گیری ۵۴ سناریو می‌شود. سطوح و نوع عملکرد هر یک از سیاست‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. سطوح سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل در مطالعه‌ی موردی

ردیف	سیاست	نوع سیاست	مقادیر سطوح
۱	قیمت‌گذاری ورود به محدوده مطالعه	دفعی	۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ هزار تومان بر ورود
۲	قیمت‌گذاری پارکینگ‌های حاشیه‌ای محدوده مطالعه	دفعی	وضع موجود، ۲۵ و ۳۵ هزار تومان بر ساعت
۳	کاهش زمان دسترسی به حمل‌ونقل همگانی	جذب‌ی	وضع موجود و ۲۵٪ کاهش
۴	کاهش زمان سفر با سیستم حمل‌ونقل همگانی	جذب‌ی	وضع موجود، ۱۵٪ کاهش و ۳۰٪ کاهش

۳-۲ طرح آزمایش و گردآوری داده

به منظور سنجش هم‌زمان اثر سیاست‌های مختلف مدیریت تقاضای حمل‌ونقل بر تغییر شیوه سفر، طرح آزمایشی مبتنی بر روش رجحان بیان‌شده به کار گرفته شد. در این رویکرد، پاسخ‌دهندگان در معرض مجموعه‌ای از سناریوهای سیاستی قرار می‌گیرند که هر یک ترکیبی از سطوح مختلف سیاست‌ها را در بر می‌گیرد و از آن‌ها خواسته می‌شود واکنش رفتاری خود را در برابر هر سناریو بیان کنند. پاسخ‌دهنده در مواجهه با هر یک از سناریوهای سیاستی، درباره شیوه سفر مورد استفاده در سفر از منزل به محل کار خود، تصمیم‌گیری می‌کند.

طرح آزمایش در این پژوهش به گونه‌ای انجام شده است که ضمن تمرکز بر سیاست‌های منتخب مدیریت تقاضای حمل‌ونقل، تعادل مناسبی میان کاهش بار پاسخ‌دهی و حفظ توان توضیح‌دهندگی داده‌ها برای برآورد مدل‌های انتخاب برقرار شود. همان‌گونه که در بخش پیشین اشاره شد، ترکیب سطوح سیاست‌ها منجر به شکل‌گیری ۵۴ سناریو می‌شود. در این مطالعه، با در نظر گرفتن اثرات اصلی و اثرات متقابل مرتبه دوم سیاست‌ها، طرح آزمایشی شامل ۳۶ مجموعه انتخاب طراحی شد که در قالب شش بلوک مجزا توزیع گردید. این رویکرد ضمن کاهش تعداد پرسش‌های هر پاسخ‌دهنده، امکان برآورد پایای اثر

سیاست‌ها بر تصمیم تغییر شیوه سفر را فراهم ساخت. با توجه به محدودیت‌های عملی و به منظور جلوگیری از خستگی پاسخ‌دهندگان، ارائه تمامی این سناریوها به یک فرد امکان‌پذیر نبود. از این‌رو، از رویکرد طراحی آزمایش استفاده شد؛ به‌طوری‌که پس از طراحی آزمایش به روش کارا، سناریوها در قالب چند بلوک مستقل سازمان‌دهی شدند و هر پاسخ‌دهنده تنها با تعدادی از سناریوها تنها در بلوک مواجه گردید.

پس از تقسیم ۳۶ سناریوی سیاستی به شش بلوک، پرسش‌نامه نهایی برای گردآوری داده طراحی شد. این پرسش‌نامه شامل چهار بخش اصلی بود. بخش نخست به جمع‌آوری اطلاعات سفرهای روزانه پاسخ‌دهندگان با سواری شخصی و ویژگی‌های مرتبط با سفرها اختصاص داشت. در بخش دوم، هر پاسخ‌دهنده شش سناریوی سیاستی از بسته‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل را مشاهده و شیوه سفر خود در سفر کاری از منزل به محل کار را برای هر سناریو انتخاب می‌کرد. همچنین در این بخش، سؤالاتی با طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای برای سنجش نظر پاسخ‌دهندگان در خصوص جنبه‌های مختلف سیاست‌ها گنجانده شده است. بخش سوم شامل سؤالاتی با مقیاس لیکرت درباره دیدگاه‌های شهروندان نسبت به سفرهای کاری روزانه بوده و

بخش چهارم اطلاعات اجتماعی-اقتصادی مانند سن، جنسیت و وضعیت شغلی پاسخ‌دهندگان را در بر می‌گرفت.

گردآوری داده‌ها در دو مرحله آزمایشی و نهایی انجام شد. در مرحله آزمایشی، ۲۸ مصاحبه حضوری با افراد شاغل در محدوده مطالعه که در روز کاری قبل از سواری شخصی استفاده کرده بودند، انجام شد تا خوانایی و قابل‌درک بودن پرسش‌ها و بازه سطوح سیاست‌ها ارزیابی شود. بر اساس نتایج این مرحله، اصلاحاتی در پرسش‌نامه اعمال شد و نسخه نهایی حاصل شد. داده‌برداری نهایی از تاریخ ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۴ آغاز شد و در دو مرحله انجام گرفت: ابتدا ۳۷۲ مصاحبه حضوری در اردیبهشت و خرداد و پس از وقفه‌ای ناشی از شرایط اضطراری جنگ ۱۲ روزه، ۳۲۵ مصاحبه دیگر در شهریورماه انجام شد. در مجموع، ۶۹۷ پرسش‌نامه تکمیل شده به دست آمد.

۳-۳ مدل تمایل به تغییر سواری شخصی

پس از تهیه پایگاه داده نهایی، ساختار لجیت دوگانه برای شناسایی عوامل واقعی مؤثر بر تغییر شیوه سفر افراد در مواجهه با سیاست‌های مدیریت تقاضای طراحی شده، قابل استفاده است. در این ساختار، متغیر پاسخ، تغییر شیوه سفر پرسش‌شوندگان خواهد بود. بدین ترتیب، متغیر پاسخ حالتی دوگانه داشته و عدم تغییر شیوه سفر (استفاده از سواری شخصی) با عدد صفر و تغییر شیوه سفر (انتخاب هر گزینه دیگری به جز سواری شخصی) با عدد یک کدگذاری می‌شود. تعیین احتمال این پاسخ‌ها را می‌توان با رابطه (۱) نمایش داد:

$$P(y=1|x)=P(y=1|x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

برای پرهیز از محدودیت‌های مدل احتمال خطی، مدل پاسخ دوگانه به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$P(y=1|x)=G(\beta_0+\beta_1x_1+\dots+\beta_kx_k)=\frac{G(\beta_0+x\beta)}{G(\beta_0+x\beta)+G(\beta_0-x\beta)} \quad (2)$$

در رابطه فوق β بردار پارامترها بوده و G تابعی است که برای تمام اعداد حقیقی (z)، مقداری در بازه صفر تا یک دارد به طوری که $0 < G(z) < 1$. بدین ترتیب، احتمال‌های محاسبه شده در بازه صفر تا یک خواهند بود.

توابع غیرخطی متعددی به عنوان تابع G پیشنهاد شده‌اند. در مدل لجیت، G تابع لجستیک یا همان تابع توزیع تجمعی^۲ متغیر تصادفی لجستیک بوده و رابطه آن به صورت رابطه (۳) است:

$$G(z)=\exp(z)/[1+\exp(z)]=A(z) \quad (3)$$

برای تخمین پارامترهای مدل لجیت از روشی به نام برآیند درست‌نمایی بیشینه^۳ استفاده می‌شود. برای تخمین پارامترها در این روش، از تابع چگالی متغیر پاسخ استفاده می‌شود. برای نمونه‌ای با حجم n ، این تابع برای y_i به صورت رابطه (۴) است:

$$f(y_i|x_i;\beta)=[G(x_i\beta)]^{y_i}[1-G(x_i\beta)]^{1-y_i}, \quad y_i=0, 1 \quad (4)$$

در رابطه فوق، برای سادگی، مقدار ثابت در بردار x_i ادغام شده است. در این پژوهش، در صورت تغییر شیوه سفر توسط کاربر، y برابر با یک و در غیر این صورت، برابر با صفر در نظر گرفته شده است. لگاریتم تابع فوق برای مشاهده i ، تابعی از پارامترها و متغیرها (پاسخ و توصیفی) بوده و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$l_i(\beta)=y_i \log[G(x_i\beta)]+(1-y_i) \log[1-G(x_i\beta)] \quad (5)$$

با جمع رابطه فوق برای تمام مشاهدات، لگاریتم درست‌نمایی برای نمونه با حجم n حاصل می‌شود. در روش درست‌نمایی بیشینه، بردار پارامترها به گونه‌ای تخمین زده می‌شود که این مقدار، بیشینه گردد.

۴. تحلیل داده‌ها

۴-۱ آماده‌سازی داده‌ها و آمار توصیفی

پس از انجام مصاحبه‌های حضوری و گردآوری داده‌ها، کیفیت داده‌ها ارزیابی و اصلاحات لازم برای یکپارچه‌سازی پایگاه داده انجام شد. ابتدا اصلاحاتی بر ساختار ثبت داده‌ها صورت گرفت تا مقادیر وارد شده در پایگاه داده یکنواخت شوند. در ادامه، داده‌های دارای نواقص زیاد کنار گذاشته شدند و آزمون‌های منطقی بر پاسخ‌های هر شرکت‌کننده انجام شد تا کیفیت داده‌ها بررسی شود. در نهایت، پس از این مراحل، اطلاعات پاک‌سازی شده ۵۴۴ پرسش‌نامه برای استفاده در مدل‌سازی آماده شد. برای

ارائه تصویری از ویژگی‌های پاسخ‌دهندگان و سفرهای روزانه

آنان، آمار توصیفی داده‌ها در قالب جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. آمار توصیفی شرکت‌کنندگان در مصاحبه

ردیف	متغیر	سطوح	درصد در نمونه	درصد تغییر شیوه سفر
۱	جنسیت	مرد	7...	6...
		زن	2...	5...
۲	تحصیلات	کارشناسی یا پایین‌تر	7...	6...
		بالا‌تر از کارشناسی	2...	53
۳	سن	۱۸ تا ۳۴	48	6...
		۳۵ تا ۵۴	45	5...
		بیشتر از ۵۵	7	6...
۴	وضعیت اشتغال	تمام وقت	8...	5...
		پاره وقت	1...	6...
۵	وضعیت پارکینگ در محل کار	دارای پارکینگ اختصاصی	41	4...
		فاقد پارکینگ اختصاصی	59	6...
۶	مالکیت موتورسیکلت در خانوار	دارای موتورسیکلت	2...	7...
		فاقد موتورسیکلت	7...	5...

۲-۴ نتایج مدل تغییر شیوه سفر

یافت. جدول ۳ اطلاعات متغیرهای موجود در مدل را ارائه

می‌دهد. ضرایب برآورد شده مدل لجیت دوگانه نیز در جدول

۴ ارائه شده است.

مدل لجیت دوگانه با استفاده از متغیرهای سیاستی، ویژگی‌های

اجتماعی - اقتصادی و ویژگی‌های سفر پرسش‌شونده‌ها توسعه

جدول ۳. معرفی متغیرهای مدل لجیت دوگانه

نام متغیر	توضیح	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	پیشینه
<i>Y_ModeShift</i>	متغیر پاسخ - تغییر شیوه سفر در صورت اجرای سناریوی مدیریت تقاضا (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۵۹	۰/۴۹	۰	۱
<i>Entrance_fee</i>	هزینه ورود به محدوده مطالعه (هزار تومان)	۱۸۰	۸۱/۶۶	۸۰	۲۸۰
<i>Acc_time_eff</i>	زمان دسترسی کاهش یافته حمل و نقل همگانی برای افرادی که دسترسی به حمل و نقل همگانی داشته‌اند (دقیقه)	۱۴/۷۹	۱۲/۲۲	۰	۱۲۰
<i>Age_35_54</i>	سن شرکت‌کننده بین ۳۵ تا ۵۴ (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۴۵	۰/۵۰	۰	۱
<i>Edu2</i>	تحصیلات بیشتر از کارشناسی (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۲۵	۰/۴۴	۰	۱
<i>job_type</i>	نوع شغل (۰ = پاره وقت، ۱ = تمام وقت)	۰/۸۳	۰/۳۸	۰	۱

نام متغیر	توضیح	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	پیشینه
<i>Ljob</i>	داشتن شغل دوم (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۱۸	۰/۳۸	۰	۱
<i>Motor_ownership</i>	مالکیت موتورسیکلت (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۳۰	۰/۴۶	۰	۱
<i>Cars_value</i>	مجموع ارزش خودروهای تحت تملک خانوار (میلیون تومان)	۱۱۲۵/۴۱	۱۳۲۶/۸۶	۱۰۰	۱۳۴۴۰
<i>Job_parking</i>	داشتن پارکینگ اختصاصی در محل کار (۰ = خیر، ۱ = بله)	۰/۴۱	۰/۴۹	۰	۱

مشاهده می‌شود که تمام متغیرهای مستقل مدل، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، معنی‌دار هستند. در این مدل، متغیر وابسته *Y_ModeShift* برابر با یک، بیانگر کاهش استفاده از سواری شخصی و تغییر به شیوه‌های جایگزین است. از میان متغیرهای متناظر با چهار سیاست مدیریت تقاضای تعریف‌شده، دو متغیر مربوط به سیاست‌های قیمت‌گذاری ورود به محدوده و کاهش زمان دسترسی به حمل‌ونقل همگانی، معنی‌دار شده‌اند. متغیر *Entrance_fee* نشان می‌دهد که سیاست قیمت‌گذاری ورود به محدوده، احتمال تغییر شیوه سفر افراد را افزایش می‌دهد. متغیر *Acc_time_eff* نیز زمان دسترسی کاهش یافته (بر اساس سطح سیاست موردنظر) افراد به حمل‌ونقل همگانی را برای افرادی که در سفر از منزل به محل کار به حمل‌ونقل همگانی دسترسی داشته‌اند، نشان می‌دهد. ضریب منفی برای این متغیر بیانگر کاهش احتمال تغییر شیوه سفر، در صورت افزایش زمان دسترسی به حمل‌ونقل همگانی است که منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۴. نتایج مدل تغییر شیوه سفر

متغیر	ضریب	خطای استاندارد	آماره Z	P-value
پارامتر ثابت	۰/۰۹۵۰	۰/۱۴۲۵	۰/۶۷	۰/۵۰۵
<i>Entrance_fee</i>	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۰۵	۱۳/۶۹	۰/۰۰۰
<i>Acc_time_eff</i>	-۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۳۳	-۴/۶۴	۰/۰۰۰
<i>Age_35_54</i>	-۰/۳۵۷۸	۰/۰۷۸۰	-۴/۵۸	۰/۰۰۰
<i>Edu2</i>	-۰/۲۱۹۰	۰/۰۸۹۵	-۲/۴۵	۰/۰۱۴
<i>job_type</i>	-۰/۳۳۳۰	۰/۱۰۷۸	-۳/۰۹	۰/۰۰۲
<i>Ljob</i>	۰/۳۱۳۳	۰/۱۰۵۲	۲/۹۸	۰/۰۰۳
<i>Motor_ownership</i>	۰/۶۵۲۷	۰/۰۸۷۱	۷/۵۰	۰/۰۰۰
<i>Cars_value</i>	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	-۳/۰۷	۰/۰۰۲
<i>Job_parking</i>	-۰/۶۷۵۷	۰/۰۷۸۵	-۸/۶۱	۰/۰۰۰
تعداد مشاهدات	۳۲۶۴			
Log likelihood	-۱۹۷۶/۱۱۷			
Pseudo R2	۰/۱۰۳۷			

نتایج مدل نشان می‌دهد که افراد در گروه سنی بین ۳۵ تا ۵۴ سال در مقابل تغییر شیوه سفر در مواجهه با سیاست‌های طراحی شده، مقاومت نشان می‌دهند. بدین ترتیب، گروه سنی اشاره‌شده (افراد میان‌سال) دارای وابستگی رفتاری بالاتری به سواری

شخصی شناسایی شده‌اند و احتمال استفاده این افراد از سواری شخصی حتی در صورت اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا، بالا است. علاوه بر این، ضریب منفی متغیر *Edu2* نشان می‌دهد که داشتن تحصیلات بالاتر (کارشناسی ارشد و دکتری)، احتمال تغییر شیوه سفر و استفاده از شیوه‌های جایگزین (مانند حمل‌ونقل همگانی) را کاهش می‌دهد. این امر می‌تواند تا حدی به علت ارزش بیشتر زمان برای این افراد باشد. همچنین افرادی که در محل کار از پارکینگ اختصاصی برخوردار هستند، با احتمال کمتری سواری شخصی را با شیوه سفر دیگری جایگزین می‌کنند. ضریب منفی برای متغیر *job_type* و ضریب مثبت برای متغیر *Ljob* نیز نشان می‌دهد که افرادی که شغل تمام‌وقت دارند، کمتر مستعد تغییر شیوه سفر هستند اما در مقابل، افرادی که دارای شغل دوم هستند؛ در صورت اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا، استفاده از سواری شخصی را کاهش می‌دهند. این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که افراد دارای شغل تمام‌وقت، غالباً ساعت ورود و خروج مشخصی دارند و تأخیر در رسیدن به محل کار، برایشان هزینه در پی دارد. بدین ترتیب، این افراد به شیوه سفر سواری شخصی (که کنترل بیشتری بر آن دارند) تمایل بیشتری نشان می‌دهند. به علاوه، افرادی که دارای شغل دوم هستند، ممکن است به لحاظ مالی نسبت به اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا، حساسیت بیشتری داشته و به جای پرداخت هزینه مضاعف، از شیوه‌های سفر جایگزین استفاده نمایند. ضریب مثبت متغیر *Motor_ownership* نشان می‌دهد که افرادی که در خانوار خود، حداقل یک موتورسیکلت دارند، با احتمال بیشتری استفاده از سواری شخصی را کاهش می‌دهند. همچنین ضریب منفی برای متغیر *Cars_value* نشان می‌دهد که هرچه مجموع ارزش خودروهای تحت تملک خانوار فرد بیشتر باشد (نماینده وضع اقتصادی بهتر خانوار)، احتمال استفاده از سواری شخصی بیشتر می‌شود. در نهایت، ضریب منفی متغیر *Job_parking* به معنای آن است که افرادی که در محل کار، از پارکینگ اختصاصی برخوردار هستند (و بنابراین نیازی به پرداخت هزینه برای

پارکینگ ندارند)، با احتمال کمتری شیوه سفر خود را تغییر می‌دهند.

پس از توسعه مدل، عملکرد آن در پیش‌بینی تغییر شیوه سفر افراد از طریق محاسبه شاخص‌های متعددی ارزیابی گردید. شاخص درصد پیش‌بینی صحیح^۴، درصد داده‌هایی که توسط مدل به درستی دسته‌بندی شده‌اند را نشان داده و به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$Percent\ Correct = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (6)$$

در این رابطه، *TP* تعداد پیش‌بینی‌های مثبت صحیح، *TN* تعداد پیش‌بینی‌های منفی صحیح، *FP* تعداد پیش‌بینی‌های مثبت غلط و نهایتاً *FN* تعداد پیش‌بینی‌های منفی غلط است. خروجی مثبت به صورت «متغیر پاسخ برابر با یک» تعریف شده است. دو شاخص دیگری که برای ارزیابی عملکرد مدل به کار رفته‌اند عبارت‌اند از شاخص حساسیت^۵ و تشخیص پذیری^۶ که روابط (۷) و (۸) شیوه محاسبه آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \quad (8)$$

شاخص حساسیت نمایانگر توانایی مدل در شناسایی خروجی‌های مثبت (تغییر شیوه سفر) بوده و شاخص تشخیص پذیری نشان‌دهنده توانایی مدل در شناسایی خروجی‌های منفی (عدم تغییر شیوه سفر) است. جدول ۵ شاخص‌های ارزیابی را برای مدل لجیت برآورد شده نشان می‌دهد.

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی مدل لجیت دوگانه

ردیف	شاخص	مقدار
۱	درصد پیش‌بینی صحیح	۶۶/۶۷
۲	حساسیت	۸۰/۳۹
۳	تشخیص پذیری	۴۶/۶۱

مشاهده می‌شود که شاخص‌های ارزیابی عملکرد، قابل قبول بوده و مدل حدود ۶۷ درصد مشاهدات را به درستی دسته‌بندی می‌کند. حساسیت مدل حدود ۸۰ درصد است؛ بدین معنی که

مدل، ۸۰ درصد کاربرانی که شیوه سفر خود را تغییر داده‌اند، به‌درستی شناسایی می‌کند. به‌علاوه، تشخیص‌پذیری حدود ۴۷ درصدی مدل نشان می‌دهد که ۴۷ درصد افرادی که شیوه سفر خود را تغییر نداده‌اند، به‌درستی توسط مدل شناسایی شده‌اند. علاوه بر محاسبه شاخص‌های فوق، آزمون هاسمر-لمشو^۷ نیز با تقسیم داده‌ها به ده گروه انجام شده و نتیجه ($p\text{-value} = ۰/۵۹$) نشان داد شواهدی برای بدی برازش مدل وجود ندارد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل اثر سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل بر تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی، بسته‌های سیاستی متشکل از ابزارهای دفعی و جذبی را در قالب یک آزمایش رجحان بیان‌شده طراحی و با استفاده از مدل لجوجیت دوگانه مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاصل از برآورد مدل نشان داد که سیاست قیمت‌گذاری ورود به محدوده مطالعه، به‌عنوان یک سیاست دفعی، اثر معنادار و مثبتی بر افزایش احتمال تغییر شیوه سفر دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش هزینه ورود، تمایل افراد به کاهش استفاده از سواری شخصی افزایش می‌یابد. در مقابل، متغیر زمان دسترسی به حمل‌ونقل همگانی برای افرادی که امکان دسترسی به این سیستم را دارند، با ضریب منفی و معنادار ظاهر شد که بیانگر نقش کلیدی سهولت دسترسی به حمل‌ونقل همگانی در تغییر شیوه سفر کاربران سواری شخصی است.

علاوه بر سیاست‌های حمل‌ونقلی، نتایج مدل نشان داد که ویژگی‌های فردی و شغلی پاسخ‌دهندگان نقش مهمی در تصمیم تغییر شیوه سفر ایفا می‌کنند. به‌طور خاص، افراد میان‌سال، افراد با تحصیلات بالاتر، شاغلان تمام‌وقت و افرادی که در محل کار از پارکینگ اختصاصی برخوردار هستند، وابستگی بیشتری به استفاده از سواری شخصی نشان می‌دهند. در مقابل، متغیرهایی نظیر داشتن شغل دوم یا مالکیت موتورسیکلت در خانوار، احتمال کاهش استفاده از سواری شخصی را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که واکنش افراد به سیاست‌های مدیریت

تقاضا ناهمگن بوده و شدت اثر سیاست‌ها به ویژگی‌های اجتماعی - اقتصادی و شرایط سفر افراد وابسته است.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج این مطالعه بر ضرورت اجرای هم‌زمان سیاست‌های دفعی و جذبی تأکید دارد. قیمت‌گذاری به‌تنهایی می‌تواند انگیزه تغییر رفتار سفر را ایجاد کند، اما اثربخشی آن در نبود بهبود در مؤلفه‌های جذابیت حمل‌ونقل همگانی، به‌ویژه دسترسی مکانی، محدود خواهد بود؛ بنابراین، ترکیب ابزارهای محدودکننده استفاده از سواری شخصی با سیاست‌های بهبوددهنده کیفیت و دسترسی حمل‌ونقل همگانی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش وابستگی به سواری شخصی در سفرهای کاری شهری موردتوجه قرار گیرد. درعین‌حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. استفاده از داده‌های مبتنی بر رجحان بیان‌شده، تمرکز بر سفرهای کاری و به‌کارگیری یک متغیر پاسخ دوگانه به‌جای مدل‌های انتخاب چندجمله‌ای، ازجمله محدودیت‌هایی هستند که می‌توانند بر تعمیم‌پذیری نتایج اثرگذار باشند. براین‌اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، نقش متغیرهای نظری^۸ نظیر نگرش‌ها، هنجارهای اجتماعی و ادراک افراد از سیاست‌ها در کنار عوامل واقعی موردبررسی قرار گیرد. همچنین استفاده از مدل‌های انتخاب گسسته چندجمله‌ای و تحلیل ناهمگنی ترجیحات می‌تواند به درک دقیق‌تر رفتار تغییر شیوه سفر شهروندان کمک کند.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Objective factors
2. Cumulative Distribution Function (CDF)
3. Maximum Likelihood Estimation (MLE)
4. Percent correct
5. Sensitivity
6. Specificity
7. Hosmer-Lemeshow test
8. Subjective factors

۷. مراجع

- Schwartz SH (1977) Normative Influences on Altruism. In: *Advances in Experimental Social Psychology*. Academic Press, pp 221–279.
- Noor MdA, Ashrafi S, Fattah MdA, et al (2021) Assessment of traffic congestion scenario at the CBD areas in a developing city: In the context of Khulna City, Bangladesh. *Transp Res Interdiscip Perspect* 11:100435. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100435>
- Baghestani A, Tayarani M, Allahviranloo M, Gao HO (2020) Evaluating the Traffic and Emissions Impacts of Congestion Pricing in New York City. *Sustainability* 12:3655. <https://doi.org/10.3390/su12093655>
- Khalilikhah M, Habibian M, Heaslip K (2016) Acceptability of increasing petrol price as a TDM pricing policy: A case study in Tehran. *Transp Policy* 45:136–144. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.09.014>
- Hamre A, Buehler R (2014) Commuter mode choice and free car parking, public transportation benefits, showers/lockers, and bike parking at work: evidence from the Washington, DC region. *J Public Transp* 17:67–91.
- Lin B, Du Z (2017) Can urban rail transit curb automobile energy consumption? *Energy Policy* 105:120–127.
- Washbrook K, Haider W, Jaccard M (2006) Estimating commuter mode choice: A discrete choice analysis of the impact of road pricing and parking charges. *Transportation* 33:621–639.
- Zhang W, Liu C, Zhang H (2023) Public acceptance of congestion pricing policies in Beijing: The roles of neighborhood built environment and air pollution perception. *Transp Policy* 143:106–120.
- گزیده آمار حمل و نقل و ترافیک شهر تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک شهر تهران، ۱۴۰۲.
- طرح ترافیک و طرح کاهش آلودگی هوا. ۱۴۰۲، تاریخ دسترسی وبسایت: بهمن ۱۴۰۳.
- Chapman L (2007) Transport and climate change: a review. *J Transp Geogr* 15:354–367. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008>
- Briggs DJ, de Hoogh K, Morris C, Gulliver J (2008) Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution. *Environ Int* 34:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.06.011>
- Wang L, Xu J, Qin P (2014) Will a driving restriction policy reduce car trips?—The case study of Beijing, China. *Transp Res Part Policy Pract* 67:279–290. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.07.014>
- Hammadou H, Papaix C (2015) Policy packages for modal shift and CO2 reduction in Lille, France. *Transp Res Part Transp Environ* 38:105–116. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.008>
- Beaudoin J, Farzin YH, Lin Lawell C-YC (2015) Public transit investment and sustainable transportation: A review of studies of transit's impact on traffic congestion and air quality. *Res Transp Econ* 52:15–22. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.004>
- Shekarzifard M, Faghih-Imani A, Tetreault L-F, et al (2017) Modelling the Spatio-Temporal Distribution of Ambient Nitrogen Dioxide and Investigating the Effects of Public Transit Policies on Population Exposure. *Environ Model Softw* 91:186–198. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.007>

– Wooldridge JM (2018) Introductory Econometrics: Modern Approach, 7th ed.

– Thaller A, Fleiß E, Brohmer H, et al (2023) When perceived fairness and acceptance go hand in hand—Drivers of regulatory and economic policies for low-carbon mobility. *PLoS Clim* 2:e0000157.

– Harrington W, Krupnick AJ, Alberini A (2001) Overcoming public aversion to congestion pricing. *Transp Res Part Policy Pract* 35:87–105.

– Abulibdeh A (2022) Planning for congestion pricing policies in the middle east: public acceptability and revenue distribution. *Transp Lett* 14:282–297.

– Marazi NF, Majumdar BB, Sahu PK, Potoglou D (2022) Congestion pricing acceptability among commuters: An Indian perspective. *Res Transp Econ* 95:101180.

– Leong J, Nassir N, Mohri SS, Sarvi M (2024) A dynamic discrete choice modelling approach for forward-looking travel mode choices. *Transp Res Part Policy Pract* 190:104272.

– Moeinaddini A, Habibian M (2024) Acceptability of transportation demand management policy packages considering interactions and socio-economic heterogeneity. *Res Transp Econ* 103:101374.

<https://my.tehran.ir/%D9%BE%D8%B1%D8%B3%D8%B4-%D9%88-%D9%BE%D8%A7%D8%B3%D8%AE>

– (2020) Archive of Tehran Air Quality Index. Tehran Air Quality Control Co.

– Moeinaddini A, Habibian M (2023) Transportation demand management policy efficiency: An attempt to address the effectiveness and acceptability of policy packages. *Transp Policy* 141:317–330.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.07.027>