

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 دانشگاه صنعتی شریف
هدایت ذکایی آشتیانی: استاد دانشگاه صنعتی شریف
*milad.haghani@yahoo.com

چکیده

محدود بودن ظرفیت زیرساخت‌های شبکه‌های حمل و نقلی برای ساخت و احداث تسهیلات جدید و نیز توسعه ظرفیت تسهیلات موجود، به همراه هزینه بالای اجرای بسیاری از سیاست‌های مدیریت عرضه، چه از دیدگاه عرضه‌کننده و چه از دیدگاه مصرف‌کننده خدمات حمل و نقل، لزوم مراجعه هر چه بیشتر به سیاست‌های مدیریت تقاضا را برای برنامه‌ریزان آشکار می‌کند. افزایش روزافزون استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی زمان‌سفر، به منظور بهبود عملکرد و سطح خدمت در شبکه‌های حمل و نقل، توسعه مدل‌هایی با حساسیت بیشتر را توسط برنامه‌ریزان حمل و نقل ایجاد 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 (چندکلاس) از مدل تخصیص تصادفی با هسته انتخاب مسیر لوجیت ترکیب‌های دوتایی-که یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های انتخاب گسسته به کار رفته در تحلیل شبکه است- را پیشنهاد و اجرا نموده‌ایم که قادر است منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی مسافران در شبکه‌های حمل و نقل را ارزیابی نماید.

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

۱ - مقدمه

بدیهی است ارزیابی دقیق از وضعیت عملکرد یک شبکه حمل و نقل شهری در بسیاری از تصمیمات مرتبط با برنامه‌ریزی حمل و نقل و ارزیابی سیاست‌های مختلف مدیریت عرضه یا تقاضا، نظیر طراحی شبکه بهینه، ارزیابی منافع استفاده از سیستم‌های پیشرفته اطلاع‌رسانی مسافران^۱ (ATIS) و یا تأثیر قیمت‌گذاری شبکه بر نحوه 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 مسأله تخصیص ترافیک مبذول داشته‌اند. قانون کلاسیک تعادل استفاده‌کننده^۲ (UE) در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌گردد [۱]: "در شرایط تعادل، هیچ استفاده‌کننده‌ای نمی‌تواند با تغییر یک‌جانبه 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 استفاده‌کننده واردراپ^۳ [۲] تبدیل خواهد شد: "در حالت تعادل هیچ مسافری نمی‌تواند زمان سفر خود را با تغییر

1. Advanced Traveler Information System
2. User Equilibrium
3. Wardrop's First Principle

یک‌جانبه 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 واردراپ هم گفته می‌شود: "در حالت تعادل شبکه، زمان سفر در همه مسیرهای استفاده شده با یکدیگر مساوی و کمتر از زمان سفری است که توسط یک وسیله 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 غیر نزولی، می‌توان این دو را معادل در نظر گرفت [۱]. الگوی جریانی که در اصل اول واردراپ صدق کند اغلب جریان تعادل استفاده‌کننده (UE) یا در قیاس با تعادل تصادفی، جریان تعادل قطعی استفاده‌کننده^۴ (DUE) نامیده می‌شود. تخصیص قطعی ترافیک که تاکنون به شکل گسترده‌ای توسط محققان در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است، بر اساس معیار UE پایه‌گذاری شده است. اما همان‌طور که تاکنون توسط بسیاری از محققان هم بحث شده است 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 تلویحی فرض

4. Deterministic User Equilibrium

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 شده است.

مدل‌های تخصیص تصادفی علاوه بر تعدیل فرضیات محدودکننده مدل قطعی به منظور نمایش واقع‌بینانه‌تر رفتار انتخاب مسیر، به واسطه 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 بالقوه مدل‌های تصادفی، یک مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی^{۱۲} چند رده‌ای^{۱۳} 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 نمایش‌دهنده 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 بازار^{۱۴} (میزان تجهیز مسافران به این سیستم) ارزیابی نماید.

۲- مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی

در سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های انتخاب امکان استفاده از مدل‌هایی با ساختارهای انعطاف‌پذیرتر را در برنامه‌ریزی حمل و نقل و از جمله در مدل‌سازی انتخاب مسیر فراهم ساخته است. مدل لوجیت ترکیب‌های دوتایی (PCL) نیز از جمله این مدل‌ها است. این مدل در واقع عضوی از رده‌ی عمومی‌تری از مدل‌های انتخاب یعنی مدل‌های مقدار حدی تعمیم‌یافته^{۱۵} GEV است که توسط مک‌فادن [۳] با استفاده از نظریه مطلوبیت تصادفی فرمول‌بندی گردید. این فرمول‌بندی رده گسترده‌ای از مدل‌های انتخاب را شامل می‌گردد که همگی در این ویژگی مشترک‌اند که در آنها بخش مشاهده نشده مطلوبیت گزینه‌ها (عبارت‌های خطا) دارای توزیع همزمان (توأم) مقدار حدی فرض می‌شود (رابطه‌ی ۱). این توزیع همزمان^{۱۶} اجازه در نظرگیری همبستگی^{۱۷} بین مطلوبیت گزینه‌ها را می‌دهد و همان‌گونه که از نام آن برمی‌آید، تعمیمی است بر توزیع تک متغیره مقدار حدی که در

می‌کند که (۱) همه مسافران دارای اطلاع کامل از وضعیت شبکه (توپولوژی شبکه و زمان‌های سفر) هستند، (۲) همگی از یک فرآیند انتخاب مشابه و سازگار^{۱۵} استفاده می‌کنند و (۳) همه 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 محدودکننده مدل UE می‌توانند توسط کاربرد مدل‌های تصادفی انتخاب تعدیل گردند. همین امر به توسعه رده دیگری از مدل‌های تخصیص ترافیک تحت عنوان مدل‌های تصادفی تخصیص ترافیک انجامیده است که عمدتاً از مدل‌های انتخاب گسسته^{۱۶} برای مدل‌سازی رفتار انتخاب مسیر استفاده می‌کنند.^{۱۷} قانون تعادل تصادفی استفاده‌کننده (SUE) را نخستین بار داگانزو و شفلی [۵] 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 جانبه 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 اگر چه برخی از آنها، دست کم برای اهداف برنامه‌ریزی بلندمدت، چندان هم محدودکننده یا غیر واقعی نیستند. اما به هر حال تعدیل برخی از این فرضیات می‌تواند به توسعه مدل‌های تخصیص ترافیک با حساسیت یا انعطاف‌پذیری بیشتر بیانجامد. این فرضیات عبارتند از:

۱. مدل‌های انتخاب مسیر معمولاً تک معیاره یا تک متغیره^{۱۸} (تنها بر اساس زمان سفر) و نیز تک وسیله‌ای^{۱۹} هستند.
۲. در این مدل‌ها شرایط تعادل استاتیک فرض شده است بدین معنا که در دوره بررسی، هزینه‌های شبکه و الگوی ترافیک با هم سازگارند. در مقابل، دگرگونی‌های جریان ترافیک در طول دوره بررسی می‌تواند در قالب مدل‌های دینامیک بررسی شود.
۳. هزینه‌های سفر مسیرها در این مدل‌ها جمع شدنی^{۲۰} در نظر گرفته شده‌اند؛ بدین معنا که هزینه سفر در یک مسیر از مجموع هزینه‌های سفر کمان‌های تشکیل دهنده آن محاسبه می‌شود. هزینه‌های سفر کمان‌ها همچنین تفکیک‌پذیر^{۲۱} هم هستند؛ بدین معنا که هزینه سفر یک کمان تنها تابعی از جریان در همان کمان است.
۴. ماتریس تقاضا اغلب در دوره بررسی ثابت فرض شده است.
۵. به جز زمان‌های سفر درک شده توسط مسافران، سایر پارامترهای مرتبط با جواب مسأله ثابت و بدون عدم قطعیت فرض شده‌اند.

۶. فرض شده است که همه مسافران از تابع مطلوبیت یکسانی برای انتخاب مسیر پیروی می‌کنند و همه استفاده‌کنندگان شبکه

5. Consistent
6. Discrete Choice
7. Stochastic User Equilibrium
8. Univariate
9. Uni-Modal
10. Additive
11. Additive

12. Paired Combinatorial Logit
13. Multi-Class
14. Market Penetration
15. Generalized Extreme Value
16. Joint
17. Correlation



مدل لجیجیت استاندارد به کار رفته است.

$$F(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_K) = e^{-G(e^{-y_1}, \dots, e^{-y_K})} \quad (1)$$

تابع $G(\dots)$ تابع مولد^{۱۸} نامیده می‌شود. هریک از مدل‌های خانواده‌ی GEV تابع مولد خود را دارند. در حالت کلی، تابع $G(\dots)$ تابعی مشتق‌پذیر و نامنفی از K متغیر نامنفی است که باید شرایط زیر را نیز تأمین نماید:
۱. $G(\dots)$ تابعی همگن^{۱۹} از درجه‌ی $\rho > 0$ است؛ یعنی برای هر عدد حقیقی نامنفی α :

$$G(\alpha y_1, \dots, \alpha y_K) = \alpha^\rho G(y_1, \dots, y_K) \quad (2)$$

(مکفادن [۳] همگنی را از درجه یک در نظر گرفت اما بن‌کیوا و لیرمان [۴] آن را به همگنی از هر درجه دلخواه تعمیم دادند.)

$$\lim_{y_i \rightarrow +\infty} G(\dots) = +\infty, \quad i$$

۲. به ازای هر i ،
۳. m آمین مشتق جزئی $G(\dots)$ نسبت به هر ترکیبی از m تا y_i ها، برای مقادیر فرد m نامنفی و برای مقادیر زوج m نامثبت است.

در این حالت احتمال آن که یک تصمیم‌گیرنده نوعی، گزینه k با مطلوبیت سیستماتیک V_k را از میان K گزینه موجود انتخاب کند با رابطه (۳) داده می‌شود که در آن $y_k = e^{V_k}$ و

$$G_k = \frac{\partial G}{\partial y_k}$$

$$P_k = \frac{y_k G_k(y_1, \dots, y_K)}{\rho G(y_1, \dots, y_K)}$$

لجیجیت 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 لجیجیت معمولی) می‌دهد. از آن‌جا که در یک شبکه 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 [۵] پیشنهاد شده و توسط کوپلمن و ون [۶] نیز بیشتر توسعه یافته است. در این مدل هر جفت از گزینه‌ها آشیانه‌ی خود را تشکیل می‌دهند. تابع مولد آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن σ_{ij} اندیس^{۲۰} شباهت بین گزینه‌ها (مسیرها)ی i و j است. پراشکر و بخور [۷] این پارامترها را مطابق رابطه (۵) به شکل مناسبی به مشخصات فیزیکی شبکه مرتبط ساختند که در آن L_i طول مسیر i و L_j نمایش‌دهنده 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 (۶) یا به طور معادل، رابطه‌ی (۷) می‌تواند محاسبه شود:

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

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

مسأله بهینه‌سازی معادل PCL-SUE نیز صورت زیر است [۸]، که در آن $f_{k(kj)}^{rs}$ جریان در مسیر k از زوج مسیر $[k, j]$ بین r و s است محاسبه‌ی جریان تعادلی در اینجا الزاماً نیازمند محاسبه‌ی این متغیر پیچیده نیست. مقدار $f_{k(kj)}^{rs} \ln \left(\frac{f_{k(kj)}^{rs}}{1 - \sigma_{kj}} \right)$ نیز برابر صفر در نظر گرفته می‌شود هرگاه $f_{k(kj)}^{rs}$ برابر صفر یا σ_{kj} برابر یک باشد. t_a تابع زمان سفر کمان a و q^{rs} تقاضای سفر بین مبدأ-مقصد rs است.

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

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

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

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

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

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

θ پارامتر یا ضریب پراکندگی^{۲۱} نامیده می‌شود و تفسیر سرراست آن در قالب قرینه ضریب متغیر زمان سفر در بخش سیستماتیک (عدم) مطلوبیت مسیرها است: $V_k = -\theta c_k$. هرچند در تخصیص تک معیاره، تفسیر آن به گونه معادل دیگری هم امکان‌پذیر است که در جای خود می‌تواند سودمند باشد [۹].

20. Similarity Index

21. Dispersion Coefficient

18. Generating Function

19. Homogenous

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 خانواده مدل‌های لوجیت، اغلب برای تمام مسافران شبکه بین تمام مبدا- مقصدها، یک مقدار واحد θ در نظر گرفته می‌شود.

در این جا دو بحث مطرح خواهد بود: نخست آن که در نظر گرفتن پارامتر پراکندگی یکسان برای مسافران تمام مبدا- مقصدها به لحاظ رفتاری منطقی نیست. انتخاب بین هر زوج مبدا- مقصد، یک شرایط انتخاب جداگانه است که می‌تواند ضریب پراکندگی خود را داشته باشد. به ویژه که در مسافت‌های کوتاه‌تر (مبدا- 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- مبدا^{۲۲} به راحتی اجازه در نظر گرفتن پارامتر پراکندگی ویژه هر مبدا- مقصد را می‌دهد. اما بحث دقیق‌تر در این زمینه در محدوده مطالعه این پژوهش نبوده و جزئیات بیشتر توسط حقانی [۹] در قالب استفاده از مدل‌های لوجیت با پارامتر پراکندگی ساختار بندی^{۲۳} شده ارائه شده است.

اما آن‌چه در این جا 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 همه 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 عرضه کنندگان، 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 همه 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 مبدا- مقصد 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).

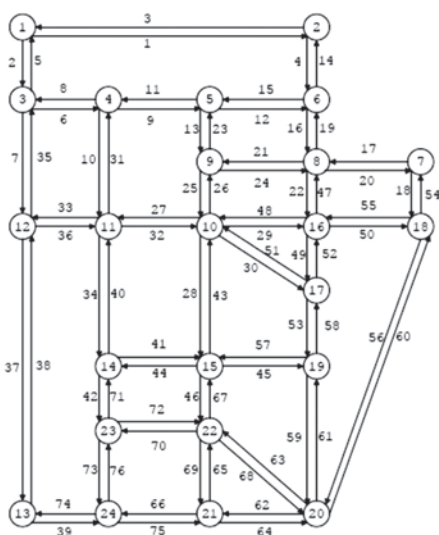
اما مسأله مهم در این جا همان مقدار θ برای این دو رده یا کلاس است. مسلماً این مقادیر می‌بایست برای شبکه مورد مطالعه کالیبره (پرداخت) شوند. اما برای شبکه‌ای که مجهز به این سیستم نیست، تخمین θ برای رده مسافران مجهز به سیستم یکی از مسائل اصلی در پیش روی تحلیل‌گر خواهد بود. در چنین

شرایطی، از آن جا که داده‌های انتخاب‌های آشکار شده^{۲۴} در چنین شبکه‌ای موجود نیست مراجعه به داده‌های ارجحیت اظهار شده^{۲۵} می‌تواند یک راهکار عملی باشد. حقانی [۹] با استفاده از روش پیشنهادی خود مقدار θ را برای شرایط بدون سیستم اطلاع‌رسانی بر اساس داده‌هایی عملی در شهر تهران حدوداً ۰/۱۵ تخمین زده است. وی همچنین با دستکاری همان مجموعه داده و ساخت مجموعه داده‌های مصنوعی نتیجه گرفته است که مثلاً مقداری نظیر $\theta=۰/۹$ 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 ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ را به عنوان مقادیر متناظر با پارامتر پراکندگی مسافران اطلاع‌رسانی شده و برای سه سیستم فرضی با دقت‌ها و شیوه‌های مختلف اطلاع‌رسانی و نوع داده‌های مختلف آزمایش کرده‌ایم.

۳- شبکه آزمایشی و الگوریتم تخصیص

شبکه آزمایشی که در این پژوهش به منظور مطالعه نتایج مدل تخصیص ترافیک پیشنهادی به کار برده‌ایم شبکه‌ی معروف موسوم به سوفالز [۱۰] است (شکل ۱). با توجه به این که در سال‌های اخیر بسیاری از محققان تخصیص ترافیک مطالعات خود را بر روی این شبکه صورت داده‌اند، این انتخاب، مقایسه نتایج و اشکال‌زدایی^{۲۶} گداهای کامپیوتری را ساده‌تر می‌کند.



شکل ۱: شبکه سوفالز

- 24. Revealed Preference
- 25. Stated Preference
- 26. Debugging

- 22. Path-based
- 23. Structured Dispersion Parameter

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

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

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

گام ۴: حرکت. جریان جدید مسیرها را به صورت ترکیب محدبی از جریان‌های موجود و جریان‌های کمکی حساب کنید:

گام ۵: کنترل همگرایی. اگر معیار همگرایی ارضا شده است، برای مثال:

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

با $n > N$ که ϵ و N مقادیر از پیش تعیین شده هستند توقف کنید. در غیر این صورت قرار دهید $n+1 = n$ و به گام ۱ 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 [۹] استفاده کرده‌ایم. تعداد کل مسیرهای تولید شده ۲۲۶۷ مسیر (به طور متوسط ۴/۱۱ مسیر برای هر مبدأ-مقصد) و بیشترین تعداد مسیرهای تولید شده برای مبدأ-مقصد ۱۷ مسیر بوده‌است. جریان‌های تعادلی نیز از ۱۰۰۰ بار تکرار الگوریتم فوق حاصل شده‌اند.

۴- نتایج اجرا بر روی شبکه 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 صرف‌شده در شبکه است. این کمیت معمولاً معیار طراحی‌های شبکه نیز قرار می‌گیرد.

شکل ۲ 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 شبکه 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.

شبکه سوپالز دارای ۲۴ گره، ۲۴ ناحیه، ۷۶ کمان و ۵۵۲ زوج مبدأ-مقصد است. هندسه شبکه در شکل نشان داده شده‌است. توابع زمان‌سفر-حجم کمان‌ها به فرم ${}^{rs}BPR^{\gamma}$ (رابطه‌ی ۹) با $\alpha = 1.5$ و $\beta = 0.4$ هستند. ماتریس تقاضا و پارامترهای ظرفیت و زمان سفر آزاد کمان‌های شبکه، از مرجع [۱۰] گرفته شده‌است. ماتریس تقاضای به کار رفته 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 نسخه مسیر-مبنای چند رده‌ای از روش میانگین‌های متوالی ${}^{rs}MSA^{\gamma}$ به دست آمده‌است که مراحل آن به شرح زیر است:

گام ۰: 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 ۱: به هنگام سازی. جریان کمان‌ها را محاسبه کنید:

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

زمان سفر کمان‌ها را به هنگام کنید:

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

زمان سفر مسیرها را به هنگام کنید:

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

گام ۲: تعیین مطلوبیت: برای هر رده از مسافران، مقدار تابع مطلوبیت سیستماتیک مسیرهای مختلف بین مبدأ-مقصد آنها را محاسبه کنید.

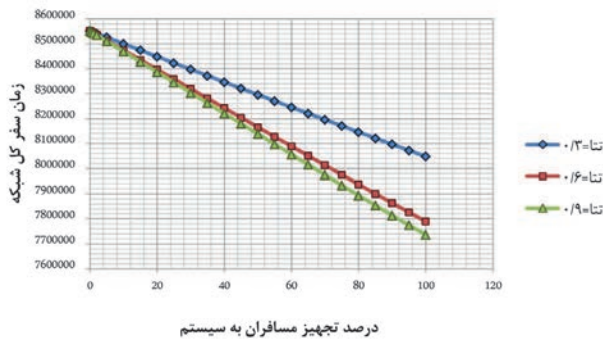
$$V_{k(eq)}^{rs} = -\theta_{(eq)} c_k$$

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

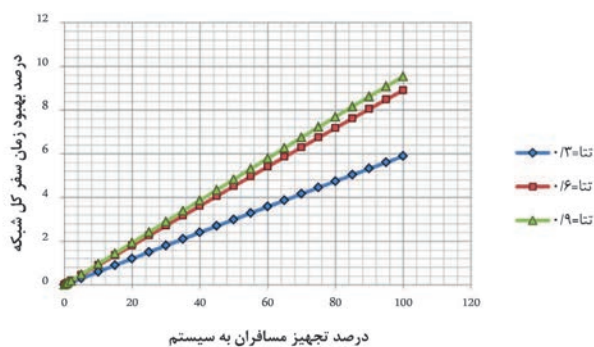
که $\theta_{(eq)}$ و $\theta_{(uneq)}$ به ترتیب پارامتر پراکندگی متناظر با مسافران اطلاع‌رسانی شده^{۲۷} و مسافران اطلاع‌رسانی نشده^{۲۸} هستند.

گام ۳: تعیین جهت. بر اساس مطلوبیت‌های سیستماتیک محاسبه شده مسیرها برای هر دو کلاس، احتمال انتخاب هر یک از مسیرها $P_k^{rs(n)}$ را برای هر کلاس تعیین کنید؛ یعنی $P_{k(eq)}^{rs(n)}$ و $P_{k(uneq)}^{rs(n)}$ را تعیین کرده و از آن‌جا شبکه را بارگذاری تصادفی و جریان‌های کمکی $h_k^{rs(n)}$ را محاسبه کنید:

27. Bureau of Public Roads
28. Method of Successive Averages
29. Equipped
30. Unequipped



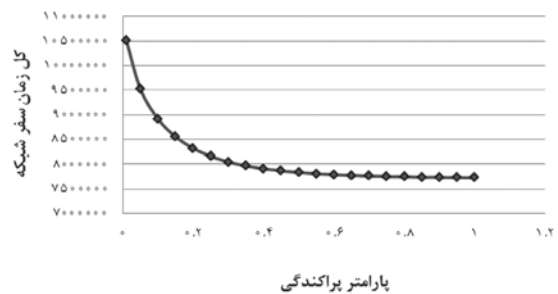
شکل ۳: کاهش زمان سفر کل شبکه بر حسب درصد تجهیز مسافران به سیستم اطلاع‌رسانی



شکل ۴: درصد کاهش زمان سفر کل شبکه بر حسب درصد تجهیز مسافران به سیستم اطلاع‌رسانی

۵ - خلاصه و نتیجه‌گیری

محدود بودن ظرفیت زیرساخت‌های شبکه‌های حمل و نقلی برای ساخت و احداث تسهیلات جدید و نیز توسعه ظرفیت تسهیلات موجود، به همراه هزینه بالای اجرای بسیاری از سیاست‌های مدیریت عرضه، چه از دیدگاه عرضه‌کننده و چه از دیدگاه مصرف‌کننده خدمات حمل و نقل، لزوم مراجعه 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 عهده 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 نحوه تغییر الگوی ترافیک ایستا در نتیجه استفاده از چنین سیستم‌هایی را پیش‌بینی نماید. در این پژوهش یک مدل تخصیص ترافیک چندرده‌ای با هسته لوجیت ترکیب‌های دوتایی معرفی شد. ملاحظه شد که



شکل ۲: کاهش کل زمان سفر صرف‌شده در شبکه در نتیجه افزایش مقدار پارامتر پراکندگی

پارامتر پراکندگی

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، به منظور نمایش انعطاف‌پذیری بالقوه مدل‌های تصادفی در پیش‌بینی الگوی جدید ترافیک در نتیجه 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 نمایش‌دهنده 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 بازار^{۳۱} (میزان تجهیز مسافران به این سیستم) ارزیابی نماید.

پارامتر پراکندگی مسافران اطلاع‌رسانی نشده را مقدار ۰/۱۵ فرض نموده و سه نوع سیستم فرضی اطلاع‌رسانی را متناظر با پارامترهای پراکندگی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ در نظر گرفته‌ایم. شکل ۳ مقدار زمان سفر کل شبکه، پیش‌بینی شده توسط این مدل و شکل ۴ درصد بهبود زمان سفر شبکه نسبت به وضعیت اولیه آن (بدون سیستم اطلاع‌رسانی) 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 ۴ شیب خطوط برای سیستم‌های فرضی متناظر با پارامترهای ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ به ترتیب در حدود ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۰ تخمین زده می‌شود؛ بدین معنا که با هر یک درصد افزایش در تجهیز مسافران به این سیستم‌ها، پیش‌بینی مدل برای شبکه آزمایشی ما این است که زمان سفر کل شبکه نسبت به وضعیت اولیه آن به ترتیب در حدود ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۰ درصد بهبود (کاهش) می‌یابد.

31. Market Penetration

- 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.
۹. حقانی، م.، تخصیص تصادفی ترافیک بر اساس مدل‌های انتخاب گسسته، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱، دانشگاه صنعتی شریف.
10. Bar Gera, H. Transportation Network Test Problems. www.bgu.ac.il/~bargera/tntp/.

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 شده است که: برای یک سیستم اطلاع‌رسانی با کیفیت، دقت، نوع اطلاعات و نحوه اطلاع‌رسانی مفروض، و برای یک میزان فرضی از نفوذ این سیستم به بازار (میزان تجهیز مسافران)، درصد بهبود در وضعیت عملکرد شبکه چقدر خواهد بود. به منظور نمایش عینی قابلیت بالقوه مدل مذکور در پیش‌بینی و ارزیابی منافع استفاده از سیستم‌های اطلاع‌رسانی، نمونه‌ای از کاربرد این مدل را از طریق اجرا بر روی یک شبکه آزمایشی شناخته شده نشان دادیم.

۶ - 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).