

تخمین ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه‌ی معابر با استفاده از نمودار اساسی شبکه باز نمونه‌گیری شده مورد پژوهی بخشی از شبکه‌ی مشهد

سید آرمان حق بیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

میثم اکبرزاده* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۲/۲، ص. ۹۵-۱۰۳ (پژوهشی)

نمودار اساسی شبکه، بیانگر متوسط تردد بر حسب متوسط چگالی معابر یک محدوده از شبکه‌ی معابر شهری است که ظرفیت و چگالی بحرانی ظرفیت و چگالی بحرانی محدوده از آن استخراج می‌شود. ناهمگنی چگالی خودروها در معابر یک محدوده باعث پراکندگی و ناپدید شدن شاخه‌ی ازدحام در نمودار اساسی شبکه آن می‌شود که تخمین مستقیم پارامترهای ذکر شده را با برازش منحنی ناممکن می‌سازد. در پژوهش حاضر، ابتدا نمودار اساسی شبکه برای ناحیه‌ی شهر مشهد با تلفیق داده‌های شناساگرهای حلقه‌ی و دستگاه‌های ثبت موقعیت مکانی و تعداد مسافران خودروهای حمل و نقل همگانی تخمین زده شده است. سپس از روش باز نمونه‌گیری تصادفی برای کاهش اثر ناهمگنی در نمودار اساسی شبکه و تخمین چگالی بحرانی و ظرفیت شبکه استفاده شده است. نتایج حاصل از به کارگیری روش باز نمونه‌گیری تصادفی نشان می‌دهد در شرایطی که امکان تخمین مستقیم پارامترهای نمودار اساسی شبکه وجود ندارد، می‌توان با استفاده از روش اخیر، مقادیر ظرفیت و چگالی بحرانی را در هر اندازه از یک نمونه‌ی مشخص به دست آورد.

واژگان کلیدی: نمودار اساسی شبکه، تلفیق داده‌ها، ناهمگنی.

۱. مقدمه

نمودار اساسی شبکه^۱، رابطه‌ی بین متوسط سرعت، متوسط نرخ تردد و متوسط چگالی را در یک محدوده‌ی مشخص از شبکه‌ی معابر شهری بیان می‌کند و با هم‌فرونی نمودار اساسی کمان‌های محدوده‌ی مورد نظر به دست می‌آید. متوسط‌های چگالی اشاره شده در واقع متوسط وزنی با وزن طول خیابان‌های شهری هستند. نمودار اساسی شبکه، همانند نمودارهای اساسی کمان‌ها (شکل ۱)، سه حالت ترافیکی خلوت، نزدیک ظرفیت و ازدحام دارند. در وضعیت خلوت با افزایش متوسط چگالی، متوسط نرخ تردد تا ظرفیت شبکه افزایش می‌یابد و پس از آن، برای محدوده‌ی از چگالی‌ها، ثابت است و نزدیک به ظرفیت شبکه باقی می‌ماند. اگر چگالی همچنان افزایش یابد، شبکه وارد فاز ازدحام می‌شود و متوسط نرخ تردد شبکه کاهش می‌یابد. برخلاف نمودار اساسی کمان، نمودار اساسی شبکه شامل چگالی راه‌بندان نیست. علت آن است که همواره در شبکه، کمان‌هایی وجود دارند که جریان در آن‌ها با سرعت بیشتر از صفر در حال حرکت است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۳/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۹/۱۵، پذیرش ۱۳۹۹/۹/۲۳

DOI:10.24200/J30.2020.55970.2791

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شکل نمودار اساسی شبکه، مستقل از تقاضاست،^[۱] که مهم‌ترین ویژگی نمودار اساسی شبکه است و برای تخمین وضعیت‌های ترافیکی در مقیاس شبکه استفاده می‌شود. همچنین از نمودار اساسی شبکه، پارامترهای متعددی استخراج می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه هستند. مقادیر مذکور در مواردی، مانند: طراحی کنترل‌کننده‌ی زمان‌بندی چراغ راهنمایی و قیمت‌گذاری معابر برای بهبود کیفیت تردد،^[۲] و کاهش آلاینده‌ی،^[۳] در محدوده‌های شهری به کار رفته‌اند. ویژگی مهم نمودار اساسی شبکه و کاربردهای گسترده‌ی آن، ضرورت تخمین نمودار اساسی شبکه و انجام پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. تخمین نمودار اساسی شبکه، مستلزم گردآوری اطلاعات واقعی از چگالی و نرخ تردد در معابر محدوده‌ی شهری مورد نظر است. اما نصب تجهیزات ثبت اطلاعات ترافیکی در همه‌ی معابر شهری امکان‌پذیر و موجه نیست. به همین دلیل، محدودیت داده‌ها، یکی از چالش‌های اصلی در تخمین نمودار اساسی شبکه با دقت مناسب است. علاوه بر این، اثر ناهمگنی نیز باعث ناپدید شدن شاخه‌ی ازدحام در نمودار اساسی شبکه و عدم قطعیت در تخمین مقادیر پارامترهای آن می‌شود. هدف از انجام پژوهش حاضر، به کارگیری روشی برای برطرف کردن چالش‌های

آن، محدوده را قیمت‌گذاری می‌کنند. گرولمینس و لوینسون (۲۰۰۹)، مبنای نظری آن را برای اولین بار معرفی و با استفاده از نمودار اساسی شبکه بر شبکه‌ی یوکاهاما ژاپن در ساعت اوج صبح پیاده‌سازی کردند و دریافتند که راهبرد قیمت‌گذاری در کاهش تأخیر خودروها بسیار تأثیرگذار بوده است.^[۹]

نمودارهای اساسی شبکه با شبیه‌سازی و با داده‌های شهری تخمین زده می‌شوند. گرولمینس و داگانزو (۲۰۰۸)، اولین افرادی بودند که نمودار اساسی شبکه را از داده‌های واقعی شبکه‌ی یوکاهاما ژاپن استخراج کردند. ایشان ابتدا با استفاده از اطلاعات شناساگرها، رابطه‌ی بین مقادیر همفرزون‌سازی شده‌ی نرخ تردد و چگالی را بررسی کردند. رابطه‌ی مذکور، مستقل از مقادیر تقاضا و زمان بود که وجود نمودار اساسی شبکه را نشان می‌داد. سپس با استفاده از اطلاعات مکانی و زمانی تاکسی‌های مجهز به سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی، همبستگی نرخ تردد در شناساگرهای خروجی ناحیه به میانگین وزن‌دار نرخ تردد در داخل ناحیه را بررسی و وجود یک نسبت تقریباً ثابت از دو متغیر ذکر شده را نیز نشان دادند.^[۱۰] ایشان در پژوهشی دیگر نیز یک روش تحلیلی با عنوان روش ترسیم برش‌ها برای تخمین نمودار اساسی شبکه ارائه کردند که نیازمند حجم کم داده‌ها و تخمین پارامترهایی بود، که به‌دست آوردن مقادیر آن‌ها در مقیاس شبکه دشوار است. هدف از روش ترسیم برش‌ها، تخمین نمودار اساسی شبکه برای شبکه‌های کاملاً همگن و حد بالای نمودار برای شبکه‌های واقعی (ناهمگن) است. حد بالای نمودار اساسی شبکه در هر چگالی، بیشترین نرخ تردد ممکن در زیرساخت‌های شبکه را نشان می‌دهد.^[۱۱] در شبکه‌ی کاملاً همگن، نمودارهای اساسی کمان‌ها و توزیع چگالی یکسان است.

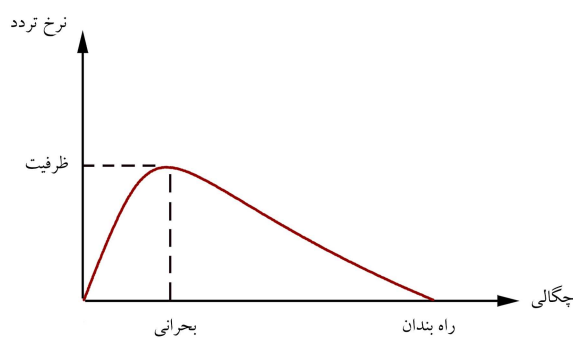
کربن و لکلرک^۸ (۲۰۱۱)، روش‌های مختلف برای تخمین نمودار اساسی شبکه را با شبیه‌سازی مقایسه کردند که شامل: روش‌های تحلیلی ترسیم برش‌ها، استفاده از اطلاعات شناساگرها و استفاده از خط سیر خودروها بوده است. علت استفاده از ابزار شبیه‌سازی، جلوگیری از تأثیر خطای داده‌های واقعی و ناهمگنی در شبکه بود. برای هر سه روش، یک شبکه‌ی ساده با ویژگی‌های یکسان (کاملاً همگن) در نظر گرفته شد. در نهایت، ایشان خطای هر روش را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که نمودار اساسی شبکه‌ی به‌دست آمده از خط سیر خودروها، کمترین خطا را دارد.^[۱۲] با استفاده از روابط ۱ و ۲ مشهور به روابط ادی^۹ می‌توان مقادیر چگالی (k) و نرخ تردد (q) را از مجموع مسافت و زمان سفر خودروها (خط سیر خودروها) محاسبه کرد:

$$k = \frac{\sum_1^I t_i}{L_n \times T} \quad (1)$$

$$q = \frac{\sum_1^I d_i}{L_n \times T} \quad (2)$$

که در آن‌ها، L_n طول شبکه، T بازه‌ی زمانی مشاهده، t_i زمان سفر هر خودرو، d_i مسافت طی شده‌ی هر خودرو و I تعداد کل سفرها را نشان می‌دهد.

اورتیگوسا^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۴)، نیز با شبیه‌سازی شبکه‌ی زوربخ و اطلاعات شناساگرها، میزان پوشش اطلاعات (تعداد کمان‌های دارای شناساگرها) موردنیاز را برای تخمین نمودار اساسی شبکه بررسی کردند. آن‌ها نمودارهای اساسی شبکه‌ی به‌دست آمده از بخشی از شناساگرها را با نمودار اساسی شبکه‌ی به‌دست آمده از کل شناساگرها مقایسه کردند که براساس نسبت‌های چگالی و ارزیابی خطای نمودارها بود و دریافتند که در هر نسبت چگالی، وجود دست‌کم ۲۵٪ از اطلاعات شناساگرها برای تخمین یک نمودار اساسی شبکه با خطای کم موردنیاز است.^[۱۳] تلفیق داده‌ها^{۱۱}، یکی دیگر از روش‌های تخمین نمودار اساسی شبکه است. پژوهشگران از روش تلفیق داده‌ها برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش تأثیر طول و



شکل ۱. نمودار اساسی کمان (منحنی نرخ تردد برحسب چگالی).

اشاره شده است. روش ذکر شده مبتنی بر استفاده‌ی همزمان از اطلاعات شناساگرهای ثبت جریان و تجهیزات موقعیت‌یاب اتوبوس‌های شهری است. این منابع داده‌ها در عموم کلان‌شهرهای کشور وجود دارند. با استفاده از روش اخیر می‌توان نمودار اساسی، ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه را تخمین زد و از آن برای مدیریت بهتر شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری بهره برد.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر و بخش دوم آن، برخی از مطالعات انجام شده با نمودار اساسی شبکه به منظور شناخت مفاهیم و کاربردهای آن مرور شده است. همچنین در انتهای بخش دوم، علت به‌کارگیری هر یک از روش‌ها با بیان محدودیت‌های موجود در تخمین چگالی بحرانی و ظرفیت شبکه از نمودار اساسی مشخص شده است. در بخش سوم، ابتدا روش استفاده شده برای تخمین نمودار اساسی بیان شده و سپس روش بازنمونه‌گیری تصادفی برای تخمین ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه شرح داده شده است. در بخش چهارم، محدوده‌ی مورد مطالعه از شبکه‌ی معابر شهر مشهد همراه با جزئیات داده‌های استفاده شده ارائه شده است. در بخش پنجم، نیز نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر محدوده‌ی مورد مطالعه ارائه شده است.

۲. تاریخچه و ادبیات موضوع

اولین نمودار اساسی شبکه با استفاده از داده‌های واقعی توسط گادفری^۲ (۱۹۶۹) برازش شده است.^[۵] پس از آن، داگانزو^۳ (۲۰۰۷)، یک راه‌حل نظری برای کاهش ازدحام و جلوگیری از مسدود شدن شبکه ارائه داد، که مبنای آن کنترل جریان ورودی به سامانه (کنترل محیطی^۴) با استفاده از نمودار اساسی شبکه بوده است.^[۲] پژوهش اخیر، نقطه‌ی شروع استفاده از نمودار اساسی شبکه بود و پس از آن مطالعات گسترده‌ی برای بررسی کاربردهای آن انجام شد. در بخش کنونی، مطالعات مرتبط‌تر با عنوان نوشتار مرور شده است.

گرولمینس^۵ و داگانزو (۲۰۰۷)، راه‌حل ارائه شده را با شبیه‌سازی خیابان‌هایی در لس‌آنجلس و سان‌فرانسیسکو سنجیدند و نرخ تردد خروجی را با محدود کردن چگالی شبکه در یک مقدار بهینه و جلوگیری از ورود بیشتر خودروها افزایش دادند.^[۶] اکباتانی و همکاران (۲۰۱۲)، نیز تأثیر اعمال کنترل محیطی با استفاده از کنترل‌کننده‌ی پس‌خوراند^۶ را در کاهش تأخیر خودروها نشان دادند.^[۷] همچنین گرولمینس و همکاران (۲۰۱۳)، با طراحی کنترل‌کننده‌ی پیش‌بینی مبتنی بر مدل^۷ و آزمایش آن بر دو ناحیه با سطح ازدحام‌های متفاوت، کارآبودن روش کنترل محیطی را نشان دادند.^[۸]

یکی دیگر از روش‌های کنترل جریان ورودی، قیمت‌گذاری محدوده است. پژوهشگران با استفاده از نمودار اساسی شبکه و استخراج ظرفیت و چگالی بحرانی از

۳. خودروها به طور یکنواخت در طول کمان توزیع شده‌اند.

۴. رکوردهای ثبت شده در هر سه منبع داده بدون اختلاف زمانی نسبت به یکدیگرند.

۵. تمامی مسافران هنگام سوار شدن کارت زده و در سامانه‌ی AFC ثبت شده‌اند.

۶. سرعت به دست آمده از داده‌های AVL برای کمان و همه‌ی باندهای عبور موجود در آن است.

۱.۳. روش تلفیق داده‌ها

با توجه به شکل ۲، تلفیق داده‌ها با ترکیب اطلاعات شناساگرهای حلقوی القایی (ILD) ۱۹، سامانه‌ی تعیین موقعیت خودکار وسیله‌ی نقلیه (AVL) ۲۰ و سامانه‌ی اخذ کرایه‌ی خودکار (AFC) ۲۱ انجام می‌شود. متوسط نرخ تردد خودروها با استفاده از اطلاعات شناساگرها و رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$q_c^{ILD}(\tau) = \frac{\sum_{i \in \ell} \sum_{r \in R_i} q_{i,r}(\tau) L_{i,r}}{\sum_{i \in \ell} \sum_{r \in R_i} L_{i,r}} \quad (3)$$

که در آن، $(q_{i,r})$ نرخ تردد ثبت شده در شناساگرها با وزن طول باند $(L_{i,r})$ است که در آن ℓ مجموعه‌ی کمان‌های شبکه، R_i مجموعه باندهای کمان i و τ بازه‌ی زمانی مورد بررسی است.

اطلاعات سامانه‌ی خودکار مکان‌یاب اتوبوس‌های شهری برای تخمین متوسط سرعت مکانی خودروها استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۴، متوسط سرعت اتوبوس‌ها $(v_{b,i})$ و رابطه‌ی ۵، سرعت کروزر ۲۲ اتوبوس‌ها $(v_{b,i}^c)$ در هر کمان را مشخص می‌کند. متوسط سرعت مکانی خودروها (همراه با فرضیات شش‌گانه) مقداری بین دو سرعت $v_{b,i}^c$ و $v_{b,i}$ خواهد بود:

$$v_{b,i}(\tau) = \frac{\sum_{z \in \beta_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{z \in \beta_i(\tau)} t_{b,i,z}(\tau)} \quad \forall i \in A \quad (4)$$

$$v_{b,i}^c(\tau) = \frac{\sum_{z \in \beta_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{z \in \beta_i(\tau)} (t_{b,i,z}(\tau) - t_{b,i,z}^w(\tau))} \quad \forall i \in A \quad (5)$$

که در آن‌ها، A نشان‌دهنده‌ی مجموعه‌ی کمان‌هایی است که اطلاعات AVL دارند؛ $\beta_i(\tau)$ مجموعه‌ی اتوبوس‌هایی است که در بازه‌ی زمانی τ از کمان i عبور می‌کنند؛ $d_{b,i,z}(\tau)$ مسافت، $t_{b,i,z}(\tau)$ زمان سفر، و $t_{b,i,z}^w(\tau)$ زمان توقف برای سوار و پیاده کردن مسافران هر اتوبوس (z) در کمان i است.

توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها، در سرعت حرکت خودروها در معابر اثرکاهنده دارد. وزن تأثیر مذکور از سه قسمت تشکیل شده است (رابطه‌ی ۶) قسمت اول، نشانگر نسبتی از خودروهای تأثیرپذیر از حرکت اتوبوس است که به صورت حاصل ضرب نسبت مجموع زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه $(t_{b,i}^w = \sum_{z \in \beta_i(\tau)} t_{b,i,z}^w)$ به مقدار بازه‌ی زمانی مشاهده (T) در نسبت سرعت سیر آزاد اتوبوس (v_b^f) به متوسط سرعت اتوبوس‌ها در کمان است. قسمت دوم، متوسط خودروهای تأثیرپذیر از زمان توقف اتوبوس را نشان می‌دهد. با فرض توزیع یکنواخت خودروها، به طور متوسط نیمی از خودروها در کمان تحت تأثیر قرار می‌گیرند. قسمت سوم، تأثیر ساختار شبکه‌ی اتوبوس در سرعت خودروها را با نوع ایستگاه (δ_i) و تعداد باندهای عبور هر کمان نشان می‌دهد. اگر فضای ایستگاه از کمان جدا باشد، δ_i برابر با صفر و در غیر این صورت، ۱ است.

$$n_i(\tau) = \min\{1, (\frac{t_{b,i}^w}{T}) \cdot (\frac{v_b^f}{v_{b,i}(\tau)}) \cdot (\frac{1}{\gamma}) \cdot (\max\{0, 2 - |R_i| \}) \cdot \delta_i\} \quad \forall i \in A \quad (6)$$

مکان شناساگرها در محاسبه‌ی متوسط چگالی استفاده می‌کنند. گایا ۱۲ و همکاران (۲۰۱۴)، با ابزار شبیه‌سازی و استفاده از اطلاعات مکانی و زمانی خودروهای مجهز به سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ۱۳ و در حال حرکت (خودروهای شناور ۱۴) و با فرض پراکندگی یکنواخت خودروهای شناور در شبکه، متوسط چگالی را محاسبه کردند. [۱۳] آمبول و منندز ۱۵ (۲۰۱۶)، الگوریتمی برای تلفیق اطلاعات از خودروهای شناور و شناساگرها ارائه دادند و عملکرد الگوریتم را با شبیه‌سازی شهر زوریخ ارزیابی کردند و با دقت قابل توجهی به نمودار اساسی شبکه، حتی در حالت پراکندگی غیریکنواخت خودروهای شناور رسیدند. [۱۴] داکویچ ۱۶ و منندز (۲۰۱۸) نیز با تلفیق اطلاعات حمل‌ونقل همگانی و شناساگرها، نمودار اساسی شبکه را برای شهر زوریخ رسم کردند. [۱۵]

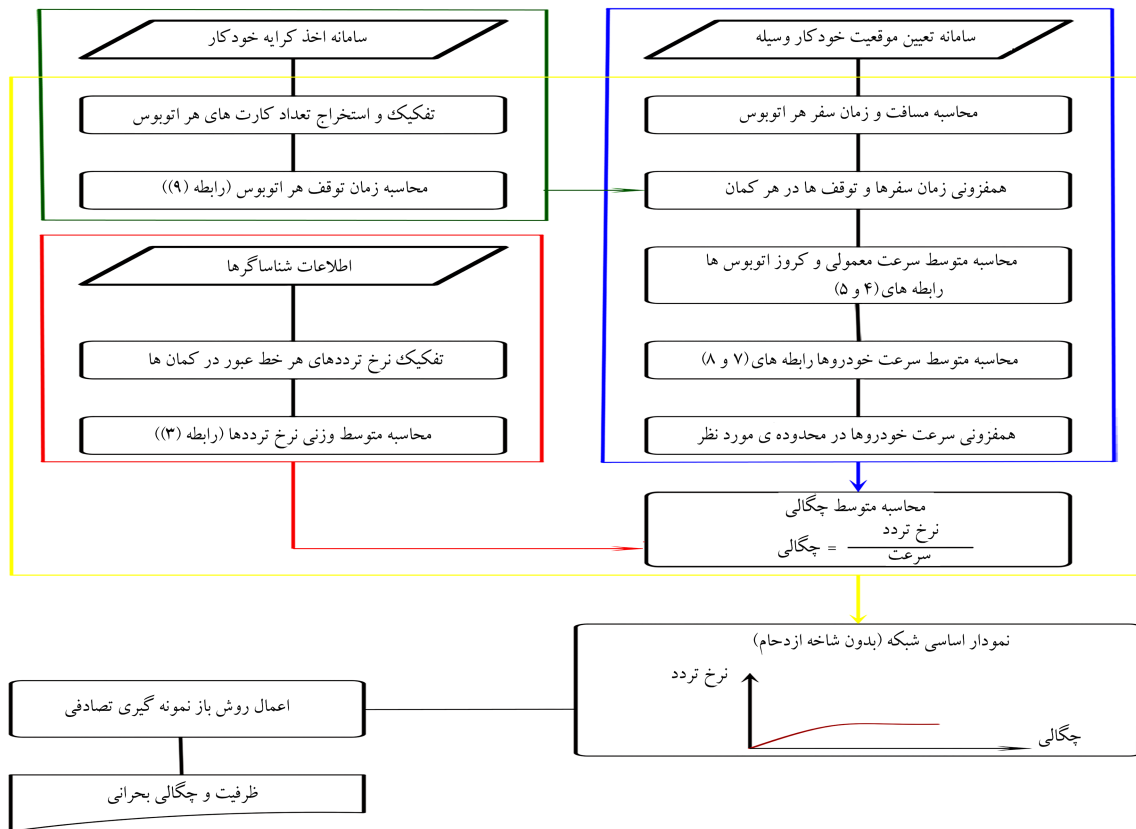
علاوه بر روش‌های تخمین نمودار اساسی شبکه، بررسی عوامل مؤثر در شکل آن نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. زمان‌بندی چراغ‌ها، توپولوژی شبکه، تنوع طبقه‌بندی معابر، توزیع چگالی در شبکه، طول و مکان شناساگرها از جمله‌ی عوامل مذکور هستند. بوسون و لادیر ۱۷ (۲۰۰۹) با استفاده از داده‌های شهر تولوز فرانسه، عوامل مؤثر در میزان پراکندگی و شکل نمودار اساسی شبکه را بررسی کردند. [۱۶] گروولیمینیس و سان ۱۸ (۲۰۰۷) واریانس میزان اشغال شناساگرها را برای یک مقدار مشخص چگالی مقایسه و سپس کاهش متوسط نرخ تردد را با افزایش مقدار واریانس مشاهده کردند. کاهش اخیر باعث ایجاد پراکندگی در نمودار اساسی شبکه می‌شود. [۱۷]

با توجه به مطالعات پیشین و منابع داده‌ی در دسترس در کلان‌شهرهای کشور، در پژوهش حاضر از روشی براساس تلفیق اطلاعات حمل‌ونقل همگانی و شناساگرهای حلقه‌ی استفاده شده است که توسط داکویچ و منندز (۲۰۱۸) مطرح و با تخمین نمودار اساسی شبکه‌ی شهر زوریخ ارزیابی شده است. [۱۵] نمودار به دست آمده از روش ذکر شده، بدون شاخه‌ی ازدحام است و امکان تخمین مقادیر ظرفیت و چگالی بحرانی با برآزش منحنی از آن وجود ندارد. نبود شاخه‌ی ازدحام در نمودار به دست آمده به دلیل اثر ناهمگنی است. لذا در پژوهش حاضر، از روش بازنمونه‌گیری تصادفی برای تخمین مقادیر ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه استفاده شده است. همچنین نحوه‌ی تأثیر ناهمگنی در شکل نمودار اساسی شبکه و پارامترهای آن با پیاده‌سازی روش مذکور مشاهده می‌شود.

۳. روش پژوهش

روش پیشنهادی شامل دو بخش اصلی است: در بخش اول، فرضیات و روابط موردنیاز برای تلفیق داده‌ها ارائه شده است. در بخش دوم، روش بازنمونه‌گیری تصادفی برای تخمین ظرفیت و چگالی بحرانی یک محدوده‌ی مورد مطالعه‌ی شبکه‌ی شهری شرح داده شده است. شکل ۲، روند پژوهش را نشان می‌دهد. مراحل داخل کادر زرد برای هر بازه‌ی زمانی τ انجام می‌شود. در پژوهش حاضر، ۶ فرض در نظر گرفته شده است:

۱. سرعت سیر آزاد اتوبوس‌ها برابر با سرعت سیر آزاد خودروهای سواری است. در معابر غیر بزرگراهی، سرعت سیر آزاد اتوبوس و خودروی سواری تفاوت چندانی ندارند و همچنین تأثیر سرعت سیر آزاد در پارامتر سرعت سیر آزاد نمودار اساسی شبکه است و در چگالی بحرانی و ظرفیت شبکه، تأثیری ندارد.
۲. از مانورهای اتوبوس در نزدیکی ایستگاه (پهلویگیری، توقف، الحاق) صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۲. روند نمای مراحل پژوهش.

است. بنابراین تخمین نمودار اساسی برای تمام ترکیب‌های ممکن $(c = \left[\frac{N}{N_s} \right])$ از یک اندازه‌ی نمونه (N_s) احتمال به‌دست آوردن نمودارهای اساسی شبکه با کمترین حساسیت به ناهمگنی را افزایش می‌دهد. [۱۸]

۲.۲.۳. تخمین چگالی بحرانی با روش بازنمونه‌گیری تصادفی

پس از رسم نمودار از تمام ترکیب‌های ممکن، حد بالای نمودارهای مذکور استخراج می‌شود. برای این کار، ابتدا مقادیر چگالی دسته‌بندی و سپس در هر دسته، میانه‌ی تعداد مشخصی (M) از بیشترین نرخ تردهای موجود در آن دسته به عنوان بالاترین نرخ تردد در چگالی مذکور در نظر گرفته می‌شود. انتخاب تعداد مشخصی از بیشترین نرخ تردها و محاسبه‌ی میانه‌ی آن‌ها به این دلیل است که از انتخاب داده‌های پرت جلوگیری شود. در نهایت، نرخ تردد معادل با صدک ۹۷٫۵ از نرخ تردهای موجود در حد بالای نمودارها به عنوان ظرفیت و همچنین متوسط چگالی متناظر با آن به عنوان چگالی بحرانی نیز انتخاب شده است.

۲.۲.۳. تخمین سطح ناهمگنی با روش بازنمونه‌گیری تصادفی

ظرفیت باقیمانده، شاخصی برای تخمین سطح ناهمگنی محدودده‌ی موردنظر است. مقدار شاخص آن در هر اندازه‌ی نمونه‌ی مشخص، برابر با اختلاف بیشترین ظرفیت در کل ترکیب‌های ساخته شده در آن اندازه‌ی نمونه و ظرفیت کل نمونه است. شاخص ظرفیت باقیمانده نشان می‌دهد که اگر تمام کمان‌ها همانند کمان‌های زیر نمونه رفتار کنند، به اندازه‌ی مقدار شاخص مذکور به ظرفیت کل نمونه افزوده می‌شود. در شرایط کاملاً همگن، مقادیر شاخص ظرفیت باقیمانده در تمامی اندازه‌ی نمونه‌ها برابر با صفر است. هر چه اندازه‌ی نمونه کوچک‌تر باشد، مقدار شاخص بزرگ‌تر است.

در نهایت، با اعمال وزن بدست آمده برای هر کمان (رابطه ۷)، متوسط سرعت مکانی خودروها در قسمت موردنظر شبکه $(v_c AVL)$ با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود. اطلاعات سامانه‌ی اخذ کرایه‌ی خودکار (AFC) در اتوبوس‌ها برای تخمین زمان توقف سپری شده در ایستگاه‌ها $(t_{b,i,z}^w(\tau))$ استفاده شده است.

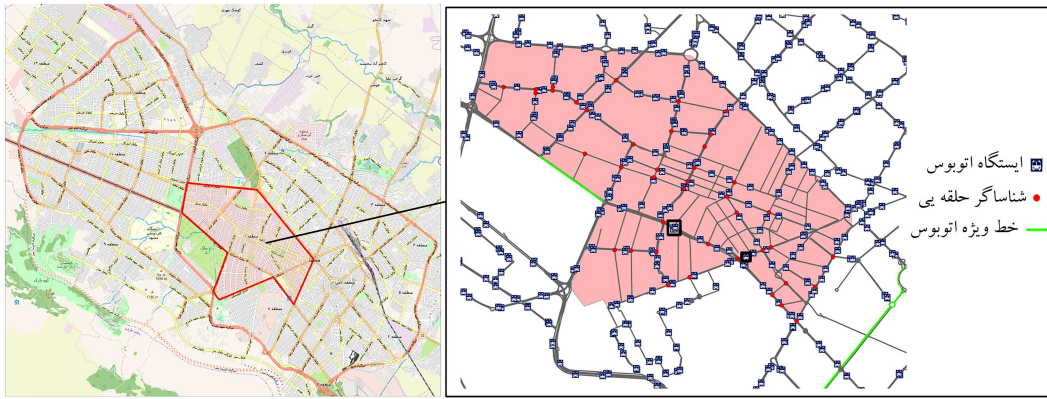
$$t_{b,i}^{cor}(\tau) = n_i(\tau) \times \sum_{z \in R_i} t_{b,i,z}(\tau) + (1 - n_i(\tau)) \times \sum_{z \in R_i} t_{b,i,z}^c(\tau) \quad (7)$$

$$\forall i \in A$$

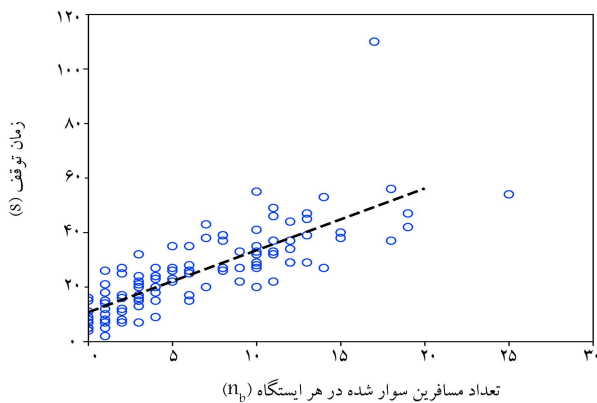
$$v_c^{AVL}(\tau) = \frac{\sum_{i \in A(\tau)} \sum_{z \in \beta_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{i \in A(\tau)} t_{b,i}^{cor}(\tau)} \quad (8)$$

۲.۳. روش بازنمونه‌گیری تصادفی

هدف از روش بازنمونه‌گیری تصادفی، دستیابی به نمودارهای اساسی شبکه از کمان‌های همگن است. در روش بازنمونه‌گیری تصادفی، در هر اندازه‌ی نمونه‌ی مشخص (N_s) ، نمونه‌گیری به تعداد دفعات زیاد از تمامی کمان‌های موجود انجام می‌شود و در هر تکرار، نمودار اساسی شبکه‌ی آن‌ها رسم می‌شود. به منظور درک روش بازنمونه‌گیری تصادفی، یک شبکه‌ی کاملاً همگن در نظر بگیرید. در شرایط کاملاً همگن، توزیع چگالی و نمودار اساسی کمان‌ها یکسان و برابرند. در این حالت، حد بالای نمودار اساسی شبکه‌ی به‌دست آمده از تمامی کمان‌ها معادل با حد بالای نمودار به‌دست آمده از روش بازنمونه‌گیری و زیرنمونه‌های آن است. اما در حالتی که ناهمگنی وجود داشته باشد (مطابق با واقعیت)، حد بالای نمودار به‌دست آمده از زیرنمونه‌ها، به مراتب پایین‌تر از حد بالای نمودار اساسی شبکه در حالت کاملاً همگن



شکل ۳. محدوده مورد مطالعه و توزیع منابع داده‌ها.



شکل ۴. اطلاعات ثبت شده در برداشت میدانی.

۴. مورد پژوهی

محدوده‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، شامل منطقه‌ی ۱ و بخشی از منطقه‌ی ۸ شبکه‌ی معابر شهری مشهد با مساحت تقریباً ۱۷ کیلومترمربع است. مرز و موقعیت محدوده در شکل ۳ مشاهده می‌شود و داده‌های آن برای ۱۱ روز، از تاریخ ۱ تا ۱۲ اسفند ۱۳۹۷ برداشت شده است. دو منطقه‌ی اخیر از جمله مناطق مرکزی مشهد هستند و پوشش مناسب اطلاعات شناساگرهای حلقه‌یی و خطوط حمل‌ونقل همگانی، علت انتخاب آن‌هاست. محدوده‌ی مورد مطالعه، ۳۰۵ شناساگر فعال دارد که تمامی آن‌ها در انتهای کمان‌ها قرار دارند. اطلاعات شناساگرها فقط شامل نرخ تردد در هر ۱۵ دقیقه بر حسب هر باند عبور است و امکان گزارش میزان اشغال آن‌ها وجود ندارد. پیاده‌سازی روش مذکور نیازمند وجود هر دو منبع داده در هر کمان است که تقریباً ۴۰٪ کمان‌های محدوده‌ی مورد مطالعه، شرایط اشاره شده را دارند. به دلیل نیاز به داده‌های AVL، زمان تحلیل از ساعت ۶ الی ۲۱:۱۵ (متناسب با ساعت‌های کار اتوبوس‌رانی) تعیین شده است. بازه‌ی زمانی ۱۵ دقیقه (۱۵ = τ)، برای تحلیل و هم‌فرونی مقادیر در نظر گرفته شده است. هم‌فرونی کمتر از ۱۵ دقیقه با توجه به نوع داده‌ها ممکن نیست. بدین دلیل است که امکان خروجی گرفتن از داده‌های شناساگرها کمتر از ۱۵ دقیقه در این وسعت وجود ندارد و همچنین تراکم داده‌های سامانه‌ی حمل‌ونقل همگانی متأثر از ضریب نفوذ ۲۲ آن در محدوده‌ی مورد نظر و سر فاصله‌ی زمانی اتوبوس‌هاست.

اطلاعات AVL، شامل حجم زیادی از رکوردهای مربوط به موقعیت مکانی و زمانی اتوبوس‌ها در کل شبکه است که در محدوده‌ی هر ایستگاه و در فاصله‌ی مشخص (تقریباً ۱۰۰ متر) از آن ثبت می‌شود. مطابق با داده‌های موجود می‌توان کمان‌ها را در ۳ گروه مختلف در نظر گرفت: ۱. کمان‌هایی که بیش از یک ایستگاه در آن‌ها وجود دارد، لذا می‌توان از رکوردهای ثبت شده در همان کمان استفاده کرد؛ ۲. کمان‌هایی که فقط یک ایستگاه در آن وجود دارد؛ ۳. کمان‌هایی که در آن‌ها ایستگاه وجود ندارد، اما اتوبوس از آن‌ها عبور می‌کند؛ که در دو گروه آخر می‌توان از رکوردهای ثبت شده در کمان‌های قبل و بعد از کمان مورد نظر استفاده کرد. از اطلاعات اخیر، مسافت و زمان سفر هر اتوبوس در هر کمان موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه و با اطلاعات AVL محاسبه می‌شود. اطلاعات AFC، شامل رکوردهای مربوط به تراکنش‌های انجام شده در هر ایستگاه و به تفکیک اتوبوس است. از این اطلاعات به منظور محاسبه‌ی زمان توقف سپری شده در ایستگاه‌ها استفاده شده است. زمان توقف سپری شده در ایستگاه‌ها با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی و تعداد

مسافران سوار شده در هر ایستگاه محاسبه می‌شود. تعداد مسافران سوار شده در هر ایستگاه همراه با فرضیات شش‌گانه از داده‌های AFC به دست می‌آیند. در این فرایند، ابتدا بازه‌ی زمانی حضور هر اتوبوس در هر کمان از اطلاعات AVL مشخص می‌شود و سپس با استفاده از اطلاعات AFC و تفکیک آن‌ها براساس بازه‌های زمانی ذکر شده و شناسه‌ی ایستگاه‌ها و اتوبوس‌ها، تعداد تراکنش‌های انجام شده در هر ایستگاه استخراج می‌شود. مقدار به دست آمده از اطلاعات AFC به عنوان متغیر مستقل مدل خطی در نظر گرفته می‌شود. برداشت میدانی از سه ایستگاه با کدهای ۲۳۰۱، ۲۲۶۹، ۲۲۷۰ (مربع‌های مشکی در شکل ۳) در تاریخ ۲۱ خرداد ۱۳۹۸ از ساعت ۹ الی ۲۱ برای تخمین ضرایب مدل انجام شده است. ایستگاه‌ها براساس کمترین سر فاصله‌ی زمانی اتوبوس‌ها و بیشترین خطوط عبوری از آن‌ها انتخاب شده‌اند. محل توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه ۲۲۶۹ از فضای کمان جداست، اما در دو ایستگاه دیگر نیست. در شکل ۴، نقاط ثبت شده در برداشت میدانی و مدل خطی آن مشاهده می‌شود.

در برداشت میدانی، زمان توقف هر اتوبوس در ایستگاه‌ها و تعداد مسافران سوار شده ثبت شده است. زمان توقف، شامل: زمان سوار و پیاده شدن مسافران و باز و بسته شدن درب است. در رابطه‌ی ۹، مدل خطی به دست آمده ارائه شده است:

$$dwell\ time(s) = ۲,۲۷ \times n_b + ۱۰,۷۶ \quad (۹)$$

که در آن، n_b تعداد مسافران سوار شده در هر ایستگاه است. ضریب تعیین ۲۴ آن

۰٫۶۳ است، و آزمون تحلیل واریانس^{۲۵} برای معنی‌داری مدل و آزمون تی^{۲۶} برای معناداری متغیر انجام شده است. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهند که مدل موردنظر با اطمینان ۹۵٪ قادر به بیان تغییرات زمان توقف است.

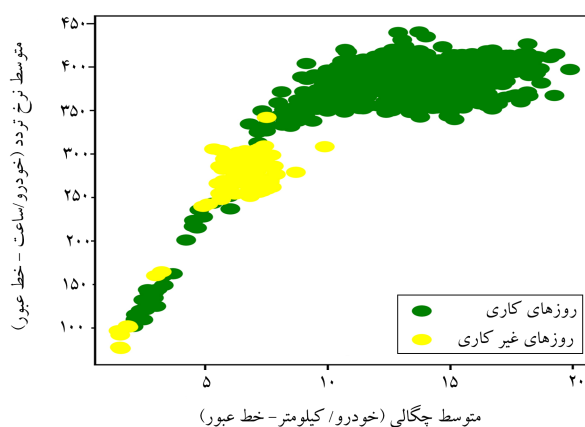
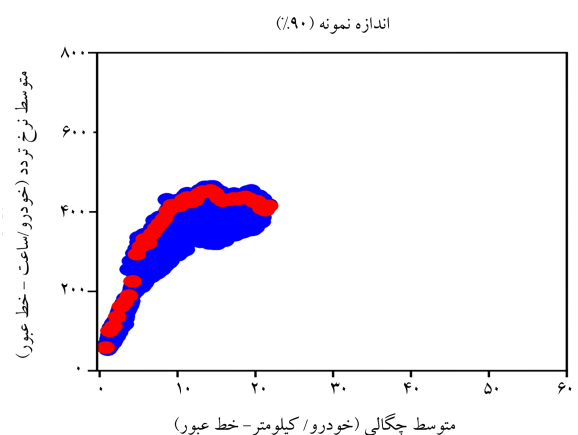
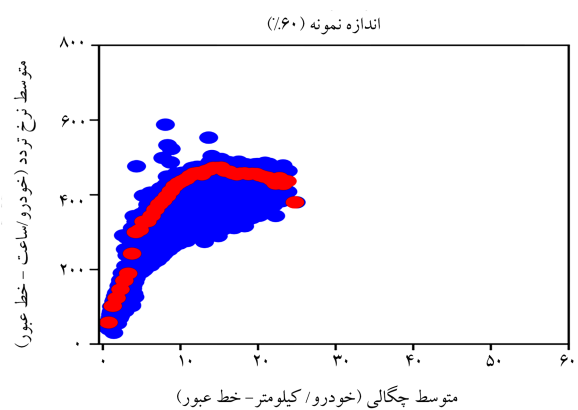
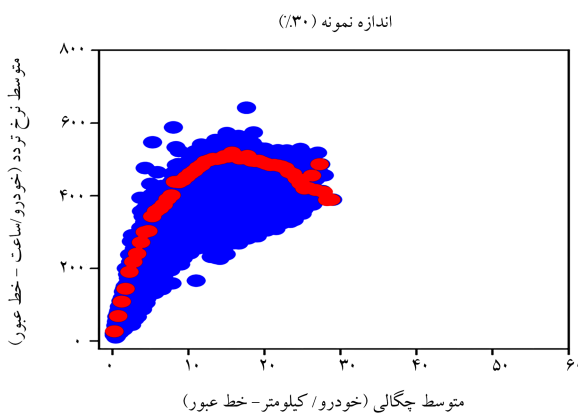
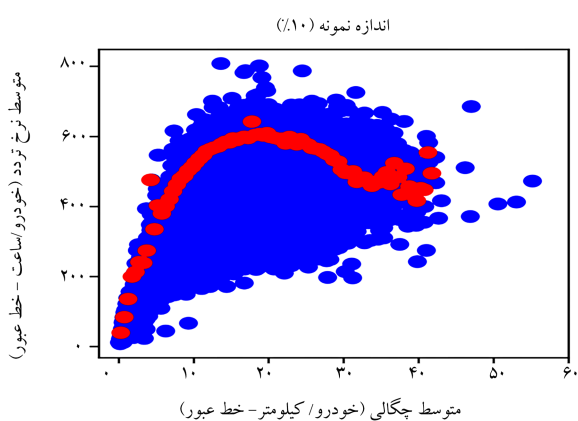
۵. نتایج

نتایج مربوط به تخمین نمودار اساسی، ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه در بخش حاضر ارائه شده است. نمودار اساسی شبکه در محدوده‌ی مورد مطالعه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، حاصل هم‌فرونی مقادیر نرخ تردد و چگالی کمان‌های شبکه در ۱۱ روز است که شامل ۲ روز غیرکاری (جمعه) و ۹ روز کاری است.

با توجه به مقادیر موجود در نمودار اخیر، وضعیت خلوت در شبکه برای متوسط چگالی‌های کمتر از ۸ خودرو در هر کیلومتر - خط عبور گزارش می‌شود و مقادیر بیشتر از آن (چگالی بحرانی)، نرخ تردهای در محدوده‌ی ۳۲۰ تا ۴۲۰ خودرو در هر ساعت - خط عبور را تجربه می‌کند. این نتایج عدم وابستگی شکل نمودار به ماتریس تقاضا را نشان می‌دهد. شاخه‌ی ازدحام در شکل ۵ مشخص نیست. به همین دلیل، از روش بازنمونه‌گیری تصادفی استفاده شده است. در روش بازنمونه‌گیری تصادفی، نمودارهای اساسی شبکه‌ی بازنمونه‌گیری شده در اندازه‌ی نمونه‌های مختلف با ۵۰۰ انتخاب تصادفی ترسیم و حد بالای آن‌ها استخراج شده است. در شکل ۶، نمودارهای به دست آمده در اندازه‌ی نمونه‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ درصد مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش اندازه‌ی نمونه، چگالی و ظرفیت در نمودارها کاهش و شاخه‌ی ازدحام ناپدید می‌شود. اثر ناهمگنی در نمودار اساسی شبکه با مقایسه‌ی نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود. پراکندگی زیاد در اندازه‌ی نمونه‌ی ۱۰ درصدی، به دلیل تنوع فراوان در تعداد انتخاب‌هاست.

مقادیر شاخص ظرفیت باقیمانده برای هر اندازه‌ی نمونه در محدوده‌ی مورد مطالعه با هدف تخمین اثر ناهمگنی در ظرفیت شبکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که با توجه به آن، اگر تمامی کمان‌های محدوده‌ی مورد مطالعه همانند نمونه‌ی ۱۰ درصدی عمل کنند، اثر ناهمگنی کاهش و ظرفیت شبکه ۵۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین شیب نمودار در اندازه‌ی نمونه‌ی ۹۰ درصدی نشان می‌دهد که با حذف ۱۰٪ از کمان‌ها، به ظرفیت شبکه ۱۰٪ افزوده می‌شود.

پس از محاسبه‌ی شاخص ظرفیت باقیمانده، چگالی بحرانی نیز در همه‌ی اندازه‌ی نمونه‌ها تخمین زده شده است. مقادیر چگالی بحرانی همانند ظرفیت باقیمانده با



شکل ۵. نمودار اساسی شبکه در محدوده‌ی مطالعه شده.

شکل ۶. نمودارهای اساسی شبکه بازنمونه‌گیری شده در اندازه نمونه‌های مختلف.

نمونه‌های ۱۰ و ۲۰ درصدی به دست می‌آید. بنابراین در صورت استفاده از داده‌های روزهای غیرکاری، اندازه‌ی نمونه‌های بیشتر از ۲۰٪ بدون شاخه‌ی ازدحام هستند. دقت روش اخیر با محاسبه‌ی خطای نسبی چگالی‌های بحرانی داده‌ها در بازه‌های زمانی یک روزه از کل داده‌ها (۱۱ روز) بررسی شده است. محدوده‌ی خطاهای نسبی در هر اندازه‌ی نمونه در شکل ۸ مشاهده می‌شود. این محدوده با مقادیر پیشینه، میانه و کمینه‌ی خطای نسبی در هر اندازه‌ی نمونه مشخص شده است. مطابق با نمودار اشاره‌شده، مقادیر میانه برای تمامی اندازه‌های نمونه‌ها، تقریباً نزدیک به صفر است. مقادیر پیشینه و کمینه در محدوده‌ی بین ۸ تا ۲۵ درصد نوسان می‌کنند.

۶. نتیجه‌گیری

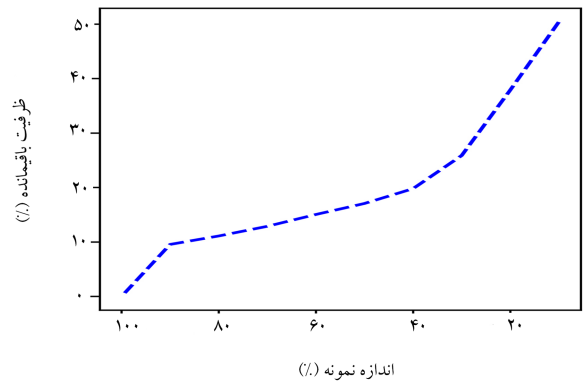
پژوهش حاضر با هدف معرفی روشی برای تخمین ظرفیت و چگالی بحرانی شبکه انجام شده است. نمودار اساسی شبکه، ابزار اصلی در تخمین پارامترهای شبکه است، که در فرایند ترسیم آن، ابتدا انواع روش‌های موجود بررسی و سپس روشی براساس منابع داده‌ی موجود در شهر مشهد استفاده شده است. به کارگیری داده‌های اشاره شده و روش موردنظر، باعث افزایش اثر ناهمگنی در نمودار و ناپدید شدن شاخه‌ی ازدحام در آن شده است. تخمین مستقیم ظرفیت و چگالی بحرانی از نمودارهای بدون شاخه‌ی ازدحام ممکن نیست. به همین دلیل در پژوهش حاضر از روش بازنمونه‌گیری تصادفی استفاده شده و مقادیر ظرفیت و چگالی بحرانی با ترسیم نمودارهای اساسی بازنمونه‌گیری شده در اندازه‌ی نمونه‌های مختلف تخمین زده شده است. شاخص ظرفیت باقیمانده نیز به منظور بررسی اثر ناهمگنی در ظرفیت شبکه محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش اندازه‌ی نمونه‌ها و به دلیل اثر ناهمگنی، مقادیر شاخص ظرفیت باقیمانده و چگالی بحرانی شبکه کاهش یافته است. چگالی بحرانی شبکه در اندازه‌ی نمونه‌های بیش از ۶۰٪، ۱۳ خودرو در هر کیلومتر - خط عبور به دست آمده است. همچنین با حذف ۲۰٪ از ناهمگن‌ترین کمان‌ها، تخمین مقادیر پارامترها از نمودار اساسی شبکه امکان‌پذیر می‌شود؛ زیرا شاخه‌ی ازدحام در نمودارهای اساسی بازنمونه‌گیری شده در اندازه‌ی نمونه‌های ۸۰ درصدی مشهود است. داده‌های روزهای غیرکاری برای تخمین این پارامترها از نمودار اساسی شبکه نامناسب است. علت آن است که چگالی بحرانی از آن‌ها فقط در اندازه‌ی نمونه‌های ۱۰ و ۲۰ درصد به دست آمده است. اندازه‌گیری بسیار دقیق سطح ناهمگنی در شبکه به دلیل محدودیت محاسباتی در آزمایش تمامی ترکیب‌ها، ممکن نیست. در گام‌های بعدی می‌توان روش را با هدف رفع محدودیت محاسباتی بهبود بخشید. همچنین اثر میزان نرخ نفوذ اطلاعات حمل‌ونقل همگانی در دقت تخمین نمودار اساسی شبکه و پارامترهای آن نیز قابل بررسی است.

تشکر و قدردانی

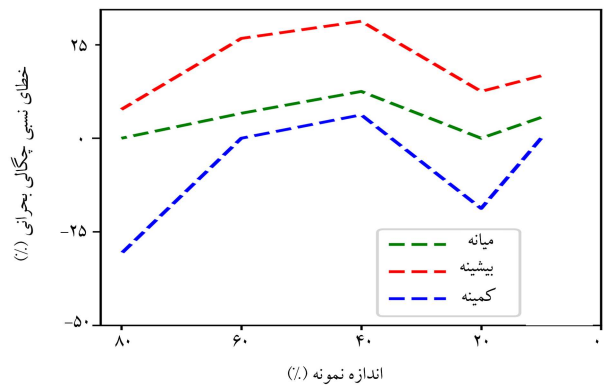
نویسندگان لازم می‌دانند از سازمان‌های اتوبوس‌رانی، مرکز فناوری و اطلاعات (فاوا) و مرکز کنترل ترافیک مشهد بابت همکاری در جمع‌آوری داده‌ها قدردانی کنند.

پانویس‌ها

1. network fundamental diagram
2. Godfrey
3. Daganzo
4. perimeter control



شکل ۷. مقدار شاخص ظرفیت باقیمانده در هر اندازه‌ی نمونه.



شکل ۸. محدوده‌ی خطاهای نسبی برای چگالی بحرانی داده‌های یک‌روزه در هر اندازه‌ی نمونه.

افزایش اندازه‌ی نمونه، کاهش یافته است. چگالی بحرانی در اندازه‌ی نمونه‌ی ۱۰ درصدی، حدوداً ۱۸ خودرو در هر کیلومتر - خط عبور به دست آمده است. با افزایش ۱۰ درصدی اندازه‌ی نمونه، چگالی بحرانی ۲ واحد کاهش یافته است. این مقدار تا اندازه‌ی نمونه‌ی ۶۰ درصدی، در محدوده‌ی بین ۱۴ تا ۱۶ خودرو در هر کیلومتر - خط عبور نوسان می‌کند. همچنین چگالی بحرانی در اندازه‌ی نمونه‌های بیش از ۶۰٪، ۱۳ خودرو در هر کیلومتر - خط عبور به دست آمده است.

در حالت کلی، چگالی بحرانی هنگامی قابل تخمین است که نمودار اساسی شبکه، شاخه‌ی ازدحام داشته باشد. بنابراین، مقادیر ذکر شده هنگامی معتبرند که حد بالای نمودارهای اساسی بازنمونه‌گیری شده، شاخه‌ی ازدحام داشته باشند. وجود نرخ تردهای کمتر از ظرفیت (دست‌کم ۳۰ خودرو در هر ساعت - خط عبور) برای چگالی‌های بیشتر از چگالی بحرانی شرط بررسی این اعتبار است. با توجه به این شرط در محدوده‌ی مورد مطالعه، چگالی بحرانی در اندازه‌ی نمونه‌ی ۹۰ درصدی قابل تخمین نیست. همچنین چگالی بحرانی برای داده‌های روزهای غیرکاری، فقط در اندازه

5. Geroliminis
6. feedback control
7. Model predictive control
8. Courbon & Leclercq
9. Eddie
10. Ortigosa
11. data fusion

12. Gayah
13. global positioning system (GPS)
14. Floating car
15. Ambuhl & Menendez
16. Dakic
17. Buisson & Ladier
18. Geroliminis & Sun
19. inductive loop detector (ILD)
20. automatic vehicle locationing system (AVL)
21. automated fare collection (AFC)
22. cruising speed
23. penetration rate
24. coefficient of determination
25. ANOVA (F-test)
26. T-test

منابع (References)

1. Geroliminis, N. and Daganzo, C.F. "Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings", *Transportation Research Part B: Methodological*, **42**(9), pp. 759-770 (2008).
2. Daganzo, C.F. "Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches", *Transportation Research Part B: Methodological*, **41**(1), pp. 49-62 (2007).
3. Simoni, M., Pel, A.J., Waraich, R.A. and Hoogendorn, S.P. "Marginal cost congestion pricing based on the network fundamental diagram", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **56**, pp. 221-238 (2015).
4. Wang, K.; Tong, Y.; Cao, T. and et al. "Vehicle emissions calculation for urban roads based on the macroscopic fundamental diagram method and real-time traffic information", *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **13**(2), pp. 1-8 (2020).
5. Godfrey, J. "The mechanism of a road network", *Traffic Engineering & Control*, **11**(8), pp.323-327 (1969).
6. Geroliminis, N. and Daganzo, C.F. "Macroscopic modeling of traffic in cities", in Transportation Research Board 86th Annual Meeting, 07-0413 (2007).
7. Keyvan-Ekbatani, M., Kouvelas, A., Papamichail, I. and et al. "Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating", *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**(10), pp. 1393-1403 (2012).
8. Geroliminis, N., Haddad, J. and Ramezani, M. "Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A model predictive approach", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **14**(1), pp. 348-359 (2012).
9. Geroliminis, N. and Levinson, D.M. "Cordon pricing consistent with the physics of overcrowding, in Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee", Springer, pp. 219-240 (2009).
10. Daganzo, C.F. and Geroliminis, N. "An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic", *Transportation Research Part B: Methodological*, **42**(9), pp. 771-781 (2008).
11. Courbon, T. and Leclercq, L. "Cross-comparison of macroscopic fundamental diagram estimation methods", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **20**, pp. 417-426 (2011).
12. Ortigosa, J., Menendez, M. and Tapia, H. "Study on the number and location of measurement points for an MFD perimeter control scheme: a case study of Zurich", *EURO Journal on Transportation and Logistics*, **3**(3-4), pp. 245-266 (2014).
13. Du, J., Rakha, H. and Gayah, V.V. "Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **66**, pp. 136-149 (2016).
14. Ambuhl, L. and Menendez, M. "Data fusion algorithm for macroscopic fundamental diagram estimation", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **71**, pp. 184-197 (2016).
15. Dakic, I. and Menendez, M. "On the use of Lagrangian observations from public transport and probe vehicles to estimate car space-mean speeds in bi-modal urban networks", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **91**, pp. 317-334 (2018).
16. Buisson, C. and Ladier, C. "Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams", *Transportation Research Record*, **2124**(1), pp. 127-136 (2009).
17. Geroliminis, N. and Sun, J. "Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic", *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**(3), pp. 605-617 (2011).
18. Ambuhl, L., Loder, A. and Bliemer, M.C.J. "Introducing a re-sampling methodology for the estimation of empirical macroscopic fundamental diagrams", *Transportation Research Record*, **2672**(20), pp. 239-248 (2018).