

قیمت‌گذاری پویا با در نظر گرفتن تغییرات ظرفیت و سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاعاتی مسافر در شبکه‌های شهری

مهرداد غلامی شه‌بندی (دکتری)

عباس بابازاده* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۲، ص. ۱۰۵-۹۵

وقوع تصادفات در شبکه‌های شهری موجب کاهش ظرفیت و افزایش زمان تأخیر در معابر می‌شود. سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاعاتی مسافر (ATIS)، این امکان را فراهم می‌آورند که رانندگان قبل از رسیدن به محل تصادف از وقوع آن مطلع شوند و با کاهش عدم قطعیت درباره‌ی ظرفیت معابر مسیرهای بهتری را برای رسیدن به مقصد خود انتخاب کنند. قیمت‌گذاری شلوغی به عنوان یک سیاست کنترل ترافیک در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنظیم صحیح این سیاست مستلزم در نظرگیری تغییرات جریان در شبکه (تحلیل پویا) بوده و عملکرد آن در شرایط عدم قطعیت متأثر از میزان دسترسی رانندگان به اطلاعات است. در این مقاله، ضمن معرفی یک مدل تخصیص ترافیک پویا با قابلیت در نظرگیری عوارض تردد، یک مدل قیمت‌گذاری پویای شلوغی به همراه الگوریتم حل آن ارائه می‌شود. مسئله برای شبکه‌ی شهر سوفالز حل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در شرایط وجود عدم قطعیت زیاد، اطلاع‌رسانی اولویت بیشتری نسبت به سیاست قیمت‌گذاری دارد. همچنین تحلیل حساسیت‌هایی نیز روی پارامترهای عدم قطعیت و شدت تصادف انجام می‌شود.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی ترافیکی، قیمت‌گذاری پویا، تصادفات ترافیکی، سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاعاتی مسافر.

m.gholami.sh@ut.ac.ir
ababazadeh@ut.ac.ir

۱. مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و افزایش نرخ مالکیت وسیله‌ی نقلیه شخصی در شهرها سبب ایجاد شلوغی در معابر شهری شده است. این موضوع سبب افزایش زمان تأخیر و زمان سفر و در نهایت سبب کاهش کیفیت زندگی شهرنشینی می‌شود. به همین دلیل، کنترل ترافیک با هدف کاهش شلوغی یکی از اهداف اصلی در مدیریت حمل‌ونقل شهری است. افزایش ظرفیت شبکه از طریق تعریض معابر و ساخت معابر جدید، علاوه بر هزینه‌های هنگفت و مشکلات اجرا، سبب افزایش تقاضای سواری شخصی می‌شود و مشکل را تشدید می‌کند.^[۱] قیمت‌گذاری شلوغی^۱، سیاستی نوین در کنترل ترافیک است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. اولین بار پیگو (۱۹۲۰) و نایت (۱۹۲۴) روش‌های قیمت‌گذاری شلوغی را بررسی کردند.^{[۲][۳]} ایده‌ی اصلی در این سیاست دریافت عوارض تردد در معابر شبکه متناسب با میزان شلوغی آنهاست، به طوری که جریان ترافیک در جهت کاهش هزینه‌ی کل سیستم به شیوه‌ی متوازن‌تری توزیع شود. اعمال عوارض برای تمام کمان‌های شبکه به دلیل

مقاومت‌های اجتماعی عموماً ممکن نیست. در سوی مقابل اعمال عوارض تردد در زیرمجموعه‌ی کمان‌های شبکه که اصطلاحاً به دومین - بهترین^۲ معروف است، از مقبولیت بیشتری برخوردار است. مسئله‌ی دومین - بهترین توسط محققانی نظیر مرچند (۱۹۸۶) و رهوف (۲۰۰۲)، اکستروم و همکاران (۲۰۰۹) و شیرد و سومالی (۲۰۰۴) مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۴-۷] مطالعات پیشین نشان داده است که طرح و ارزیابی سیاست‌های مدیریت جریان ترافیک مستلزم در نظرگیری تغییرات نرخ جریان در بازه‌های زمانی مختلف بوده است؛ بنابراین تحلیل پویای شبکه اصلی ضروری در طرح این سیاست‌ها شناخته می‌شود.^[۸-۱۱] پژوهشگران متعددی نظیر، ابودینا (۲۰۱۶)، لیو و همکاران (۲۰۱۷) و چنگ و همکاران (۲۰۱۹) سیاست نوین قیمت‌گذاری شلوغی مسافت مینا را بررسی و مدل‌هایی ریاضی برای حل مسئله ارائه کرده‌اند.^[۱۱-۱۳] اولین بار ویکری (۱۹۷۱) سیاست قیمت‌گذاری شلوغی را در شرایط پویا در یک کمان که یک مبدأ - مقصد را به هم متصل می‌کند بررسی کرد.^[۱۴] پژوهشگرانی نظیر ون و آگلس (۲۰۱۶)، چنگ و همکاران (۲۰۱۸) و چنگ و همکاران (۲۰۱۹) جنبه‌های مختلفی از قیمت‌گذاری پویا در شبکه را بررسی کرده‌اند.^[۱۵-۱۷]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۵/۲۲، پذیرش ۱۳۹۹/۶/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2020.55762.2776

اطلاعات مسافران از شرایط شبکه‌ی معابر در عمل با عدم قطعیت‌هایی همراه است. وجود عدم قطعیت در اطلاعات مسافران از ظرفیت معابر از جمله این نوع عدم قطعیت‌هاست که یکی از عوامل اصلی آن احتمال وقوع تصادفات ترافیکی در شبکه است. در چند دهه‌ی اخیر، با پیشرفت فناوری، امکان به‌کارگیری سیستم‌های ارتباطی در سیستم‌های حمل‌ونقل به وجود آمده است. سیستم‌های پیشرفته‌ی اطلاعاتی مسافر (ATIS) ^۳ از جمله سامانه‌هایی است که با پیشرفت فناوری، در سیستم‌های حمل‌ونقل به‌کارگرفته می‌شود. این سیستم با کاهش عدم قطعیت رانندگان نسبت به وضعیت شبکه، امکان انتخاب مسیر بهتر را برایشان فراهم می‌سازد. ^[۱] محققانی نظیر یانگ (۱۹۹۹) و هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) کارایی ATIS در شبکه‌های ترافیکی را در شرایط وجود عدم قطعیت‌ها ارزیابی کرده‌اند. ^[۱۸ و ۱۹] این سامانه در شرایطی که تغییرات غیرتکراری ظرفیت در شبکه وجود داشته باشد، تأثیرات مثبتی به همراه دارد.

با توجه به وجود عدم قطعیت در شرایط سیستم حمل‌ونقل (تقاضا و ظرفیت) مطالعات متعددی در خصوص در نظرگیری این موضوع در مسئله‌ی قیمت‌گذاری انجام شده است. بانسال و همکاران (۲۰۱۸) موضوع عدم قطعیت در تقاضای متغیر را برای قیمت‌گذاری اولین بهترین بررسی کرده و مدلی برای حل مسئله قیمت‌گذاری ارائه کرده‌اند. ^[۲۰] ژنگ و همکاران (۲۰۱۷) با در نظرگیری عدم قطعیت در تقاضا، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی در قالب ساختاری دوسطحی با هدف کاهش شلوغی و افزایش ایمنی ارائه دادند و مسئله را برای یک شبکه‌ی کوچک فرضی حل کردند. ^[۲۱] لو و همکاران (۲۰۱۹) مدلی برای قیمت‌گذاری شلوغی با هدف کاهش آلایندگی هوا ارائه کردند و در آن عدم قطعیت‌های موجود در انتشار آلایندگی را به کمک برنامه‌ریزی تصادفی فازی در نظر گرفتند. آنها مسئله را برای بخشی از شبکه‌ی شهر بیژینگ در چین حل و بیان کردند که به کارگیری مدل پیشنهادی سبب کاهش آلایندگی هوا می‌شود. ^[۲۲] ژو و همکاران (۲۰۱۷) با تمرکز بر قابلیت اطمینان زمان سفر در طرح سیاست قیمت‌گذاری، عدم قطعیت آن را به واسطه شرایط متغیر شبکه و تناسب بین تقاضا و ظرفیت بررسی کردند. آنها مسئله‌ی قیمت‌گذاری پویا را با فرض ناهمگنی استفاده‌کنندگان در ارزش زمان سفر تحلیل کردند. ^[۲۳] چانگ و همکاران (۲۰۱۲) مسئله قیمت‌گذاری پویا را با در نظرگیری عدم قطعیت تقاضا به صورت مجموعه‌های عدم قطعیت ^۴ بررسی کردند و یک مدل دوسطحی ارائه دادند که در آن، سطح بالاسعی در کمینه کردن کل هزینه‌ی اجتماعی دارد و سطح پایین تخصیص ترافیک را انجام می‌دهد. آنها با به‌کارگیری الگوریتم فرایبنده‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات سلولولی ^۵ مسئله را در شبکه‌ی کوچک مقیاس حل می‌کنند. ^[۲۴]

برای در نظرگیری عدم قطعیت در ظرفیت شبکه در حل مسئله قیمت‌گذاری، به کارگیری سیستم ATIS اهمیت پیدا می‌کند. ATIS با ارائه‌ی اطلاعات دقیق از وضعیت شبکه به رانندگان باعث شکل‌گیری توزیع جریان براساس تعادل استفاده‌کننده می‌شود. سیاست قیمت‌گذاری نیز با تغییر ساختار عرضه تعادل جدید را ایجاد می‌کند که در آن توزیع جریان در جهت کاهش هزینه‌ی کلی سیستم تغییر پیدا می‌کند. به کارگیری هم‌زمان سیاست قیمت‌گذاری شلوغی و سیستم اطلاعات مسافر می‌تواند به عنوان یک راه‌کار مدیریت شبکه در شرایط عدم قطعیت ظرفیت مدنظر قرار گیرد. یانگ (۱۹۹۹) برای اولین بار ترکیب ATIS و قیمت‌گذاری را در مقیاس یک شبکه بررسی کرد و عدم قطعیت مربوط به رفتار استفاده‌کنندگان را در نظر گرفت. ^[۱۸] او فرض کرد که استفاده‌کنندگان از ATIS طبق اصل تعادل استفاده‌کننده قطعی و سایر استفاده‌کنندگان طبق اصل تعادل استفاده‌کننده تصادفی، انتخاب مسیر می‌کنند. سپس برای تعیین عوارض بهینه طبق اصل هزینه‌ی حاشیه‌ی، یک مدل

تخصیص ترافیک تعادلی ترکیبی ^۶ ارائه کرد و از روش میانگین‌گیری متوالی ^۷ برای حل آن بهره جست. فرناندز و همکاران (۲۰۰۹) شبکه‌ی ترافیکی را در فضایی تصادفی تعریف کردند. بدین ترتیب ظرفیت شبکه بر اساس روابط احتمالی در هر روز مشخص می‌شود. آنها شرایط مختلفی از به‌کارگیری هر دو سیاست را مد نظر قرار دادند که در آن بسته به دسترسی رانندگان به ATIS و همچنین امکان اعمال عوارض تردد برای هر روز مشخص، سناریوهای مختلفی از مدیریت شبکه ایجاد می‌شود. آنها ضمن ارائه‌ی مدل ریاضی و روش حل برای هر کدام از حالات پیش آمده، مسئله را برای یک شبکه‌ی آزمایشی حل کردند. ^[۲۵] گاردنر و همکاران (۲۰۱۱) پژوهش مشابهی را انجام دادند. ^[۲۶] در این مطالعات به عوارضی که به صورت روزانه قابل تنظیم باشد، اصطلاحاً عوارض واکنشی ^۸ نیز گفته می‌شود که در آن می‌توان به تغییرات ظرفیت در شبکه به صورت هوشمند واکنش نشان داد. ژنگ و همکاران (۲۰۱۵) مسئله‌ی قیمت‌گذاری شلوغی را با به‌کارگیری ATIS مدل‌سازی کردند و استفاده‌کنندگان را به دو دسته براساس دسترسی آنها به اطلاعات شبکه تقسیم‌بندی می‌کنند. ضمن حل مدل پیشنهادی در شبکه‌ی فرضی، تحلیلی از میزان درصد تجهیز استفاده‌کنندگان به ATIS ارائه می‌دهند. ^[۲۷] تمام مطالعات مورد اشاره، قیمت‌گذاری و تحلیل شبکه را (در صورت در نظرگیری عدم قطعیت) به صورت استاتیک در نظر می‌گیرند. تاکنون به کارگیری سیاست قیمت‌گذاری پویا به صورت هم‌زمان با ATIS برای در نظرگیری عدم قطعیت در ظرفیت بررسی نشده است. هدف مقاله‌ی حاضر آن است تا ضمن ارائه‌ی یک مدل تخصیص ترافیک پویا با قابلیت در نظرگیری عوارض تردد در شبکه، یک مدل قیمت‌گذاری پویای شلوغی ارائه کند و سناریوهای مختلفی از ترکیب دو سیاست قیمت‌گذاری و اطلاع‌رسانی را ارائه و تحلیل کند. بدین منظور، مسئله برای شبکه‌ی شهر سوفالز حل شده و نتایج تحلیل شده‌اند. همچنین تحلیل حساسیتی روی دو عامل احتمال وقوع تصادفات شدت تصادفات انجام می‌شود.

۲. مدل تخصیص ترافیک پویا

به منظور ارائه‌ی مدل قیمت‌گذاری پویا، به یک مدل تخصیص ترافیک پویا به عنوان ابزار ارزیابی طرح‌های قیمت‌گذاری نیاز است. در مقاله‌ی حاضر، یک مدل تحلیلی تخصیص ترافیک پویا مبتنی بر مسیر با توسعه‌ی مدل جوانی (۱۳۹۷) برای در نظرگیری عوارض تردد در شبکه پیشنهاد می‌شود. ^[۲۸] فرض کنید که گراف $G=(N,A)$ یک شبکه‌ی حمل‌ونقل را نشان می‌دهد که در آن N مجموعه‌ی گره‌ها و A مجموعه‌ی کمان‌های شبکه هستند. همچنین فرض کنید A' مجموعه‌ی کمان‌های ورودی به کمربندی قیمت‌گذاری باشد. $A_p \subseteq A$ را به عنوان مجموعه‌ی کمان‌ها و $N_p \subseteq N$ را به عنوان مجموعه‌ی گره‌های واقع بر مسیر p در نظر بگیرید. هر کمان $a \in A$ را متناظر با یک جفت (n,m) از گره‌ها فرض کنید که n گره ابتدا و m گره انتهایی کمان هستند. همچنین $r(p)$ گره مبدأ مسیر p و $A_{pm} \subseteq A_p$ مجموعه‌ی کمان‌های واقع بر مسیر p از گره $r(p)$ تا گره $n \in N_p$ را نشان می‌دهند. با فرض آن که نرخ تقاضای پویای هر زوج مبدأ - مقصد i و هر بازه‌ی زمانی عزیمت d مشخص باشد، مسئله‌ی تخصیص پویا با عوارض تردد به صورت زیر قابل ارائه است (تعریف پارامترها و متغیرهای مدل در جدول ۱ ارائه شده است). رابطه‌ی ۱ تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که از دو بخش تشکیل شده است: بخش سمت چپ که توسعه‌ی تابع هدف بکمن برای شرایط پویاست و بخش سمت راست که کل میزان عوارض دریافتی در ورودی‌های کمربندی را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۲ شرط بقای

جدول ۱. تعریف متغیرهای به کار رفته در مدل DTTA.

پارامتر/متغیر	تعریف
x_a^t	جریان کمان a در بازه‌ی زمانی t
$f_a^t(x_a^t) : [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$	تابع زمان سفر کمان a در بازه‌ی زمانی t که غیر نزولی و پیوسته و مشتق‌پذیر است و تابعی از جریان کمان a در بازه‌ی زمانی است.
ϕ	ارزش زمان سفر (VOT)
D	مجموعه‌ی همه‌ی بازه‌های زمانی
$D' \subseteq D$	مجموعه‌ی بازه‌های زمانی اعمال عوارض
I	مجموعه‌ی زوج‌های مبدأ - مقصد
P_i	مجموعه‌ی مسیرهای بین زوج مبدأ - مقصد $i \in I$
q_i^d	نرخ تقاضای زوج مبدأ - مقصد i که در بازه‌ی عزیمت $d \in D$ شروع به حرکت می‌کند.
h_p^d	جریان مسیر p که در بازه‌ی عزیمت $d \in D$ شروع به حرکت کرده است
$\beta_{pa}^{dt} \in [0, 1]$	متغیر کسر جریان مسیر؛ که نسبتی از جریان مسیر p است در بازه‌ی d شروع به حرکت کرده است و در بازه‌ی زمانی t از کمان a استفاده می‌کند.
α_{pa}^{dt}	متغیر وقوع کمان - مسیر؛ که برابر است با یک اگر جریان مسیر p که در بازه‌ی d شروع به حرکت کرده است، در بازه‌ی زمانی t برای اولین بار به کمان a می‌رسد، وگرنه برابر با صفر خواهد بود.
Δt	طول بازه‌های زمانی
T_{pn}^d	زمان سفر مسیر p تا رسیدن به گره $n \in N_p$ که در بازه‌ی عزیمت d شروع به حرکت کرده است
μ^t	مقدار عوارض ورودی به کمربندی قیمت‌گذاری در بازه‌ی زمانی t.

جریان و رابطه‌ی ۳ نیز نامنفی بودن جریان را برای تضمین امکان‌پذیر بودن جواب بیان می‌کنند. رابطه‌ی ۴ رابطه‌ی میان جریان‌های پویای مسیر و کمان را با استفاده از متغیر کسر جریان مسیر، β_{pa}^{dt} ، نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۵، زمان سفر رسیدن جریان مسیر p با زمان عزیمت d به گره $n \in N_p$ را نشان می‌دهد که مجموع زمان سفر در کمان‌های واقع بر مسیر در بازه‌های زمانی که جریان به گره انتهایی آنها رسیده باشد، ضرب در متغیرهای کسر جریان مسیر است. در واقع زمان سفر مسیر برابر است با میانگین وزنی زمان سفر کمان‌های روی آن مسیر در بازه‌های زمانی که جریان از این کمان‌ها عبور می‌کند. متغیرهای کسر جریان مسیر به عنوان این وزن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. رابطه‌ی ۶ بیان می‌کند که متغیر وقوع کمان - مسیر عدد صحیح یک یا صفر است. بر اساس رابطه‌ی ۷ نیز جریان مسیر p با بازه‌ی عزیمت d تنها می‌تواند در یک بازه‌ی زمانی به کمان‌های واقع بر آن مسیر برسد. روابط ۸ و ۹ پیوستگی

زمانی جریان مسیرها را نشان می‌دهند که بر اساس آنها، زمان رسیدن جریان به هر کمان واقع بر مسیر با زمان رسیدن به گره انتهایی آن کمان سازگار است.

[DTTA]

$$\min Z_{\delta}(x(h)) = \sum_{a \in A} \sum_{t \in D} \int_0^{x_a^t} f_a^t(\omega) d\omega + \sum_{a \in A'} \sum_{t \in D'} x_a^t \cdot \frac{\mu^t}{\phi} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{p \in P_i} h_p^d = q_i^d \quad \forall i \in I, d \in D \quad (2)$$

$$h_p^d \geq 0 \quad \forall p \in P_i, i \in I, d \in D \quad (3)$$

بخشی از تقاضا از این شیوه به شیوه‌ی حمل‌ونقل همگانی شود. در این مقاله با فرض ثابت بودن تقاضا، از این مزیت سیاست قیمت‌گذاری چشم‌پوشی شده است.

۳. مدل قیمت‌گذاری پویای کمربندی

مسئله‌ی قیمت‌گذاری شلوغی حالت خاصی از مسئله‌ی طراحی شبکه است که متغیر تصمیم در آن، تغییر هزینه‌ی سفر در کمان‌های شبکه است. این مسئله عموماً به صورت یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی یا برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های تعادل تعریف شده است. تابع هدف این مسئله عموماً کمیته‌سازی کل زمان سفر شبکه (در شرایط تقاضای ثابت) یا بیشینه‌سازی کل منفعت اجتماعی (در شرایط تقاضای انعطاف‌پذیر) در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله با توجه به آن‌که قیمت‌گذاری پویا در محدوده‌ی شلوغی مرکزی شبکه مورد نظر است، زمان سفر در ورودی‌ها و درون محدوده‌ی قیمت‌گذاری به عنوان تابع هدف مسئله انتخاب شده است. مدلی دوسطحی برای مسئله‌ی قیمت‌گذاری پویای شلوغی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود.

[DCP]

$$\min S(x, \mu) = \sum_{a \in A' \cup A''} \sum_{t \in D} x_a^t \cdot f_a^t(x_a^t) \quad (13)$$

s.t.

$$0 \leq \mu^t \leq \mu_{\max} \quad \forall t \in D' \quad (14)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{t \in D} x_a^t \cdot f_a^t(x_a^t) \leq TC. \quad (15)$$

$$x \text{ solves DTTA} \quad (16)$$

که در آن A'' مجموعه کمان‌های داخل کمربندی قیمت‌گذاری، TC کل زمان سفر شبکه قبل از اعمال سیاست قیمت‌گذاری و μ_{\max} بیشینه عوارض قابل اعمال را نشان می‌دهند. تابع هدف ۱۳ مجموع زمان سفر در محدوده‌ی درون کمربندی قیمت‌گذاری و کمان‌های ورودی به آن را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۴ نیز شرط امکان‌پذیر بودن جواب را کنترل می‌کند. رابطه‌ی ۱۵ به عنوان یک محدودیت مهم، برای حفظ وضعیت کلی سیستم در سطح قابل قبول تعریف شده است. این رابطه بیان می‌کند که زمان سفر کل شبکه پس از قیمت‌گذاری باید کمتر یا مساوی با TC باشد. در مسئله‌ی قیمت‌گذاری پویای کمربندی، هدف آن است تا شلوغی در محدوده‌ی قیمت‌گذاری و ورودی‌های آن کاهش یابد. ولی این موضوع نباید سبب افت شاخص کلی شبکه شود. از این رو این محدودیت ۱۵ برای تضمین عملکرد قابل قبول کل شبکه به مدل اضافه شده است. رابطه‌ی ۱۶ نیز بیان می‌کند که احجام به کار رفته در محاسبه‌ی تابع هدف، بر اساس جواب تعادلی از حل مدل تخصیص ترافیک پویا هستند. مدل ارائه شده مدلی دوسطحی است که سطح

$$x_a^t = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} \sum_{a \in A_p} \sum_{d \in D} h_p^d \beta_{pa}^{dt} \quad \forall a \in A, t \in D \quad (4)$$

$$T_{pn}^d = \begin{cases} \sum_{a \in A_{pn}} \sum_{t \in D} f_a^t(x_a^t) \beta_{pa}^{dt} & \text{if } n \in N_p - r(p) \\ 0 & \text{if } n = r(p) \end{cases}$$

$$\forall p \in P_i, i \in I, n \in N_p, d \in D \quad (5)$$

$$\alpha_{pa}^{dt} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P_i, i \in I, a \in A_p, d \in D, t \in D \quad (6)$$

$$\sum_{t \in D} \alpha_{pa}^{dt} = 1 \quad \forall p \in P_i, i \in I, a \in A_p, d \in D \quad (7)$$

$$(T_{pn}^d + (d - t - 1) \Delta t) \alpha_{pk}^{dt} \leq 0$$

$$\forall p \in P_i, i \in I, k = (n, m) \in A_p, d \in D, t \in D \quad (8)$$

$$(T_{pn}^d + (d - t) \Delta t) \alpha_{pk}^{dt} \geq 0$$

$$\forall p \in P_i, i \in I, k = (n, m) \in A_p, d \in D, t \in D \quad (9)$$

$$\beta_{pk}^{dt} = 0 \quad \forall p \in P_i, i \in I, k \in A_p, d \in D, t < t' : \alpha_{pk}^{dt'} = 1 \quad (10)$$

$$\beta_{pa}^{dt} = 0 \quad \forall p \in P_i, i \in I, a \notin A_p, d \in D, t \in D \quad (12)$$

برای حل مدل پیشنهادی از ایده‌ی پیشنهادی جانسون (۱۹۹۱) مبنی بر تقسیم مسئله به دو زیرمسئله استفاده می‌شود. با ثابت فرض کردن متغیرهای β_{pa}^{dt} و α_{pa}^{dt} ، روابط ۱ تا ۴ مشابه با مسئله‌ی تخصیص ترافیک ایستا بر پایه‌ی تعادل استفاده‌کننده خواهد بود. با حل این مسئله تخصیص و تعیین جریان در مسیرها و کمان‌ها، مقدار متغیرهای β_{pa}^{dt} و α_{pa}^{dt} با استفاده از روابط ۵ تا ۱۲ قابل تعیین هستند. ایده‌ی اصلی در حل مسئله، به کارگیری روندی تکراری برای اصلاح مقادیر متغیرهای وقوع کمان - مسیر و کسر جریان مسیر است. بدین ترتیب مسئله‌ی اصلی به دو زیر مسئله تقسیم می‌شود:

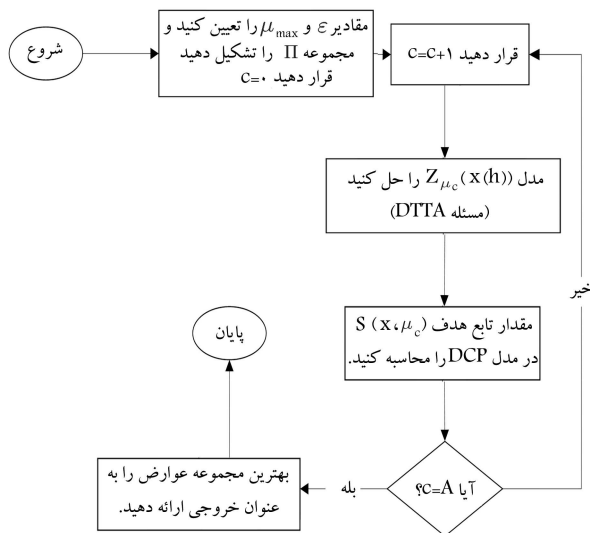
SP۱: زیرمسئله‌ی متناظر با روابط ۱ تا ۴ که یک مسئله‌ی تخصیص ایستا را نشان می‌دهد.

SP۲: زیرمسئله‌ی متناظر با روابط ۵ تا ۱۲ که مربوط به بهنگام‌سازی مقادیر متغیرهای β_{pa}^{dt} و α_{pa}^{dt} است.

حل مسئله با انتخاب مقادیری امکان‌پذیر برای متغیرهای β_{pa}^{dt} و α_{pa}^{dt} شروع می‌شود و در ادامه زیر مسئله SP۱ با این مقادیر ثابت و با استفاده از الگوریتم ODFWTQP برای به دست آوردن جریان در مسیرها و کمان‌ها حل می‌شود.^[۲۹] سپس زیرمسئله SP۲ برای بهنگام‌سازی مقادیر متغیرهای β_{pa}^{dt} و α_{pa}^{dt} با استفاده از حجم جریان‌های به دست آمده حل می‌شود. این فرایند تا زمان دستیابی به شرط توقف ادامه می‌یابد. در مدل DTTA تقاضا به صورت ثابت و مستقل از مقادیر عوارض در نظر گرفته شده است. به طور کلی اعمال عوارض تردد برای وسایل نقلیه‌ی شخصی می‌تواند بسته به میزان کشش‌پذیر بودن تقاضا، باعث انتقال

$$\beta_{pk}^{d,t+l} = \frac{\min \left\{ (t+1-l-d) \Delta t - T_{pn}^d - \sum_{t' < t+l} \beta_{pk}^{dt'} f_k^{t'}(x_k^{t'}), \left(1 - \sum_{t' < t+l} \beta_{pk}^{dt'} \right) f_k^{t+l}(x_k^{t+l}) \right\}}{f_k^{t+l}(x_k^{t+l})}$$

$$\forall p \in P_i, i \in I, k = (n, m) \in A_p, d \in D, t : \alpha_{pk}^{dt} = 1, l = 0, \dots, |D| - t \quad (11)$$



شکل ۱. نمودار جریان حل مدل DCP به روش جستجوی شبکه.

در کمان هاست که به واسطه وقوع تصادفات می تواند در شرایط خاصی قرار گیرد. مقصود از وضعیت کمان a ، ظرفیت این کمان در وضعیت شبکه w است. در واقع وضعیت w ، طبق توابع احتمالی $P(s_a)$ برای تمام کمان ها تعیین شده است.

با توجه به آنکه بازه زمانی تحلیل ساعت اوج است، w نشانگر وضعیت شبکه و ظرفیت در هر روز مشخص در ساعت اوج است. با در نظرگیری وقوع تصادفات ترافیکی در هر روز، ظرفیت کمان های شبکه نیز در هر روز در وضعیت خاص خود قرار خواهند گرفت. وضعیت شبکه (ظرفیت کمان های شبکه) در ابتدای بازه زمانی تحلیل در هر روز مشخص تا پایان بازه زمانی تحلیل در همان روز ثابت است. در واقع تغییراتی در ظرفیت در یک روز مشخص رخ نمی دهد و صرفاً تفاوت ظرفیت در روزهای مختلف در نظر گرفته می شود. بر اساس نحوه به کارگیری سیاست قیمت گذاری پویا و همچنین نحوه بهره برداری از ATIS در ساعت اوج، شش سناریوی مختلف برای وضعیت مفروض w قابل تعریف خواهد بود:

سناریوی ۱: اطلاع کامل - عوارض واکنشی 11 (FL-RDT): در این سناریو مسافران به ATIS دسترسی دارند و مدیر سیستم نیز در هر روز عوارض را متناسب با وضعیت شبکه تغییر می دهد.

سناریوی ۲: اطلاع کامل - عوارض غیرواکنشی 11 (FL-UDT): در این سناریو مسافران به ATIS دسترسی دارند، ولی مدیر سیستم بدون توجه به وضعیت شبکه عوارض ثابتی را برای ساعت اوج در هر روز در نظر می گیرد.

سناریوی ۳: اطلاع کامل - بدون عوارض 12 (FL-NDT): در این سناریو مسافران به ATIS دسترسی دارند، ولی سیاست قیمت گذاری در شبکه اجرا نمی شود.

سناریوی ۴: عدم اطلاع - عوارض واکنشی 13 (NL-RDT): در این سناریو استفاده کنندگان به ATIS دسترسی ندارند، ولی مدیر سیستم عوارض را متناسب با وضعیت شبکه در هر روز تنظیم می کند. به دلیل عدم اطلاع از وضعیت شبکه، استفاده کنندگان در هر روز مسیر یکسانی را انتخاب می کنند. همچنین به دلیل عدم وجود سیستم اطلاع رسانی، از نرخ عوارض هر روز نیز بی اطلاع هستند. پس تغییر میزان عوارض، تأثیری بر نحوه رفتار آنها نخواهد داشت. بنابراین این سناریو از نظر عملکردی قابل توجیه نیست.

سناریوی ۵: عدم اطلاع - عوارض غیرواکنشی 14 (NL-UDT): در این سناریو

بالای آن طبق روابط ۱۳ تا ۱۵ مسئله بهینه سازی برای تعیین میزان عوارض بهینه است و سطح پایین آن مسئله تخصیص ترافیک دینامیکی با عوارض تردد در شبکه است رابطه ۱۶. این مدل معادل با بازی استکلبرگ است که در آن پیشرو (مدیر سیستم) عوارض را تعیین و دنبال کنندگان (رانندگان) بر اساس عوارض و ساختار جدید شبکه، اقدام به انتخاب مسیر خود می کنند. در این مقاله برای حل مدل پیشنهادی از روش شمارش کامل استفاده خواهد شد که در آن با تقسیم بندی فضای جواب به مجموعه یی گسسته و منظم از نقاط، ارزیابی تمام جواب های تعریف شده به کمک حل مدل تخصیص ترافیک پویا انجام می شود و بهترین جواب به عنوان جواب بهینه معرفی می شود. بدین منظور کل فضای جواب امکان پذیر مسئله به شبکه یی با قطعات مساوی تقسیم می شود و تمام نقاط واقع روی این شبکه یی مفروض با استفاده از مدل DTTA ارزیابی خواهند شد. برای تشکیل این شبکه یی شطرنجی، پارامتری با عنوان گام عوارض ϵ ، تعریف شده است. با توجه به مدل پیشنهادی، تعداد کل نقاط روی شبکه به کمک رابطه یی زیر تعیین خواهد شد:

$$\Lambda = \left(\frac{\mu_{\max}}{\epsilon} + 1 \right)^{|D'|} \quad (17)$$

که در آن $|D'|$ نشان دهنده تعداد اعضای مجموعه v است. بدین ترتیب مجموعه یی نقاط روی شبکه یی تعریف شده به صورت زیر قابل در نظرگیری است:

$$\Pi = \{ \mu_1, \dots, \mu_{\Lambda} \} \quad (18)$$

که در آن μ_g مجموعه یی از عوارض امکان پذیر، نشان دهنده یکی از نقاط روی شبکه یی مفروض فضای جواب مسئله است. این مجموعه به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\mu_g = \{ \mu_1, \dots, \mu_{|D'|} \} \quad (19)$$

به دلیل تبدیل فضای حل پیوسته به فضای گسسته، جواب به دست آمده از این روش بهینه یی جهانی نخواهد بود. با وجود این با کاهش مقدار پارامتر گام عوارض، دقت در حل مسئله از نظر نظری افزایش می یابد و به تناسب آن تعداد نقاط روی شبکه یی شطرنجی مفروض نیز بیشتر می شود و پیچیدگی های محاسباتی مسئله از نظر زمان حل افزایش خواهد یافت. شکل ۱ نمودار جریان حل مدل دوسطحی پیشنهادی را نمایش می دهد.

۴. مدل قیمت گذاری پویا با ظرفیت متغیر

در شرایطی که عدم قطعیت در ظرفیت شبکه وجود داشته باشد، هر کمان $a \in A$ ، بسته به شرایط ترافیکی حاکم در شبکه می تواند در یکی از وضعیت های مجموعه S_a قرار بگیرد. اگر احتمال وقوع وضعیت $s_a \in S_a$ در آن کمان a باشد، فضای احتمالاتی (Ω, Pr) وجود خواهد داشت که در آن مجموعه یی تمام وضعیت های ممکن برای شبکه G و Pr تابع توزیع احتمال زیر است:

$$\Pr(w) = \prod_{a \in A} p(s_a^w) \quad (20)$$

که در آن S_a^w وضعیت کمان a در وضعیت w شبکه است. مقصود از وضعیت w زیرمجموعه یی از مجموعه تمام حالات امکان پذیر شبکه از حیث ظرفیت تردد

۲.۴. سناریوی FI-RDT

در این سناریو هر مسافر از وضعیت شبکه اطلاعاتی کامل دارد و عوارض پویا نیز به صورت روزانه بر اساس شرایط حاکم بر شبکه در همان روز تنظیم می‌شود. مدل قیمت‌گذاری پویای شلوغی برای این سناریو به صورت زیر تعریف می‌شود:

[FI - RDT]

$$\text{Min } Z = \sum_{\mu} \text{Pr}(w) \sum_{a \in A' \cup A''} \sum_{t \in D} x_a^{tw} \cdot f_a^{tw}(x_a^{tw}) \quad (25)$$

s.t.

$$0 \leq \mu^{tw} \leq \mu_{\max} \quad \forall a \in A', t \in D', w \in \Omega \quad (26)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{t \in D} x_a^{tw} \cdot f_a^{tw}(x_a^{tw}) \leq TC^w \quad \forall w \in \Omega \quad (27)$$

$$x^w \text{ solves DTTA} \quad \forall w \in \Omega \quad (28)$$

که در آن $\mu^{tw} = (\mu^{tw})$ بردار مقدار عوارض بهینه در وضعیت w شبکه است. در این سناریو هر مسافر از وضعیت شبکه اطلاعاتی کامل دارد و عوارض نیز به صورت روزانه عوض می‌شود. مدل بالا قابل تجزیه روی مجموعه Ω است. پس با حل مسئله DCP برای هر روز مفروض، مقدار عوارض بهینه در هر روز مشخص می‌شود.

۳.۴. سناریوی NI-UDT

در این سناریو رانندگان به ATIS دسترسی ندارند و عوارض نیز در کلیه وضعیت‌های $\Omega = \{1, \dots, |\Omega|\}$ ثابت است. این سناریو معادل با حل مسئله قیمت‌گذاری بدون در نظرگیری تغییرات در ظرفیت است. با توجه به ثابت بودن مقادیر عوارض و همچنین عدم تغییر رفتار رانندگان در وضعیت‌های مختلف، این سناریو معادل با حل مسئله DCP برای شبکه‌ی پایه (بدون در نظرگیری تغییرات ظرفیت) است.

۵. مطالعه‌ی موردی، شبکه‌ی سوفالز

شبکه سوفالز بخشی از شبکه‌ی معابر شهری با همین نام در ایالت داکوتای جنوبی در آمریکا است. این شبکه یکی از شناخته شده‌ترین شبکه‌های آزمایشی در مطالعات مهندسی حمل‌ونقل به شمار می‌آید و در بسیاری از پژوهش‌ها برای ارزیابی مدل‌ها و الگوریتم‌ها از آن استفاده شده است. این شبکه دارای ۲۴ گره، ۷۶ کمان و ۵۵۲ زوج مبدأ - مقصد است و تقاضای سفر آن معادل ۳۶۰۶۰۰ وسیله‌ی نقلیه در روز است.^[۳۰] شکل ۲ گراف متناظر با این شبکه و کمربندی قیمت‌گذاری مفروض آن را نشان می‌دهد. ارزش زمان سفر، ϕ ، در این شبکه برابر با ۲۰ دلار در ساعت در نظر گرفته شده است. به منظور تبدیل تقاضای روزانه به تقاضای ساعت اوج، کل تقاضا در ضریب ۰/۱ ضرب شده است. همچنین برای تشکیل ماتریس تقاضای سفر پویا در ساعت اوج، تقاضای ساعتی میان چهار بازه‌ی زمانی ۱۵ دقیقه‌ی به ترتیب سهم‌های ۲۰، ۳۰، ۳۰ و ۲۰ درصد توزیع شده است. تابع زمان سفر - حجم کمان‌های شبکه نیز به صورت زیر تعریف شده است:

$$f_a^t(x_a^t) = A_a + B_a(x_a^t/\Delta t)^{\alpha} \quad \forall a \in A, t \in D \quad (29)$$

که در آن A_a و B_a ضرایب پارامترهای تابع زمان سفر - حجم هستند که در مرجع^[۳۰] ارائه شده‌اند.

مسافران به ATIS دسترسی ندارند و مسیر روزانه‌ی خود را تغییر نمی‌دهند. مدیر سیستم نیز عوارض ثابتی را برای هر روز در نظر می‌گیرد. سناریوی ۶: عدم اطلاع - بدون عوارض^{۱۵} (NLNDT): در این سناریو نه رانندگان به ATIS دسترسی دارند و نه مدیر سیستم عوارض ترددی را بر شبکه اعمال می‌کند.

در ادامه مدل‌های قیمت‌گذاری پیشنهادی برای سناریوهای ۱، ۲ و ۵ ارائه خواهد شد. سناریوهای ۳ و ۶ نیز به دلیل عدم پیاده‌سازی سیاست قیمت‌گذاری، تنها با حل مدل DTTA قابل ارزیابی خواهند بود. سناریوی ۴ نیز فاقد توجیه فنی است و بررسی نخواهد شد. تمام مدل‌های پیشنهادی، مدلی‌هایی «برون‌خط^{۱۶}» هستند که با معلوم بودن ظرفیت کمان‌های شبکه در تمام وضعیت‌های مجموعه‌ی Ω ، مسئله حل می‌شود و قیمت‌گذاری نیز در مبدأ سفر به اطلاع استفاده‌کننده می‌رسد.

۴.۱. سناریوی FI-UDT

در این سناریو هر مسافر با دسترسی به ATIS اطلاعاتی کامل از وضعیت شبکه دارد، ولی عوارض در کلیه وضعیت‌های $\Omega = \{1, \dots, |\Omega|\}$ ثابت است. مدل قیمت‌گذاری به دنبال یافتن یک بردار عوارض پویای ثابت $\mu = (\mu^t)$ برای روزهای مختلف است به طوری که امید ریاضی کل زمان سفر در $|\Omega|$ روز (وضعیت) مختلف کمیته شود. وضعیت‌های در نظر گرفته شده صرفاً به عنوان نماینده‌ی از شرایط واقعی به طور تصادفی تولید می‌شوند. در واقع این وضعیت‌ها نمونه‌ی از شرایط روزانه‌ی شبکه در ساعت اوج در یک سال از بهره‌برداری شبکه هستند و پی‌درپی بودن آنها لزومی ندارد. مدل قیمت‌گذاری پویای شلوغی برای این سناریو به صورت زیر تعریف می‌شود:

[FI-UDT]

$$\text{Min } Z = \sum_{\mu} \text{Pr}(w) \sum_{a \in A' \cup A''} \sum_{t \in D} x_a^{tw} \cdot f_a^{tw}(x_a^{tw}) \quad (21)$$

s.t.

$$0 \leq \mu^t \leq \mu_{\max} \quad \forall a \in A', t \in D' \quad (22)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{t \in D} x_a^{tw} \cdot f_a^{tw}(x_a^{tw}) \leq TC^w \quad \forall w \in \Omega \quad (23)$$

$$x^w \text{ solves DTTA} \quad \forall w \in \Omega \quad (24)$$

که در آن $x^w = (x_a^{tw})$ بردار احجام در معابر شبکه در وضعیت w، $f_a^{tw} = (x_a^{tw})$ تابع زمان سفر کمان a در وضعیت w و TC^w نیز کل زمان سفر شبکه در وضعیت w بدون اعمال سیاست قیمت‌گذاری است. این مدل در دسته مدل‌های برنامه‌ریزی با قیدهای تعادل قرار دارد که حل آنها بسیار دشوار است، زیرا این قیدها مسئله را به مسئله‌ی نامحدب تبدیل می‌کنند. از طرفی، سناریوی FI-UDT سخت‌ترین سناریو برای حل مسئله‌ی قیمت‌گذاری پویاست. زیرا ثابت بودن عوارض روزانه، تجزیه‌ی مسئله روی مجموعه‌ی Ω را ناممکن می‌سازد. به همین دلیل در این مقاله از روش حلی ابتکاری استفاده می‌شود. بدین شرح که مسئله روی مجموعه‌ی Ω به $|\Omega|$ زیرمسئله‌ی قیمت‌گذاری پویای شلوغی تجزیه می‌شود و پس از حل تمام زیرمسئله‌ها، میانگین بردارهای عوارض به دست آمده به عنوان جواب مسئله معرفی می‌شود. بدین منظور، تعداد $|\Omega|$ وضعیت شبکه به کمک توابع احتمالاتی تولید و مسئله‌ی قیمت‌گذاری پویای شلوغی (مدل DCP) برای هر کدام از آنها به کمک روش جستجوی شبکه حل می‌شود.

جدول ۳. فرض‌های حل مسئله قیمت‌گذاری با در نظرگیری عدم قطعیت در ظرفیت.

پارامتر	مقدار
$ \Omega $	۵۰
τ	۰/۵
ζ	۰/۵
ε	۰/۰۵
μ_{max}	۱ دلار

جدول ۴. نتایج حل مسئله قیمت‌گذاری با در نظرگیری عدم قطعیت در ظرفیت برای سناریوهای مختلف.

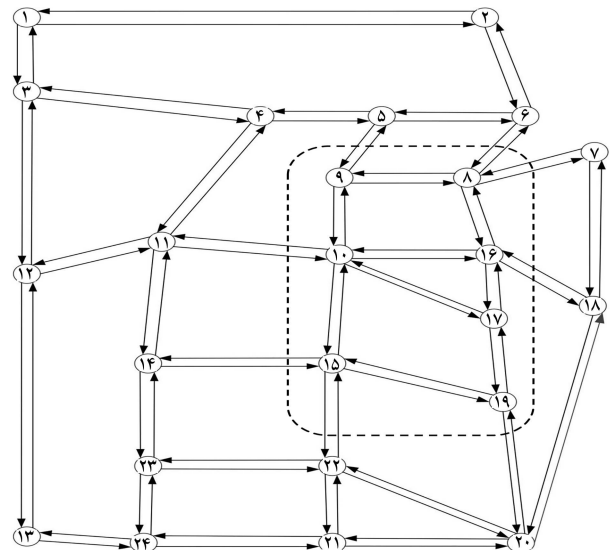
سناریو	میانگین زمان سفر در کمان‌های ورودی و داخلی محدودی (وسيله - ساعت)	میانگین کل زمان سفر شبکه (وسيله - ساعت)
FLUDT	۶۰۲۰/۴	۹۳۵۵/۳
FLRDT	۴۲۳۵/۶	۸۷۷۵/۹
NLUDT	۴۸۳۹/۵	۹۹۵۰/۲
FLNDT	۴۴۲۵/۰	۸۹۴۶/۳
NLNDT	۴۸۴۹/۲	۹۹۵۴/۱

رابطه‌ی زیر استفاده شده است:

$$C_a^w = \begin{cases} C_a^0 \cdot (1 - \tau) & \text{if } \sigma_a^w \leq \zeta \\ C_a^0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall a \in A''', w \in \Omega \quad (31)$$

که در آن $A''' \subseteq A$ مجموعه‌ی کمان‌های محتمل برای کاهش ظرفیت، C_a^w ظرفیت کمان $a \in A'''$ در وضعیت w ، C_a^0 ظرفیت کمان a در وضعیت پایه‌ی شبکه (بدون کاهش ظرفیت)، τ عددی در بازه‌ی $[0, 1]$ نشان‌دهنده‌ی شدت تصادف، ζ پارامتری در بازه‌ی $[0, 1]$ نشان‌دهنده‌ی احتمال وقوع تصادف و σ_a^w نیز عدد تصادفی در بازه‌ی $[0, 1]$ نشان‌دهنده‌ی شاخص وقوع تصادف در کمان a در وضعیت w بر اساس یک تابع توزیع احتمال یکنواخت است. جدول ۳ تنظیمات مفروض برای حل مسئله در شبکه‌ی سوفالز را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز نتایج میانگین حاصل از حل مسئله برای سناریوهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

طبق جدول ۴، سناریوی FLRDT بهترین نتیجه را برای کل زمان سفر شبکه و زمان سفر در محدوده به دست داده است. با توجه به تطبیق روزانه‌ی سیاست قیمت‌گذاری با شرایط شبکه در این سناریو، این نتیجه مورد انتظار نیز بوده است. در هر دو سناریوی FLUDT و FLNDT رانندگان به ATIS مجهز بوده و تفاوت آنها، اعمال عوارض ثابت در هر روز در سناریوی FLUDT است. براساس نتایج، اعمال این عوارض نه تنها سودی نخواهد داشت، بلکه شرایط شبکه را در هر دو شاخص مورد بررسی تضعیف خواهد کرد. در واقع، در صورت وجود عدم قطعیت در ظرفیت شبکه و دسترسی رانندگان به ATIS، اعمال عوارض ثابت روزانه نتیجه‌ی مطلوبی خواهد داشت. در این سناریو، تابع هدف مسئله بدترین مقدار را در میان تمام سناریوها دارد. دو سناریوی NLUDT و NLNDT با اختلاف معناداری بدترین نتایج را در شاخص کل زمان سفر شبکه به دست داده‌اند. در هر دو سناریوی مذکور رانندگان به ATIS دسترسی ندارند و با توجه به وجود ۶۰ درصد کمان‌های مجموعه‌ی A''' در خارج از محدوده‌ی قیمت‌گذاری، این نتیجه مورد انتظار است. سناریوی NLUDT برتری اندکی نسبت به سناریوی NLNDT دارد. در واقع در صورت عدم وجود ATIS، به کارگیری عوارض ثابت روزانه نتیجه مثبت، هر چند



شکل ۲. شبکه‌ی سوفالز و کمربندی قیمت‌گذاری مفروض

جدول ۲. کمان‌های مفروض با احتمال وقوع تصادف در شبکه‌ی سوفالز.

کمان‌های داخلی	کمان‌های مرزی	کمان‌های خارجی
(۱۰-۱۷)، (۱۷-۱۰)	(۱۱-۱۰)، (۱۰-۱۱)	(۱-۲)، (۲-۱)
	(۱۴-۱۵)، (۱۵-۱۴)	(۱۲-۱۳)، (۱۳-۱۲)
		(۲۰-۱۸)، (۲۰-۱۸)
		(-۲۴)، (۲۰-۲۱)
		(۱-۳)، (۱۳)

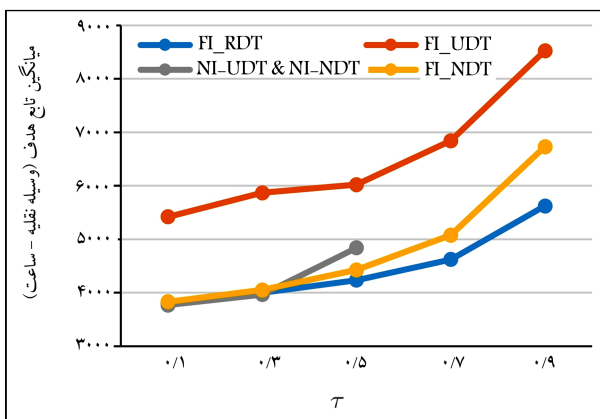
در این مقاله از تعریف پویای معیار شکاف نسبی^{۱۷} به عنوان یکی از متداول‌ترین معیارهای کنترل همگرایی الگوریتم‌های تخصیص ترافیک به شرح زیر به منظور کنترل جواب بهینه استفاده می‌شود:

$$[RG] = \frac{\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i^{d+}} h_p^d T_p^d - \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i^d} h_p^d u_i^d}{\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i^{d+}} h_p^d T_p^d} \quad (30)$$

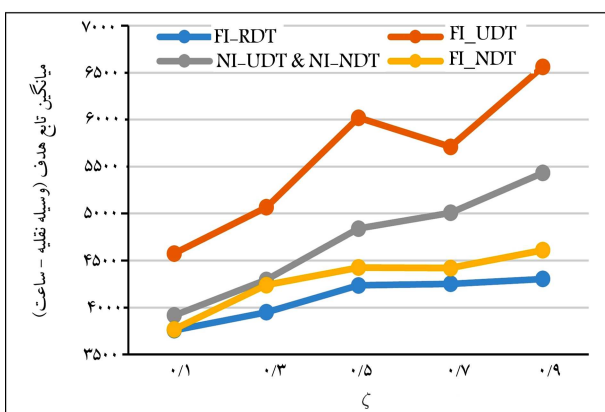
که در آن P_i^{d+} مجموعه‌ی مسیرهای فعال زوج مبدأ - مقصد i مربوط به بازه‌ی عزیمت d و u_i^d کمترین هزینه‌ی سفر زوج مبدأ - مقصد i در بازه‌ی عزیمت d است. در این مقاله مسئله‌ی تخصیص ترافیک با شرط توقف رسیدن معیار شکاف نسبی به 10^{-6} حل می‌شود.

در گام نخست از حل مسئله نیاز است تا کمان‌هایی از شبکه که احتمال کاهش ظرفیت در آنها به دلیل وقوع تصادف وجود دارد، انتخاب شوند. بدین منظور کمان‌ها به سه دسته کمان‌های خارج از کمربندی، کمان‌های مرزی کمربندی و کمان‌های داخل محدوده‌ی قیمت‌گذاری تقسیم‌بندی شدند. از میان کل کمان‌ها، ۹ کمان خارجی، ۴ کمان مرزی (دو ورودی و دو خروجی) و ۲ کمان داخلی انتخاب شدند. جدول ۲ کمان‌های منتخب را نشان می‌دهند. براساس این جدول، احتمال وقوع تصادف در ۱۹/۷ درصد از کمان‌های شبکه وجود دارد.

پس از تعیین کمان‌های منتخب برای کاهش احتمالی ظرفیت، نیاز است تا ظرفیت آنها به طور تصادفی در هر وضعیت w شبکه تعیین شود. بدین منظور از



شکل ۴. مقدار میانگین تابع هدف برای ضرایب مختلف شدت تصادف در سناریوهای مختلف.



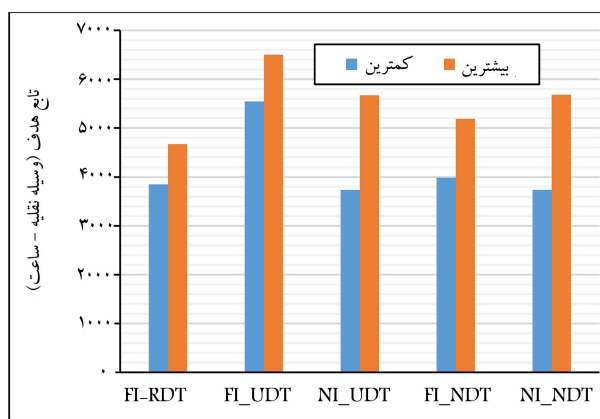
شکل ۵. مقدار میانگین تابع هدف برای ضرایب مختلف احتمال وقوع تصادف در سناریوهای مختلف.

نتایج به دست آمده برای تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. مشابه با تحلیل ارائه شده برای شدت تصادفات، در این بخش نیز از یک نمودار مشترک برای سناریوهای NI-UDT و NI-NDT استفاده شده است.

بر اساس شکل ۵، در تمام سطوح مختلف احتمال رخداد تصادف، سناریوی FI-RDT بهترین نتیجه را دارد. پس از آن سناریوی FI-NDT قرار دارد و در رده‌ی سوم نیز سناریوهای NI-UDT و NI-NDT هستند. سناریوی FI-UDT با اختلاف در رده‌ی آخر میان سناریوها قرار دارد و نوساناتی نیز در نمودار آن مشاهده می‌شود.

۳.۵. مقایسه‌ی کارایی سیاست قیمت‌گذاری و ATIS

بر اساس نتایج در صورت رخداد تصادفات، اطلاع‌رسانی نقشی مؤثرتر نسبت به سیاست قیمت‌گذاری دارد. در واقع سیاست قیمت‌گذاری در شرایطی کارایی لازم را خواهد داشت که در ابتدا رانندگان از وضعیت شبکه مطلع باشند. شکل ۶ مقدار تابع هدف مسئله را برای سه سناریوی FI-RDT، FI-NDT و NI-UDT ترکیبات مختلف دو ضریب τ و ζ نشان می‌دهد. با افزایش مقدار این دو ضریب، اختلاف میان سه سناریو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر کمتر و برابر با $0/5$ ، اختلاف میان دو سناریوی FI-NDT و FI-RDT کم است. در نقطه‌ی $(0/5-0/5)$ ، مقدار تابع هدف در سناریوی FI-NDT و FI-RDT به ترتیب به میزان $13/5$



شکل ۳. کمینه و بیشینه‌ی مقدار تابع هدف در سناریوهای مختلف.

اندک، را به همراه خواهد داشت. با مقایسه‌ی نتایج این دو سناریو با سایر سناریوها، اهمیت ATIS در شاخص کل زمان سفر شبکه مشخص می‌شود.

اعداد ارائه شده در جدول ۴، میانگین نتایج در روزهای مختلف برای مجموعه‌ی Ω هستند. یکی از موارد مهم در بررسی عدم قطعیت، رخداد بدترین شرایط است که عموماً در بهینه‌سازی استوار مدنظر قرار می‌گیرد. هرچند رویکرد پیشنهادی حل مسئله در این مقاله بر مبنای بهینه‌سازی میانگین تابع هدف است، بررسی بدترین وضعیت ایجاد شده می‌تواند در مقایسه‌ی تأثیرات سناریوها مفید باشد. شکل ۳ کمترین و بیشترین مقدار زمان سفر در محدوده را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. نکته‌ی قابل توجه، تفاوت میان سناریوهای مجهز به ATIS و سناریوهای فاقد آن از حیث اختلاف میان کمینه و بیشینه‌ی مقدار تابع هدف است. در سناریوهای مجهز به ATIS، این اختلاف در مقایسه با سناریوهای فاقد ATIS کمتر است. پس در صورتی که حفظ حداقل شرایط در بدترین وضعیت شبکه مدنظر باشد، به کارگیری ATIS ضروری است.

۱.۵. تحلیل اثرات شدت تصادف

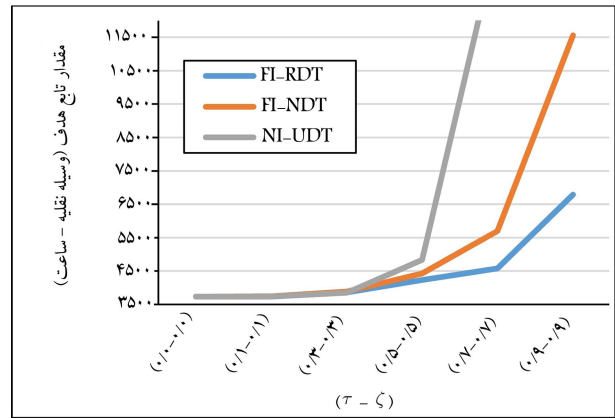
به منظور ارزیابی تأثیرات شدت تصادف در عملکرد سناریوها، مسئله‌ی مورد بررسی با ثابت فرض کردن پارامتر ζ برابر با $0/5$ ، برای مقادیر مختلف τ حل شد. شکل ۴ نتایج به دست آمده در مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. به دلیل بسیار نزدیک بودن نتایج سناریوهای NI-UDT و NI-NDT، از یک نمودار مشترک برای آنها استفاده شده است. برای $0/5 > \tau$ ، مقادیر به دست آمده در این دو سناریو به شدت افزایش می‌یابند، به همین دلیل از نمودارها حذف شده‌اند.

در تمام سناریوها، تغییرات در مقدار تابع هدف برای مقادیر $0/3 \leq \tau$ کم است. برای مقادیر بزرگتر از $0/3$ ، میزان این تغییرات افزایش می‌یابد و شیب نمودار بیشتر می‌شود. در سناریوهای مجهز به ATIS، میزان این افزایش نسبت به سناریوهای فاقد ATIS کمتر است. با مقایسه‌ی سناریوهای FI-NDT و FI-RDT می‌توان بیان کرد که با تشدید وضعیت تصادفات، توزیع جریان در شبکه به میزان بیشتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ پس اعمال عوارض متغیر در هر روز به بهبود وضع شبکه کمک خواهد کرد.

۲.۵. تحلیل اثرات احتمال وقوع تصادف

به منظور ارزیابی احتمال وقوع تصادف در عملکرد سناریوها، مسئله‌ی مورد بررسی با ثابت فرض کردن پارامتر τ برابر با $0/5$ ، برای مقادیر مختلف ζ حل شد. شکل ۵

کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد، معادل $(194481)^{214}$ است. با در نظرگیری تعداد روزهای مورد بررسی برابر با ۵۰، حل مسئله مستلزم حل $9,724,05$ مسئله‌ی تخصیص ترافیک پویا با عوارض تردد است. حل هر مسئله تخصیص ترافیک نیز به طور تقریبی $1/7$ ثانیه طول می‌کشد. بدین ترتیب برای حل مسئله به تقریباً ۱۹۱ روز زمان نیاز است. در مقاله‌ی حاضر به دلیل امکان حل هر مسئله تخصیص به طور مجزا، فضای جواب در روش شمارش کامل به چندین زیرفضا شکسته شد و محاسبات حل مسئله بر روی سیستم مذکور به طور موازی انجام شد. بدین ترتیب زمان حل مسئله به $15/92$ روز کاهش یافت. این زمان برای حل چنین مسئله‌ی که نتیجه‌ی آن در بازه‌های زمانی میان مدت تا بلندمدت در شبکه قابل استفاده است، قابل قبول است. امکان کاهش این زمان با استفاده از روش‌های رایانه‌ی و محاسبات سریع نیز وجود دارد.



شکل ۶. میانگین تابع هدف در سناریوهای FL-NDT، FL-RDT و NI-UDT با ترکیبات ضرایب شدت و احتمال وقوع تصادف.

درصد و $18/4$ درصد نسبت به شرایط پایه افزایش می‌یابد. پس در صورت وجود ATIS و برای مقادیر ضرایب مفروض کمتر یا مساوی با $0/5$ ، پیاده‌سازی سیاست قیمت‌گذاری تأثیرات چشمگیری نخواهد داشت. در بدترین حالت نیز افزایش تابع هدف در دو سناریوی FL-NDT و FL-RDT به ترتیب برابر با 82 درصد و 209 درصد است. وقوع این حالت بسیار بدبینانه است؛ پس به طور میانگین می‌توان عملکرد دو سناریو را قابل قبول دانست. سناریوی NI-UDT نیز تا ترکیب ضرایب $(0/5-0/5-0/5)$ نتایج نسبتاً قابل قبولی دارد (افزایش $29/5$ درصدی مقدار تابع هدف). ولی با افزایش مقادیر ضرایب τ و ζ ، نتایج آن به شدت افت می‌کند.

۶. زمان حل مسئله

مسئله‌ی مورد بررسی در سطح برنامه‌ریزی قرار دارد و به منظور مدیریت برخط شبکه ارائه نشده است. پس حل سریع آن از الزامات مسئله نیست. با وجود این، پیچیدگی‌های محاسباتی و زمان حل مسئله، یکی از جنبه‌هایی است که باید به منظور بررسی کاربردی بودن مدل‌های پیشنهادی تحلیل شود. منظور از کاربردی بودن مدل‌ها، امکان حل مسئله در بازه‌ی زمانی قابل قبول است. الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله روی یک Workstation با مشخصات پردازنده $x2/6\text{GHz}$ Intel® 2Quad core Xeon و حافظه‌ی 16GB RAM اجرا شده‌اند. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، سناریوهای FL-NDT و FL-UDT پیچیده‌ترین مدل‌ها برای حل هستند؛ زیرا برای حل آنها نیاز است تا زیرمسئله‌ی مربوط به هر وضعیت (روز) به طور جداگانه به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی حل شود. با در نظرگیری مفروضات مسئله، تعداد جواب‌های امکان‌پذیر که به کمک روش شمارش

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل تخصیص ترافیک پویا با قابلیت در نظرگیری عوارض تردد در شبکه توسعه شده است. همچنین یک مدل دوسطحی بهینه‌سازی قیمت‌گذاری پویای شلوغی ارائه شده است که از الگوریتم جستجوی شبکه برای حل آن استفاده می‌شود. در ادامه سناریوهای مختلفی برای در نظرگیری تغییرات ظرفیت به واسطه‌ی وقوع تصادفات در شبکه‌های شهری در حل مسئله قیمت‌گذاری پویا طرح شده است. مدل دوسطحی قیمت‌گذاری شلوغی به عنوان هسته‌ی اصلی در حل این سناریوها به کار گرفته شده است. با حل مسئله برای شبکه‌ی سوئالز، مقایسه‌های مختلفی بین سناریوهای پیشنهادی انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که سناریوی FL-RDT بهترین عملکرد را دارد که مورد انتظار نیز بود. در مقایسه‌ی دو سیاست قیمت‌گذاری و اطلاع‌رسانی به رانندگان، مشخص شد که در صورت شدید بودن کاهش عرضه در شبکه، اطلاع‌رسانی اولویت بیشتری دارد. در صورت به کارگیری ATIS در شبکه، اعمال عوارض ثابت روزانه در اکثر حالات نتیجه مناسبی نخواهد داشت. در واقع بر مبنای نتایج، عدم قیمت‌گذاری در شرایطی که عدم قطعیت در شبکه وجود دارد، نسبت به عوارض ثابت نتیجه‌ی نسبتاً بهتری خواهد داشت.

این نتایج بر اساس شبکه‌ی آزمایشی مورد استفاده به دست آمدند و فرض‌های در نظر گرفته شده نیز بر جزئیات این نتایج تأثیرگذارند. با این حال کلیت نتایج و ارزیابی‌های به عمل آمده قابل استناد است و توجهی بر مطالعات آینده در این حوزه می‌باشد. در مقاله‌ی حاضر تقاضا به صورت ثابت در نظر گرفته شده است، استفاده‌کنندگان از نظر ارزش زمان سفر همگن هستند و تابع هدف برابر کل زمان سفر در محدوده‌ی قیمت‌گذاری است. برداشتن هر یک از این فرض‌های ساده‌کننده می‌تواند موضوع مطالعه‌ی جدیدی باشد.

پانویس‌ها

1. congestion pricing
2. second best
3. advanced traveler information systems (ATIS)

4. set-based uncertainty
5. cellular particle swarm optimization (CPSO)
6. mixed equilibrium traffic assignment
7. method of successive average (MSA)
8. responsive toll
9. toll step

10. full information / Responsive dynamic tolls
11. full information / unresponsive dynamic tolls
12. full information / no dynamic tolls
13. no information / responsive dynamic tolls
14. no information / unresponsive dynamic tolls
15. no information / no dynamic tolls
16. Offline
17. relative gap

منابع (References)

1. Verhoef, E. and Lindsey, R. "Congestion modeling", *Handbook of Transport Modeling*, chapter **21**, pp. 377-39, (2000).
2. Pigou, A.C. "Wealth and Welfare", *Macmillan, London* (1920).
3. Knight, F. "Some fallacies in the interpretation of social costs", *Economics*, **4**, pp. 582-606 (1924).
4. Marchand, M. "A note on optimal tolls in an imperfect environment", *Econometrica*, **36**, pp. 575-581 (1968).
5. Verhoef, E. "Second-best congestion pricing in general networks, heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points", *Transportation Research Part B*, **36**, pp. 707-729, (2002).
6. Ekstrom, J., Engelson, L. and Rydergren, C. "Heuristic algorithms for a second-best congestion pricing problem", *Netnomics*, **10**, pp. 85-102 (2009).
7. Shepherd, S. and Sumalee, A. "A genetic algorithm based approach to optimal toll level and location problems", *Network and Spatial Economics*, **4**, pp. 161-179 (2004).
8. Johnson, D.S., Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G. "The complexity of the network design problem", *Networks*, **8**, pp. 279-285 (1978).
9. Janson, B.N. "Convergent algorithm for dynamic traffic assignment", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1328**, pp. 69-80 (1991).
10. Lo, H.K and Szeto, W.Y. "Modeling advanced traveler information services: static versus dynamic paradigm", *Transportation Research Part B*, **36**(5), pp. 421-443 (2004).
11. Aboudina, A. "Optimized time-dependent congestion pricing system for large networks: integrating distributed optimization, departure time choice, and dynamic traffic assignment in the greater toronto area", *Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto* (2016).
12. Liu, Z., Wang, S., Zhou, B. and et al. "Robust optimization of distance-based tolls in a network considering stochastic day to day dynamics", *Transportation Research Part C*, **79**, pp. 58-72 (2017).
13. Cheng, Q., Xing, J., Yi, W. and et al. "Distance-based congestion pricing with day-to-day dynamic traffic flow evolution process", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **6**, pp. 1-7 (2019).
14. Vickery, W.S. "Responsive pricing of public utility services", *Bell Journal of Economics and Management Science*, **2**, pp. 337-346 (1971).
15. Wen, L. and Eglese, R. "Minimizing CO2e emissions by setting a road toll", *Transportation Research Part D*, **44**, pp. 1-13 (2016).
16. Cheng, Q., Liu, Zh. and Selmoune, A. "Nonlinear distance-based dynamic pricing considering congestion-level correction", *International Journal of Transportation*, **6**(2), pp. -8 (2018).
17. Cheng, Q., Liu, Zh. and Szeto, W.Y. "A cell-based dynamic congestion pricing scheme considering travel distance and time delay", *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, **7**(1), pp. 1286-1304 (2019).
18. Yang, H. "Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion", *Transportation*, **26**, pp. 299-322 (1999).
19. Huang, H.J. and Li, Z.H. "A multiclass, multi criteria logit-based traffic equilibrium assignment model under ATIS", *European Journal of Operational Research*, **176**(3), pp. 1464-1477 (2007).
20. Bansal, P., Shah, R. and Boyles, S.D. "Robust network pricing and system optimization under combined long-term stochasticity and elasticity of travel demand", *Transportation*, **45**(3), pp. 1389-1418 (2018).
21. Zhong, Sh., Xiao, X., Bushell, M. and et al. "Optimal road congestion pricing for both traffic efficiency and safety under demand uncertainty", *Journal of Transportation Engineering*, **143**(3), pp. 1-10 (2017).
22. Lv, Y., Wang, Sh., Gao, Z. and et al. "Design of a heuristic environment-friendly road pricing scheme for traffic emission control under uncertainty" *Journal of Environmental Management*, **236**, pp. 455-465 (2019).
23. Zhu, Sh., Jiang, G. and Lo, H.K. "Capturing value of reliability through road pricing in congested traffic under uncertainty", *Transportation Research Part C*, **23**, pp. 664-678 (2017).
24. Chung, B.D., Yao, T., Friesz, T. and et al. "Dynamic congestion pricing with demand uncertainty: A robust optimization approach", *Transportation Research Part B*, **46**, pp. 1504-1518 (2012).
25. Fernández, L., Joaquin de cea Chi. and Valverde, G. "Effect of advanced traveler information systems and road pricing in a network with non-recurrent congestion", *Transportation Research Part A*, **43**, pp. 481-499 (2009).
26. Gardner, L.M., Boyles, S.D. and Waller, S.T. "Quantifying the benefit of responsive pricing and travel information in the stochastic congestion pricing problem", *Transportation Research Part A*, **45**, pp. 204-218, (2011).

27. Zhong, Sh., Wei, D. and Bushell, M. "Reliability-based congestion pricing model under endogenous equilibrated market penetration and compliance rate of ATIS", *Journal of Central South University*, **22**, pp. 1155-1165 (2015).
28. Javani, Babak. "Multi-class dynamic traffic assignment for urban networks: Path-based formulation and algorithm", *PhD Dissertation, University of Tehran, Tehran, Iran* (2018).
29. Javani, B. and Babazadeh, A. "Origin-destination-based truncated quadratic programming algorithm for traffic assignment problem", *Transportation Letters*, **9**(3), pp. 166-176 (2017).
30. LeBlanc, L.J., Morlok, E.K. and Pierskalla, W.P. "An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem", *Transportation Research*, **9**(5), pp. 309-318 (1975).