تحلیل ناهمگنی رفتار انتخاب وسیله با استفاده از مدل کلاس پنهان

مقاله پژوهشی

حمیدرضائی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

الناز ایران نژاد، دانش آموخته دکتری، دانشکده تجارت، اقتصاد و حقوق، دانشگاه کوئینزلند، کوئینزلند، استرالیا

امیررضا ممدوحی*، دانشیار، گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: armamdoohi@modares.ac.ir

دریافت: ۹۹/۱۱/۱۸- پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

صفحه ۷۴-۶۱

چکیده

در شهر تهران به منظور کاهش تردد به محدوده مرکزی شهر و در نتیجه کاهش آلودگی هوا، طرح مدیریتی قیمت‌گذاری عوارض در این منطقه از شهر اجرا می‌شود. در پژوهش حاضر، انتخاب وسیله افراد در محدوده طرح‌ترافیک، با توجه به سناریوهای ساعت مبنا بررسی شده است. جامعه آماری شامل ۱۳۸۸ پاسخ دهنده است که به دلیل پاسخ دادن هر شخص به سه سناریوی قیمتی ۴۱۶۴ مشاهده برای تحلیل موضوع مورد نظر فراهم شد. همچنین به‌منظور بررسی ناهمگنی در رفتار مسافران و تاثیر هزینه طرح ترافیک بر انتخاب وسیله گروه‌های مختلف، از مدل کلاس پنهان استفاده شده است. براساس نتایج مدل کلاس پنهان حساسیت گروه‌های مختلف نسبت به قیمت متفاوت است به گونه‌ای که در کلاسی که احتمال عضویت شاغلین بیشتر است، حساسیت نسبت به قیمت طرح ترافیک نیز کمتر است. محاسبه اثر حاشیه‌ای متغیر هزینه طرح ترافیک نشان می‌دهد، درصورتی‌که هزینه طرح ترافیک ۱۰۰۰ تومان زیاد شود، احتمال انتخاب گزینه خودرو شخصی به طور متوسط در سه کلاس ۰/۱۹۸۴ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انتخاب وسیله، محدوده طرح ترافیک، ناهمگنی، مدل کلاس پنهان

۱- مقدمه

از مهم‌ترین عوامل در توسعه اقتصادی یک کشور، توسعه حمل‌ونقل آن کشور است. سیستم حمل‌ونقل علاوه بر تاثیر بر شاخص‌های کلان یک کشور دارای تاثیرات بر ساختار شهری نیز می‌باشد. در مواردی تامین عرضه مناسب یا توسعه سیستم حمل‌ونقل نمی‌تواند بهترین گزینه جهت بهبود سیستم حمل‌ونقل تلقی شود چرا که ضمن داشتن هزینه‌های گزاف مالی و زمانی ممکن است با پیامدهای زیست محیطی نیز همراه باشند. این امر تنها با استفاده از ابزارهای مدیریتی ممکن است. یکی از این سیاست‌های مدیریتی، مدیریت تقاضای حمل‌ونقل است. در این‌صورت از استراتژی‌های قیمت‌گذاری در تسهیلات حمل‌ونقل استفاده می‌شود. در این سیاست راننده موظف است به‌منظور تردد در ناحیه موردنظر، هزینه‌ای را پرداخت نماید. از اوایل دهه ۱۹۶۰ مهندسین و برنامه‌ریزان حمل‌ونقل با به‌کارگیری مدیریت عرضه و تقاضا در سیستم حمل‌ونقل باعث کاهش مشکلات ناشی از افزایش اتومبیل‌ها در شهرها شده‌اند. در یک تقسیم‌بندی کلی، قیمت‌گذاری معابر به دو صورت خطی و سطحی تقسیم می‌شوند. در حالت خطی، برای یک معبر مشخص استفاده‌کنندگان باید عوارض مشخصی را بپردازند، در این حالت معبر جایگزینی نیز وجود دارد که مطلوبیت کمتری دارد. این سیاست باعث استفاده همزمان از دو معبر می‌شود. سطح استفاده از راه‌ها هنگامی مقدار بهینه پیدا می‌کند که هر سفری حداقل به اندازه هزینه اجتماعی حاشیه‌ای

آن سفر سودآوری داشته باشد، و از هیچ یک از سفرهایی که در این حد سودآوری دارند جلوگیری نشود. بر این مبنا، نظریه‌های اقتصادی و ریاضی تاکید دارند که میزان عوارض دریافتی از هر خودرو برابر با ارزش زمان تاخیر تحمیل شده به سایر خودروهای شبکه باشد. این موضوع به اصل قیمت‌گذاری برمبنای هزینه حاشیه‌ای یا روش قیمت‌گذاری اولین-بهترین معروف است. در بسیاری از موارد بالا به دلایل فنی، اقتصادی و همینطور مقبولیت عمومی، ممکن است مانع این شوند که تمام راه‌های شبکه قیمت‌گذاری شود، یا بتوان مقدار عوارض را به طور متناوب تغییر داد. به دلیل وجود چنین محدودیت‌هایی در عمل پیاده‌سازی قیمت‌گذاری به روش اولین-بهترین با دشواری‌هایی همراه است. به همین دلیل غالبا برای قیمت‌گذاری شبکه راه‌ها از روش دومین-بهترین استفاده می‌شود که در آن محدودیت‌های امکان‌پذیری نیز لحاظ می‌شود. ایجاد محدوده طرح ترافیک در راستای رسیدن به اهداف متنوعی اجرا می‌شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کاهش تراکم خودروها، کاهش آلودگی، بهبود سیستم حمل‌ونقل همگانی، کاهش میانگین زمان سفر کل سیستم و بهبود شرایط محیطی اشاره کرد، از سوی دیگر اجرای این طرح علاوه بر نکات مثبت، دارای اثرات منفی نیز خواهد بود. از جمله می‌توان به افزایش هزینه‌های زندگی، اعتراض صاحبان مشاغل داخل محدوده به دلیل کم شدن مشتری، ایجاد صف‌های طولانی قبل و بعد از تردد رایگان به محدوده و عدم اطمینان به سیستم حمل‌ونقل همگانی در سال‌های اولیه اجرای طرح اشاره کرد [May, 1986]. تبدیل سیستم‌های سنتی دریافت عوارض از استفاده‌کنندگان شبکه حمل‌ونقل (مانند مالیات سوخت، عوارض پارکینگ و تعرفه‌های خرید خودرو) به طرح‌های دریافت عوارض که ازنظر اقتصادی کارآمدتر است (قیمت‌گذاری تراکم)، یک اصلاح بنیادین است. چنین سیستم‌های دریافت عوارضی، می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر روی رفتار و انتخاب‌های رانندگان داشته باشد؛ تأثیر روی زمان عزیمت سفر یا انتخاب وسیله حمل‌ونقل در کوتاه مدت-که وابسته به کاربرد ویژه طرح قیمت‌گذاری است- و نیز تأثیر تغییر محل سکونت یا محل کار و همچنین سطح رفاه اشخاص در بلندمدت برخی از این تأثیرات هستند. بنابراین لازم است که پیش از پیاده‌سازی یک طرح قیمت‌گذاری جدید، تأثیرت آن طرح (مثلاً بر کاهش استفاده از خودروی شخصی) و همین‌طور مقبولیت عمومی آن، که در برخی موارد مهم‌ترین عامل پذیرفته شدن یک طرح است، تحلیل و پیش‌بینی شود [Li and Hensher, 2012]. علاوه بر این، از این مطالعات می‌توان جهت تعیین مقادیر ارزش زمان و برآورد تقاضا و همچنین در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی مرتبط با ارزیابی شبکه‌های حمل‌ونقل ازجمله مسائل تعیین قیمت عوارض بهینه و تعیین مناطق یا کمان‌های بهینه‌ی دریافت عوارض استفاده نمود. تکنیک رجحان بیان‌شده رویکرد عملی برای شناخت اثرات احتمالی یک دستاورد یا یک سیاست جدید، مانند قیمت‌گذاری و پاسخ‌های رفتاری به آن است. در یک مطالعه رجحان بیان‌شده از پاسخ‌دهنده درخواست می‌شود که از بین انتخاب‌های موجود، گزینه‌ای را که بیشتر ترجیح می‌دهد انتخاب کند (یا اینکه گزینه‌ها را رتبه‌بندی کند). این گزینه‌ها از مجموعه‌ای از سطوح ویژگی‌های موردبررسی، که بر اساس یک طراحی آزمایش درهر گزینه چیده می‌شوند، تشکیل‌شده‌اند. استفاده از طراحی آزمایش، به‌منظور بیشینه‌سازی دقت برآورد پارامترهای موردبررسی است. بنابراین می‌توان گفت که روش رجحان بیان‌شده برای بازسازی انتخاب‌های حقیقی با درجه زیادی از واقع‌گرایی، طراحی‌شده است[Tillema et al, 2010]. اولویت‌دهی ذاتی فرد در پاسخ‌گویی به اثر متغیرهای مختلف مانند سطح خدمت و یا خصوصیات سفر، انتخاب وسیله او را تحت تأثیر قرار می‌دهد [Bhat, 2003]. این امر ناهمگنی در انتخاب شیوه حمل‌ونقل را می‌رساند. یکی از متداول‌ترین فرآیندها در بررسی تقاضای حمل‌ونقل، فرآیند چهارمرحله‌ای کلاسیک است. سومین مرحله از این فرآیند، تفکیک سفر است که اطلاعات لازم برای تخصیص سفر را آماده می‌کند. این مرحله به دلیل داشتن متغیرهای سیاست‌پذیر نقش موثری در سیاست‌گذاری حمل‌ونقل دارد [Ortuzar and Willumsen, 2011].

در پژوهش حاضر، انتخاب وسیله افراد در محدوده طرح‌ترافیک، با عوارض متغیر نسبت به‌وقت روز بررسی می‌شود. برای این منظور از داده‌های رجحان بیان‌شده استفاده می‌شود (عوارض ورود به محدوده طرح ترافیک با خودرو شخصی در سه سناریو قیمتی ارائه‌شده است). همچنین به‌منظور بررسی ناهمگنی در رفتار مسافران و تاثیر هزینه طرح ترافیک بر انتخاب وسیله گروه‌های مختلف، از مدل کلاس پنهان استفاده می‌شود.

۲ - پیشینه تحقیق

در مطالعات مربوط به قیمت‌گذاری موضوعات مختلفی بررسی شده است. آبلز و ورهوف (۲۰۰۷) تاثیر قیمت‌گذاری تراکم را روی میزان استفاده از خودرو شخصی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش آن‌ها از سه معیار اصلی برای معرفی به رانندگان استفاده کردند. در این معیارها مصرف درآمدها در چهاربخش شامل حذف مالیات مالکیت خودرو و خرید خودرو، ساخت راه‌های جدید و کمک به افراد کم درآمد در پرداخت مالیات پیشنهاد شد. در این مطالعه مشاهده شد که در اثر قیمت‌گذاری تراکم، میزان استفاده از خودرو شخصی به طور متوسط ۱۱ درصد کاهش می‌یابد و این میزان کاهش برای سفرهای غیرکاری از سفرهای کاری بیشتر است [Ubbels and Verhoef, 2007]. آبلز و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه دیگری جهت برآورد ارزش کاهش زمان سفر مثل ارزش زمان زودتر رسیدن یا برنامه‌ریزی برای رسیدن با تاخیر از آزمایش رجحان بیان شده استفاده کردند. در این پژوهش هر یک از پاسخ‌دهندگان باید از بین چهار گزینه که شامل وسیله حمل‌ونقل، مسیرهای مختلف، وقت انجام سفر و ویژگی‌های دیگر (مانند زمان سفر، وقت رسیدن، تغییر پذیری زمان و هزینه) بود، یکی را انتخاب می‌کردند. در این راستا دو نوع هزینه سفر در نظر گرفته شد؛ یکی هزینه سوخت خودرو و دیگری هزینه عوارض برای طرح قیمت‌گذاری تراکم مسافت-مبنا با عوارض یکنواخت. در این مطالعه، ناهمگونی در رفتار، در مقادیر تمایل به پرداخت مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان مثال، پاسخ‌دهندگانی که زمان شروع کارشان معین بود، تمایل به داشتن مقدار ارزش زمان زودتر رسیدن و ارزش زمان با تاخیر رسیدن از پیش برنامه‌ریزی شده بیشتری دارند. همچنین مقدار ارزش زمان زودتر رسیدن برای پاسخ‌دهندگانی که وقت انجام سفرشان معین است، بیشتر است. همچنین در پاسخ‌های رفتاری، با استفاده از پارامترهای مجزا برای هزینه سوخت و عوارض، بین هزینه سوخت و هزینه عوارض تراکم، تفاوت در نظر گرفته شد [Ubbels et al, 2005]. اگراوال و نیکسون (۲۰۱۱) با انجام پیمایش نظر بیان شده، نظر مردم آمریکا را در مورد طرح قیمت‌گذاری تراکم مسافت مبنا با دو گزینه جمع‌آوری کردند. گزینه اول شامل عوارض یک سنت بر مایل برای تمام خودروها و گزینه دوم عوارض وابسته به نوع خودرو با میانگین یک سنت بر مایل برای هر خودرو می‌شد. سناریوهای قیمت‌گذاری دیگری مانند افزایش مالیات سوخت نیز در پژوهش آن‌ها در نظر گرفته شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عوارض مسافت مبنای یکنواخت با ۲۱ درصد کمترین طرفدار و عوارض وابسته به نوع خودرو با ۳۳ درصد بیشترین طرفدار را دارد [Agrawal and Nixon 2011]. چن و همکاران (۲۰۱۸) ، تأثیر طرح ترافیک را بر انتشار گازهای آلاینده و تغییر زمان حمل بار بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد، قیمت‌گذاری در کاهش انتشار آلاینده‌ها، افزایش زمان سفر و همچنین کاهش حجم ترافیک مؤثر است [Chen et al, 2018]. کوستر و همکاران (۲۰۱۸) قیمت‌گذاری به روش اولین-بهترین و دومین-بهترین را با توجه به ناهمگنی بررسی کردند. آن‌ها همچنین توانستند ناهمگنی را در زمان سفر پیدا کنند[Koster et al, 2018]. مطالعات متعددی در زمینه کلاس پنهان انجام‌شده است. لی و همکاران (۲۰۰۳)، رفتار انتخاب وسیله را تحت تأثیر اطلاعات ترافیکی با استفاده از مدل کلاس پنهان بررسی کردند. هدف اصلی این مطالعه سنجش پاسخگویی برای اطلاعات ترافیکی عرضه‌شده درباره اطلاعات سفرهای تأخیری بود[Lee et al, 2003]. شاهید و کریتزا (۲۰۱٤)، از مدل کلاس پنهان برای بررسی پارامترهای مؤثر در نتایج شدت تصادفات در تصادفات موتورسیکلت استفاده کرد[Shaheed and Gkritza, 2014]. کیم و مختاریان (۲۰۱۸) با استفاده از مدل کلاس پنهان، مالکیت خودرو شخصی و ناهمگنی در رفتار مسافران را بررسی کرده است[Kim and Mokhtarian, 2018]. در برخی مطالعاتی مدل لوجیت ترکیبی را با مدل کلاس پنهان مقایسه کرده‌اند. گرین و هنشر (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای مربوط به انتخاب مسیر سفر برای مسافت‌های طولانی در کشور نیوزلند مدل کلاس پنهان را با مدل لوجیت ترکیبی مقایسه کرد [Greene and Hensher, 2003]. شن (۲۰۰۹)، تفاوت بین مدل لوجیت ترکیبی و کلاس پنهان را با استفاده از دو مجموعه دیتا از ژاپن بررسی کرده است. نتایج نشان داد، مدل کلاس پنهان برای هر دو مجموعه داده، نتایج بهتری دارد[Shen, 2009]. سرویک و همکاران(۲۰۱٤) به‌منظور بررسی شدت تصادفات کامیون‌های سنگین و عوامل مؤثر بر آن از مدل لوجیت ترکیبی و مدل کلاس پنهان استفاده کردند. همچنین برای یافتن ناهمگنی مشاهده نشده افراد، مقایسه‌ای بین این دو مدل انجام داده‌اند[Cerwick et al, 2014].

۳- روش شناسی پژوهش

به‌طورکلی می‌توان گفت که انسان‌ها در انجام فعالیت‌های روزمره خود ناگزیر از انتخاب بین دو یا چند گزینه هستند و این انتخاب می‌تواند هوشیارانه و یا ناخودآگاه باشد و باید توجه داشت که عدم انتخاب نیز خود نوعی انتخاب به شمار می‌آید. علت هر انتخاب می‌تواند دلایل گوناگونی داشته باشد، به‌عنوان‌مثال برخی از انتخاب‌ها در اثر عادات هستند و برخی بر اساس مراقبت و احتیاط، برخی بر اساس اطلاعات کنونی و یا تجارب قبلی، به‌هرحال با توجه به ماهیت بسیار تصادفی بشر در امر انتخاب، کشف و یا تخمین کلی از نحوه‌ی انتخاب بسیار پیچیده و حساس است و درصورتی‌که بتوان رفتار بشر را در انتخاب یک گزینه خاص پیش‌بینی کرد، این امر می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آتی بسیار راه گشا و مفید واقع شود [Hensher et al., 2015]. در چهارچوب مدل‌های انتخاب گسسته به مجموعه گزینه‌ها، مجموعه اطلاق می‌شود. هر مجموعه انتخاب باید دارای ۳ ویژگی مهم زیر باشد: ۱. گزینه‌ها باید از دیدگاه تصمیم‌گیرنده دوبه‌دو ناسازگار باشند تا درنهایت انتخاب یک گزینه شامل گزینه‌های دیگر نشود. ۲. مجموعه گزینه‌ها باید جامع باشد. یعنی تمام انتخاب‌های ممکن را شامل شود. ۳.تعداد گزینه‌ها باید محدود باشد. همچنین باید توجه کرد که تعریف انتخاب توسط محقق تا حدود زیادی تحت تأثیر اهداف تحقیق و داده‌های موجود است. مدل‌های انتخاب گسسته معمولاً تحت فرض ماکزیمم کردن تابع مطلوبیت برای تصمیم‌گیرنده به دست می‌آید که در این راستا ترستون در سال ۱۹۲۷ بر اساس مفهوم محرک روانی، مدل پروبیت دوتایی را برای تعیین رفتار پاسخ‌دهندگان توسعه داد. مارسچاک در سال ۱۹۶۰ محرک را به مطلوبیت ترجمه کرد و فرم مشتقی از ماکزیمم کردن تابع مطلوبیت به دست آورد. این مدل‌هایی که بر اساس کار مارسچاک به دست می‌آیند به نام مدل‌های مطلوبیت تصادفی معروف‌اند. نکته قابل‌توجه این است که هرچند این مدل‌ها از ماکزیمم کردن مطلوبیت مشتق شده‌اند ولی می‌توانند رفتار تصمیم‌گیرنده‌ای که در تصمیم خود ماکزیمم مطلوبیت را لحاظ نکرده باشد را نیز نشان دهد. بنابراین این مدل‌ها رفتار و وابستگی انتخاب را با متغیرهای توضیحی بیان می‌کنند و به اینکه علت این انتخاب چه بوده است کاری ندارند[Train, 2009].

اگر U_{nj} نشان‌دهنده تابع مطلوبیت برای تصمیم‌گیرنده‌ی n برای گزینه j باشد در این صورت نشان‌دهنده رفتار انتخاب تصمیم‌گیرنده بر اساس گزینه‌ای است که باعث ماکزیمم شدن تابع مطلوبیت می‌شود. مثلاً اگر به‌صورت زیر باشد، تصمیم‌گیرنده گزینه i را انتخاب می‌کند.

$$U_{ni} > U_{nj} \; \forall j \neq i \qquad (۱)$$

در حقیقت مدل‌ساز نمی‌تواند تابع مطلوبیت واقعی تصمیم‌گیرنده را مشاهده کند. آنچه محقق می‌تواند دریابد تأثیر ویژگی‌هایی است که برای هر گزینه انتخاب قرار دارد و همچنین مشخصات فردی تصمیم‌گیرنده است.

$$V_{nj} = (x_{nj}, S_n) \forall j \qquad (۲)$$

در تابع بالا x_{nj} همان ویژگی گزینه و S_n همان مشخصات فردی تصمیم‌گیرنده است. با توجه به تعریف فوق، تابع V_{nj} به نام مطلوبیت مشاهده‌شده معروف است.

با توجه به اینکه مقدار تابع مطلوبیت مشاهده‌شده با مقدار تابع مطلوبیت کل برابر نیست، بنابراین داریم:

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \qquad (۳)$$

که ε_{nj} مقادیری هستند که در مطلوبیت اثر داشته‌اند ولی در مدل دیده نشده‌اند. درواقع قسمت احتمالاتی ε_{nj} نشان‌دهنده خطاها و سلایق خاص افراد موردمطالعه است. ε_{nj} ازلحاظ آماری دارای میانگین غیر صفر و توزیع احتمالی است و به دلیل اینکه قابل‌مشاهده نیستند به‌صورت تصادفی فرض می‌شوند.

چگالی مشترک بردار تصادفی $\acute{\varepsilon} = (\varepsilon_{n1}, \varepsilon_{n2}, \varepsilon_{n3}, \dots\dots, \varepsilon_{nj})$ به‌صورت $f(\varepsilon_n)$ نشان داده می‌شود. با داشتن این چگالی مدل‌ساز می‌تواند به بیان احتمال در خصوص نوع انتخاب تصمیم‌گیرنده بپردازد. مدل‌های مختلفی را می‌توان بر اساس اینکه خطاها دارای چه تابع توزیعی هستند ساخت. یکی از مهم‌ترین انواع مدل‌ها آن‌هایی هستند که با استفاده از اصل استقلال و یکسان بودن توزیع خطاها ساخته می‌شوند.لازم به ذکر است، تلاش‌های فراوانی به‌منظور یافتن توزیع مناسب توسط محققان انجام‌گرفته است ساده‌ترین و بیشترین مدل استفاده‌شده برای مدل‌های انتخاب معمولاً مدل‌های لوجیت

هستند و علت این محبوبیت به دلیل نوع فرمول این مدل‌ها و همچنین تفسیر بسیار راحت آن‌ها است. در مدل لوجیت مقادیر مطلوبیت مشاهده نشده دارای توزیع IID هستند که فاکتور مشاهده نشده با گزینه‌ها غیر همبسته است و میزان واریانس آن برای هرکدام از گزینه‌ها برابر است. این فرض علاوه بر این‌که محدودیت است اما باعث سهولت در استفاده از این مدل شده است. مدل لوجیت با این فرض حاصل می‌شود که بخش غیر سیستماتیک یا ε دارای توزیع گامبل و فرض IID باشد. چگالی مطلوبیت مشاهده نشده و توزیع تجمعی آن به ترتیب به‌صورت زیر است:

$$f(\varepsilon_{nj}) = e^{-\varepsilon_{nj}} e^{-e^{-\varepsilon_{nj}}} \quad (۴)$$

$$F(\varepsilon_{nj}) = e^{-e^{-\varepsilon_{nj}}} \quad (۵)$$

توزیع فوق دارای واریانس $\frac{\pi^2}{6}$ است.

در این صورت $\varepsilon_{nji} = \varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni}$ از توزیع لوجستیک زیر پیروی می‌کند:

$$F(\varepsilon^*_{nji}) = \frac{\varepsilon^*_{nji}}{1 + \varepsilon^*_{nji}} \quad (۶)$$

رابطه فوق در مدل‌های لوجیت دوتایی استفاده می‌شود(مدل‌هایی که در آن دو گزینه وجود دارد). درصورتی‌که انتخاب از میان چندین گزینه صورت بپذیرد، با استفاده از این مدل می‌توان احتمال انتخاب هر یک از گزینه‌ها را به دست آورد.

$$P_A = \frac{\exp(U_A)}{\sum_j \exp(U_J)} \quad (۷)$$

که در آن:

P_A= احتمال انتخاب گزینه A

U_A= تابع مطلوبیت انتخاب گزینه A

U_J= تابع مطلوبیت انتخاب گزینه J

نسبت احتمال دو گزینه فقط به تابع مطلوبیت دو گزینه وابسته است و از مطلوبیت سایر گزینه‌ها مستقل است.

ویژگی مدل لوجیت درباره بی‌تأثیر بودن گزینه‌های غیر مرتبط(IIA)، گاهی تبدیل به محدودیت می‌شود چون در برخی مواقع تمام روابط سیستماتیک، مشاهده نشده و درنتیجه بخشی از آن به قسمت غیر سیستماتیک تابع مطلوبیت منتقل می‌شود و باعث عدم استقلال ε_{ni} شده و درنهایت ویژگی IIA برقرار نخواهد بود. به‌عبارت‌دیگر وجود وابستگی بین گزینه‌ها باعث تولید نتایج نادرست خواهد شد. با استفاده از مدل لوجیت آشیانه‌ای می‌توان بر این مشکل غلبه نمود. در این موارد گزینه‌هایی که دارای همبستگی نسبت به یکدیگر باشند در سطحی متفاوت با سایر گزینه‌ها قرار داده می‌شوند [Train, 2009].

نظریه کلاس پنهان فرض می‌کند که رفتار فرد وابسته به مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل‌مشاهده و غیرقابل مشاهده است. منظور از ویژگی‌های غیرقابل مشاهده همان ناهمگنی است. مطابق با این نظریه فرض می‌شود که افراد در Q کلاس قرار می‌گیرند. در مدل کلاس پنهان احتمال اینکه گزینه i توسط فرد n انتخاب شود، برابر است با [Hensher et al., 2015]:

$$P_n(i) = \sum_{q=1}^{Q} P_n(i|q) . M_n(q) \quad (۸)$$

که در آن مقدار $P_n(i|q)$ برابر است با:

$$P_n(i|q) = \frac{e^{V_{ni}(\beta_q)}}{\sum_{j \in C_n} e^{V_{nj}(\beta_q)}} \quad (۹)$$

و مقدار $M_n(q)$ برابر مقدار زیر است:

$$M_n(q) = \left(\frac{e^{z_n(\theta_q)}}{\sum_{q=1}^{Q} e^{z_n(\theta_q)}}\right) \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها:

z_n : بردار متغیر کلاس‌بندی شامل ویژگی‌های اجتماعی اقتصادی

θ_q : بردار پارامترهای کلاس q

$P_n(i|q)$: مدل لوجیت چندگانه که احتمال انتخاب گزینه i توسط فرد n در کلاس q را مشخص می‌کند.

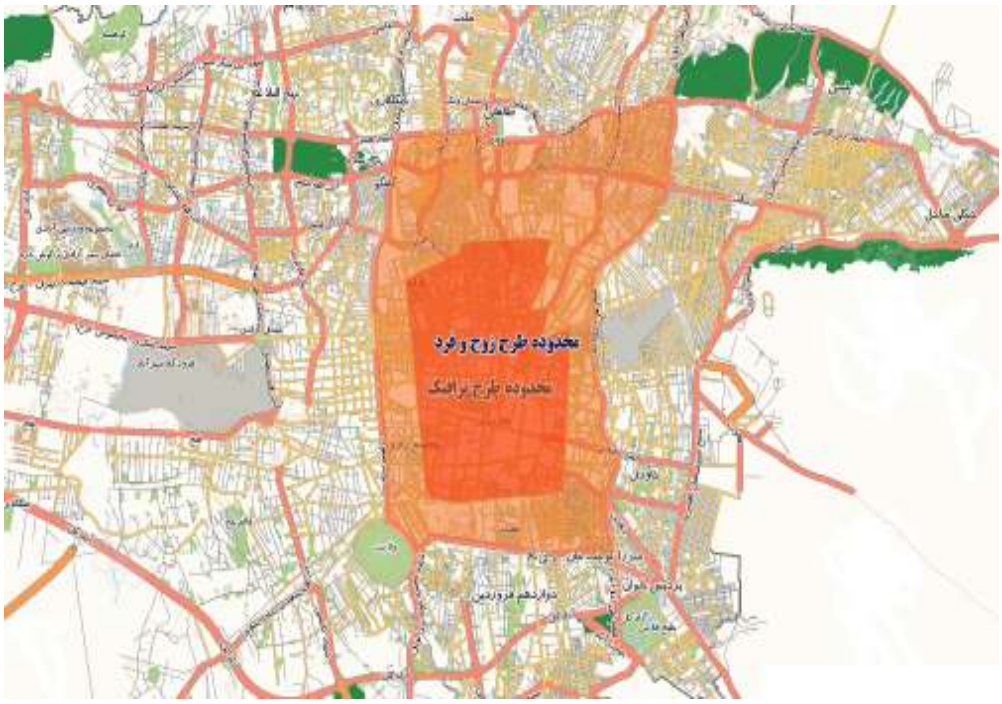
C_n : مجموعه گزینه‌های قابل انتخاب برای فرد n

$M_n(q)$: تابع عضویت در کلاس است که احتمال عضویت فرد n در کلاس q را تعیین می‌کند.

در مدل کلاس پنهان، به‌منظور شناسایی تعداد کلاس بهینه از سه شاخص AIC ، BIC و CAIC استفاده می‌شود [Shen, 2009].

٤- نمونه آماری

در این پژوهش متغیر وابسته، میزان استفاده از وسیله نقلیه برای سفر به محدوده طرح ترافیک در دوره زمانی معین است. پرسشنامه در نظر گرفته‌شده، شامل ۳ بخش کلی است: ۱. مشخصات سفر، ۲. سناریوها، ۳. مشخصات فردی، اجتماعی و اقتصادی سفر کنندگان به محدوده طرح ترافیک. سناریوهای قیمتی بر مبنای تعداد ساعات حضور در محدوده طرح ترافیک (ساعت مبنا) طراحی شدند. به‌این‌ترتیب، یک هزینه ثابت برای ورود وسیله به محدوده طرح در نظر گرفته می‌شود و سپس هزینه‌ای متغیر بر اساس ساعات حضور در محدوده، اعمال می‌شود. هزینه ثابت ورود به طرح در ساعت اوج ترافیک، ۱۵۰۰۰ تومان و در ساعت غیر اوج معادل ۱۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد. برای هزینه هر ساعت حضور در محدوده طرح ترافیک سه سطح از تغییرات به‌صورت: ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ تومان انتخاب شد. در این حالت اوج صبح و عصر به ترتیب ۶ تا ۱۰ و ۱۶ تا ۱۹ و ساعات غیر اوج ۱۰ تا ۱۶ در نظر گرفته شد. درنهایت، انتخاب افراد در قبال هر یک از سه قیمت ساعتی پیشنهادی، پرسیده شد. قیمت محاسبه‌شده برای تصمیم‌گیری درباره این سناریوها نیز براساس آخرین سفر صورت گرفته به محدوده طرح ترافیک است. انتخاب‌های پیشنهادشده به پاسخ‌دهندگان عبارت بودند از سفر با: ۱. خودرو شخصی ۲. حمل‌ونقل همگانی شامل اتوبوس و مترو ۳. تاکسی ۴. اسنپ (تاکسی اینترنتی) ۵. موتورسیکلت. در این بخش ویژگی های کمی نمونه آماری (شامل ۱۳۸۸ پاسخ دهنده) بررسی شده است. به دلیل پاسخ دادن هر شخص به سه سناریوی قیمتی ۴۱۶۴ مشاهده برای تحلیل موضوع مورد نظر فراهم شد. آماربرداری اصلی در بهمن ماه ۹۶ به صورت مصاحبه حضوری و در محدوده طرح ترافیک انجام شد. در جدول ۱ ویژگی‌های نمونه آماری و در جدول ۲ متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی ارائه شده است.



شکل ۱. محدوده طرح ترافیک و زوج‌وفرد شهر تهران

جدول ۱. ویژگی‌های کمی نمونه آماری

ویژگی	مقدار	فراوانی نسبی (درصد)
جنسیت	مرد	۸۳/۰۴
	زن	۱۶/۹۶
وضعیت تاهل	مجرد	۳۲/۰۷
	متاهل	۶۷/۹۳
سن	بین ۱۸ تا ۵۵	۹۰/۸۸
	بیشتر از ۵۵	۹/۱۲
تحصیلات	کمتر از دیپلم	۸/۷۶
	دیپلم	۳۶/۲۴
	لیسانس	۴۲/۴۳
	فوق لیسانس	۱۱/۴۱
	دکتری	۱/۱۶
نوع اشتغال	شغل آزاد	۵۸/۲۹
	کارمند	۱۳/۶۷
	مهندس	۳/۷۲
	دانشجو	۹/۸۰
	سایر	۱۴/۵۲
بعد خانوار	۱ و ۲ نفر	۱۵/۱۶
	۳	۲۸/۰۶
	۴	۳۶/۹۸
	۵ نفر و بیشتر	۱۹/۸۰
افراد دارای گواهینامه	۱	۱۶/۰۱
	۲	۴۴/۳۸
	۳ و بیشتر	۳۹/۶۱
سرپرست خانوار	بله	۶۱/۸۶
	خیر	۳۸/۱۴
وسایل خانوار	۱	۸۰/۴۹
	۲	۱۶/۸۴
	۳ و بیشتر	۲/۶۷

جدول ۲. متغیرهای مورد استفاده در مدل های انتخاب وسیله محدوده طرح ترافیک

نوع متغیر	نماد متغیر	واحد	تعریف متغیر
			خصوصیات فیزیکی و عملکردی سیستم های حمل و نقل
مستقل	price	تومان	هزینه تردد به محدوده طرح ترافیک برای خودرو شخصی
	t-car	دقیقه	زمان سفر خودرو شخصی
	t-pub	دقیقه	زمان سفر حمل و نقل همگانی
	t-taxi	دقیقه	زمان سفر تاکسی
	t-motor	دقیقه	زمان سفر موتورسیکلت
			خصوصیات مربوط به سفر
	dbeghr		شروع سفر در ساعت غیر اوج =۱ در غیر این صورت صفر
	dendhr		پایان سفر در ساعت غیر اوج =۱ در غیر این صورت صفر
	dpur-b		هدف سفر؛ خرید =۱ در غیر این صورت صفر
	dpur-e		هدف سفر؛ تحصیلی =۱ در غیر این صورت صفر
	dpur-m		هدف سفر؛ درمانی =۱ در غیر این صورت صفر
	dlice-w		مجوز هفتگی =۱ در غیر این صورت صفر
	enter		تعداد دفعات ورود به محدوده طرح ترافیک در روز گذشته
			خصوصیات مربوط به شبکه
	nopub		عدم دسترسی به حمل و نقل همگانی
			متغیرهای اجتماعی-اقتصادی
	djob7		شغل؛ شغل آزاد =۱ در غیر این صورت صفر
	djob6		شغل؛ کارمند =۱ در غیر این صورت صفر
	dnoapp1		دلیل عدم درخواست مجوز سالیانه؛ عدم نیاز مستمر =۱ در غیر این صورت صفر
	dnoapp2		دلیل عدم درخواست مجوز سالیانه؛ گران بودن طرح =۱ در غیر این صورت صفر
	dage1		سن؛ بین ۱۸ تا ۵۵=۱ در غیر این صورت صفر
	dage2		سن؛ بالای ۵۵ سال =۱ در غیر این صورت صفر
	dedu3		میزان تحصیلات؛ لیسانس =۱ در غیر این صورت صفر
	dedu4		میزان تحصیلات: فوق لیسانس =۱ در غیر این صورت صفر
	dgen1		جنسیت؛ مرد =۱ در غیر این صورت صفر
	dmarr1		وضعیت تاهل؛ مجرد =۱ در غیر این صورت صفر
وابسته	میزان استفاده از وسیله نقلیه		خودرو شخصی حمل و نقل همگانی تاکسی اسنپ موتور سیکلت

جدول ۳. نتایج مدل کلاس پنهان در انتخاب وسیله محدوده طرح ترافیک

		کلاس ۱		کلاس ۲		کلاس ۳	
گزینه	متغیر	ضریب	آماره t	ضریب	آماره t	ضریب	آماره t
car	price	**-۰/۲۵۲**	**-۷/۵۰**	**-۰/۰۵۷**	**-۱۴/۲۹**	**-۰/۲۵۳**	**-۶/۹۵**
	t-car	-۰/۰۰۱	-۰/۰۷	**-۰/۰۱۱**	**-۴/۱۹**	۰/۰۱۷	۱/۲۱
	dlice-w	**-۱/۷۳۳**	**-۳/۷۳**	-۰/۱۱۹	-۱/۵۰	**-۲/۵۹۰**	**-۴/۸۵**
	dnoapp1	-۶/۰۲۲	-۰/۳۷	**-۰/۲۶۰**	**-۲/۳۶**	-۱۹/۳۷۳	۰/۰۰
	dnoapp2	-۰/۴۲۰	-۰/۷۶	**-۱/۰۹۱**	**-۱۲/۳۶**	-۰/۵۰۱	-۰/۹۹
	dgen1	۰/۰۰۸	۰/۰۲	**۰/۴۱۲**	**۳/۰۸**	۱۴/۲۹۲	۰/۰۰
حمل‌ونقل همگانی	c1	-۰/۴۳۷	-۰/۴۲	**-۶/۶۱۵**	**-۳/۹۱**	-۲/۸۹۶	۰/۰۰
	t-pub	**-۰/۳۲۱**	**-۲/۶۴**	۰/۰۷۰	۰/۲۲	**۰/۲۶۳**	**۱/۹۳**
	enter	**-۱/۱۳۲**	**-۵/۸۵**	-۱/۱۱۲	-۰/۹۶	۰/۱۴۷	۰/۷۰
	dnopub	**-۸/۳۶۹**	**-۱۳/۵۳**	-۰/۹۳۲	-۰/۸۱	-۱۲/۶۴۵	-۰/۰۱
تاکسی	c2	-۴۵/۷۲۲	-۰/۶۸	**-۸/۱۶۸**	**-۲/۹۵**	۱۱/۷۲۹	۰/۰۰
	t-taxi	۰/۳۹۹	۰/۵۹	۰/۰۰۵	۰/۱۰	**۰/۰۱۶**	**۱/۶۶**
	dbeghr	۲/۸۲۸	۰/۲۳	-۴/۳۱۴	-۰/۰۱	**-۲/۷۳۵**	**-۸/۴۳**
	dpur-b	۶/۲۲۵	۰/۵۶	-۸/۴۵۱	۰/۰۰	**۲/۵۷۰**	**۴/۸۳**
	djob6	-۳۵/۰۹۲	۰/۰۰	**۱/۸۴۰**	**۱/۷۳**	**-۲/۷۳۹**	**-۷/۱۲**
اسنپ	c3	**-۷/۲۴۸**	**-۵/۸۸**	**-۳/۱۷۷**	**-۱۲/۷۲**	-۲/۱۶۵	۰/۰۰
	dpur-m	**۴/۵۰۷**	**۶/۲۹**	-۹/۵۶۷	۰/۰۰	**۳/۵۷۴**	**۶/۳۷**
	enter	**-۱/۸۱۹**	**-۴/۸۵**	**-۰/۴۴۶**	**-۶/۸۵**	۰/۰۷۱	۰/۴۳
	dage2	۰/۰۱۷	۰/۰۴	**۰/۳۳۲**	**۲/۱۹**	-۸/۸۶۱	۰/۰۰
موتورسیکلت	c4	-۲۷/۹۴۳	۰/۰۰	**-۲/۲۲۸**	**-۱۰/۳۳**	-۳/۲۶۲	۰/۰۰
	t-motor	-۰/۹۵۷	۰/۰۰	**-۰/۰۳۴**	**-۸/۰۱**	۰/۱۲۷	۰/۰۱
	dendhr	۸/۸۴۰	۰/۰۰	**-۰/۳۸۱**	**-۳/۸۰**	۱/۵۲۴	۰/۰۰
	pur-e	-۴/۸۸۹	۰/۰۰	**-۲/۴۰۲**	**-۸/۳۹**	-۲/۶۰۳	۰/۰۰
	dmarr1	۵/۶۴۶	۰/۰۰	**۰/۸۹۹**	**۱۰/۳۷**	-۴/۲۴۲	۰/۰۰
تابع عضویت کلاس	c	**۰/۶۲۷**	**۴/۰۸**	۰/۲۴۷	۱/۴۵	-	-
	dedu3	**۰/۳۰۸**	**۱/۸۴**	۰/۰۱۲	۰/۰۷	-	-
	djob7	۰/۰۸۳	۰/۴۹	**۰/۴۵۵**	**۲/۴۷**	-	-
K		۸۰					
LL(0)		-۶۰۶۹/۱۹					
LL(C)		-۵۵۱۹/۲۱۴					
LL(β)		-۲۷۷۷/۰۳۳					
ρ^2		۰/۵۴۲					
ρ_c^2		۰/۵۴۰					
average		۰/۴۵۲		کلاس ۱			

گزینه	متغیر	کلاس ۱		کلاس ۲		کلاس ۳	
		ضریب	آماره t	ضریب	آماره t	ضریب	آماره t
class probability	۰/۳۴۵			کلاس ۲			
	۰/۲۰۳			کلاس ۳			

۵- نتایج پرداخت مدل

پس از پرداخت بیش از ۵۰۰ مدل کلاس پنهان، مدل منتخب برای نمایش ناهمگونی تمایل‌ها در میان مسافران ارائه شد (جدول ۳). شایان ذکر است که از نرم‌افزار Nlogit5.0 جهت پرداخت مدل‌ها استفاده شده‌است. با توجه به حجم زیاد داده‌ها، در حدود ۱ الی ۵ ساعت زمان برای پرداخت مدل‌ها صرف شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، تمام ضرایب محاسبه شده حداقل در یک کلاس از علامت و مقدارهای نسبی قابل انتظار برخوردار هستند.

متغیر هزینه ورود به محدوده در سه کلاس معنادار شده است. حساسیت کلاس دوم نسبت به قیمت از سایر کلاس‌ها کمتر است. با توجه به تابع عضویت کلاس مدل، شاغلین تمایل بیشتری به عضویت در کلاس دوم دارند. همچنین با توجه به نیاز مستمر و روزانه این افراد برای ورود به محدوده، این مطلب قابل توجیه است. حساسیت کلاس اول و سوم نسبت به قیمت طرح ترافیک تقریبا برابر است. با توجه به تابع عضویت کلاس مدل، افراد دارای تحصیلات کمتر در کلاس‌های اول و سوم قرار دارند. در صورتی که رابطه مستقیمی بین تحصیلات و درآمد در نظر بگیریم، افراد کلاس اول و سوم به دلیل درآمد کمتر حساسیت بیشتری نسبت به قیمت طرح دارند. متغیر زمان سفر با خودرو شخصی در کلاس دوم در مطلوبیت گزینه خودرو شخصی با علامت منفی ظاهر شده‌است. علامت منفی این متغیر نشان می‌دهد با افزایش زمان سفر احتمال انتخاب گزینه خودروشخصی برای سفر کاهش می‌یابد. متغیر داشتن مجوز هفتگی در کلاس اول و سوم با علامت منفی ظاهر شده است. با توجه به این مطلب که در طراحی سناریوها فرض بر حذف کلیه مجوزهای سالیانه، هفتگی و شناور شده است و افراد درای این مجوزها هزینه کمتری را نسبت به طرح روزانه پرداخت می‌کردند، ظاهر شدن این متغیر با علامت منفی توجیه پذیر است. همچنین با توجه به سطح تحصیلات و در نتیجه درآمد پایین تر کلاس سوم، حساسیت کلاس سوم نسبت به این متغیر بیشتر است.

متغیر دلیل عدم درخواست طرح سالیانه ترافیک به علت گران بودن، در کلاس دوم معنادار شده است. همانطوری که انتظار میرود این متغیر با علامت منفی ظاهر شده است که نشان می‌دهد هزینه طرح یکی از دلایل کاهش مطلوبیت استفاده از خودرو شخصی است. با افزایش تعداد دفعات ورود به محدوده، مطلوبیت خودرو شخصی به دلیل افزایش هزینه‌ها کاهش پیدا می‌کند. با توجه به احتمال بالاتر عضویت شاغلین در کلاس دوم و متعاقبا نیاز بیشتر این گروه به تردد به محدوده، این متغیر در کلاس دوم معنادار شده است.

متغیر جنست؛ مرد در کلاس دوم با اثر مثبت ظاهر شده است، با توجه به احتمال بالاتر عضویت شاغلین در این کلاس، ضریب این متغیر نیز توجیه‌پذیر است. متغیر زمان سفر حمل‌ونقل همگانی در کلاس اول و سوم معنادار شده است. علامت مثبت این متغیر در کلاس سوم می‌تواند به دلیل احتمال بالاتر عضویت افراد کم‌درآمد در این کلاس و درنتیجه ترجیح این افراد به استفاده از حمل‌ونقل همگانی در مسافت‌های طولانی به دلیل هزینه کمتر استفاده از سیستم حمل‌ونقل همگانی باشد. علامت منفی تعداد دفعات ورود به محدوده در حمل‌ونقل همگانی با توجه به تابع عضویت کلاس حاکی از این مطلب است که احتمال عضویت افرادی با تحصیلات و در نتیجه درآمد بیشتر در کلاس اول از سایر کلاس‌ها بیشتر است. که می‌تواند به دلیل عدم وجود زیرساخت مناسب و در نتیجه پایین بودن سطح رفاه، آسایش و راحتی در تعداد دفعات بالای ورود به محدوده در صورت استفاده از حمل‌ونقل همگانی باشد. عدم دسترسی به حمل‌ونقل همگانی دارای اثر منفی در کاهش مطلوبیت استفاده از حمل‌ونقل همگانی است. این متغیر در کلاس اول معنادار شده است. متغیر زمان سفر تاکسی در کلاس سوم معنادار شده است. علامت مثبت این متغیر در کلاس سوم می‌تواند به دلیل احتمال بالاتر عضویت افراد کم‌درآمد در این کلاس و درنتیجه ترجیح این افراد به استفاده از تاکسی در مسافت‌های طولانی به دلیل هزینه کمتر استفاده از تاکسی باشد. متغیر شروع سفر در ساعت غیر اوج در مطلوبیت

تاکسی در کلاس سوم با علامت منفی ظاهر شده است. ظاهر شدن این متغیر با علامت منفی ناشی از کاهش هزینه سفر به محدوده در ساعت غیر اوج با خودرو شخصی است.

متغیر هدف سفر خرید در کلاس سوم در مطلوبیت گزینه تاکسی دارای اثر و علامت مثبت است. که نشان می‌دهد در صورتی که هدف از سفر به محدوده خرید باشد، احتمال انتخاب تاکسی افزایش می‌یابد. با توجه به تابع عضویت کلاس مدل، احتمال انتخاب تاکسی برای هدف سفر خرید برای افراد کم‌درآمد بیشتر است.

متغیر شغل کارمند در کلاس دوم و سوم با علامت و اثرهای مختلفی ظاهر شده‌است که نشان‌دهنده اختلاف سلیقه تصادفی در مورد این متغیر است. با توجه به تابع عضویت کلاس مدل، احتمال قرار گرفتن افراد با سطح تحصیلات لیسانس در کلاس دوم بیشتر از کلاس سوم است. به عبارتی در کلاس دوم در صورت قرار گرفتن شاغلین احتمال انتخاب تاکسی افزایش می‌یابد و در کلاس سوم این متغیر دارای اثر منفی در انتخاب تاکسی است.

متغیر هدف سفر درمانی با علامت مثبت در کلاس اول و سوم نشانگر استفاده از اسنپ به منظور رفاه، آسایش و راحتی بیشتر در استفاده از این وسیله باشد.

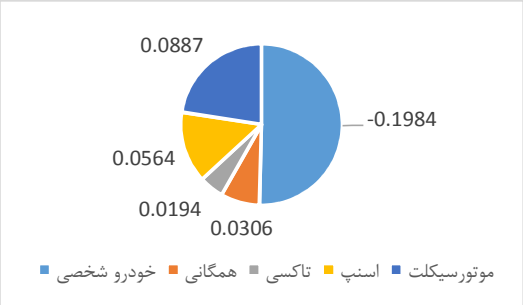
با افزایش تعداد دفعات ورود به محدوده مطلوبیت اسنپ کاهش می‌یابد. این متغیر در کلاس اول و دوم با علامت منفی ظاهر شده است. با توجه به افزایش هزینه‌ها در تعداد سفر بالا به محدوده ظاهر شدن این متغیر با علامت منفی در دو کلاس توجیه‌پذیر است. همچنین حساسیت کلاس دوم با توجه به احتمال بالاتر عضویت شاغلین در این کلاس و درنتیجه استفاده بیشتر از محدوده نسبت به این متغیر کمتر است.

متغیر سن بالای ۵۵ سال در کلاس دوم دارای اثر مثبت و معنادار در استفاده از گزینه اسنپ است. معنادار شدن عدد ثابت در کلاس دوم در مطلوبیت موتورسیکلت نشان دهنده برخی از عوامل موثر و دیده نشده در مطلوبیت گزینه موتورسیکلت در این کلاس است. متغیر زمان سفر با موتورسیکلت در کلاس دوم در مطلوبیت گزینه موتورسیکلت با علامت منفی ظاهر شده‌است. علامت منفی این متغیر نشان می‌دهد با افزایش زمان سفر موتورسیکلت احتمال انتخاب گزینه موتورسیکلت برای سفر کاهش می‌یابد. متغیر پایان سفر در ساعت غیر اوج در مطلوبیت موتورسیکلت در کلاس دوم با علامت منفی ظاهر شده است. ظاهر شدن این متغیر با علامت منفی ناشی از کاهش هزینه تردد به محدوده در ساعت غیر اوج با خودرو شخصی است.

متغیر هدف سفر تحصیلی در کلاس دوم در مطلوبیت گزینه موتورسیکلت دارای اثر و علامت منفی است. که نشان می‌دهد در صورتی که هدف از سفر به محدوده تحصیلی باشد، احتمال انتخاب موتورسیکلت کاهش می‌یابد.

متغیر وضعیت تاهل مجرد در کلاس دوم در مطلوبیت گزینه موتورسیکلت دارای اثر و علامت مثبت است. که نشان می‌دهد در صورت مجرد بودن احتمال انتخاب گزینه موتورسیکلت افزایش می‌یابد.

مقادیر شاخص ρ^2 برای مدل بین ۰/۵۴۲ به‌دست‌آمده است. همچنین شاخص خوبی برازش نسبت به سهم بازار که با ρ_c^2 نشان داده‌شده ۰/۵۴۰ است که همگی بیانگر قابل‌قبول بودن مدل هستند (جدول ۳).



شکل ۲. اثر حاشیه‌ای متغیر هزینه طرح‌ترافیک

محاسبه اثر حاشیه‌ای متغیر هزینه طرح ترافیک در مدل کلاس پنهان نشان می‌دهد، درصورتی‌که هزینه طرح ترافیک ۱۰۰۰ تومان زیاد شود، احتمال انتخاب گزینه خودرو شخصی به طور متوسط در سه کلاس ۰/۱۹۸۴ درصد کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، انتخاب وسیله افراد در محدوده طرح‌ترافیک، با عوارض متغیر نسبت به‌وقت روز بررسی شده است. برای این منظور از داده‌های رجحان بیان‌شده استفاده شده است. نتایج پرداخت مدل کلاس پنهان نشان می‌دهد با افزایش هزینه طرح ترافیک مطلوبیت خودرو شخصی در ۳ کلاس کاهش می‌یابد که حساسیت گروه‌های مختلف با توجه به

ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی آن‌ها نسبت به قیمت متفاوت است. تابع عضویت کلاس مدل از دو متغیر سطح تحصیلات و اشتغال تشکیل شده است که احتمال عضویت شاغلین در کلاس دوم و افراد تحصیل‌کرده در کلاس اول از سایر کلاس‌ها بیشتر است. بر این اساس حساسیت گروه دوم نسبت به قیمت طرح ترافیک از سایر کلاس‌ها کمتر است که با توجه به نیاز مستمر و روزانه این افراد برای ورود به محدوده، این مطلب قابل توجیه است. بررسی متغیر دسترسی به حمل‌ونقل همگانی برای کاربران محدوده طرح ترافیک نشان می‌دهد که عدم دسترسی به حمل‌ونقل همگانی دارای اثر مهم و منفی در کاهش مطلوبیت استفاده از حمل‌ونقل همگانی است که این امر لزوم توسعه در این بخش را می‌رساند. محاسبه اثر حاشیه‌ای متغیر هزینه طرح ترافیک در مدل کلاس پنهان نشان می‌دهد، درصورتی‌که هزینه طرح ترافیک ۱۰۰۰ تومان زیاد شود، احتمال انتخاب گزینه خودرو شخصی به طور متوسط در سه کلاس ۰/۱۹۸٤ درصد کاهش می‌یابد همچنین احتمال انتخاب گزینه موتورسیکلت با افزایش۰/۰۸۸۷ نسبت به سایر گزینه‌ها بیشتر است. با توجه به عدم دسترسی به انتخاب وسیله مربوط به رجحان آشکار شده افراد پرسشگری شده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با در نظر گرفتن این انتخاب، از مدل‌های دیگری همانند لوجیت ترکیبی به منظور یافتن ناهمگنی در رفتار انتخاب وسیله استفاده شود.

۷- مراجع

-Agrawal, A.W., Nixon, H.K., (2011), "What Do Americans Think about Federal Transportation Tax Options: Results from Year 2 of a national Survey" Mineta Transportation Institute, College of Business, San José State University.

-Bhat, C. R., (2000), "Incorporating observed and unobserved heterogeneity in urban work travel mode choice modeling", Transportation science, Vol. 34, No. 2, pp. 228-238.

-Cerwick, D. M., Gkritza, K., Shaheed, M. S., & Hans, Z., (2014), "A comparison of the mixed logit and latent class methods for crash severity analysis", Analytic Methods in Accident Research, Vol. 3, pp. 11-27.

-Chen, D., Ignatius, J., Sun, D., Goh, M., & Zhan, S., (2018), "Impact of congestion pricing schemes on emissions and temporal shift of freight transport", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 118, pp. 77-105.

-Greene, W.H., Hensher, D.A., (2003), "A latent class model for discrete choice analysis: Contrasts with mixed logit", Transp. Res. Part B Methodol, Vol. 37,pp. 681–698.

-Hensher, D.A., Rose, J.M., Greene, W.H., (2015), Applied Choice Analysis 2nd, Cambridge University Press.

-May, A. D., (1986), "Traffic restraint: a review of the alternatives", Transportation Research Part A: General, Vol. 20, No. 2, pp. 109-121.

-Ortúzar, J. D. D., & Willumsen, L. G. (2002), "Modelling transport", John Wiley & Sons, West Sussex, England.

-Kim, S.H., Mokhtarian, P.L., (2018), "Taste heterogeneity as an alternative form of endogeneity bias: Investigating the attitude-moderated effects of built environment and socio-demographics on vehicle ownership using latent class modeling", Transp. Res. Part A Policy Pract, Vol. 116, pp. 130–150.

-Koster, P., Verhoef, E., Shepherd, S., & Watling, D., (2018), "Preference heterogeneity and congestion pricing: The two route case revisited" Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 117, pp. 137-157.

-Lee, B. J., Fujiwara, A., Zhang, J., & Sugie, Y., (2003), "Analysis of mode choice behaviours based on latent class models", In 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne.

-Li, Z., Hensher, D.A., (2012), "Congestion charging and car use: A review of stated preference and opinion studies and market monitoring evidence", Transp. Policy, Vol. 20, pp. 47–61.

-Shaheed, M. S., & Gkritza, K. (2014)" A latent class analysis of single-vehicle motorcycle crash severity outcomes", Analytic Methods in Accident Research, vol. 2, pp. 30-38.

-Shen, J., (2009), "Latent class model or mixed logit model? A comparison by transport mode choice data", Applied Economics, Vol. 41, No. 22, pp. 2915-2924.
-Tillema, T., van Wee, B., Ettema, D., (2010), "Road pricing and relocation decisions of Dutch households", Urban Stud, Vol. 47, pp. 3013–3033.
-Train, K. E., (2009), "Discrete choice methods with simulation", Cambridge university press.
-Ubbels, B., Tseng, Y. Y., & Verhoef, E. T., (2005), "Value of time, schedule delay and reliability-estimates based on choice behaviour of Dutch commuters facing congestion".
-Ubbels, B., Verhoef, E., (2007), "Behavioral Responses to Road Pricing: Empirical Results from a Survey of Dutch Car Owners", Transp. Res. Rec. J. Transp, Res. Board 1960, pp. 159–166.

Heterogeneous Analysis of Mode Choice Behavior Using Latent Class Model

Hamid Rezaei, M.Sc., Grad., Transportation Planning Dept., Civil & Envi. Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Elnaz Irannezhad, Ph. D.,Grad, Faculty of Business, Economics and Law, university of Queensland, Austelia.
Amir Reza Mamdoohi, Associate Professor, Transportation Planning Dept., Civil & Envi. Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: armamdoohi@modares.ac

Received: July 2021-Accepted: August 2021

ABSTRACT
To reduce traffic in the central area of Tehran and thus reduce air pollution, a toll management plan is being implemented in this area of the city. In the present study, the mode choice within the congestion pricing scheme has been investigated with respect to the base hour scenarios. The statistical population consists of 1388 respondents who were provided for the analysis of the subject in question by answering to each of the three price scenarios of 4164 observations. In addition, a latent class model is used to investigate the heterogeneity in passenger behavior and the impact of price on mode choice. Based on the results of the latent class model, the sensitivity of different groups to the price is different, so that in the class with a higher probability of being employed, the sensitivity to the price of the congestion pricing is also less. The calculation of the variable marginal effect of the traffic plan cost shows that, if the traffic cost of the project exceeds 1000 toman, the likelihood of choosing a personal car option is reduced by an average of 0.1984 percent in the three classes.

Keywords: Mode Choice, Congestion Pricing Scheme, Heterogeneity, Latent Class Model