

نقش پردازش موازی در تخصیص پویای حمل و نقل همگانی شهری با محدودیت ظرفیت

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نفیسه دوستی فرد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمید میرزاحسین، دانشیار، گروه عمران - برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه بین‌المللی 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 چند هسته‌ای 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 حمل و نقل همگانی با الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی و زیرالگوریتم حذف سفر، انجام شد؛ تا نمایش دقیق‌تری از نحوه انتخاب کاربران حمل و نقل همگانی و پارامترهای تأثیرگذار در انتخاب آن‌ها به دست آید. در نهایت نتایج حاصل از مدل معرفی شده، 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 چند هسته‌ای کردن در زمان محاسبات، مورد سنجش قرار گیرد. با بررسی داده‌های خروجی مشخص شد که با افزودن فرآیند چند هسته‌ای 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 تک هسته‌ای بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: شبکه حمل و نقل همگانی، تخصیص پویا، محدودیت ظرفیت، الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر، پردازش موازی

۱- مقدمه

تعیین می‌کند. یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی حمل و نقل، تخصیص ترافیک نام دارد؛ که در آن تقاضای سفر با فرضیات و محدودیت‌های خاص به شبکه راه‌ها انتقال داده می‌شود. به‌طور کلی شبکه حمل و نقل همگانی، شامل مجموعه‌ای از خطوط و ایستگاه‌ها است که مسافران در آن‌ها سوار یا پیاده می‌شوند. در حالی که در تخصیص ترافیک سستی اتومبیل‌های شخصی به‌عنوان تقاضا معرفی می‌شوند، امروزه با هدف‌گذاری توسعه شبکه حمل و نقل همگانی، تخصیص در این شیوه مورد توجه بسیاری از متخصصان و مدیران ترافیک شهرها بوده

در برنامه‌ریزی، طراحی، بهره‌برداری و مدیریت زیرساخت‌های حمل و نقلی، هدف اصلی پیش‌بینی چگونگی استفاده مردم از زیرساخت‌ها است. در برنامه‌ریزی بلندمدت، تجزیه و تحلیل کارایی و اقتصادی بودن سیستم حمل و نقل همگانی پیشنهادی، نیاز به آگاهی از مسیر مورد انتخاب مسافران برای جابه‌جایی بین دو نقطه مختلف در سیستم دارد. از منظر اقتصادی، این موضوع اهمیت بسیار زیادی دارد؛ زیرا نحوه و میزان استفاده کاربران از منابع حمل و نقلی، وضعیت تعامل بین تقاضا و عرضه در سیستم، و همچنین مزایا و هزینه‌های مربوط به کاربران را

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 ایجاد شده 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 در نظر 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 در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت بر زمان کل سفرها در مقایسه با حالت بدون ظرفیت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته 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 استفاده شده باشد، تاکنون تنها در چند مطالعه محدود مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که الگوریتم مبتنی بر برنامه

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، از این‌رو 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 مورد نیاز برای انجام سفر، وابسته به زمان شروع سفر خواهد بود.

در نتیجه 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 مورد مطالعه قرار گرفته 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 سفر تر 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

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 ارائه دادند. در همان سال، نگوین و پالوتینو (Nguyen & Pallottino, 1989) امکان استفاده از هر تابع هزینه تعمیم‌یافته‌ای برای مجموعه مسیرهای جذاب و احتمال انتخاب کمان‌های جایگزین در هر گره را به کمک مدل مبتنی بر تواتر برای شبکه حمل و نقل همگانی معرفی کردند. در سال ۱۹۹۲، جانسون و ریستولپ (Jansson & Ridderstolpe, 1992) ارائه روشی برای محاسبه زمان انتظار مسافر و بررسی مسئله انتخاب مسیر به شکل واقع‌بینانه‌تر ارائه داشتند که نتیجه آن کاهش زمان حل مسائل 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 ارائه 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 ارائه دادند. در سال ۲۰۰۳، بل (Bell, 2003) بحث تخصیص ترافیک با ظرفیت محدود را مطرح کردند و رویکردی برای مسئله تخصیص حمل‌ونقل

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 در نظر 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 به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مطالعات اندکی به بررسی تأثیر دقیق وجود همپوشانی میان مسیرها در محاسبه مطلوبیت آن‌ها پرداخته شده است. حال آنکه 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 هدتیمی (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 ارائه یک برنامه کامپیوتری برای یافتن سریع‌ترین مسیر پیشنهاد کردند. در سال ۱۹۶۶، 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، به صورت وابسته به زمان با بازه‌های زمانی ارائه دادند. در سال ۱۹۷۵ چریکی و رایبیلارد (Chriqui & Robillard, 1975) در مطالعه خود تحت عنوان مسیرهای اتوبوس مشترک راه‌حلی بر اساس زمان سفر درک شده و زیرمجموعه بهینه‌ای از مسیرها به عنوان مسیرهای جذاب ارائه کردند. در ادامه دو سال بعد، لست و لیک (Last & Keak, 1976) یک مدل مبتنی بر رایانه، با امکان تعریف کمان با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و استفاده از یک فرآیند بارگذاری تکرارشونده برای محاسبه احتمال اضافه بار ارائه کردند. در سال ۱۹۸۴، 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 ارائه کردند که نتیجه آن بررسی بیشتر مدل‌سازی

فراهم کردن امکان ارتباط با مدل‌های مبتنی بر فعالیت و امکان استخراج الگوهای سفر کلی از انتخاب‌های فردی بود. در سال ۲۰۱۳، خانی (Khani, 2013) یک برنامه تخصیص پویا مبتنی بر برنامه زمانی برای حمل‌ونقل همگانی، با محدودیت ظرفیت و اولویت سوارشدن و ارائه یک مدل بهینه‌سازی برای هر دو حالت قطعی و تصادفی را معرفی کردند. در ادامه خانی و همکاران (Khani, Sall, Zorn, & Hickman, 2013) توانستند مدل‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه زمان‌بندی با محدودیت ظرفیت را ایجاد کنند. خانی و همکاران در سال ۲۰۱۵ (Khani, Hickman, & Noh, 2015) با استفاده از مدل‌های مبتنی بر لجستیک و از جمله الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر، مسیر ترکیبی مبتنی بر لجستیک برای شبکه مبتنی بر برنامه سفر ارائه دادند. در این راستا، در سال ۲۰۱۸، کوه و همکاران (Koh, Ng, Pan, & Mak, 2018) کاربرد اتوبوس‌های انبوه‌بر و دخیل کردن اثر تغییر ظرفیت با شبیه‌سازی را در سنگاپور نشان دادند. در سال ۲۰۱۹، کتس و همکاران (Cats & Glück, 2019) به توسعه نسل جدیدی از روش‌ها کمک کردند که قابلیت اطمینان را در مرحله برنامه‌ریزی تاکتیکی برای بهبود کیفیت خدمات ادغام می‌کند. در آخرین مطالعات در سال ۲۰۲۰، جیشنو نارایان و همکاران (Narayan, Cats, van Oort, & Hoogendoorn, 2020) در مطالعه خود تحت عنوان انتخاب مسیر و مدل تخصیص یکپارچه برای سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی ثابت و انعطاف‌پذیر به این نتیجه دست یافتند که میانگین زمان انتظار کاربران هنگام استفاده در ترکیب با تقاضای ثابت کمتر از سناریویی است که هر یک از آن‌ها به‌عنوان یک حالت انحصاری استفاده شود. در نهایت در سال ۲۰۲۱، کیوسالیتیس و کتس (Gkiotsalitis & Cats, 2021) با توجه به مواجهه با فراگیری کووید، در مطالعه‌ای تحت عنوان انطباق برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی تحت بحران همه‌گیر COVID-19: بررسی ادبیات نیازها و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی اقدامات مداخله‌ای که می‌تواند از ارائه‌دهندگان خدمات حمل‌ونقل همگانی 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 به تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد پشتیبانی کند. همان‌طور که از بررسی مطالعات پیشین قابل برداشت است، در شبکه‌هایی که مسیرهای مشترک بین خدمات مختلف وجود دارند، تولید مجموعه مسیرهای جذاب برای مسافران به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مطالعات اندکی به بررسی تأثیر دقیق وجود همپوشانی میان مسیرها در محاسبه مطلوبیت آن‌ها پرداخته شده است. حال آنکه وجود همپوشانی میان چند مسیر، باعث کاهش

همگانی با ظرفیت محدود که به ترتیب و توالی سوارشدن مسافران به وسایل حمل‌ونقل همگانی اهمیت می‌داد نتیجه کار او بود. در همان سال کاروچی و بل (Kurauchi, Bell, & Schmöcker, 2003) رویکرد شبکه‌های حمل‌ونقل همگانی پرتراکمی که برخی از مسافران به دلیل عدم وجود فضای کافی قادر به سوارشدن نیستند و همچنین مسئله خطوط مشترک، که در آن انتخاب مسیر به تواتر ورودی‌ها بستگی دارد و نشان دادند که وقتی مسافران ریسک‌گریزی بالایی دارند، جریان مسافر به‌منظور کاهش ریسک پخش خواهد شد و در نظر گرفتن خطوط مشترک، نتایج تخصیص واقع‌بینانه‌تری را به دست خواهد داد. در سال ۲۰۰۴، حمدوچ و همکاران (Hamdouch, Marcotte, & Nguyen, 2004) موضوع مدل‌سازی سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه زمان‌بندی با محدودیت ظرفیت و گسترده سازی شبکه بر اساس زمان را مطرح کردند و در نهایت مجموعه انتخاب‌های اولویت‌بندی شده برای آن تبیین شد. در سال ۲۰۰۸، شوماخر و بل (Schmöcker, Bell, & Kurauchi, 2008) مدل تخصیص شبه پویا حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر تواتر با محدودیت ظرفیت ارائه شد که در نتیجه آن معرفی بازه‌های زمانی امکان اصلاح فرضیه مربوط به مدل‌های ایستا را که در آن همه مسافران برای فضاهای یکسان رقابت می‌کنند، فراهم می‌کند. در ادامه مطالعات سال ۲۰۰۴، اینبار حمدوچ و لفونپانیچ (Hamdouch & Lawphongpanich, 2008) مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر برنامه با راهبردهای سفر و محدودیت‌های ظرفیت را تعریف کردند که در آن علاوه بر محدودیت ظرفیت کلی، احتمال پیدا کردن یک صندلی در وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی را نیز در نظر می‌گیرد. در سال ۲۰۰۸، ژو و محماسانی (Zhou, Mahmassani, & Zhang, 2008) در مطالعه خود با عنوان رویکرد مدل‌سازی ریز تخصیص پویا برای مدیریت یکپارچه مسیر شهری چندمدی با هدف توسعه یک سیستم شبیه‌سازی میان‌نگر و تخصیص کوچک‌مقیاس پویا در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری چندمدی و ارائه یک مدل نابرابری متغیر برای توصیف کلیت مسئله تعادل تصادفی و پویای کاربر سعی در یکپارچه‌سازی کامل شبکه حمل‌ونقل چندمدی و تخصیص کاربران به مسیر بهینه داشتند. در سال ۲۰۰۹، محمد وهبه و عامر شلیبی (Wahba & Shalaby, 2009) زمان حرکت مبتنی بر یادگیری و مدل‌سازی انتخاب مسیر برای تخصیص حمل‌ونقل همگانی تحت ارائه اطلاعات: یک چهارچوب نظری را ارائه دادند که نتیجه آن

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

برای دستیابی به اطلاعات ساختار شبکه در این مطالعه از مشخصات ورودی حمل و نقل همگانی استفاده شده است. این مشخصات به صورت فایل های متنی و حاوی اطلاعاتی در مورد شبکه حمل و نقل همگانی است. این موارد شامل:

Agency.txt فهرستی حاوی اطلاعاتی در مورد آژانس های حمل و نقل همگانی ارائه دهنده داده ها و خدمات

Stops.txt حاوی اطلاعاتی درباره ایستگاه های حمل و نقل همگانی (مکان های منحصر به فردی که وسایل نقلیه عمومی در آنجا، مسافران را سوار یا پیاده می کنند)

Routes.txt شامل اطلاعاتی در مورد مسیرهای حمل و نقل همگانی

Trips.txt فهرست تمام سفرهای وسایل نقلیه و مسیرهای آنها (یک سفر، دنباله ای از دو یا چند ایستگاه است که در یک زمان خاص اتفاق می افتد)

Stop-times.txt لیست زمان های ورود و خروج وسایل نقلیه در هر ایستگاه و برای هر سفر (برنامه زمانی حمل و نقل همگانی)

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

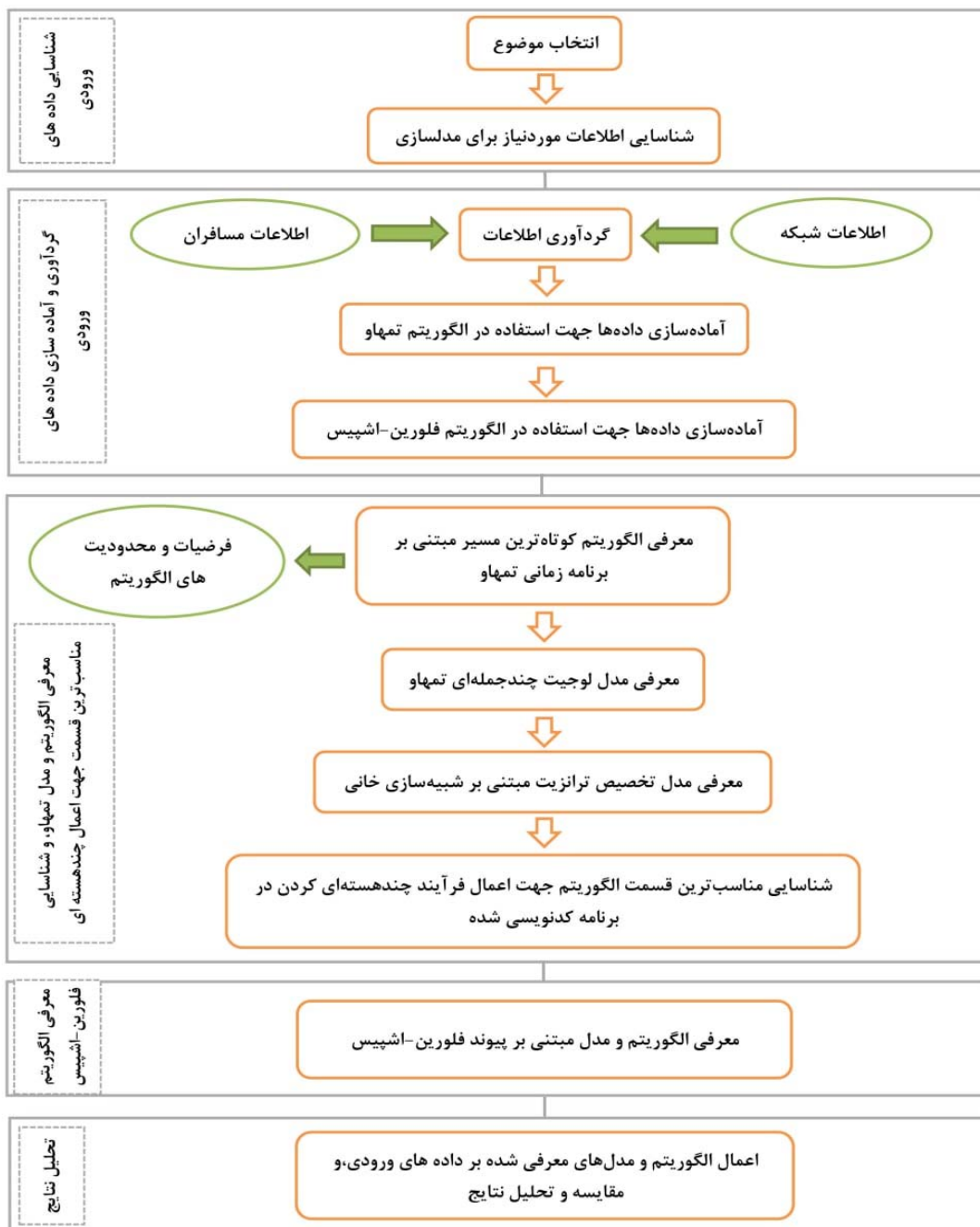
میزان مطلوبیت آنها برای مسافران می شود. فلذا در این مقاله سعی شده است که با ایجاد تغییر در مدل انتخاب مسیر و استفاده از یک الگوریتم کوتاه ترین مسیر چند معیاره مبتنی بر برنامه زمانی پرداخته شود. بعلاوه در مطالعات پیشین، به وجود کارایی محاسباتی در مدل های معرفی شده، کمتر پرداخته شده است. حال آنکه یک مدل تخصیص جهت اجرا در شبکه های بزرگ و پرتراکم، بایستی کارایی محاسباتی مناسب و قابلیت اجرایی شدن داشته باشد. این امر در مطالعه پیش رو، از طریق چند هسته ای کردن روند پردازش داده ها در قسمتی از مدل ارایه شده، انجام گرفته است.

همچنین در مطالعات پیشین، میزان تأثیر در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت در شبکه، در کارایی محاسباتی روند شبیه سازی مسیرهای مسافران حمل و نقل همگانی، بررسی نشده است. در مطالعه پیش رو، این تأثیر از طریق مقایسه مدل و الگوریتم ارایه شده در این مطالعه، با مدل مبتنی بر کمان فلورین-اشپیس، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

در این مقاله، با بررسی و استفاده از یک الگوریتم کوتاه ترین مسیر مبتنی بر برنامه زمانی و زیر الگوریتم حذف سفر، به تولید مجموعه مسیرهای انتخابی مسافران پرداخته می شود. پس از ایجاد مجموعه مسیرهای جذاب، در ادامه از یک مدل مبتنی بر لوجیت، جهت مقایسه مطلوبیت مسیرها و انتخاب مسیر مطلوب تر برای مسافران استفاده شد. در گام بعدی، برای اعمال محدودیت ظرفیت موجود در شبکه، از یک مدل مبتنی بر شبیه سازی جهت تخصیص مسافران به مسیرهای مطلوب دارای ظرفیت استفاده گردید. روند کلی این مطالعه به طور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

فلوچارت ارایه شده در شکل (۱) کلیات روش انجام تحقیق، شامل بخش های اصلی مطالعه، زیر مجموعه های مورد بررسی در هر بخش، و همچنین ابزار مورد استفاده برای برداشت اطلاعات هر بخش را نشان می دهد.



شکل ۱. کلیات روش تحقیق

در متن مربوط به اطلاعات سفر، اطلاعات سفرهایی که شناسه سرویس در آن‌ها با شناسه سرویس‌های به دست آمده از مرحله قبل یکی بود، برداشت شد. به تناسب اطلاعات شناسه سفرهای به دست آمده از مرحله قبل، اطلاعات سفرها، شناسه مسیرهای مرتبط با آن‌ها و سایر اطلاعات مرتبط با مسیرها استخراج گردید.

در این مرحله از روش تحقیق، به آماده سازی اطلاعات ورودی جهت ایجاد شبکه و مدل سازی بر اساس الگوریتم تمهاو و پرداخته شد. به این ترتیب با استفاده از برنامه نویسی به زبان پایتون داده‌ها به شکلی قابل استفاده برای مدل مورد نظر درآمد. مراحل طبق شرایط در پی آمده تعریف گشت.

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.

$$P(i|C_n) = \frac{e^{V_{in} + \beta_{PS} P_{Sin}}}{\sum_{j \in C_n} e^{V_{jn} + \beta_{PS} P_{Sjn}}} \quad (1)$$

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

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

PS_{jn} و PS_{in} = تصحیح اندازه مسیر برای هر یک از مسیرهای i و j از مجموعه انتخابی C_n به صورت 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. به عبارت دیگر، فرض بر این است که انتخاب‌ها با یکدیگر همبستگی ندارند. متأسفانه، در مورد مسئله انتخاب مسیر حمل‌ونقل همگانی، در واقع بسیاری از گزینه‌های مسیر می‌توانند با یکدیگر همبستگی داشته باشند. به طور خاص این مورد معمولاً به این صورت است که دو مسیر، دقیقاً قسمت یکسانی از راه را پوشش می‌دهند و فقط از نظر شماره مسیر متفاوت هستند. در نتیجه این همبستگی بالقوه، یک اصطلاح تصحیح اندازه مسیر، که توسط دیگریت 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 به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$P_{Sin} = \sum_{s \in I_i} \frac{1}{N_i} \ln \left(\sum_{j \in C_n} \delta_{sj} \right) \quad (2)$$

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

متناسب با شناسه ایستگاه‌های به دست آمده 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 نوشته شده، 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. به این ترتیب که هر گروه از سفرهای وسایل نقلیه عمومی که تعداد ایستگاه‌ها و شناسه ایستگاه‌های عبوری آن‌ها یکسان بوده، و در عین حال 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 پرتیجا متنی مربوط به اطلاعات سفر، اطلاعات سفرهایی که شناسه سرویس در آن‌ها با شناسه سرویس‌های به دست آمده از مرحله قبل یکی بود، برداشت شد.

- با توجه به اطلاعات شناسه سفرهای به دست آمده از مرحله قبل و طبق قاعده بیان شده در بالا، خطوط حمل‌ونقل همگانی استخراج گردید. به هر خط حمل‌ونقل همگانی شناسه‌ای تعلق گرفته و در اطلاعات مربوط به هر سفر، شناسه خط حمل‌ونقل همگانی مرتبط با آن سفر افزوده شد.

- میزان سرفاصله زمانی، که به صورت 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 داده شده 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

$$\Gamma_i = \text{مجموعه تمام ایستگاه‌های مسیر } i$$

$$N_i = \text{تعداد کل ایستگاه‌های مسیر } i$$

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

درحالی که اصطلاح تصحیح اندازه مسیر معمولاً بر اساس طول کمان محاسبه می‌شود، برای حالت حمل و نقل همگانی مستدل است که ایستگاه‌ها نماینده بهتری برای هم پوشانی واقعی تجربه شده مسافران، در مسیرهای جذاب خود، می‌باشند. در نتیجه اصطلاح تصحیح اندازه مسیر به جای هم پوشانی کمان‌ها، نسبت به هم پوشانی 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 حمل و نقل همگانی که در این مطالعه زمان پیاده روی است، محاسبه می‌شوند و از آنجاکه 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 با زمان سفر طولانی‌تر در داخل وسیله حمل و نقلی انتخاب کنند، تا زمان پیاده روی مرتبط با مسیر انتخابی خود و زمان انتظار برای وسایل نقلیه حمل و نقل همگانی را به حداقل برسانند.

در مطالعه پیش رو از ضرایب به دست آمده از مدل لجیت چندجمله‌ای ساده شده، که مدل ساده تری برای مدل‌های تخصیص حمل و نقل همگانی محسوب می‌شود، استفاده شده است. علی‌رغم اینکه این مدل نسبت به مدل لجیت

چندجمله‌ای بسط یافته تعداد پارامترهای کمتری دارد، اما مقدار ρ 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 حمل و نقل همگانی، سریع و سیر، اتوبوس محلی)

- تعداد جابه‌جایی در مسیر

- پارامترهای زمانی، شامل زمان داخل وسیله نقلیه حمل و نقل همگانی، زمان پیاده روی ورودی/خروجی و زمان انتظار دسترسی ضرایب پارامترهای به کاررفته 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 تم‌ها و با توجه به نرخ حاشیه‌ای جایگزینی مربوط به زمان‌های مؤثر در انتخاب مسیر مسافران، "نخستین کوتاه‌ترین مسیر" برای مسافران تولید شده و سپس با استفاده از زیرالگوریتم حذف سفر، با بهره‌گیری از "نخستین کوتاه‌ترین مسیر" به عنوان "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 ذخیره سازی می‌شود. در گام بعدی فاکتور اصلاح هم پوشانی 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 لجیت چندجمله‌ای تم‌ها و نرخ‌های حاشیه‌ای جایگزینی

ضریب	نرخ حاشیه‌ای جایگزینی (نسبت به زمان پیاده روی در مقیاس ساعت)	پارامتر
-۵,۸۶۷	۱,۰۰۰	زمان سفر غیر حمل و نقل همگانی (ساعت)
-۲,۱۸۷	۰,۳۷۳	زمان سفر داخل وسیله نقلیه حمل و نقل همگانی (ساعت)
-۱۰,۲۴۶	۱,۷۴۶	زمان پیاده روی دسترسی (ساعت)
-۱۶,۹۷۱	۲,۸۹۳	زمان پیاده روی خروجی (ساعت)
-۱۸,۲۲۷	۳,۱۰۷	زمان انتظار دسترسی (ساعت)
-۲,۸۱۴	۰,۴۸۰ (جریمه ۲۸۸ دقیقه‌ای)	تعداد جابه‌جایی در هر مسیر
-۰,۷۷۹	—	اصلاح هم پوشانی ایستگاه

است؛ بنابراین شبکه با توجه به بار وسایل نقلیه به روز شده و سپس تخصیص مسافران ناموفق، در شبکه به روز 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 به گونه‌ای اجرا می‌شود که در هر تکرار، مسافران تخصیص یافته در مسیر بهینه خود سفر می‌کنند. از طریق تکرارهای بیشتر این الگوریتم، مسافران بیشتری می‌توانند سفرهای خود را تکمیل کرده و در نهایت 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 ایجاد شده در سیستم، به‌عنوان معیار سنجش همگرایی الگوریتم در هر مرحله، استفاده می‌شود. قابل ذکر 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 خارج شده و در تکرار بعدی، با یک مسیر به‌روز شده، به سیستم اضافه می‌شوند. به‌عبارت دیگر، 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 نوشته شده 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

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.,) 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. از آنجاکه برنامه خدمت‌دهی مربوط به سفرهای وسایل نقلیه مشخص است، ورود و خروج وسایل نقلیه به‌عنوان رویدادهای شبیه‌سازی تعریف شده و برای تعیین وضعیت شبکه پردازش می‌شوند. در حین شبیه‌سازی، مسافران تولید شده و با توجه به مسیرهای از پیش تعریف شده خود، در ایستگاه‌های ورود، بارگذاری می‌شوند. مسافران بدون در نظر گرفتن 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 مسافرایی 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 ارزیابی شده و زیرمجموعه‌ای از مسافران که مسیرهای ناموفق دارند، برای تخصیص به مسیرهای جایگزین در تکرار بعدی انتخاب می‌شوند. مدل تخصیص حمل‌ونقل همگانی ارائه شده 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

در ادامه نتایج حاصل از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر پویای مبتنی بر برنامه زمانی به همراه زیرالگوریتم حذف سفر تمهات، 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 در نظر گرفتن ظرفیت که مبنای مطالعات است مقایسه شده است.

۴- 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 قابل توجهی دارد، اعمال شد. این داده‌های اولیه پس از برداشت از منابع ارائه‌دهنده 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)، (۴) و (۵) زیر نمونه‌ای از این داده‌های آماده‌شده و تغییر یافته، که شامل موارد مورداحتیاج در این پژوهش است، ارائه شده 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 (۶) ارائه شده است.

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.

تخصصی یا هر ترکیبی از موارد فوق باشند. از نظر 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 ۴ پردازشگر منطقی بود به این معنا که با اعمال فرآیند چندهسته‌ای کردن تمام ۴ پردازنده موجود در سیستم جهت انجام محاسبات به‌کار گرفته می‌شوند.

بخش بعدی برنامه‌ی کد نویسی شده، مربوط به شبیه‌سازی و اعمال محدودیت ظرفیت است. از آنجا که شبیه‌سازی و تخصیص مسافران به مسیرهای جذاب وابسته به انتخاب و تخصیص مسافران پیشین است، و در واقع 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. به این ترتیب 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.

جدول ۲. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات ایستگاه‌ها

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نقطه زمانی	ظرفیت	شناسه ایستگاه
19th_Avenue_&_Holloway_St	37.72119	-122.4751	۱	۱۰۰	۳۹۰
MISSION_ST_&_OCEAN_AVENUE	37.723914	-122.4354	۱	۱۰۰	۶۶۰
DUBLIN_ST_&_LAGRANDE_AVE	37.719192	-122.4258	۱	۱۰۰	۹۱۳
2nd_St_&_Brannan_St__	37.781827	-122.3919	۱	۱۰۰	۳۰۰۳
2nd_St_&_Brannan_St__	37.781854	-122.3922	۱	۱۰۰	۳۰۰۴
2nd_St_&_Folsom_St__	37.785318	-122.3966	۱	۱۰۰	۳۰۰۸
2nd_St_&_Harrison_St__	37.784532	-122.3953	۱	۱۰۰	۳۰۰۹

جدول ۳. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات سفرها

شناسه مسیّر	حالت	زمان شروع	ظرفیت	شناسه شکل	شناسه سفر
۷۷۶۷	۳	۷۰۹۰۰	۶۳	۹۰۱۳۴	۵۱۱۶۳۸۵
۷۷۶۷	۳	۷۱۷۰۰	۶۳	۹۰۱۳۴	۵۱۱۶۳۸۶
۱۰۳۰	۳	۱۷۳۰۰	۶۳	۹۰۳۴۳	۵۱۳۴۹۵۱
۱۰۳۰	۳	۱۷۴۲۰۰	۶۳	۹۰۳۴۳	۵۱۳۴۹۵۲
۱۰۴۵	۳	۹۰۴۰۰	۶۳	۹۰۳۵۰	۵۱۳۴۹۵۳
۱۰۴۵	۳	۹۱۷۰۰	۶۳	۹۰۳۵۰	۵۱۳۴۹۵۴
۱۰۴۵	۳	۹۲۹۰۰	۶۳	۹۰۳۵۰	۵۱۳۴۹۵۵

جدول ۴. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات مسیّرهای حمل و نقل همگانی

شناسه مسیّر	نام کوتاه مسیّر	نام مفصل مسیّر	نوع مسیّر
۷۷۶۷	۱	CALIFORNIA	۳
۱۰۰۲	۲	CLEMENT	۳
۱۰۰۳	۳	JACKSON	۳
۷۷۶۹	۵	FULTON	۳

جدول ۵. نمونه داده‌های ورودی مربوط به اطلاعات زمان-ایستگاه‌ها

ترتیب ایستگاه	شناسه ایستگاه	زمان عزیمت	زمان ورد	شناسه سفر
۱	۴۰۱۵	۷۰۹۰۰	۷۰۹۰۰	۵۱۱۶۳۸۵
۲	۶۲۹۴	۷۱۰۰۸	۷۱۰۰۸	۵۱۱۶۳۸۵
۳	۶۲۹۰	۷۱۱۲۱	۷۱۱۲۱	۵۱۱۶۳۸۵
۴	۶۳۱۴	۷۱۲۰۰	۷۱۲۰۰	۵۱۱۶۳۸۵
۵	۶۳۰۷	۷۱۲۴۷	۷۱۲۴۷	۵۱۱۶۳۸۵

ایستگاه حمل و نقل همگانی مرتبط با مسیّر منتخب، و با استفاده از طول و عرض جغرافیایی هر کدام از ایستگاه‌ها و مراکز نواحی ترافیکی محاسبه می‌شوند. بر این اساس کمان‌های پیاده‌روی دسترسی، یعنی کمان میان نواحی ترافیکی مبدأ

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

در جداول (۷)، نمونه‌ی کوچکی از داده‌های ورودی تغییر یافته و تولید شده، برای کمان‌های دسترسی، خروجی و انتقال در شبکه شهر سانفرانسیسکو ارائه شده است.

داده‌های شمارشگرهای خودکار مسافران مربوط به شبکه اتوبوس‌رانی و مترو شهر سانفرانسیسکو، برای شبیه‌سازی زمان ترجیحی ورود و خروج مسافران در بازه‌های پنج دقیقه‌ای 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 تولید شده، 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.

تا اولین ایستگاه مسیر جهت سوار شدن 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 در نظر گرفتن آستانه ۰/۱ مایلی، یعنی فاصله طولی میان ایستگاه‌ها با توجه به طول و عرض جغرافیایی آن‌ها، در تمام شبکه ایجاد شدند.

در نهایت با ادغام داده‌های مشخصات ورودی حمل‌ونقل همگانی جامع شهر سانفرانسیسکو، اطلاعات نواحی ترافیکی آن و کمان‌های پیاده‌روی و انتقال ایجاد شده 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.

جدول ۶. 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 (مایلی)
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

جدول ۸. ویژگی‌های شبکه حمل‌ونقل همگانی سانفرانسیسکو و تقاضا در بازه پنج ساعته بعدازظهر

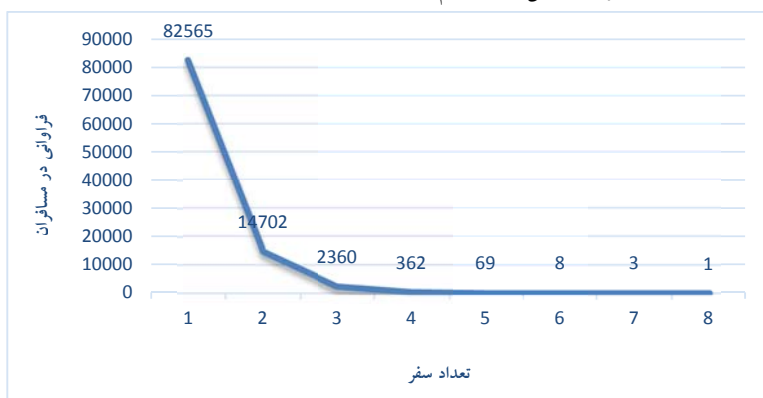
ویژگی شبکه	نواحی ترافیکی	ایستگاه	راه یا مسیر	سفرهای وسیله حمل‌ونقل همگانی	زمان-ایستگاه‌ها	تقاضا (سفر مسافران)
تعداد	۹۸۱	۳۵۹۸	۷۹	۲۹۸۷	۱۲۰۱۴۳	۱۲۰۹۱۹

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.

تعداد کل خانوارهای موردبررسی در این مطالعه، ۸۷۹۳۴ خانوار است. این تعداد خانوار شامل ۱۰۰۰۷۰ مسافر است که همان‌طور که در جدول (۸) به آن اشاره شده است، تعداد

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 ارائه شده است.

با بررسی بیشتر داده‌های تقاضای 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 داده شده است. بازه‌ی زمانی مورد مطالعه 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 در مجموع حدود ۷۰٪ از مسافران تمایل به انجام



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	ناحیه ترافیکی مبدأ	زمان ورود/عزیمت ترجیحی
۱۰۸	۱۰۸	۱	۴	۵۹	۲۰۴	۱۰۰۳
۱۲۲	۱۲۲	۱	۴	۶۴	۲۴۸	۹۷۹
۱۳۹	۱۳۹	۲	۴	۵۲۰	۷۲	۱۰۵۷
۱۵۲	۱۵۲	۲	۴	۷۷	۱۸۹	۱۰۷۱
۱۷۷	۱۷۷	۱	۴	۸۷	۴۰۹	۹۳۴
۱۸۶	۱۸۶	۱	۴	۱۶۷	۳۹۱	۱۰۵۹

با استفاده از الگوریتم دایکسترا و زیرالگوریتم حذف سفر، انجام شده و در نهایت یک مجموعه از مسیرهای جذاب بدون در نظر گرفتن 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

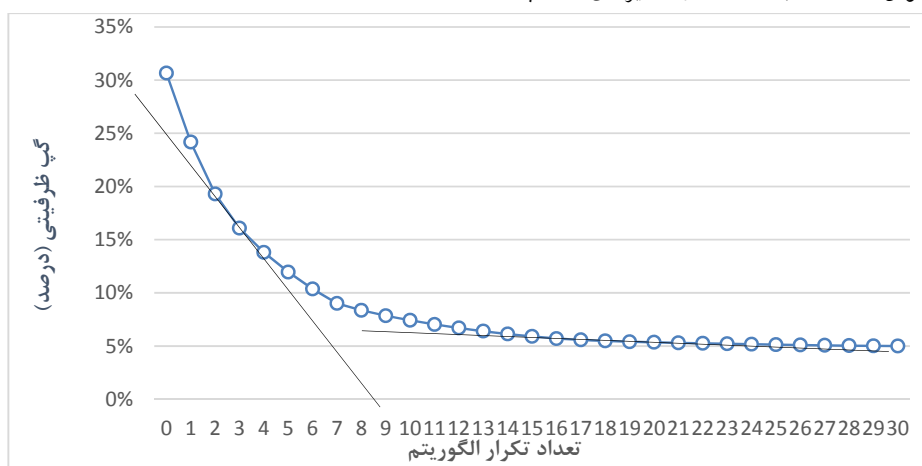
الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مبتنی بر برنامه‌ی زمانی به همراه زیرالگوریتم حذف سفر، در محیط برنامه‌نویسی به زبان ++C، در یک کامپیوتر با مشخصات Intel Core-i7 7500 U CPU و میزان حافظه GB16 نوشته شد. این برنامه کد نویسی شده دارای دو ماژول اصلی شامل تخصیص و شبیه‌سازی بود. در ماژول تخصیص برای هر مسافر، فرآیند علامت‌گذاری ایستگاه‌های شبکه و یافتن کوتاه‌ترین مسیرهای جذاب،

موجود در مجموعه انتخابی خود به مقصد برسند و تنها ۵٪ از مسافران به دلیل کمبود ظرفیت از رسیدن به مقصد خود بازمانده‌اند. به بیان دیگر پس از تکرار ۳۰ ام از برنامه، مدل مورد بررسی به‌طور مؤثری همگرا شده است. همانطور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، مقدار درصدی گپ ظرفیتی و یا در واقع 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، افزایش یافته و در نتیجه 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 در حالی که 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 به مراتب بالاتر از تکرارهای نهایی الگوریتم است. به طوری که از تکرار اول تا تکرار ۱۶ ام از الگوریتم ۱۸/۴۷٪ از مسافران باقی‌مانده در شبکه، به مقاصد خود رسیده‌اند و در واقع گپ ظرفیتی به اندازه ۱۸/۴۷٪ کاهش یافته است؛ در حالی که 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 دست یافته‌اند.

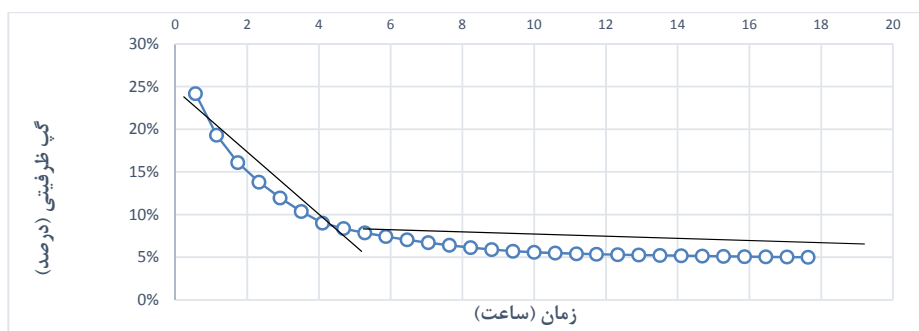
مسافران دارای مسیر انجام می‌شود. این فرآیند به صورت تخصیص یک‌به‌یک مسافران به سفرها و کمانهای مربوط به مسیر منتخب آن‌ها است. ویژگی محدودیت ظرفیت سفرها به این صورت اعمال می‌شود که با سوار شدن هر مسافر به هر وسیله نقلیه حمل‌ونقل همگانی در شبکه، از ظرفیت آن سفر به اندازه یک مسافر کاسته شده و با رسیدن آن مسافر به ایستگاه پیاده شدن و خروج از آن وسیله، که در مسیر منتخب مسافر از پیش محاسبه و تعیین شده است، به اندازه یک مسافر به ظرفیت آن سفر وسیله نقلیه اضافه می‌شود. این فرآیند به ترتیب برای تمام مسافران اجرا شده 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 از دست داده‌اند، و در نهایت گپ حاصل از کمبود ظرفیت که به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود، چاپ می‌شود.

$$g_i = \frac{\sum_{rs} \bar{q}_{rs}^i}{\sum_{rs} q_{rs}} \quad (3)$$

که در آن q_{rs} تعداد تقاضای سفر مسافران بین جفت مبدأ-مقصد rs بوده، $\sum_{rs} q_{rs}$ تعداد کل تقاضای سفر مسافران برای تمام جفت مبدأ-مقصدها و \bar{q}_{rs}^i تعداد مسافران ناموفق در جفت مبدأ-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



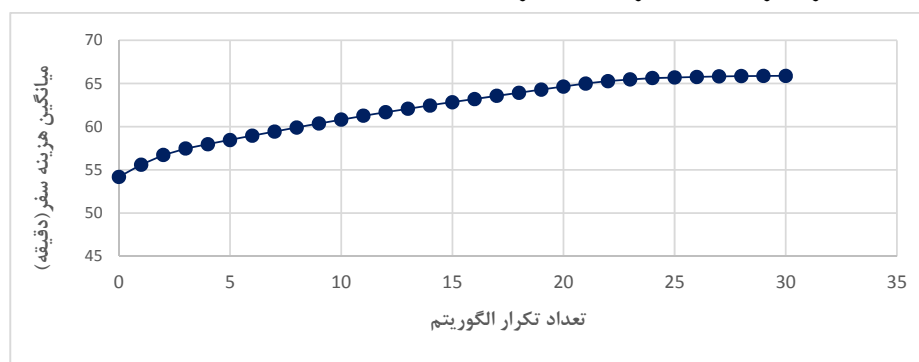
شکل ۳. نسبت گپ ظرفیتی به تکرار الگوریتم در شبکه سانفرانسیسکو



شکل ۴. نسبت گپ ظرفیتی به زمان محاسبه در شبکه سافرانسیسکو

کاهش یافته و در نتیجه مسافران به مسیرهای با زمان 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 تحمیل شده به مسافران به دلیل محدودیت ظرفیت است. با توجه به میانگین هزینه اولیه مسافرانی که به مقصد رسیده‌اند، بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، برابر $54/2$ دقیقه است. در حالی که این مقدار در تکرار آخر، یعنی تکرار سی‌ام از الگوریتم، برابر مقدار $65/89$ دقیقه است. یعنی مسافران در شبکه، به علت کمبود ظرفیت، حاضرند مسیرهایی با هزینه زمانی بیشتر $11/69$ دقیقه‌ای یا $21/5$ درصدی را برای رسیدن به مقاصد خود بپیمایند.

در شکل (۴) مقدار گپ ظرفیتی بر اساس زمان محاسبه نشان داده شده است. همانند تعداد تکرارها، این نمودار بیانگر این نکته است که با گذشت 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. به طوری که در پنج ساعت ابتدایی زمان محاسباتی، حدود $16/6\%$ از گپ ظرفیتی کاهش یافته است و در $12/5$ ساعت بعدی این میزان حدود 3% بوده است. در شکل (۵) نیز میانگین هزینه سفر مسافرانی که در هر تکرار به مقصد خود رسیده‌اند، نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با اختصاص مسافران بیشتر به شبکه، میانگین هزینه سفر به ازای هر مسافر افزایش می‌یابد. یعنی در حالی که راه‌حل ارائه شده 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



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

داد که زمان محاسباتی مربوط به یافتن مجموعه مسیرهای جذاب، با استفاده از یک پردازشگر با 4 هسته منطقی، حدود 3 ساعت و 30 دقیقه، یا 37 درصد کاهش یافته است.

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 مورد بررسی، نشان

۵- نتیجه گیری

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.

۶- 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.

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 ارزیابی 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 طراحی شده 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 داده شده 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 ارزیابی شده در این مقاله، مربوط به استفاده از یک مدل جدید مبتنی بر لوجیت انتخاب مسیر برای مسافران می‌باشد. این مدل، برخلاف مدل‌های معرفی شده پیشین که در آن‌ها انتخاب مسیر مسافران در هر ایستگاه انجام می‌گرفته، در ابتدای سفر مجموعه‌ای از مسیرهای جذاب را ارزیابی می‌دهد. بعلاوه با تغییر در ضرایب مدل ریاضی تابع مطلوبیت، و اعمال فاکتور اصلاح هم‌پوشانی مسیر، روش جدیدی برای انتخاب مسیر مسافران ارائه 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 قابل‌قبولی کاهش یافت و کارایی

- 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.
- 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.

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 Mirzahosseini, 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