

تخمین نمودار اساسی شبکه با استفاده از همجوشی داده‌های شهری

(مطالعه موردی: شبکه مشهد)

سیدآرمان حق‌بیان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
میثم اکبرزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

E-mail: makbarzadeh@iut.ac.ir

چکیده

رفع مسئله ازدحام نیازمند تحلیل جریان ترافیک در مقیاس شبکه معابر شهر است. نمودار اساسی شبکه یکی از ابزارهای نسبتاً جدید برای تحلیل وضعیت ترافیک و طراحی استراتژی‌های کارآمد برای کنترل ازدحام در محدوده‌های موردنظر شهری است. این نمودار رابطه بین میانگین وزنی نرخ تردد و چگالی را در یک شبکه شهری نشان می‌دهد. تخمین این نمودار نیازمند داده‌هایی است که بتوان نرخ تردد و چگالی در کل شبکه را از آنها محاسبه کرد. این داده‌ها از سامانه‌هایی که به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات و نظارت بر تسهیلات حمل‌ونقلی در کلان‌شهرها تعبیه شده‌اند به دست می‌آیند. از آنجاکه در شهرهای ایران، پوشش این تسهیلات محدود است، گردآوری داده برای تخمین نمودار اساسی شبکه و استفاده از منافع آن با چالش روبرو است. در این مقاله روشی ترکیبی برای همجوشی داده‌ها طرح شده و با استفاده از آن، نمودار اساسی برای بخشی از شبکه شهر مشهد تخمین زده شده است. این داده‌ها از شناساگرهای حلقه‌ای و سیستم‌های ثبت موقعیت مکانی و تعداد مسافران خودروهای حمل‌ونقل همگانی به دست آمده‌اند. این روش در کلان‌شهرهای مختلف کشور قابل اجراست و اهمیت آن در فراهم آوردن امکان استفاده از نمودار اساسی در کنترل ترافیک محدوده‌های شلوغ شهری است.

واژه‌های کلیدی: ازدحام، نمودار اساسی کلان‌نگر، همجوشی داده‌ها

۱. مقدمه

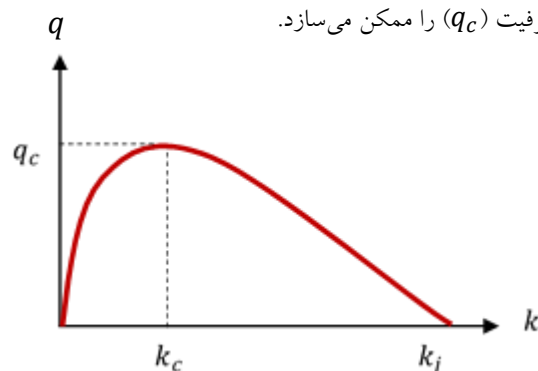
مدل‌سازی انتخاب مسیر رانندگان مخصوصاً در وضعیت ازدحام در مقیاس شبکه با رسم این نمودار از بین می‌رود. بنابراین با رسم این نمودار بدون نیاز به ماتریس تقاضا و دانستن منطق انتخاب مسیر رانندگان می‌توان جریان ترافیک را در مقیاس شبکه مدل کرد و با پیاده‌سازی استراتژی‌های کنترل بر ورودی‌های ناحیه موردبررسی، از قفل‌شدگی و رسیدن به وضعیت ازدحام جلوگیری نمود.

۲. ادبیات پژوهش

تحلیل جریان ترافیک در مقیاس کلان نگر با نظریه امواج سینماتیک^۳ و فرضیات آن آغاز شد. در این نظریه جریان ترافیک همانند جریان سیال، در محیط پیوسته (مشتق‌پذیر) و صرف‌نظر از فاصله بین خودروها (موج) توصیف شده است. گادفری (۱۹۶۹) ارتباط بین تعداد خودروها و متوسط سرعت آنها در قسمت‌هایی از شبکه شهری را بررسی نمود. پس‌از آن نظریه دو سیالی برای تحلیل جریان ترافیک در شبکه‌های بدون بزرگراه توسط هرمن و پروگونیگ (۱۹۷۹) معرفی شد. منطق این نظریه بر اساس نسبت تعداد خودروهای در حال حرکت و متوقف‌شده است. توابع این نظریه روابط بین میانگین انواع سرعت، نرخ تردد، چگالی و نسبت خودروهای متوقف‌شده در شبکه را مشخص می‌کند. همچنین در این توابع پارامترهایی وابسته به ساختار شبکه وجود دارد. اعتبار فرضیات این نظریه توسط محمسانی، ویلیامز و هرمن (۱۹۸۴) با شبیه‌سازی و همچنین هرمن و اردکانی (۱۹۸۷) با داده‌های واقعی از شهرهای مختلف بررسی شده است.

تا سال ۲۰۰۷ تحلیل برای رفع مشکل ازدحام در شبکه ارائه نشده بود. داگانزو (۲۰۰۷) نحوه پیاده‌سازی استراتژی‌های کنترل را بر نمودار اساسی شبکه باهدف جلوگیری از قفل‌شدگی در شبکه بررسی کرد. مدل در این مقاله با تقسیم شهر به سیستم‌های مخزنی^۷ با ابعاد قابل‌مقایسه با طول سفر و معرفی متغیرها و مفاهیمی در مقیاس خردنگر (تک مخزنه^۸) و تعمیم این مفاهیم به یک شبکه همگن در مقیاس کلان‌نگر (چند مخزنه^۹) پیاده شده فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و یکم/ شماره ۸۶ / پاییز ۱۴۰۰

تحلیل کلان‌نگر^۱ جریان ترافیک با مطالعه نرخ جریان^۲، چگالی^۳ و متوسط مکانی سرعت خودروها^۴ در مقاطع یکنواخت خیابان و راه انجام می‌شود. نمودارهای اساسی ارتباط بین این متغیرها را در وضعیت‌های مختلف ترافیکی مشخص می‌کنند. شکل نمودار اساسی نرخ‌تردد-چگالی به دلیل رفتار ذاتی انسان‌ها به صورت مقعر است. با توجه به شکل ۱، جریان ترافیک را می‌توان به دو رژیم خلوت^۵ و شلوغ^۶ تقسیم کرد. شاخه‌ی صعودی شکل ۱ جریان خلوت و شاخه‌ی نزولی، جریان شلوغ را نشان می‌دهد. در شاخه‌ی صعودی نسبت تغییرات نرخ تردد (q) به چگالی (k) دارای علامت مثبت و در شاخه‌ی نزولی دارای علامت منفی است. چگالی بین صفر و چگالی راه‌بندان (k_j) متغیر است و در مقدار بحرانی خود (k_c) عبور دهی بیشینه برابر ظرفیت (q_c) را ممکن می‌سازد.



شکل ۱. نمودار اساسی برحسب نرخ تردد و چگالی

نمودار اساسی شبکه با همفزون‌سازی مقادیر نرخ تردد و چگالی در کمان‌های آن به دست می‌آید. به بیان دیگر، این نمودار، ارتباط بین میانگین نرخ تردد در شبکه را با میانگین تعداد خودروهای موجود در آن بیان می‌کند. ویژگی‌های شبکه از جمله توپولوژی و سامانه کنترل ترافیک تقاطع‌ها از عوامل تأثیرگذار بر شکل نمودار اساسی آن هستند. این ویژگی‌ها مستقل از ماتریس تقاضا هستند در نتیجه شکل نمودار اساسی شبکه در زمان‌های مختلف ثابت است. استقلال شکلی از الگوی تقاضای روزانه، مهم‌ترین ویژگی نمودار اساسی شبکه است. علاوه بر این ویژگی، پیچیدگی

تخمین نمودار اساسی شبکه با استفاده از همجوشی داده‌های شهری (مطالعه موردی: شبکه مشهد)

چگالی‌ها در شبکه است. آن‌ها با مقایسه واریانس میزان اشغال شناساگرهای موجود در زمان‌های قبل و بعد از ازدحام ساعت اوج به این نتیجه رسیدند که با افزایش این واریانس، میانگین نرخ تردد در شبکه کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در زمان قبل از ازدحام نسبت به زمان بعد از ازدحام تعداد بیشتری از شناساگرهای حلقه‌ای نرخ تردد نزدیک به ظرفیت را تجربه می‌کنند.

از سال ۲۰۰۸ توابع متفاوتی از جمله نمایی و چندجمله‌ای برای برازش نمودار اساسی شبکه معرفی شده است. آمبجل و همکاران (۲۰۱۸) تابعی بر اساس حد بالای نمودار اساسی کلان نگر برای رسم خود نمودار پیشنهاد نمودند. حد بالای نمودار اساسی شبکه^{۱۳} بر اساس روش تحلیلی معرفی شده توسط داگانزو و گرولیمینیس (۲۰۰۸) رسم می‌شود و بیشترین مقدار نرخ تردد ممکن در هر چگالی را نشان می‌دهد. آن‌ها با چهار پارامتر نمودار حد بالا را به صورت ذوزنقه‌ای برای شهرهای مختلف از جمله زوریخ، ماری، لوتسرن و لندن رسم کردند. این چهار پارامتر تأثیر نمودار اساسی کمان‌ها، سیستم کنترل ترافیک و میانگین ظرفیت تقاطع‌ها را نشان می‌دهند. همچنین با پارامتری دیگری به نام پارامتر هم فزون‌ساز، تأثیر عوامل کاهش نرخ تردد در رسم نمودار اساسی کلان‌نگر را در نظر گرفتند. عوامل کاهش نرخ تردد از جمله ناهمگنی، تأثیر زیرساخت‌ها (میزان تفکیک عابر پیاده و حمل‌ونقل همگانی از خودروها) و تعاملات خودروها است که بر روی شکل نمودار اساسی شبکه تأثیرگذار است اما در حد بالای این نمودار تأثیرگذار نیست.

علاوه بر حجم زیادی از مطالعات درباره جنبه‌های مختلف شبکه‌های تک‌گونه، تحقیقاتی مربوط به تعاملات و تأثیرات گونه‌های مختلف حمل‌ونقلی بر نمودار اساسی شبکه انجام شده است. بویاسی و گرولیمینیس (۲۰۱۱) در تلاش بودند که مفهوم نمودار اساسی شبکه را در شبکه‌های چندگونه^{۱۴} گسترش دهند. ژانگ و گرولیمینیس (۲۰۱۳) تأثیر توزیع فضای تخصیص داده‌شده به گونه‌های مختلف حمل‌ونقلی بر عملکرد ترافیکی

است. گرولیمینیس و داگانزو (۲۰۰۸) وجود نمودار اساسی در مقیاس شهری و عدم وابستگی این نمودار به مقادیر تقاضا را با استفاده از داده‌های واقعی نشان دادند. داده‌های این مقاله از شناساگرهای حلقه‌ای^{۱۱} و تاکسی‌های مجهز به سامانه جهانی مکان‌یاب^{۱۱} در شهر یوکاهاما در ژاپن به دست آمده بودند. همچنین همبستگی نرخ تردد در شناساگرهای خروجی ناحیه به میانگین وزن‌دار نرخ تردد در کل ناحیه و وجود یک نسبت تقریباً ثابت از این دو متغیر در طول روز را نیز نشان دادند. بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که نرخ تردد خروجی از ناحیه یک رابطه کاملاً خطی با نرخ تردد داخل ناحیه دارد.

وجود یک محدوده از میانگین نرخ تردها در شبکه به ازای یک مقدار مشخص از چگالی، پراکندگی در نمودار اساسی شبکه را نشان می‌دهد. داگانزو و گرولیمینیس (۲۰۰۸) روشی تحلیلی برای رسم نمودار اساسی شبکه کاملاً همگن ارائه نمودند. با استفاده از این روش و فرضیات آن می‌توان حد بالای نمودار اساسی شبکه را ترسیم نمود. بایسون و لادیر (۲۰۰۹) تأثیر روش‌های برداشت اطلاعات بر میزان پراکندگی در نمودار اساسی شبکه و پدیده پسماند (هیستریزیس) در این نمودار را بررسی کردند. آن‌ها اطلاعات موردنیاز خود را از شناساگرهای حلقه‌ای موجود در شبکه شهر تولوز فرانسه برداشت کردند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد فاصله شناساگرها از تقاطع و نیز تنوع طبقه‌بندی معابر شبکه مورد مطالعه از عوامل مؤثر بر پراکندگی نمودار اساسی هستند. علت تأثیر فاصله شناساگرها از تقاطع‌ها، بالاتر بودن سرعت خودروها در فواصل دورتر از تقاطع بود. آن‌ها پدیده پسماند را در نمودارهای مربوط به خیابان‌های شریانی، بزرگراهی و کل شبکه شهری در ساعت اوج صبح مشاهده کردند (در نمودار مربوط به خیابان‌های مرکز شهر پسماند مشاهده نشد). علت این پدیده، ازدحام ناشی از تردد خودروهای سنگین بود.

گرولیمینیس و سان (۲۰۱۱) با رسم نمودارهای اساسی شبکه و همچنین هیستوگرام میزان اشغال^{۱۱} شناساگرهای حلقه‌ای نشان دادند یکی از عوامل بسیار مهم در میزان پراکندگی نمودار، توزیع

کمان‌های شبکه، \mathcal{R}_i مجموعه از تعداد خطوط هر کمان و τ بازه‌ی زمانی موردبررسی باشد.

$$q_c^{LDD}(\tau) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} q_{i,r}(\tau) \cdot l_{i,r}}{\sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} l_{i,r}} \quad (1)$$

$$k_c^{LDD}(\tau) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} k_{i,r}(\tau) \cdot l_{i,r}}{\sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} l_{i,r}} \quad (2)$$

$$\approx \frac{\sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} o_{i,r}(\tau) \cdot l_{i,r}}{l_e \cdot \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{r \in \mathcal{R}_i} l_{i,r}}$$

دسته دوم شامل اطلاعات مکانی هر خودرو مجهز به GPS است. با استفاده از این اطلاعات می‌توان میانگین سرعت مکانی این خودروها را به دست آورد (روش لاگرانژی^{۲۰}). در سیستم‌های چندگونه، به دلیل تعاملات گونه‌های مختلف، در صورت نیاز به اطلاعات یک‌گونه خاص می‌توان از اطلاعات دیگرگونه‌ها استفاده کرد. همچنین با توجه به اینکه در بیشتر شهرها سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی مجهز به ابزار GPS هستند، داکچ و منندز (۲۰۱۸) با ارائه روشی مبتنی بر اطلاعات حمل‌ونقل همگانی با استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های واقعی زوربخ نمودار اساسی شبکه را رسم نمودند. در این روش سرعت آزاد اتوبوس‌ها برابر

با سرعت آزاد خودروها ($\Omega = \frac{V_c^f}{V_b^f}$) فرض می‌شود. به دلیل اینکه تحلیل ترافیک در مقیاس کلان نگر است و متغیرهای آن هم فزون می‌شوند، از مانورهایی که ممکن است در مجاورت یک ایستگاه اتوبوس اتفاق بیفتد (واگرایی و همگرایی) صرف‌نظر می‌شود و همچنین فرض می‌شود که خودروها به‌طور یکنواخت در طول کمان توزیع شده‌اند. اطلاعات موجود برای تخمین سرعت وسایل نقلیه، مسافت اتوبوس و زمان سفر از هر توقف تا توقف در ایستگاه بعدی است که شامل (میزان توقف در هر ایستگاه به‌منظور پیاده و سوارشدن مسافر^{۲۱}، شتاب‌گیری و ترمز‌گیری در هر ایستگاه) بوده است.

رابطه ۳ میانگین سرعت مکانی اتوبوس‌ها و رابطه ۴ سرعت کروژ^{۲۲} اتوبوس‌ها را مشخص می‌کند. داکچ و منندز (۲۰۱۸) میانگین سرعت خودروها را همراه با فرضیات ارائه‌شده در بالا، یک مقدار بین سرعت‌های به‌دست‌آمده از روابط ۳ و ۴ در نظر گرفتند. در این دو رابطه، \mathcal{A} نشان‌دهنده مجموعه کمان‌هایی فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و یکم/ شماره ۸۶ / پاییز ۱۴۰۰

آن‌ها بررسی کردند. گرولیمینیس و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی یک نمودار اساسی سه‌بعدی مرتبط با تعداد کل اتوبوس‌ها و خودروها در شبکه و نرخ تردد وسایل نقلیه در آن ارائه دادند و همچنین در کنار آن نمودار اساسی سه‌بعدی مرتبط با نرخ تردد مسافران نیز رسم کردند. چایبات (۲۰۱۵) اهمیت بررسی نمودار اساسی سه‌بعدی با نرخ تردد مسافر^{۱۵} برای سیستم‌های چندگونه را موردبحث قرار داده است. آلیستورلودر و همکاران در سال ۲۰۱۷ با هدف کمی کردن میزان تأثیر مدهای مختلف بر یکدیگر در جریان ترافیک و در مقیاس کلان نگر، نمودار اساسی شبکه سه‌بعدی را برای دو منطقه از شهر زوریخ سوئیس با توپولوژی و تسهیلات حمل‌ونقل همگانی متفاوت رسم نمودند. این نمودار اولین نمودار سه‌بعدی است که با مقادیر مشاهده‌شده از جریان ترافیک رسم شده است و هر نقطه از این نمودار میانگین نرخ سفر خودرو-کیلومتر^{۱۶} (مسافر-کیلومتر) در مقدار مشخصی از میانگین تعداد وسایل نقلیه^{۱۷} (مسافر) در هر مد را نشان می‌دهد.

۳. روش پژوهش

در واقعیت رسم نمودار اساسی شبکه به‌طور دقیق به دلیل کمبود اطلاعات در مقیاس شبکه شهری امکان‌پذیر نیست. بنابراین محققین تنها قسمتی از شبکه را که اطلاعات آن موجود است بررسی می‌کنند و با استفاده از روش‌های موجود نمودار را تخمین می‌زنند. برآزش نمودار اساسی کلان نگر و برداشت اطلاعات مربوط به آن در مجموع به دودسته تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل اطلاعاتی است که می‌توان از آن‌ها به‌طور مستقیم چگالی و نرخ تردد در هر کمان را به دست آورد و سپس با محاسبه میانگین وزن‌دار آن‌ها، نمودار اساسی را رسم نمود (روش اوپلری^{۱۸}). در این دسته اطلاعات شناساگرها^{۱۹} (مشاهدات زمانی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اطلاعات برای محاسبه میانگین نرخ تردد مناسب است اما برای محاسبه میانگین چگالی به دلیل تأثیر طول و مکان این شناساگرها در نتایج به‌دست‌آمده، مناسب نیست. اگر \mathcal{L} مجموعه از کل

به میانگین سرعت مکانی اتوبوس‌ها در کمان $(v_{b,i}(\tau) = \sum_{z \in \mathcal{R}_i} d_{b,i,z}(\tau) / \sum_{z \in \mathcal{R}_i} t_{b,i,z}(\tau))$ در نظر گرفته‌اند. قسمت دوم به‌طور میانگین تأثیر هر خودرو از زمان توقف اتوبوس را نشان می‌دهد که با فرض توزیع یکنواخت خودروها، به‌طور متوسط هر خودرو به‌اندازه نیمی از زمان توقف تحت تأثیر قرار می‌گیرد. قسمت سوم تأثیر ساختار شبکه اتوبوس بر سرعت خودروها را با نوع ایستگاه (δ_i) و تعداد خط عبورها (\mathcal{R}_i) در هر کمان نشان می‌دهد. در نهایت با استفاده از رابطه ۷ و اعمال وزن به‌دست‌آمده برای هر کمان، متوسط سرعت مکانی خودروها در قسمتی از شبکه زوریخ محاسبه نمودند.

$$v_b(\tau) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{A}(\tau)} \sum_{z \in \beta_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{i \in \mathcal{A}(\tau)} \sum_{z \in \beta_i(\tau)} t_{b,i,z}(\tau)} \quad (3)$$

$$v_b^c(\tau) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{A}(\tau)} \sum_{z \in \beta_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{i \in \mathcal{A}(\tau)} \sum_{z \in \beta_i(\tau)} t_{b,i,z}^c(\tau)} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{L}(\tau)} \sum_{z \in \mathcal{R}_i(\tau)} d_{b,i,z}(\tau)}{\sum_{i \in \mathcal{L}(\tau)} \sum_{z \in \mathcal{R}_i(\tau)} (t_{b,i,z}(\tau) - t_{b,i,z}^w(\tau))} \quad (4)$$

$$n_i(\tau) = \min \left\{ 1, \left(\frac{t_{b,i}^w}{T} \right), \left(\frac{v_b^f}{v_{b,i}(\tau)} \right), \left(\frac{1}{2} \right), (\max\{0, 2 - |\mathcal{R}_i|\} \delta_i) \right\} \quad \forall i \in \mathcal{L}(\tau) \quad (5)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر فضای ایستگاه از کمان جدا نباشد} \\ 0 & \text{اگر فضای ایستگاه از کمان جدا باشد} \end{cases} \quad (6)$$

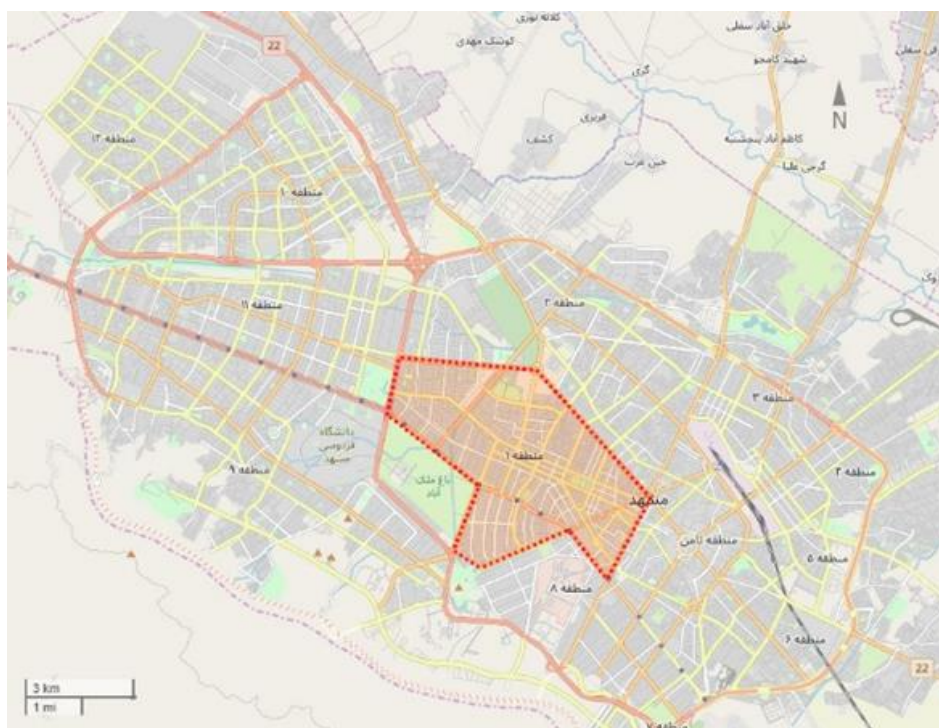
$$t_{b,tot}^{cor}(\tau) = \sum_{i \in \mathcal{L}(\tau)} \left(n_i(\tau) \cdot \sum_{z \in \mathcal{R}_i(\tau)} t_{b,i,z}(\tau) + (1 - n_i(\tau)) \cdot \sum_{z \in \mathcal{R}_i(\tau)} t_{b,i,z}^c(\tau) \right) \quad (7)$$

$$v_c^{AVL}(\tau) = \Omega \cdot \frac{d_{b,tot}^{cor}(\tau)}{t_{b,tot}^{cor}(\tau)} \quad (8)$$

خودروها در هر کمان و AFC به‌منظور تخمین زمان صرف شده برای پیاده و سوارشدن مسافران در هر ایستگاه استفاده می‌شود. این داده‌ها برای ۱۱ روز، از تاریخ ۲۰ فوریه تا ۲ مارس ۲۰۱۹ است. به دلیل محدودیت‌های داده‌های AVL، زمان تحلیل از ساعت ۶ صبح تا ۹:۱۵ شب است.

۴. منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش قسمتی از شبکه شهر مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است. مساحت این منطقه تقریباً ۱۷ کیلومتر مربع است و دارای ۳۰۵ شناساگر حلقه‌ای فعال است که تمامی آن‌ها در انتهای کمان‌ها قرار دارند. اطلاعات شناساگرها فقط شامل نرخ تردد در هر ۱۵ دقیقه برحسب هر خط عبور است و امکان گزارش میزان اشغال آن‌ها وجود ندارد. همچنین در این پژوهش اطلاعات وسایل حمل‌ونقل همگانی از جمله AVL و AFC نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از AVL به‌منظور تخمین سرعت



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

۴-۱ روند آماده‌سازی داده‌ها

سیستم ثبت اطلاعات AVL سازمان اتوبوس‌رانی مشهد به صورت مکان‌مبنا است. این بدین معناست که تنها در محدوده‌ی هر ایستگاه و در فاصله مشخص (تقریباً ۱۰۰ متر) از آن، موقعیت مکانی و زمانی هر اتوبوس ثبت می‌شود. بنابراین برای محاسبه زمان توقف اتوبوس در هر ایستگاه از داده‌های AFC و مدل رگرسیونی بین این داده‌ها و زمان صرف شده برای پیاده و سوارشدن مسافران، استفاده می‌شود. اطلاعات AVL شامل حجم زیادی از رکوردهای مربوط به موقعیت مکانی و زمانی اتوبوس‌ها در کل شبکه است. بنابراین برای محاسبه میانگین سرعت در هر کمان در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه، نیاز به تفکیک و مرتب‌سازی داده‌ها وجود دارد. مطابق با داده‌های موجود می‌توان کمان‌ها را در سه گروه مختلف در نظر گرفت: ۱. کمان‌هایی که بیش از یک ایستگاه در آن‌ها وجود دارد که در این حالت می‌توان به راحتی از رکوردهای ثبت شده در همان کمان استفاده نمود. ۲. کمان‌هایی که فقط یک ایستگاه در آن وجود دارد که در این حالت محل ایستگاه بسیار اهمیت دارد.

۳. کمان‌هایی که در آن‌ها ایستگاه وجود ندارد ولی اتوبوس از آن‌ها عبور می‌کند که در دو گروه آخر می‌توان از رکوردهای ثبت شده در کمان‌های قبل و بعد از کمان موردنظر استفاده نمود. پس از مشخص شدن زمان حضور هر یک از خودروهای حمل‌ونقل همگانی در هر یک از کمان‌ها می‌توان بر اساس آن داده‌های AFC را تفکیک نمود و تعداد مسافرین که در ایستگاه‌ها پیاده شده‌اند را به دست آورد. برای محاسبه زمان توقف اتوبوس‌ها از مدل رگرسیونی که در آن تعداد مسافرین سوار شده در هر ایستگاه (n_b) به عنوان متغیر مستقل است، محاسبه می‌شود. به منظور به دست آوردن ضرایب این مدل برداشت میدانی از سه ایستگاه با کدهای ۲۳۰۱، ۲۲۶۹ و ۲۲۷۰ انجام شده است. این برداشت در تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۱۹ و از ساعت ۹ صبح تا ۹ شب انجام گرفته است. ایستگاه‌ها بر این اساس انتخاب شده‌اند که اتوبوس‌ها با کمترین سرفاصله زمانی متوقف شوند و بیشترین خطوط از آن عبور کنند. محل توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه ۲۲۶۹ از فضای کمان جدا است، اما در دو ایستگاه دیگر جدا نیست. رابطه ۹ مدل خطی به دست آمده را نشان می‌دهد.

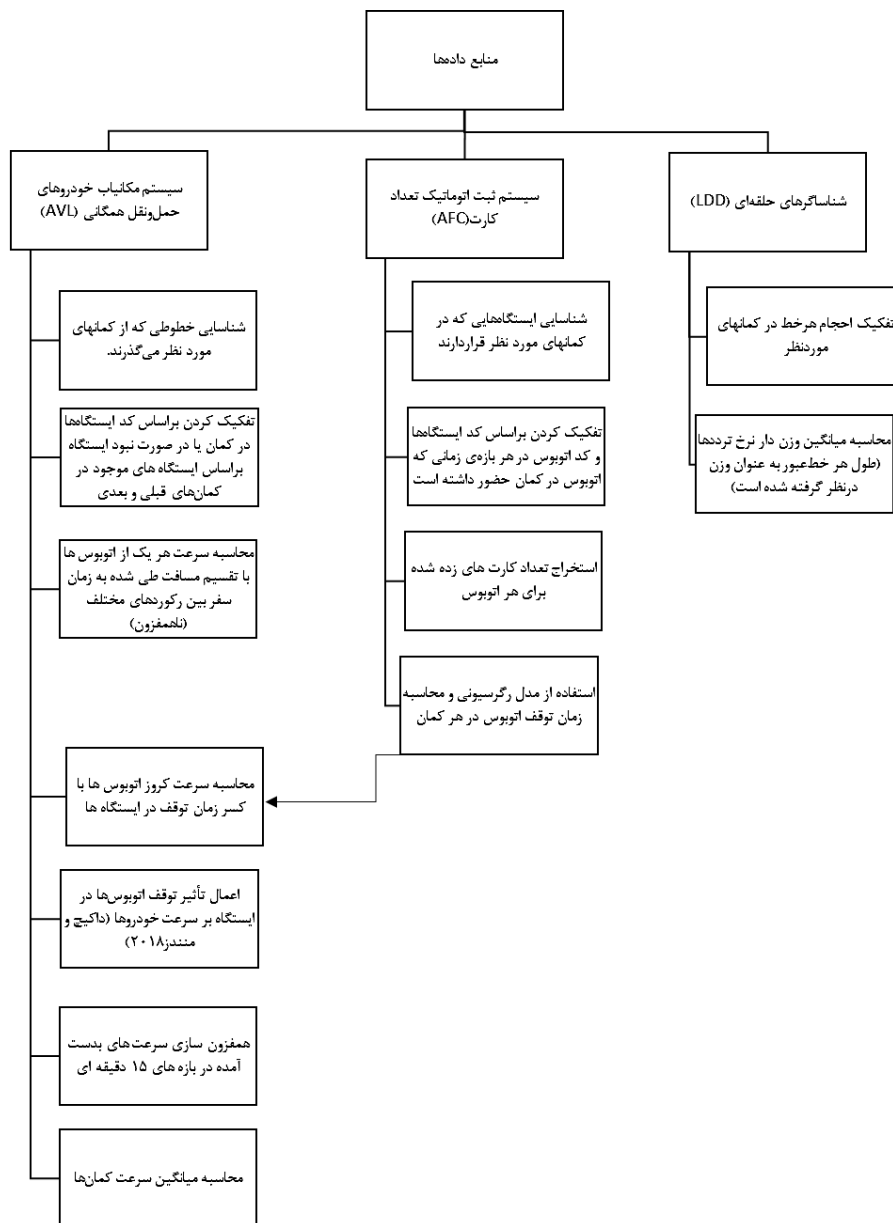
تخمین نمودار اساسی شبکه با استفاده از همجوشی داده‌های شهری (مطالعه موردی: شبکه مشهد)

برای تمامی باند عبورهای موجود در یک کمان است. چارت موجود در شکل ۳ مراحل انجام شده برای محاسبه میانگین نرخ تردد و سرعت شبکه را نشان می‌دهد. در نهایت، با تقسیم میانگین نرخ تردها به سرعت‌ها می‌توان مقادیر چگالی‌ها را به دست و نمودار اساسی شبکه را رسم نمود. این نمودار از داده کمان‌هایی در ناحیه مورد مطالعه رسم شده است که در هر لحظه از بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای، هر سه منبع را دارند. نبود هر کدام از این منابع منجر به در نظر نگرفتن کلیه داده‌های دیگر است.

ضریب تعیین آن $0/63$ است و تست F برای معنی‌داری مدل و تست T برای معناداری متغیر انجام شد که مقادیر تمام آزمون‌ها کمتر از 5 درصد است که می‌توان نتیجه گرفت که این مدل قادر به بیان تغییرات زمان توقف است.

$$dwell\ time(s) = 2.3 \times n_b + 10.7 \quad (9)$$

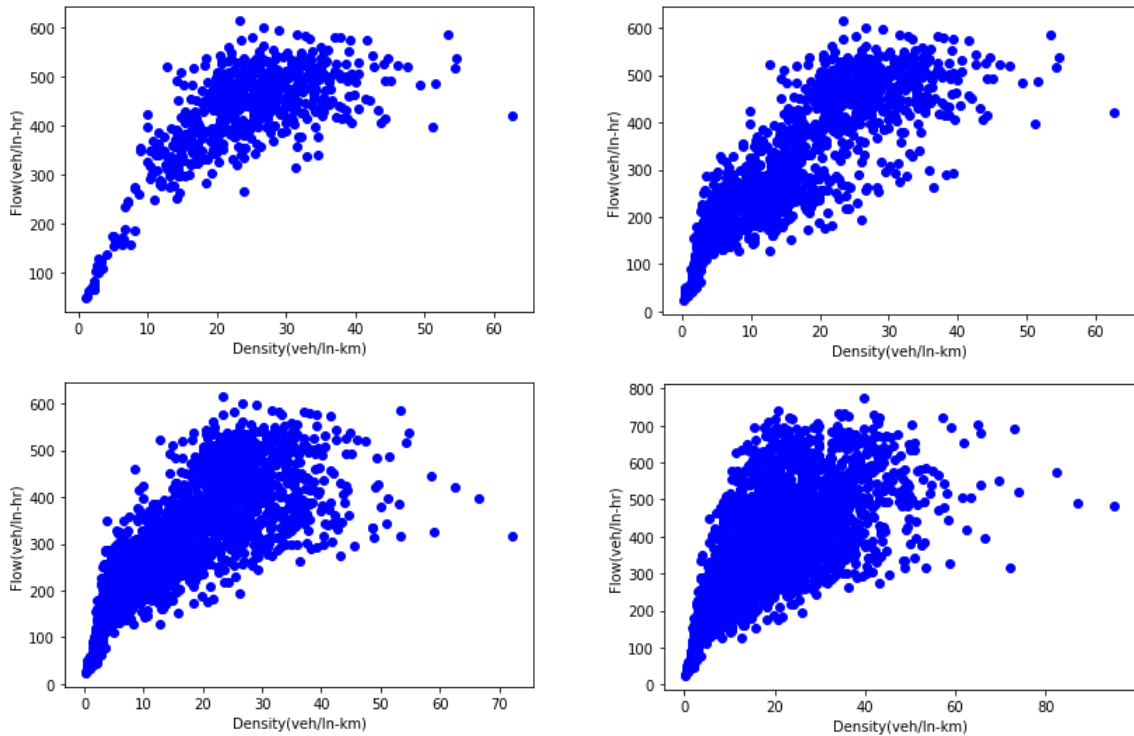
در این پژوهش فرض شده است که: ۱. رکوردهای ثبت شده در هر سه منبع داده بدون اختلاف زمانی نسبت به یکدیگرند. ۲. تمامی مسافران هنگام سوار شدن کارت زده‌اند و در سیستم AFC ثبت شده‌اند. ۳. سرعت به دست آمده از داده‌های AVL



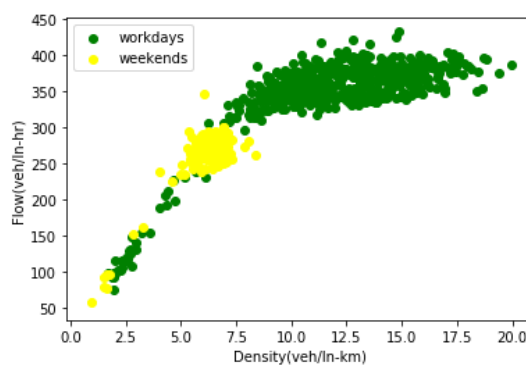
شکل ۳. چارت مراحل انجام شده

با پراکندگی کمتر همراه با مقادیر نرخ تردد و چگالی مشخص برای روزهای متفاوت به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر موجود در این نمودار مستقل از ماتریس تقاضا است. زیرا میانگین نرخ تردد در شبکه در هر مقدار چگالی مشخص است.

در این بخش نتایج مربوط به تخمین نمودار اساسی شبکه ارائه می‌شود. شکل ۴ نمودار اساسی تعدادی از کمان‌های موجود در ناحیه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نمودارها دارای پراکندگی زیادی هستند. اما با هم فزون سازی این مقادیر و رسم نمودار اساسی شبکه (شکل ۵)، نموداری



شکل ۴. نمودار اساسی برای تعدادی از کمان‌ها در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نمودار اساسی کلان نگر برای منطقه مورد مطالعه

نرخ ترددهای در محدوده‌های ۳۲۰ تا ۴۲۰ خودرو در هر ساعت-خط را تجربه می‌کند. به صورت شهودی شاخه‌ای ازدحام در این نمودار مشخص نیست. محو شدن آن می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. از جمله آن‌ها می‌توان به هم فزون سازی ۱۵ دقیقه‌ای فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و یکم/ شماره ۸۶ / پاییز ۱۴۰۰

این نمودار حاصل اطلاعات ۱۱ روز است که شامل ۲ روز غیر کاری (جمعه) و ۹ روز کاری است. بر اساس این نمودار تقریباً تا میانگین چگالی ۸ خودرو در هر کیلومتر-خط، شبکه در وضعیت خلوتی است و مقادیر بیشتر از آن (چگالی بحرانی)،

6. Kinematic wave theory
7. Reservoir system
8. Single reservoir system
9. Multi reservoir system
10. Loop Detector
11. Global Positioning System (GPS)
12. Occupancy
13. Upper bound of technologically feasible traffic states
14. Multi-modal Network
15. Passenger Macroscopic Fundamental Diagram
16. Travel production
17. Accumulation
18. Eulerian Method
19. Loop Detector Data
20. Lagrangian Method
21. Dwell time
22. Cruising time

۸. مراجع

- Transportation Research Part B: Methodological, 2007, Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, 41(1): pp. 49-62.
- Proc. R. Soc. 1955, On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, 229(1178): pp. 317-345.
- Traffic Engineering Control, 1969, The mechanism of a road network. Science, 1979, A two-fluid approach to town traffic, 204(4389): pp. 148-151.
- Transportation Research Record, 1984, Investigation of network-level traffic flow relationships: some simulation results, 971: pp. 121-130.
- Transportation Science, 1987, Urban network-wide traffic variables and their relations, 21(1): pp. 1-16.
- Transportation Research Part B: Methodological, 2008, Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, 42(9): pp. 759-770.
- Transportation Research Part B: Methodological, 2008, An analytical

داده‌ها اشاره کرد که وجود ازدحام در محدوده‌ای به این وسعت در مدت زمان ۱۵ دقیقه رخدادی است که بسیار کم اتفاق می‌افتد. در صورتی که اگر از اطلاعات روزهای بیشتری استفاده شود احتمال پدیدار شدن این شاخه بیشتر می‌شود. هم فزون سازی کمتر از ۱۵ دقیقه با توجه به نوع داده‌ها امکان‌پذیر نیست. به دلیل اینکه امکان خروجی گرفتن از داده‌های شناساگرهای حلقه‌ای کمتر از ۱۵ دقیقه در این وسعت وجود ندارد و همچنین تراکم داده‌های سیستم حمل‌ونقل همگانی متأثر از ضریب نفوذ آن در شبکه و سرفاصله زمانی اتوبوس‌ها است.

۵. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین هدف انجام این پژوهش تخمین نمودار اساسی شبکه برای یک شبکه واقعی در شهرهای ایران است. برای تخمین این نمودار انواع روش‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. سپس با توجه به اطلاعات موجود برای شهر مشهد روش‌ها ترکیب شده و نمودار اساسی شبکه تخمین و ترسیم گردید. مقادیر این نمودار از همجوشی مقادیر نرخ تردد از شناساگرهای حلقه‌ای و میانگین سرعت خودروها از خروجی‌های سیستم موقعیت‌یاب نصب شده بر روی ناوگان اتوبوس‌رانی تخمین زده شد. ناحیه مورد مطالعه بر اساس میزان اطلاعات موجود در نظر گرفته شده است. در گام‌های بعدی کارایی نمودار و استخراج پارامترهای مورد استفاده در پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی انجام خواهد شد.

۶. سپاسگزاری

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

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Macroscopic
2. Flow rate
3. Density
4. Space mean speed
5. Uncongested regime

فصلنامه مهندسی ترافیک / سال بیست و یکم / شماره ۸۶ / پاییز ۱۴۰۰

approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, 42(9): p. 771-781.

- Transportation Research Record, 2009, Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams, 2124(1): pp. 127-136.

- Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, Hysteresis phenomena of a macroscopic fundamental diagram in freeway networks, 17: pp. 213-228.

- Transportation Research Part B: Methodological, 2018, A functional form with a physical meaning for the macroscopic fundamental diagram.

- Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2011, Estimation of the Network Capacity for Multimodal Urban Systems, 16: pp. 803-813.

- Transportation Research Part B: Methodological, 2013, On the distribution of urban road space for multimodal congested networks, 57: pp. 326-341.

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks, 42: pp. 168-181.

- Transportation Research Part B: Methodological, 2015, Evaluation of a multimodal urban arterial: The passenger macroscopic fundamental diagram, 81: pp. 410-420.

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, Empirics of multi-modal traffic networks – Using the 3D macroscopic fundamental diagram, 82:pp. 88-101.

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, On the use of Lagrangian observations from public transport and probe vehicles to estimate car space-mean speeds in bi-modal urban networks, 91:pp. 317-334.