مدل‌سازی انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان در شرایط عدم قطعیت با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی

مجتبی رجبی بهاءآبادی (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نوید خادمی، استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
افشین شریعت مهیمنی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
جلیل شاهی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: mojtaba_rajabi@civileng.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰٤/۱۸

چکیده

برای ارزیابی اثربخشی استراتژی‌های کاهش ترافیک، تحلیل اثرات کوتاه مدت پروژه‌های حمل‌ونقلی درون شهری پدید آورنده شوک در سیستم عرضه و تقاضای حمل و نقل، لازم است که بتوان شرایط شبکه حمل‌ونقل درون شهری را به صورت دینامیکِ روزبه‌روز مدل‌سازی نمود تا بتوان روند تغییرات جریان ترافیکی در کمان های شبکه حمل و نقل را در هر روز بعد از بروز شوک مربوطه پیش‌بینی و راه حل‌های کارشناسی لازم را در صورت بروز هر گونه مساله غیر عادی تدبیر کرد. در طی چند دهه اخیر، مدلهای گوناگونی برای انتخاب مسیر هر روزه (برای سفرهای متداول هر روزه به قصد کار یا تحصیل) رانندگان ارایه شده است، که تعداد اندکی از این مدلها، دینامیک و اکثر آن‌ها، مدلهای استاتیک هستند. در این مقاله، مدل انتخاب مسیر دینامیکِ روزبه‌روزی ارایه شده است که در آن برای مدل سازی واقعی‌تر سازوکار تصمیم گیری رانندگان و در نظر گرفتن عدم قطعیتهای ذاتی فرآیند تصمیم‌گیری از مزایا و قابلیتهای تئوری مجموعه‌های فازی استفاده شده است. همچنین، مدل ارایه شده در یک شبکه فرضی کوچک بکارگرفته شده و چگونگی تغییر مسیر رانندگان در سناریوهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج بکارگیری مدل ارایه شده در شبکه فرضی نشان می دهد که رویکرد بکارگرفته شده در مدل سازی انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان بسیار کارآ و توانمند بوده است و مدل ارایه شده نسبت به شوکهای حادث شده در سیستم عرضه و تقاضا حساس است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که جریان ترافیکی در شبکه لزوماً برابر با جریان تعادلی نیست و شوکهای حادث شده در سیستم عرضه و تقاضا باعث می شود که شبکه از حالت تعادل استفاده کننده خارج گردد. همچنین، نرخ تغییر مسیر رانندگان با افزایش عدم قطعیت در شبکه افزایش می یابد که این نرخ با میزان ریسک پذیری رانندگان مستقیم رابطه دارد.

واژه‌های کلیدی: انتخاب مسیر دینامیک روزبه‌روز، تئوری مجموعه‌های فازی، پیش بینی زمان سفر، جریان ترافیک

۱. مقدمه

سفر، از اجزای جدایی ناپذیر زندگی روزمره انسانها است و هر روزه تعداد زیادی سفر با وسایل نقلیه شخصی و عمومی توسط مسافران هر روزه با اهداف مختلف صورت می‌گیرد. هر یک از سفرها به نوعی بر زندگی انسانها تاثیری ثانویه می‌گذارند و باعث مشکلاتی از جمله آلودگی هوا و تراکم در شبکه حمل‌ونقلی و اتلاف زمان افراد می‌شود. بررسی رفتار راننده‌ها و شناخت نحوه انتخاب مسیر آنها در شرایط گوناگون به منظور کاهش این تاثیرات منفی و مدیریت جریان ترافیک امری گریزناپذیر است.

نحوه انتخاب مسیر رانندگان از دیرباز تا کنون، بارها مورد تحقیق قرار گرفته است و پژوهشگران زیادی از دیدگاه‌های متفاوت به بحث درباره آن پرداخته‌اند و مدلهای گوناگونی در این زمینه ارایه شده است. این مدلها را می‌توان به طور کلی به مدلهای تخصیص استاتیک ترافیک [Fukushima,1984; Martin and Manheim,1965; Wardrop,1953]، مدلهای انتخاب مسیر گسسته[1] [Bogers et al.,2008; Gao et al.,2010; Prashker and Bekhor,2004]، مدلهای بر پایه استنتاج فازی[2] [Henn,2000; Liu et al.,2003; Lotan and Kou sopoulos,1993; Teodorovic et al.,1998]، مدلهای بر پایه تئوریهای تصمیم‌گیری[3] [Arslan and Khisty,2005; Arslan and Khisty,2006]، مدلهای انتخاب مسیر مبتنی بر نظریه بازیها[4] [Bell,2000; Bell and Cassir,2002]، مدلهای انتخاب مسیر مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی[5] [H was,2004] و مدلهای انتخاب مسیر روزبه‌روز[6] [Chen and Mahmassani,2004; De Palma et al.,1997; Naka ama et al.,1999; Sundaram et al.,2010] تقسیم‌بندی کرد.

امروزه مطالعه‌های حمل‌و نقلی، تدریجاً به سمت مدیریت تقاضای سفر و استفاده بهینه از زیرساختها به جای گسترش زیرساختهای حمل‌ونقلی سوق داده شده‌اند و سرمایه‌گذاری در استفاده از سیستمهای اطلاع رسانی به مسافران حمل‌ونقل هوشمند، گواه این موضوع است. از طرفی برای تحلیل و ارزیابی آثار کوتاه مدت سیاستها و استراتژیهای مدیریتی و نحوه واکنش رانندگان به این سیاستها، استفاده از روشهای مرسوم مدل‌سازیهای حمل‌ونقلی، ممکن است به جوابهای دقیقی منتج نشود [Sundaram et al.,2010]. بنابراین، برای بررسی آثار کوتاه مدت استراتژیهای مدیریتی مانند یک طرفه کردن یک معبر اصلی، بررسی شوکهای عرضه مانند بسته شدن یک پل، بررسی شوکهای تقاضا مانند باز شدن مدارس در اول مهر و یا برپایی نمایشگاه کتاب، نیاز به بکارگیری مدلهای انتخاب مسیر روزبه‌روز است.

در خصوص مدل‌سازیِ روزبه‌روز انتخاب مسیر رانندگان، مطالعات اندکی انجام شده است که از میان آنها می‌توان به مطالعات ناکایاما و همکاران [Nakayama et al.,1999]، چن و مهمسنی [Chen and Mahmassani,2004]، دپالما و همکاران [De Palma et al.,1997] و سندارام و همکاران [Sundaram et al.,2010] اشاره کرد. به طور کلی، در اکثر مدلهای انتخاب مسیرِ روزبه‌روز، رفتار و تصمیم گیری‌های هر مسافر در هر روز به صورت غیرهمفزون[7] شبیه‌سازی می‌شود به طوری که هر مسافر بر اساس مجموعه‌ای از تجربه‌های گذشته‌اش در شبکه، یکی از مسیرهای موجود بین مبداء و مقصد سفرش را انتخاب می‌کند. سپس، تجربه سفر در مسیر انتخاب شده به مجموعه تجربه‌هایش اضافه می شود.

با توجه به اینکه، مدل سازی واقع گرایانه فرآیند رفتاری انتخاب مسیر رانندگان، نقش کلیدی در اعتبار این مدلها ایفا می کند، بنابراین چندین مطالعه در زمینه رفتارشناسی انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان صورت گرفته است. در این راستا، ایدا و همکاران [Iida et al.,1992] و چن و مهمسنی [Chen and Mahmassani,2004]، نحوه انتخاب مسیرِ روزبه‌روز مسافران را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که متغیری تحت عنوان میزان خطا در پیش‌بینی زمان سفر، در انتخاب مسیر روزبه‌روز مسافران، نقش قابل توجهی را ایفا می‌کند. در حقیقت، یک مسافر قبل از انجام سفرش، قضاوتی از زمان سفر مسیر برگزیده خود دارد و پس از انجام سفر، متوجه انحرافی بین زمان سفر واقعی مسیر و زمان سفر پیش‌بینی شده

می‌شود. هر چه اختلاف بین زمان سفر پیش‌بینی شده مسافر و زمان سفر تجربه شده مسافر بیشتر شود، آنگاه احتمال تغییر مسیر مسافر افزایش می‌یابد. بنابراین این پژوهشگران، آستانه‌ای را به عنوان «آستانه رضایت» تعریف کردند، به طوری که، یک مسافر تنها وقتی مسیرش را عوض می‌کند که اختلاف بین زمان سفر پیش‌بینی شده و تجربه‌شده‌اش در یک مسیر از «آستانه رضایت» بیشتر باشد. در مطالعات فوق الذکر، آستانه رضایت به صورت یک عدد قطعی در نظر گرفته شده است که این باعث می‌شود که عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در فرآیند انتخاب مسیر و ناهمگنی در ادراک مسافران در نظر گرفته نشود. با توجه به اینکه رانندگان بیشتر بر اساس ادراکشان از شبکه ترافیکی، انتخاب مسیر می‌کنند که این ادراک ممکن است با شرایط واقعی شبکه متفاوت باشد [Tawfik et al.,2010]. بنابراین، ادراک مسافران از شرایط شبکه، همواره همراه با عدم قطعیت است که این باعث می‌شود که تصمیم‌گیری مسافران نیز همراه با عدم قطعیت باشد. تاکنون در قلمرو مدلهای انتخاب مسیر روزبه‌روز، کمتر به عدم قطعیتهای ذاتی در فرآیند انتخاب مسیر رانندگان توجه شده است. عموماً، پدیده‌هایی را که با عدم قطعیت همراه هستند می‌توان با تئوری احتمالات[8] یا تئوری مجموعه‌های فازی[9] بیان کرد. ولی اگر این عدم قطعیت ناشی از عدم شفافیت در معنی یک متغیر کلامی یا عدم قطعیت در ادراک انسانها باشد آنگاه تئوری مجموعه‌های فازی راه حل مناسب تری برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت است. بنابراین در این مقاله، برای مدل سازی واقع گرایانه‌تر سازوکار تصمیم گیری رانندگان، در نظر گرفتن عدم قطعیت های ذاتی فرآیند تصمیم گیری و در نظر گرفتن ناهمگنی در ادراک رانندگان، از قابلیتها و مفاهیم تئوری مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، در این پژوهش سعی شده است که با بکارگیری تئوری مجموعه‌های فازی، فرآیند انتخاب مسیر روزبه‌روز مسافران به گونه‌ای واقعی‌تر مدلسازی گردد. در این راستا در این مقاله، مفهوم آستانه رضایت از پیش‌بینی زمان سفر توسعه داده می‌شود و نشان داده می‌شود که آستانه رضایت مسافران، عددی قطعی نیست، بلکه ماهیتی غیر قطعی دارد. سپس، از عدد فازی مثلثی[10] برای در نظر گرفتن ماهیت غیر قطعی آستانه رضایت استفاده شده و تابع درجه عضویت[11] این عدد فازی، بر اساس داده‌های حاصل از یک پرسشنامه تعیین می‌شود. در ادامه، بر اساس عدد فازی آستانه رضایت از پیش‌بینی زمان سفر، مدل انتخاب مسیر روزبه‌روزی ارایه می‌شود که بر اساس آن می‌توان آثار کوتاه مدت تغییرات در سیستم عرضه و تقاضا را بر پارامترهای عملکردی شبکه حمل و نقل، مورد بررسی قرار داد و نحوه واکنش رانندگان به استراتژیهای مدیریتی را پیش‌بینی کرد.

در ادامه در این مقاله، ابتدا در بخش ۲، چهارچوب و ساختار مدل انتخاب مسیرِ روزبه‌روز پیشنهادی، تبیین و تشریح می‌شود. بخش ۳ به پرداخت و ارایه نتایج بکارگیری مدل ارایه شده در یک شبکه فرضی کوچک اختصاص دارد. در نهایت، در بخش ٤، به نتیجه گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی پرداخته می‌شود.

۲. چهارچوب مدل انتخاب مسیر روزبه‌روز ارایه شده

مدل انتخاب مسیر روزبه‌روز ارایه شده در این پژوهش از سه مولفه اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: ۱) مدل پیش‌بینی زمان سفر، ۲) مدل تصمیم‌گیری و ۳) مدل جریان ترافیک. قبل از تشریح جزئیات هر یک از مولفه‌های فوق، پارامترها و نمادهای عمومی بکاررفته در این پژوهش معرفی می‌شوند. این پارامترها و نمادها عبارتند از:

K : تعداد کل زوج مبداء- مقصد در شبکه

k : اندیس یک زوج مبداء-مقصد

I : تعداد کل روزها یا تکرارها در مدل انتخاب مسیر روزبه‌روز

i : اندیس یک روز یا تکرار

N^k : تعداد مسافران با خودروی شخصی (رانندگان) بین مبداء و مقصد kام

t : اندیس یک مسافر یا راننده

l : اندیس کمان در شبکه

$\tilde{l}(i,t)$: مجموعه کمان‌های استفاده شده برای سفر مسافر t در روز iام

r : اندیس مسیر

$\overline{r}_m$: مجموعه معابری که مسیر r را تشکیل می‌دهند.

$\hat{r}(i,t)$: مسیر انتخاب شده توسط مسافر t در روز یا تکرار i

tt_l^i : زمان سفر کمان l در روز یا تکرار i

$ett_t^{i,l}$: زمان سفر تجربه‌شده مسافرt در کمان l در روز i

$ptt_t^{i,l}$: زمان سفر پیش‌بینی‌شده توسط مسافر t برای کمان l و برای روز iام

$Ett_t^{i,r}$: زمان سفر تجربه‌شده مسافرt در مسیر r در روز i

$Ptt_t^{i,r}$: زمان سفر پیش‌بینی‌شده توسط مسافر t برای مسیر r و برای روز iام

شکل ۱ به صورت شماتیک، فرآیند مدل انتخاب روزبه‌روز ارایه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد که جزئیات آن در بخش‌های بعدی تشریح می شود.

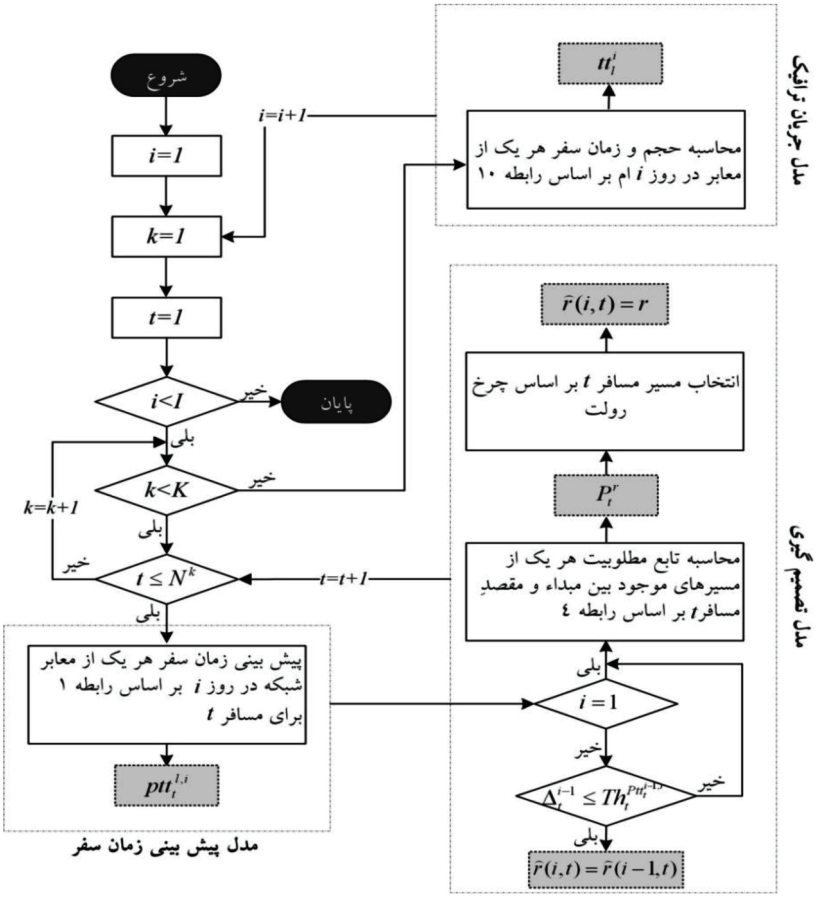
۲-۱ مدل پیش‌بینی زمان سفر

مدل‌پیش‌بینی زمان سفر، مدلی است که میزان پیش‌بینی‌زمان سفر یک مسافر را برای یک کمان خاص، براساس آرشیوی از زمان سفرهای تجربه شده آن مسافر در آن کمان، تعیین می‌کند. در این مقاله از مدل ارایه شده توسط ایدا و همکارآن [Iida et al.,1992] استفاده شده است. در این مدل، زمان سفر پیش بینی شده مسافر t برای کمان l در روز i+۱، تابعی از زمان سفر پیش‌بینی‌شده در روز قبل($ptt_t^{i,l}$) و میزان اختلاف بین زمان سفر تجربه شده و پیش‌بینی شده در روز برای کمان است :

$$ptt_t^{i+1,l} = \begin{cases} ptt_t^{i,l} & l \notin \hat{l}(i,t) \\ ett_t^{i,l} + \theta + \zeta E_{t,l}^i & otherwise \end{cases} \quad (۱)$$

$$E_{t,l}^i = ptt_t^{i,l} - ett_t^{i,l}$$

در رابطه فوق، ζ و θ ضرایب مدل هستند که با رگرسیون خطی تخمین زده می‌شوند. رابطه اول تابع دو ضابطه‌ای فوق



شکل۱. ساختار مدل انتخاب مسیر روزبه‌روز ارایه شده

به این معنا است که اگر مسافرt در روزi از کمان l عبور نکرده باشد، آنگاه زمان سفر پیش‌بینی شده توسط این مسافر برای روز i+۱ام برابر با زمان سفر پیش بینی شده برای روز iام است؛ زیرا این مسافر تجربه جدیدی از کمان کسب نکرده‌است. همچنین زمان سفر پیش‌بینی شده مسافر t برای مسیر r در روز i+۱ برابر با مجموع زمان سفرهای پیش‌بینی شده برای معابر تشکیل دهنده مسیرr است به طوری که:

$$ptt_t^{i+1,r} = \sum_{l \in \bar{r}_m} ptt_t^{i+1,l} \qquad (۲)$$

۲-۲ مدل تصمیم‌گیری

مدل تصمیم‌گیری، بیانگر مکانیزم انتخاب مسیر مسافر است. به عبارت دیگر، هدف این مولفه از مدل انتخاب مسیر روزبه‌روز، شبیه‌سازی فرآیند انتخاب مسیر یک مسافر است. طبق مطالعات ایدا و همکارآن [Iida et al.,1992] و چن و مهمسنی [Chen and Mahmassani,2004] ، «آستانه رضایت» در انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان، نقش موثری را ایفا می کند به طوری که، یک مسافر تنها وقتی مسیرش را عوض می‌کند که اختلاف بین زمان سفر پیش‌بینی شده و تجربه‌شده‌اش در یک مسیر از «آستانه رضایت» آن مسافر بیشتر باشد.

مسلم است که آستانه رضایت یک مسافر برای زمان سفرهای پیش‌بینی شده مختلف، متفاوت است و با افزایش‌زمان سفر پیش‌بینی شده، آستانه رضایت متناظر با آن زمان سفر نیز افزایش می‌یابد و برعکس. برای مثال، آستانه رضایت برای زمان سفر پیش‌بینی شده ۵ دقیقه، ممکن است ۳ دقیقه باشد، ولی برای زمان سفر پیش‌بینی شده ۵۰ دقیقه، این آستانه بسیار بیشتر است.

مدل تصمیم‌گیری در این مقاله، بر اساس مفاهیم مطالعات فوق و روش انتخاب چرخ رولت بنیان نهاده شده است. فرض کنید که مسافر t بین مبداء o و مقصد d در روز i، مسیر r را انتخاب کرده باشد ($\hat{r}(i,t) = r$)، اگر پس از سفر، اختلاف بین زمان سفر تجربه شده ($Ett_t^{i,r}$) و پیش‌بینی شده ($Ptt_t^{i,r}$) در مسیر انتخاب شده در آن روز، Δ_t^i، کمتر از آستانه رضایت ($Th_t^{Ptt_t^{i,r}}$) آن مسافر برای زمان سفر پیش‌بینی شده $Ptt_t^{i,r}$ باشد، آنگاه مسافر t برای سفر در روز بعد، همان مسیر را انتخاب می‌کند. به عبارت دیگر:

$$\hat{r}(i+1,t) = \hat{r}(i,t) \qquad if\ \Delta_t^i \le Th_t^{Ptt_t^{i,r}} \qquad (۳)$$

در صورتی که $\Delta_t^i \le Th_t^{Ptt_t^{i,r}}$ باشد، از روش انتخاب چرخ رولت[۱۲] برای مدل‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری مسافر استفاده می‌شود. روش انتخاب مبتنی بر چرخ رولت، روش انتخاب احتمالی است که در آن هرچه میزان مطلوبیت یک عضو در یک مجموعه، بیشتر باشد، آنگاه احتمال انتخاب آن عضو از آن مجموعه بیشتر است. بنابراین، مسافر t برای انتخاب مسیر در روز بعد،i+۱ ، برای هر یک از مسیرهای موجود بین مبداء و مقصد سفرش ،r، مطلوبیتی را بر اساس رابطه زیر محاسبه مسیر می‌کند:

$$P_t^r = \frac{e^{-Ptt_t^{i+1,r}}}{\sum_{r=1}^{m} e^{-Ptt_t^{i+1,r}}} \qquad (٤)$$

در رابطه فوق، m، تعداد مسیرهای بین مبداء o و مقصد d است. الگوریتم ۱، به طور خلاصه، شبه کد[۱۳] روش انتخاب چرخ رولت را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲، چهارچوب نظری روش انتخاب چرخ رولت را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. طبق شکل ۲، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه، مطلوبیت مسیر j از سایر مسیرها بیشتر است بنابراین احتمال انتخاب آن مسیر نسبت به سایر مسیرها بیشتر است.

الگوریتم ۱: شبه کد روش انتخاب چرخ رولت

for *r=1 to m do:*

$$P_t^r = P_t^r + P_t^{r-1}$$

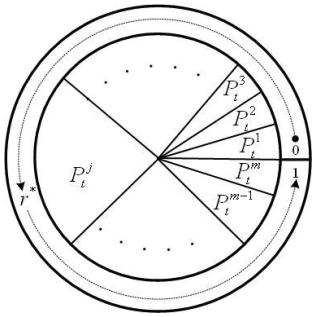
end

Generate a random number, r^* *, between 0 and 1*

Select the first route, j *, that satisfies the inequality* $r^* \ge P_t^j$

$\hat{r}(i+1,t) = j$

return *the chosen route ,* $\hat{r}(i+1,t)$



شکل ۲. روش انتخاب چرخ رولت

دلیل استفاده از روش چرخ رولت، در نظر گرفتن ناهمگنی رفتاری در جامعه مسافران است. در واقع بر اساس این روش، هر مسافر به صورت احتمالی، مسیری را بین مبدا و مقصد سفرش انتخاب می‌کند و احتمال انتخاب یک مسیر با مطلوبیت بیشتر، زیادتر است.

لازم به ذکر است که اگر $\Delta_t^i > Th_t^{ptt_t^{i,r}}$ باشد، آنگاه مسافر t الزاماً تغییر مسیر نمی‌دهد. بلکه به آرشیو تجربیات گذشته خود رجوع می‌کند و بر اساس تجربیات گذشته خود در هر یک از مسیرها، مطلوبیتی را برای آن مسیرها در نظر می‌گیرد. سپس بر اساس این مطلوبیت، انتخاب مسیر می کند. بنابراین، ممکن است دوباره مسیر روز قبلش را انتخاب کند.

در مطالعات گذشته، آستانه رضایت به صورت یک عدد قطعی در نظر گرفته شده است. بدیهی است که آستانه رضایت یک مسافر، عددی قطعی نیست؛ زیرا منطقی نیست که فاصله بین رضایت کامل از یک پیش‌بینی و عدم رضایت از یک پیش‌بینی، عدد بسیار کوچکی باشد. مثلاً فرض کنید که مسافری زمان سفر مسیری را ۲۰ دقیقه پیش‌بینی کند و آستانه رضایت این فرد برای زمان سفر پیش‌بینی شده ۲۰ دقیقه، عدد قطعی ۱۰ دقیقه باشد. حال با فرض قطعی بودن آستانه رضایت، مسافر فوق در صورتی که زمان سفر ۳۰ دقیقه را تجربه کند، آنگاه از پیش‌بینی خودش کاملاً راضی است، ولی اگر زمان سفر ۳۰ دقیقه و ۱ ثانیه را تجربه کند، آنگاه از پیش‌بینی‌اش کاملاً ناراضی است. بدیهی است که این اختلاف بسیار کم (۱ ثانیه) نمی‌تواند باعث شود که فرد کاملاً از پیش‌بینی‌اش ناراضی گردد. حال مسافر دیگری را در نظر بگیرید که می خواهد از یک مبداء به یک مقصد برود. او برای این مسیر، زمان سفری بسیار کمتر از زمان سفر واقعی مسیر پیش‌بینی می‌کند، بنابراین با کمی تاخیر به مقصد می‌رسد. اگر از این مسافر سوال شود که چقدر از قضاوت خویش در خصوص پیش‌بینی زمان سفر این مسیر راضی است؟ پاسخها ممکن است عبارت باشند از: تا حدی، کم و بیش، نسبتاً و مواردی از قبیل. پاسخ‌های فوق گواه بر آن است که آستانه رضایت، عددی فازی است. بنابراین، در این مقاله آستانه رضایت یک مسافر به صورت یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. به طوری که، اگر مسافر t زمان سفر خود را در روز i برای مسیر r، $ptt_t^{i,r}$ پیش‌بینی کند آنگاه آستانه رضایت این مسافر مطابق شکل ۳، برای زمان سفر پیش‌بینی شده فوق، عدد فازی مثلثی $Th_t^{ptt_t^{i,r}} = (th_{cr}, 0.5(th_{cr}+th_{nu}), th_{nu})$ است که در آن thr_{cr} و thr_{nu} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

• آستانه رضایت ابتدایی (thr_{cr}): کمترین اختلاف بین زمان سفر تجربه شده و زمان سفر پیش‌بینی شده که فرد به طور کامل از پیش‌بینی‌اش راضی است.

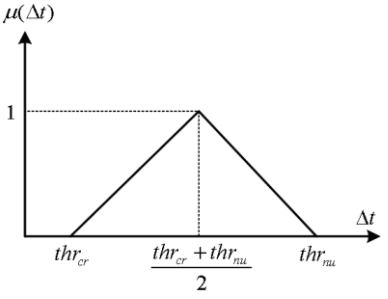
• آستانه رضایت انتهایی(thr_{nu}): کمترین اختلاف بین زمان سفر تجربه شده و زمان سفر پیش‌بینی شده که فرد به طور کامل از پیش‌بینی‌اش ناراضی می شود.

با توجه به مطالب فوق، آستانه رضایت از پیش‌بینی زمان‌سفر، بر اساس رابطه زیر مشخص می شود:

(۵)

$$\triangleq \mu_{Th_t^{ptt_t^{i,r}}}(\Delta t) = \begin{cases} \dfrac{2(\Delta t - thr_{cr})}{thr_{nu} - thr_{cr}} & thr_{cr} \le \Delta t \le \dfrac{thr_{cr}+thr_{nu}}{2} \\ \dfrac{2(\Delta t - thr_{nu})}{thr_{cr} - thr_{nu}} & \dfrac{thr_{cr}+thr_{nu}}{2} < \Delta t \le thr_{nu} \end{cases}$$

$$\Delta t = ptt_t^{i,r} - ett_t^{i,r}$$



شکل ۳. عدد فازی مثلثی آستانه رضایت

در حالت قطعی، مقایسه دو عدد قطعی Δ_t^i و $Th_t^{ptt_t^{i,r}}$ و بررسی نامساوی $\Delta_t^i \le Th_t^{ptt_t^{i,r}}$ بسیار آسان است. با توجه به اینکه آستانه رضایت به صورت یک عدد فازی در نظر گرفته شده است، بنابراین، برای مقایسه عدد قطعی Δ_t^i و عدد فازی $Th_t^{ptt_t^{i,r}}$، از مفاهیم نامساوی‌های فازی استفاده شده است. در این راستا، برای مقایسه این دو عدد، عدد فازی $Th_t^{ptt_t^{i,r}}$، غیرفازی می شود. برای غیرفازی کردن عدد فازی $Th_t^{ptt_t^{i,r}}$ از روش برش آلفا (α–cuts)

استفاده شده است.

عدد فازی $Th_t^{ptt_t^{i,r}} = (th_{cr}, 0.5(th_{cr}+th_{nu}), th_{nu})$ را در نظر بگیرید. یک برش آلفا از این عدد فازی، زیر مجموعه‌ای محدب از $\Re$ است که به صورت زیر تعریف می شود [Bojadziev and Bojadziev,2007]:

$$Th_t^{ptt_t^{i,r}}{}_{\alpha} = \left\{ \Delta t \in \Re \middle| \mu_{Th_t^{ptt_t^{i,r}}}(\Delta t) \geq \alpha, \alpha \in [0,1] \right\} \quad (٦)$$

حدود بالا و پایین مجموعه فوق به صورت زیر هستند[Bojadziev and Bojadziev,2007]:

$$\underline{m}_{\alpha} = \inf_{\Delta t \in \Re} \left\{ \Delta t \middle| \mu_{Th_t^{ptt_t^{i,r}}}(\Delta t) \geq \alpha \right\} \quad (٧)$$

$$\bar{m}_{\alpha} = \sup_{\Delta t \in \Re} \left\{ \Delta t \middle| \mu_{Th_t^{ptt_t^{i,r}}}(\Delta t) \geq \alpha \right\} \quad (٨)$$

مقدار غیرفازی شده عدد فازی آستانه رضایت، ترکیب محدب $\underline{m}_{\alpha}$ و $\bar{m}_{\alpha}$ است [Kaufmann and Gupta,1991] :

$$th_t^{ptt_t^{i,r}} = \omega \underline{m}_{\alpha} + (1-\omega)\bar{m}_{\alpha} \quad (٩)$$

در روابط فوق، α و ωمتغیرهای تصادفی بین ۰ و ۱ هستند که از توزیع یکنواخت استخراج می‌شوند. در واقع، α متغیری است که در برگیرنده عدم قطعیت‌های ذاتی فرآیند تصمیم‌گیری است و ω بیانگر ناهمگنی در رفتار مسافران است. به بیانی شیواتر، هر چه مقدار ω یک مسافر بیشتر باشد، آنگاه آن مسافر ریسک‌پذیرتر است و احتمال اینکه مسیرش را در اثر یک قضاوت نادرست تغییر دهد، افزایش می‌یابد.

۲-۳ مدل جریان ترافیک

مدل جریان ترافیک، فرآیندی است که برهم‌کنش سیستم عرضه و تقاضا را مدل‌سازی می کند و در نهایت پارامترهای عملکردی شبکه مانند زمان سفر در شبکه را تعیین می کند. در این قسمت، برای محاسبه زمان سفرهای تجربه شده هر یک از مسافران، زمان سفر هر یک از کمانها بر اساس رابطه BPR به صورت زیر تعیین می شود:

$$t = t_0 \times \left[1 + \lambda \left(\frac{v}{C} \right)^{\beta} \right] \quad (١٠)$$

در رابطه فوق، t_0 زمان سفر جریان آزاد، vحجم کمان، C ظرفیت کمان و λ و β پارامترهای ثابتی هستند که طبق توصیه مارتین و مکگوکین [Martin and McGuckin,1998]، به ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۵/۵ در نظرگرفته شده‌اند.

۳. پرداخت و بکارگیری مدل

در این بخش از مقاله، ابتدا چگونگی پرداخت عدد فازی مثلثی «آستانه رضایت» بحث می‌شود. سپس، نتایج بکارگیری مدل ارایه شده در یک شبکه کوچک نشان داده می‌شوند و در مورد خروجیهای مدل بحث می شود.

۱-۳ پرداخت تابع درجه عضویت فازی آستانه رضایت

روشهای ایجاد تابع درجه عضویت فازی را می توان به دو دسته کلی روش تک خبره و چند خبره تقسیم بندی کرد. در روش تک خبره، تنها از نظر یک خبره برای ساخت تابع درجه عضویت فازی استفاده می شود، یعنی یک و تنها یک خبره، تابع درجه عضویت فازی را ایجاد می کند؛ ولی در روش چند خبره، نظرهای چندین فرد خبره برای ساخت تابع درجه عضویت فازی در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر، در این روش سعی می شود تا از تجمیع نظرهای خبره‌ها برای ساخت تابع درجه فازی استفاده شود. همچنین از دیدگاه دیگر، روشهای ساخت تابع درجه عضویت فازی را به دو دسته روشهای مستقیم و روشهای غیر مستقیم تقسیم بندی می کنند. به طوری که در روشهای مستقیم، هر خبره تابع درجه عضویت فازی را به صورت کامل برای همه اعضای مجموعه فازی ایجاد می کند، مثلاً ممکن است که خبره، تابع درجه عضویت فازی را درقالب یک فرمول ریاضی بیان کند؛ ولی در روشهای غیر مستقیم، درجه عضویت برخی از نقاط تابع درجه عضویت فازی توسط خبره تعیین می شود. به طور مثال، افراد خبره در برخی ازمطالعات فازی، هیچ گونه آشنایی با مباحث فازی و حتی ریاضی ندارند، در این مواقع، پژوهشگران سعی می کنند به گونه‌ای، درجه عضویت بعضی از اعضای مجموعه فازی را از افراد خبره بپرسند و در نهایت با استفاده از برخی روشهای ریاضی، تابع درجه عضویت فازی را ایجاد کنند[Klir and Yuan,1995].

در این مقاله با توجه به اینکه افراد خبره، افراد عادی هستند و آشنایی با مباحث فازی ندارند، بنابراین از روشهای غیرمستقیم برای ساخت تابع درجه عضویت آستانه رضایت استفاده شده است. در این راستا، برای ساخت عدد فازی مثلثی آستانه رضایت، از ۱۰۰ نفر از دانشجویان مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران خواسته شده است که مسیری را به ترتیب با حداقل و حداکثر زمان ۱۰ و ۷۰ دقیقه فرض کنند. سپس از آنها درخواست‌شده که میزان آستانه‌های رضایت ابتدایی و انتهایی خود را برای ۸ زمان سفر پیش بینی شده ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰،۵۰ و۶۰ دقیقه بیان کنند. در نهایت با محاسبه میانگین نتایج به دست آمده از این آمارگیری، آستانه‌های رضایت ابتدایی و انتهایی برای هر یک از ۸ زمان سفر فوق محاسبه شده است. شکل ٤، اعداد فازی مثلثی آستانه رضایت را برای ۸ زمان سفر پیش‌بینی شده فوق را نشان می‌دهد.

لازم به یادآوری است که برای تعیین آستانه‌های رضایت ابتدایی و انتهایی زمان سفرهای پیش‌بینی شده غیر از ۸ عدد فوق، از درونیابی آستانه‌های رضایت ابتدایی و انتهایی زمان سفرهای پیش‌بینی شده مجاور استفاده می‌شود. برای مثال، اگر آستانه رضایت ابتدایی زمان سفر پیش‌بینی شده ۲۰ دقیقه، ۵ دقیقه باشد و آستانه رضایت ابتدایی زمان سفر ۳۰ دقیقه، ۱۰ دقیقه باشد، آنگاه آستانه رضایت ابتدایی زمان سفر پیش‌بینی شده ۲۵ دقیقه، برابر با ۲/(۵+۱۰) است.

۳-۲ بکارگیری مدل ارایه شده در یک شبکه کوچک

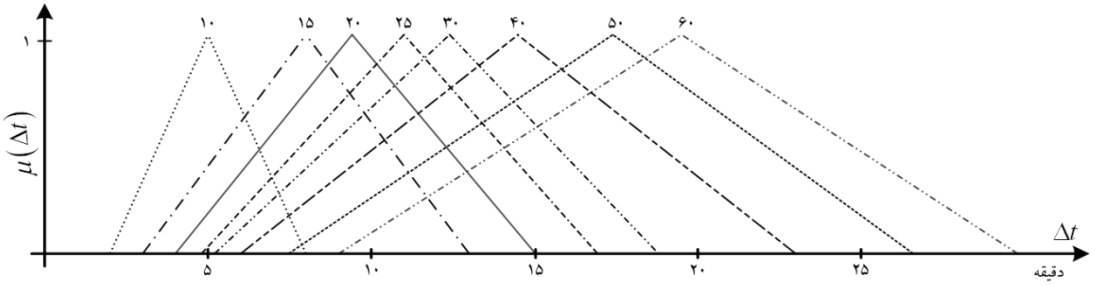
در این بخش، به منظور بررسی روزبه‌روز برهمکنش سیستم عرضه و تقاضا، از مدل ارایه شده برای شبیه سازی فرآیند انتخاب مسیر مسافران در یک شبکه فرضی کوچک استفاده شده است. شبکه بکارگرفته شده در این مقاله در مطالعات چن و مهمسنی [Chen and Mahmassani,2004] و هِی و همکاران [He et al.,2010] نیز بکارگرفته شده است. این شبکه دارای ۹ گره، ۱۲ کمان و ٦ مسیر است که مبداء ۱ را به مقصد ۹ وصل می‌کند. تقاضای سفر بین مبداء ۱ و مقصد ۹، ۲۰۰۰ واحد است. همچنین، ظرفیت هر کمان برابر با ۱۰۰۰ و زمان سفر جریان آزاد هر یک از کمانها برابر با ۷ دقیقه در نظر گرفته شده است (شکل ۵).

طبق مطالعه آزمایشگاهی سِلتن و همکاران [Selten et al.,2007]، نرخ تغییر مسیر مسافران با گذشت زمان کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، هر مسافر پس از چندین سفر بین یک مبداء و مقصد، به یک مسیر خاص تمایل پیدا می‌کند و آن مسیر را در روزهای بعدی انتخاب می‌کند، مگر اینکه، شوکهای سیستم عرضه یا تقاضا باعث شود که مسافر، مسیر دیگری را انتخاب کند. در واقع، با گذشت زمان، ثبات در انتخاب مسیر مسافران افزایش می‌یابد. در این مقاله برای تعیین میزان ثبات در انتخاب مسیر در یک شبکه در روز i، شاخصی به نام «شاخص ثبات» در انتخاب مسیر برای روزi ام تعریف شده است که به صورت زیر است:

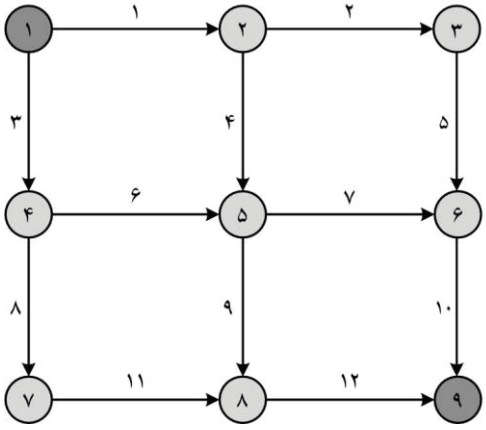
$$S_i = \frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{N^k}\xi_i^t}{\sum_{k=1}^{K}N^k} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق، ξ_i^t متغیری باینری است که اگر مسافر t مسیرش را در روز i تغییر دهد مقدار ۰ و در غیر این صورت مقدارش ۱ است؛ به عبارت دیگر:

$$\begin{cases}\xi_i^t = 1 & \hat{r}(i-1,t) = \hat{r}(i,t)\\ \xi_i^t = 0 & otherwise\end{cases} \qquad (۱۲)$$



شکل ٤. اعداد فازی مثلثی آستانه رضایت را برای ۸ زمان سفر پیش‌بینی‌شده



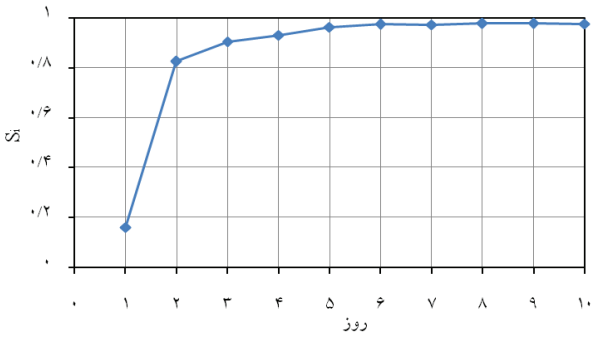
معابر تشکیل دهنده مسیرها

شماره مسیر	شماره معابر
۱	۱→۲→۵→۱۰
۲	۳→۸→۱۱→۱۲
۳	۱→۴→۹→۱۲
۴	۱→۴→۷→۱۰
۵	۳→۶→۷→۱۰
۶	۳→۶→۹→۱۲

شکل ۵. مشخصات شبکه فرضی کوچک

بر اساس روابط ۱۱ و ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که اگر همه مسافران در یک شبکه مسیرهایشان را در روز i تغییر دهند، آنگاه S_i برابر با ۰ و اگر همه مسافران همان مسیرهای روز قبل خود را انتخاب کنند آنگاه S_i برابر با ۱ است.

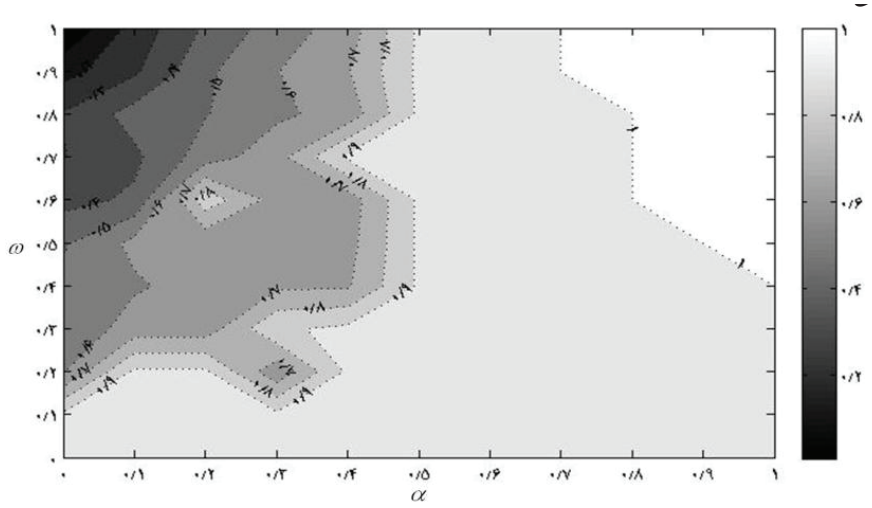
شکل ٦، مقدار شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران را در روزهای مختلف در شبکه فوق بر اساس مدل انتخاب مسیر ارایه شده، نشان می‌دهد. طبق این شکل، نرخ تغییر مسیر مسافران با گذشت زمان کاهش می‌یابد. به طوری که میزان ثبات در انتخاب مسیر در روزهای ٦ به بعد، بیشتر از ۰/۹۷ است.



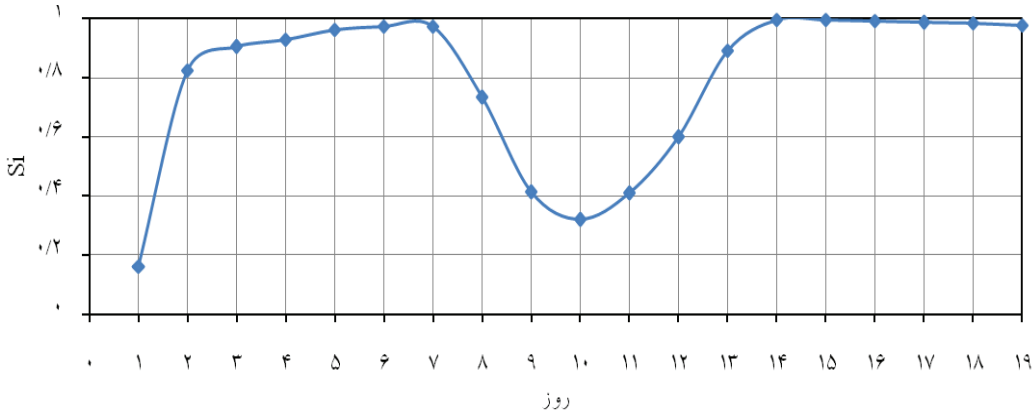
شکل ٦. میزان شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران در روزهای مختلف

شکل ۷، خطوط همتراز منحنی مقدار میانگین شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران به ازای α و ω های مختلف در شبکه فوق و بر اساس مدل انتخاب مسیر ارایه شده را نمایش می‌دهد. طبق شکل ۷، در یک ثابت، هر چه مقدار یک مسافر بیشتر باشد، آنگاه، میانگین شاخص ثبات در انتخاب مسیر آن مسافر کمتر است. در واقع، هر چه یک مسافر بیشتر باشد آنگاه، آن مسافر ریسک‌پذیرتر است و احتمال اینکه مسیرش را در اثر یک قضاوت نادست تغییر دهد، افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان ثبات در انتخاب مسیر آن مسافر کاهش می‌یابد.

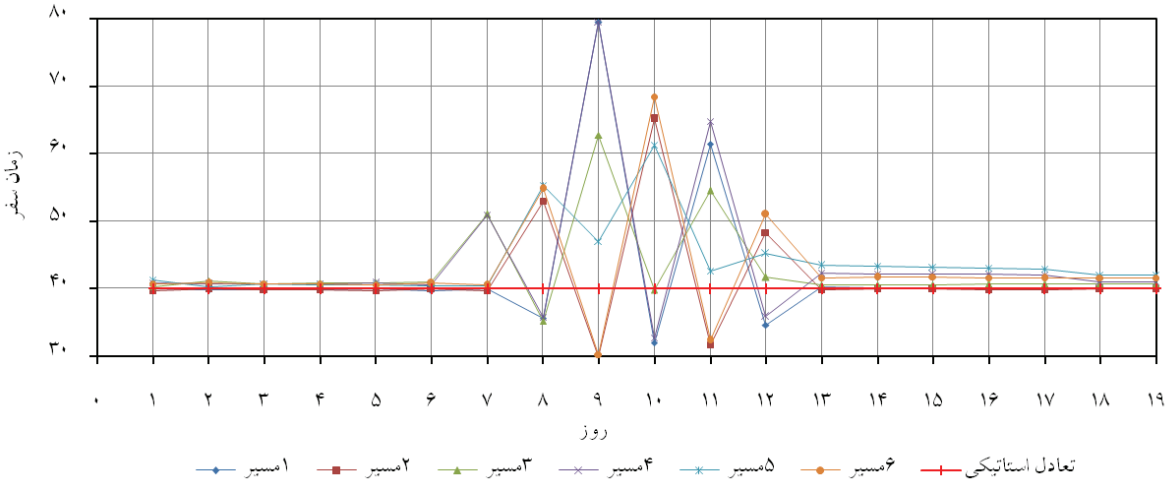
به منظور بررسی توانایی مدل ارایه شده در بررسی آثار کوتاه مدت شوکهای حادث شده در سیستم عرضه حمل و نقل، حالتی را در نظر بگیرید که در روز هفتم یک تصادف در کمان ٤ رخ دهد و این تصادف باعث شود که تاخیری برابر با ۱۰ دقیقه به هر یک از مسافرانی که این کمان را انتخاب کرده‌اند، وارد شود. شکل ۸، میزان شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران را در روزهای مختلف در شبکه فوق را نشان می‌دهد. طبق این شکل، برخی از مسافران پس از برخورد با شوک در روز هفتم، مسیر خود را تغییر می‌دهند و شبکه ثبات خود را از دست می‌دهند، ولی پس از گذشت چند روز، شبکه به ثبات اولیه خود می‌رسد و نرخ تغییر مسیر مسافران کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۹، چگونگی تغییر زمان سفر هر یک از مسیرها را قبل و پس از شوک نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۹، زمان سفر هر یک از مسیرها حدود زمان سفر تعادل استاتیکی است، ولی به محض اینکه شوکی در کمان ٤ در روز هفتم رخ داد، این شوک باعث می‌شود که مسافران تغییر مسیر دهند و شبکه از حالت تعادل خارج شود. سپس در روزهای بعد، زمان سفر مسیرها در حال نوسان است و در نهایت، پس از چند روز، شبکه دوباره به حالت تعادل اولیه خود بر می شود.



شکل ۷. مقدار میانگین شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران به ازای و های مختلف



شکل ۸. میزان شاخص ثبات در انتخاب مسیر مسافران در روزهای مختلف



شکل ۹. زمان سفر هر یک از مسیرها

٤. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل انتخاب مسیر روزبه‌روزی برای سفرهای هر روزه کاری ارایه شده است که از آن می‌توان برای بررسی تغییرات روزبه‌روز جریان ترافیکی در سطح شبکه حمل‌ونقل استفاده کرد و چگونگی تغییر جریان ترافیکی در کمانهای شبکه را در هنگام وقوع شوکهای عرضه و تقاضا در روزهای بعد از بروز شوک پیش‌بینی کرد و در نتیجه، تصمیمات کارشناسی لازم را در صورت بروز هر گونه مساله غیر عادی اتخاذ کرد. علاوه بر این، مدل ارایه شده در یک شبکه فرضی کوچک بکارگرفته شده و چگونگی تغییر مسیر رانندگان در سناریوهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

با توجه به اینکه، مدل سازی واقع گرایانه‌تر فرآیند انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان با نگاهی ریزنگر به جزئیات رفتاری این فرآیند، نقش مهمی را در اعتبار نتایج این مدل ایفا می کند. بنابراین، این مطالعه، رویکردی ریزنگرتر نسبت به مطالعات پیشین به فرآیند تصمیم‌گیری رانندگان داشته‌است و به این منظور، از قابلیت‌های تئوری مجموعه‌های فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت های ذاتی فرآیند تصمیم گیری و ناهمگنی در ادراک رانندگان بهره برده است.

نتایج مدل ارایه شده نشان می‌دهد که شوکهای حادث شده در سیستم عرضه و تقاضا بر تعادل شبکه اثر می‌گذارند و باعث می‌شوند که رانندگان ادراک کاملاً صحیحی از شرایط شبکه نداشته باشند و در نتیجه، جریان ترافیکی در شبکه حمل‌ونقل همواره برابر با جریان تعادلی نباشد. همچنین طبق نتایج این مطالعه، میزان شاخص ثبات در انتخاب مسیر رانندگان، با افزایش عدم قطعیت در شبکه کاهش می‌یابد که این میزان، بستگی به ریسک‌پذیری رانندگان دارد.

در راستای تکمیل پژوهش فوق، چندین افق تحقیقاتی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- ارایه مدلی ریزنگرتر و جامع‌تر که در برگیرنده مدلهای زمان ترک منزل[14]، انتخاب سبک سفر[15] و مدلهای تراکم[16] باشد.

۲- بکارگیری مدل ارایه شده در یک شبکه واقعی

۳- ارایه مدلی که تاثیرات سیستم‌های اطلاع‌رسان به مسافر را بر چگونگی انتخاب مسیر روزبه‌روز رانندگان در نظر بگیرد.

پی‌نوشتها:

1. Discrete Choice
2. Fuzzy Reasoning
3. Multi Criteria Decision Making
4. Game Theory
5. Artificial Neural Networks
6. Day-to-Day Route Choice Models
7. Disaggregate
8. Probability Theory
9. Fuzzy Set Theory
10. Triangular Fuzzy Number
11. Membership Function
12. Roulette Wheel Selection
13. Pseudo Code
14. Departure Time Choice Models
15. Mode choice Models
16. Congestion Models

منابع

Arslan, T. and Khisty, C. J. (2005) "A rational reasoning method from fuzzy perceptions in route choice", Fuzzy Sets and Systems. Vol. 150, No. 3, pp. 419-435.

Arslan, T. and Khisty, J. (2006) "A rational approach to handling fuzzy perceptions in route choice", European Journal of Operational Research.Vol. 168, No. 2, pp. 571-583.

Bell, M. G. H. (2000) "A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks", Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 34, No. 6, pp. 533-545.

Bell, M. G. H. and Cassir, C. (2002) "Risk-adverse user equilibrium traffic assignment: an application of game theory", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 36, No. 8, pp. 671-681.

Bogers, E., Lint, H. Van and Zuylen, H. Van (2008) "Reliability of travel time: Effective measures from a behavioral point of view", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research

to fuzzy arithmetic: Theory and applications. ": Van Nortland Reinhold, New York.

Klir, G. and Yuan, B. (1995) "Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications": Prentice Hall PTR Upper Saddle River, USA.

Liu, H.X (2003) "Formulation and solution algorithm for fuzzy dynamic traffic assignment model", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1854, No. -1, pp. 114-123.

Lotan, T. and Koutsopoulos, H. (1993) "Models for route choice behavior in the presence of information using concepts from fuzzy set theory and approximate reasoning", Transportation, Vol. 20, No. 2, pp. 129-155.

Martin, B. and Manheim , M.(1965) "A research program for comparison of traffic assignment techniques", Highway Research Record, Vol. 88, No. pp. 69–84.

Martin, W.A. and McGuckin, N. A. (1998) "Travel estimation techniques for urban planning": Transportation Research Board, USA.

Nakayama, S., Kitamura, R. and Fujii, S. (1999) "Drivers' learning and network behavior: dynamic analysis of the driver-network system as a complex system", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1676, No. -1, pp. 30-36.

Prashker, J. and Bekhor, S. (2004) "Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review", Transport Reviews, Vol. 24, No. 4, pp. 437-463.

Selten, R (2007) "Commuters route choice behaviour", J. Games and Economic Behavior, Vol. 58, No. 2, pp. 394-406.

Sundaram, S., Kontsopoulos, H. K., Ben Akiva, M., Antouniou, C. and Balakrishna, R. (2010) "Simulation-based dynamic traffic assignment for short-term planning applications", simulation modelling Practice and Theory, Vol. 19, January 2011, pp. 450-462.

Board, Vol. 2082, No. -1, pp. 27-34.

Bojadziev, G. and Bojadziev, M. (2007) "Fuzzy logic for business, finance, and management": World Scientific, USA.

Chen, R. and Mahmassani , H. (2004) "Travel time perception and learning mechanisms in traffic networks", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1894, No. -1, pp. 209-221.

De Palma, A., Marchal, F. and Nesterov, Y. (1997) "Metropolis: Modular system for dynamic traffic simulation", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1607, No. -1, pp. 178-184.

Fukushima, M. (1984) "A modified Frank-Wolfe algorithm for solving the traffic assignment problem", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 18, No. 2, pp. 169-177.

Gao, S., Frejinger, E. and Ben-Akiva, M. (2010) "Adaptive route choices in risky traffic networks: A prospect theory approach", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 18, No. 5, pp. 727-740.

Hawas, Y. (2004) "Development and calibration of route choice utility models: neuro-fuzzy approach", Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 2, pp. 171-182.

He, X., Guo, X. and Liu, H. (2010) "A link-based day-to-day traffic assignment model", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 44, No. pp. 597–608.

Henn, V. (2000) "Fuzzy route choice model for traffic assignment", Fuzzy sets and systems, Vol. 116, No. 1, pp. 77-101.

Iida, Y., Akiyama, T. and Uchida, T. (1992) "Experimental analysis of dynamic route choice behavior", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 26, No. 1, pp. 17-32.

Kaufmann, A. and Gupta, M. (1991) "Introduction

Tawfik, A., Rakha, H. and Miller , S. (2010) "Driver route choice behavior: Experiences, perceptions, and choices". in Intelligent Vehicles Symposium.

Teodorovic , D., Vukanovi, S. and K. Obradovi, K. (1998) "Modeling route choice with advanced traveler information by fuzzy logic", Transportation Planning and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 1-25.

Wardrop, J. (1953) "Some theoretical aspects of road traffic research", Operational Research Society, Vol. 4, No. 4, pp. 72-73.