



مدل تخصیص ترافیک لوجیت ترکیب‌های دوتایی چندرده‌ای با قابلیت ارزیابی و پیش‌بینی منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی در شبکه‌های حمل و نقل

میلاذ حقانی، کارشناس ارشد حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی شریف¹
هدایت ذکایی آشتیانی، استاد گروه حمل‌ونقل دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف²
¹ milad.haghani@yahoo.com ، +98935 - 8347041
² zokaei@sharif.ed ، +9821-66019208

چکیده

محدود بودن ظرفیت زیرساخت‌های شبکه‌های حمل و نقلی برای ساخت و احداث تسهیلات جدید و نیز توسعه‌ی ظرفیت تسهیلات موجود، به همراه هزینه‌ی بالای اجرای بسیاری از سیاست‌های مدیریت عرضه، چه از دیدگاه عرضه‌کننده و چه از دیدگاه مصرف‌کننده‌ی خدمات حمل و نقل، لزوم مراجعه‌ی هر چه بیشتر به سیاست‌های مدیریت تقاضا را برای برنامه‌ریزان آشکار می‌سازد. افزایش روزافزون استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی زمان‌سفر، به منظور بهبود عملکرد و سطح خدمت در شبکه‌های حمل و نقل، توسعه‌ی مدل‌هایی با حساسیت بیشتر را توسط برنامه‌ریزان حمل و نقل ایجاب می‌کند که قادر باشند منافع کاربرد چنین سیستم‌هایی را کمی و پیش‌بینی نمایند. یک امتیاز رویکرد تصادفی تخصیص ترافیک، انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به مدل قطعی است. به منظور نشان دادن این انعطاف‌پذیری بالقوه، یک نسخه‌ی چند رده‌ای (چندکلاسه) از مدل تخصیص تصادفی با هسته‌ی انتخاب مسیر لوجیت ترکیب‌های دوتایی- که یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های انتخاب گسسته‌ی به کار رفته در تحلیل شبکه است- را پیشنهاد و اجرا نموده‌ایم که قادر است منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران در شبکه‌های حمل‌ونقل را ارزیابی نماید.

کلیدواژه: سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاع‌رسانی مسافران، مدیریت تقاضا، تخصیص ترافیک چند رده‌ای، لوجیت ترکیب‌های دوتایی

بدیهی است ارزیابی دقیق از وضعیت عملکرد یک شبکه‌ی حمل و نقل شهری در بسیاری از تصمیمات مرتبط با برنامه‌ریزی حمل و نقل و ارزیابی سیاست‌های مختلف مدیریت عرضه یا تقاضا، نظیر طراحی شبکه‌ی بهینه، ارزیابی منافع استفاده از سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاع‌رسانی مسافران¹ (ATIS) و یا تأثیر قیمت‌گذاری شبکه بر نحوه‌ی رفتار استفاده‌کنندگان و الگوی جریان ترافیک شبکه مؤثر خواهد بود. به همین جهت در سال‌های اخیر محققان توجه بیشتری به استفاده از مدل‌های رفتاری واقع‌بینانه‌تر و منعطف‌تر در مسأله‌ی تخصیص ترافیک مبذول داشته‌اند.

قانون کلاسیک تعادل استفاده‌کننده² (UE) در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌گردد [1]: □ در شرایط تعادل، هیچ استفاده‌کننده‌ای نمی‌تواند با تغییر یک‌جانبه‌ی انتخاب یا تصمیمش مطلوبیت خود را افزایش دهد.

چنانچه زمان سفر به عنوان یگانه معیار مطلوبیت یا سطح سرویس در انتخاب مسیر فرض شود، قانون کلی مذکور به قانون مشهور تعادل استفاده‌کننده‌ی واردراپ [2] تبدیل خواهد شد: □ در حالت تعادل هیچ مسافری نمی‌تواند زمان سفر خود را با تغییر یک‌جانبه‌ی مسیر بهبود (کاهش) دهد.

واردراپ برای آن که بتواند قانون فوق را در قالب فرمول‌بندی ریاضی ارائه دهد، آن را در قالب عبارات زیر بیان نمود که اغلب به آن اصل اول واردراپ³ هم گفته می‌شود: "در حالت تعادل شبکه، زمان سفر در همه‌ی مسیرهای استفاده شده با یکدیگر مساوی و کمتر از زمان سفری است که توسط یک وسیله‌ی منفرد در هر یک از مسیرهای استفاده‌نشده تجربه خواهد شد."

دو قانون اخیر در حالت کلی با یکدیگر معادل نیستند اما تحت یک سری شرایط معین نظیر توابع حجم-تأخیر پیوسته و غیرنزولی، می‌توان این دو را معادل در نظر گرفت [1]. الگوی جریان‌ی که در اصل اول واردراپ صدق کند اغلب جریان تعادل استفاده‌کننده (UE) یا در قیاس با تعادل تصادفی، جریان تعادل قطعی استفاده‌کننده⁴ (DUE) نامیده می‌شود. تخصیص قطعی ترافیک که تاکنون به شکل گسترده‌ای توسط محققان در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌است، بر اساس معیار UE پایه‌گذاری شده‌است. اما همان طور که تاکنون توسط بسیاری از محققان هم بحث شده‌است مدل تخصیص قطعی به لحاظ رفتاری چندان انعطاف‌پذیر نیست و به طور ضمنی فرضیات محدودکننده‌ای نیز با خود به همراه دارد. تخصیص UE به طور تولیچی فرض می‌کند که (1) همه‌ی مسافران دارای اطلاع کامل از وضعیت شبکه (توپولوژی شبکه و زمان‌های سفر) هستند، (2) همگی از یک فرآیند

¹ Advanced Traveler Information System

² User Equilibrium

³ Wardrop's First Principle

⁴ Deterministic User Equilibrium



انتخاب مشابه و سازگار¹ استفاده می‌کنند و (3) همه‌ی مسافران بهینه‌کننده‌های خطاناپذیر هستند، بدین معنا که توانایی نامحدودی در اتخاذ تصمیم درست و انتخاب کم‌هزینه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد سفر خود دارند. این فرض‌های محدودکننده‌ی مدل UE می‌توانند توسط کاربرد مدل‌های تصادفی انتخاب تعدیل گردند. همین امر به توسعه‌ی رده‌ی دیگری از مدل‌های تخصیص ترافیک تحت عنوان مدل‌های تصادفی تخصیص ترافیک انجامیده‌است که عمدتاً از مدل‌های انتخاب گسسته² برای مدل‌سازی رفتار انتخاب مسیر استفاده می‌کنند. قانون تعادل تصادفی استفاده‌کننده³ (SUE) را نخستین بار داگانزو و شفای [5] به عنوان تعمیمی بر اصل UE واردراپ مطرح ساختند: □ در یک شبکه در وضعیت SUE هیچ مسافری اعتقاد ندارد که می‌تواند زمان سفر خود را با تغییر یک جانبه‌ی مسیرش بهبود بخشد.

علاوه بر این، در اکثر مدل‌های پیش‌بینی الگوی ترافیک در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت حمل و نقلی برخی فرضیات همواره در نظر گرفته می‌شوند که اگرچه برخی از آنها، دست کم برای اهداف برنامه‌ریزی بلندمدت، چندان هم محدودکننده یا غیرواقعی نیستند. اما به هر حال تعدیل برخی از این فرضیات می‌تواند به توسعه‌ی مدل‌های تخصیص ترافیک با حساسیت یا انعطاف‌پذیری بیشتر بیانجامد. این فرضیات عبارتند از:

1. مدل‌های انتخاب مسیر معمولاً تک معیاره یا تک متغیره⁴ (تنها بر اساس زمان سفر) و نیز تک وسیله‌ای⁵ هستند.
2. در این مدل‌ها شرایط تعادل استاتیک فرض شده‌است بدین معنا که در دوره‌ی بررسی، هزینه‌های شبکه و الگوی ترافیک با هم سازگارند. در مقابل، دگرگونی‌های جریان ترافیک در طول دوره‌ی بررسی می‌تواند در قالب مدل‌های دینامیک بررسی شود.
3. هزینه‌های سفر مسیره‌ها در این مدل‌ها جمع شدنی⁶ در نظر گرفته شده‌اند؛ بدین معنا که هزینه‌ی سفر در یک مسیر از مجموع هزینه‌های سفر کمان‌های تشکیل دهنده‌ی آن محاسبه می‌شود. هزینه‌های سفر کمان‌ها همچنین تفکیک‌پذیر⁷ هم هستند؛ بدین معنا که هزینه‌ی سفر یک کمان تنها تابعی از جریان در همان کمان است.
4. ماتریس تقاضا اغلب در دوره‌ی بررسی ثابت فرض شده‌است.

¹ Consistent

² Discrete Choice

³ Stochastic User Equilibrium

⁴ Univariate

⁵ Uni-Modal

⁶ Additive

⁷ Separable



5. به جز زمان‌های سفر درک شده توسط مسافران، سایر پارامترهای مرتبط با جواب مسأله ثابت و بدون عدم قطعیت فرض شده‌اند.

6. فرض شده‌است که همه‌ی مسافران از تابع مطلوبیت یکسانی برای انتخاب مسیر پیروی می‌کنند و همه‌ی استفاده‌کنندگان شبکه به این لحاظ در یک رده (کلاس) قرار دارند. فرض اخیر در مدل چندرده‌ای که به منظور نمایش قابلیت ارزیابی منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران در شبکه‌های حمل و نقل پیشنهاد گردیده، تا حدودی تعدیل شده‌است.

مدل‌های تخصیص تصادفی علاوه بر تعدیل فرضیات محدودکننده‌ی مدل قطعی به منظور نمایش واقع‌بینانه‌تر رفتار انتخاب مسیر، به واسطه‌ی وجود پارامتر کالیبراسیون، انعطاف‌پذیری بیشتری هم نسبت به مدل قطعی دارند. از جمله، این قابلیت بالقوه را دارند که عملکرد کاربرد سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران را ارزیابی کرده و میزان بهبود احتمالی را که در شرایط شبکه ایجاد می‌شود به صورت کمی پیش‌بینی نمایند.

در این بخش، به منظور نمایش انعطاف‌پذیری بالقوه‌ی مدل‌های تصادفی، یک مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی¹ چند رده‌ای² را معرفی می‌کنیم. در این مدل مسافران هر مبدأ-مقصد به دو رده یا کلاس طبقه‌بندی می‌شوند که هر کدام پارامتر پراکندگی مخصوص خود را دارند که نمایش‌دهنده‌ی سطح آگاهی مختلف مسافران این دو رده از شرایط شبکه، مانند زمان‌های سفر است. یک سطح می‌تواند متناظر با شرایط عادی انتخاب مسیر (مسافران تجهیز نشده) و سطح دیگر متناظر با مسافرانی باشد که از سیستم مذکور در انتخاب مسیر استفاده می‌کنند. این مدل قابلیت آن را دارد که میزان بهبود احتمالی را که سیستم اطلاع‌رسانی در عملکرد شبکه ایجاد می‌کند مثلاً در قالب معیار زمان سفر کل شبکه و بر حسب میزان دقت و آگاهی‌ای که این سیستم به مسافران می‌دهد (میزان افزایش پارامتر پراکندگی) و میزان نفوذ به بازار³ (میزان تجهیز مسافران به این سیستم) ارزیابی نماید.

2 - مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی

در سال‌های اخیر، توسعه‌ی مدل‌های انتخاب امکان استفاده از مدل‌هایی با ساختارهای انعطاف‌پذیرتر را در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و از جمله در مدل‌سازی انتخاب مسیر فراهم ساخته‌است. مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی (PCL) نیز از جمله‌ی این مدل‌ها است. این مدل در واقع عضوی از رده‌ی عمومی‌تری از مدل‌های انتخاب یعنی مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته⁴ GEV است که توسط

¹ Paired Combinatorial Logit

² Multi-Class

³ Market Penetration

⁴ Generalized Extreme Value



مکفادن [3] با استفاده از نظریه‌ی مطلوبیت تصادفی فرمول‌بندی گردید. این فرمول‌بندی رده‌ی گسترده‌ای از مدل‌های انتخاب را شامل می‌گردد که همگی در این ویژگی مشترک‌اند که در آنها بخش مشاهده نشده‌ی مطلوبیت گزینه‌ها (عبارت‌های خطا) دارای توزیع همزمان (توأم) مقدار حدی فرض می‌شود (رابطه‌ی 1). این توزیع همزمان¹ اجازه‌ی در نظرگیری همبستگی² بین مطلوبیت گزینه‌ها را می‌دهد و همان‌گونه که از نام آن برمی‌آید، تعمیمی است بر توزیع تک‌متغیره‌ی مقدار حدی که در مدل لوجیت استاندارد به کاررفته‌است.

$$F(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{\mathcal{K}}) = e^{-G(e^{-\gamma_1}, \dots, e^{-\gamma_{\mathcal{K}}})} \quad (1)$$

تابع $G(\dots)$ تابع مولد³ نامیده می‌شود. هریک از مدل‌های خانواده‌ی GEV تابع مولد خود را دارند. در حالت کلی، تابع $G(\dots)$ تابعی مشتق‌پذیر و نامنفی از \mathcal{K} متغیر نامنفی است که باید شرایط زیر را نیز تأمین نماید:

1. $G(\dots)$ تابعی همگن⁴ از درجه‌ی $\rho > 0$ است؛ یعنی برای هر عدد حقیقی نامنفی α :

$$G(\alpha y_1, \dots, \alpha y_{\mathcal{K}}) = \alpha^\rho G(y_1, \dots, y_{\mathcal{K}}) \quad (2)$$

مکفادن [3] همگنی را از درجه‌ی یک در نظر گرفت اما بن‌اکیوا و لِرمان [4] آن را به همگنی از هر درجه‌ی دلخواه تعمیم دادند.)

$$2. \lim_{y_i \rightarrow +\infty} G(\dots) = +\infty, \quad i \text{ هر ازای هر}$$

3. m آمین مشتق جزئی $G(\dots)$ نسبت به هر ترکیبی از m تا از y_i ها، برای مقادیر فرد m

نامنفی و برای مقادیر زوج m ناممثبت است.

در این حالت احتمال آنکه یک تصمیم‌گیرنده‌ی نوعی، گزینه‌ی k با مطلوبیت سیستماتیک V_k را از میان \mathcal{K} گزینه‌ی موجود انتخاب کند با رابطه‌ی (3) داده می‌شود که در آن $y_k = e^{V_k}$ و $G_k = \frac{\partial G}{\partial y_k}$:

$$P_k = \frac{y_k G_k(y_1, \dots, y_{\mathcal{K}})}{\rho G(y_1, \dots, y_{\mathcal{K}})} \quad (3)$$

لوجیت ترکیب‌های دوتایی (PCL) یکی از مدل‌های GEV است که ساختار آشیانه‌ای آن امکان در نظرگیری همبستگی بین مطلوبیت هر دو گزینه را (بر خلاف مدل لوجیت معمولی) می‌دهد. از آنجا که در یک شبکه‌ی حمل و نقل، مسیرهای مختلف به دلیل همپوشانی‌های احتمالی که با یکدیگر دارند در مطلوبیت‌های تصادفی سفر با یکدیگر همبسته هستند، نمایش این ساختار همبستگی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک مدل انتخاب مسیر مناسب است که PCL به خوبی قادر به اجرای آن است. این مدل نخستین بار توسط چو [5] پیشنهاد شده و توسط کوپلمن و ون [6] نیز بیشتر توسعه

¹ Joint

² Correlation

³ Generating Function

⁴ Homogenous



یافته‌است. در این مدل هر جفت از گزینه‌ها آشیانه‌ی خود را تشکیل می‌دهند. تابع مولد آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G(y_1, \dots, y_{\mathcal{K}}) = \sum_{j=1}^{\mathcal{K}-1} \sum_{i=j+1}^{\mathcal{K}} (1 - \sigma_{ij}) \left(y_i^{\frac{1}{1-\sigma_{ij}}} + y_j^{\frac{1}{1-\sigma_{ij}}} \right)^{1-\sigma_{ij}} \quad (4)$$

که در آن σ_{ij} اندیس شباهت¹ بین گزینه‌ها (مسیرها) i و j است. پراشگر و بخور [7] این پارامترها را مطابق رابطه‌ی (5) به شکل مناسبی به مشخصات فیزیکی شبکه مرتبط ساختند که در آن L_i طول مسیر i و L_{ij} نمایش‌دهنده‌ی طول مشترک بین مسیرهای i و j است.

$$\sigma_{ij} = \frac{L_{ij}}{(L_i L_j)^{0.5}} \quad (5)$$

احتمال‌های انتخاب نیز از رابطه‌ی (6) یا به طور معادل، رابطه‌ی (7) می‌تواند محاسبه شود:

$$P_k = \frac{\sum_{j \neq k} e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} (1 - \sigma_{kj}) \left(e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} + e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{kj}}} \right)^{-\sigma_{kj}}}{\sum_{j=1}^{\mathcal{K}-1} \sum_{i=j+1}^{\mathcal{K}} (1 - \sigma_{ij}) \left(e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} + e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{kj}}} \right)^{1-\sigma_{kj}}} \quad (6)$$

$$P_k = \sum_{j \neq k} \left(\frac{e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}}}{e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} + e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{kj}}}} \right) \left(\frac{(1 - \sigma_{kj}) \left(e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} + e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{kj}}} \right)^{1-\sigma_{kj}}}{\sum_{j=1}^{\mathcal{K}-1} \sum_{i=j+1}^{\mathcal{K}} (1 - \sigma_{ij}) \left(e^{\frac{V_k}{1-\sigma_{kj}}} + e^{\frac{V_j}{1-\sigma_{kj}}} \right)^{1-\sigma_{kj}}} \right) \quad (7)$$

مسأله‌ی بهینه‌سازی معادل PCL-SUE نیز صورت زیر است [8]، که در آن $f_{k(kj)}^{rs}$ جریان در مسیر k از زوج مسیر kj بین r و s است محاسبه‌ی جریان تعادلی در اینجا الزاماً نیازمند محاسبه‌ی این متغیر پیچیده نیست. مقدار $\ln \left(\frac{f_{k(kj)}^{rs}}{1-\sigma_{kj}} \right)$ نیز برابر صفر در نظر گرفته می‌شود هرگاه $f_{k(kj)}^{rs}$ برابر صفر یا σ_{kj} برابر یک باشد. $t_a(\cdot)$ تابع زمان سفر کمان a و q^{rs} تقاضای سفر بین مبدأ-مقصد rs است.

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (8)$$

$$Z_1 = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

$$Z_2 = \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \sum_k \sum_{j \neq k} (1 - \sigma_{kj}) f_{k(kj)}^{rs} \ln \left(\frac{f_{k(kj)}^{rs}}{1 - \sigma_{kj}} \right)$$

$$Z_3 = \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \sum_{k=1}^{\mathcal{K}-1} \sum_{j=k+1}^{\mathcal{K}} \sigma_{kj} (f_{k(kj)}^{rs} + f_{j(kj)}^{rs}) \ln \left(\frac{f_{k(kj)}^{rs} + f_{j(kj)}^{rs}}{1 - \sigma_{kj}} \right)$$

¹ Similarity Index



$$s. t. \sum_k \sum_{j \neq k} f_{k(kj)}^{rs} = q^{rs} \quad \forall rs$$

$$f_{k(kj)}^{rs} \geq 0 \quad \forall k, j, rs$$

θ پارامتر یا ضریب پراکندگی¹ نامیده می‌شود و تفسیر سراسر آن در قالب قرینه‌ی ضریب متغیر زمان سفر در بخش سیستماتیک (عدم) مطلوبیت مسیرها است: $V_k = -\theta c_k$ ، هر چند در تخصیص تک معیاره، تفسیر آن به گونه‌ی معادل دیگری هم امکان‌پذیر است که در جای خود می‌تواند سودمند باشد [9]. اما از هر کدام از این دو منظر، بیشتر بودن θ به معنای آگاهی و حساسیت بیشتر مسافران نسبت به زمان‌های سفر در شبکه و کمتر بودن آن به معنای عدم آگاهی بیشتر مسافران نسبت به زمان‌های سفر مسیرهای موجود در شبکه، تنوع بیشتر در انتخاب مسیرها و خطای بیشتر در درک کوتاهترین مسیرها است. در مدل‌های تخصیص تصادفی با استفاده از خانواده‌ی مدل‌های لوجیت، اغلب برای تمام مسافران شبکه بین تمام مبدأ- مقصدها، یک مقدار واحد θ در نظر گرفته می‌شود. در اینجا دو بحث مطرح خواهد بود: نخست آنکه در نظر گرفتن پارامتر پراکندگی یکسان برای مسافران تمام مبدأ-مقصدها به لحاظ رفتاری منطقی نیست. انتخاب بین هر زوج مبدأ- مقصد، یک شرایط انتخاب جداگانه است که می‌تواند ضریب پراکندگی خود را داشته باشد. به ویژه که در مسافت‌های کوتاهتر (مبدأ-مقصدهای نزدیک‌تر) میزان خطای درک مسافران از زمان‌های سفر کمتر و احتمال برگزیدن کوتاهترین مسیر توسط آنها بیشتر است. بنابراین در نظر گرفتن یک مقدار واحد θ در تمام شبکه توجیهی نخواهد داشت؛ به ویژه که مدل‌های تخصیص مسیر- مبنا² به راحتی اجازه‌ی در نظر گرفتن پارامتر پراکندگی ویژه‌ی هر مبدأ-مقصد را می‌دهد. اما بحث دقیق‌تر در این زمینه در محدوده‌ی مطالعه‌ی این پژوهش نبوده و جزئیات بیشتر توسط حقانی [9] در قالب استفاده از مدل‌های لوجیت با پارامتر پراکندگی ساختار بندی³ شده ارائه شده است.

اما آنچه در این‌جا مورد نظر ما است در نظرگیری این حقیقت است که مسافران نیز به لحاظ درک زمان‌های سفر یکسان نیستند و ممکن است نتوان به طور منطقی همه‌ی آنها را به لحاظ تابع مطلوبیت مسیر یا به طور دقیق‌تر، مقدار پارامتر پراکندگی در یک رده یا کلاس قرار داد. مصداق این بحث زمانی خواهد بود که توسط عرضه‌کنندگان، زمان‌های سفر یا سایر داده‌های شبکه به مسافران اطلاع‌رسانی شود. در این صورت مسلماً ضریب پراکندگی مسافرانی که از چنین سیستمی استفاده می‌کنند با آنهایی که به این سیستم مجهز نیستند به طور قابل توجهی متفاوت خواهد بود به گونه‌ای که دیگر نمی‌توان همه‌ی آنها را بدین لحاظ در یک کلاس قرار داد. این پژوهش دقیقاً به همین مسأله می‌پردازد. مدل تخصیص PCL را در شرایطی اجرا خواهیم نمود که در آن مسافران هر مبدأ- مقصد

¹ Dispersion Coefficient

² Path-based

³ Structured Dispersion Parameter



در دو کلاس قرار می‌گیرند: آنهایی که مجهز به سیستم اطلاع‌رسانی نیستند (و پارامتر پراکندگی کمتری دارند) و آنهایی که از سیستم اطلاع‌رسانی استفاده می‌کنند (و در نتیجه مقدار پارامتر پراکندگی متناظر آنها بزرگتر است).

اما مسأله‌ی مهم در اینجا همان مقدار θ برای این دو رده یا کلاس است. مسلماً این مقادیر را می‌بایست برای شبکه‌ی مورد مطالعه کالیبره (پرداخت) شوند. اما برای شبکه‌ای که مجهز به این سیستم نیست، تخمین θ برای رده‌ی مسافران مجهز به سیستم یکی از مسائل اصلی در پیش روی تحلیل‌گر خواهد بود. در چنین شرایطی، از آن‌جا که داده‌های انتخاب‌های آشکارشده¹ در چنین شبکه‌ای موجود نیست مراجعه به داده‌های ارجحیت اظهارشده² می‌تواند یک راهکار عملی باشد. حقانی [9] با استفاده از روش پیشنهادی خود مقدار θ را برای شرایط بدون سیستم اطلاع‌رسانی بر اساس داده‌هایی عملی در شهر تهران حدوداً 0/15 تخمین زده‌است. وی همچنین با دستکاری همان مجموعه داده و ساخت مجموعه داده‌های مصنوعی نتیجه گرفته‌است که مثلاً مقداری نظیر $\theta=0/9$ می‌تواند متناظر با شرایطی باشد که مسافران به شکل قابل توجهی از شرایط شبکه آگاه هستند و با انحرافات کمی قادر هستند کوتاهترین مسیر خود را تشخیص دهند.

مسلماً مقدار پارامتر پراکندگی متناظر با مسافران مجهز، به نوع سیستم اطلاع‌رسانی و نوع اطلاعاتی که در اختیار استفاده‌کنندگان قرار می‌دهد و نیز مجرای که این اطلاعات را به آنها می‌رساند هم بستگی خواهد داشت. ما در این پژوهش مقادیر 0/3، 0/6 و 0/9 را به عنوان مقادیر متناظر با پارامتر پراکندگی مسافران اطلاع‌رسانی‌شده و برای سه سیستم فرضی با دقت‌ها و شیوه‌های مختلف اطلاع‌رسانی و نوع داده‌های مختلف آزمایش کرده‌ایم.

3 - شبکه‌ی آزمایشی و الگوریتم تخصیص

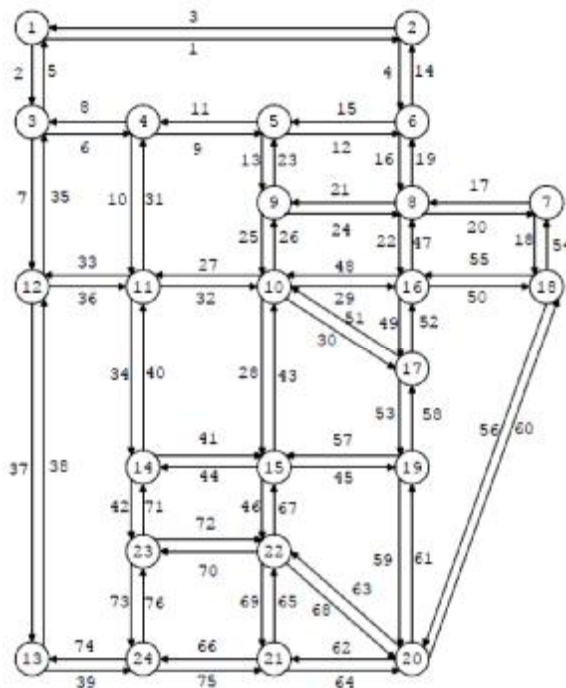
شبکه‌ی آزمایشی که در این پژوهش به منظور مطالعه‌ی نتایج مدل تخصیص ترافیک پیشنهادی به کار برده‌ایم شبکه‌ی معروف موسوم به سوفالز [10] است (شکل 1). با توجه به این که در سال‌های اخیر بسیاری از محققان تخصیص ترافیک مطالعات خود را بر روی این شبکه صورت داده‌اند، این انتخاب، مقایسه‌ی نتایج و اشکال‌زدایی³ کدهای کامپیوتری را ساده‌تر می‌کند.

¹ Revealed Preference

² Stated Preference

³ Debugging





شکل ۱: شبکه‌ی سوفالز.

شبکه‌ی سوفالز دارای 24 گره، 24 ناحیه، 76 کمان و 552 زوج مبدأ- مقصد است. هندسه‌ی شبکه در شکل نشان داده شده است. توابع زمان سفر - حجم کمان‌ها به فرم BPR^1 (رابطه‌ی 9) با $\alpha = 0/15$ و $\beta = 4/0$ هستند. ماتریس تقاضا و پارامترهای ظرفیت و زمان سفر آزاد کمان‌های شبکه، از مرجع [10] گرفته شده است. ماتریس تقاضای به کاررفته یک دهم تقاضای روزانه را نشان می‌دهد.

$$t_a = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right] \quad (9)$$

نتایج تخصیص ترافیک نیز با اجرای یک نسخه‌ی مسیر-مبنای چند رده‌ای از روش میانگین‌های متوالی² (MSA) به دست آمده است که مراحل آن به شرح زیر است:

گام 0: آماده‌سازی. زمان‌های سفر کمان‌ها را برابر زمان‌های سفر آزاد آنها قرار داده و از آنجا زمان سفر آزاد مسیرها را محاسبه کنید. بر اساس زمان‌های سفر آزاد مسیرها، شبکه را بارگذاری تصادفی کنید و یک جریان امکانپذیر اولیه $f_k^{rs(0)}$ برای هر k و هر rs به دست آورید. شمارنده را قرار دهید: $n = 1$.

گام 1: بهنگام سازی. جریان کمان‌ها را محاسبه کنید:

$$x_a^{(n)} = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs(n)} \delta_{ak}^{rs}$$

¹ Bureau of Public Roads

² Method of Successive Averages



زمان سفر کمان‌ها را به‌نگام کنید:

$$t_a^{(n)} = t_a(x_a^{(n)})$$

زمان سفر مسیرها را به‌نگام کنید:

$$c_k^{rs(n)} = \sum_a t_a^{(n)} \delta_{ak}^{rs}$$

گام 2: تعیین مطلوبیت: برای هر رده از مسافران، مقدار تابع مطلوبیت سیستماتیک مسیرهای مختلف بین مبدأ- مقصد آنها را محاسبه کنید:

$$V_{k(eq)}^{rs} = -\theta_{(eq)} c_k$$

$$V_{k(uneq)}^{rs} = -\theta_{(uneq)} c_k$$

که $\theta_{(uneq)}$ و $\theta_{(eq)}$ به ترتیب پارامتر پراکندگی متناظر با مسافران اطلاع‌رسانی شده¹ و مسافران اطلاع‌رسانی نشده² هستند.

گام 3: تعیین جهت. بر اساس مطلوبیت‌های سیستماتیک محاسبه شده‌ی مسیرها برای هر دو کلاس، احتمال انتخاب هر یک از مسیرها $P_k^{rs(n)}$ را برای هر کلاس تعیین کنید؛ یعنی $P_k^{rs(n)}$ و $P_k^{rs(n)}$ را تعیین کرده و از آنجا شبکه را بارگذاری تصادفی کنید و جریان‌های کمکی $h_k^{rs(n)}$ را محاسبه کنید:

$$h_{k(eq)}^{rs(n)} = q_{(eq)}^{rs} \cdot P_k^{rs(n)}$$

$$h_{k(uneq)}^{rs(n)} = q_{(uneq)}^{rs} \cdot P_k^{rs(n)}$$

$$h_k^{rs(n)} = h_{k(eq)}^{rs(n)} + h_{k(uneq)}^{rs(n)}$$

گام 4: حرکت. جریان جدید مسیرها را به صورت ترکیب محذبی از جریان‌های موجود و جریان‌های کمکی حساب کنید:

$$f_k^{rs(n+1)} = f_k^{rs(n)} + \frac{1}{n} (h_k^{rs(n)} - f_k^{rs(n)})$$

گام 5: کنترل همگرایی. اگر معیار همگرایی ارضا شده است، برای مثال:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{K}} \sum_{rs} \sum_k (h_k^{rs(n)} - f_k^{rs(n)})^2} \leq \varepsilon_0$$

یا $n > N_0$ که ε_0 و N_0 مقادیر از پیش تعیین شده هستند توقف کنید. در غیر این صورت قرار دهید $n = n + 1$ و به گام 1 بروید.

در اجرای این الگوریتم لازم است برای هر مبدأ-مقصد، پیش از فرآیند تخصیص، مجموعه مسیرهایی تولید شده باشد. در این پژوهش از یک الگوریتم تولید مسیر شبیه‌سازی شده [9] استفاده کرده‌ایم.

¹ Equipped

² Unequipped

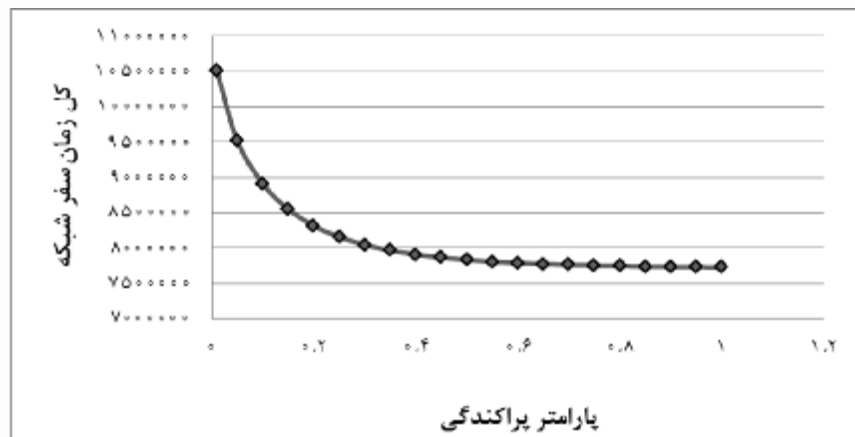




تعداد کل مسیرهای تولید شده 2267 مسیر (به طور متوسط 4/11 مسیر برای هر مبدأ- مقصد) و بیشترین تعداد مسیرهای تولید شده برای مبدأ- مقصدها 17 مسیر بوده است. جریان‌های تعادلی نیز از 1000 بار تکرار الگوریتم فوق حاصل شده‌اند.

4 - نتایج اجرا بر روی شبکه‌ی آزمایشی

یکی از معیارها و کمیت‌هایی که برنامه‌ریزان حمل و نقل و به طور خاص، تحلیل‌گران شبکه اغلب برای تحلیل وضعیت عملکرد و به عنوان اندازه‌ای از سطح سرویس شبکه به آن مراجعه می‌کنند، کل زمان سفر صرف شده در شبکه است. این کمیت معمولاً معیار طراحی‌های شبکه نیز قرار می‌گیرد. شکل 2 نشان می‌دهد که چگونه با افزایش مقدار پارامتر پراکندگی و میل کردن الگوی جریان به UE، کل زمان سفر شبکه‌ی آزمایشی ما کاهش می‌یابد. این نتیجه از اجرای الگوریتم تخصیص تک رده‌ای بر روی شبکه‌ی مذکور حاصل شده و پیش‌بینی مدل PCL را از کل زمان سفر صرف شده در شبکه نشان می‌دهد. بنابراین یک راه‌کار عملی برای میل دادن شبکه به بهینگی، کاهش مقدار پارامتر θ است. این کاهش مسلماً می‌تواند از طریق استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی زمان سفر به مسافران صورت بگیرد.

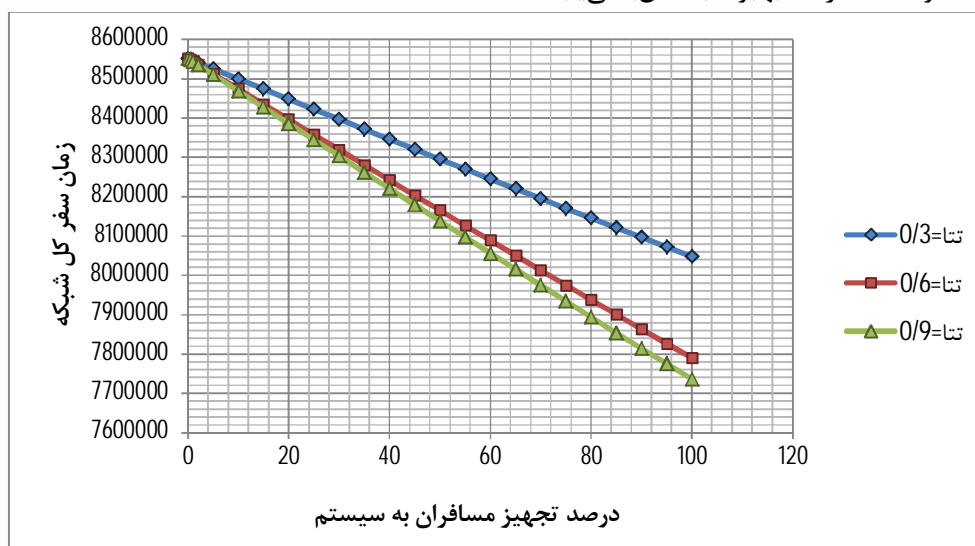


شکل 2: کاهش کل زمان سفر صرف شده در شبکه در نتیجه‌ی افزایش مقدار پارامتر پراکندگی.

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، به منظور نمایش انعطاف‌پذیری بالقوه‌ی مدل‌های تصادفی در پیش‌بینی الگوی جدید ترافیک در نتیجه‌ی استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران و ارزیابی منافع حاصل از اجرای این سیاست مدیریت تقاضا، یک مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی چند رده‌ای را به کار گرفتیم که در آن مسافران هر مبدأ-مقصد به دو رده یا کلاس طبقه‌بندی می‌شوند که هر کدام

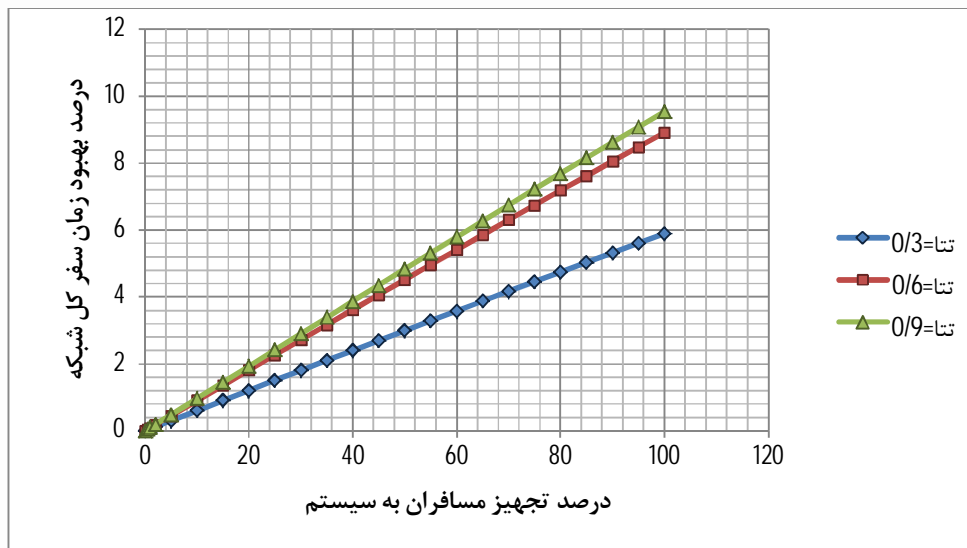
پارامتر پراکندگی مخصوص خود را دارند که نمایش دهنده‌ی سطح آگاهی مختلف مسافران این دو رده از شرایط شبکه، مانند زمان‌های سفر است. یک سطح می‌تواند متناظر با شرایط عادی انتخاب مسیر (مسافران تجهیز نشده) و سطح دیگر متناظر با مسافرانی باشد که از سیستم مذکور در انتخاب مسیر استفاده می‌کنند. این مدل قابلیت آن را دارد که میزان بهبود احتمالی را که سیستم اطلاع رسانی در عملکرد شبکه ایجاد می‌کند مثلاً در قالب معیار زمان سفر کل شبکه و بر حسب میزان دقت و آگاهی‌ای که این سیستم به مسافران می‌دهد (میزان افزایش پارامتر پراکندگی) و میزان نفوذ به بازار¹ (میزان تجهیز مسافران به این سیستم) ارزیابی نماید.

پارامتر پراکندگی مسافران اطلاع‌رسانی نشده را مقدار $0/15$ فرض نموده و سه نوع سیستم فرضی اطلاع رسانی را متناظر با پارامترهای پراکندگی $0/3$ ، $0/6$ و $0/9$ در نظر گرفته‌ایم. شکل 3 مقدار زمان سفر کل شبکه، پیش‌بینی شده توسط این مدل و شکل 4 درصد بهبود زمان سفر شبکه نسبت به وضعیت اولیه‌ی آن (بدون سیستم اطلاع رسانی) را بر حسب میزان نفوذ به بازار نشان می‌دهد. شکل‌های مذکور به طور واضحی روندی خطی را در کاهش کل زمان سفر شبکه با افزایش میزان تجهیز مسافران پیش‌بینی می‌کند. در شکل 4 شیب خطوط برای سیستم‌های فرضی متناظر با پارامترهای $0/3$ ، $0/6$ و $0/9$ به ترتیب در حدود $0/06$ ، $0/09$ و $0/10$ تخمین زده می‌شود؛ بدین معنا که با هر یک درصد افزایش در تجهیز مسافران به این سیستم‌ها، پیش‌بینی مدل برای شبکه‌ی آزمایشی ما این است که زمان سفر کل شبکه نسبت به وضعیت اولیه‌ی آن به ترتیب در حدود $0/06$ ، $0/09$ و $0/10$ درصد بهبود (کاهش) می‌یابد.



شکل 3: کاهش زمان سفر کل شبکه بر حسب درصد تجهیز مسافران به سیستم اطلاع‌رسانی.

¹ Market Penetration



شکل 4: درصد کاهش زمان سفر کل شبکه بر حسب درصد تجهیز مسافران به سیستم اطلاع رسانی.

5 - خلاصه و نتیجه گیری

محدود بودن ظرفیت زیرساخت‌های شبکه‌های حمل و نقلی برای ساخت و احداث تسهیلات جدید و نیز توسعه‌ی ظرفیت تسهیلات موجود، به همراه هزینه‌ی بالای اجرای بسیاری از سیاست‌های مدیریت عرضه، چه از دیدگاه عرضه‌کننده و چه از دیدگاه مصرف‌کننده‌ی خدمات حمل و نقل، لزوم مراجعه‌ی هر چه بیشتر به سیاست‌های مدیریت تقاضا را برای برنامه‌ریزان آشکار می‌سازد. افزایش روزافزون استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران در شبکه‌های مدرن حمل و نقل می‌تواند این پرسش را پیش روی مدیران و عرضه‌کنندگان خدمت حمل و نقل دیگر شبکه‌ها قرار دهد که منافع استفاده از این سیستم‌ها چقدر خواهد بود. مسلماً بر عهده‌ی برنامه‌ریزان حمل و نقل خواهد بود که با ساخت مدل‌های حساس‌تر و انعطاف‌پذیرتر در تخصیص ترافیک، پاسخی کمی برای این پرسش ارائه دهند. رویکرد تخصیص تصادفی ترافیک این ظرفیت را دارد که نحوه‌ی تغییر الگوی ترافیک ایستا در نتیجه‌ی استفاده از چنین سیستم‌هایی را پیش‌بینی نماید. در این پژوهش یک مدل تخصیص ترافیک چندرده‌ای با هسته‌ی لوجیت ترکیب‌های دوتایی معرفی شد. ملاحظه شد که این مدل چگونه قادر است میزان بهبود در عملکرد شبکه را، مثلاً بر حسب کمیته نظیر زمان سفر کل شبکه که معیار اکثر طراحی‌های شبکه هم هست، پیش‌بینی نماید. به طور ساده این مدل به منظور پاسخ به این پرسش طراحی شده‌است که: برای یک سیستم اطلاع‌رسانی با کیفیت، دقت، نوع اطلاعات و نحوه‌ی اطلاع‌رسانی مفروض، و برای یک میزان فرضی از نفوذ این سیستم به بازار (میزان تجهیز مسافران)،



درواز دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک
 درصد بهبود در وضعیت عملکرد شبکه چقدر خواهد بود. به منظور نمایش عینی قابلیت بالقوه‌ی مدل
 مذکور در پیش‌بینی و ارزیابی منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی، نمونه‌ای از کاربرد این مدل
 را از طریق اجرا بر روی یک شبکه‌ی آزمایشی شناخته شده نشان دادیم.



6 - مراجع

1. Aashtiani, H.Z. *The Multi-Modal Traffic Assignment Problem*, Ph.D. Dissertation, MIT, 1979.
2. Wardrop, J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1(36): 352-378, 1952.
3. 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).
4. Ben-Akiva, M., and S. R. Lerman. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. The MIT Press, Cambridge, Mass., 1985.
5. Chu, C. A Paired Combinatorial Logit Model for Travel Demand Analysis. *In Proc., Fifth World Conference on Transportation Research*, Ventura, Calif., 1989, Vol. 4.
6. Koppelman, F. S., and C. H. Wen. The Paired Combinatorial Logit Model: Properties, Estimation and Application, *Transportation Research Part B*, Vol. 24, 2000, pp. 75-89.
7. Prashker, J. N. and Bekhor, S. Investigation of Stochastic Network Loading Procedures, *Transportation Research Record*, 1645, 1998, pp. 94-102.
8. Prashker, J. N. and Bekhor, S. Stochastic User Equilibrium Formulations for Extended Logit Assignment Models, *Transportation Research Record*, 1676, 1999, pp. 145-152.
9. حقانی، م.، تخصیص تصادفی ترافیک بر اساس مدل‌های انتخاب گسسته، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، 1391، دانشگاه صنعتی شریف.
10. Bar Gera, H. *Transportation Network Test Problems*. www.bgu.ac.il/~bargera/tntp/.



A Multi-class Paired Combinatorial Logit Traffic Assignment Model for Assessing Benefits of Travelers Information Systems in Transportation Networks

Milad Haghani¹, Master of Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran,
Hedayat. Z. Aashtiani, Doctor of Philosophy, Professor, Sharif University of
Technology, Tehran, Iran

Abstract

Limited capacity of transportation infrastructures for building new facilities and as well expansion of the capacity of current facilities, in addition to the high level of expense involving in many supply management policies, whether from the suppliers perspective or from the view point of transportation services users, has revealed more necessity for transportation planners to refer to the demand management policies. The growing rate of implementing travel time information systems, in order to enhance the performance and the level of service in transportation networks, has stimulated planners to develop more sensitive models with capability to quantitate and assess the benefits of introducing traveler information systems. A superiority of stochastic approach of traffic assignment is its more flexibility than the deterministic model in modeling commuting behaviors. In order to demonstrate this potential flexibility, we have suggested a multi-class version of stochastic traffic assignment with paired combinatorial logit route choice kernel—one of the most advanced discrete choice models applied in network analysis—which is able to evaluate benefits of serving transportation networks by traveler information systems.

