نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۳، سال ۱۳۹۶، صفحات ۵۸۱ تا ۵۹۲
DOI: 10.22060/ceej.2016.685

کاربرد مدل لوجیت ترکیبی در انتخاب وسیله: مطالعه موردی سفرهای شغلی شهر مشهد

امیررضا ممدوحی*، سید اصغر میرمحمدی

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۴ مهر ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۴ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۳شهریور ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۸ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
لوجیت ترکیبی
ضرایب تصادفی
لوجیت چندگانه
سفرهای شغلی
انتخاب وسیله

چکیده: مدل‌های تفکیک سفر، معمولاً به‌عنوان سومین مرحله از فرآیند چهارمرحله‌ای، سهم وسایل نقلیه را در سفرهای شهری مشخص می‌کند. مدل‌های انتخاب به عنوان مدل‌های احتمالی در دهه‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و پیشرفت قابل توجهی کرده‌اند. مدل لوجیت ترکیبی به عنوان مدل انتخاب انعطاف‌پذیر، سال‌های زیادی است که شناخته شده است، اما با ورود کامپیوتر و روش شبیه‌سازی این مدل، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. این مدل برخلاف مدل لوجیت استاندارد به یک توزیع خاص محدود نیست و توانایی یافتن ناهمگونی در رفتار افراد و حتی منبع ایجاد این ناهمگونی را نیز دارد. مدل لوجیت ترکیبی می‌تواند، با در نظر گرفتن توزیع‌های مناسب برای ویژگی‌های ضرایب در تابع مطلوبیت، رفتار مدل‌های مختلف با مطلوبیت تصادفی را تقریب زند. هدف از این پژوهش، بررسی ساختار مدل لوجیت ترکیبی برای مدل‌سازی انتخاب وسیله، به منظور توصیف اختلاف سلیقه در میان افراد و منبع این اختلاف سلیقه، در ارتباط با ویژگی‌های مختلف تأثیرگذار در انتخاب وسیله است. در این مطالعه، از اطلاعات تفکیک سفرهای شغلی برگرفته شده از اطلاعات آمارگیری سال ۱۳۸۷ شهر مشهد و از نرم‌افزار بایوجیم جهت پرداخت مدل‌ها استفاده شده است. نتایج پرداخت مدل‌های لوجیت ترکیبی، نشان می‌دهد که در بین مسافران در ارتباط با سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی و موتورسیکلت، به ترتیب در انتخاب خودروی شخصی و موتورسیکلت، اختلاف سلیقه‌ای وجود دارد، که به‌وسیله‌ی تجزیه ضرایب تصادفی، بخشی از منبع این اختلاف سلیقه نیز ارائه شده است. در این پژوهش، نشان داده می‌شود که مدل‌های لوجیت ترکیبی به صورت معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد نسبت به مدل لوجیت چندگانه برتری دارد. اگرچه میزان برتری با توجه به ضریب خوبی برازش در سطح ناچیزی است که یکی از دلایل آن ناکافی بودن دقت و در سطح هم‌فزونی اطلاعات است.

۱- مقدمه

فرآیند چهار مرحله‌ای از متداول‌ترین روش‌های تحلیل تقاضا در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل به شمار می‌آید. مدل‌های تفکیک سفر، معمولاً به عنوان سومین مرحله از این فرآیند سهم وسایل نقلیه را در سفرهای شهری مشخص و اطلاعات مورد نیاز برای تخصیص سفر به عنوان آخرین مرحله از فرایند چهار مرحله‌ای را آماده می‌نماید. مرحله‌ی تفکیک سفر، به دلیل دارا بودن متغیرهای سیاست‌پذیر، نقش کلیدی در سیاست‌گذاری حمل‌ونقل عمومی، ایفا می‌کند [۱]. مدل‌های انتخاب[1] نسبت به سایر مدل‌های تفکیک سفر، در دهه‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و پیشرفت قابل توجهی کرده‌اند. ساختار این مدل‌ها، از نوع احتمالی[2] است و در آن رفتار تصمیم‌گیرنده و تلاش او در بیشینه‌سازی مطلوبیت ناشی از انتخاب، از طریق روابط ریاضی مدل‌سازی می‌شود [۲]. مدل‌های با مطلوبیت تصادفی، بیش از ۵۰ سال است که در زمینه‌ی تحقیقات حمل‌ونقلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ابتدا (در شرایط تعداد گزینه‌ها) تقریباً تمامی کاربردها بر اساس مدل لوجیت چندگانه[3] بود [۳, ۴]. مدل لوجیت چندگانه، ساده‌ترین، ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین مدل انتخاب گسسته به شمار می‌آید. محبوبیت این مدل از آنجا ناشی می‌شود که فرم بسته‌ای برای بیان احتمال انتخاب گزینه‌ها ارائه می‌دهد که به سادگی قابل تفسیر است [۵]. اولین بار ساختار مدل لوجیت توسط برکسن[4] [۶] استفاده شد. این مدل در دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی و پس از تحقیقات مک‌فادن[5] [۴] به‌صورت چشم‌گیری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت [۷]. با معرفی خانواده‌ی مدل‌های مقدار حدی تعمیم یافته[6]، از محدودیت‌های تعریف شده برای مدل لوجیت کاسته می‌شود، که از معروفترین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های لوجیت آشیانه‌ای[7] اشاره کرد [۵]. دو نوع دیگر مدل‌های انتخاب گسسته، که به عنوان مدل‌های انعطاف‌پذیر شناخته می‌شوند، مدل پروبیت چندگانه[8] [۸, ۹] و مدل لوجیت

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: armamdoohi@modares.ac.ir

1 Choice Models
2 Probability Models
3 Multinomial Logit Model
4 Berkson
5 McFadden
6 Generalized Extreme Value (GEV) Models
7 Nested Logit (NL) Models
8 Multinomial Probit (MNP) Mode

Archive of SID
www.SID.ir

ترکیبی چندگانه[1] [۱۰] است. مدل‌های پروبیت دارای ساختار بسیار پیچیده‌ای هستند که به کارگیری آن‌ها مستلزم صرف هزینه‌های هنگفتی خواهد بود. از طرف دیگر مدل‌های پروبیت دارای فرمول‌های خاص (به عنوان مثال نمایی، کسری و ...) نیستند که این موضوع نیز کاربرد آن‌ها را با مشکل روبرو می‌نماید. مدل لوجیت ترکیبی می‌تواند تفسیرهای رفتاری و فیزیکی فراوانی ارائه کند. مانند مدل پروبیت، سال‌های زیادی از شناخت این مدل می‌گذرد، اما با توجه به عدم وجود فرم بسته برای بیان احتمال انتخاب گزینه‌ها و نیاز به استفاده از روش شبیه‌سازی در پرداخت مدل‌های لوجیت ترکیبی، این مدل در ۲۰ سال اخیر و پس از توسعه در تکنولوژی ساخت کامپیوترهای پرسرعت، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است [۵, ۱۱]. اولین کاربرد مدل لوجیت ترکیبی مربوط به مدل‌های تقاضای اتومبیل می‌شود که توسط بوید و ملمن[2] [۱۲] و کاردل و دانبر[3] [۱۳] مورد استفاده قرار گرفت. مک‌فادن و ترین[4] [۱۰] در تحقیقات خود نشان دادند که در مدل لوجیت ترکیبی، می‌توان با در نظرگرفتن توزیع‌های مناسب برای ویژگی‌های ضرایب در تابع مطلوبیت، رفتار مدل‌های مختلف با مطلوبیت تصادفی را تقریب زد، که نوع این توزیع‌ها به منظور مطابقت بیشتر با واقعیت تعیین می‌شود [۱۱]. انتخاب نوع توزیع برای ضرایب با توزیع تصادفی، نقش بسیار مهمی در خصوصیات یک مدل لوجیت ترکیبی دارد [۱۴, ۱۵]. در بیشتر مطالعه‌ها، مانند میندرتا[5] [۱۶]، تنها توزیع‌های نرمال و لگاریتم نرمال[6] کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی مدل‌های لوجیت ترکیبی داشتند. چندین محقق نیز مانند هنشر و گرین[7] [۱۷]، خواهان استفاده از توزیع مثلثی[8] شدند. در حالی که در دهه‌ی اخیر مانند مطالعه‌ی ترین و سانییر[9] [۱۸]، نتیجه‌های خوبی با استفاده از توزیع‌های محدود شده[10] مانند توزیع SB جانسون[11]، گرفته شده است. با بررسی پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی کاربرد مدل‌های لوجیت ترکیبی، مشاهده می‌شود که مطالعه‌های فراوانی در خارج از کشور در زمینه‌ی کاربرد این مدل‌ها انجام شده است، که اهمیت پرداخت به این موضوع را بیشتر می‌کند.

هدف از این پژوهش، بررسی ساختار مدل لوجیت ترکیبی برای مدل‌سازی انتخاب وسیله‌ی شهر مشهد، به منظور توصیف اختلاف سلیقه در میان افراد و منبع این اختلاف سلیقه، در پاسخ به ویژگی‌های مختلف تأثیرگذار در انتخاب وسیله است. ساختار این مطالعه به این شرح است که در ابتدا مبانی مدل لوجیت ترکیبی ارائه می‌شود و در بخش سوم نمونه آماری و هم‌چنین متغیرهای مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی بررسی شده است و در انتها، پس از ارائه‌ی نتایج مدل‌های پرداخت شده در بخش چهارم، نتایج حاصل از این مطالعه و پیشنهاداتی برای ادامه‌ی آن ارائه می‌شود.

۲- مدل لوجیت ترکیبی

مدل لوجیت ترکیبی در ۲۰ سال اخیر به علت توسعه در تکنولوژی ساخت کامپیوترهای پرسرعت، مورد توجه بیشتر قرار گرفته و به صورت گسترده‌تری مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. ساختار این مدل، ساختاری تعمیم‌یافته و منطقی از مدل معروف لوجیت چندگانه است که توانایی تخمین هرگونه مدل با مطلوبیت تصادفی را دارد و بر سه کمبود مهم مدل لوجیت چندگانه با استفاده از در نظرگرفتن اختلاف سلیقه‌ی تصادفی[12]، الگوی جانشینی نامحدود[13] و وابستگی عوامل دیده نشده در زمان[14] چیره شده است [۵]. لازم به ذکر است که این مدل برخلاف مدل‌های لوجیت استاندارد و پروبیت، به یک توزیع خاص محدود نیست و توانایی یافتن ناهمگونی در رفتار افراد و حتی منبع ایجاد این ناهمگونی را دارد [۷]. در زمینه‌ی مدل‌سازی انتخاب گسسته، تابع مطلوبیت تعریف شده برای تصمیم‌گیرنده‌ی n، برای انتخاب گزینه‌ی i از مجموعه‌ی انتخاب در دسترس، به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود [۱۱, ۱۹].

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \qquad (۱)$$

که در آن V_{ni} مطلوبیت معین (قابل مشاهده) گزینه‌ی i برای فرد n و ε_{ni} بخش نامعین و تصادفی (غیرقابل مشاهده) مطلوبیت گزینه‌ی i برای فرد n تعریف می‌شود. در مدل لوجیت ترکیبی، بخش غیرقابل مشاهده‌ی تابع مطلوبیت (ε_{ni}) شامل دو بخش است. قسمت اول از یک توزیع دلخواه و قسمت دوم مانند مدل لوجیت استاندارد از توزیع مقدار حدی با توزیع مستقل و یکسان[15] تشکیل می‌شود، بنابراین فرض‌های کمتری را بر داده‌ها تحمیل می‌نماید اما مانند مدل پروبیت دارای فرم بسته نیست. فرم کلی مدل لوجیت ترکیبی به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود [۵, ۷, ۱۴].

1 Mixed Multinomial Logit (MMNL) Model
2 Boyd and Mellman
3 Cardell and Dunbar
4 Train
5 Mehndiratta
6 Normal and Lognormal Distributions
7 Hensher and Greene
8 Triangular Distribution
9 Sonnier
10 Bounded Distributions
11 Johnson's SB Distribution

12 Random Taste Variation
13 Unrestricted Substitution Pattern
14 Unobserved Factors Over Time
15 Independently and Identically Distributed (iid)

Archive of SID
www.SID.ir

$$P_{ni} = \int L_{ni}(\beta) f(\beta) d\beta \qquad (۲)$$

که در آن P_{ni}، احتمال انتخاب گزینه‌ی i توسط فرد n و $L_{ni}(\beta)$ احتمال انتخاب گزینه‌ی i توسط فرد n در مدل لوجیت که تابعی از مقدار پارامتر β است و به صورت رابطه‌ی ۳ نشان داده می‌شود.

$$L_{ni}(\beta) = \frac{\exp(V_{ni}(\beta))}{\sum_{j=1}^{J} \exp(V_{ni}(\beta))} \qquad (۳)$$

$f(\beta)$ نیز به عنوان تابع چگالی و $V_{ni}(\beta)$، بخش مشاهده شده از تابع مطلوبیت است که به پارامترهای β بستگی دارد. در واقع احتمال لوجیت ترکیبی، میانگین وزنی احتمال بدست آمده از لوجیت استاندارده به ازای مقدارهای متفاوت βبا وزن‌های معین چگالی تعریف می‌شود. مدل لوجیت استاندارد در واقع نوعی خاص از مدل لوجیت ترکیبی است، که در آن چگالی $f(\beta)$، در پارامترهای ثابت b، به ازای $\beta = b$، ۱ و $\beta \neq b$، صفر تعریف می‌شود. بنابراین تابع احتمال انتخاب لوجیت استاندارد به صورت رابطه‌ی ۴ بدست می‌آید.

$$P_{ni} = \frac{\exp(b' X_{ni})}{\sum_{j=1}^{J} \exp(b' X_{nj})} \qquad (۴)$$

که در آن P_{ni}: احتمال انتخاب گزینه‌ی i توسط فرد n،X_{ni}: ویژگی‌های مشاهده شده‌ی مربوط به تصمیم‌گیر n و گزینه‌ی i ،b' : بردار ضرایب ویژگی‌های مشاهده شده که نشان‌دهنده‌ی یکسان بودن وزن هر متغیر توضیحی، نزد افراد است. توزیع‌هایی که بیشتر برای تابع چگالی پارامتر β مورد استفاده قرار می‌گیرد، عبارتند از: نرمال، لگاریتم نرمال، یکنواخت، مثلثی و SB جانسون [۵, ۱۱, ۲۰]

۲- ۱- مدل ضرایب تصادفی

احتمال لوجیت ترکیبی می‌تواند از رفتار بیشینه‌سازی مطلوبیت در روش‌های مختلفی که به طور رسمی معادل، اما تفسیرهای متفاوتی را ایجاد می‌کند، نتیجه شود. ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های حاصل شده، مدل‌های با ضرایب تصادفی هستند. در این مدل‌ها، مطلوبیت تعریف شده‌ی گزینه‌ی i، برای انتخاب از بین گزینه‌های I، برای فرد n، به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود [۵, ۲۱].

$$U_{ni} = \beta_n' X_{ni} + \varepsilon_{ni} \qquad (۵)$$

که در آن X_{ni}: ویژگی‌های مشاهده شده‌ی مربوط به تصمیم‌گیر و گزینه است،

β_n' : بردار ضرایب ویژگی‌های مشاهده شده، برای فرد n که سلیقه‌ی افراد را نمایش می‌دهد، ε_{ni} : بخش تصادفی تابع مطلوبیت با توزیع مقدار حدی با توزیع مستقل و یکسان است. در این مدل، برخلاف مدل لوجیت استاندارد، پارامتر β با تابع چگالی $f(\beta)$ برای تصمیم‌گیرها متفاوت خواهد بود.($f(\beta)$ تابعی از پارامترهای θ که به عنوان مثال، متوسط و هم‌پراکنش پارامترهای βرا در جامعه توصیف می‌کند. مدل ضرایب تصادفی، به صورت انتگرالی از مدل لوجیت، بر روی تابع چگالی پارامتر β تعریف می‌شود، که به صورت رابطه ۶، که همان رابطه‌ی احتمال لوجیت ترکیبی است، نشان داده می‌شود.

$$P_{ni} = \int \frac{\exp(\beta_n' X_{ni})}{\sum_{j=1}^{J} \exp(\beta_n' X_{nj})} f(\beta \mid \theta) d\beta \qquad (۶)$$

که در آن θ اشاره به پارامتر توزیع (میانگین و انحراف معیار) اختصاص داده شده برای ضرایب دارد. در این روش محقق با اختصاص توزیعی برای ضرایب، پارامترهای توزیع را محاسبه می‌کند. آدلر و همکاران [۲۲]، در تحقیقات خود، جهت بهبود بیشتر مقدار لگاریتم تابع درست‌نمایی، استفاده از توزیع نرمال را نسبت به سایر توزیع‌ها، پیشنهاد کرده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که با استفاده از توزیع نرمال، وجود مقدارهای مثبت و منفی به پارامتر در مدل تحمیل می‌شود [۷, ۲۳]. در صورتی که فرض ویژه غیرمنفی بودن مقدارهای پارامتر مورد نظر باشد، استفاده از توزیع لگاریتم نرمال مناسب به نظر می‌رسد. هم‌چنین استفاده از توزیع یکنواخت در بازه (۰،۱)، در صورتی‌که در تابع مطلوبیت متغیر ساختگی وجود داشته باشد، منطقی به نظر می‌رسد [۱۷].

۲- ۲- تجزیه ضرایب تصادفی

همانطور که در بخش ۲ اشاره شد، مدل لوجیت ترکیبی توانایی یافتن منبع ناهمگونی تمایل تصمیم‌گیرها، و در نتیجه ساخت مدلی با محدودیت کمتر را دارد. برای این هدف، همانند مدل لوجیت چندگانه تابع مطلوبیت به صورت $U_{ni} = \beta_n' X_{ni} + \varepsilon_{ni}$ در نظر گرفته می‌شود و ناهمگونی تمایل‌های افراد را می‌توان با استفاده ازβ_n، به صورت رابطه‌ی $\beta_n = \beta + \Delta Z_n + \eta_n$، وارد مدل کرد، که در آن β_n ضریب تصادفی از دیدگاه فرد nام است. طبق این فرمول ناهمگونی سیستماتیک حول میانگین توزیع ضریب تصادفی، با عبارت ΔZ_n بیان می‌شود، که درآن Δ برداری از پارامترها به همراه ویژگی‌های مشاهده شده‌ی Z_n، همچون ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی افراد یا ویژگی‌های سفر است. ناهمگونی تصادفی نیز با استفاده از K مقدار تصادفی در بردار تصادفی η_n، علاوه بر I عامل تصادفی در ε_{ni} بیان می‌شود. بنابراین احتمال انتخاب گزینه‌ی i به صورت رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود [۱۷, ۲۰].

Archive of SID

www.SID.ir

$$P_{ni} = \int \frac{\exp\left(\beta_n' X_{ni}\right)}{\sum_{j=1}^{J} \exp\left(\beta_n' X_{nj}\right)} f\left(\beta \mid \theta, Z_n\right) d\beta \qquad (۷)$$

که در آن θ بیانگر پارامترهای ثابت توزیع است. همانند بخش ۲-۱، مقدار انتگرال با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و برای مقدار داده شده‌ی θ، مقدار ضریب β_n با استفاده از تعداد مشخصی نمونه‌گیری تصادفی بدست می‌آید.

۳- نمونه آماری

در این پژوهش، از داده‌ها و اطلاعات سفرهای شغلی برگرفته از آمارگیری‌های مبدأ-مقصد ساکنین شهر مشهد سال ۱۳۸۷ استفاده می‌شود که شامل سفرهای با وسایل اتومبیل شخصی، تاکسی، اتوبوس و موتورسیکلت، به‌عنوان وسیله‌های سفر غالب[1] در ساعات اوج ترافیک صبح (ساعت ۷ تا ۹) می‌شود. اطلاعات به صورت هم‌فزون ناحیه‌ای (۲۵۳ ناحیه‌ی ترافیکی[2]) شامل فراوانی سفرها به تفکیک وسایل نقلیه سفر برای هر زوج مبدأ-مقصد است. پس از تعیین وسایل سفر غالب برای سفرهای شغلی، بانک اطلاعاتی هم‌فزون[3]، شامل ۴۸۴۹ رکورد زوج مبدأ-مقصد با حداقل یک سفر با یکی از وسایل سفر غالب، به‌عنوان بانک اطلاعاتی پژوهش تشکیل شد. با توجه به اینکه هر رکورد شامل چند سفر است، در مجموع فراوانی سفرهای شغلی آمارگیری شده از ساکنین شهر مشهد، ۱۳۰۳۵ سفر است، که در جدول ۱ این فراوانی به تفکیک وسایل نقلیه‌ی غالب ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، سواری شخصی با سهم ۵۱/۷ درصد از کل ۱۳۰۳۵ سفر شغلی (با وسایل نقلیه‌ی غالب)، بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد.

جدول ۱: فراوانی سفرهای شغلی شهروندان شهر مشهد به تفکیک وسیله نقلیه‌ی غالب

Table 1. Frequency of work travels of citizens of Mashhad city by prevailing vehicles

شماره وسیله	وسیله نقلیه سفر	فراوانی	
		مطلق	نسبی (درصد)
۱	سواری شخصی	۶۷۳۹	۵۱/۷
۲	تاکسی و کش	۱۹۲۵	۱۴/۷۷
۳	اتوبوس واحد	۲۲۸۹	۱۷/۵۶
۴	موتور	۲۰۸۲	۱۵/۹۷
	جمع	۱۳۰۳۵	۱۰۰

1 ملاک انتخاب وسیله سفر غالب، استفاده‌ی بیش از ۱۰ درصد سفرها از آن وسیله در نظر گرفته شده است.

2 Traffic Analysis Zone

3 Aggregate

۳-۱- متغیرهای مورد استفاده در مدل

در این پژوهش، متغیر وابسته، میزان (سهم) استفاده از وسیله‌های غالب (جدول ۱) برای سفرهای شغلی شهر مشهد از مبدأ مشخصی به مقصد مشخصی در دوره‌ی زمانی معینی است. فرض می‌شود که تعداد سفرهای با وسیله‌ی i از مبدأ o به مقصد d در دوره‌ی زمانی $(T^{ti}_{od})t$، به صورت سهمی از کل سفرهای از مبدأ o به مقصد d در دوره‌ی زمانی $(T^{t}_{od})t$، به صورت رابطه‌ی ۸ باشد [۲۴].

$$T^{ti}_{od} = T^{t}_{od} . P^{ti}_{od} \qquad (۸)$$

که در آن P^{ti}_{od}، تابع احتمال انتخاب وسیله‌ی i برای سفر از مبدأ o به مقصد d در دوره‌ی زمانی t است. در این پژوهش این تابع احتمال با فرض مدل لوجیت استاندارد به صورت رابطه‌ی ۴ و با فرض مدل لوجیت ترکیبی به صورت رابطه‌ی ۶ و ۷ است. متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل‌های تفکیک وسیله‌ی سفر را می‌توان به ۴ دسته‌ی کلی تقسیم کرد (جدول ۲): ۱- خصوصیات عملکردی و فیزیکی سیستم‌های حمل و نقل، ۲- خصوصیات فیزیکی شبکه، ۳- متغیرهای اقتصادی-اجتماعی جامعه و ۴- خصوصیات سفر.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود، متغیرهای مربوط به خصوصیات سفر (ACBD، PCBD و PACBD) به شکل متغیرهای مجازی (فقط مقدار ۰ یا ۱) تعریف شده‌اند. از مقدار میانگین متغیرهای مجازی می‌توان این نتیجه را گرفت که در اطلاعات پژوهش، ۳۱ درصد مبادی، ۳۰ درصد مقاصد و ۱۳ درصد زوج مبدأ-مقصدها در مرکز تجاری شهر[4] قرار دارند [۲۵].

۴- نتایج پرداخت مدل‌ها

هدف از پرداخت مدل‌ها، یافتن ضرایب متغیرهای توضیحی تابع مطلوبیت و تعیین میزان اهمیت هر یک از آن‌ها است. پرداخت مدل لوجیت چندگانه نیازمند تخمین یک گروه از پارامترها و مدل لوجیت ترکیبی نیازمند تخمین دو گروه از پارامترها است. در مدل لوجیت چندگانه برداری از ضرایب (اهمیت ویژگی‌ها) که برای همه‌ی تصمیم‌گیرها ثابت و یکسان است، تخمین زده می‌شود، ولی در مدل لوجیت ترکیبی یک گروه از پارامترها مانند مدل لوجیت چندگانه، برای همه‌ی تصمیم‌گیرها ثابت و یکسان و گروه دیگر از پارامترها به صورت تصادفی با چگالی $f(\beta \mid \theta)$، که در آن θ مربوط به پارامترهای توزیع ضرایب تصادفی است، در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، فرآیند مدل‌سازی انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد در سه مرحله صورت گرفت.

4 Central Business District (CBD)

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲: متغیرهای مورد استفاده در مدل‌های انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد [۲۵]

Table 2. Variables used in the mode choice models of Mashhad work trips

نوع متغیر	دسته کلی	نماد متغیر	تعریف متغیر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین
مستقل	خصوصیات عملکردی و فیزیکی سیستم‌های حمل و نقل	Tin	زمان سفر داخل اتوبوس از مبدأ تا مقصد	دقیقه	۰/۰	۵۰/۸	۱۴/۰
		Tout	زمان سفر خارج اتوبوس از مبدأ تا مقصد	دقیقه	۰/۰۰	۶۳/۰۰	۲۱/۷۵
		Nbrd	تعداد دفعات سوار شدن بر اتوبوس، از مبدأ تا مقصد	تعداد	۱/۰۰	۴/۱۸	۱/۸۰
		Tc	زمان سفر سواری شخصی از مبدأ تا مقصد	دقیقه	۵/۸۳	۴۷/۸۳	۱۹/۵۰
		To	زمان سفر آزاد در شبکه از مبدأ تا مقصد	دقیقه	۵/۷۵	۳۳/۸۶	۱۵/۳۰
	خصوصیات مربوط به شبکه	Ndst	فاصله بین زوج مبدأ- مقصد روی شبکه	کیلومتر	۰/۲۲۴	۲۵/۳۷۰	۷/۴۰۰
		BusStop	تعداد ایستگاه های اتوبوس در هر ناحیه مبدأ	تعداد	۱/۰	۱۶/۰	۶/۴
		Ddst	فاصله هوایی بین زوج مبدأ- مقصد	کیلومتر	۰/۱۷۲	۲۱/۲۰۶	۵/۵۰۰
	متغیرهای اقتصادی- اجتماعی جامعه	Amo	سرانه مالکیت موتورسیکلت مبدأ	وسیله بر نفر	۰/۰۰۰۱	۰/۲۲۲۰	۰/۰۵۱۰
		Aco	سرانه مالکیت سواری شخصی مبدأ	وسیله بر نفر	۰/۰۴۰	۰/۳۱۳	۰/۱۸۷
	خصوصیات مربوط به سفر	PCBD	اگر مبدأ در CBD باشد ۱، در غیر این صورت صفر	-	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۱
		ACBD	اگر مقصد در CBD باشد ۱، در غیر این صورت صفر	-	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۰
		PACBD	اگر مبدأ و مقصد در CBD باشند ۱، در غیر این صورت صفر	-	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۱۳
وابسته	-	P^{ti}_{od}	سهم استفاده از وسیله‌ی از مبدأ به مقصد در دوره‌ی زمانی	درصد	۰	۱	-

در مرحله‌ی اول پس از پرداخت بیش از ۱۵۰ مدل لوجیت چندگانه، مدل برتر انتخاب شد (جدول ۳). در مرحله‌ی دوم، با در نظر گرفتن ضرایب تصادفی برای این مدل منتخب و با پرداخت بیش از ۲۵ مدل، مدل منتخب برای نمایش ناهمگونی تمایل‌ها در میان مسافرها ارائه شد (جداول ۴ و ۵). در مرحله‌ی سوم، با تجزیه‌ی ضرایب تصادفی مدل منتخب مرحله‌ی قبلی و با پرداخت بیش از ۱۵ مدل، مدل منتخب برای نمایش وجود یا عدم وجود ناهمگونی سیستماتیک حول میانگین ضریب‌های تصادفی ارائه شد (جداول ۶ و ۷). شایان ذکر است که از نرم‌افزار بایوجیم[1] [۲۶] جهت پرداخت مدل‌ها و در پرداخت مدل‌های لوجیت چندگانه از روش درست‌نمایی بیشینه[2] و مدل‌های لوجیت ترکیبی از روش شبیه‌سازی درست‌نمایی بیشینه[3] با استفاده از ۱۰۰۰ بار نمونه‌گیری به روش هالتون [۲۷]، (روشی هوشمند برای نمونه‌گیری در محاسبه انتگرال چند متغیره در شبیه‌سازی شبه مونت‌کارلو[4]) استفاده شده است. با توجه به حجم زیاد داده‌ها، تفاوت بسیار زیادی در زمان پرداخت مدل لوجیت چندگانه در نرم‌افزار در مقایسه با مدل لوجیت ترکیبی وجود دارد، به‌طوری‌که این زمان در پرداخت مدل‌های لوجیت چندگانه در حدود کمتر از ۱ دقیقه و در مدل‌های لوجیت ترکیبی در حدود ۱ الی ۸ ساعت می‌باشد [۲۵].

1 Biogeme Software Package

2 Maximum Likelihood Estimation

3 Maximum Simulated Likelihood

4 Quasi-Monte Carlo (QMC)

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳: نتایج پرداخت مدل لوجیت چندگانه برای انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد

Table 3. Results of multinomial logit model for mode choice of Mashhad work trips

وسیله سفر	متغیر	ضرایب	
		مقدار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	مقدار ثابت	-۰/۸۶۴۰	-۴/۲۴
	lnTc	-۰/۲۳۱۰	-۳/۳۴
	Aco	۱۱/۶۰۰۰	۲۲/۰۹
تاکسی	مقدار ثابت	-۱/۷۵۰۰	-۱۰/۵۰
	Aco	۷/۱۵۰۰	۱۱/۸۵
	lnNdst(*D۵-۱)	-۰/۲۰۸۰	-۴/۶۴
اتوبوس	مقدار ثابت	-۱/۸۱۰۰	-۷/۶۱
	Amo	۲/۸۴۰۰	۳/۴۹
	lnTc	۰/۶۷۳۰	۷/۳۸
	lnNbrd	-۰/۲۷۷۰	-۳/۰۵
	PCBD	-۰/۴۹۲۰	-۶/۹۹
	Tin+Tout	-۰/۰۱۴۶	-۴/۵۲
موتور سیکلت	مقدار ثابت	۰	-
	Aco	-۱/۵۰۰۰	-۲/۴۰
	Amo	۸/۰۶۰۰	۱۰/۵۵
	lnNdst	-۰/۲۳۴۰	-۵/۲۰
	Tin+Tout	-۰/۰۱۱۲	-۳/۲۴
	lnBusStop	-۰/۱۱۲۰	-۲/۸۰
مشخصات مدل			
$LL(\beta) = -14805.605$		$LL(C) = -15928.667$	$LL(0) = -18070.347$
$x_{17}^2(0.01d.f) = 33.4$	$x_{14}^2(0.01d.f) = 29.14$	$\rho_c^2 = 0.070$	$\rho^2 = 0.181$
تعداد مشاهدات = ۱۳۰۳۵	تعداد ضرایب مدل = ۱۷	تعداد ضرایب تصادفی = ۰	تعداد متغیرهای مستقل = ۱۴

*اگر ۰<Ndst<۵ ،D_5=۱ در غیر اینصورت، D_5=۰

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضرایب تعریف شده برای متغیرها نسبت به گزینه‌ها به صورت خاص[1] و طبق مدل لوجیت استاندارد (برخلاف مدل لوجیت ترکیبی)، برای تمامی مسافران، ثابت و یکسان فرض شده است. در واقع مدل لوجیت استاندارد توانایی بیان ناهمگونی تمایل‌ها در میان مسافرها را ندارد. با توجه به جدول ۴، در مدل‌های ضرایب تصادفی، ضرایب تعریف شده برای متغیرها نسبت به تمامی مسافران می‌تواند به صورت ثابت یا تصادفی تعریف شود، که در این مدل ضرایب ۲ متغیر از ۱۴ متغیر، به صورت تصادفی و ضرایب ۱۲ متغیر باقی‌مانده به صورت ثابت، معنی‌دار شده است. ضرایب تصادفی شامل ضریب سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی (Aco) در تابع مطلوبیت خودروی شخصی و ضریب سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت (Amo) در تابع مطلوبیت موتورسیکلت است.

1 Specific

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴: نتایج پرداخت مدل ضرایب تصادفی برای انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد

Table 4. Results of Random Coefficients for mode choice of Mashhad work trips

وسیله سفر	متغیر	ضرایب ثابت	
		مقدار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	مقدار ثابت	-۱/۱۲۰۰	-۳/۶۲
	lnTc	-۰/۴۷۳۰	-۴/۴۲
تاکسی	مقدار ثابت	-۱/۶۰۰۰	-۶/۶۱
	Aco	۶/۱۳۰۰	۹/۹۲
	$(1-D_5)$ lnNdst	-۰/۲۰۵۰	-۴/۷۴
اتوبوس	مقدار ثابت	-۱/۷۳۰۰	-۵/۶۸
	Amo	۴/۰۲۰۰	۴/۳۸
	lnTc	۰/۶۴۵۰	۶/۲۲
	lnNbrd	-۰/۳۷۹۰	-۳/۷۱
	PCBD	-۰/۵۰۳۰	-۶/۴۱
	Tin+Tout	-۰/۰۱۸۷	-۵/۰۹
موتور سیکلت	مقدار ثابت	۰	-
	Aco	-۴/۰۶۰۰	-۳/۵۷
	lnNdst	-۰/۴۱۹۰	-۵/۶۵
	Tin+Tout	-۰/۰۱۴۴	-۲/۵۳
	lnBusStop	-۰/۰۱۴۴	-۱/۵۹

		ضرایب تصادفی			
		نوع توزیع	متوسط	آماره‌ی t	انحراف معیار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	Aco	یکنواخت	۱۷/۱	۱۴/۷۲	۸/۷۱	۴/۳۳
موتور سیکلت	Amo	لگاریتم نرمال	۲۳/۲	۶/۶۷	۱۲۱/۶۰	۸/۱۳

مشخصات مدل			
$LL(0) = -18070.347$	$LL(C) = -15928.667$	$LL(\beta) = -14755.156$	
$\rho^2 = 0.183$	$\rho_C^2 = 0.074$	$x_{16}^2(0.01d.f) = 32$	$x_{19}^2(0.01d.f) = 36.19$
تعداد ضرایب تصادفی = ۲		تعداد ضرایب مدل = ۱۷	تعداد مشاهدات = ۱۳۰۳۵
تعداد متغیرهای مستقل = ۱۴			

جدول ۵: توابع مطلوبیت وسایل نقلیه برای سفرهای شغلی شهر مشهد طبق مدل ضرایب تصادفی

Table 5. Vehicle utility function for Mashhad work trips on the basis of random coefficient model

شماره وسیله	وسیله نقلیه سفر	تابع مطلوبیت
۱	خودروی شخصی	$-1.12+(17.1+8.71.u^{*}).Aco-0.473.\ln Tc$
۲	تاکسی	$-1.6+6.13.Aco-0.205.(1-D_5).\text{lnNdst}$
۳	اتوبوس	$-1.73+4.02.Amo+0.645.\ln Tc-0.379.\ln Nbrd-0.503.PCBD-0.0187.(Tin+Tout)$
۴	موتورسیکلت	$-4.06.Aco+(23.2+121.6.n^{**}).Amo-0.419.\ln Ndst-0.0144.(Tin+Tout)-0.101.\text{lnBusStop}$

*مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت و دارای میانگین = ۰ و انحراف معیار = ۱ (توزیع یکنواخت استاندارد) **مقدار تصادفی با توزیع لگاریتم نرمال و دارای میانگین = ۰ و انحراف معیار = ۱

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۶: نتایج پرداخت مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه ضرایب تصادفی برای انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد

Table 6. Results of Mixed Logit Model with decomposition of random Coefficients for Mashhad work trips

وسیله سفر	متغیر	ضرایب ثابت	
		مقدار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	مقدار ثابت	-۰/۷۷۰۰	-۲/۲۸
	lnTc	-۰/۵۶۲۰	-۴/۷۰
تاکسی	مقدار ثابت	-۱/۴۸۰۰	-۵/۷۷
	Aco	۶/۱۶۰۰	۹/۹۸
	$(1-D_S)$lnNdst	-۰/۲۱۹۰	-۴/۹۱
اتوبوس	مقدار ثابت	-۱/۶۱۰۰	-۵/۲۳
	Amo	۳/۸۷۰۰	۴/۲۱
	lnTc	۰/۶۷۸۰	۶/۶۹
	lnNbrd	-۰/۴۰۳۰	-۳/۹۱
	PCBD	-۰/۵۰۹۰	-۶/۴۸
	Tin+Tout	-۰/۰۲۱۱	-۵/۵۸
موتور سیکلت	مقدار ثابت	۰	-
	Aco	-۴/۴۹۰۰	-۴/۱۴
	Tin+Tout	-۰/۰۲۲۶	-۴/۳۲
	lnBusStop	-۰/۱۲۳۰	-۱/۸۳

		ضرایب تصادفی			
		نوع توزیع	متوسط	آماره‌ی t	انحراف معیار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	Aco	یکنواخت	۱۶/۸	۱۳/۸۷	۸/۶	۸/۲۷
موتور سیکلت	Amo	لگاریتم نرمال	۲۵/۶	۱۳/۹۶	۶۶/۴	۹/۷۷

		تجزیه ضرایب تصادفی	
		مقدار	آماره‌ی t
خودروی شخصی	Aco بر اساس ACBD	۰/۸۷۷	۲/۱۲
موتور سیکلت	Amo بر اساس lnNdst	-۶/۱۹۰	-۶/۰۹

مشخصات مدل			
$LL(\beta) = -14745.447$	$LL(C) = -15928.667$	$LL(0) = -18070.347$	
$x^2_{20}(0.01d.f) = 37.56$	$x^2_{17}(0.01d.f) = 33.4$	$\rho_C^2 = 0.074$	$\rho^2 = 0.184$
تعداد مشاهدات = ۱۳۰۳۵	تعداد ضرایب مدل = ۱۸	تعداد ضرایب تصادفی = ۲	تعداد متغیرهای مستقل = ۱۵

در واقع این یافته نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف سلیقه‌ی تصادفی در بین مسافران در ارتباط با سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی و موتورسیکلت به ترتیب در مطلوبیت خودروی شخصی و موتورسیکلت است، که مدل لوجیت چندگانه توانایی بیان آن را ندارد. توزیع‌های مختلفی مانند توزیع نرمال، لگاریتم نرمال، مثلثی، یکنواخت و SB، مورد آزمون قرار گرفته‌اند، که بهترین نوع توزیع‌ها برای ضرایب تصادفی سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی (در مطلوبیت خودروی شخصی) و سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت (در مطلوبیت موتورسیکلت)، به ترتیب توزیع یکنواخت و لگاریتم نرمال انتخاب شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

به عبارتی دیگر اهمیت ویژگی‌های Aco در انتخاب خودروی شخصی و Amo در انتخاب موتورسیکلت، برای همه‌ی مسافرها به صورت یکسان نیست، که مدل لوجیت ترکیبی این ناهمگونی در رفتار مسافرها را به ترتیب با توزیع یکنواخت (میانگین = ۱۷/۱ و انحراف معیار = ۸/۷۱) و توزیع لگاریتم نرمال (میانگین = ۲۳/۲ و انحراف معیار = ۱۲۱/۶) نشان داده است. همانطور که در بخش ۲ اشاره شد، با استفاده از تجزیه‌ی ضرایب تصادفی، می‌توان وجود ناهمگونی تمایل‌های تصمیم‌گیرها، در اطراف میانگین ضریب‌های تصادفی را بر اساس ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی افراد و ویژگی‌های سفر، بررسی کرد. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مدل پرداخت شده، دارای ۱۵ متغیر است، که ضرایب این متغیرها، شامل ۱۱ ضریب ثابت، ۲ ضریب تصادفی و ۲ متغیر با ضرایب ثابت، برای تجزیه‌ی ناهمگونی مشاهده شده در ضریب‌های تصادفی و ارائه توضیحی برای این ناهمگونی است. نتایج مدل ارائه شده در جدول ۴ نشان داد که افراد در پاسخ به سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی و سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت، به ترتیب در انتخاب خودروی شخصی و موتورسیکلت، اختلاف سلیقه‌ای دارند که مدل لوجیت چندگانه توانایی بیان آن را ندارد. در این بخش از مطالعه نیز با استفاده از تجزیه‌ی ضرایب تصادفی نشان داده شد که بخشی از این اختلاف سلیقه‌ها به ترتیب با استفاده از ویژگی‌های واقع شدن یا واقع نشدن مقصد سفر در CBD و لگاریتم فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد روی شبکه قابل توضیح هستند. علامت مثبت ضریب جمله ترکیبی (حاصل‌ضرب) سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی و قرار گرفتن یا قرار نگرفتن مقصد سفر در CBD (۰/۸۷۷) در تابع مطلوبیت خودروی شخصی، بیانگر این نکته است، که تأثیر سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی در انتخاب خودروی شخصی در زمانی که مقصد سفر در CBD باشد، نسبت به زمانی که مقصد سفر در CBD نباشد، افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، در صورتی که مقصد سفر در CBD باشد، تمایل افراد برای انتخاب خودروی شخصی برای سفرهای شغلی شهر مشهد افزایش پیدا می‌کند که تأثیر این ویژگی در داخل ضریب سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی، جهت نشان دادن بخشی از دلایل اختلاف سلیقه‌ی افراد در پاسخ به سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی در انتخاب این وسیله، آورده شده است. همچنین علامت منفی ضریب جمله ترکیبی (حاصل‌ضرب) سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت و لگاریتم فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد روی شبکه (۶/۱۹-) در تابع مطلوبیت موتورسیکلت، بیانگر این نکته است، که تأثیر سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت برای انتخاب موتورسیکلت با افزایش فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد، تمایل افراد برای انتخاب موتورسیکلت برای سفرهای شغلی شهر مشهد، کاهش پیدا می‌کند که تأثیر این ویژگی در داخل ضریب سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت، جهت نشان دادن بخشی از دلایل اختلاف سلیقه‌ی افراد در پاسخ به سرانه‌ی مالکیت موتورسیکلت، در انتخاب این وسیله، آورده شده است.

جدول ۷: توابع مطلوبیت وسایل نقلیه برای سفرهای شغلی شهر مشهد طبق مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه ضرایب تصادفی

Table 7. Vehicle utility function for Mashhad work trips on the basis of mixed logit model with random coefficient decomposing

شماره وسیله	وسیله نقلیه سفر	تابع مطلوبیت
۱	خودروی شخصی	$-0.77+\left(16.8+0.877.\mathrm{ACBD}+8.6.\mathrm{u}^{*}\right).Aco-0.562.\ln Tc$
۲	تاکسی	$-1.48+6.16.Aco-0.219.\left(1-D_5\right).\mathrm{lnNdst}$
۳	اتوبوس	$-1.61+3.87.Amo+0.678.\mathrm{lnTc}-0.403.\mathrm{lnNbrd}-0.509.\mathrm{PCBD}-0.0211.\left(Tin+Tout\right)$
۴	موتورسیکلت	$-4.49.Aco+\left(25.6+66.4.n^{**}-6.19.\ln Ndst\right).Amo-0.0226.\left(Tin+Tout\right)-0.123.\ln BusStop$

*مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت و دارای میانگین = ۰ و انحراف معیار = ۱ (توزیع یکنواخت استاندارد)

**مقدار تصادفی با توزیع لگاریتم نرمال و دارای میانگین = ۰ و انحراف معیار = ۱

۴- ۱- ارزیابی مدل‌ها

یکی از اساسی‌ترین آزمون‌های اعتباریابی مدل‌های پرداخت شده، بررسی مقدار و علامت ضرایب محاسبه شده است. معمولاً در پرداخت مدل‌ها، یک انتظاری از علامت و مقدارهای نسبی ضرایب وجود دارد [۲]. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۳، ۴ و ۶، تمام ضرایب محاسبه شده از علامت و مقدارهای نسبی قابل انتظار برخوردار می‌باشند. از آماره‌ی t به منظور تعیین اهمیت هر یک از متغیرهای توضیحی مدل با سطح اطمینان مشخص (به عنوان مثال ۹۵ درصد) استفاده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۳، ۴ و ۶، تمامی متغیرهای توضیحی مدل لوجیت چندگانه، مدل ضرایب تصادفی (به جز متغیر lnBusStop) و مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه

Archive of SID

www.SID.ir

ضرایب تصادفی (به جز متغیر lnBusStop)، در سطح اطمینان بیش از ۹۵ درصد معنی‌دار است. متغیر lnBusStop در مدل‌های ضرایب تصادفی و لوجیت ترکیبی با تجزیه ضرایب تصادفی به ترتیب در سطح اطمینان ۸۹ درصد و بیش از ۹۰ درصد معنی‌دار است. با مقایسه مقدار لگاریتم تابع درست‌نمایی در همگرایی ($LL(\beta)$) مدل‌ها، می‌توان به بهبود برازش مدل لوجیت ترکیبی با ضرایب تصادفی نسبت به مدل لوجیت چندگانه و بهبود برازش مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه‌ی ضرایب تصادفی نسبت به مدل لوجیت ترکیبی با ضرایب تصادفی و لوجیت چندگانه پی برد. برای اطمینان از معنی‌دار بودن بهبود برازش مدل‌ها پس از استفاده از ساختارهای پیچیده نسبت به مدل لوجیت چندگانه (با توجه به افزودن پارامترهای جدید به مدل و افزایش درجه آزادی مدل) از آزمون نسبت درست‌نمایی[1] (آزمون مربع خی) استفاده و نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با استفاده از آزمون نسبت درست‌نمایی، مدل‌های لوجیت ترکیبی با ضرایب تصادفی و لوجیت ترکیبی با تجزیه‌ی ضرایب تصادفی، به صورت معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد (۱۱۸ و ۱۰۱= χ^2) از مدل لوجیت چندگانه برتر است. همچنین این آزمون، برتری مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه‌ی ضرایب تصادفی نسبت به مدل لوجیت ترکیبی با ضرایب تصادفی را به صورت معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد (۱۶/۹= χ^2) نشان می‌دهد.

1 Likelihood ratio test

جدول ۸: مقایسه مدل‌ها با استفاده از آزمون نسبت درست‌نمایی

Table 8. Comparison of models using likelihood ratio test

ویژگی مدل	مدل‌های پرداخت شده		
	لوجیت چندگانه	لوجیت ترکیبی	لوجیت ترکیبی با تجزیه ضرایب تصادفی
$LL(\beta)$	-۱۴۸۰۵/۶۰۵	-۱۴۷۵۵/۱۵۶	-۱۴۷۴۶/۷۰۵
تعداد پارامترهای پرداخت شده	۱۷	۱۹	۲۰
تعداد ضرایب مدل	۱۷	۱۷	۱۸
تعداد ضرایب تصادفی	۰	۲	۲
تعداد نمونه	۱۳۰۳۵	۱۳۰۳۵	۱۳۰۳۵
درجه آزادی (در مقایسه با مدل لوجیت چندگانه)	–	۲	۳
آماره‌ی نسبت درست‌نمایی در مقایسه با لوجیت چندگانه	–	۱۰۱	۱۱۸
$\chi^2(0.1d.f)$	–	۴/۶	۶/۲۵
$\chi^2(0.05d.f)$	–	۵/۹۹	۷/۸۱
$\chi^2(0.01d.f)$	–	۹/۲۱	۱۱/۳۴

۴- ۱- ۱- عملکرد پیش‌بینی مدل‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد پیش‌بینی مدل‌های پرداخت شده از درصد برآورد درست و میانگین احتمال پیش‌بینی درست[2] (روشی مناسب‌تر نسبت به درصد برآورد) استفاده می‌شود (جدول ۷). همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مدل لوجیت چندگانه درصد برآورد درست بهتری نسبت به مدل‌های لوجیت ترکیبی ارائه می‌دهد. با توجه به تئوری و غیرقابل اطمینان بودن این شاخص، این نتیجه نمی‌تواند دلیل بهتر بودن قدرت پیش‌بینی مدل لوجیت چندگانه نسبت به مدل لوجیت ترکیبی باشد. بنابراین شاخص میانگین احتمال پیش‌بینی درست [۱۴, ۲۸] که برخلاف شاخص درصد برآورد درست، ماهیت احتمالی دارد، می‌تواند شاخصی قابل‌اطمینان‌تر از درصد برآورد درست برای سنجیدن قدرت پیش‌بینی مدل‌های انتخاب گسسته باشد، که نتایج این شاخص نیز در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور مقدار این شاخص برای مدل‌ها در حدود ۳۹ درصد بدست آمده است، که نسبت به درصد برآورد درست مدل‌ها، کاهش پیدا کرده است. با توجه به تئوری این دو شاخص، عملکرد پیش‌بینی شاخص میانگین احتمال پیش‌بینی درست می‌تواند از اطمینان بیشتری نسبت به شاخص درصد برآورد درست برخوردار باشد.

2 Average probability of Correct Prediction

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۹: پیش‌بینی درست مدل‌ها برای انتخاب وسیله سفرهای شغلی شهر مشهد

Table 9. The correct prediction of models for mode choice of Mashhad work trips

شاخص / مدل	لوجیت چندگانه	ضرایب تصادفی	لوجیت ترکیبی با تجزیه ضرایب تصادفی
درصد برآورد درست (درصد)	۵۳/۹	۴۳/۹	۴۴/۲
میانگین احتمال پیش‌بینی درست (درصد)	۳۹/۶	۳۹/۰	۳۹/۱

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش مدل لوجیت ترکیبی به عنوان مدل انعطاف‌پذیر با ساختاری تعمیم‌یافته و منطقی از مدل لوجیت استاندارد، جهت مدل‌سازی تفکیک سفر به عنوان سومین مرحله از رویکرد چهارمرحله‌ای در مطالعات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مورد تحلیل و استفاده قرار گرفت. مدل لوجیت ترکیبی برخلاف مدل‌های لوجیت و پروبیت به یک توزیع خاص محدود نیست و توانایی یافتن ناهمگونی در رفتار افراد و حتی منبع ایجاد این ناهمگونی را دارد. با توجه به عدم توانایی مدل لوجیت استاندارد در توصیف اختلاف سلیقه در میان افراد در پاسخ به ویژگی‌های مختلف تأثیرگذار در انتخاب، از ساختار مدل لوجیت ترکیبی برای مدل‌سازی انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد استفاده شده است، که نتایج اصلی آن به شرح زیر است:

با توجه به بهبود نتایج پرداخت مدل لوجیت ترکیبی (ضرایب تصادفی و تجزیه آن‌ها) نسبت به لوجیت استاندارد، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف سلیقه بین مسافران نسبت به سرانه‌ی مالکیت خودروی شخصی (Aco) و موتورسیکلت (Amo) وجود داشته و مدل لوجیت ترکیبی توانایی تبیین این اختلاف را (حداقل) برای نمونه موردی پژوهش جاری (نسبت به مدل لوجیت چندگانه با فرض ثابت بودن ضرایب تمام متغیرها) داراست.

براساس نتایج پرداخت مدل لوجیت ترکیبی با تجزیه‌ی ضرایب تصادفی، اختلاف سلیقه‌ی موجود نسبت به Aco و Amo به ترتیب در انتخاب خودروی شخصی و موتورسیکلت، در صورت سفر به مرکز تجاری شهر و لگاریتم فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد روی شبکه (lnNdst) قابل توضیح است. علامت مثبت ضریب جمله ترکیبی (حاصل‌ضرب) Aco و ACBD در تابع مطلوبیت خودروی شخصی، نشان‌دهنده‌ی افزایش تأثیر Aco در انتخاب خودروی شخصی (برای سفرهای شغلی شهر مشهد) در صورت سفر به CBD است. همچنین علامت منفی ضریب جمله ترکیبی (حاصل‌ضرب) Amo و lnNdst، نشان‌دهنده‌ی کاهش تأثیر Amo در انتخاب موتورسیکلت (برای سفرهای شغلی شهر مشهد) در صورت افزایش فاصله‌ی بین زوج مبدأ- مقصد است.

مدل‌های لوجیت ترکیبی برای انتخاب وسیله‌ی سفرهای شغلی شهر مشهد، از نظر میزان برازش، نتایج بهتری نسبت به مدل لوجیت استاندارد (ضریب تصادفی در برابر ضریب ثابت برای تمام افراد) ارائه می‌دهد: مقدار لگاریتم تابع درست‌نمایی برابر ۱۴۸۰۶، ۱۴۷۵۵ و ۱۴۷۴۷، به ترتیب، برای مدل‌های لوجیت استاندارد، لوجیت ترکیبی با ضریب تصادفی و ضرایب آن‌ها با اطلاعات هم‌فزون (در سطح اطمینان ۹۹ درصد با استفاده از آزمون نسبت درست‌نمایی). میانگین احتمال پیش‌بینی درست برای مدل‌های لوجیت چندگانه و لوجیت ترکیبی در حدود ۳۹ درصد گزارش شده است، که در مقایسه با مقدار درصد برآورد درست مدل‌ها کاهش یافته است. با توجه به تئوری روش درصد برآورد درست، میانگین احتمال پیش‌بینی درست، یک جایگزین مناسب برای بررسی عملکرد پیش‌بینی مدل‌های انتخاب گسسته پیشنهاد شده است. با توجه به داده‌های هم‌فزون استفاده شده در این پژوهش و عدم برتری زیاد مدل لوجیت ترکیبی نسبت به مدل لوجیت چندگانه، در ادامه‌ی این مطالعه، می‌توان از ساختار مدل لوجیت ترکیبی برای اطلاعات تفصیلی‌تر، به خصوص در سطح ناهم‌فزون استفاده و نتایج آن با نتایج مدل لوجیت استاندارد و سایر مدل‌های انتخاب گسسته مقایسه و ارزیابی شود.

منابع

[1] L.G. Willumsen, Modelling transport, John Wiley & Sons, 2011.

[2] M.E. Ben-Akiva, S.R. Lerman, Discrete choice analysis: theory and application to travel demand, MIT press, 1985.

[3] S. Hess, M. Bierlaire, J.W. Polak, Estimation of value of travel-time savings using mixed logit models, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 39(2) (2005) 221-236.

[4] D. McFadden, Analysis of Qualitative Choice Behavior. Zarembka, P.(ed.): Frontiers in Econometrics, in, Academic Press. New York, NY, 1974.

[5] K.E. Train, Discrete choice methods with simulation, Cambridge university press, 2009.

[6] J. Berkson, Application of the logistic function to bio-assay, Journal of the American Statistical Association, 39(227) (1944) 357-365.

[7] A. rezaei, Modeling Air Itinerary Choice in Low a Frequency Market, Case of: International Travels from Tehran Airport, Sharif University of Technology, 2011.

Archive of SID

www.SID.ir

[19] R.-C. Jou, D.A. Hensher, T.-L. Hsu, Airport ground access mode choice behavior after the introduction of a new mode: A case study of Taoyuan International Airport in Taiwan, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 47(3) (2011) 371-381.

[20]

[21] D.A. Hensher, J.M. Rose, W.H. Greene, Applied choice analysis: a primer, Cambridge University Press, 2005.

[22] C. Cirillo, P. Hetrakul, Continuous random coefficient logit models: a comparison of parametric and non-parametric methods to estimate individual preferences over Cybernetic Transportation Systems, in: Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010.

[23] T. Adler, C. Falzarano, G. Spitz, Modeling service trade-offs in air itinerary choices, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1915) (2005) 20-26.

[24] T. Adler, C. Falzarano, G. Spitz, Modeling service trade-offs in air itinerary choices, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1915) (2005) 20-26.

[25] H. Poorzahedi, A.r. Mamdoohi, Mode choice modeling for work trips: case study of Mashhad city, Program and development, 2002. (in Persian)

[26] s.a. mirmohammadi, Mixed logit model application in mode choice: case of Mashhad work trips, Tarbiat Modares University, 2013. (in Persian)

[27] M. Bierlaire, Estimation of discrete choice models with BIOGEME 1.8, Transport and Mobility Laboratory, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2009.

[28] K. Train, Halton sequences for mixed logit, Department of Economics, UCB, 2000.

[29] S. Hess, J.W. Polak, Mixed logit modelling of airport choice in multi-airport regions, Journal of Air Transport Management, 11(2) (2005) 59-68.

(in Persian)

[8] C. Daganzo, Multinominal Probit: The Theory and its Applications to Demand Modeling, in, Academic Press, 1979.

[9] Daganzo, The Theory and its Applications to Demand Forecasting, 1979.

[10] D. McFadden, K. Train, Mixed MNL models for discrete response, Journal of applied Econometrics, (2000) 447-470.

[11] L. Huamin, H. Huang, L. Jianfeng, Parameter estimation of the mixed Logit model and its application, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 10(5) (2010) 73-78.

[12] J.H. Boyd, R.E. Mellman, The effect of fuel economy standards on the US automotive market: an hedonic demand analysis, Transportation Research Part A: General, 14(5-6) (1980) 367-378.

[13] N.S. Cardell, F.C. Dunbar, Measuring the societal impacts of automobile downsizing, Transportation Research Part A: General, 14(5-6) (1980) 423-434.

[14] S. Hess, Advanced discrete choice models with applications to transport demand, University of London, 2005.

[15] Hess, Advanced discrete choice model with applications to transport demand, London, 2005.

[16] S.R. Mehndiratta, TIME-OF-DAY EFFECTS IN INTER-CITY BUSINESS TRAVEL, 1996.

[17] D.A. Hensher, W.H. Greene, The mixed logit model: The state of practice and warnings for the unwary, Institute of Transport Studies, the University of Sydney and Monash University, 2002.

[18] K. Train, G. Sonnier, Mixed logit with bounded distributions of correlated partworths, Applications of simulation methods in environmental and resource economics, (2005) 117-134.

Please cite this article using:

A. R. Mamdoohi, S. A. Mirmohammadi, "Mixed logit model application in mode choice: case of Mashhad work trips", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 581-592.

DOI: 10.22060/ceej.2016.685

Archive of SID

www.SID.ir