



تحلیل چندمعیاره و چنددهای شبکه‌های حمل و نقل با استفاده از مدل‌های Mixed GEV: مبانی نظری و متدولوژی

زهرا شاه‌حسینی، کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف¹

میلاذ حقانی، کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف²

حسین پورزاهدی، استاد گروه حمل و نقل دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف³

¹ zahra.shahhoseini@ymail.com , +98912 - 5874657

² milad.haghani@yahoo.com , +98935 - 8347041

³ porzahed@sharif.edu , +9821- 66019208

چکیده

بسیاری از مطالعات در زمینه‌ی برنامه ریزی حمل و نقل به هر چه واقع‌بینانه‌تر ساختن مدل‌سازی رفتار اختصاص یافته‌است. مسأله‌ی مدل‌سازی انتخاب مسیر نیز از قاعده‌ی فوق مستثنی نبوده‌است. دقت و کارایی بسیاری از تصمیمات گرفته شده در زمینه‌ی طراحی و توسعه‌ی شبکه‌های حمل و نقل، قیمت‌گذاری مسیر و اتخاذ دیگر سیاست‌های مرتبط با مدیریت عرضه یا تقاضا در گروهی دقت در پیش‌بینی الگوی تعادلی ترافیک در شبکه است. به همین جهت توسعه‌ی مدل‌های تخصیص ترافیک تعمیم‌یافته‌تر، دقیق‌تر و با حساسیت بیشتر در سال‌های اخیر در ادبیات حمل و نقل مورد توجه بوده‌است. این پژوهش به معرفی و توسعه‌ی مبانی نظری یک رویکرد جدید در تخصیص ترافیک با هدف افزایش دقت، حساسیت و سیاست‌پذیری در پیش‌بینی الگوی ترافیک شبکه‌های حمل و نقل در نتیجه‌ی بهره‌گیری از فرضیات رفتاری سالمتر در مدل‌سازی رفتار انتخاب مسیر اختصاص خواهد یافت. رویکرد پیشنهادی شامل تخصیص ترافیک چندمعیاره (چندمتغیره) و چنددهای و با استفاده از مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته‌ی مخلوط خواهد بود. چهارچوب نظری متدولوژی پیشنهادی با جزئیات شرح داده شده و مدل بر روی شبکه‌های آزمایشی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌است. همچنین مقایسه‌ای نیز بین رویکرد پیشنهادی با مدل سنتی تک‌متغیره و تک‌دهای قطعی صورت گرفته که حاکی از تفاوت قابل توجهی میان نتایج دو روش است.

کلیدواژه: مدل‌سازی انتخاب مسیر، مدل‌های لوجیت و لوجیت مخلوط، پرداخت مدل، داده‌های ارجحیت



<http://traffic.org.tahran.ir>
اطهارشده



1 - مقدمه

مدل سازی رفتار از مهم ترین مباحث تحلیل تقاضای سفر به شمار می آید. بسیاری از مطالعات در زمینه برنامه ریزی حمل و نقل به هر چه واقع بینانه تر ساختن مدل سازی رفتار اختصاص یافته است، چرا که بسیاری از نیازهایی که مهندس حمل و نقل می بایست برای پاسخ گویی به آنها برنامه ریزی نماید و همچنین بسیاری از تغییرات در ازای اجرای سیاست های مختلف که می بایست آنها را پیش بینی نماید در حقیقت، نتیجه ی انتخاب های استفاده کنندگان خدمات حمل و نقل است. بنابراین افزایش توان پیش بینی رفتار افراد در استفاده از تسهیلات حمل و نقل به معنای دقت بیشتر در برآورد تقاضا، ارائه ی تحلیل های واقع گرایانه تر و در نتیجه ی اتخاذ تصمیم های بهتر خواهد بود. از همین رو، در سال های اخیر توجه بیشتری از جانب برنامه ریزان و محققان در زمینه ی توسعه ی مدل های واقع گرایانه تر، با فرضیات رفتاری سالمتر و با حساسیت بیشتر نسبت به متغیرهای مختلف صورت گرفته است.

مسأله ی مدل سازی انتخاب مسیر نیز از قاعده ی فوق مستثنی نبوده است. دقت و کارایی بسیاری از تصمیمات گرفته شده در زمینه ی طراحی و توسعه ی شبکه های حمل و نقل، قیمت گذاری مسیر و اتخاذ دیگر سیاست های مرتبط با مدیریت عرضه یا تقاضا در گروهی دقت در پیش بینی الگوی تعادلی ترافیک در شبکه است. به همین جهت توسعه ی مدل های تعمیم یافته تر تخصیص ترافیک، دقیق تر و با حساسیت بیشتر در سال های اخیر در ادبیات حمل و نقل مورد توجه بوده است.

این پژوهش به معرفی و توسعه ی مبانی نظری یک رویکرد جدید در تخصیص ترافیک با هدف افزایش دقت، حساسیت و انعطاف پذیری در پیش بینی الگوی ترافیک شبکه های حمل و نقل در نتیجه ی بهره گیری از فرضیات رفتاری سالمتر در مدل سازی رفتار انتخاب مسیر اختصاص خواهد یافت. رویکرد پیشنهادی شامل تخصیص ترافیک چندمعیاره (چندمتغیره) و چندرده ای و با استفاده از مدل های مقدار حدی تعمیم یافته ی مخلوط خواهد بود. مدل های سنتی تخصیص ترافیک اغلب تکمعیاره و تکرده ای هستند و در اکثر آنها از معیار تعادل واردراپ [1] برای مدل سازی رفتار انتخاب مسیر استفاده شده است. تعدیل هر یک از محدودیت های فوق در پژوهش های جداگانه ای تاکنون پیشنهاد شده اما در نظرگیری همزمان آنها به منظور بهره گیری همزمان از مزایای نظری این تعمیم ها تاکنون در ادبیات تخصیص ترافیک گزارش نشده است. ضمن آن که مشخصه ی نمایش جنبه های اقتصادی-اجتماعی مسافران به صورت صریح در مدل سازی رفتار انتخاب مسیر برای نخستین بار در تخصیص ترافیک و توسعه و کاربرد مدل های مقدار حدی تعمیم یافته ی مخلوط نیز برای اولین بار در ادبیات مدل سازی در این پژوهش گزارش شده است.



مدل‌های مقدار حدی تعمیم یافته¹ (GEV) و نیز مدل لوجیت مخلوط² که هر دو از بدیع‌ترین و پیشرفته‌ترین مدل‌های انتخاب هستند در سال‌های اخیر به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه برنامه‌ریزان و محققان حمل و نقل نیز قرار گرفته و در مدل سازی رفتار در تحلیل تقاضای حمل و نقل به کار گرفته شده‌اند. مدل‌های GEV و لوجیت مخلوط هر دو می‌توانند به عنوان تعمیم‌هایی بر مدل ساده‌ی لوجیت استاندارد نگریسته شوند اما از زوایایی متفاوت. مدل‌های GEV به طور خاص فرض توزیع‌های مستقل بر روی گزینه‌ها برای عبارت‌های خطا که منجر به تحمیل الگوی جانشینی مستقل بودن از گزینه‌های نامرتب³ IIA به مدل سازی انتخاب می‌شد را تعدیل می‌کنند. این مدل‌ها از طریق اجازه دادن به در نظرگیری توزیع‌های توأم برای مطلوبیت‌های تصادفی (یا به طور معادل برای عبارت‌های خطا) امکان نمایش الگوهای جانشینی بسیار تعمیم‌یافته‌تر و به عبارت دیگر با محدودیت کمتری را به تحلیل‌گر می‌دهند. به طور خاص، ورود این مدل‌ها به مسأله‌ی انتخاب مسیر دقیقاً به منظور نمایش همپوشانی⁴ مسیرهای مختلف و در نظرگیری آن در مدل‌سازی انتخاب مسیر بوده‌است؛ مسأله‌ای که محل اصلی نقد منتقدان به کاربرد مدل لوجیت استاندارد در تخصیص ترافیک بوده‌است چرا که با توجه به وجود عینی همپوشانی بین مسیرهای مختلف در یک شبکه‌ی حمل و نقل، تحمیل فرض مستقل بودن از گزینه‌های نامرتب به فرآیند مدل‌سازی انتخاب مسیر فرض بسیار محدودکننده‌ای به شمار می‌آید. مدل‌های GEV همگی در این ویژگی نیز مشترک‌اند که نظیر لوجیت استاندارد از فرم بسته برای محاسبه‌ی احتمالات برخوردارند. اجازه دادن الگوهای رقابت (جانشینی)⁵ تعمیم یافته میان گزینه‌ها به همراه راحتی محاسباتی ناشی از برخوردار بودن فرم بسته این مدل‌ها را در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار داده‌است.

مدل لوجیت مخلوط نیز فرم دیگری از تعمیم بر مدل لوجیت استاندارد است. به طور سنتی دو تفسیر مختلف برای لوجیت مخلوط ارائه می‌شود که البته هر دو به لحاظ نظری معادل‌اند اما از منظره‌ی که در این پژوهش بیشتر مورد نظر است لوجیت مخلوط را می‌توان به عنوان مدلی تفسیر کرد که جای در نظرگیری یک ذائقه‌ی واحد برای جمعیتی از انتخاب‌کنندگان طریق تخمین مقادیری واحد برای ضرایب متغیرهای تابع مطلوبیت، تنوع سلیقه در ترجیح میان پارامترها یا ویژگی‌های مختلف را میان انتخاب‌کنندگان از طریق در نظرگیری توزیع احتمالی برای همه یا برخی از ضرایب تابع مطلوبیت نمایش می‌دهد. به عنوان مثال، این فرض منطقی خواهد بود که در توابع مطلوبیت مسیر، همه‌ی استفاده‌کنندگان شبکه به لحاظ درک یا حساسیت نسبت به متغیری مثل زمان سفر یکسان نیستند؛

¹ Generalized Extreme Value

² Mixed Logit

³ Independence from Irrelevant Alternatives

⁴ Overlap

⁵ Competition (or Substitution Pattern)





بلکه تصمیم‌گیرندگان مختلف به لحاظ ارزش زمان سفر مقادیر متفاوتی برای خود دارند؛ ویژگی‌ای که مدل لوجیت استاندارد قادر به نمایش آن نیست. در نظرگیری توزیع احتمالی پیوسته برای ضریب زمان سفر در واقع معادل در نظرگیری توزیع برای ارزش زمان بر روی جمعیت استفاده‌کنندگان شبکه است که به لحاظ نظری فرض بسیار تعمیم‌یافته و سالمی است. نمایش این ناهمگونی¹ در انتخاب، به طور عادی در انحصار مدل لوجیت مخلوط است؛ به علاوه، رویکرد استفاده از لوجیت مخلوط در تخمین بر روی داده‌های ارجحیت اظهارشده² SP یک امتیاز بسیار ویژه دارد و آن نمایش همبستگی³ بر روی بُعد زمان است که همواره هنگامی که پای داده‌های SP در میان باشد، لوجیت مخلوط را به عنوان یک گزینه‌ی مناسب مدل‌سازی پیش‌روی محقق قرار می‌دهد. کاربرد مدل لوجیت استاندارد (و نه انواع دیگر) مخلوط در زمینه‌ی انتخاب مسیر تا کنون به شکل بسیار محدودی و آن هم با رویکردی متفاوت از این پژوهش و با هدف نمایش همپوشانی مسیرها صورت گرفته‌است [2]. اما نکته‌ای اساسی این است که تاکنون در ادبیات مدل‌سازی و اقتصادسنجی استفاده از منافع هر دوی این رویکردها به طور همزمان، یعنی نمایش توأم همبستگی میان گزینه‌ها (یا همان الگوهای جانشینی محدودنشده یا کمتر محدودشده) و ناهمگونی در درک و دریافت و انتخاب مسافران (و احیاناً نمایش همبستگی بر روی زمان اگر داده‌های SP در کار باشد) صورت نگرفته‌است، هرچند که تئوری محدودیتی در این مورد قائل نیست و به سادگی اجازه‌ی ساخت مدل‌هایی نظیر لوجیت ترکیب‌های دوتایی مخلوط⁴ یا لوجیت آشیانه‌ای متقاطع مخلوط⁵ و به طور عمومی مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته‌ی مخلوط⁶ را می‌دهد. اصطلاحات فنی اخیر در ادبیات مدل‌سازی تاکنون به طور رسمی به کار نرفته‌اند.

در این پژوهش بخش 2 مروری خواهیم داشت بر مطالعات پیشین صورت گرفته در زمینه‌ی توسعه و استفاده از مدل لوجیت مخلوط و نیز منابع مرتبط با رویکرد تخصیص چندمعیاره‌ی ترافیک. لازم به ذکر است که با توجه به بحث صورت گرفته پیش از این، از آن‌جا که در زمینه‌ی کاربرد مدل‌های مخلوط در تخصیص ترافیک و نیز کاربرد مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته‌ی مخلوط در مدل‌سازی مطالعه‌ای منتشر نشده‌است، منابع تخصیص چندمعیاره و مدل‌های انتخاب مخلوط به صورت جداگانه و مستقل مرور شده‌اند. بخش 3 به تبیین مبانی نظری مدل‌های مقدار حدی مخلوط و بخش 4 به نمایش قابلیت کاربرد این مدل‌ها بر روی شبکه‌های آزمایشی اختصاص خواهد یافت. مقایسه‌ای نیز

¹ Heterogeneity

² Stated Preference

³ Correlation

⁴ Mixed Paired combinatorial Logit

⁵ Mixed Cross-nested Logit

⁶ Mixed Generalized Extreme Value





بین رویکرد پیشنهادی در این پژوهش و رویکرد سنتی تخصیص ترافیک قطعی صورت خواهیم داد. بخش 5 نیز به بیان خلاصه و نتیجه گیری اختصاص خواهد یافت.

2- مروری بر منابع

2-1- مدل سازی با استفاده از لوجیت مخلوط

مدل لوجیت مخلوط را می توان از انعطاف پذیرترین مدل های انتخاب دانست که می توان هر مدل مطلوبیت تصادفی دیگری را با آن تقریب زد [3]. این مدل همچنین قادر به نمایش هر نوع الگوی جانشینی، تنوع تصادفی ذائقه¹ بر روی انتخاب کنندگان و همچنین نمایش همبستگی در مطلوبیت ها بر روی زمان (در آزمایش های SP و داده های پانل²) است. همچنین بر خلاف دیگر مدل های انتخاب، توزیع خطاها در آن محدود شده نیست و قادر به در نظرگیری هر نوع توزیعی برای عبارت های تصادفی خطا است. همچنین شبیه سازی احتمالات آن سر راست است. افزایش سرعت محاسبات کامپیوتری و نیز درک بهتر از فرآیند شبیه سازی در سال های اخیر امکان به کارگیری هر چه بیشتر قدرت این مدل را فراهم ساخته است [1].

مبانی و چهارچوب نظری مدل لوجیت مخلوط در منابع متعددی ذکر شده است. از جمله و از مهم ترین آنها می توان به مکفادن و ترین [4]، ریولت و ترین [5]، ترین و سانیر [6]، ترین [7]، ترین [8]، ترین [9]، واکر [10]، چرچی و ارتوزار [11]، مونیزاگا و آوارز-دازیانو [12] و نارلا و بات [13] اشاره کرد.

مدل لوجیت مخلوط در ادبیات گاهی مدل با ضرایب تصادفی³ (دالی و همکاران [14]) و گاهی هم مدل پروبیت چند جمله ای با هسته ی لوجیت یا به اختصار مدل هسته-لوجیت⁴ نامیده می شود [15]. بخور و همکاران [2] مدل هسته لوجیت را به منظور در نظر گرفتن همبستگی میان مطلوبیت گزینه های مختلف در مسأله ی انتخاب مسیر به کار گرفتند.

به طور سنتی، تخمین مدل لوجیت مخلوط با استفاده از روش بیشینه ی درست نمایی شبیه سازی⁵ شده انجام می شود که در آن با تولید اعداد (شبه) تصادفی، عبارت تابع تحت انتگرال بارها محاسبه شده و سپس میانگین نتایج گرفته می شود. بات [16] روش جایگزینی برای تخمین مدل لوجیت مخلوط پیشنهاد نمود و با آزمایش بر روی مسأله ی انتخاب وسیله نشان داد که روش پیشنهادی دقت

¹ Random Taste Variation

² Panel Data

³ Random Coefficient Model

⁴ Logit Kernel

⁵ Simulated Maximum Likelihood





بیشتری را در ازای تعداد دفعات نمونه‌گیری تصادفی کمتر و در نتیجه زمان محاسباتی کمتر به دست می‌دهد.

2-2 - تخصیص ترافیک چندمعیاره

مطالعاتی که در آنها مدل‌های تخصیص ترافیک به صورت چندمتغیره یا چندمعیاره¹ در نظر گرفته شده باشند به صورت محدودی در ادبیات حمل و نقل یافت می‌شوند. از مهم‌ترین و مقبول‌ترین آنها شاید بتوان به مطالعات صورت گرفته توسط دافر موس [17] لورنت [18، 19 و 20]، یانگ و هوانگ [21]، ناگورنی [22]، ناگورنی و دانگ [23] و دایال [24، 25 و 26] اشاره نمود. اما تقریباً تمامی این مطالعات در یک ویژگی مشترک‌اند و آن در نظرگیری یک ترکیب خطی از زمان و هزینه سفر به عنوان هزینه‌ی عمومی² مسیر یا تابع عدم مطلوبیت سفر است. برخی از این مطالعات با تمایز قائل شدن برای مقدار ارزش زمان³ سفر رده‌های مختلف مسافران، رویکرد تعمیم‌یافته‌تر و پیشرفته‌تری را در پیش گرفته‌اند. برخی رده‌های مختلفی از مسافران را به صورت گسسته به لحاظ ارزش زمان سفر متمایز کرده و برخی نیز توزیعی پیوسته برای ارزش زمان سفر در نظر گرفته‌اند. به عنوان مثال، ناگورنی [23] یک مدل چندمعیاره و چندرده‌ای⁴ برای تعادل ترافیکی توسعه داد که در آن مسافران هر کلاس (رده) عدم مطلوبیت سفر از یک مسیر را به صورت ترکیب وزن‌داری از زمان سفر و هزینه‌ی سفر درک می‌کنند. مدل به صورت صریح اثر تراکم⁵ (یا همان وابستگی زمان سفر به جریان ترافیک عبوری) را می‌بیند.

رویکرد مشابهی نیز توسط دایال [24، 25 و 26] به منظور نمایش واکنش متفاوت مسافران به فاکتورهای مختلف یک مسیر واحد نظیر زمان سفر، تراکم و عوارض مسیر در انتخاب مسیر پیشنهاد شد. وی مدل خود را T2 نامید که در آن یک ترکیب تصادفی خطی زمان و هزینه‌ی سفر به عنوان معیار عدم مطلوبیت به هر مسیر اختصاص داده می‌شود. در حقیقت T2 فرض می‌کند که هر مسافر ارزش زمان سفر خود را دارد و مسیری را انتخاب می‌کند که با توجه به این ارزش زمان سفر، ترکیبی خطی از زمان و هزینه را کمینه نماید. به بیان دیگر ارزش زمان سفر در مدل مذکور متغیری تصادفی فرض می‌شود که دارای توزیعی بر روی جمعیت استفاده‌کنندگان شبکه است. این تنها وجه تصادفی مدل پیشنهادی دایال است. این مدل در عین حال که یک وجه تصادفی انتخاب مسیر یعنی همان

¹ Multicriteria

² Generalized Cost

³ Value of Time

⁴ Multiclass

⁵ Congestion



متفاوت بودن ارزش زمان سفر افراد مختلف را در نظر می‌گیرد، یک وجه تصادفی دیگر از فرآیند انتخاب مسیر را نادیده می‌گیرد که همان خطای درک، دریافت و اندازه‌گیری است که به طور معمول در تمامی مدل‌های تصادفی انتخاب وارد می‌شود. به عبارت دیگر دایال فرض می‌کند که هر مسافر با آگاه بودن از مقدار ارزش زمان سفر خود و هزینه و زمان سفر تمامی مسیرهای موجود، قادر است مسیری را که هزینه‌ی عمومی متناظر با شخص او را کمینه می‌کند تشخیص داده و انتخاب نماید. حال آن‌که (1) هر مسافر قادر به اندازه‌گیری یا تشخیص زمان و هزینه‌ی تمامی مسیرها به طور دقیق نیست. (2) مسافران نوعاً از تمام مسیرهای ممکن بین مبدأ-مقصد خود آگاه نیستند. (3) ممکن است مسافران مختلف معیارهای دیگری هم برای انتخاب مسیر داشته باشند که در کنترل تحلیل‌گر نیست. (4) اندازه‌گیری ویژگی‌های مسیرها برای خود تحلیل‌گر نیز به طور دقیق امکان‌پذیر نیست و (5) حتی اگر زمان و هزینه‌ی سفر تنها معیارهای انتخاب همه‌ی افراد باشد معلوم نیست همه‌ی مسافران الزاماً ترکیبی خطی از این دو معیار را به عنوان ملاک انتخاب مسیر خود به کار ببرند. با توجه به همه‌ی این دلایل؛ یعنی خطای درک و دریافت ویژگی‌ها توسط مسافران، خطای اندازه‌گیری، خطای تعیین مدل و نیز عدم برقراری فرض مسافران بهینه‌گر خطاناپذیر، در نظر گرفتن یک عبارت خطای کلی در تابع (عدم) مطلوبیت مسیر، به لحاظ رفتاری اگر مهم‌تر از در نظر گرفتن توزیع برای ارزش زمان سفر نباشد، کم‌اهمیت‌تر هم به نظر نمی‌رسد.

مدل پیشنهادی در این پژوهش در عین حال که وجه تصادفی مذکور را با در نظر گرفتن یک عبارت خطای کلی با یک توزیع احتمالی هم‌زمان و مناسب می‌بیند، وابستگی میزان حساسیت و درک نسبت به متغیر هزینه را از طریق نرمال کردن هزینه‌ی سفر بر اساس معیاری از درآمد مسافر به صورت سیستماتیک می‌بیند و از طریق در نظرگیری توزیع احتمالی پیوسته برای ضریب زمان نیز در عین حال قادر است ناهمگونی در حساسیت به متغیر زمان سفر را به صورت تصادفی در مدل‌سازی انتخاب مسیر نمایش دهد.

3 - مبانی نظری مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته‌ی مخلوط

مدل‌های احتمالی انتخاب مسیر نوعاً از نظریه‌ی مطلوبیت تصادفی استخراج می‌شوند. یک مسافر نوعی n را از میان N مسافر یک مبدأ-مقصد در نظر بگیرید که برای سفر از مبدأ به مقصد خود با مجموعه‌ای از J_n مسیر که آن را \mathbb{J}_n می‌نامیم مواجه است ($J_n = |\mathbb{J}_n|$). مطلوبیتی که این مسافر از مسیر $\mathbb{J}_n \in J$ دریافت می‌کند با U_{nj} نمایش داده می‌شود. در حالت کلی، این مطلوبیت توسط



تحلیل گر قابل مشاهده نیست و به دو بخش تقسیم می شود: یک مؤلفه ی قطعی¹ (غیر تصادفی)، V_{nj} که بخش قابل نمایش مطلوبیت² نامیده می شود و یک بخش تصادفی³، ε_{nj} که عبارت یا مؤلفه ی خطا⁴ یا اختلال⁵ نامیده می شود و در نظر گیرنده ی همه ی عواملی است که بر مطلوبیت تأثیر گذاشته و در V_{nj} لحاظ نشده اند. به عبارت دیگر، ε_{nj} لحاظ کننده ی ماهیت تصادفی مطلوبیت است:

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad \forall n = 1, \dots, N \quad \forall j \in \mathbb{J}_n \quad (1)$$

در رابطه ی فوق، بالانویس rs را که نشان دهنده ی انتخاب مسیر بین زوج مبدأ-مقصد rs است برای اختصار حذف کرده ایم. V_{nj} تابعی از پارامترهایی ناشناخته اما به لحاظ آماری قابل تخمین و ویژگی های سفر در مسیر j و احیاناً ویژگی های شخصی فرد n است. عبارت خطا، ε_{nj} منعکس کننده ی همه ی عوامل تأثیرگذار بر مطلوبیت است که تحلیل گر نمی تواند آنها را به صورت صریح در مدل نمایش دهد؛ نظیر خطای اندازه گیری⁶، خطای درک افراد⁷ و یا اشتباه در تعیین مدل⁸. ویژگی های هر مدل انتخاب به شدت به ساختار و توزیع احتمالی که برای عبارت های خطای آن در نظر گرفته می شود بستگی دارد.

اصل موضوع بهینه سازی مطلوبیت در نظریه ی مطلوبیت تصادفی بیان می دارد که هر مسافر مسیری را انتخاب خواهد کرد که اعتقاد دارد از همه مطلوب تر است یا به عبارت دیگر، بیشترین مطلوبیت را از آن دریافت می کند. بنابراین احتمال انتخاب یک مسیر مانند j توسط یک فرد نوعی مانند n به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_{nj} = \text{Prob}(U_{nj} > U_{nk}; \forall k \neq j) = \text{Prob}(V_{nj} + \varepsilon_{nj} > V_{nk} + \varepsilon_{nk}; \forall k \neq j) \\ = \text{Prob}(\varepsilon_{nk} - \varepsilon_{nj} < V_{nj} - V_{nk}; \forall k \neq j) \quad (2)$$

چنانچه بردار عبارت های خطا برای فرد n را به صورت $\varepsilon_n^T = \langle \varepsilon_{1n}, \varepsilon_{2n}, \dots, \varepsilon_{J_n n} \rangle$ و تابع چگالی احتمال توأم ε_n را با $f(\varepsilon_n)$ نمایش دهیم، آنگاه P_{nj} به صورت زیر قابل بیان خواهد بود:

$$P_{nj} = \int_{\varepsilon_n} I(\varepsilon_{nk} - \varepsilon_{nj} < V_{nj} - V_{nk}, \forall k \neq j) f(\varepsilon_n) d\varepsilon_n \quad (3)$$

انتگرال ظاهر شده در رابطه ی فوق یک انتگرال J_n بعدی است و $I(\cdot)$ یک تعیین کننده ی دومقداره⁹ است که برابر 1 است هرگاه پیشامد درون پرانتز آن رخ دهد و در غیر این صورت صفر است [1]. برای خانواده ی مدل های لوجیت، $f(\cdot)$ به گونه ای تعیین می شود که انتگرال فوق بتواند به صورت تحلیلی

¹ Deterministic Component

² Representative Utility

³ Random

⁴ Error Term or Error Component

⁵ Disturbance

⁶ Measurement Error

⁷ Individual Perception Error

⁸ Model Specification Error

⁹ Binary Indicator



حل شود. این فرم‌های تحلیلی بسته، که سادگی محاسبه‌ی احتمالات را به دنبال دارد موجب شده‌است که این رده از مدل‌ها بسیار مورد توجه محققین، از جمله در زمینه‌ی مدل‌سازی انتخاب مسیر قرار بگیرد.

خانواده‌ی مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته¹ (GEV) که توسط مک‌فادن [27] فرمول‌بندی گردیده‌است رده‌ای از مدل‌های انتخاب را شامل می‌گردد که همگی آنها در یک ویژگی مشترک هستند؛ این که در تمامی آنها عبارت‌های تصادفی خطا دارای توزیع توأم مقدار حدی هستند که در حالت کلی تابع توزیع تجمعی آن با رابطه‌ی (4) داده می‌شود.

$$F(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j_n}) = e^{-G(e^{-\varepsilon_1}, \dots, e^{-\varepsilon_{j_n}})} \quad (4)$$

در این رابطه $G(\dots)$ تابع مولد² نامیده می‌شود. هر یک از مدل‌های خانواده‌ی GEV تابع مولد خود را دارند. در حالت کلی، تابع $G(\dots)$ تابعی مشتق‌پذیر و نامنفی از J_n متغیر نامنفی است که باید شرایط زیر را نیز تأمین نماید:

1. $G(\dots)$ تابعی همگن³ از درجه‌ی 1 است؛ یعنی برای هر عدد حقیقی نامنفی α :

$$G(\alpha y_1, \dots, \alpha y_{j_n}) = \alpha G(y_1, \dots, y_{j_n}) \quad (6-3)$$

2. به ازای هر j ، $\lim_{y_j \rightarrow +\infty} G(\dots) = +\infty$

3. m امین مشتق جزئی $G(\dots)$ نسبت به هر ترکیبی از m تا از y_j ها، برای مقادیر فرد m نامنفی و برای مقادیر زوج m نامثبت است.

در این حالت احتمال آنکه یک تصمیم‌گیرنده‌ی نوعی، گزینه‌ی j را از میان J_n گزینه‌ی موجود انتخاب کند با رابطه‌ی (5) داده می‌شود که در آن $y_{nj} = e^{V_{nj}}$ و $G_{nj} = \frac{\partial G}{\partial y_{nj}}$:

$$P_{nj} = \frac{y_{nj} G_{nj}(y_{n1}, \dots, y_{nj_n})}{G(y_{n1}, \dots, y_{nj_n})} \quad (5)$$

بنابراین مدل‌های مقدار حدی تعمیم یافته مجموعه‌ی محدودی از مدل‌ها را شامل نمی‌شود و امکان ساخت مدل‌هایی را از طریق تعیین تابع مولد با شرایط مذکور می‌دهد که قادر به نمایش الگوهای جانشینی مورد نظر تحلیل‌گر باشند. به عبارت دیگر، تحلیل‌گر می‌تواند متناسب با مسأله‌ی مورد نظر خود، با تعیین تابع $G(\dots)$ ، مدل مناسب مسأله‌ی خود را بسازد و در عین حال از راحتی نظری برخوردار از فرم بسته برای محاسبه‌ی احتمالات نیز بهره‌مند بماند. مدل‌های لوجیت چندجمله‌ای⁴ (MNL)، لوجیت آشیانه‌ای متقاطع (CNL) و لوجیت ترکیب‌های دوتایی (PCL) از معروفترین مدل‌های GEV هستند.

¹ Generalized Extreme Value

² Generating Function

³ Homogenous

⁴ Multinomial Logit



3-1- لوجیت چندجمله‌ای یا لوجیت استاندارد

در مدل لوجیت چندجمله‌ای تابع مولد با رابطه‌ی (6) داده می‌شود. این نوع مشخص کردن تابع مولد معادل فرض کردن توزیع‌های مستقل و مشابه¹ (IID) گامبل² یا همان مقدار حدی³ (ابطه‌ی 7) برای عبارت‌های خطا است [3]. احتمال‌های انتخاب از رابطه‌ی شناخته‌شده‌ی (8) به دست می‌آید:

$$G(y_1, \dots, y_{J_n}) = \sum_{j=1}^{J_n} y_{nj} \quad (6)$$

$$f(\varepsilon_j) = e^{-\varepsilon_j} e^{-e^{-\varepsilon_j}} \quad (7)$$

$$P_{nj} = \frac{e^{V_{nj}}}{\sum_{k \in J_n} e^{V_{nk}}} \quad (8)$$

ضعف‌های نظری مدل لوجیت در انتخاب مسیر نیز در واقع از همین ساختار محدودشده‌ی خطاها ناشی می‌شود. در یک شبکه‌ی حمل‌ونقل نوعی بین هر زوج مبدأ- مقصد تعداد بسیار زیادی مسیر وجود دارد که بسیاری از آنها به لحاظ فیزیکی با یکدیگر همپوشانی دارند. همین سبب می‌شود هزینه‌ها و نیز عوامل مشاهده‌نشده در (عدم) مطلوبیت مسیرها از یکدیگر مستقل نباشند که همین ویژگی احتمال‌های انتخاب مسیرها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حالی که مدل لوجیت استاندارد قادر به نمایش این همبستگی‌ها نبوده و عملاً (عدم) مطلوبیت هر دو مسیر را متغیرهای تصادفی مستقل در نظر می‌گیرد. این مسأله در ادبیات تخصیص ترافیک به مسأله‌ی همپوشانی⁴ معروف شده و محل اصلی نقد پژوهشگران به تخصیص ترافیک بر اساس مدل لوجیت چندجمله‌ای بوده‌است. بسیاری از پژوهش‌های دیگر در زمینه‌ی تخصیص تصادفی ترافیک عملاً برای رفع همین ضعف منطقی؛ یعنی نادیده گرفتن همپوشانی مسیرها بوده‌است.

3-2- لوجیت آشیانه‌ای متقاطع

مدل لوجیت آشیانه‌ای متقاطع با تابع مولد داده‌شده در رابطه‌ی (9) مشخص می‌شود. البته توابع مولد مختلفی برای مدل CNL پیشنهاد شده‌است، اما ووشا [28] که نخستین بار از این مدل استفاده کرده از تابع مولد زیر استفاده کرده‌است:

$$G(y_1, \dots, y_{J_n}) = \sum_a \left(\sum_k \alpha_{ak} y_k \right)^\mu \quad (9)$$

¹ Independent and Identical Distributions

² Gumbel Distribution

³ Extreme Value

⁴ Overlapping Problem



که در آن a اندیس آشیانه‌ها و k اندیس گزینه‌ها است. μ و α_{ak} پارامترهای مدل هستند. اولی پارامتر لوگ-مجموع یا پارامتر عدم شباهت¹ یا درجه‌ی آشیانه‌ای² و دیگری ضرایب شمول³ نامیده می‌شوند که در واقع درصد عضویت گزینه‌ها به آشیانه‌های مختلف را نشان می‌دهند. مدل لجیت آشیانه‌ای متقاطع یک ساختار آشیانه‌ای انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کند که در آن گزینه‌ها می‌توانند با درجات عضویت مختلف به آشیانه‌ها متعلق باشند. بنابراین این مدل دارای یک ساختار آشیانه‌ای همپوشان⁴ است. برای سازگاری با اصل بیشینه‌سازی مطلوبیت، پارامتر لوگ-مجموع باید بین صفر و یک باشد و در حالت خاص $\mu = 1$ هم مدل CNL به MNL تنزل می‌کند. در این مطالعه مقدار پارامتر μ برابر 0/5 در نظر گرفته شده است.

در مدل CNL احتمال‌های انتخاب با رابطه‌ی (10) داده می‌شود. پراشکر و بخور [29] نخستین بار با در نظرگیری کمان‌های شبکه به عنوان آشیانه‌ها و مسیرها به عنوان گزینه‌ها و مرتبط ساختن پارامترهای شمول به توپولوژی شبکه به شکل مناسب (رابطه‌ی (11))، مدل CNL را برای انتخاب مسیر سازگار کردند که در آن، l_a و l_j به ترتیب طول کمان a و مسیر j هستند و δ_{aj} متغیر دوتایی صفر و یک است که مقدار آن برابر 1 است هرگاه کمان a در مسیر j قرار داشته باشد.

$$P_{nj} = \frac{\exp \left[V_j + \ln \sum_a \alpha_{aj} \left(\sum_{k \in \mathbb{J}_n} \alpha_{ak} e^{V_k} \right)^{\mu-1} \right]}{\sum_{i \in \mathbb{J}_n} \exp \left[V_i + \ln \sum_a \alpha_{ai} \left(\sum_{k \in \mathbb{J}_n} \alpha_{ak} e^{V_k} \right)^{\mu-1} \right]} \quad (10)$$

$$\alpha_{aj} = \left(\frac{l_a}{l_j} \right) \delta_{aj} \quad (11)$$

3-3 - لجیت ترکیب‌های دوتایی

مدل لجیت ترکیب‌های دوتایی نخستین بار توسط چو [30] پیشنهاد شده است. تابع مولد آن با رابطه‌ی (12) تعریف می‌شود. در این مدل هر جفت از گزینه‌ها آشیانه‌ی خود را تشکیل می‌دهند. ساختار آشیانه‌ای آن امکان در نظرگیری همبستگی بین مطلوبیت هر دو گزینه را می‌دهد. σ_{ij} اندیس شباهت بین گزینه‌ها (مسیرها) i و j است. احتمال‌های انتخاب نیز از رابطه‌ی (13) می‌تواند محاسبه شود:

$$G(y_1, \dots, y_{J_n}) = \sum_{j=1}^{J_n-1} \sum_{i=j+1}^{J_n} (1 - \sigma_{ij}) \left(y_i^{\frac{1}{1-\sigma_{ij}}} + y_j^{\frac{1}{1-\sigma_{ij}}} \right)^{1-\sigma_{ij}} \quad (12)$$

¹ Dissimilarity Parameter

² Degree of Nesting

³ Inclusion Coefficient

⁴ Overlapping Nesting Structure





$$P_{nj} = \frac{\sum_{k \neq j} e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{jk}}} (1 - \sigma_{jk}) \left(e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{jk}}} + e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{jk}}} \right)^{-\sigma_{jk}}}{\sum_{k=1}^{J_n-1} \sum_{i=k+1}^{J_n} (1 - \sigma_{ik}) \left(e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{jk}}} + e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{jk}}} \right)^{1-\sigma_{jk}}} \quad (13)$$

مدل PCL را نخستین بار پراشکر و بخور [29] با مربوط ساختن اندیس‌های شناخت به هندسه‌ی شبکه (رابطه‌ی 14) برای استفاده در تخصیص ترافیک سازگار کرده‌است. در این رابطه، L_{ij} طول مشترک مسیرهای i و j است.

$$\sigma_{ij} = \frac{L_{ij}}{(L_i L_j)^{0.5}} \quad (14)$$

3-4 - مدل‌های با ضرایب تصادفی یا مدل‌های مخلوط

مدل لوجیت مخلوط مدلی بسیار تعمیم‌یافته و انعطاف‌پذیر است که قابلیت نمایش تصادفی تنوع ذائقه، در نظرگیری همبستگی در عوامل مشاهده نشده بر روی زمان (یعنی مثلاً در آزمایش‌های SP) و نیز در نظرگیری همبستگی میان مطلوبیت‌های گزینه‌ها و در نتیجه نمایش نرخ‌های جانشینی (رقابت) محدود نشده میان گزینه‌ها را دارد. مدل‌های لوجیت یا به عبارت دقیق‌تر مدل‌های خانواده‌ی GEV در حالت عادی فاقد دو ویژگی اول هستند. مدل‌های لوجیت مخلوط همچنین بر خلاف پروبیت بر فرض توزیع الزاماً نرمال استوار نیستند. یک تصمیم‌گیرنده‌ی نوعی n را در نظر بگیرید که با J_n گزینه برای انتخاب مواجه است. مطلوبیتی که این فرد از گزینه‌ی j ام دریافت می‌کند به صورت رابطه‌ی (15) مشخص می‌شود که در آن، X_{nj} بردار متغیرهای توصیفی و β_n بردار ضرایب این متغیرها برای فرد n است که نمایش دهنده‌ی ذائقه‌ی این فرد است و ε_{nj} عبارتی تصادفی با توزیع همزمان مقدار حدی تعمیم یافته (در حالت خاص برای لوجیت چند جمله‌ای مخلوط، توزیع iid مقدار حدی) است.

$$U_{nj} = \beta_n' X_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (15)$$

بر خلاف مدل لوجیت استاندارد که فرض می‌کند ضرایب مقادیر ثابتی هستند و برای هر یک از افراد جمعیت یکسان هستند، لوجیت مخلوط اجازه می‌دهد که این ضرایب بر روی جمعیت به طور تصادفی تغییر کنند. افراد مختلف ذائقه‌های مختلفی دارند و لذا می‌تواند توزیعی از این ذائقه بر روی جمعیت وجود داشته باشد که این ضرایب تصادفی قادر به نمایش این تنوع خواهند بود. رابطه‌ی (16) تابع چگالی این توزیع را نشان می‌دهد. مسلماً این توزیع تابعی از پارامترهایی ناشناخته از جمعیت مانند میانگین و واریانس خواهد بود که تحلیل‌گر به دنبال تخمین آنها است. θ نمایش دهنده‌ی پارامترهای مذکور است. به عبارت دیگر، هر فرد در این نمایش از رفتار انتخاب، ذائقه (سلیقه‌ی) خود را دارد که



با β ی خود آن فرد مشخص می‌شود. اما توزیعی از این سلیقه و در نتیجه از این β بر روی جمعیت انتخاب‌کنندگان وجود دارد که خود این توزیع با پارامترهایی مشخص می‌شود که آنها را با θ نشان داده‌ایم. و به طور کلی، در این رویکرد، هدف تعیین یا به عبارت دقیق‌تر تخمین همین پارامترهای جمعیت است.

$$\beta_n \sim f(\beta_n | \theta) \quad (16)$$

بنابراین تنها تفاوت با مدل‌های لجیت معمولی این است که این رویکرد اجازه می‌دهد ضرایب به جای مقادیر ثابت دارای توزیعی بر روی جمعیت باشند. تحلیل‌گر مقادیر X_{nj} ها را مشاهده یا اندازه‌گیری می‌کند اما، β_n و ε_{nj} هر دو برای تحلیل‌گر غیرقابل مشاهده هستند. اگر تحلیل‌گر می‌توانست β_n را مشاهده کند آن‌گاه احتمال انتخاب، بسته به نوع مدل GEV می‌توانست از یکی از روابط (8)، (10) یا (13) و یا در حالت کلی از رابطه‌ی عمومی (5) به دست آید. این احتمال را احتمال شرطی می‌نامیم:

$$H_{nj}(\beta_n) = \frac{y_{nj} G_{nj}(y_1, \dots, y_{jn})}{G(y_1, \dots, y_{jn})} \quad (17)$$

اما مسلماً تحلیل‌گر مقدار β_n هر فرد را نمی‌داند. احتمال غیرشرطی، انتگرال $H_{nj}(\beta_n)$ بر روی همه‌ی مقادیر ممکن β_n است که همان فرمول انتخاب در مدل‌های GEV مخلوط خواهد بود:

$$P_{nj} = \int H_{nj}(\beta_n) f(\beta_n | \theta) d\beta_n \quad (18)$$

این انتگرال در حالت کلی به صورت فرم بسته قابل حل نخواهد بود اما شبیه‌سازی آن بسیار ساده است. به طور کلی، برای شبیه‌سازی انتگرال یک آماره بر روی تابع چگالی آن کافی است از توزیع مذکور به دفعات زیاد نمونه‌گیری تصادفی کرده، مقدار آماره را در هر نمونه‌گیری حساب و در نهایت بر روی مقادیر محاسبه شده متوسط‌گیری کنیم. بنابراین گام‌های شبیه‌سازی احتمالات مدل‌های GEV مخلوط به صورت زیر خواهد بود:

1- از $f(\beta_n | \theta)$ مقدار β_n^r را به صورت تصادفی تولید کنید که بالانویس r شماره‌ی تکرار را نشان می‌دهد.

2- مقدار آماره‌ی $H_{nj}(\beta_n^r)$ را با مقدار تصادفی تولید شده حساب کنید.

3- گام‌های 1 و 2 را به تعداد دفعات زیاد مثلاً R بار تکرار کنید.

4- بر روی تکرارهای شبیه‌سازی، مقادیر $H_{nj}(\beta_n)$ را متوسط‌گیری کنید. این میانگین همان احتمال شبیه‌سازی شده‌است (رابطه‌ی 19) و یک تخمین زننده‌ی غیر آریب¹ برای P_{nj} است.

$$\hat{P}_{nj} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R H_{nj}(\beta_n^r) \quad (19)$$

¹ Unbiased



4 - نتایج تخصیص ترافیک چندمعیاری چندرده‌ای با استفاده از مدل‌های GEV مخلوط

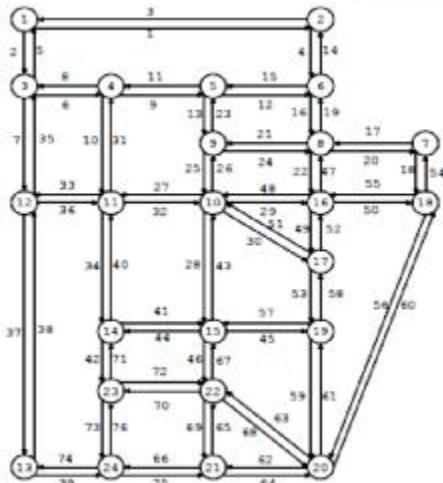
در این بخش نتیجه‌ی کاربرد مدل‌های تخصیص ترافیک پیشنهادی بر روی دو شبکه‌ی آزمایشی ارائه می‌گردد: یکی شبکه‌ی پیشنهادی ناگوین و دوپویس [31] و دیگری شبکه‌ی سوفالز¹ [32] (شکل 1). جزئیات مشخصات این شبکه‌ها در منابع مذکور قابل دسترسی بوده و در اینجا به علت محدودیت حجم و تنها به خاطر رعایت اختصار از ذکر این جزئیات صرف‌نظر شده‌است. تابع مطلوبیت لجیت مخلوط را با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های ارجحیت اظهارشده در شهر تهران مطابق رابطه‌ی (20) پرداخت نموده‌ایم [33] که در آن V_{nj} مطلوبیت سیستماتیک مسیر j ام برای فرد n ، t_{nj} و c_{nj} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی زمان و هزینه‌ی سفر مسیر، I_n درآمد ماهیانه‌ی خانوار فرد n و α و β ضرایب کالیبراسیون هستند. نتایج تخمین‌های ما در اینجا برای حالتی ارائه شده‌است که زمان سفر بر حسب دقیقه، هزینه‌ی سفر بر حسب ده ریال و درآمد بر حسب ده میلیون ریال در ماه محاسبه شود. ضریب زمان سفر، α متغیر تصادفی با توزیع نرمال در نظر گرفته شده و مقدار میانگین و انحراف استاندارد آن به ترتیب برابر $-0/0917$ و $0/0185$ و مقدار ضریب هزینه‌ی نرمال شده‌ی سفر، β برابر $-1/2158$ - تخمین زده شده که همه‌ی تخمین‌ها نیز در سطح اطمینان 95 درصد معنادار هستند.

$$V_{nj} = \alpha t_{nj} + \beta \left(\frac{\ln c_{nj}}{I_n} \right) \quad (20)$$

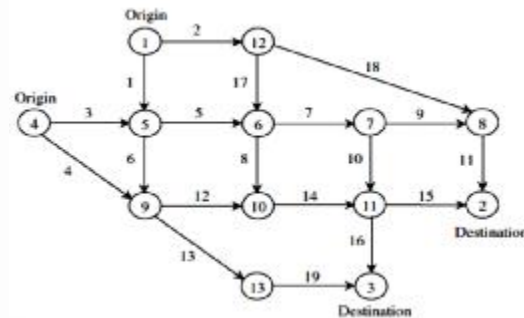
به منظور قابل اجرا بودن مدل نیز لازم است اطلاعات درآمدی مسافران هر مبدأ به عنوان داده‌های ورودی به مدل تخصیص معرفی شوند. در این پژوهش فرض کرده‌ایم که توزیع درآمد در هر گره‌ی مبدأ می‌تواند با یک توزیع احتمال نمایی² مشخص شود که بدین ترتیب برای مشخص شدن توزیع درآمد، تنها مشخص بودن میانگین درآمد ناحیه کافی است. شبکه‌های آزمایشی ما در حالت عادی فاقد این داده‌های ورودی هستند. اما در اینجا مقادیری فرضی به عنوان میانگین درآمد به ناحیه‌ها نسبت داده شده‌اند. مسافران در 4 کلاس درآمدی بر اساس توزیع مذکور تقسیم‌بندی شده‌اند.

¹ Sioux Falls

² Exponential Distribution



(ب) شبکه‌ی سوفالز



(الف) شبکه‌ی ناگوین و دوپویس

شکل 1: شبکه‌ی‌های آزمایشی.

جدول‌های 1 و 2 نتایج تخصیص روی شبکه‌های ناگوین و سوفالز را با استفاده از مدل‌های پیشنهادی و نیز مدل سنتی تعادل قطعی استفاده‌کننده نشان می‌دهند. نتایج با استفاده از 500 بار تکرار روش میانگین‌های متوالی¹ [34] به دست آمده‌اند. در هر تکرار الگوریتم مذکور نیز برای محاسبه‌ی احتمالات مدل مخلوط از 500 تکرار شبیه‌سازی استفاده شده‌است.

مدل‌های تخصیص ترافیک پیشنهاد شده در این پژوهش، به لحاظ فرضیات رفتاری تفاوت‌های قابل توجهی با مدل سنتی تعادل (قطعی) استفاده‌کننده² UE داشته و تعدیلات متعددی بر فرضیات آن ارائه می‌کنند: مسافران همه به کوتاهترین مسیر اختصاص داده نمی‌شوند و دریافت آنها از ویژگی‌های مسیرهای مختلف در قالب توابع مطلوبیت تصادفی آنها دیده می‌شود که مسافران را به انتخاب مطلوب‌ترین مسیر درک شده (مسیر با کمترین عدم مطلوبیت درک شده) سوق می‌دهد و لذا انتخاب مسیر آنها از یک ضابطه‌ی احتمالی پیروی می‌کند. فرض می‌شود که در میزان مطلوبیتی که هر مسافر از هر مسیر دریافت می‌کند به جز زمان سفر، هزینه‌ی پولی سفر و نیز ویژگی‌های اقتصادی خود مسافر نیز دخیل است؛ یعنی مسافران هر مبدأ-مقصد به لحاظ توابع مطلوبیت دریافتی از مسیرها همگی در یک کلاس قرار نمی‌گیرند و دست کم به خاطر ویژگی‌های متفاوت درآمدی، هر کلاس (رده) از استفاده‌کنندگان شبکه توابع مطلوبیت مخصوص به خود را دارند. و اینکه مدل‌های مخلوط نیز فرض می‌شود که میزان حساسیت انتخاب‌کنندگان نسبت به متغیر زمان سفر که در قالب ضریب این متغیر در توابع مطلوبیت دیده می‌شود متغیری تصادفی توزیع شده بر روی جمعیت مسافران است.

¹ Method of Successive Averages

² User Equilibrium



با توجه به تفاوت‌های مذکور در مبانی نظری، انتظار می‌رود که پیش‌بینی‌های این دو رویکرد از الگوی جریان ترافیک تفاوت‌های قابل توجهی با هم داشته باشند. شکل‌های 2 و 3 هم مؤید این فرضیه هستند. شکل‌های 2 و 3 مربوط به اجرا بر روی شبکه‌ی سوفالز هستند و نتایج UE را با نتیجه‌ی مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی چندمعیاره‌ی مخلوط به دو صورت متفاوت مقایسه می‌کند؛ اولی به صورت نقاطی که مؤلفه‌های آنها مقادیر جریان کمان UE و مدل پیشنهادی هستند و میزان پراکندگی آنها در اطراف خط نیمساز ربع اول می‌تواند معیاری برای شباهت یا تفاوت دو رویکرد باشد و دیگری مقادیر درصد اختلاف نسبی دو جریان را نشان می‌دهد که هر دو نمودار حاکی از این امر هستند که چنانچه مدل‌های چندمعیاره‌ی پیشنهادی را به عنوان مدل‌هایی که فرضیات متعادل‌تری دارند به عنوان مبنا در نظر بگیریم مدل UE می‌تواند به طور قابل توجهی جریان کمان‌ها را بیش‌تخمین¹ یا کم‌تخمین² برآورد کند که همان‌طور که در شکل‌های مذکور قابل تشخیص است، اجزای انجام شده در این بخش این گونه دلالت می‌کنند که UE اغلب مقادیر جریان کمان‌ها را (نسبت به مدل‌های چندمعیاره) دست پایین برآورد می‌کند.

جدول 1: نتایج تخصیص ترافیک بر روی شبکه‌ی ناگوین.

Mixed PCL	Mixed CNL	Mixed MNL	UE	کمان
732	741	736	706	1
468	459	464	494	2
374	368	423	100	3
426	432	377	700	4
638	659	687	440	5
468	451	472	366	6
575	563	591	354	7
332	336	384	180	8
246	228	227	100	9
330	336	363	254	10
445	446	403	500	11
452	450	467	500	12
441	432	383	566	13
785	786	851	680	14
555	554	597	500	15
559	568	617	434	16
269	240	288	94	17
199	218	176	400	18
441	432	383	566	19

¹ Overestimate

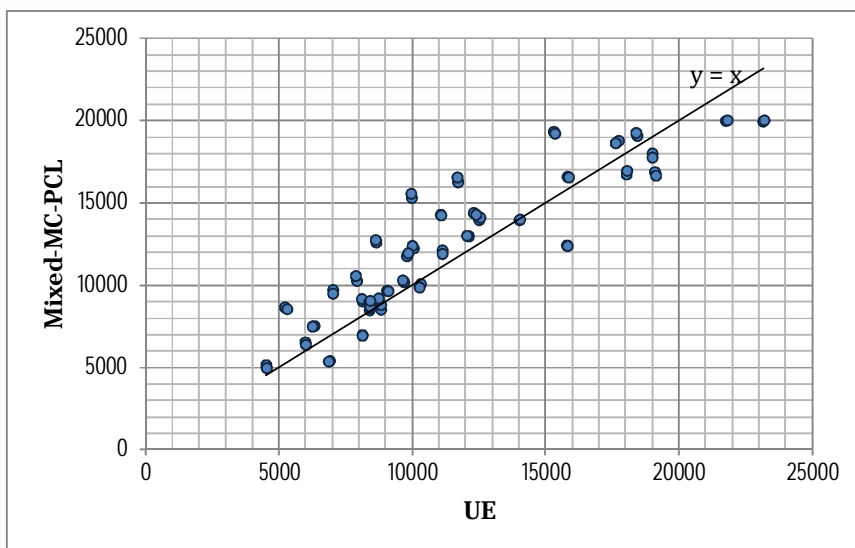
² Underestimate



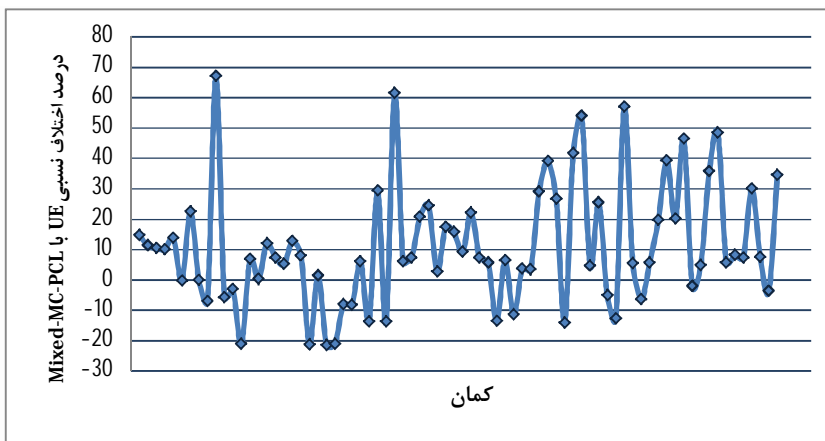


جدول 2: نتایج تخصیص ترافیک بر روی شبکه‌ی سوفالز.

Mixed PCL	UE	کمان	Mixed PCL	UE	کمان
12141	11121	39	5158	4495	1
11981	9814	40	9037	8119	2
9688	9036	41	4991	4519	3
8884	8400	42	6568	5967	4
20048	23192	43	9204	8095	5
9672	9080	44	13980	14006	6
16901	19083	45	12276	10022	7
19082	18410	46	14010	14031	8
8701	8407	47	16741	18006	9
14280	11073	48	8679	5200	10
16268	11695	49	16991	18031	11
19348	15278	50	8531	8798	12
6963	8100	51	12452	15781	13
16563	11684	52	6401	5992	14
15317	9953	53	8834	8806	15
16584	15855	54	13991	12493	16
19229	15333	55	12988	12102	17
18030	18977	56	16610	15794	18
16667	19117	57	14127	12526	19
15593	9942	58	13014	12041	20
9166	8688	59	5423	6883	21
17785	18992	60	8511	8389	22
9208	8711	61	12399	15797	23
7547	6302	62	5396	6837	24
9753	7000	63	20019	21744	25
7490	6240	64	20038	21814	26
12626	8620	65	18791	17727	27
10089	10309	66	19959	23126	28
19289	18386	67	14294	11047	29
9507	7000	68	6982	8100	30
12772	8607	69	8560	5300	31
10214	9662	70	18653	17604	32
9082	8395	71	8978	8365	33
10320	9626	72	11800	9776	34
10280	7903	73	12413	9974	35
11939	11112	74	8639	8405	36
9887	10260	75	14424	12288	37
10585	7862	76	14321	12379	38



شکل 2: مقایسه‌ی نتایج مدل تخصیص چندمعیاره‌ی پیشنهادی با مدل سنتی تعادل استفاده‌کننده بر روی شبکه‌ی سوفالزر.



شکل 3: مقایسه‌ی نتایج مدل تخصیص چندمعیاره‌ی پیشنهادی با مدل سنتی تعادل استفاده‌کننده بر روی شبکه‌ی سوفالزر.

5 - خلاصه و نتیجه‌گیری

در این پژوهش رویکرد جدیدی برای مدل‌سازی تعادل ترافیک در شبکه پیشنهاد گردید که (1) ماهیت تصادفی انتخاب مسیر مسافران را در نظر می‌گیرد. (2) متغیرهای توضیحی دیگری علاوه بر زمان سفر را به منظور افزایش سیاست‌پذیری مدل تخصیص در نظر می‌گیرد. (3) همپوشانی مسیرها در

شبکه را از طریق کاربرد مدل‌های پیشرفته‌ی انتخاب لحاظ می‌کند. (4) جنبه‌هایی از ویژگی‌های اقتصادی استفاده‌کنندگان شبکه را در فرآیند انتخابشان نمایش می‌دهد و مسافران با رده‌های درآمدی مختلف را به لحاظ حساسیت نسبت به متغیرهای پولی در مدل‌سازی رفتار از هم متمایز می‌کند، و (5) تنوع تصادفی سلیقه، توزیع‌شده بر روی جمعیت مسافران را از طریق کاربرد مدل‌های با ضرایب تصادفی نمایش می‌دهد. نشان‌داده‌شد که این رویکرد عملاً نتایجی تولید می‌کند که با مدل سنتی تک‌معیاره و تک‌رده‌ای قطعی تفاوت قابل توجهی دارد.



انجمن مهندسان حمل و نقل ایران



انجمن مهندسان حمل و نقل ایران

1. Wardrop, J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1(36): 352–378, 1952.
2. Bekhor, S., M. S. Ben-Akiva, and S. M. Ramming. Adaptation of Logit Kernel to Route Choice Situation. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1805, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 78–85.
3. Train, K. E. *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, New York, 2009.
4. McFadden, D. and K. Train. Mixed MNL Models of Discrete Response, *Journal of Applied Econometrics* **15**, 2000, pp. 447–470.
5. Revelt, D. and K. Train. Mixed Logit with Repeated Choices, *Review of Economics and Statistics* **80**, 1998, pp. 647–657.
6. Train, K. and G. Sonnier. Mixed Logit with Bounded Distributions of Correlated Partworths, in R. Scarpa and A. Alberini, eds., *Applications of Simulation Methods in Environmental and Resource Economics*, Springer, Dordrecht, 2005, pp. 117–134.
7. Train, K. A Recursive Estimator for Rom Coefficient Models, Working Paper, Department of Economics, University of California, Berkeley, 2008.
8. Train, K. A Comparison of Hierarchical Bayes and Maximum Simulated Likelihood for Mixed Logit, Working Paper, Department of Economics, University of California, Berkeley, 2001.
9. Train, K. Halton Sequences for Mixed Logit, Working Paper No. E00-278, Department of Economics, University of California, Berkeley, 2000.
10. Walker, J. Mixed Logit (or Logit Kernel) Model Dispelling Misconceptions of Identification, *Transportation Research Record* 1805, *Paper No. 02-3937*, 2002, pp. 86–98.
11. Ortúzar, J. D. and E. Cherchi, Use of Mixed Revealed-Preference and Stated-Preference Models with Nonlinear Effects in Forecasting, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1977, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 27–34.
12. Munizaga, M.A. and R. Alvarez-Daziano. Testing Mixed Logit and Probit Models by Simulation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1921, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 53–62.
13. Nerella, S. and C.R. Bhat. Numerical Analysis of Effect of Sampling of Alternatives in Discrete Choice Models, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1894, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004, pp. 11–19.
14. Daly, A., S. Hess and K. Train. Assuring Finite Moments for Willingness to Pay in Random Coefficient Models, *Transportation* 39(1), 2011, pp.19-31.
15. Ben-Akiva, M. and D. Bolduc. Multinomial Probit with a Logit Kernel and a General Parametric Specification of the Covariance Structure, Working Paper, Department of Civil Engineering, MIT, 1996.





16. Bhat, C.R. Quasi-random Maximum Simulated Likelihood Estimation of the Mixed Multinomial Logit Model, *Transportation Research Part B* 35, 2001, 677-693.
17. Dafermos, S. A Multicriteria Route-mode Choice Traffic Equilibrium Model, Lefschetz Center for Dynamical Systems, Brown University, Providence, RI, 1981.
18. Leurent, F. Cost versus Time Equilibrium over a Network. *European Journal of Operational Research* 71, 1993, pp. 205-221.
19. Leurent, F. The Theory and Practice of a Dal Criteria Aignment Model with a Continuously Distributed Value-of-time. In: Lessort, J.-B. (Ed.), *Transportation and Traffic Theory*. Elsevier, Amsterdam, 1996, pp. 455-477.
20. Leurent, F. Sensitivity and Error Analysis of the Dual Criteria Traffic Assignment Model. *Transportation Research B* 32, 1998, pp. 189-204.
21. Yang, H., Huang, H.J. The Multi-class, Multi-criteria Traffic Network Equilibrium and System Optimum Problem. *Transportation Research B* 38, 2004, pp. 1-15.
22. Nagurney, A. A Multiclass, Multicriteria Traffic Network Equilibrium Model. *Mathematical and Computer Modeling* 32, 2000, pp. 393-411.
23. Nagurney, A., Dong, J. A Multiclass, Multicriteria Traffic Network Equilibrium Model with Elastic Demand. *Transportation Research B* 36, 2002, pp. 445-469.
24. Dial, R. B. Bicriterion Traffic Assignment: Basic Theory and Elementary Algorithms, *Transportation Science*, Vol. 30, No. 2, 1996, pp. 96-111.
25. Dial, R. B. Bicriterion Traffic Assignment: Efficient Algorithms Plus Examples, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 5, 1997, pp. 357-379.
26. Dial, R. B. Bicriterion Traffic Equilibrium: T2 Model, Algorithm, and Software Overview. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1725, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2000, pp. 54-62.
27. McFadden, D. Modeling the Choice of Residential Location, *Spatial Interaction Theory and Residential Location*, (A. Karlqvist, L. Lundqvist, and J. W. Weibull, eds). 1978, pp. 75-96 (Amsterdam: North Holland).
28. Vovsha, P. Application of Cross-Nested Logit Model to Mode Choice in Tel Aviv, Israel, Metropolitan Area. In *Transportation Research Record* 1607, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1997, pp. 6-15.
29. Prashker, J. N. and Bekhor, S. Investigation of Stochastic Network Loading Procedures, *Transportation Research Record*, 1645, 1998, pp. 94-102.
30. Chu, C. A Paired Combinatorial Logit Model for Travel Demand Analysis. In *Proc., Fifth World Conference on Transportation Research*, Ventura, Calif., 1989, Vol. 4.
31. Nguyen, S. and D. Dupuis. An Efficient Method for Computing Traffic Equilibria in Networks with Asymmetric Transportation Costs, *Transportation Science*, Vol.18, 1984, 185-202.
32. Bar Gera, H. Transportation Network Test Problems. www.bgu.ac.il/~bargera/tntp/.
33. شاه‌حسینی، ز. تخصیص ترافیک چندمعیاره‌ی چندرده‌ای با استفاده از مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته‌ی مخلوط، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، 1391.
34. Sheffi, Y., and W.B. Powell. A Comparison of Stochastic and Deterministic Traffic Assignment over Congested Networks. *Transportation Research*, Vol.15B, 1981, pp. 53-64.



Multicriteria and Multiclass Analysis of Transportation Networks Using Mixed GEV Models: Theoretical Framework and Methodology

Zahra Shahhoseini, Master of Science, Sharif University of Technology, Tehran,
Iran

Milad Haghani, Master of Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Hossein Poorzahedi, Doctor of Philosophy, Professor, Sharif University of
Technology, Tehran, Iran

Abstract

Many of the researches in transportation planning are associated with making modeling route choice behavior more realistic. The precision and efficiency of many decisions in transportation network design or network pricing depends on the accuracy of forecasting equilibrium traffic pattern. Accordingly, in recent years, there has been considerable attention in developing more generalized, more accurate and more sensitive traffic assignment models in literature. This research introduces and develops an innovative approach in traffic assignment in order to enhance the accuracy and flexibility of route choice modeling and enjoying sounder assumptions in traffic equilibrium analysis. The presented approach includes making use of a multiclass multicriteria traffic assignment model employing mixed (or random coefficient) generalized extreme value (GEV) models for representation of commuters' decisions. The methodology has been elaborated and the model has also investigated on example networks. A comparison with traditional univariate single-class deterministic model has been conducted as well which indicates a considerable difference between the two methods.

