

پیش‌بینی سهم مدهای حمل‌ونقل شهری مبتنی بر قیمت‌گذاری خدمات حمل‌ونقل با استفاده از رویکرد مدل لوجیت چندگانه و رگرسیون چند متغیره

مقاله علمی - پژوهشی

محمد همه‌وند، دانشجوی دکترا، گروه مدیریت صنعتی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
*ایرج نوری (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مدیریت، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
محمد صادق حری، دانشیار، گروه مدیریت، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: i-nouri@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۳۶۸-۳۵۳

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل اثر قیمت‌گذاری بر رفتار انتخاب مد و پیش‌بینی سهم مدهای حمل‌ونقل شهری مشهد، سه سناریوی توسعه خط ۳ مترو شامل عدم راه‌اندازی، بهره‌برداری محدود و بهره‌برداری کامل را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این منظور، از روش مدل‌سازی انتخاب و سیله سفر مبتنی بر رجحان بیان شده و بر پایه مدل لوجیت چندگانه استفاده شد و داده‌های قیمتی افق پنج‌ساله استخراج گردید. سپس با ادغام این داده‌ها و خروجی‌های نرم‌افزار VISUM، مدل‌های رگرسیون چندمتغیره نهایی جهت پیش‌بینی سهم مدهای حمل‌ونقل توسعه یافت. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدهای خودرویی شخصی و تاکسی بیشترین کشش و دسایت را نسبت به تغییرات کرایه و هزینه پارکینگ دارند. در حالی که مترو کمترین دسایت قیمتی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج مدل‌ها بیانگر آن است که قیمت می‌تواند به عنوان یک ابزار سیاستی مؤثر در مدیریت تقاضای سفر به کار گرفته شود. هرچند اعمال نهایی سیاست‌های قیمتی نیازمند در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی و نظرات خبرگان است. این تحقیق با ارائه چارچوبی کارآمد برای تعیین بهای خدمات حمل‌ونقل و تحلیل اثرات آن، می‌تواند در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری حمل‌ونقل شهری مشهد مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برای دستیابی به مدیریت جامع تقاضا، توجه هم‌زمان به عوامل غیرقیمتی همچون کیفیت خدمت، زمان سفر و دسترسی‌پذیری نیز ضروری است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی سهم مد، تحلیل حساسیت، حمل‌ونقل شهری، خط ۳ مترو، قیمت‌گذاری حمل‌ونقل، مدل لوجیت چندگانه، مشهد، نرم‌افزار

۱-مقدمه

آلودگی هوا، افزایش مصرف سوخت و اتلاف وقت شهروندان شده است (Litman, 2017). این چالش‌ها، ضرورت مدیریت کارآمد و برنامه‌ریزی استراتژیک در حوزه حمل‌ونقل شهری را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این میان، تخصیص بهینه منابع و هدایت تقاضای سفر به سمت استفاده از شیوه‌های حمل‌ونقل

حمل‌ونقل شهری به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار شهری، نقشی حیاتی در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جوامع ایفا می‌کند. رشد روزافزون جمعیت شهری و افزایش تمایل به استفاده از وسایل نقلیه شخصی، منجر به بروز چالش‌های متعددی از جمله تراکم ترافیک،

بگذارد (Small & Winston, 2006). با این حال، تعیین این قیمت‌ها امری پیچیده است و نیازمند درک عمیقی از رفتار سفر، عوامل مؤثر بر انتخاب مد و میزان حساسیت کاربران به تغییرات قیمتی است. عدم تناسب در تعیین قیمت‌ها می‌تواند منجر به پیامدهای نامطلوبی چون افزایش استفاده از خودروی شخصی، کاهش بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل عمومی و تشدید مشکلات ترافیکی و زیست‌محیطی گردد.

- تدوین مدل‌های مطلوبیت: طراحی و پیاده‌سازی توابع مطلوبیت برای مدهای مختلف حمل‌ونقل شهری (خودروی شخصی، تاکسی، اتوبوس، مترو) با استفاده از رویکرد لجیت چندگانه در نرم‌افزار VISUM.

- مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره: برآورد معادلات رگرسیونی چندمتغیره با استفاده از داده‌های مشاهده شده (شامل قیمت‌های حمل‌ونقل و سهم مدها) به عنوان متغیر وابسته، به منظور سنجش رابطه بین قیمت و سهم مد.

- تحلیل حساسیت قیمتی: سنجش میزان حساسیت سهم هر یک از مدهای حمل‌ونقل به تغییرات قیمتی (کرایه اتوبوس، مترو، تاکسی و هزینه پارکینگ) در سناریوهای مختلف راه‌اندازی خط ۳ مترو.

- پیش‌بینی سهم مدها: پیش‌بینی سهم هر یک از مدهای حمل‌ونقل در افق زمانی پنج ساله (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵) بر اساس سناریوهای مختلف توسعه خط ۳ مترو و با اعمال تغییرات قیمتی.

- ارائه چارچوب تصمیم‌گیری: توسعه یک ابزار کاربردی مبتنی بر نتایج مدل‌های رگرسیونی برای کمک به تصمیم‌گیری در خصوص تعیین بهای خدمات حمل‌ونقل با در نظر گرفتن اهداف مدیریت تقاضا.

این پژوهش با تلفیق رویکردهای مدل‌سازی پیشرفته و تمرکز بر سناریوهای توسعه زیرساختی، نوآوری‌های متعددی را به حوزه مطالعات حمل‌ونقل شهری ارائه می‌دهد:

کاربرد ترکیبی VISUM و رگرسیون چندمتغیره: نوآوری اصلی این تحقیق در استفاده همزمان از نرم‌افزار VISUM برای مدل‌سازی مطلوبیت و شبیه‌سازی رفتار سفر و از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره برای تحلیل حساسیت قیمتی و پیش‌بینی سهم مدها است. در حالی که مدل‌های لجیت چندگانه در VISUM برای تخصیص سفر به مدها به کار گرفته می‌شوند، استفاده از خروجی‌های این نرم‌افزار (مشاهدات مربوط به قیمت

عمومی پایدار و کارآمد، یکی از اهداف کلیدی سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری محسوب می‌شود (Banister, 2002). یکی از مؤثرترین ابزارها برای مدیریت تقاضا و تأثیرگذاری بر رفتار سفر شهروندان، استفاده از سازوکار قیمت‌گذاری است. تعیین کرایه‌های منطقی و متناسب با هزینه‌ها و منافع هر یک از مدهای حمل‌ونقل، می‌تواند به طور قابل توجهی بر انتخاب شهروندان در استفاده از وسایل نقلیه شخصی یا عمومی تأثیر شهر مشهد، به عنوان دومین کلان‌شهر ایران و یکی از قطب‌های گردشگری مذهبی، سالانه پذیرای میلیون‌ها زائر و مسافر است. این حجم از تردد، همراه با رشد جمعیت و گسترش محدوده شهری، سیستم حمل‌ونقل این شهر را با فشارهای مضاعفی روبرو ساخته است. توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل، به ویژه گسترش خطوط مترو، به عنوان یکی از راهبردهای اصلی مدیریت شهری برای پاسخگویی به این تقاضای رو به رشد در دستور کار قرار گرفته است. راه‌اندازی خط ۳ مترو مشهد، به عنوان یکی از پروژه‌های کلیدی، پتانسیل بالایی برای تغییر الگوی سفر و افزایش سهم حمل‌ونقل عمومی دارد. با این حال، میزان موفقیت و اثربخشی این طرح، تا حد زیادی به چگونگی تأثیرگذاری آن بر رفتار سفر و نحوه تعامل آن با سایر مدهای حمل‌ونقل شهری، از جمله خودروی شخصی، تاکسی و اتوبوس، وابسته است. درک چگونگی تأثیرگذاری تغییرات قیمتی بر سهم هر یک از مدهای حمل‌ونقل، در سناریوهای مختلف توسعه خط ۳ مترو، برای تدوین سیاست‌های قیمت‌گذاری مؤثر و برنامه‌ریزی جامع حمل‌ونقل شهری امری ضروری است. این پژوهش با بررسی تأثیر تغییرات کرایه‌ها و هزینه‌ها بر سهم سفر در سه سناریوی متمایز (عدم راه‌اندازی، راه‌اندازی جزئی و راه‌اندازی کامل خط ۳ مترو)، تلاش می‌کند تا درکی عمیق از پویایی سیستم حمل‌ونقل شهری مشهد در مواجهه با تغییرات قیمتی و زیرساختی ارائه دهد. این درک، مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری در خصوص تعیین کرایه‌ها و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار حمل‌ونقل شهری فراهم خواهد کرد. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل و پیش‌بینی سهم مدهای حمل‌ونقل شهری مشهد در سناریوهای مختلف توسعه خط ۳ مترو با رویکرد قیمت‌گذاری ترکیبی است. برای دستیابی به این هدف کلی، اهداف جزئی زیر دنبال می‌شوند:

مبنایی مستدل برای تحقیق حاضر در شهر مشهد، با تمرکز بر سناریوهای توسعه خط ۳ مترو و کاربرد قیمت‌گذاری ترکیبی است.

مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی انتخاب مد حمل‌ونقل و تحلیل تأثیر عوامل مختلف، به ویژه قیمت، بر سهم مدها صورت گرفته است. مدل لوجیت چندگانه به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی انتخاب مد به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در نظر گرفتن ناهمگنی ترجیحات کاربران و همبستگی بین انتخاب‌ها استفاده شده است (McFadden, 1974; Train, 2003). مطالعات کلاسیک در این زمینه، بر تخمین توابع مطلوبیت و پیش‌بینی سهم مدها در شرایط مختلف تأکید داشته‌اند (Ben-Akiva & Lerman, 1985).

تحقیقات اخیر، اهمیت عوامل قیمتی را در شکل‌دهی به رفتار سفر مورد تأکید قرار داده‌اند (Winston, 2006). در پژوهشی جامع، نشان دادند که سیاست‌های قیمت‌گذاری مانند عوارض ترافیک و قیمت‌گذاری پارکینگ می‌توانند به طور مؤثری منجر به کاهش استفاده از خودروی شخصی و بهبود جریان ترافیک شوند. در زمینه حمل‌ونقل عمومی، تأثیر تغییرات کرایه بر تقاضا نیز به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (Goodwin, 1992).

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی انتخاب مد و تحلیل عوامل مؤثر بر آن انجام شده است. برخی پژوهش‌ها به مدل‌سازی انتخاب مد در شهر تهران با استفاده از رویکرد لوجیت پرداخته‌اند (کرباسیان و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، تأثیر ویژگی‌های قیمتی و زمانی بر انتخاب مد حمل‌ونقل عمومی در شهرهای مختلف ایران مورد مطالعه قرار گرفته است (نعمتی و همکاران، ۱۳۹۷). با این حال، مطالعاتی که به طور همزمان به تحلیل سناریوهای توسعه زیرساختی (مانند راه‌اندازی خطوط جدید مترو) همراه با مدل‌سازی قیمت‌گذاری ترکیبی و تحلیل حساسیت قیمتی با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی مانند VISUM و مدل‌های رگرسیون بردازند، محدود هستند. این پژوهش تلاش می‌کند تا با پر کردن این شکاف، مدلی جامع و کاربردی برای مدیریت حمل‌ونقل شهری مشهد ارائه دهد.

و سهم مد) به عنوان ورودی برای مدل‌های رگرسیون، امکان تحلیل دقیق‌تر تأثیر قیمت و سنجش حساسیت قیمتی را فراهم می‌آورد. این رویکرد ترکیبی، تصویری جامع‌تر از دینامیک سیستم حمل‌ونقل و تأثیر متغیرهای قیمتی ارائه می‌دهد.

تحلیل سناریو محور: بررسی تأثیر قیمت‌گذاری در سه سناریوی مشخص توسعه خط ۳ مترو (عدم راه‌اندازی، راه‌اندازی جزئی و راه‌اندازی کامل) به این تحقیق عمق و کاربرد بیشتری می‌بخشد. این رویکرد سناریو محور به سیاست‌گذاران اجازه می‌دهد تا اثرات بالقوه سیاست‌های قیمت‌گذاری را در شرایط مختلف توسعه زیرساخت‌ها ارزیابی کنند و تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ نمایند.

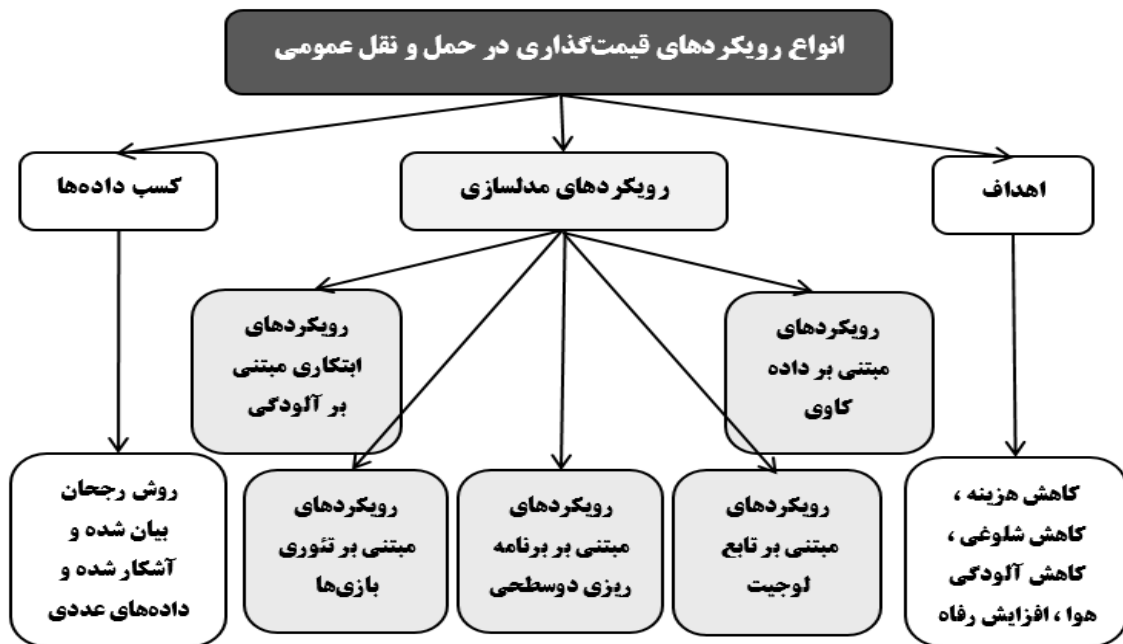
تمرکز بر مشهد و خط ۳ مترو: پژوهش حاضر با تمرکز بر کلان‌شهر مشهد و پروژه استراتژیک خط ۳ مترو، به نیازهای بومی و مسائل خاص این منطقه پاسخ می‌دهد و نتایج آن قابلیت اجرایی بالایی برای مدیریت حمل‌ونقل شهری مشهد خواهد داشت.

ارائه ابزار تصمیم‌گیری قیمت‌گذاری: تحقیق فراتر از تحلیل صرف، یک چارچوب عملیاتی و ابزار کاربردی برای تعیین قیمت خدمات حمل‌ونقل ارائه می‌دهد که می‌تواند توسط نهادهای مسئول مورد استفاده قرار گیرد. این جنبه کاربردی، ارزش پژوهش را به عنوان یک ابزار سیاستی افزایش می‌دهد.

۲- پیشینه تحقیق

تحول روزافزون شهرها و افزایش تقاضا برای جابجایی، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری را به چالشی اساسی تبدیل کرده است. دستیابی به سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار، کارآمد و دسترس‌پذیر، مستلزم درک عمیق رفتار سفر شهروندان و عوامل مؤثر بر انتخاب شیوه‌های حمل‌ونقل است. در این میان، سیاست‌گذاری‌های قیمتی به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند مدیریت تقاضا و هدایت رفتار سفر مطرح می‌شوند (Litman, 2017). این بخش از مقاله به مرور انتقادی ادبیات موجود در زمینه مدل‌سازی انتخاب شیوه حمل‌ونقل، تأثیرات سیاست‌های قیمتی، و چارچوب‌های تحلیلی مرتبط با استفاده از رویکردهای کمی می‌پردازد. هدف، شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و ارائه

شکل ۱. رویکردهای جمع آوری داده و مدلسازی در قیمت گذاری حمل و نقل



فراهم می‌کند و IIA را در درون هر لانه اعمال می‌نماید (Daly & Zachary, 1979).

مدل لاجیت مختلط: این مدل پیشرفته‌ترین رویکرد محسوب می‌شود که امکان ناهمگونی ترجیحات بین افراد و وابستگی بین گزینه‌ها را فراهم می‌آورد و محدودیت IIA را کاملاً برطرف می‌سازد (Train, 2003; Bhat, 2008). این مدل، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رفتار واقعی دارد، اما نیازمند داده‌های جامع و توان محاسباتی بالایی است.

۲-۲- تأثیر قیمت گذاری بر انتخاب شیوه حمل و نقل

مطالعات تجربی متعددی، رابطه بین قیمت گذاری و انتخاب شیوه حمل و نقل را مورد بررسی قرار داده‌اند.

هزینه‌های مستقیم سفر: تحقیقات کلاسیک مانند (Small & Winston, 2006)، با تحلیل داده‌های سفرهای شهری، کشش قیمتی تقاضا برای سفرهای با خودروی شخصی و حمل و نقل عمومی را بر اساس عواملی چون هزینه سوخت، پارکینگ و کرایه حمل و نقل عمومی محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند که سیاست‌های قیمتی می‌توانند ابزار مؤثری برای مدیریت تقاضا و کاهش ترافیک باشند.

سیاست‌های قیمت گذاری ترکیبی و غیرمستقیم: فراتر از هزینه‌های مستقیم، (Goodwin, 1996) تأکید کرد که

۲-۱- مرور مدل‌های انتخاب شیوه حمل و نقل

شکل ۱ رویکردهای جمع آوری داده و مدلسازی در قیمت گذاری حمل و نقل را نشان می‌دهد. مدل سازی رفتار سفر، به ویژه انتخاب شیوه حمل و نقل، از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. مدل‌های مبتنی بر تابع مطلوبیت، که بیانگر منفعت یا رضایت حاصل از هر گزینه انتخابی است، در قلب این تحقیقات قرار دارند (Train, 2009).

مدل لاجیت چندگانه: این مدل به دلیل سادگی در اجرا و تفسیر، به طور گسترده‌ای در مطالعات حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفته است (Ben-Akiva & Lerman, 1985).

فرض کلیدی MNL، یعنی استقلال از گزینه‌های نامرتب، در بسیاری از سناریوهای واقعی نقض می‌شود. برای مثال، افزایش قیمت یک گزینه حمل و نقل عمومی ممکن است سهم بیشتری را به سمت گزینه‌ای مشابه (مانند اتوبوس به مترو) هدایت کند تا گزینه‌ای کاملاً متفاوت (مانند خودروی شخصی)، که این امر با فرض IIA سازگار نیست (McFadden, 1974).

برای غلبه بر محدودیت IIA، مدل‌های پیچیده‌تری توسعه یافته‌اند:

مدل لاجیت سلسله‌مراتبی: این مدل با گروه‌بندی گزینه‌ها در "لانه‌ها"، امکان مدل سازی روابط سلسله‌مراتبی در انتخاب را

سیاست‌های قیمتی مانند عوارض جاده‌ای و هزینه پارکینگ، نقش مهمی در تغییر الگوهای سفر ایفا می‌کنند. تحقیقات اخیر به طور فزاینده‌ای به قیمت‌گذاری ترکیبی توجه نشان داده‌اند که ترکیبی از هزینه‌های دسترسی (مانند عوارض ثابت) و هزینه‌های استفاده (مانند کرایه متغیر بر اساس مسافت یا زمان) است (De Jong, 2011). این رویکرد، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدیریت تقاضا و تشویق به استفاده از شیوه‌های پایدار حمل‌ونقل ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، (Yang et al, 2018) در مطالعه‌ای بر روی پکن، تأثیر سیستم‌های عوارض ترکیبی را بر کاهش ترافیک و آلودگی هوا ارزیابی کردند.

۲-۳- مدل‌سازی رگرسیون چند متغیره در تحلیل قیمتی

در حالی که مدل‌های انتخاب گسسته بر احتمال انتخاب هر گزینه تمرکز دارند، مدل‌های رگرسیون چند متغیره ابزاری قدرتمند برای تحلیل کمی روابط بین متغیرها هستند. این مدل‌ها امکان کمی‌سازی تأثیر تغییرات در پارامترهای قیمتی (متغیرهای مستقل) بر سهم مدها یا سایر شاخص‌های سفر (متغیرهای وابسته) را فراهم می‌کنند. به عنوان مثال، با استفاده از مدل رگرسیون، می‌توان کشش قیمتی هر مد حمل‌ونقل را محاسبه کرد. این کشش، نشان‌دهنده درصد تغییر در سهم یک مد در ازای یک درصد تغییر در قیمت آن مد است (Horowitz & Louviere, 1993). مدل‌های رگرسیون چند متغیره، مانند رگرسیون خطی چند گانه یا مدل‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌های خطی تعمیم‌یافته، به محقق اجازه می‌دهند تا به طور همزمان اثرات متغیرهای مختلف (قیمتی، جمعیتی، کارکردی شبکه) را بر سهم مدها کنترل و تحلیل کنند (Cameron & Trivedi, 2005). این امر درک جامعی از دینامیک‌های پیچیده حاکم بر رفتار سفر ارائه می‌دهد. در زمینه مطالعات داخلی ایران، تحقیقات متعددی به موضوع رفتار سفر و انتخاب شیوه حمل‌ونقل پرداخته‌اند، اما اغلب با محدودیت‌هایی روبرو بوده‌اند که نیازمند توجه بیشتر است. بسیاری از تحقیقات داخلی، به ویژه در مورد شهرهای بزرگی همچون تهران و مشهد، عمدتاً از مدل لجیت چند گانه (MNL) استفاده کرده‌اند؛ برای مثال، مطالعه‌ای که توسط Aghabayk و همکاران (۲۰۱۷) بر روی شهر تهران انجام شد، نمونه‌ای از این رویکرد است. هرچند این مدل به دلیل سادگی کاربرد فراوانی دارد، اما محدودیت فرض استقلال از گزینه‌های نامرتب (IIA) را دارد و ممکن است در سناریوهای

پیچیده و با وجود گزینه‌های حمل‌ونقل مشابه، نتایج دقیقی ارائه ندهد. این موضوع، اهمیت به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته‌تر را که قادر به در نظر گرفتن وابستگی بین گزینه‌ها هستند، برجسته می‌سازد. علاوه بر این، تحقیقات داخلی کمتر به طور عمیق به بررسی اثرات قیمت‌گذاری ترکیبی پرداخته و تحلیل سناریوهای پیچیده‌تر توسعه زیرساخت‌ها در کنار سیاست‌های قیمتی را به صورت جامع پوشش نداده‌اند. به عنوان مثال، بررسی اثر همزمان افزایش کرایه مترو با اجرای سیستم قیمت‌گذاری دسترسی در مناطق مرکزی شهر، کمتر در مطالعات داخلی مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که درک اثر متقابل این سیاست‌ها برای دستیابی به اهداف مدیریت تقاضا و ارتقای پایداری حمل‌ونقل شهری حیاتی است.

در پژوهش حاضر، از توابع مطلوبیت در نرم‌افزار VISUM و مدل رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. این ادغام رویکردی نوین محسوب می‌شود، زیرا VISUM به طور سنتی برای مدل‌سازی شبکه و تخصیص سفر به کار می‌رود و تلفیق آن با تحلیل‌های پیشرفته انتخاب گسسته و رگرسیون، پتانسیل بالایی برای ارائه نتایج دقیق‌تر و جامع‌تر دارد، همانطور که Ortuzar & Willumsen (۲۰۱۱) بر اهمیت ابزارهای مدل‌سازی جامع در این حوزه تأکید کرده‌اند. با توجه به تمرکز تحقیق شما بر توسعه خط ۳ مترو مشهد و تحلیل حساسیت قیمتی، این جنبه از تحقیق، به ویژه در زمینه ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی برای برنامه‌ریزان، می‌تواند نوآوری قابل توجهی به همراه داشته باشد. مطالعات کمی در ایران به طور مشخص به تحلیل کمی سهم مدها در سناریوهای قیمتی مختلف و در بستر توسعه یک خط متروی جدید پرداخته‌اند، که این امر شکاف تحقیقاتی مهمی را نمایان می‌سازد. این تحقیق با هدف پر کردن این شکاف، بر آن است تا با ادغام این رویکردها، مدلی جامع برای پیش‌بینی سهم مدها در مواجهه با سیاست‌های قیمتی متنوع و در بستر توسعه خط ۳ مترو مشهد ارائه دهد. این رویکرد، با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت قیمتی مبتنی بر رگرسیون چند متغیره و مدل‌سازی مطلوبیت در VISUM، قادر خواهد بود تا درک عمیق‌تری از رفتار کاربران حمل‌ونقل فراهم آورد و چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی‌تری را برای برنامه‌ریزان شهری مشهد ارائه دهد. ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که در حالی که مدل‌های متعددی برای تحلیل انتخاب شیوه حمل‌ونقل و تأثیر سیاست‌های قیمتی وجود دارد، ادغام مدل‌سازی مطلوبیت با

مطالعات جامع شهر مشهد" به دست آمده است. این رویکرد، امکان بررسی طیف وسیعی از سناریوهای قیمتی و تأثیرات آن‌ها را فراهم می‌کند که جمع‌آوری مستقیم این داده‌ها در دنیای واقعی ممکن است بسیار پرهزینه، زمان‌بر یا حتی غیرممکن باشد. (۳) استفاده از داده‌های خبرگان و مطالعات پیشین: اگرچه داده‌های اصلی از طریق شبیه‌سازی به دست آمده‌اند، اما تعیین سناریوهای مختلف قیمتی و همچنین اعتبارسنجی اولیه توابع مطلوبیت، با مشورت خبرگان حوزه حمل و نقل سازمان حمل و نقل ترافیک شهر مشهد و بر اساس مطالعات جامع پیشین صورت گرفته است.

۳-۱- تعریف تحقیق از منظر نحوه و تحلیل داده‌ها

تحلیل اکتشافی: در ابتدا، با استفاده از نرم‌افزار VISUM و تغییر کرایه‌های مختلف، رابطه بین کرایه و سهم مدها به صورت اکتشافی بررسی می‌شود تا درک اولیه‌ای از الگوهای رفتاری حاصل گردد.

تحلیل تبیینی: هدف اصلی تحقیق، تبیین رابطه بین متغیرهای مستقل (کرایه‌ها) و متغیرهای وابسته (سهم مدها) است. مدل‌های رگرسیون چندمتغیره دقیقاً برای این منظور طراحی شده‌اند تا مشخص کنند هر واحد تغییر در کرایه، چه تأثیری بر سهم هر مد حمل و نقل دارد.

مدل سازی پیش‌بینانه: نتایج مدل‌های رگرسیون می‌تواند برای پیش‌بینی سهم مدها در آینده، تحت سناریوهای قیمتی مختلف، مورد استفاده قرار گیرد. این پیش‌بینی‌ها اساس تصمیم‌گیری برای تعیین قیمت خدمات حمل و نقل خواهد بود.

۳-۲- مدل پایه: مدل‌های انتخاب

برای درک عمیق‌تر چگونگی انتخاب روش سفر توسط شهروندان، از مدل‌های انتخاب استفاده می‌شود. این مدل‌ها بر اساس این ایده بنا شده‌اند که افراد هنگام مواجهه با گزینه‌های مختلف (مانند وسایل نقلیه متفاوت)، گزینه‌ای را انتخاب می‌کنند که بیشترین "مطلوبیت" یا "سودمندی" را برای آن‌ها به همراه داشته باشد. مطلوبیت یک آلترناتیو (مانند یک روش سفر خاص) تابعی از ویژگی‌های آن آلترناتیو و ویژگی‌های فرد تصمیم‌گیرنده است. در این تحقیق، تابع مطلوبیت برای هر طریق سفر (U_x) به صورت خطی از مشخصه‌های سفر تعریف می‌شود.

$$U_x = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (1)$$

نرم‌افزارهای تخصصی مانند VISUM و تحلیل رگرسیون چند متغیره برای ارزیابی حساسیت قیمتی در چارچوب سناریوهای توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل (مانند خط ۳ مترو مشهد)، یک حوزه نویدبخش و کمتر کاوش شده است. این تحقیق با هدف پر کردن این شکاف، بر آن است تا با ادغام این رویکردها، مدلی جامع برای پیش‌بینی سهم مدها در مواجهه با سیاست‌های قیمتی متنوع و در بستر توسعه خط ۳ مترو مشهد ارائه دهد. این رویکرد، با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت قیمتی مبتنی بر رگرسیون چندمتغیره و مدل‌سازی مطلوبیت در VISUM، قادر خواهد بود تا درک عمیق‌تری از رفتار کاربران حمل‌ونقل فراهم آورد و چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی‌تری را برای برنامه‌ریزان شهری مشهد ارائه دهد.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، تدوین و اجرای مدل‌های قیمت‌گذاری حمل و نقل به منظور تعیین بهای بهینه خدمات و دستیابی به سهم‌های مطلوب حمل و نقلی در شهر مشهد است. رویکرد اتخاذ شده، ترکیبی از مدل‌های رفتار انتخاب و مدل‌های رگرسیون چندمتغیره است که امکان تحلیل دقیق رفتار سفر شهروندان و تأثیر متغیرهای اقتصادی (مانند قیمت) بر آن را فراهم می‌آورد.

از منظر هدف، این تحقیق در دسته تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، هدف کاربردی مشخص، ارائه مدلی برای تعیین قیمت خدمات حمل و نقل عمومی و خصوصی است که بتواند به بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل شهر مشهد، کاهش ترافیک و آلودگی هوا، و دستیابی به اهداف کلان توسعه حمل و نقل کمک کند. این تحقیق از منظر ماهیت داده‌ها و نحوه جمع‌آوری، ترکیبی از رویکردها را به کار می‌گیرد. (۱) تحلیل کمی: بخش عمده‌ای از این پژوهش بر پایه جمع‌آوری و تحلیل داده‌های کمی استوار است. مدل‌های انتخاب و مدل‌های رگرسیون، ابزارهای اصلی تحلیل کمی هستند که بر مبنای داده‌های عددی عمل می‌کنند. مقادیر مربوط به زمان سفر، هزینه سفر، کرایه‌ها، سهم سفر، و پارامترهای مدل‌ها همگی کمی هستند. (۲) تحلیل ثانویه و داده‌های شبیه‌سازی شده: بخش قابل توجهی از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار VISUM و با بهره‌گیری از توابع مطلوبیت استخراج شده از مطالعات پیشین ("بهبودسازی

U_X : میزان مطلوبیت یا ارزش ذهنی سفر X برای مسافر.

n : تعداد مشخصه‌های مؤثر بر انتخاب، مانند زمان سفر، هزینه سفر، راحتی، دسترسی و غیره.

a_i : ضریب اهمیت یا وزن اختصاص داده شده به مشخصه i . این ضریب نشان می‌دهد که هر واحد تغییر در مشخصه i ، چه میزان بر مطلوبیت کل تأثیر می‌گذارد. این ضرایب معمولاً از طریق داده‌های واقعی یا شبیه‌سازی شده برآورد می‌شوند.

X_i : ارزش مشخصه i برای سفر X . به عنوان مثال، اگر X_1 ملازمان سفر باشد، X_1 مدت زمان سفر با آن وسیله نقلیه خاص است.

تاکسی (T) یکی را انتخاب می‌کند. احتمال انتخاب هر گزینه، تابعی نمایی از مطلوبیت آن گزینه نسبت به مجموع مطلوبیت‌های تمام گزینه‌ها است.

مدل لجیت چندگانه یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای تحلیل انتخاب بین بیش از دو گزینه گسسته است. در این مدل، فرض می‌شود که مسافر بین چهار گزینه اصلی سفر در مشهد (خودروی شخصی (C)، اتوبوس (B)، قطار شهری (M) و

$$P(C) = \frac{e^{U_C}}{e^{U_C} + e^{U_B} + e^{U_M} + e^{U_T}} \quad (2)$$

$$P(B) = \frac{e^{U_B}}{e^{U_C} + e^{U_B} + e^{U_M} + e^{U_T}} \quad (3)$$

$$P(M) = \frac{e^{U_M}}{e^{U_C} + e^{U_B} + e^{U_M} + e^{U_T}} \quad (4)$$

$$P(T) = \frac{e^{U_T}}{e^{U_C} + e^{U_B} + e^{U_M} + e^{U_T}} \quad (5)$$

$P(X)$: احتمال انتخاب روش سفر X .

e : پایه لگاریتم طبیعی (عدد نپر).

U_C, U_B, U_M, U_T : توابع مطلوبیت مربوط به هر یک از روش‌های سفر.

سهم هر مد حمل و نقل برقرار کنیم. رگرسیون چندمتغیره به خانواده‌ای از مدل‌های آماری گفته می‌شود که به بررسی رابطه خطی بین چندین متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل می‌پردازند. در مقابل، رگرسیون چندگانه معمولاً به مدلی با یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل اشاره دارد. گاهی اوقات، مدل‌هایی که هم دارای چندین متغیر وابسته و هم چندین متغیر مستقل هستند، با عنوان "رگرسیون چندگانه چندمتغیره" نیز شناخته می‌شوند، اما اصطلاح دقیق‌تر، رگرسیون چندمتغیره است.

در این تحقیق، هدف این است که مشخص شود به ازای چه سطوح قیمتی برای هر مد حمل و نقل، چه سهمی از کل تقاضای سفر به آن مد اختصاص می‌یابد. بنابراین:

متغیرهای وابسته (Y_i): نسبت‌ها یا درصدهای سهم هر یک از مدهای مختلف حمل و نقل (مثلاً سهم خودرو شخصی، سهم اتوبوس، سهم قطار شهری، سهم تاکسی). اگر m مد حمل و نقل در نظر گرفته شود، m متغیر وابسته خواهیم داشت.

متغیرهای مستقل (X_{ij}): کرایه‌های مربوط به هر یک از مدهای حمل و نقل. اگر p مد حمل و نقل دارای کرایه مشخص باشند، p متغیر مستقل خواهیم داشت.

مجموع این احتمالات برابر ۱ خواهد بود $P(C) + P(B) + P(M) + P(T) = 1$ ، که نشان‌دهنده این است که مسافر یکی از این چهار گزینه را قطعاً انتخاب خواهد کرد.

نکته مهم: ضرایب a_i در توابع مطلوبیت، از طریق مصاحبه با مسافران و با استفاده از رویکرد "رجحان بیان شده" در محدوده شهر مشهد برآورد شده‌اند. این ضرایب نشان‌دهنده میزان حساسیت مسافران به تغییرات در مشخصه‌های مختلف سفر (مانند زمان و هزینه) هستند. از آنجایی که این ضرایب قبلاً در مطالعات جامع شهر مشهد اعتبارسنجی شده‌اند، در این تحقیق از همان مقادیر استفاده خواهد شد. این امر به ما امکان می‌دهد تا تأثیر اعمال قیمت‌های مختلف (کرایه تاکسی، اتوبوس، قطار شهری، هزینه پارکینگ) را بر احتمال انتخاب هر مد سفر، به دقت محاسبه و پیش‌بینی کنیم.

۳-۳- مدل نهایی: مدل رگرسیون چندمتغیره

پس از مدل‌سازی رفتار انتخاب سفر، مرحله بعد، توسعه یک مدل رگرسیونی برای تعیین بهای خدمات حمل و نقل است. این مدل به ما کمک می‌کند تا رابطه دقیقی بین قیمت‌های مختلف و

اگر n مشاهده (داده) از متغیرهای مستقل p بعدی X داشته باشیم و بخواهیم رابطه خطی با m متغیر پاسخ Y برقرار کنیم، مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$y_{i1} = \beta_{01} + \sum_{j=1}^p \beta_{j1} x_{ij} + \epsilon_{i1}$$

$$y_{i2} = \beta_{02} + \sum_{j=1}^p \beta_{j2} x_{ij} + \epsilon_{i2}$$

$$\dots$$

$$y_{im} = \beta_{0m} + \sum_{j=1}^p \beta_{jm} x_{ij} + \epsilon_{im}$$

برای $i = 1, \dots, n$ (معادلات ۸ تا ۱۰)

y_{ij} : مقدار j -امین متغیر وابسته برای i -امین مشاهده.

x_{ij} : مقدار j -امین متغیر مستقل برای i -امین مشاهده. (در اینجا، x ها کرایه‌ها هستند).

β_{0k} : عرض از مبدأ برای k -امین متغیر وابسته.

β_{jk} : ضریب رگرسیون برای j -امین متغیر مستقل بر روی k -امین متغیر وابسته. این ضرایب نشان‌دهنده میزان تأثیر هر کرایه بر سهم هر مد حمل و نقل هستند.

ϵ_{ik} : جمله خطای مدل برای i -امین مشاهده و k -امین متغیر وابسته، که نشان‌دهنده تغییراتی است که توسط متغیرهای مستقل در مدل توضیح داده نشده است.

این مدل به ما امکان می‌دهد تا با دقت، چگونگی تأثیرگذاری تغییرات در کرایه هر وسیله نقلیه بر میزان استفاده از آن و سایر وسایل نقلیه را تحلیل کنیم.

۳-۴- جمع‌آوری داده و پیاده‌سازی مدل

فرایند جمع‌آوری داده و اجرای مدل‌ها، شامل مراحل مشخصی است که با هدف دستیابی به نتایج دقیق و قابل اتکا انجام پذیرفته است:

پروژه دارای افق زمانی حداقل پنج ساله است. با توجه به عدم قطعیت در زمان‌بندی دقیق راه‌اندازی خط سه متری مشهد، تعیین قیمت‌ها نیازمند در نظر گرفتن سناریوهای مختلف است. این سناریوها، که با مشورت خبرگان حوزه حمل و نقل و سازمان حمل و نقل ترافیک شهر مشهد تدوین شده‌اند، نرم‌افزار VISUM به عنوان ابزار اصلی برای تولید داده‌های مورد نیاز مدل رگرسیونی به کار گرفته شد. فرایند کار به شرح زیر بود:

ورود داده‌های پایه: توابع مطلوبیت از پیش تعریف شده در VISUM بارگذاری شد.

تعیین کرایه‌ها (متغیرهای مستقل): برای هر سناریو، مجموعه‌ای از سطوح قیمتی مختلف برای کرایه تاکسی، اتوبوس، قطار شهری و هزینه پارکینگ (برای خودرو شخصی) تعریف شد. این کرایه‌ها به صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شدند.

اجرای شبیه‌سازی: برای هر ترکیب از کرایه‌ها، نرم‌افزار VISUM اجرا می‌شد. این نرم‌افزار با استفاده از توابع مطلوبیت، محاسبه می‌کرد که در آن شرایط قیمتی، چه درصدی از مسافران کدام مد حمل و نقل را انتخاب خواهند کرد.

استخراج نتایج (متغیرهای وابسته): خروجی هر شبیه‌سازی شامل نسبت یا سهم هر یک از مدهای حمل و نقل (خودروی شخصی، اتوبوس، قطار شهری، تاکسی) بود.

مدل رگرسیون چندمتغیره تخمین زده شد تا ضرایب β (که نشان‌دهنده رابطه بین کرایه‌ها و سهم مدها هستند) برآورد شوند. ضرایب به دست آمده، اساس تعیین قیمت خدمات حمل و نقل را تشکیل می‌دهند. به عنوان مثال، اگر ضریب کرایه اتوبوس بر سهم اتوبوس مثبت و معنی‌دار باشد، نشان می‌دهد که افزایش کرایه اتوبوس منجر به کاهش سهم آن می‌شود. این رویکرد ترکیبی، امکان تحلیل دقیق و کمی رفتار سفر را فراهم کرده و مبنای علمی محکمی برای سیاست‌گذاری قیمت‌گذاری در سیستم حمل و نقل شهری فراهم می‌آورد.

تشکیل مجموعه داده: هر مجموعه از کرایه‌های ورودی و سهم‌های خروجی حاصل از یک شبیه‌سازی، به عنوان یک "مشاهده" یا "نقطه داده" در مجموعه داده نهایی محسوب می‌شد. این فرآیند برای جمع‌آوری تعداد کافی مشاهده (که بستگی به پیچیدگی مدل و دقت مورد نیاز دارد) تکرار شد. پس از جمع‌آوری مجموعه داده کافی از طریق VISUM، از نرم‌افزارهای آماری مانند Stata برای ساخت مدل رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. در این مرحله: متغیرهای وابسته (سهم مدها) و متغیرهای مستقل (کرایه‌ها) به نرم‌افزار وارد شدند.

۴- پیاده‌سازی مدل و نتایج

۴-۱- سناریوی صفر: عدم راه‌اندازی خط ۳ مترو

شبیه‌سازی، شامل سهم هر یک از مدها در جابجایی مسافران و میزان آلاینده‌گی ناشی از حمل‌ونقل بود. این داده‌های ورودی-خروجی، به عنوان مشاهدات برای ساخت مدل رگرسیونی چندمتغیره مورد استفاده قرار گرفتند. ساخت مدل رگرسیون چندمتغیره: با استفاده از مشاهدات حاصل از شبیه‌سازی VISUM، مدل رگرسیون چندمتغیره با بهره‌گیری از نرم‌افزار آماری Stata پیاده‌سازی شد. در این مدل، سهم هر یک از مدها به عنوان متغیر وابسته و سطوح کرایه (شامل کرایه مترو MTP، اتوبوس BTP، تاکسی TP و هزینه پارکینگ PC) به عنوان متغیرهای مستقل تعریف شدند. معادلات رگرسیونی برآورد شده به شرح جدول (۱) ارائه شده است.

در این بخش، مدل‌سازی و تحلیل رفتاری حمل‌ونقل شهری مشهود با فرض عدم راه‌اندازی خط ۳ مترو در افق پنج‌ساله تحقیق (۱۴۰۱-۱۴۰۵) ارائه می‌شود. این سناریو، وضعیت موجود حمل‌ونقل با احتساب خطوط فعال ۱ و ۲ مترو، اتوبوس، خودروی شخصی و تاکسی را در بر می‌گیرد. **جمع‌آوری و پردازش داده‌ها با VISUM:** برای دستیابی به اهداف فوق، فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزار VISUM با هدف تعیین کرایه‌های بهینه انجام پذیرفت. در این فرآیند، مجموعه‌ای از سطوح قیمتی برای کرایه چهار مد اصلی حمل‌ونقل (مترو، اتوبوس، تاکسی و هزینه پارکینگ خودروی شخصی) تعریف شد. هر ترکیب منحصر به فرد از این سطوح قیمتی به عنوان یک ورودی شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. خروجی هر اجرای

جدول ۱. مدل‌های رگرسیونی برآوردکننده سهم مدهای مختلف بر حسب کرایه در سناریوی صفر

مد حمل و نقل	سهم مد بر حسب بهای خدمات	ضریب R^2
سهم خودروی شخصی	$40.36889 + 0.0012174 \times BTP - 0.0012817 \times PC + 0.0018057 \times TP$	0.9402
سهم تاکسی	$17.51628 + 0.0000696 \times MTP + 0.0004136 \times BTP + 0.0001675 \times PC - 0.0026399 \times TP$	0.9572
سهم اتوبوس	$17.08911 + 0.0000667 \times MTP - 0.0022851 \times BTP + 0.0002637 \times PC + 0.0005517 \times TP$	0.9611
سهم مترو	$2.889028 - 0.0002121 \times MTP + 0.000013906 \times BTP - 0.0000097 \times PC - 0.0000093 \times TP$	0.8623

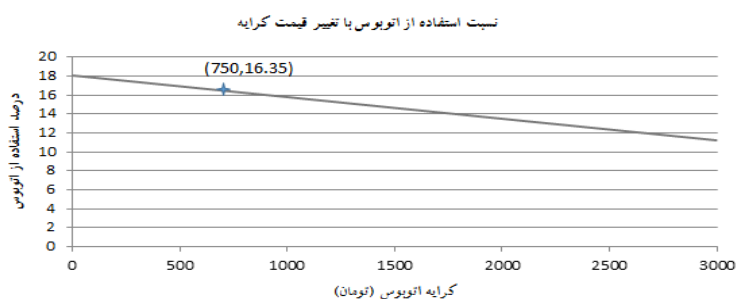
پیش‌بینی سهم مدها و تحلیل حساسیت: با استفاده از معادلات رگرسیونی فوق، امکان پیش‌بینی سهم هر یک از مدها برای افق پنج ساله (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۵) فراهم می‌شود. با وارد کردن سطوح کرایه‌ای پیشنهادی برای هر سال در معادلات، سهم مورد انتظار هر مد استخراج می‌گردد. جدول (۲) نمونه‌ای از این پیش‌بینی‌ها را با فرض تغییر کرایه‌ها در این بازه زمانی نشان می‌دهد.

جدول ۲. نمونه‌ای از سهم‌ها و کرایه‌های هر یک از مدها با فرض عدم راه‌اندازی خط ۳ مترو

کرایه‌های مد حمل و نقل	سهم‌های مد حمل و نقل
مترو (۱۰۰۰)، اتوبوس (۸۵۰)، تاکسی (۷۴۰) و خودروی شخصی (۱۹۰۰)	مترو (۲/۵۸)، اتوبوس (۱۶/۱۴)، تاکسی (۱۶/۲۲) و خودروی شخصی (۴۰/۷۱)
مترو (۱۲۵۰)، اتوبوس (۱۲۰۰)، تاکسی (۱۱۰۰) و خودروی شخصی (۲۳۰۰)	مترو (۲/۶۶)، اتوبوس (۱۵/۶۴)، تاکسی (۱۵/۵۸) و خودروی شخصی (۴۰/۸۴)
مترو (۱۵۰۰)، اتوبوس (۱۵۰۰)، تاکسی (۱۴۰۰) و خودروی شخصی (۳۰۰۰)	مترو (۲/۵۹)، اتوبوس (۱۵/۳۲)، تاکسی (۱۵/۰۵) و خودروی شخصی (۴۰/۸۴)
مترو (۲۰۰۰)، اتوبوس (۱۸۰۰)، تاکسی (۱۸۵۰) و خودروی شخصی (۳۷۰۰)	مترو (۲/۴۹)، اتوبوس (۱۵/۱۰)، تاکسی (۱۴/۱۳) و خودروی شخصی (۴۱/۱۲)
مترو (۲۵۰۰)، اتوبوس (۲۳۰۰)، تاکسی (۲۴۰۰) و خودروی شخصی (۴۶۰۰)	مترو (۲/۳۸)، اتوبوس (۱۵/۵۳)، تاکسی (۱۳/۰۷) و خودروی شخصی (۴۱/۵۶)
مترو (۳۲۰۰)، اتوبوس (۲۸۰۰)، تاکسی (۳۱۰۰) و خودروی شخصی (۵۸۰۰)	مترو (۲/۲۳)، اتوبوس (۱۴/۱۴)، تاکسی (۱۱/۶۸) و خودروی شخصی (۴۱/۸۸)

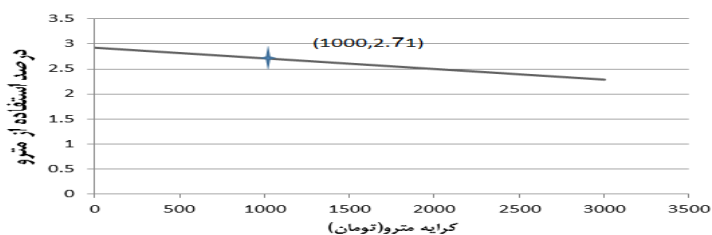
علاوه بر پیش‌بینی، تحلیل حساسیت برای درک بهتر تأثیر تغییرات کرایه هر مد بر سهم آن انجام شد. این تحلیل با ثابت نگه داشتن کرایه‌های سایر مدها و تغییر تدریجی کرایه یک مد خاص صورت گرفت و نتایج آن در قالب نمودار (شکل ۲ تا ۵) نمایش داده شد:

تأثیر کرایه اتوبوس (شکل ۲): افزایش ۱۰۰۰ تومانی کرایه اتوبوس، منجر به کاهش ۲٫۲۸ درصدی سهم این مد می‌شود (از ۱۸٫۰۶٪ با کرایه صفر به ۱۱٫۲۲٪ با کرایه ۳۰۰۰ تومان).



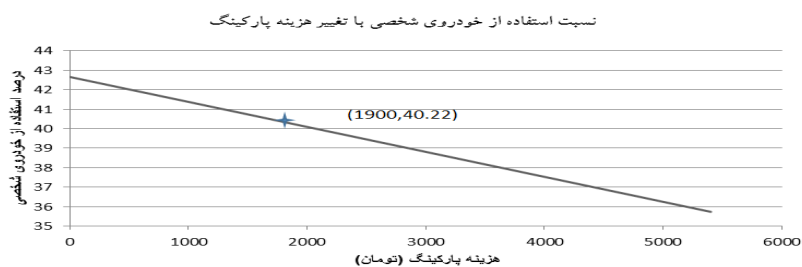
شکل ۲. رابطه بین کرایه اتوبوس و درصد استفاده از آن سناریوی صفر

تأثیر کرایه مترو (شکل ۳): افزایش ۱۰۰۰ تومانی کرایه مترو، کاهش ۰٫۲۱ درصدی را در سهم مترو به همراه دارد (از ۲٫۹۲٪ با کرایه صفر به ۲٫۲۸٪ با کرایه ۳۰۰۰ تومان).



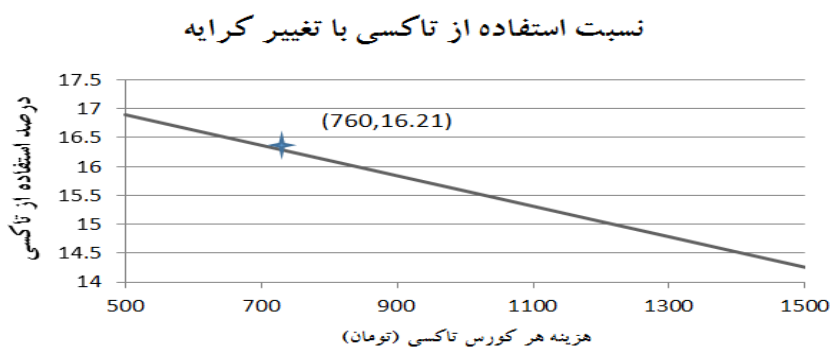
شکل ۳. رابطه بین کرایه مترو و درصد استفاده از آن سناریوی صفر

تأثیر هزینه پارکینگ (شکل ۴): افزایش ۱۰۰۰ تومانی هزینه پارکینگ، منجر به کاهش ۱,۲۸ درصدی سهم خودروی شخصی می شود (از ۴۲,۶۵٪ با پارکینگ رایگان به ۳۵,۷۳٪ با هزینه ۵۴۰۰ تومان).



شکل ۴. رابطه بین کرایه پارکینگ و درصد استفاده از خودروی شخصی سناریوی صفر

تأثیر کرایه تاکسی (شکل ۵): افزایش ۱۰۰۰ تومانی کرایه تاکسی، کاهش ۲,۶۴ درصدی در سهم این مد را نشان می دهد (از ۱۶,۸۹٪ با کرایه ۵۰۰ تومان به ۱۴,۲۵٪ با کرایه ۱۵۰۰ تومان). لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت کارشناسی و خصوصی بودن تعیین کرایه تاکسی، انعطاف پذیری قیمتی آن محدود است و تغییرات کوچک کرایه تأثیر ناچیزی بر تقاضا دارد.



شکل ۵. رابطه بین کرایه تاکسی و درصد استفاده از آن سناریوی صفر

این تحلیل‌ها نشان‌دهنده میزان تأثیرپذیری سهم مدها از سیاست‌های قیمتی در سناریوی عدم راه‌اندازی خط ۳ مترو است.

۴-۲- سناریوی راه‌اندازی بخشی از خط ۳ مترو (فاز اول)

برآورد گردید. این معادلات، سهم مد حمل‌ونقل (خودروی شخصی، تاکسی، اتوبوس و مترو) را بر اساس بهای خدمات (کرایه‌ها) پیش‌بینی می‌کنند.

در جدول ۳ چهار معادله رگرسیونی خطی ارائه می‌دهد که سهم هر مد را بر اساس کرایه‌ها (TP, PC, BTP, MTP) تعیین می‌کند. ضریب تعیین (R^2) بالا در اکثر مدل‌ها (مانند سهم خودروی شخصی ۰,۹۸۲۸ و اتوبوس ۰,۹۷۳۷) نشان‌دهنده برازش مناسب مدل‌ها است. با توجه به معناداری آماری معادلات، امکان تعیین سهم هر مد حمل‌ونقل بر اساس تغییرات همزمان قیمتی فراهم می‌شود.

در این بخش، تأثیر راه‌اندازی فاز اول خط ۳ مترو، شامل ایستگاه‌های شهدا، باب‌الجواد و پایانه مسافربری (به طول ۵,۳ کیلومتر) در افق پنج‌ساله تحقیق (۱۴۰۱-۱۴۰۵) مورد بررسی قرار گرفت. راه‌اندازی این بخش از خط ۳، منجر به تغییر در ساختار شبکه حمل‌ونقل و احتمال افزایش سهم مترو در جابجایی‌های درون‌شهری می‌شود. برای مدل‌سازی این تغییرات، نرم‌افزار VISUM با پیکربندی جدید اجرا شد تا رفتار مسافران و مطلوبیت آن‌ها در شرایط جدید شبکه شبیه‌سازی شود. ورودی‌های نرم‌افزار شامل ترکیبات مختلف کرایه‌های مدها و خروجی‌ها شامل نسبت استفاده از مدها بود. با استفاده از این داده‌ها، معادلات رگرسیونی در جدول (۳)

جدول ۳. مدل‌های رگرسیونی برآوردکننده سهم مدهای مختلف بر حسب کرایه در سناریوی ۱

مد حمل و نقل	سهم مد بر حسب بهای خدمات	ضریب R^2
سهم خودروی	$42.07975+0.0001348 \times MTP+0.001301 \times BTP-0.0032416 \times PC+0.0017661 \times TP$	0.9828
سهم تاکسی	$15.12909 +0.0007095 \times BTP+0.0008431 \times PC-0.0032111 \times TP$	0.9131
سهم اتوبوس	$17.11673+0.000133 \times MTP -0.0028972 \times BTP +0.0012584 \times PC+0.0012151 \times TP$	0.9737
سهم مترو	$3.397557-0.0002413 \times MTP +0.0000867 \times BTP +9.74e-06 \times PC$	0.8675

۴-۳- سناریوی راه‌اندازی کامل خط ۳ مترو

خدمات (کرایه‌ها) در سناریوی راه‌اندازی کامل خط ۳ پیش‌بینی می‌کنند. این جدول نیز شامل چهار معادله رگرسیونی برای سهم خودروی شخصی، تاکسی، اتوبوس و مترو است. ضریب تعیین (R^2) برای هر معادله ذکر شده است. ضریب تعیین (R^2) در این سناریو نیز بالا بوده و نشان‌دهنده برازش خوب مدل‌ها است (مانند سهم خودروی شخصی ۰,۹۸۸۱ و اتوبوس ۰,۹۸۷۱). به منظور پیش‌بینی سهم سفر هر یک از مدها برای افق پنج‌ساله، مبالغ پیشنهادی کرایه در ابتدای هر سال در معادلات جدول (۴) قرار داده می‌شود تا درصد سهم‌های مختلف استخراج گردد.

با در نظر گرفتن احتمال راه‌اندازی کلیه ایستگاه‌های خط ۳ مترو در افق پنج‌ساله، این سناریو نیز در تحقیق لحاظ گردید. برای مدل‌سازی این وضعیت، رفتار و مطلوبیت مسافران در شرایط جدید شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نرم‌افزار VISUM مجدداً با پیکربندی جدید برای این سناریو اجرا شد. ورودی‌های نرم‌افزار شامل کرایه‌های مختلف مدها و خروجی‌ها شامل نسبت‌های استفاده از مدها بود. بر اساس مشاهدات به دست آمده، معادلات رگرسیونی در جدول (۴) برآورد گردیدند. این معادلات، سهم مدها را بر حسب بهای

جدول ۴. مدل‌های رگرسیونی برآوردکننده سهم مدهای مختلف بر حسب کرایه در سناریوی ۲ (راه‌اندازی کامل خط ۳)

مد حمل و نقل	سهم مد بر حسب بهای خدمات	ضریب R^2
سهم خودروی شخصی	$42.0162+0.0000937 \times MTP+0.0012975 \times BTP -0.0031654 \times PC+0.0018138 \times TP$	0.9881
سهم تاکسی	$14.58202+0.000121 \times MTP+0.0007502 \times BTP +0.0007841 \times PC-0.0032142 \times TP$	0.9383
سهم اتوبوس	$16.67976+0.0001072 \times MTP-0.0028271 \times BTP +0.0011885 \times PC+0.0010478 \times TP$	0.9871
سهم مترو	$4.539853-0.0002942 \times MTP+0.0000279 \times BTP +0.0001228 \times PC+0.00000927 \times TP$	0.9232

۵- نتیجه گیری

ابزار کنترلی مؤثر برای مدیریت سهم مدها و هدایت تقاضای سفر به سمت اهداف حمل و نقل درون شهری (کاهش ترافیک، بهبود کیفیت هوا و افزایش بهره‌وری حمل و نقل عمومی) به کار گرفته شود. ضریب تعیین (R^2) بالا در مدل‌های رگرسیونی (مانند ۰,۹۸۲۸، برای خودروی شخصی در سناریوی اول و ۰,۹۸۸۱، برای خودروی شخصی در سناریوی دوم) بیانگر برازش مناسب مدل‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها در پیش‌بینی سهم مدها بر اساس تغییرات کرایه است. با این حال، یافته‌های تحقیق بر این نکته تأکید دارند که قیمت، تنها یکی از عوامل مؤثر بر انتخاب مد حمل و نقل توسط افراد است. عوامل دیگری همچون زمان سفر، راحتی، دسترسی، ایمنی، و قابلیت اطمینان نیز نقش بسزایی در تصمیم‌گیری مسافران ایفا می‌کنند. بنابراین، در حالی که تعیین بهای خدمات می‌تواند ابزاری قدرتمند در سیاست‌گذاری حمل و نقل باشد، دستیابی به یک سیستم حمل و نقل شهری پایدار و کارآمد نیازمند در نظر گرفتن و سرمایه‌گذاری همزمان بر روی سایر عوامل مؤثر و بهبود کیفیت و کمیت خدمات حمل و نقل عمومی است. در نهایت، این پژوهش با ارائه مدل‌های کمی برای پیش‌بینی سهم مدها بر اساس قیمت، گامی در جهت حمایت از تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد در حوزه مدیریت حمل و نقل شهری مشهود برداشته است. با این وجود، تحقیقات آتی می‌تواند با لحاظ کردن عوامل بیشتر مؤثر بر انتخاب مد و همچنین بررسی سناریوهای گسترده‌تر، به درک عمیق‌تر و ارائه راهکارهای جامع‌تر برای حل معضلات حمل و نقل شهری کمک نمایند.

حمل و نقل شهری، به ویژه در کلان‌شهری مانند مشهد، با چالش‌های متعددی روبروست که یکی از اساسی‌ترین آن‌ها، تعیین بهای خدمات بهینه برای سامانه‌های حمل و نقل عمومی و خصوصی است. کرایه‌های نامتعادل اتوبوس، مترو و تاکسی، به همراه هزینه‌های پارکینگ، می‌توانند به طور مستقیم بر الگوهای سفر شهروندان تأثیر گذاشته و منجر به پیامدهای ناخواسته‌ای چون افزایش استفاده از خودروهای شخصی، تشدید ترافیک و آلودگی هوا، یا عدم بهره‌برداری بهینه از ظرفیت حمل و نقل عمومی شوند. در این پژوهش، با هدف ارائه راهکاری علمی برای مدیریت تقاضای سفر و بهینه‌سازی سیاست‌گذاری کرایه‌ها، مدلی جامع مبتنی بر رویکرد رجحان بیان شده (Stated Preference) و با استفاده از تکنیک لوجیت چندگانه (Nested Logit) توسعه داده شد. این مدل، رفتار انتخاب وسیله سفر توسط شهروندان مشهد را در افق پنج‌ساله (۱۴۰۵-۱۴۰۱) و در سناریوهای مختلف راه‌اندازی خطوط مترو (شامل راه‌اندازی فاز اول و راه‌اندازی کامل خط ۳) شبیه‌سازی و تحلیل کرد. داده‌های اولیه قیمتی برای کرایه‌های مختلف در بازه زمانی پیش‌بینی شده، با استفاده از نرم‌افزار VISUM به منظور پیکربندی شبکه و شبیه‌سازی رفتار سفر، مورد پردازش قرار گرفت. خروجی‌های نرم‌افزار VISUM، به همراه داده‌های قیمتی، به عنوان ورودی برای برآورد مدل‌های رگرسیونی چند متغیره مورد استفاده قرار گرفتند. این مدل‌ها، ارتباط بین کرایه‌ها و سهم مدها (خودروی شخصی، تاکسی، اتوبوس و مترو) را به طور کمی تعیین نمودند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که تغییرات قیمتی می‌تواند به عنوان یک

۶- مراجع

لوجیت چندگانه و تأکید بر عوامل اجتماعی-اقتصادی. مجله پژوهش‌های عمرانی، ۳۰(۲)، ۷۲-۵۷.
-Aghabayk, K., Shavandi, N., & Izadi, A. (2017). Modeling mode choice behavior in Tehran using multinomial logit model. *Journal of Transportation Infrastructure and Engineering*, 3(1), 25-38.
- Banister, D. (2002). Transport planning. In *Transport planning*, Routledge. 21-43.
-Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). Discrete choice analysis: theory and application to travel demand. MIT press.

-کرباسیان، رضا، نظری، امیر، و حیدری، محمد. (۱۳۹۵). مدل‌سازی انتخاب مد حمل و نقل در شهر تهران با استفاده از مدل لوجیت چندگانه. *فصلنامه تحقیقات حمل و نقل*، ۱۳(۳)، ۳۹۴-۳۷۹.
-نعمتی، مریم، قادری، محمد، و ذاکر، ابراهیم. (۱۳۹۷). تحلیل عوامل مؤثر بر انتخاب مد حمل و نقل عمومی در شهر زنجان. *فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی شهری*، ۷(۲۵)، ۱۸-۱.
-رضایی، ابراهیم، بختیاری، سجاد، و محمدزاده، مریم. (۱۳۹۸). مدل‌سازی انتخاب مد حمل و نقل در شهر تهران با رویکرد

- Litman, T. (2017). Evaluating transportation land use impacts. *Victoria Transport Policy Institute*.
- McFadden, D. (1974). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In *Structural analysis of discrete data with economic applications*, MIT Press. 105-142.
- Ortuzar, J. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Small, K. A., & Winston, C. (2006). The effects of gasoline prices, driving costs, and urban form on US vehicle travel. *The Review of Economics and Statistics*, 88(4), 646-654.
- Small, K. A., & Winston, C. (2006). The economics of congestion. *MIT Press*.
- Train, K. (2009). *Qualitative choice analysis: Theory, econometrics, and application to transportation*. MIT press.
- Train, K. E. (2003). *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press.
- Yang, X., Tan, J., Wang, Y., & Chen, Y. (2018). The impact of hybrid road pricing on travel behavior and traffic congestion: A case study of Beijing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 112, 107-118.
- Bhat, C. R. (2008). Advanced econometric techniques for modeling transportation choices. In *Handbook of Transport Modeling*, 245-270).
- Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2005). *Microeconometrics: Methods and applications*. Cambridge University Press.
- Daly, A., & Zachary, S. (1979). Some examples of the application of a general disaggregate choice model. *Transport Research Record*, (722).
- De Jong, G. (2011). Road pricing: Economic theory and policy. In *The Oxford Handbook of Transport Economics*, 258-283.
- Goodwin, P. B. (1992). A review of new demand elasticities in international travel/tourism literature and their policy implications. *Journal of Transport Geography*, 1(4), 231-244.
- Goodwin, P. B. (1992). A review of new demand elasticities in public transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, 26(2), 155-165.
- Horowitz, J. L., & Louviere, J. J. (1993). Analyzing choices over time: Choices with unpredictable components. *Journal of Marketing Research*, 30(1), 61-71.

Predicting Urban Transportation Mode Shares Based on Service Pricing Using a Multinomial Logit Model and Multivariate Regression Approach

Mohammad Hamevand, Ph.D. Student, Department of Management, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.

Iraj Nouri, Department of Management, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.

Mohammad Sadegh Hori, Department of Management, Ar.C., Islamic Azad University, Arak, Iran.

E-mail: i-nouri@iaau.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

This research aims to analyze the effect of pricing on mode choice behavior and predict the share of transportation modes in Mashhad, by examining three scenarios for the development of Metro Line 3: no operation, limited operation, and full operation. For this purpose, the stated preference-based mode choice modeling method, based on the multinomial logit model, was employed, and five-year price data were extracted. Subsequently, by integrating this data and the outputs of the VISUM software, final multivariate regression models were developed to predict transportation mode shares. The findings indicate that private car and taxi modes exhibit the highest elasticity and sensitivity to changes in fares and parking costs, while the metro shows the lowest price sensitivity. Furthermore, the model results suggest that price can be utilized as an effective policy tool for managing travel demand, although the final implementation of pricing policies necessitates consideration of operational constraints and expert opinions. This study, by providing an efficient framework for determining transportation service prices and analyzing their effects, can be utilized in the planning and policymaking for Mashhad's urban transportation. However, for comprehensive demand management, simultaneous attention to non-price factors such as service quality, travel time, and accessibility is also essential.

Keywords: Urban Transport, Mashhad, Sensitivity Analysis, Mode Share Prediction, Metro Line 3, Transport Pricing, Multinomial Logit Model, Software