نقش پردازش موازی در تخصیص پویای حمل‌ونقل همگانی شهری با محدودیت ظرفیت

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نفیسه دوستی‌فرد ، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمید میرزاحسین، دانشیار، گروه عمران – برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

صفحه ۳۲-۱۵

چکیده

یکی از مسائل اصلی در تخصیص ترافیک، عدم وجود راندمان محاسباتی در مدل‌های تخصیص موجود است. این موضوع موجب کاهش کارایی مدل‌های پیشنهادی در مطالعات پیشین شده است. هدف از این مقاله، بررسی و بهبود مدل ریاضی انتخاب مسیر مسافران در مطالعات پیشین، افزایش راندمان محاسباتی و کاهش زمان پردازش داده‌ها است. این کار از طریق چندهسته‌ای نمودن مراحل پردازش داده‌ها، با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی، و همچنین اصلاح مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در مطالعات پیشین، از طریق بررسی یک مدل تخصیص پویای حمل‌ونقل همگانی با الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی و زیرالگوریتم حذف سفر، انجام شد؛ تا نمایش دقیق‌تری از نحوه انتخاب کاربران حمل‌ونقل همگانی و پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب آن‌ها به دست آید. درنهایت نتایج حاصل از مدل معرفی‌شده، با نتایج حاصل از یک مدل غیرپویا با الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر کمان مقایسه گردید، تا تأثیر در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و پویایی الگوریتم در زمان محاسبات، و دقت داده‌های خروجی، و همچنین تأثیر فرآیند چندهسته‌ای کردن در زمان محاسبات، مورد سنجش قرار گیرد. با بررسی داده‌های خروجی مشخص شد که با افزودن فرآیند چندهسته‌ای کردن به فرآیند پردازش داده‌ها در ساختار پردازش موازی دیده شده در این مقاله، زمان کل محاسبات الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی در حدود ۲۰٪ نسبت به حالت تک‌هسته‌ای بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: شبکه حمل‌ونقل همگانی، تخصیص پویا، محدودیت ظرفیت، الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر، پردازش موازی

۱- مقدمه

در برنامه‌ریزی، طراحی، بهره‌برداری و مدیریت زیرساخت‌های حمل‌ونقلی، هدف اصلی پیش‌بینی چگونگی استفاده مردم از زیرساخت‌ها است. در برنامه‌ریزی بلندمدت، تجزیه‌وتحلیل کارایی و اقتصادی بودن سیستم حمل‌ونقل همگانی پیشنهادی، نیاز به آگاهی از مسیر مورد انتخاب مسافران برای جابه‌جایی بین دونقطه مختلف در سیستم دارد. از منظر اقتصادی، این موضوع اهمیت بسیار زیادی دارد؛ زیرا نحوه و میزان استفاده کاربران از منابع حمل‌ونقلی، وضعیت تعامل بین تقاضا و عرضه در سیستم، و همچنین مزایا و هزینه‌های مربوط به کاربران را تعیین می‌کند. یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، تخصیص ترافیک نام دارد؛ که در آن تقاضای سفر با فرضیات و محدودیت‌های خاص به شبکه راه‌ها انتقال داده می‌شود. به‌طورکلی شبکه حمل‌ونقل همگانی، شامل مجموعه‌ای از خطوط و ایستگاه‌ها است که مسافران در آن‌ها سوار یا پیاده می‌شوند. درحالی‌که در تخصیص ترافیک سنتی اتومبیل‌های شخصی به‌عنوان تقاضا معرفی می‌شوند، امروزه با هدف‌گذاری توسعه شبکه حمل‌ونقل همگانی، تخصیص در این شیوه موردتوجه بسیاری از متخصصان و مدیران ترافیک شهرها بوده

است. در تخصیص حمل‌ونقل همگانی، باتوجه به ویژگی‌های عملیاتی سیستم، مسافران به مسیرها یا وسایل نقلیه حمل‌ونقل عمومی اختصاص داده می‌شوند. وسایل نقلیه حمل‌ونقل عمومی برخلاف وسایل نقلیه شخصی قابلیت فراخوانی انفرادی ندارند، ازاین‌رو کوتاه‌ترین مسیر مسافران در شبکه حمل‌ونقل همگانی:

اولاً؛ شامل یک هزینه (جریمه) برای زمان انتظار در مبدأ است.

ثانیاً؛ شامل زمان انتظار مربوط به تغییر مسیر است. به این معنا که در هنگام تغییر مسیر، برای هماهنگی با جدول زمان‌بندی مربوط به مسیر جدید، باید هزینه دیگری منظور شود.

ثالثاً؛ به دلیل ماهیت خدمات حمل‌ونقل همگانی با برنامه زمانی ثابت، ممکن است این برنامه در طول روز تغییر کند؛ زیرا جدول زمانی هر یک از مسیرها مطابق با میزان تقاضای مسافران در مسیرها متغیر است و بنابراین حداقل زمان موردنیاز برای انجام سفر، وابسته به زمان شروع سفر خواهد بود.

درنتیجه برای برآورد کوتاه‌ترین مسیر (کم‌هزینه‌ترین مسیر) در سفرهای حمل‌ونقل همگانی باید از رویکردهای پیچیده‌تری با در نظرگیری مسافران استفاده شود.

مهم‌ترین مسئله در مدل‌های تخصیص حمل‌ونقل همگانی این است که یک مسافر همواره می‌خواهد مسیری مقرون‌به‌صرفه را برای تکمیل سفر خود انتخاب کند. بنابراین، هدف این است که برای همه مسافران، هزینه سفر مطابق با مسیری که استفاده می‌کنند، به حداقل رسیده یا بهینه شود. در این شرایط، مدل‌سازی سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه زمان‌بندی با محدودیت ظرفیت، موضوع پیچیده‌تری است که در سال‌های اخیر موردمطالعه قرارگرفته است. این پیچیدگی سبب شده است که تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه زمانی، یک مسئله ریاضی پیچیده قلمداد شده و مدل‌های معدودی در ادبیات تحقیق قادر به حل مشکلات تخصیص در دنیای واقعی و در ابعاد بزرگ‌تر باشند.

در واقع، مسافران، در حین سفرتر شبکه حمل‌ونقل همگانی، به مکان‌های مختلف در مقاطع زمانی مختلف حرکت می‌کنند که نشان‌دهنده یک فرآیند تصادفی است. این فرآیند تصادفی تا حدی به عملکرد سرویس حمل‌ونقل همگانی وابسته است و تا حدی توسط مسافر حمل‌ونقل همگانی کنترل می‌شود. بنابراین مدل‌سازی نحوه انتخاب مسیر مسافران به‌گونه‌ای که نماینده خوبی از وضعیت شبکه و مسافران و نحوه برهم‌کنش آن‌ها باشد اهمیت فراوانی دارد. بنابراین، تمرکز اصلی این مقاله، بررسی یک مدل مبتنی بر برنامه زمانی برای حمل‌ونقل همگانی، با محدودیت ظرفیت و اولویت سوارشدن است که برای پیاده‌سازی تخصیص پویای سریع ایجادشده است. با استفاده از مدل ارائه‌شده، مجموعه‌ای از مسیرهای جذاب برای هر یک از مسافران تولید می‌شود که اطلاعات دقیقی از تمام کمان‌های شبکه در اختیار برنامه ریزان قرار می‌دهد. همچنین با استفاده از یک مدل انتخاب مسیر لوجیت چندجمله‌ای و با درنظر گرفتن اصطلاح ضریب تصحیح اندازه مسیر در سطح ایستگاه‌ها، مسیر مورد انتخاب مسافران حمل‌ونقل همگانی پیش‌بینی می‌شود.

در این مقاله تلاش شده است تا از طریق چندهسته‌ای نمودن مراحل پردازش داده‌ها و همچنین اصلاح مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در مطالعات پیشین، نمایش دقیق‌تری از نحوه انتخاب کاربران حمل‌ونقل همگانی و پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب آن‌ها به دست آید و کارایی محاسباتی برای استفاده از مدل مبتنی بر برنامه زمانی در پیش‌بینی سفر مسافران، و در نتیجه برنامه‌ریزی برای نحوه گسترش یا ایجاد تغییر در شبکه به طرز مطلوب بهبود یابد. همچنین تفاوت مدل‌سازی مبتنی بر برنامه زمانی و مدل‌سازی مبتنی بر کمان بر میزان دقت مسیرهای به‌دست‌آمده و تأثیر درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت بر زمان کل سفرها در مقایسه باحالت بدون ظرفیت موردبررسی و مقایسه قرارگرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

باتوجه به اینکه موضوع تخصیص ترافیک از موضوعات سابقه‌دار در حوزه مطالعات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده که در این مقاله سعی شده است اهم موارد آن که مرتبط با حوزه تخصیص حمل‌ونقل همگانی در فضای شهری است بررسی شود. لذا جهت تسهیل مرور منابع و کمک به دریافت اهم مطالب بیان‌شده، موارد دسته‌بندی‌شده و بر حسب رعایت تسلسل زمانی در جدول (۱) آورده شده است. باتوجه به بررسی ادبیات پیشین تحقیق مشخص شد، الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمان‌بندی، که در آن از یک مدل لوجیت چندجمله‌ای استفاده‌شده باشد، تاکنون تنها در چند مطالعه محدود مورد استفاده قرارگرفته است. از آنجا که الگوریتم مبتنی بر برنامه

زمانی نماینده خوبی از نوسان خدمات شبکه در طول روز است و به پویایی روند تخصیص کمک به سزایی می‌کند، گسترش استفاده از این نوع الگوریتم به صورتی که محدودیت ظرفیت را به روشی دقیق‌تر درنظر بگیرد، از خلأهای تحقیقاتی موجود در مطالعات پیشین است.

علاوه بر این، در شبکه‌هایی که مسیرهای مشترک بین خدمات مختلف وجود دارند، تولید مجموعه مسیرهای جذاب برای مسافران به‌ندرت موردبررسی قرارگرفته است. همچنین در مطالعات اندکی به بررسی تأثیر دقیق وجود همپوشانی میان مسیرها در محاسبه مطلوبیت آن‌ها پرداخته‌شده است. حال‌آنکه وجود همپوشانی میان چند مسیر، باعث کاهش میزان مطلوبیت آن‌ها برای مسافران می‌شود. لذا، در این مقاله سعی شده است که با ایجاد تغییر در مدل انتخاب مسیر و استفاده از یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر چند معیاره مبتنی بر برنامه زمانی پرداخته شود. در سال ۱۹۶۳، لوین و هدتنیمی (Levin & Hedetniemi, 1963) در مطالعه خود تحت عنوان تعیین سریع‌ترین مسیرها با استفاده از برنامه زمانی ثابت که در حوزه علوم کامپیوتر، بررسی نقش برنامه زمانی در انجام سفرها انجام شد، رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی را با توجه به ارایه یک برنامه کامپیوتری برای یافتن سریع‌ترین مسیر پیشنهاد کردند. در سال ۱۹٦٦، کوک و هالسی (Cooke & Halsey, 1966) در مطالعه خود تحت عنوان کوتاه‌ترین مسیر در یک شبکه با زمان‌های گذر بین گره‌ای وابسته به زمان یک الگوریتم جدید و فرمولی تعمیم‌یافته از مسئله کوتاه‌ترین مسیر کلاسیک، به‌صورت وابسته به زمان با بازه‌های زمانی ارایه دادند. در سال ۱۹۷۵ چریکی و رابیلارد (Chriqui & Robillard, 1975) در مطالعه خود تحت عنوان مسیرهای اتوبوس مشترک راه‌حلی بر اساس زمان سفر درک شده و زیرمجموعه بهینه‌ای از مسیرها به‌عنوان مسیرهای جذاب ارایه کردند. در ادامه دو سال بعد، لست و لیک (Last & Keak, 1976) یک مدل مبتنی بر رایانه، با امکان تعریف کمان با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت و استفاده از یک فرآیند بارگذاری تکرارشونده برای محاسبه احتمال اضافه بار ارایه کردند. در سال ۱۹۸٤، تانگ و ریچاردسون (Tong & Richardson, 1984) در مقاله خود با عنوان برآورد ماتریس‌های مبدا–مقصد وابسته به زمان برای شبکه‌های حمل‌ونقل الگوریتم‌های تنظیم برچسب برای یافتن سریع‌ترین یا کم‌هزینه‌ترین مسیر با استفاده از تابع هزینه تعمیم‌یافته ارایه کردند که نتیجه آن بررسی بیشتر مدل‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی، تطبیق الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر دایکسترا برای یافتن سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین مسیر در شبکه‌های با برنامه زمانی مشخص بود. در سال ۱۹۸۹، فلورین و اشپیس (Spiess & Florian, 1989) در مطالعه خود با عنوان راهبردهای بهینه: یک مدل تخصیص جدید برای شبکه‌های حمل‌ونقل همگانی یک مدل برنامه‌نویسی خطی برای تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر راهبرد با فرکانس‌های ترکیبی، برای اندازه‌گیری زمان انتظار مسافر ارایه دادند. در همان سال، نگوین و پالوتینو (Nguyen & Pallottino, 1989) امکان استفاده از هر تابع هزینه تعمیم‌یافته‌ای برای مجموعه مسیرهای جذاب و احتمال انتخاب کمان٦های جایگزین در هر گره را به کمک مدل مبتنی بر تواتر برای شبکه حمل و نقل همگانی معرفی کردند. در سال ۱۹۹۲، جانسون و ریدستولپ (Jansson & Ridderstolpe, 1992) ارائه روشی برای محاسبه زمان انتظار مسافر و بررسی مسئله انتخاب مسیر به شکل واقع‌بینانه‌تر ارایه داشتند که نتیجه آن کاهش زمان حل مسائله بود.

در سال ۱۹۹۳، سیا و فرناندز (De Cea & Fernández, 1993) تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر فرکانس با محدودیت ظرفیت و استفاده از ویژگی خط مشترک برای توزیع تقاضای بیش‌ازحد به مسیرهای جایگزین را معرفی کردند. در سال ۱۹۹۸، نگوین و پالوتینو (Nguyen, Pallottino, & Gendreau, 1998) مزیت ساختار مبتنی بر لوجیت در بررسی شبکه حمل‌ونقل همگانی نشان دادند. در سال ۱۹۹۹، نیلسن و جوویچ (Nielsen & Jovicic, 1999) یک مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر جدول زمانی تصادفی در مقیاس بزرگ برای انتخاب مسیر ارایه دادند که نتیجه آن فراهم کردن امکان مدل‌سازی تغییرات تصادفی و تفاوت‌های موجود در ترجیحات مسافران نسبت به هزینه و زمان، معرفی تابع مطلوبیت و امکان تغییر ضرایب بود. در سال ۲۰۰۱، نگوین و پالوتینو (Nguyen, Pallottino, & Malucelli, 2001; Nielsen & Jovicic, 1999) در قالب یک چارچوب مدل‌سازی برای تخصیص مسافر در شبکه حمل‌ونقل با جدول زمانی مدل‌سازی سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه زمان‌بندی با محدودیت ظرفیت و اولویت سوارشدن در فرم یک فرمول ریاضی و یک الگوریتم محاسباتی برای تعیین جریان تعادل ارایه دادند. در سال ۲۰۰۳، بل (Bell, 2003) بحث تخصیص ترافیک با ظرفیت محدود را مطرح کردند و رویکردی برای مسئله تخصیص حمل‌ونقل

همگانی با ظرفیت محدود کـه بـه ترتیـب و تـوالی سوارشـدن مسافران به وسایل حمل‌ونقل همگانی اهمیت می‌داد نتیجه کـار او بود. در همان سـال کـاروچی و بـل (Kurauchi, Bell, & Schmöcker, 2003) رویکرد شبکه‌های حمل‌ونقـل همگـانی پرتراکمی که برخی از مسافران به دلیل عدم وجود فضای کافی قادر به سوارشدن نیستند و همچنـین مسـئله خطـوط مشـترک، که در آن انتخاب مسیر به تواتر ورودی‌ها بستگی دارد و نشـان دادند که وقتی مسافران ریسک گریـزی بـالایی دارنـد، جریـان مسافر به‌منظور کاهش ریسک پخش خواهد شد و درنظرگرفتن خطوط مشترک، نتایج تخصیص واقـع‌بینانـه‌تـری را بـه دسـت خواهد داد. در سال ۲۰۰٤، حمدوچ و همکاران (Hamdouch, Marcotte, & Nguyen, 2004) موضـوع مـدل‌سـازی سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی مبتنی بـر برنامـه زمـان‌بنـدی بـا محدودیت ظرفیت و گسترده سازی شبکه بـر اسـاس زمـان را مطرح کردند و در نهایت مجموعه انتخاب‌هـای اولویـت‌بنـدی شـده بـرای آن تبیـین شـد. در سـال ۲۰۰۸ ، شـوماخر و بـل (Schmöcker, Bell, & Kurauchi, 2008) مـدل تخصـیص شبه پویا حمل‌ونقـل همگـانی مبتنـی بـر تـواتر بـا محـدودیت ظرفیت ارایه شد که در نتیجه آن معرفی بازه‌های زمـانی امکـان اصلاح فرضیه مربـوط بـه مـدل‌هـای ایسـتا را کـه در آن همـه مسافران برای فضاهای یکسان رقابت می‌کنند، فـراهم مـی‌کنـد. در ادامـه مطالعـات سـال ۲۰۰٤ ، اینبـار حمـدوچ و لفونپـانیچ (Hamdouch & Lawphongpanich, 2008) مدل تخصیص حمل‌ونقل همگـانی مبتنـی بـر برنامـه بـا راهبـردهـای سـفر و محـدودیت‌هـای ظرفیـت را تعریـف کردنـد کـه در آن عـلاوه بر محدودیت ظرفیت کلی، احتمـال پیـدا کـردن یـک صـندلی در وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی را نیز در نظـر مـی‌گیـرد. در سـال ۲۰۰۸، ژو و محماسـانی (Zhou, Mahmassani, & Zhang, 2008) در مطالعه خود با عنوان رویکـرد مـدل‌سـازی ریـز تخصـیص پویـا بـرای مـدیریت یکپارچـه مسـیر شـهری چندمدی با هدف توسعه یک سیستم شبیه‌سازی میان‌نگر و تخصیص کوچک‌مقیاس پویا در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری چندمـدی و ارایـه یک مدل نابرابری متغیـر بـرای توصـیف کلیـت مسـئله تعـادل تصادفی و پویای کاربر سعی در یکپارچـه‌سـازی کامـل شـبکه حمل‌ونقل چندمدی و تخصیص کاربران به مسیر بهینه داشتند.

در سال ۲۰۰۹، محمد وهبـه و عـامر شـلبی (Wahba & Shalaby, 2009) زمان حرکت مبتنی بر یادگیری و مدل‌سازی انتخاب مسیر برای تخصیص حمل‌ونقل همگـانی تحـت ارایـه اطلاعات: یک چهارچوب نظری را ارایـه دادنـد کـه نتیجـه آن فراهم کردن امکان ارتباط با مدل‌های مبتنی بر فعالیت و امکـان استخراج الگوهای سفر کلی از انتخاب‌های فردی بود. در سـال ۲۰۱۳، خانی (Khani, 2013) یک برنامه تخصیص پویا مبتنـی بر برنامه زمانی برای حمل‌ونقل همگانی، با محدودیت ظرفیـت و اولویت سوارشدن و ارائه یک مدل بهینه‌سازی بـرای هـر دو حالت قطعی و تصـادفی را معرفـی کردنـد. در ادامـه خـانی و همکـاران (Khani, Sall, Zorn, & Hickman, 2013) توانستند مدل‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقـل همگـانی مبتنـی بـر برنامه زمان‌بندی با محدودیت ظرفیت را ایجـاد کننـد. خـانی و همکـاران در سـال ۲۰۱۵ (Khani, Hickman, & Noh, 2015) با اسـتفاده از مـدل‌هـای مبتنـی بـر لوجیـت و ازجملـه الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر، مسیر ترکیبی مبتنـی بـر لوجیـت برای شبکه مبتنی بر برنامه سفر ارایه دادنـد. در ایـن راسـتا، در سـال ۲۰۱۸، کـوه و همکـاران (Koh, Ng, Pan, & Mak, 2018) کاربرد اتوبوس‌های انبوه‌بـر و دخیـل کـردن اثـر تغییـر ظرفیت با شبیه‌سازی را در سنگاپور نشان دادند. در سال ۲۰۱۹، کتس و همکـاران (Cats & Glück, 2019) بـه توسـعه نسـل جدیدی از روش‌هـا کمـک کردنـد کـه قابلیـت اطمینـان را در مرحله برنامه‌ریزی تاکتیکی برای بهبود کیفیـت خـدمات ادغـام می‌کند. در آخرین مطالعات در سـال ۲۰۲۰، جیشـنو نارایـان و همکاران (Narayan, Cats, van Oort, & Hoogendoorn, 2020) در مطالعه خـود تحـت عنـوان انتخـاب مسـیر و مـدل تخصیص یکپارچه برای سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی ثابت و انعطاف‌پذیر به این نتیجه دست یافتند که میانگین زمـان انتظـار کاربران هنگام اسـتفاده در ترکیـب بـا تقاضـای ثابـت کمتـر از سناریویی اسـت کـه هـر یـک از آن‌هـا بـه‌عنـوان یـک حالـت انحصاری استفاده شود. درنهایت در سال ۲۰۲۱، کیوسالیتیس و کـتس (Gkiotsalitis & Cats, 2021) بـا توجـه بـه مواجـه با فراگیری کووید، در مطالعه‌ای تحت عنوان انطباق برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی تحت بحران همه‌گیر COVID-19: بررسی ادبیات نیازها و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی اقـدامات مداخلـه‌ای که می‌تواند از ارائه‌دهندگان خـدمات حمـل‌ونقـل همگـانی در برنامه‌ریزی خدمات در مرحله پس از تعطیلی و الزامات توسعه مدل‌سازی مربوطه حمایت کند را شناسایی کردند. این می‌تواند از گذار از شیوه‌های اولیه برنامه‌ریزی موقت بـه تصـمیم‌گیـری مبتنی بر شواهد پشتیبانی کند. همان‌طور که از بررسی مطالعات پیشین قابل‌برداشت است، در شبکه‌هایی که مسـیرهای مشـترک بین خدمات مختلف وجود دارنـد، تولیـد مجموعـه مسـیرهای جذاب برای مسافران به‌نـدرت موردبررسـی قرارگرفتـه اسـت. همچنـین در مطالعـات انـدکی بـه بررسـی تـأثیر دقیـق وجـود همپوشانی میان مسیرها در محاسبه مطلوبیت آن‌ها پرداخته‌شـده است. حال‌آنکه وجود همپوشانی میان چند مسیر، باعث کاهش

میزان مطلوبیت آن‌ها برای مسافران می‌شود. فلذا در این مقاله سعی شده است که با ایجاد تغییر در مدل انتخاب مسیر و استفاده از یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر چند معیاره مبتنی بر برنامه زمانی پرداخته شود. بعلاوه در مطالعات پیشین، به وجود کارایی محاسباتی در مدل‌های معرفی‌شده، کمتر پرداخته‌شده است. حال‌آنکه یک مدل تخصیص جهت اجرا در شبکه‌های بزرگ و پرتراکم، بایستی کارایی محاسباتی مناسب و قابلیت اجرایی شدن داشته باشد. این امر در مطالعه پیش رو، از طریق چندهسته‌ای کردن روند پردازش داده‌ها در قسمتی از مدل ارائه‌شده، انجام‌گرفته است.

همچنین در مطالعات پیشین، میزان تأثیر درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت در شبکه، در کارایی محاسباتی روند شبیه‌سازی مسیرهای مسافران حمل‌ونقل همگانی ، بررسی نشده است. در مطالعه پیش رو، این تأثیر از طریق مقایسه مدل و الگوریتم ارائه‌شده در این مطالعه، با مدل مبتنی بر کمان فلورین-اشپیس، موردبررسی قرارگرفته است.

۳- روش تحقیق

در این مقاله، با بررسی و استفاده از یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی و زیرالگوریتم حذف سفر، به تولید مجموعه مسیرهای انتخابی مسافران پرداخته می‌شود. پس از ایجاد مجموعه مسیرهای جذاب، در ادامه از یک مدل مبتنی بر لوجیت، جهت مقایسه مطلوبیت مسیرها و انتخاب مسیر مطلوب‌تر برای مسافران استفاده شد. در گام بعدی، برای اعمال محدودیت ظرفیت موجود در شبکه، از یک مدل مبتنی بر شبیه‌سازی جهت تخصیص مسافران به مسیرهای مطلوب دارای ظرفیت استفاده گردید. روند کلی این مطالعه به‌طور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

فلوچارت ارائه‌شده در شکل (۱) کلیات روش انجام تحقیق، شامل بخش‌های اصلی مطالعه، زیرمجموعه‌های مورد بررسی در هر بخش، و همچنین ابزار مورد استفاده برای برداشت اطلاعات هر بخش را نشان می‌دهد.

در بخش گردآوری اطلاعات، اطلاعات مختص مسافران در این مطالعه، مربوط به تقاضای سفر مسافران است. این اطلاعات به‌صورت یک فایل نوشتاری، شامل اطلاعاتی درباره همه مسافران است که شامل اطلاعات شناسه مسافر (شناسه منحصربه‌فردی که یک مسافر را مشخص می‌کند)، منطقه ترافیکی مبدأ و مقصد مسافر، شیوه سفر، بازه زمانی انجام سفر (قبل از ظهر یا بعدازظهر)، جهت انجام سفر (یک مقدار عددی که جهت مسافر را به‌صورت: جهت=۱: خروج از منزل در بازه زمانی قبل از ظهر، و جهت=۲: حرکت به سمت منزل در بازه زمانی بعدازظهر) و زمان ورود ترجیحی به مقصد است.

برای دستیابی به اطلاعات ساختار شبکه در این مطالعه از مشخصات ورودی حمل‌ونقل همگانی استفاده‌شده است. این مشخصات به‌صورت فایل‌های متنی و حاوی اطلاعاتی در مورد شبکه حمل‌ونقل همگانی است. این موارد شامل:

Agency.txt فهرستی حاوی اطلاعاتی در مورد آژانس‌های حمل‌ونقل همگانی ارائه‌دهنده داده‌ها و خدمات

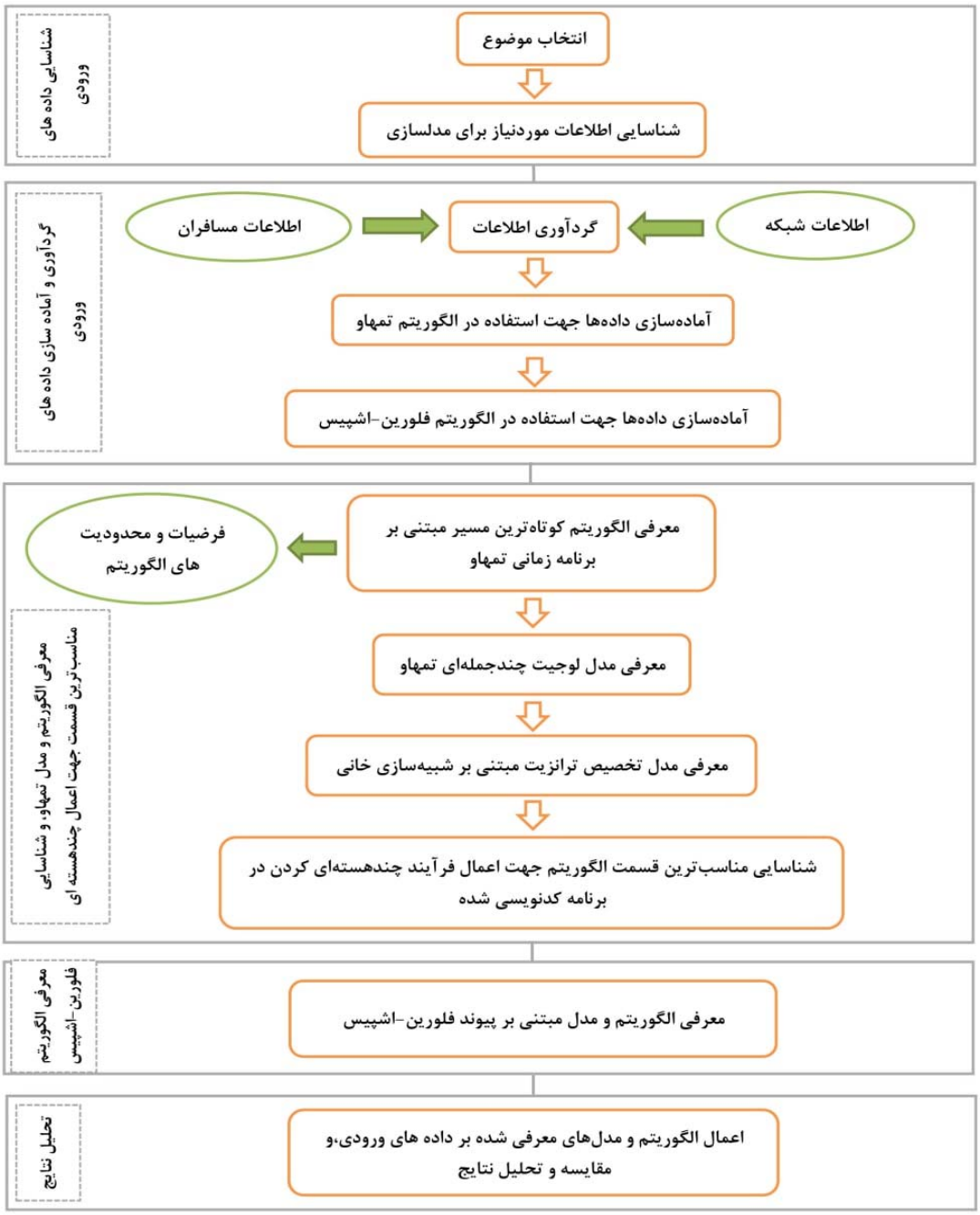
Stops.txt حاوی اطلاعاتی درباره ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی (مکان‌های منحصربه‌فردی که وسایل نقلیه عمومی در آنجا، مسافران را سوار یا پیاده می‌کنند)

Routes.txt شامل اطلاعاتی در مورد مسیرهای حمل‌ونقل همگانی

Trips.txt فهرست تمام سفرهای وسایل نقلیه و مسیرهای آن‌ها (یک سفر، دنباله‌ای از دو یا چند ایستگاه است که در یک‌زمان خاص اتفاق می‌افتد)

Stop-times.txt لیست زمان‌های ورود و خروج وسایل نقلیه در هر ایستگاه و برای هر سفر (برنامه زمانی حمل‌ونقل همگانی)

Calendar.txt فهرست خدمات در دسترس موجود در تاریخ‌های مختلف (زمان شروع و پایان خدمات و روزهایی از هفته را که خدمات در آن در دسترس هستند، مشخص می‌کند).



شکل ۱. کلیات روش تحقیق

در این مرحله از روش تحقیق، به آماده‌سازی اطلاعات ورودی جهت ایجاد شبکه و مدل‌سازی بر اساس الگوریتم تم‌ها و پرداخته شد. به‌این‌ترتیب با استفاده از برنامه‌نویسی به زبان پایتون داده‌ها به شکلی قابل‌استفاده برای مدل موردنظر درآمد. مراحل طبق شرایط در پی آمده تعریف گشت.

-در متن مربوط به اطلاعات سفر، اطلاعات سفرهایی که شناسه سرویس در آن‌ها با شناسه سرویس‌های به‌دست‌آمده از مرحله قبل یکی بود، برداشت شد.

به‌تناسب اطلاعات شناسه سفرهای به‌دست‌آمده از مرحله قبل، اطلاعات سفرها، شناسه مسیرهای مرتبط با آن‌ها و سایر اطلاعات مرتبط با مسیرها استخراج گردید.

تناسب اطلاعات شناسه سفرهای به‌دست‌آمده از مرحله قبل، اطلاعات زمان‌های توقف در ایستگاه‌ها و ایستگاه‌های مرتبط استخراج گردید.

متناسب با شناسه ایستگاه‌های به‌دست‌آمده از مرحله قبل، سایر اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های مربوطه استخراج گردید.

پس از طی مراحل بالا، تمامی این اطلاعات در فایل‌های متنی جداگانه‌ای جهت فراخوانی در برنامه نوشته‌شده، ثبت و ذخیره‌سازی شدند.

به علت تفاوت در نحوه تعریف شبکه در الگوریتم مبتنی بر کمان، در این بخش از روش تحقیق، به استخراج خطوط حمل‌ونقل همگانی پرداخته شد. به‌این‌ترتیب که هر گروه از سفرهای وسایل نقلیه عمومی که تعداد ایستگاه‌ها و شناسه ایستگاه‌های عبوری آن‌ها یکسان بوده، و درعین‌حال جهت حرکت و مسیر طی شده آن‌ها یکی باشد، با این شرط که فاصله‌ی زمانی آغاز سفرها مشخص و ثابت باشد، یک خط حمل‌ونقل همگانی در نظر گرفته می‌شود. مراحل آماده‌سازی داده‌ها برای این الگوریتم به شیوه زیر صورت پذیرفت:

-ابتدا با مشخص نمودن تاریخ مدنظر جهت مدل‌سازی، از طریق اطلاعات موجود در تقویم، شناسه سرویس‌ها استخراج شد. در پَروَنجا متنی مربوط به اطلاعات سفر، اطلاعات سفرهایی که شناسه سرویس در آن‌ها با شناسه سرویس‌های به‌دست‌آمده از مرحله قبل یکی بود، برداشت شد.

-با توجه به اطلاعات شناسه سفرهای به‌دست‌آمده از مرحله قبل و طبق قاعده بیان‌شده در بالا، خطوط حمل‌ونقل همگانی استخراج گردید. به هر خط حمل‌ونقل همگانی شناسه‌ای تعلق‌گرفته و در اطلاعات مربوط به هر سفر، شناسه خط حمل‌ونقل همگانی مرتبط با آن سفر افزوده شد.

-میزان سرفاصله زمانی، که به‌صورت سرفاصله زمانی عبور دو سفر متوالی مربوط به یک خط حمل‌ونقل همگانی، از یک ایستگاه مشخص محاسبه می‌شود، برای هر خط محاسبه و به اطلاعات سفرهای مرتبط با خطوط، افزوده شد.

سپس با استفاده از سفرهای موجود در هر خط حمل‌ونقل همگانی، ایستگاه‌های شبکه به خطوط حمل‌ونقل همگانی نسبت داده‌شده و خطوط حمل‌ونقل همگانی عبوری از ایستگاه‌ها مشخص گردیدند.

در نهایت، تمامی این اطلاعات جهت فراخوانی در برنامه، در فایل‌های متنی، ثبت و ذخیره‌سازی شدند. پس از تعیین مجموعه انتخاب مسیر، تقاضا با استفاده از تابع احتمال لوجیت به گزینه‌ها تخصیص داده می‌شود. مدل مخلوط لوجیت چندجمله‌ای، به منظور درک اهمیت پارامترهای مختلف در تصمیم‌گیری مسافران ایجاد شده است. به طور خاص، هر مسافر در مبدأ حرکت با مقایسه میزان مطلوبیت مسیرهای جذاب، در مورد مسیر انتخابی تصمیم‌گیری می‌کند و به این وسیله میزان احتمال انتخاب هر مسیر از مجموعه انتخابی، برای مسافر مربوطه، محاسبه می‌شود.

$$P\ (i|Cn)\ = \frac{e^{V_{in}+\beta_{PS}PS_{in}}}{\sum_{j\in C_n} e^{V_{jn}+\beta_{PS}PS_{jn}}} \qquad (۱)$$

$P\ (i|C_n)$ = احتمال انتخاب مسیر i از مجموعه انتخابی C برای مسافر n است.

V_{in} و V_{jn} = میزان مطلوبیت مسیرهای i و j به‌صورت مجزا برای مسافر n هستند.

PS_{in} و PS_{jn} = تصحیح اندازه مسیر برای هریک از مسیرهای i و j از مجموعه انتخابی C_n به‌صورت مجزا.

β_{PS} = ضریب تخمینی برای عبارت تصحیح مسیر.

یکی از ویژگی‌های کلیدی مدل لوجیت چندجمله‌ای ارایه شده، که در واقع وجه تمایز این مدل لوجیت نسبت به سایر مدل‌ها است، فرض استقلال از گزینه‌های غیرمرتبط است. این فرض بیان می‌کند که وقتی از مسافران خواسته می‌شود تا از بین مجموعه‌ای از مسیرهای جذاب، مسیری را برای خود انتخاب کنند، احتمال انتخاب یک گزینه نباید به گزینه دیگری بستگی داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر، فرض بر این است که انتخاب‌ها با یکدیگر همبستگی ندارند. متأسفانه، در مورد مسئله انتخاب مسیر حمل‌ونقل همگانی، درواقع بسیاری از گزینه‌های مسیر می‌توانند با یکدیگر همبستگی داشته باشند. به‌طور خاص این مورد معمولاً به این صورت است که دو مسیر، دقیقاً قسمت یکسانی از راه را پوشش می‌دهند و فقط ازنظر شماره مسیر متفاوت هستند. درنتیجه این همبستگی بالقوه، یک اصطلاح تصحیح اندازه مسیر، که توسط دیگزیت و همکاران در سال ۲۰۲۱ میلادی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Dixit, Cats, Brands, van Oort, & Hoogendoorn, 2021)، به مدل اضافه می‌شود. این اصطلاح به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$PS_{in}\ = \sum_{s\in\Gamma_i} \frac{1}{N_i} \ln\left(\sum_{j\in C_n} \delta_{sj}\right) \qquad (۲)$$

Γ_i = مجموعه تمام ایستگاه‌های مسیر i.

N_i = تعداد کل ایستگاه‌های مسیر i.

δ_{sj} = اگر ایستگاه s در مسیر j باشد، این مقدار برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

درحالی‌که اصطلاح تصحیح اندازه مسیر معمولاً بر اساس طول کمان محاسبه می‌شود، برای حالت حمل‌ونقل همگانی مستدل است که ایستگاه‌ها نماینده بهتری برای هم‌پوشانی واقعی تجربه‌شده مسافران، در مسیرهای جذاب خود، می‌باشند. درنتیجه اصطلاح تصحیح اندازه مسیر به‌جای هم‌پوشانی کمان‌ها، نسبت به هم‌پوشانی ایستگاه‌ها در مسیرهای مجموعه انتخابی منطبق شده است.

با توجه به این واقعیت که تمام نرخ‌های حاشیه‌ای جایگزینی، نسبت به زمان داخل وسیله نقلیه غیر حمل‌ونقل همگانی که در این مطالعه زمان پیاده‌روی است، محاسبه می‌شوند و ازآنجاکه این ضرایب برای سایر پارامترهای زمانی برابر ۱/۰ نیستند؛ بدیهی است که همه اجزای زمان به یک اندازه در فرآیند انتخاب مسیر مسافر تأثیرگذار نباشند. این موضوع به این دلیل است که عموماً افراد تمایل دارند مسیرهایی بازمان سفر طولانی‌تر در داخل وسیله حمل‌ونقلی انتخاب کنند، تا زمان پیاده‌روی مرتبط با مسیر انتخابی خود و زمان انتظار برای وسایل نقلیه حمل‌ونقل همگانی را به حداقل برسانند.

در مطالعه پیش رو از ضرایب به‌دست‌آمده از مدل لوجیت چندجمله‌ای ساده شده، که مدل ساده‌تری برای مدل‌های تخصیص حمل‌ونقل همگانی محسوب می‌شود، استفاده شده است. علی‌رغم اینکه این مدل نسبت به مدل لوجیت چندجمله‌ای بسط‌یافته تعداد پارامترهای کمتری دارد، اما مقدار ρ^2 اصلاح شده آن نسبتاً بزرگ بوده و برابر مقدار ۰/۴۱۵ بود. متغیرهای مهم در این تابع مطلوبیت به شرح زیر است:

-ضریب تصحیح اندازه مسیر

-نوع مسیر (مسیر حمل‌ونقل همگانی ، سریع و سیر، اتوبوس محلی)

-تعداد جابه‌جایی در مسیر

-پارامترهای زمانی، شامل زمان داخل وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی، زمان پیاده‌روی ورودی/خروجی و زمان انتظار دسترسی ضرایب پارامترهای به‌کاررفته در این مدل به شرح جدول (۱) بر مبنای مطالعات تم‌ها و تعریف شده است.

در ادامه با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه‌ی زمانی تمهاو و با توجه به نرخ حاشیه‌ای جایگزینی مربوط به زمان‌های مؤثر در انتخاب مسیر مسافران، "نخستین کوتاه‌ترین مسیر" برای مسافران تولیدشده و سپس با استفاده از زیرالگوریتم حذف سفر، با بهره‌گیری از "نخستین کوتاه‌ترین مسیر" به‌عنوان "ریشه" درخت مسیرها، سایر مسیرهای جذاب به روش حذف سفرها، ایستگاه‌ها و کمانهای مرتبط با آن‌ها تولید و به مجموعه انتخاب مسافران اضافه می‌شوند.

در مرحله بعد، با استفاده از میزان مطلوبیت هریک از مسیرهای مجموعه انتخابی مسافران محاسبه گشته و ثبت و ذخیره‌سازی می‌شود. در گام بعدی فاکتور اصلاح هم‌پوشانی مسیر برای هریک از مسیرهای مجموعه انتخابی مسافران، نسبت به سایر مسیرهای موجود در مجموعه، محاسبه می‌شود. در مرحله بعدی احتمال انتخاب هریک از مسیرهای مجموعه انتخابی مسافران، محاسبه می‌شود.

جدول ۱. ضرایب مدل لوجیت چندجمله‌ای تمهاو و نرخ‌های حاشیه‌ای جایگزینی

پارامتر	نرخ حاشیه‌ای جایگزینی (نسبت به زمان پیاده‌روی در مقیاس ساعت)	ضریب
زمان سفر غیر حمل‌ونقل همگانی (ساعت)	۱,۰۰۰	-۵,۸۶۷
زمان سفر داخل وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی (ساعت)	۰,۳۷۳	-۲,۱۸۷
زمان پیاده‌روی دسترسی (ساعت)	۱,۷۴۶	-۱۰,۲۴۶
زمان پیاده‌روی خروجی (ساعت)	۲,۸۹۳	-۱۶,۹۷۱
زمان انتظار دسترسی (ساعت)	۳,۱۰۷	-۱۸,۲۲۷
تعداد جابه‌جایی در هر مسیر	۰,۴۸۰ (جریمه ۲۸,۸ دقیقه‌ای)	-۲,۸۱۴
اصلاح هم‌پوشانی ایستگاه	ـــــ	-۰,۷۷۹

جهت شبیه‌سازی حرکت‌های مسافران در شبکه حمل‌ونقل همگانی و منظور کردن محدودیت ظرفیت موجود در شبکه، از مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر شبیه‌سازی خانی (Khani, 2013; Khani et al., 2015; Khani et al., 2013) استفاده می‌شود. ایده اصلی در استفاده از این روش، بارگذاری تقاضا در شبکه، اطمینان از برقراری اصل اولویت سوارشدن و تعیین تجاوز از ظرفیت در سیستم است. در این مدل شبیه‌سازی، وسایل نقلیه حمل‌ونقل همگانی و ایستگاه‌ها عناصر ثابت سیستم، و مسافران عوامل حرکت در سیستم هستند. در ادامه تعامل بین سیستم و مسافران شرح داده می‌شود. ازآنجاکه برنامه خدمت‌دهی مربوط به سفرهای وسایل نقلیه مشخص است، ورود و خروج وسایل نقلیه به‌عنوان رویدادهای شبیه‌سازی تعریف‌شده و برای تعیین وضعیت شبکه پردازش می‌شوند. در حین شبیه‌سازی، مسافران تولیدشده و با توجه به مسیرهای از پیش تعریف‌شده خود، در ایستگاه‌های ورود، بارگذاری می‌شوند. مسافران بدون درنظرگرفتن وسیله نقلیه انتخابی خود، در ایستگاه‌ها یک صف ایجاد کرده و برای سوارشدن به وسایل نقلیه، به ترتیب اولویت ورود به ایستگاه از صف خارج می‌شوند. در هر رویداد حمل‌ونقل همگانی ، یعنی وقتی یک وسیله نقلیه به ایستگاه می‌رسد، مسافران ابتدا در صورت نیاز از وسیله نقلیه خارج می‌شوند و سپس اگر مسافران موجود در ایستگاه قصد سوارشدن به سفر فعلی را داشته باشند، سوار وسیله نقلیه می‌شوند. در شرایطی که ظرفیت موجود کمتر از تعداد مسافرانی باشد که مایل به سوارشدن هستند، با توجه به اولویت سوارشدن، تعداد محدودی از مسافران سوار وسیله نقلیه شده و مابقی به‌عنوان مسافرهایی با مسیرهای ناموفق برچسب‌گذاری می‌شوند. در کنار این شبیه‌سازی رویداد، سیستم، پیاده‌روی مسافران بین نقاط را مدل‌سازی کرده و آن‌ها را به ایستگاه‌های ورود تخصیص داده و یا به مقصد نهایی خود می‌فرستد. پس از اجرای شبیه‌سازی، تجربیات مسافران ارزیابی‌شده و زیرمجموعه‌ای از مسافران که مسیرهای ناموفق دارند، برای تخصیص به مسیرهای جایگزین در تکرار بعدی انتخاب می‌شوند. مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی ارایه‌شده در این مطالعه، یک‌روند تکرارشونده از مراحل فوق است تا زمانی که ملاک خاتمه برقرار شود. تنها پارامتری که در طول تکرارها تغییر می‌کند، ظرفیت موجود برای هر گروه خاص از مسافران است؛ بنابراین شبکه با توجه به بار وسایل نقلیه به‌روز شده و سپس تخصیص مسافران ناموفق، در شبکه به‌روز شده، انجام می‌شود. در اصل بعد از هر شبیه‌سازی، ظرفیت موجود برای هر مسافر در هر مسیر مشخص می‌شود و در صورت عدم وجود ظرفیت در مسیر فعلی برای مسافر، او به مسیر جذاب بعدی خود تخصیص داده می‌شود. این الگوریتم به‌گونه‌ای اجرا می‌شود که در هر تکرار، مسافران تخصیص‌یافته در مسیر بهینه خود سفر می‌کنند. از طریق تکرارهای بیشتر این الگوریتم، مسافران بیشتری می‌توانند سفرهای خود را تکمیل کرده و درنهایت همه مسافران جذاب‌ترین مسیر در دسترس خود را طی کنند. این شرایط دقیقاً شرایط تعادل است و راه‌حل مطلوب برای حل مسئله است. در این مدل، درصد مسافران با مسیرهای ناموفق به دلیل کمبود ظرفیت ایجادشده در سیستم، به‌عنوان معیار سنجش همگرایی الگوریتم در هر مرحله، استفاده می‌شود. قابل‌ذکر است که پدیده عدم موفقیت در سوارشدن مسافر، در شبیه‌سازی به‌عنوان یک فن الگوریتمی برای تسهیل روش حل، مدل شده است. یعنی به‌جای شبیه‌سازی رفتارهای انطباقی و تطبیقی مسافران در یک تکرار واحد، آن دسته از مسافرانی که موفق به سوارشدن نشدند، در تکرار فعلی از سیستم خارج‌شده و در تکرار بعدی، با یک مسیر به‌روز شده، به سیستم اضافه می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، روند تنظیم مسیر برخلاف قرار گرفتن در مسیر، تکراری است. در ادامه حل سعی شده است تا اثر پردازش موازی تشریح شود. محاسبات یا پردازش موازی نوعی از محاسبات است که در آن بسیاری از محاسبات یا فرآیندها به‌طور هم‌زمان انجام می‌شوند. به‌طور مرسوم، نرم‌افزار کامپیوتر برای رایانش متوالی نوشته‌شده و برای حل یک مسئله، الگوریتمی به شکل یک جریان متوالی از دستورالعمل‌ها ساخته و اجرا می‌شود. این دستورالعمل‌ها در یک واحد پردازش مرکزی در رایانه اجرا می‌شوند. بنابراین در یک‌زمان مشخص، فقط یک دستورالعمل می‌تواند اجرا شود و پس از پایان آن دستورالعمل، دستور بعدی اجرا خواهد شد. اما پردازش موازی از چندین عنصر پردازشگر به‌طور هم‌زمان برای حل یک مسئله استفاده می‌کند. این امر با تقسیم مسئله به قسمت‌های مستقل حاصل می‌شود تا هر عنصر پردازشگر بتواند بخشی از الگوریتم را هم‌زمان با بقیه اجرا کند. عناصر پردازشگر می‌توانند متنوع بوده و شامل منابعی مانند یک رایانه با چندین پردازنده، چندین رایانه شبکه شده، سخت‌افزار

تخصصی یا هر ترکیبی از موارد فوق باشند. ازنظر تاریخی رایانش موازی برای محاسبات علمی و شبیه‌سازی مسئله‌های علمی، به‌ویژه در علوم طبیعی و مهندسی، مانند هواشناسی استفاده می‌شد. هدف از فرآیند چندهسته‌ای کردن بهبود زمان محاسباتی است. با اعمال این فرآیند در یک برنامه‌ی کدنویسی شده و تقسیم محاسبات میان هسته‌های مختلف در یک پردازشگر، زمان محاسباتی به میزان قابل قبولی بهبود پیدا خواهد کرد. در مطالعه حاضر، چندهسته‌ای کردن به معنی استفاده از یک رایانه با چندین هسته پردازشگر است. این روش فقط هنگامی قابل‌استفاده است که وظایف محول شده به هسته‌های پردازشگر، استقلال کافی داشته و به یکدیگر وابسته نباشند. با توجه به این مسئله که فرآیند یافتن مجموعه مسیرهای جذاب برای مسافران مستقل از یکدیگر است و مجموعه مسیرهای جذاب یک مسافر بر مجموعه مسیرهای جذاب مسافر دیگر تأثیرگذار نیست، این بخش از برنامه کد نویسی شده مورد بازبینی و برنامه‌نویسی موازی قرار گرفت. رایانه مورد استفاده در این مطالعه دارای دوهسته و ٤ پردازشگر منطقی بود به این معنا که با اعمال فرآیند چندهسته‌ای کردن تمام ٤ پردازنده موجود در سیستم جهت انجام محاسبات به‌کار گرفته می‌شوند.

بخش بعدی برنامه‌ی کد نویسی شده، مربوط به شبیه‌سازی و اعمال محدودیت ظرفیت است. ازآنجاکه شبیه‌سازی و تخصیص مسافران به مسیرهای جذاب وابسته به انتخاب و تخصیص مسافران پیشین است، و درواقع رسیدن هر مسافر به مقصد خود بر مسیر مسافران بعدی تأثیرگذار است، این بخش از برنامه‌ی کد نویسی شده امکان برنامه‌نویسی به‌صورت موازی را نداشته و به‌صورت برنامه‌نویسی سری باقی خواهد ماند. به‌این‌ترتیب فرآیند چندهسته‌ای کردن، باهدف بهبود زمان محاسباتی و افزایش کارایی برنامه‌ی کد نویسی شده، فقط بر روی قسمتی از برنامه که به تولید مجموعه مسیرهای جذاب برای کاربران می‌پردازد، اعمال شده است.

در ادامه نتایج حاصل از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر پویای مبتنی بر برنامه زمانی به همراه زیرالگوریتم حذف سفر تمهاو، با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی خانی برای ملاحظه ظرفیت معرفی شده در این مقاله، با نتایج الگوریتم معرفی شده مدل فلورین–اشپیس (Spiess & Florian, 1989) به‌عنوان یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر غیرپویای مبتنی بر کمان و بدون درنظرگرفتن ظرفیت که مبنای مطالعات است مقایسه شده است.

٤- نتایج پژوهش و تفسیر آن‌ها

به دلیل عدم دسترسی به داده‌های ترافیکی مناسب در داخل کشور برای استفاده در این مدل، الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش برای مطالعه موردی روی شبکه اتوبوس‌رانی و مترو شهری سانفرانسیسکو در کالیفرنیا ، که مشکلات ظرفیتی قابل‌توجهی دارد، اعمال شد. این داده‌های اولیه پس از برداشت از منابع ارایه‌دهنده این نوع اطلاعات، با استفاده از کد نویسی به زبان برنامه‌نویسی پایتون، و به‌وسیله ادغام و ترکیب شدن با یکدیگر، به حالت مطلوب برای استفاده در الگوریتم و مدل موردبررسی در این مقاله درآمدند. در جداول (۲)، (۳)، (٤) و (۵) زیر نمونه‌ای از این داده‌های آماده‌شده و تغییریافته، که شامل موارد مورداحتیاج در این پژوهش است، ارایه‌شده است. مؤلفه ضروری دیگر برای ایجاد شبکه حمل‌ونقل همگانی، اطلاعات مربوط به نواحی ترافیکی است. این اطلاعات شامل شناسه نواحی و طول و عرض جغرافیایی مراکز آن‌ها است. اطلاعات نواحی ترافیکی برای مطالعه حاضر، از طریق منابع ارائه‌دهنده (https://gtfs.org) برای شهر سانفرانسیسکو تهیه شدند. نمونه این اطلاعات در جدول (٦) ارایه شده‌است.

مؤلفه دیگر شبکه حمل‌ونقلی که برای اجرای مدل پیشنهادی باید تولید شود، مجموعه کمان‌های پیاده‌روی یعنی دسترسی، خروجی و انتقال است. این کمان‌ها نیز با استفاده از برنامه‌نویسی به زبان پایتون، در میان ایستگاه‌های حمل‌ونقلی و مراکز نواحی ترافیکی تولید می‌شوند.

جدول ۲. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات ایستگاه‌ها

شناسه ایستگاه	ظرفیت	نقطه زمانی	طول‌جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه
۳۹۰	۱۰۰	۱	-122.4751	37.72119	19th_Avenue_&_Holloway_St
٦٦٠	۱۰۰	۱	-122.4354	37.723914	MISSION_ST_&_OCEAN_AVENUE
۹۱۳	۱۰۰	۱	-122.4258	37.719192	DUBLIN_ST_&_LAGRANDE_AVE
۳۰۰۳	۱۰۰	۱	-122.3919	37.781827	2nd_St_&_Brannan_St___
۳۰۰٤	۱۰۰	۱	-122.3922	37.781854	2nd_St_&_Brannan_St___
۳۰۰۸	۱۰۰	۱	-122.3966	37.785318	2nd_St_&_Folsom_St___
۳۰۰۹	۱۰۰	۱	-122.3953	37.784532	2nd_St_&_Harrison_St___

جدول ۳. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات سفرها

شناسه سفر	شناسه شکل	ظرفیت	زمان شروع	حالت	شناسه مسیر
٥١١٦٣٨٥	۹۰۱۳٤	٦٣	۷۰۹۰۰	۳	۷۷٦۷
٥١١٦٣٨٦	۹۰۱۳٤	٦٣	۷۱۷۰۰	۳	۷۷٦۷
٥١٣٤٩٥١	۹۰۳٤۳	٦٣	۱۷۳۰۰	۳	۱۰۳۰
٥١٣٤٩٥٢	۹۰۳٤۳	٦٣	۱۷٤۲۰۰	۳	۱۰۳۰
٥١٣٤٩٥٣	۹۰۳٥۰	٦٣	۹۰٤۰۰	۳	۱۰٤٥
٥١٣٤٩٥٤	۹۰۳٥۰	٦٣	۹۱۷۰۰	۳	۱۰٤٥
٥١٣٤٩٥٥	۹۰۳٥۰	٦٣	۹۲۹۰۰	۳	۱۰٤٥

جدول ٤. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات مسیرهای حمل‌ونقل همگانی

شناسه مسیر	نام کوتاه مسیر	نام مفصل مسیر	نوع مسیر
۷۷٦۷	۱	CALIFORNIA	۳
۱۰۰۲	۲	CLEMENT	۳
۱۰۰۳	۳	JACKSON	۳
۷۷٦۹	٥	FULTON	۳

جدول٥. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات زمان-ایستگاه‌ها

ترتیب ایستگاه	شناسه ایستگاه	زمان عزیمت	زمان ورد	شناسه سفر
۱	٤۰۱٥	۷۰۹۰۰	۷۰۹۰۰	٥١١٦٣٨٥
۲	٦۲۹٤	۷۱۰۰۸	۷۱۰۰۸	٥١١٦٣٨٥
۳	٦۲۹۰	۷۱۱۲۱	۷۱۱۲۱	٥١١٦٣٨٥
٤	٦۳۱٤	۷۱۲۰۰	۷۱۲۰۰	٥١١٦٣٨٥
٥	٦۳۰۷	۷۱۲٤۷	۷۱۲٤۷	٥١١٦٣٨٥

در این مطالعه محل مبدأ و مقصد هر مسافر، در مرکز ناحیه ترافیکی مبدأ و مقصد آن قرار داده شده است. بنابراین فاصله طولی و زمانی مربوط به کمان‌های دسترسی و خروجی، از مرکز نواحی مبدأ و مقصد مسافران تا اولین و آخرین ایستگاه حمل‌ونقل همگانی مرتبط با مسیر منتخب، و با استفاده از طول و عرض جغرافیایی هرکدام از ایستگاه‌ها و مراکز نواحی

ترافیکی محاسبه می‌شوند. بر این اساس کمان‌های پیاده‌روی دسترسی، یعنی کمان میان نواحی ترافیکی مبدأ تا اولین ایستگاه مسیر جهت سوارشدن مسافر به اولین وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی ، با توجه به آستانه ۱/۱ مایلی و کمان‌های پیاده‌روی خروجی، یعنی از آخرین ایستگاه مسیر که مسافر در آن پیاده شده و به سمت مقصد پیاده‌روی می‌کند تا مرکز ناحیه ترافیکی مقصد، با توجه به آستانه ۰/۷۲ مایل ایجاد شدند. همچنین کمانهای پیاده‌روی انتقال نیز با درنظرگرفتن آستانه ۰/۱ مایلی، یعنی فاصله طولی میان ایستگاه‌ها با توجه به طول و عرض جغرافیایی آن‌ها، در تمام شبکه ایجاد شدند.

درنهایت با ادغام داده‌های مشخصات ورودی حمل‌ونقل همگانی جامع شهر سانفرانسیسکو، اطلاعات نواحی ترافیکی آن و کمانهای پیاده‌روی و انتقال ایجادشده از قسمت قبل، شبکه حمل‌ونقل همگانی شهر سانفرانسیسکو ساخته شد. بعلاوه ظرفیت هر وسیله نقلیه و هر ایستگاه حمل‌ونقل همگانی از منابع دیگر تعیین و برابر ۶۳ مسافر در هر وسیله و ۱۰۰ مسافر برای هر ایستگاه حمل‌ونقل همگانی در نظر گرفته شد. در جداول (۷)، نمونه‌ی کوچکی از داده‌های ورودی تغییریافته و تولیدشده، برای کمان‌های دسترسی، خروجی و انتقال در شبکه شهر سانفرانسیسکو ارایه شده است.

داده‌های شمارشگرهای خودکار مسافران مربوط به شبکه اتوبوس‌رانی و مترو شهر سانفرانسیسکو، برای شبیه‌سازی زمان ترجیحی ورود و خروج مسافران در بازه‌های پنج‌دقیقه‌ای استفاده شد. این تغییرات پویای تقاضا، تمام بازه‌های زمانی یعنی بازه‌های زمانی بزرگی مانند صبح ، نیمه‌روز ، بعدازظهر و سایر دوره‌های زمانی دیگر را دربرمی‌گرفت. اطلاعات تور، به‌طور مثال شامل سفرهای ورودی یا خروجی به و از ناحیه مبدأ و دقت بالای سفرهای تولیدشده، تخصیص دقیق‌تر مسافران به شبکه را ممکن می‌ساخت. جدول (۸) زیر اطلاعات شکل شبکه و داده‌های تقاضا را برای مدل‌سازی شبکه حمل‌ونقل سانفرانسیسکو در دوره اوج ۵ ساعته بعدازظهر نشان می‌دهد.

جدول ٦. نمونه داده‌های ورودی اطلاعات نواحی ترافیکی

شناسه ناحیه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	-122.414	37.70949
2	-122.464	37.70921
3	-122.421	37.70978
4	-122.457	37.70948
5	-122.417	37.70984

جدول ۷. نمونه داده‌های ورودی اطلاعات کمان‌های دسترسی و خروجی

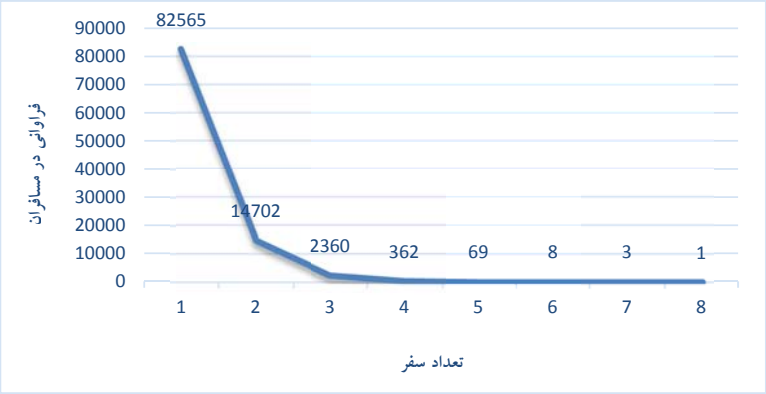
شناسه ناحیه ترافیکی	شناسه ایستگاه	فاصله زمانی (دقیقه)	فاصله طولی (مایل)
1	4808	5.43	0.272
1	4895	4.07	0.203
337	6746	8.23	0.411
337	6772	7.47	0.374
337	6906	4.34	0.217
338	3085	5.46	0.273

جدول۸. ویژگی‌های شبکه حمل‌ونقل همگانی سانفرانسیسکو و تقاضا در بازه پنج‌ساعته بعدازظهر

ویژگی شبکه	نواحی ترافیکی	ایستگاه	راه یا مسیر	سفرهای وسیله حمل‌ونقل همگانی	زمان-ایستگاه‌ها	تقاضا (سفر مسافران)
تعداد	۹۸۱	۳۵۹۸	۷۹	۲۹۸۷	۱۲۰۱۴۳	۱۲۰۹۱۹

تعداد کل خانوارهای موردبررسی در این مطالعه، ۸۷۹۳٤ خانوار است. این تعداد خانوار شامل ۱۰۰۰۷۰ مسافر است که همان‌طور که در جدول (۸) به آن اشاره‌شده است، تعداد تقاضاهای سفر از سوی این مسافران ۱۲۰۹۱۹ سفر است. این بدان معنا است که هر مسافر به‌طور میانگین، در بازه زمانی موردبررسی، تقاضای انجام بیش از یک سفر را داشته است.

با بررسی بیشتر داده‌های تقاضا مشخص شد که ۸۲/۵ درصد از مسافران تقاضای تنها یک سفر، ۱۴/۷ درصد از مسافران تقاضای دو سفر، ۲/۳۵ درصد از مسافران تقاضای سه سفر و تنها حدود ۰/۴۴ درصد از مسافران تقاضای چهار تا هشت سفر در بازه مطالعاتی داشته‌اند. جزییات این بررسی به‌صورت فراوانی تعداد سفرها میان مسافران در شکل (۲) نشان داده‌شده است. بازه‌ی زمانی موردمطالعه در این مقاله، بازه پنج‌ساعته بعدازظهر از ساعت ۱۵ الی ۲۰ بوده است. با بررسی بیشتر داده‌های ورودی مشخص شد که ساعت اوج تقاضای ترافیکی در این بازه، در پنجره‌های زمانی ۱۷ تا ۱۸ و ۱۶ الی ۱۷ عصر قرار دارد و درمجموع حدود ۷۰٪ از مسافران تمایل به انجام سفر در این بازه‌های زمانی را داشته، یا به عبارتی زمان رسیدن ترجیحی آن‌ها به مقصد در این بازه‌ها قرار دارد. به‌طور دقیق‌تر در بازه زمانی ۱۷ تا ۱۸، ۳۵/۱ درصد از مسافران، در بازه‌ی زمانی ۱۶ الی ۱۷، ۳۳/۶ درصد از مسافران، و در بازه‌های زمانی ۱۸ الی ۱۹ و ۱۵ الی ۱۶ به ترتیب ۱۶ و ۱۵/۳ درصد از مسافران تمایل به انجام سفرهای خود دارند. همچنین مشخص شد که از میان ۱۲۰۹۱۹ تقاضای سفر، تعداد ۲۶۴۱۰ سفر مربوط به تقاضای سفر خروجی از مبدأ و ۹۴۵۰۹ سفر مربوط به تقاضای سفر به سمت مبدأ است. در جدول (۹) نمونه‌ی کوچکی از داده‌های ورودی تقاضای سفر مسافران ارایه‌شده است.



شکل ۲. فراوانی تعداد تقاضای سفر در میان مسافران در پیک پنج‌ساعته بعدازظهر

جدول ۹. نمونه داده‌های ورودی تقاضای سفر مسافران

شناسه خانوار	شناسه مسافر	جهت سفر	حالت سفر	ناحیه ترافیکی مقصد	ناحیه‌ترافیکی مبدأ	زمان ورود/عزیمت ترجیحی
۱۰۸	۱۰۸	۱	٤	۵۹	۲۰٤	۱۰۰۳
۱۲۲	۱۲۲	۱	٤	٦٤	۲٤۸	۹۷۹
۱۳۹	۱۳۹	۲	٤	۵۲۰	۷۲	۱۰۵۷
۱۵۲	۱۵۲	۲	٤	۷۷	۱۸۹	۱۰۷۱
۱۷۷	۱۷۷	۱	٤	۸۷	٤۰۹	۹۳٤
۱۸٦	۱۸٦	۱	٤	۱٦۷	۳۹۱	۱۰۵۹

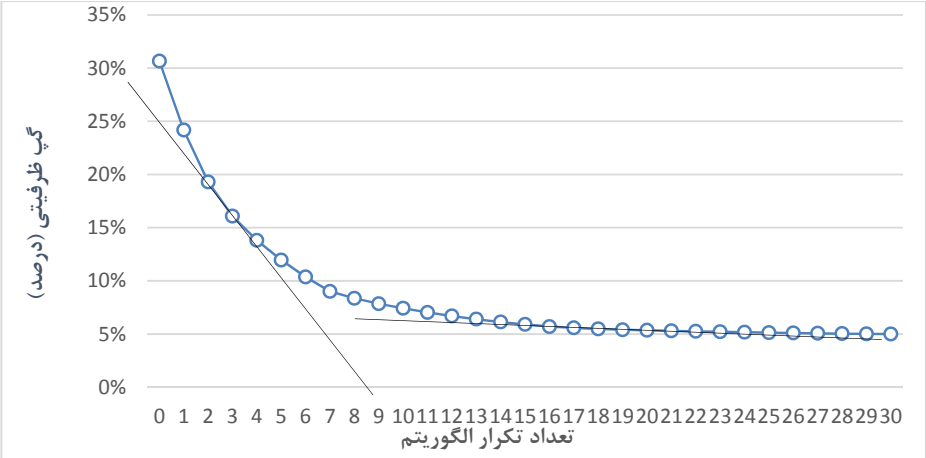
الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه‌ی زمانی به همراه زیرالگوریتم حذف سفر، در محیط برنامه‌نویسی به زبان C++، در یک کامپیوتر با مشخصات Intel Core-i7 7500 U CPU و میزان حافظه GB16 نوشته شد. این برنامه کد نویسی شده دارای دو ماژول اصلی شامل تخصیص و شبیه‌سازی بود. در ماژول تخصیص برای هر مسافر، فرآیند علامت‌گذاری ایستگاه‌های شبکه و یافتن کوتاه‌ترین مسیرهای جذاب، با استفاده از الگوریتم دایکسترا و زیرالگوریتم حذف سفر، انجام‌شده و درنهایت یک مجموعه از مسیرهای جذاب بدون درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت به دست آمد. سپس بر اساس مطلوبیت مسیرهای موجود، مسافران به‌طور متناسب به گزینه‌های جذاب اختصاص یافتند. همچنین از تابع لوجیت چندجمله‌ای برای محاسبه مقادیر مطلوبیت مربوط به گزینه‌های جذاب استفاده شد. در مرحله بعد، فرآیند شبیه‌سازی برای

مسافران دارای مسیر انجام می‌شود. این فرآیند به‌صورت تخصیص یک‌به‌یک مسافران به سفرها و کمانهای مربوط به مسیر منتخب آن‌ها است. ویژگی محدودیت ظرفیت سفرها به این صورت اعمال می‌شود که با سوارشدن هر مسافر به هر وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی در شبکه، از ظرفیت آن سفر به‌اندازه یک مسافر کاسته شده و با رسیدن آن مسافر به ایستگاه پیاده شدن و خروج از آن وسیله، که در مسیر منتخب مسافر از پیش محاسبه و تعیین‌شده است، به‌اندازه یک مسافر به ظرفیت آن سفر وسیله نقلیه اضافه می‌شود. این فرآیند به ترتیب برای تمام مسافران اجراشده و در پایان هر تکرار از اجرای برنامه، تعداد کل مسافران دارای مسیر، تعداد مسافرانی که با استفاده از کوتاه‌ترین مسیر تخصیصی خود به مقصد رسیده‌اند، تعداد مسافرانی که به دلیل نبود ظرفیت سفر خود را ازدست‌داده‌اند، و درنهایت گپ حاصل از کمبود ظرفیت که به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود، چاپ می‌شود.

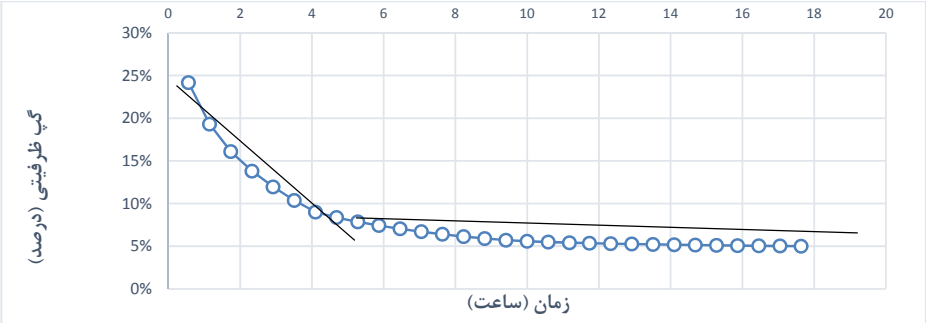
$$g_i = \frac{\sum_{rs} \tilde{q}^i_{rs}}{\sum_{rs} q_{rs}} \qquad (۳)$$

که در آن q_{rs} تعداد تقاضای سفر مسافران بین جفت مبدا–مقصد rs بوده، $\sum_{rs} q_{rs}$ تعداد کل تقاضای سفر مسافران برای تمام جفت مبدا–مقصدها و $\tilde{q}^i_{rs}$ تعداد مسافران ناموفق در جفت مبدا–مقصد rs در تکرار i از الگوریتم می‌باشد.

نتایج محاسبات نشان می‌دهد که برنامه بعد از ۳۰ تکرار به گپ ظرفیتی ۵ درصدی رسیده است. این موضوع بیانگر این است که پس از ۳۰ بار تکرار برنامه و شبیه‌سازی مسیرهای مسافران، ۹۵٪ مسافران موفق شده‌اند تا با استفاده از مسیرهای جذاب موجود در مجموعه انتخابی خود به مقصد برسند و تنها ۵٪ از مسافران به دلیل کمبود ظرفیت از رسیدن به مقصد خود بازمانده‌اند. به‌بیان‌دیگر پس از تکرار ۳۰ ام از برنامه، مدل موردبررسی به‌طور مؤثری همگرا شده است. همانطور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، مقدار درصدی گپ ظرفیتی و یا درواقع همگرایی الگوریتم را بر اساس تعداد تکرار نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، با افزایش تعداد تکرارها، تعداد مسافرانی که با استفاده از مسیرهای موجود در مجموعه انتخاب خود به مقصد رسیده‌اند، افزایش‌یافته و درنتیجه گپ حاصل از کمبود ظرفیت، کاهش می‌یابد. بعلاوه این نمودار نشانگر آن است که بعد از تکرار اول الگوریتم، حدود ۲۴٪ از مسافران، هنوز به مقصد خود نرسیده‌اند درحالی‌که در تکرار سی‌ام از الگوریتم این گپ ظرفیتی به حدود ۵٪ رسیده است. بعلاوه تأثیر تکرارهای اول الگوریتم بر کاهش گپ ظرفیتی بیشتر از تکرارهای بعدی آن است و سرعت کاهش گپ ظرفیتی در تکرارهای اول به‌مراتب بالاتر از تکرارهای نهایی الگوریتم است. به‌طوری‌که از تکرار اول تا تکرار ۱۶ ام از الگوریتم ۱۸/۴۷٪ از مسافران باقی‌مانده در شبکه، به مقاصد خود رسیده‌اند و درواقع گپ ظرفیتی به‌اندازه ۱۸/۴۷٪ کاهش‌یافته است؛ درحالی‌که از تکرار ۱۶ ام تا ۳۰ ام، یعنی طی ۱۴ تکرار، فقط حدود ۰/۷٪ از گپ ظرفیتی کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که پیدا کردن مسیرهای دارای ظرفیت وقتی ۹۰٪ مسافران به مقاصد خود رسیده‌اند، دشوارتر از یافتن آن در هنگامی است که تنها ۷۰٪ مسافران به مقاصد خود دست‌یافته‌اند.

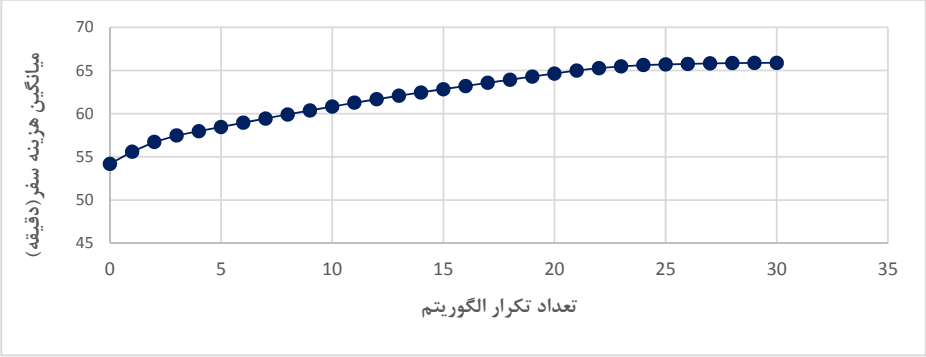


شکل ۳. نسبت گپ ظرفیتی به تکرار الگوریتم در شبکه سانفرانسیسکو



شکل ٤. نسبت گپ ظرفیتی به زمان محاسبه در شبکه سانفرانسیسکو

در شکل (٤) مقدار گپ ظرفیتی بر اساس زمان محاسبه نشان داده‌شده است. همانند تعداد تکرارها، این نمودار بیانگر این نکته است که باگذشت زمان، میزان گپ ظرفیتی کاهش و به راه‌حل بهینه نزدیک‌تر می‌شویم. مطابق این نمودار، در ساعات ابتدایی و در تکرارهای اولیه، میزان سرعت کاهش گپ ظرفیتی بسیار بیشتر از ساعات پایانی زمان محاسباتی است. به‌طوری‌که در پنج ساعت ابتدایی زمان محاسباتی، حدود ١٦/٦٪ از گپ ظرفیتی کاهش‌یافته است و در ۱۲/۵ ساعت بعدی این میزان حدود ۳٪ بوده است. در شکل (۵) نیز میانگین هزینه سفر مسافرانی که در هر تکرار به مقصد خود رسیده‌اند، نمایش داده‌شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با اختصاص مسافران بیشتر به شبکه، میانگین هزینه سفر به ازای هر مسافر افزایش می‌یابد. یعنی درحالی‌که راه‌حل ارائه‌شده به یک راه‌حل عملی نزدیک‌تر می‌شود، هزینه سفر مسافران افزایش می‌یابد؛ که البته با آنچه قبلاً در مورد همگرایی الگوریتم توضیح داده شد، سازگار است. دلیل این موضوع این است که با اختصاص مسافران بیشتر به شبکه، میزان ظرفیت در مسیرهای بهینه‌تر کاهش‌یافته و درنتیجه مسافران به مسیرهای بازمان سفر بیشتر تخصیص داده می‌شوند. این امر موجب افزایش کلی متوسط هزینه سفر می‌شود. در هر تکرار، فقط هزینه سفر مسافرانی که به مقصد خود رسیده‌اند، لحاظ شده و هزینه شکست سایر مسافران در تکمیل سفرشان درج نشده است. در غیر این صورت، هزینه متوسط سفر، بسته به میزان کاهش ظرفیت شبکه، افزایش می‌یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت بین میانگین هزینه اولیه و میانگین هزینه نهایی سفر، برابر با میانگین هزینه اضافی تحمیل‌شده به مسافران به دلیل محدودیت ظرفیت است. با توجه به میانگین هزینه اولیه مسافرانی که به مقصد رسیده‌اند، بدون درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت، برابر ٥٤/٢ دقیقه است. درحالی‌که این مقدار در تکرار آخر، یعنی تکرار سی‌ام از الگوریتم، برابر مقدار ٦٥/٨٩ دقیقه است. یعنی مسافران در شبکه، به علت کمبود ظرفیت، حاضرند مسیرهایی با هزینه زمانی بیشتر ١١/٦٩ دقیقه‌ای یا ۲۱/۵ درصدی را برای رسیدن به مقاصد خود بپیمایند.



شکل ۵. نسبت میانگین هزینه سفر مسافران در هر تکرار در شبکه سانفرانسیسکو

نتیجه اعمال روش پردازش موازی در این مقاله، بر زمان پردازش داده‌ها و تولید مجموعه مسیرهای جذاب برای مسافران، در الگوریتم مبتنی بر برنامه زمانی موردبررسی، نشان داد که زمان محاسباتی مربوط به یافتن مجموعه مسیرهای

جذاب، با استفاده از یک پردازشگر با ٤ هسته منطقی، حدود ۳ ساعت و ۳۰ دقیقه، یا ۳۷ درصد کاهش‌یافته است.

۵-نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از این مقاله، مدل کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر کمان با بهره‌گیری از خطوط حمل‌ونقل همگانی، در شبکه‌های دارای محدودیت ظرفیت شدید مانند شبکه اتوبوس‌رانی و مترو سانفرانسیسکو، گزینه مناسبی نمی‌باشد. زیرا علی‌رغم داشتن زمان محاسباتی کم، به دلیل عدم منظور نمودن زمان رسیدن ترجیحی مسافران به مقصد یا زمان خروج ترجیحی مسافران از مبدأ و نگاه کلی‌نگر، اعمال محدودیت ظرفیت در آن دشوار بوده و نتایج آن دارای دقت کافی نیستند. اما این مدل، با استفاده از فرکانس ترکیبی در ایستگاه‌ها و تخصیص تقاضا با بهره‌گیری از راهبرد معرفی شده، متوسط زمان سفر کل مسافران را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

همچنین، در این مقاله به بررسی و ارایه یک مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی با محدودیت ظرفیت، با بهره‌گیری از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی به همراه زیرالگوریتم حذف سفر، پرداخته شد. این مدل که بر مبنای نحوه انتخاب مسیر مسافران طراحی‌شده است، مجموعه‌ای از مسیرهای جذاب را برای هر یک از مسافران تولید کرده، و مسافران بسته به مطلوبیت مسیرهای جایگزین و ظرفیت مربوط به هریک از سفرهای آن‌ها، به مسیرها تخصیص داده‌شده و شبیه‌سازی می‌شوند. در این مدل، در راستای منظور نمودن محدودیت ظرفیت، از یک‌روند تخصیص، بازخورد و تکرار استفاده شده است. همچنین این الگوریتم با تعریف زمان انتظار دسترسی به اولین سفر در هر مسیر، و اختصاص بیشترین ضریب عدم مطلوبیت به این زمان، ساختار انتخاب مسیر مسافران را تغییر داده است.

نوآوری ارایه‌شده در این مقاله، مربوط به استفاده از یک مدل جدید مبتنی بر لوجیت انتخاب مسیر برای مسافران می‌باشد. این مدل، برخلاف مدل‌های معرفی‌شده پیشین که در آن‌ها انتخاب مسیر مسافران در هر ایستگاه انجام می‌گرفته، در ابتدای سفر مجموعه‌ای از مسیرهای جذاب را ارائه می‌دهد. بعلاوه با تغییر در ضرایب مدل ریاضی تابع مطلوبیت، و اعمال فاکتور اصلاح هم‌پوشانی مسیر، روش جدیدی برای انتخاب مسیر مسافران ارایه شد، که هم‌پوشانی مسیرهای مختلف حمل‌ونقل همگانی را در سطح ایستگاه‌ها مورد توجه قرار داده و موجب تغییر در میزان احتمال انتخاب هر مسیر در مجموعه انتخابی شد. همچنین با معرفی ساختار پردازش موازی و بهره‌گیری از چندین هسته پردازشگر برای پردازش داده‌ها، زمان محاسبات به میزان قابل قبولی کاهش‌یافت و کارایی محاسباتی بهبود بخشیده شد. یکی از کاستی‌های این روش، نیاز مجدد به بارگذاری شبکه در هر بار از تولید مسیر جذاب و ویرایش آن برای علامت‌گذاری مجدد و یافتن کوتاه‌ترین مسیر جدید است. این امر به‌خودی‌خود، باعث افزایش زمان محاسبات می‌شد که البته با معرفی پردازش موازی و بهره‌گیری از آن در محاسبات، زمان پردازش داده‌ها و گرفتن خروجی در حدود ۲۰٪ بهبود یافت. این میزان بهبود برای شبکه‌ی بزرگی مانند شبکه اتوبوس‌رانی و مترو شهر سانفرانسیسکو قابل توجه است.

٦-مراجع

-Bell, M., (2003), "Capacity Constrained Transit Assignment Models and Reliability Analysis", In: Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning. Publication Of: Elsevier Science Publishers BV.

-Cats, O., & Glück, S., (2019), "Frequency And Vehicle Capacity Determination Using A Dynamic Transit Assignment Model", Transportation Research Record, 2673(3), pp.574-585.

-Chriqui, C., & Robillard, P., (1975), "Common Bus Lines, Transportation Science", 9(2), Pp.115-121.

-Cooke, K. L., & Halsey, E., (1966), "The Shortest Route Through A Network With Time-Dependent Internodal Transit Times", Journal of Mathematical Analysis and Applications, 14(3), pp.493-498.

-De Cea, J., & Fernández, E., (1993), "Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: an Equilibrium Model", Transportation Science, 27(2), pp.133-147.

-Dixit, M., Cats, O., Brands, T., Van Oort, N., & Hoogendoorn, S., (2021), "Perception of Overlap In Multi-Modal Urban Transit Route Choice", Transportmetrica A: Transport Science, pp.1-23.

-Hamdouch, Y., & Lawphongpanich, S. (2008), "Schedule-Based Transit Assignment Model With Travel Strategies and Capacity Constraints", Transportation Research Part B: Methodological, 42(7-8),pp.663-684.

-Hamdouch, Y., Marcotte, P., & Nguyen, S., (2004), "Capacitated Transit Assignment With Loading Priorities", Mathematical Programming, 101(1), pp.205-230.
-Jansson, K., & Ridderstolpe, B., (1992), "A Method for the Route-Choice Problem in Public Transport Systems", Transportation Science, 26(3), pp.246-251.
-Khani, A., (2013), "Models and Solution Algorithms For Transit and Intermodal Passenger Assignment (Development of Fast-Trips Model)", The University of Arizona.
-Khani, A., Hickman, M., & Noh, H., (2015), "Trip-Based Path Algorithms Using The Transit Network Hierarchy", Networks and Spatial Economics, 15(3), pp.635-653.
-Khani, A., Sall, E., Zorn, L., & Hickman, M., (2013), "Integration of The FAST-Trips Person-Based Dynamic Transit Assignment Model, The SF-CHAMP Regional, Activity-Based Travel Demand Model", and San Francisco's Citywide Dynamic Traffic Assignment Model. Retrieved From
-Koh, K., Ng, C., Pan, D., & Mak, K. S., (2018), "Dynamic Bus Routing: A Study on The Viability of On-Demand High-Capacity Ridesharing As an Alternative to Fixed-Route Buses in Singapore", Paper Presented At The 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
-Kurauchi, F., Bell, M. G., & Schmöcker, J. D., (2003), "Capacity Constrained Transit Assignment With Common Lines", Journal Of Mathematical Modelling and Algorithms, 2(4), pp.309-327.
-Last, A., & Keak, S., (1976), "Transept: A Bus Model. Traffic Engineering & Control", 17(1).
-Levin, B. M., & Hedetniemi, S., (1963), "Determining Fastest Routes Using Fixed Schedules", Paper Presented at The Proceedings of The May, Spring Joint Computer Conference,
pp. 21-23.
-Narayan, J., Cats, O., Van Oort, N., & Hoogendoorn, S., (2020), "Integrated Route Choice And Assignment Model for Fixed and Flexible Public Transport Systems", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 115, 102631.
-Nguyen, S., & Pallottino, S., (1989), "Hyperpaths and Shortest Hyperpaths", in Combinatorial Optimization, Springer, pp. 258-271.
-Nguyen, S., Pallottino, S., & Gendreau, M., (1998), "Implicit enumeration of hyperpaths in a logit model for transit networks", Transportation science, 32(1), pp.54-64.
-Nguyen, S., Pallottino, S., & Malucelli, F., (2001), "A modeling framework for passenger assignment on a transport network with timetables", Transportation science, 35(3), pp.238-249.
-Nielsen, O. A., & Jovicic, G., (1999), "A large scale stochastic timetable-based transit assignment model for route and sub-mode choices", Ptrc-Publications-P, pp.169-184.
-Schmöcker, J.-D., Bell, M. G., & Kurauchi, F. (2008), "A quasi-dynamic capacity constrained frequency-based transit assignment model", Transportation Research Part B: Methodological, 42(10), pp.925-945.
-Spiess, H., & Florian, M., (1989), "Optimal strategies: a new assignment model for transit networks", Transportation Research Part B: Methodological, 23(2), pp.83-102.
-Tong, C., & Richardson, A., (1984), "A computer model for finding the time-dependent minimum path in a transit system with fixed schedules", Journal of Advanced Transportation, 18(2), pp.145-161.
-Wahba, M., & Shalaby, A., (2009), "Learning-based departure time and path choice modelling for transit assignment under information provision: a theoretical framework", Paper presented at the 12th international conference on travel behaviour research, Jaipur, Rajasthan, India.
-Zhou, X., Mahmassani, H. S., & Zhang, K., (2008), "Dynamic micro-assignment modeling approach for integrated multimodal urban corridor management", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 16(2), pp.167-186.

The Role of Parallel Processing in Dynamic Assignment of Urban Public Transport Considering Capacity Constraint

Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Nafiseh Doostifard, M.Sc Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Hamid Mirzahossein, Associate Professor, Department of Civil - Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: May 2023

ABSTRACT

Considering That the Issue of Choosing the Passenger's Route and the Parameters Involved in It Has Been the Focus and Study of Transportation Planners and Policymakers for Decades, In This Article It Has Been Tried to Increase the Computational Efficiency and Reduce the Data Processing Time by Examining and Improving the Mathematical Model of Passenger Route Selection in Previous Studies. This Issue Has Been Addressed Through Multi-Core Data Processing (Parallel Processing) Based on the Modification of Mathematical Models Presented in Previous Studies in the Form of a Public Transport Dynamic Assignment Model with The Shortest Path Algorithm Based on the Schedule and The Travel Elimination Sub-Algorithm. The Results Were Compared with the Outputs of a Non-Dynamic Model Based on The Shortest Link-Based Algorithm to Measure the Effect of Considering the Capacity Constraint and Dynamics of the Algorithm on The Calculation Time and the Accuracy of the Output. Even Though the Number of Calculations Went Up By 13.7% Compared to The Basic Model, the Time It Took to Solve the Problem Went Down By 20% Because of Parallel Processing.

Keyword: Public Transport Network, Dynamic Assignment, Capacity Constraint, Shortest Path Algorithm, Parallel Processing