

استفاده از یک مدل پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری در برآورد ماتریس توزیع سفر

امیدرضا عباسی^{۱*}، علی اصغر آل شیخ^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی

oabbasi@mail.kntu.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

alesheikh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۵، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۵)

چکیده

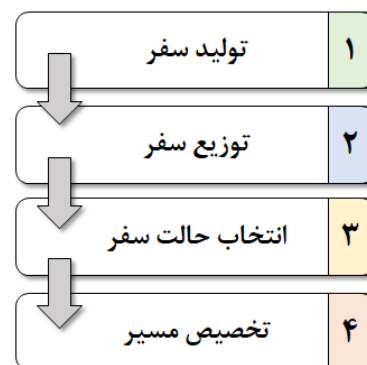
یکی از مباحث کلیدی در برنامه ریزی حمل و نقل شهری پیش‌بینی تقاضای سفر است و درک و مدل‌سازی آن کاربردهای فراوانی در طراحی زیرساخت‌های شهری، مدل‌سازی مکانی شیوع بیماری‌ها، سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی شهری و تحلیل‌های مکانی-زمانی در GIS دارد. به طور سنتی برای پیش‌بینی تقاضای سفر از یک مدل چهار مرحله‌ای استفاده می‌شود. خروجی مرحله دوم از این مدل ماتریس مبدأ-مقصد یا ماتریس توزیع سفر نام دارد و درایه‌های این ماتریس میزان سفرهای انجام شده از هر مبدأ به هر مقصد را نشان می‌دهند. ماتریس توزیع سفر می‌تواند به عنوان یک ورودی مهم در بسیاری از تحلیل‌های مکانی GIS استفاده شود. مهمترین بخش توزیع سفر تعیین مدل مورد استفاده جهت برآورد ماتریس مبدأ-مقصد است. تا به امروز مدل‌های مختلفی نظیر مدل جاذبه جهت برآورد ماتریس توزیع سفر معرفی شده است. در سال‌های اخیر نیز برخی مدل‌های دارای پارامتر و بدون پارامتر نظیر PWO، تابش و رتبه‌مبنا در حوزه پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری توسعه داده شده است. در این مقاله کاربرد مدل رتبه‌مبنا در برآورد ماتریس توزیع سفر شهری بررسی شده است. در این مقاله به عنوان مطالعه موردی، مدل رتبه‌مبنا در منطقه منتهن شهر نیویورک ایالات متحده پیاده‌سازی شده و نتایج آن به صورت کمی و در مقایسه با مدل جاذبه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس شاخص همانندی سورسن مدل رتبه‌مبنا توانسته است حدود ۶۷٪ سفرها را شبیه به سفرهای واقعی برآورد کند. هم‌چنین مقدار r-squared حاصل از تحلیل رگرسیون خطی برابر ۰/۳۲ به دست آمد که این عدد بیان‌گر انطباق مناسب اعداد ماتریس برآوردشده با واقعیت است.

واژگان کلیدی: الگوی حرکتی شهری، دینامیک شهری، توزیع سفر، ماتریس مبدأ-مقصد، برنامه‌ریزی حمل و نقل، مدل رتبه‌مبنا

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یکی از اقدامات مهم در جهت پیاده‌سازی سیستم‌های حمل و نقل کارآمد پیش‌بینی تقاضای سفر^۱ است و درک و مدل‌سازی آن کاربردهای فراوانی در طراحی زیرساخت‌های حمل و نقل شهری [۱]، کنترل بیماری‌ها [۲]، سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی شهری [۳] و تحلیل مکانی-زمانی الگوها در GIS دارد. هدف از مدل‌سازی تقاضای سفر، بیان صریح توزیع مکانی سفرها با استفاده از یک سیستم منطقه‌ای است. بنابراین در این مدل‌سازی، تصمیمات افراد در رابطه با انتخاب مقصد، انتخاب وسیله سفر و انتخاب مسیر پیش‌بینی می‌شود [۴]. به طور سنتی برای پیش‌بینی تقاضای سفر از یک مدل چهار مرحله‌ای استفاده می‌شود (شکل ۱) [۵]. هر یک از مراحل این مدل، بخشی از روند پیش‌بینی تقاضای سفر را تکمیل می‌کند و دارای هدفی مجزا از دیگر مراحل است. این مراحل به ترتیب پاسخ سوالات «چه تعداد سفر در یک واحد زمانی مشخص در منطقه صورت گرفته است؟»، «این سفرها از چه مناطقی به چه مناطقی انجام شده است؟»، «این سفرها با چه وسیله‌ای صورت گرفته است؟» و «هر یک از این سفرها از چه مسیری استفاده کرده‌اند؟» را فراهم می‌کنند.



شکل ۱- مدل چهار مرحله‌ای پیش‌بینی تقاضای سفر در برنامه‌ریزی حمل و نقل

بخش عمده مرحله توزیع سفر مدل مورد استفاده جهت برآورد ماتریس مبدأ-مقصد است. تا به امروز مدل‌های مختلفی نظیر مدل جاذبه^۲، مدل فرصت‌های تداخلی، مدل fratar و مدل logit در کنار منابع داده مختلف جهت برآورد ماتریس توزیع سفر معرفی شده است

[۶]. به طور کلی این مدل‌ها دارای پیچیدگی‌های محاسباتی هستند [۷] و بر اساس فرضیاتی شکل گرفته‌اند که رفتار سفر کاربر را به درستی در نظر نمی‌گیرند [۸]. در سال‌های اخیر برخی مدل‌های دارای پارامتر اضافی و بدون پارامتر در حوزه پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری توسعه داده شده است. از پارامتر اضافی جهت انطباق الگوی سفرهای پیش‌بینی‌شده بر سفرهای واقعی استفاده می‌شود و از طریق فرایند کالیبراسیون تعیین می‌گردد. از آنجا که این مدل‌ها دارای ساختار احتمالاتی هستند و انتخاب مقصد سفر را بر اساس یک تابع احتمال پیش‌بینی می‌کنند، این مقاله به بررسی این مدل‌ها در برآورد ماتریس توزیع سفر شهری می‌پردازد.

پیش از ورود به مراحل پیش‌بینی تقاضای سفر، ابتدا لازم است تا حوزه مورد مطالعه به مناطق کوچک‌تری بخش‌بندی شود. به هر یک از این بخش‌ها منطقه تحلیل ترافیک (TAZ)^۳ گفته می‌شود. به طور کلی، اندازه این مناطق در مرکز شهر کوچک‌تر و در حومه شهر بزرگ‌تر است و به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که شبکه خیابان‌های شهر به‌عنوان مرز مناطق قرار گیرند [۹]. در شکل ۲ نمونه‌هایی از مناطق تحلیل ترافیک نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است این مناطق ممکن است منظم (سمت راست) و یا غیرمنظم (وسط) باشند، اما در هر صورت مناطق مرکزی متراکم‌تر هستند. همچنین نمونه‌ای از کاربرد این مناطق در کشور ایران (شهر قزوین) نیز نمایش داده شده است. پس از بخش‌بندی منطقه، در مرحله تولید سفر^۴، بر اساس اندازه خانوار [۱۰]، میزان درآمد، میزان مالکیت خودرو در منطقه [۱۱]، تراکم سکونت، دسترسی [۱۲]، کاربری اراضی [۱۳] و غیره میزان تولیدها (سفرهای تولید شده) و جاذب‌های (سفرهای جذب شده) هر منطقه توسط نرم‌افزار سیستم اطلاعات مکانی برآورد می‌شود. پس از آن، در مرحله توزیع سفر^۵، مقصد هر سفر تولید شده در هر مبدأ برآورد می‌شود. در مرحله انتخاب حالت سفر^۶ نوع وسیله نقلیه (خودرو شخصی، تاکسی، اتوبوس، دوچرخه و غیره)

۳ Traffic Analysis Zone (TAZ)

۴ Trip Generation

۵ Trip Distribution

۶ Mode Choice

۱ Travel Demand

۲ Gravity Model



شکل ۲- مناطق تحلیل ترافیک در (الف) منطقه شهری شیکاگو، ایالات متحده [۲۰]؛ (ب) منطقه شارلوتویل، ویرجینیا، ایالات متحده [۲۱]؛ (ج) منطقه شهری شهر قزوین، ایران (به همراه شبکه معابر) [۸]

۲- تحقیقات پیشین

به طور سنتی در حوزه توزیع سفر از مدل‌هایی نظیر جاذبه، فاکتور رشد و غیره استفاده می‌شود. تا آنجا که نویسندگان این مقاله مطلع هستند، از مدل‌های برآورد الگوی حرکتی شهری در این حوزه استفاده نشده است. اما تحقیق در حوزه برآورد تقاضای سفر با توسعه فناوری‌ها تغییر یافته است. توسعه فناوری‌ها باعث ایجاد روش‌های گوناگون اخذ داده شده است و بسیاری از این داده‌ها را در تحقیقات حمل و نقل و مدل‌های مذکور به کار برده‌اند. در این بخش به مرور تحقیقات انجام‌شده با استفاده از مدل‌ها و داده‌های مختلف می‌پردازیم.

روش سنتی جمع‌آوری داده‌های سفر شامل سرشماری‌های خانگی و کنارجاده‌ای است [۵]. پیاده‌سازی این روش‌ها با مشکلات بسیاری نظیر هزینه فراوان و زمان‌بر بودن همراه است [۲۰]. هم‌چنین سرشماری‌های کنارجاده‌ای در روند ترافیک اختلال ایجاد می‌کند. از طرفی غالباً زمان شروع و پایان سفر گزارش شده توسط افراد دقیق نیست. علاوه بر این، زمین‌مرجع کردن آدرس‌های گزارش‌شده امری پیچیده محسوب می‌شود [۲۲].

مشخص می‌شود. در نهایت، در مرحله تخصیص مسیر^۱، از بین مسیرهای ممکن بین مبدأ و مقصد مسیر بهتر محاسبه می‌شود.

خروجی مرحله دوم از مدل پیش‌بینی تقاضای سفر، ماتریس مبدأ-مقصد (OD)^۲ یا ماتریس توزیع سفر نام دارد. سطرهای این ماتریس بیان‌گر مبدأها و ستون‌ها بیان‌گر مقصدهای سفر است. درایه‌های این ماتریس میزان سفرهای انجام شده از هر مبدأ به هر مقصد را نشان می‌دهند [۵]. بدین ترتیب سفرها در میان مناطق شهر توزیع می‌شوند.

تا کنون به‌منظور برآورد ماتریس مبدأ-مقصد از منابع داده مختلفی نظیر داده‌های سرشماری خانگی و کنارجاده‌ای، شمارش‌گرهای ترافیک [۱۴]، شبکه‌های سلولی تلفن‌های همراه [۱۵، ۱۶]، بلوتوث [۱۷]، پایانه‌های پرداخت الکترونیک، کارت‌های پرداخت حمل و نقل عمومی [۱۸]، شبکه‌های اجتماعی مکان‌مبنا [۱۹] و غیره استفاده شده است.

در بخش ۲ این مقاله به مرور اجمالی برخی از تحقیقات در حوزه برآورد ماتریس مبدأ-مقصد و داده‌های مورد استفاده در آن‌ها پرداخته می‌شود. پس از آن برخی مدل‌های رایج نظیر مدل جاذبه و فرصت‌های تداخلی (IO)^۳ بررسی خواهند شد. در بخش ۴ مدل‌های جدید در حوزه پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری معرفی و پتانسیل آن‌ها جهت استفاده در پیش‌بینی تقاضای سفر بررسی می‌شود. سپس مدل رتبه‌مبنا در منطقه منتهن پیاده‌سازی و نتایج آن ارزیابی می‌شود. در نهایت، بخش ۷ به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای تحقیق می‌پردازد.



^۱ Route Assignment

^۲ Origin-Destination (OD) Matrix

^۳ Intervening Opportunities (IO) Model

از دیگر منابع داده مورد استفاده در مدل‌سازی توزیع سفر شمارنده‌های جاده‌ای هستند [۲۳]. این شمارنده‌ها وسایل الکترونیکی هستند که در شبکه معابر نصب می‌شوند و قادرند تعداد خودروهای عبوری از شبکه را شمارش کنند. هزینه نصب و نگهداری از این وسایل از معایب این منبع داده به‌شمار می‌رود. به‌علاوه، نصب شمارنده‌ها در تمام معابر شبکه مثل راه‌های فرعی ممکن نیست.

برخی تحقیقات از داده‌های شبکه سلولی تلفن‌های همراه استفاده کرده‌اند [۱۶، ۲۴]. با استفاده از آنتن‌های شبکه‌های تلفن همراه می‌توان به منطقه کاربر دست یافت. با این وجود انطباق مناطق شبکه سلولی تلفن‌های همراه بر مناطق تحلیل ترافیک از دقت این منبع داده می‌کاهد. با گسترش فناوری‌های ارتباطی استفاده از داده‌های بلوتوث جهت تعیین موقعیت افراد ممکن شده است [۱۷]. مشکل عمده استفاده از این فناوری نرخ نفوذ پایین (حدود ۱ تا ۵ درصد) و در نتیجه کم بودن اندازه نمونه است [۲۰]. پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تعیین موقعیت اخذ داده‌های دقیق مکانی و زمانی را ممکن ساخته است. سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۱ موجود در تلفن‌های هوشمند قادرند تا مکان افراد را با دقت زیادی محاسبه کنند و در اختیار کاربر قرار دهند. همچنین برخی تحقیقات از دستگاه‌های GPS موجود در خودروهای تاکسی جهت استخراج خط سیر افراد استفاده کرده‌اند [۲۵].

با گسترش وب ۲/۰ و استفاده کاربران از شبکه‌های اجتماعی مکان‌مبنا، تحقیقات از داده‌های آن جهت پیش‌بینی تقاضای سفر بهره برده‌اند [۱۹، ۲۰]. شبکه‌های اجتماعی مکان‌مبنا به کاربر اجازه می‌دهند تا موقعیت خود را با دوستان خود به اشتراک بگذارند. اطلاعات موقعیت کاربر از GPS تلفن همراه آن‌ها به‌دست می‌آید. Jin و همکاران [۲۶] برای برآورد ماتریس OD از این داده‌ها به همراه مدل جاذبه استفاده کرده‌اند. همچنین Chen و همکاران [۲۷] در تحقیقی بر روی ویژگی‌های سفرهای درون‌شهری و مقایسه آن با سفرهای بین شهری، از داده‌های بازی و شبکه اجتماعی مکان‌مبنا Whrrl و مدل رتبه‌مبنا جهت شبیه‌سازی جریان حرکتی استفاده کرده‌اند. یک شهر مزیت این روش نسبت به روش‌های قبل حصول اطلاعات اضافی دیگر نظیر استخراج هدف سفر کاربر است.

۳- مدل‌های رایج در برآورد ماتریس توزیع سفر

پس از محاسبه سفرهای تولید شده و جذب شده برای هر منطقه در مرحله تولید سفر، لازم است تا هر یک از سفرها با استفاده از مدل توزیع سفر در میان مناطق توزیع شود. به‌طور کلی، مدل توزیع سفر یک مدل احتمالاتی به شکل زیر است.

$$T_{ij} = T_i P_{ij} \quad (۱)$$

که در آن T_i تعداد سفرهای تولید شده در منطقه مبدأ است که از مرحله تولید سفر به‌دست آمده است. همچنین T_{ij} درایه‌های ماتریس مبدأ-مقصد و P_{ij} احتمال سفر از مبدأ i به مقصد j است.

به طور سنتی، توزیع سفر با استفاده از مدل جاذبه محاسبه می‌شود، اما گاهی مدل‌های دیگری نظیر فرصت‌های تداخلی، logit و fratar نیز به‌کار می‌روند. در این بخش به تشریح مدل‌های جاذبه و فرصت‌های تداخلی پرداخته می‌شود و ویژگی‌های هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- مدل جاذبه

مدل جاذبه رایج‌ترین مدل توزیع سفر مورد استفاده در مدل چهارمرحله‌ای پیش‌بینی تقاضای سفر است [۲۸]. شباهت زیاد فرضیات این مدل با فرضیات جاذبه نیوتونی علت نام‌گذاری جاذبه برای این مدل است. فرض مدل جاذبه بر این اساس است که سفرهای تولید شده در یک منطقه i و جذب شده در منطقه‌ای دیگر j نسبت مستقیم با مولدهای مبدأ (P_i) و جاذب‌های مقصد (A_j) و نسبت معکوس با یک «عامل بازدارنده»^۲ (F_{ij}) نظیر فاصله دو منطقه از یکدیگر دارد [۲۹]. رابطه ۲ فرم استاندارد مدل جاذبه را نشان می‌دهد.

$$T_{ij} = P_i \frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{j' \in \text{zones}} A_{j'} F_{ij'} K_{ij'}} \quad (۲)$$

که در آن K یک پارامتر اختیاری برای در نظر گرفتن اثر متغیرهایی نظیر عوامل اجتماعی-اقتصادی است.

^۲ Friction Factor

^۱ Global Positioning System (GPS)

که در آن T_i تعداد سفرهای خروجی در منطقه m_i جمعیت موجود در یک منطقه، M جمعیت کل شهر و S_{ij} جمعیتی است که در دایره‌ای به شعاع فاصله مبدأ تا مقصد و به مرکز مبدأ قرار گرفته است. همچنین α پارامتر مدل به‌شمار می‌رود و باید از طریق فرایند کالیبراسیون تعیین شوند.

۴- مدل‌های الگوی حرکتی شهری

در سال‌های اخیر با توسعه فناوری‌های تعیین موقعیت، در حوزه‌های مختلف، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری انفرادی و جمعی معرفی شده است. مدل‌های الگوی حرکتی جمعی به دو دسته پارامتری و بدون پارامتر تقسیم می‌شوند. مدل‌های پارامتری نظیر مدل رتبه مبنا دارای یک پارامتر اضافی هستند که مقدار آن باید از طریق فرایند کالیبراسیون تعیین گردد. مدل‌های بدون پارامتر نظیر PWO^۳ قادر هستند تا الگوی حرکتی را بدون هیچ پارامتر اضافه‌ای پیش‌بینی کنند (گاهی این مدل‌ها را مدل‌های جهانی می‌نامند). در این بخش سه مدل تابش، PWO و رتبه‌مبنا معرفی و ویژگی‌های هر یک بررسی می‌شود.

۴-۱- مدل تابش

مدل تابش^۴ [۲۸] یک مدل بدون پارامتر جهت پیش-بینی الگوی حرکتی شهری است که از طریق مدل‌سازی دینامیک پراکنش ذرات^۵ در فیزیک به‌دست آمده است. مفاهیم این مدل به فرضیات مدل فرصت‌های تداخلی نزدیک‌تر است [۳۴]؛ با این تفاوت که یک سازوکار رقابتی در آن اتخاذ شده است. به عبارت دیگر، افراد تمایل دارند تا نزدیک‌ترین مکان‌ها با بیشترین مزایا را انتخاب کنند. مدل تابش از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T_{ij} = T_i \frac{m_i m_j}{(m_i + S_{ij})(m_i + m_j + S_{ij})} \quad (۴)$$

که در آن m_i و m_j به ترتیب جمعیت منطقه مبدأ و مقصد و S_{ij} جمعیت موجود در دایره‌ای به مرکز مقصد و به شعاع فاصله مبدأ و مقصد (بدون احتساب جمعیت مبدأ و

F_{ij} عامل بازدارنده افراد از سفر به مناطق مختلف نظیر طول سفر یا زمان سفر است. معمولاً این عامل تابعی خطی از فاصله $(\alpha + \beta d_{ij})$ یا تابعی نمایی با توان منفی $(\alpha e^{-\beta d_{ij}})$ است [۳۰]. در این توابع α و β پارامترهای مجهول هستند که باید از طریق یک فرایند کالیبراسیون به دست آیند. تا کنون روش‌های مختلفی نظیر تحلیل رگرسیون چندگانه^۱ جهت تعیین این پارامترها پیشنهاد شده است [۳۱]. در بخش ۵ نمونه‌ای از روش‌های تعیین پارامترهای مدل ذکر خواهد شد.

یکی از مسائل مهم در برآورد ماتریس توزیع سفر، موازنه ماتریس است. در واقع، تعداد سفرهای برآوردشده خروجی از یک منطقه باید با تعداد سفرهای واقعی خروجی از آن برابر باشند. همچنین، تعداد سفرهای برآوردشده ورودی به هر منطقه باید با تعداد سفرهای واقعی ورودی به آن برابر باشد. با توجه به این‌که مدل جاذبه (تک قیدی) و بسیاری دیگر از مدل‌ها موازنه تعداد سفرها را تضمین نمی‌کنند، از تکنیک‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک^۲ [۲۶]، روش furnace [۳۲] و غیره استفاده می‌شود تا این مسئله مرتفع گردد.

۳-۲- مدل فرصت‌های تداخلی

بر خلاف مدل جاذبه، مدل فرصت‌های تداخلی عامل بازدارنده یا محرک سفرها را فاصله بین مناطق نمی‌داند، بلکه فرض می‌کند که میزان سفرها به یک منطقه با تعداد فرصت‌های آن رابطه مستقیم و با تعداد فرصت‌های میانی در سایر مکان‌ها نسبت عکس دارد [۳۳]. نکته مهم در به‌کارگیری مدل فرصت‌های تداخلی نحوه تعریف فرصت‌ها در مناطق مورد نظر است. برای مثال، جمعیت حاضر در یک منطقه، مساحت کاربری‌های تجاری یا شاغلان خرده-فروشی‌ها برای سفرهای خرید، تعداد جاذبه‌های گردشگری و غیره نمونه‌هایی از فرصت‌ها در یک منطقه هستند [۸]. با در نظر گرفتن جمعیت به عنوان فرصت‌های یک منطقه، مدل فرصت‌های تداخلی به شکل زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$T_{ij} = T_i \frac{e^{-\alpha(S_{ij} - m_j)} - e^{-\alpha S_{ij}}}{1 - e^{-\alpha M}} \quad (۳)$$

^۳ Population Weighted Opportunities (PWO)

^۴ Radiation Model

^۵ Diffusion Dynamics

^۱ Multiple Regression Analysis

^۲ Genetic Algorithm (GA)

مقصد) است. همان‌گونه که در رابطه ۴ مشخص است، تنها داده مورد نیاز جهت پیاده‌سازی مدل توزیع جمعیت در شهر است.

۴-۲- مدل PWO

برخی پژوهش‌ها [۲۸، ۳۵] مدعی شده‌اند که مدل تابش در فضای شهری نتایج مطلوبی تولید نمی‌کند. مدل PWO [۷] تلاشی برای بهبود این کاستی‌های مدل تابش است و در سال ۲۰۱۴ ارائه شد. مدل PWO نیز بدون پارامتر است و رفتار حرکتی جمعی شهری را به صورت یک مدل جهانی^۱ پیش‌بینی می‌کند. به عبارت دیگر، این مدل بدون داشتن پارامتر تعدیل‌کننده قابلیت پیش‌بینی برای تمام شهرها را دارا است. این مدل از رابطه ۵ قابل محاسبه است [۷]:

$$T_{ij} = T_i \frac{m_j \left(\frac{1}{S_{ji}} - \frac{1}{M} \right)}{\sum_{k \neq i}^N m_k \left(\frac{1}{S_{ki}} - \frac{1}{M} \right)} \quad (5)$$

که در آن S جمعیت درون دایره‌ای به شعاع فاصله مبدأ و مقصد و به مرکز مقصد است. این مدل نیز تنها نیازمند توزیع جمعیت در شهر است.

۴-۳- مدل رتبه‌مبنا

فرض مدل رتبه‌مبنا^۲ بر این اساس است که احتمال سفر از یک مبدأ به یک مقصد تنها به رتبه مقصد نسبت به مبدأ (و نه به فاصله آن دو) بستگی دارد [۳۶]. رابطه مدل رتبه‌مبنا به شکل زیر است:

$$T_{ij} = T_i \frac{R_i(j)^{-\gamma}}{\sum_{k \neq i}^N R_i(j)^{-\gamma}} \quad (6)$$

که در آن $R_i(j)$ رتبه منطقه j نسبت به منطقه i و N تعداد کل مناطق در شهر است. نحوه محاسبه رتبه در این مدل اهمیت فراوانی دارد. برای مثال می‌توان فاصله بین دو منطقه را به عنوان معیار رتبه در نظر گرفت. در

این صورت نزدیک‌ترین منطقه به i رتبه ۱ و دومین منطقه رتبه ۲ خواهد گرفت. γ پارامتر مدل است که از فرایند کالیبراسیون محاسبه می‌شود.

۵- کالیبراسیون مدل‌های پارامتری

همان‌گونه که در بخش پیشین ملاحظه شد، برخی از مدل‌های برآورد ماتریس توزیع سفر و یا مدل‌های پیش‌بینی الگوی حرکتی دارای پارامترهایی اضافه هستند که باید مقدار آن‌ها تعیین گردد. نقش این پارامترها انطباق ویژگی‌های الگوی حرکتی مدل‌شده نظیر طول سفر بر الگوی واقعی سفر است.

جهت تعیین این پارامترها از روش‌های گوناگونی نظیر رگرسیون [۳۱] یا کمترین مربعات [۳۷] استفاده شده است. Hyman [۳۸] یک روش استاندارد جهت کالیبراسیون مدل‌های توزیع سفر ارائه کرده است. این روش کالیبراسیون به مدل رتبه‌مبنا نیز قابل تعمیم است [۷]. در این بخش روش Hyman شرح داده می‌شود.

هدف روش Hyman کمینه‌سازی اختلاف بین میانگین فاصله سفرهای واقعی ($\bar{r}$) و پیش‌بینی‌شده با استفاده از پارامتر $(\hat{r}(\beta))$ است [۷]. به عبارت دیگر $E(\beta)$ در رابطه زیر باید کمینه گردد.

$$E(\beta) = \left| \hat{r}(\beta) - \bar{r} \right| = \left| \frac{\sum_i \sum_j \hat{T}_{ij}(\beta) r_{ij}}{\sum_i \sum_j \hat{T}_{ij}(\beta)} - \frac{\sum_i \sum_j T_{ij} r_{ij}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \right| \quad (7)$$

در روش پیشنهادی Hyman برای کمینه‌سازی تابع هدف رابطه ۷ از روش سکانت^۳ استفاده می‌شود. روش سکانت به صورت زیر است [۳۸]:

مرحله اول: در نظر گرفتن مقدار اولیه برای پارامتر $\beta_0 = 1/\bar{r}$.

مرحله دوم: محاسبه ماتریس سفر با استفاده از پارامتر β_0 و به‌دست آوردن متوسط فاصله سفرها $(\bar{r}(\beta_0))$ و برآورد مقدار β با استفاده از رابطه $\beta_1 = \beta_0 \bar{r}(\beta_0) / \bar{r}$.

مرحله سوم: محاسبه ماتریس سفر با استفاده از پارامتر β_1 و به‌دست آوردن متوسط سفر جدید $(\bar{r}(\beta_1))$ و مقایسه آن با

^۱ Universal Model

^۲ Rank-Based Model

^۳ Secant Method

می‌رود، داده‌های تاکسی می‌تواند گزینه مناسبی برای کالیبراسیون با استفاده از این الگوریتم باشد. از مزایای استفاده از داده‌های تاکسی نسبت به داده‌های سنتی می‌توان به دقت بالاتر و سهولت بیشتر آن اشاره کرد.

۶- پیاده‌سازی و نتایج

در این تحقیق مدل رتبه‌بندی در بخش منتهن شهر نیویورک پیاده‌سازی شد و نتایج آن با نتایج بدست‌آمده از پیاده‌سازی مدل جاذبه مقایسه شد. منتهن پرجمعیت‌ترین بخش شهر نیویورک می‌باشد و یکی از مهم‌ترین مراکز تجاری و اقتصادی دنیا به‌شمار می‌رود. از این رو، تعداد سفرها در این بخش بسیار زیاد است. در بخش منتهن، ۲۸۸ منطقه سرشماری آماری نیویورک به‌عنوان مناطق تحلیل ترافیک در نظر گرفته شد. این مناطق در قسمت‌های پرتردد متراکم‌تر هستند و مرز آن‌ها با تقریب بسیار خوبی منطبق بر خیابان‌ها است. در شکل ۴ بخش منتهن شهر نیویورک و مناطق تحلیل ترافیک آن نشان داده شده است.



شکل ۴- مناطق تحلیل ترافیک در بخش منتهن شهر نیویورک

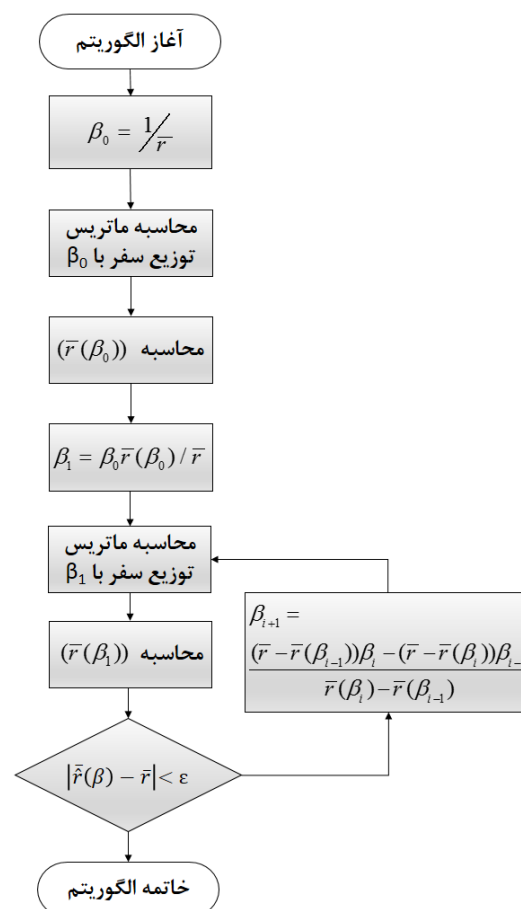
همانطور که در بخش پیشین ذکر شد، برای پیاده‌سازی مدل رتبه‌بندی از مفهوم رتبه استفاده می‌شود. در این مقاله به منظور محاسبه رتبه از فاصله استفاده شده است. علاوه بر این، محاسبه ماتریس توزیع سفر نیازمند تعداد سفرهای تولیدشده در هر منطقه (به دست آمده از مرحله تولید سفر) است. در این تحقیق، به‌منظور محاسبه تعداد سفرهای

$\bar{r}$ در صورتی که اختلاف دو مقدار مطلوب باشد، فرایند خاتمه می‌یابد. در غیر این‌صورت وارد مرحله ۴ می‌شود.
مرحله چهارم: بهبود برآورد β از طریق:

$$\beta_{i+1} = \frac{(\bar{r} - \bar{r}(\beta_{i-1}))\beta_i - (\bar{r} - \bar{r}(\beta_i))\beta_{i-1}}{\bar{r}(\beta_i) - \bar{r}(\beta_{i-1})}$$

مرحله پنجم: تکرار مرحله ۳ و ۴ تا نزدیک شدن مقدار $\bar{r}(\beta)$ به $\bar{r}$.

در شکل ۳ فلوچارت الگوریتم پیشنهادی Hyman نشان داده شده است.



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم Hyman برای کالیبراسیون مدل‌های توزیع سفر

Yue و همکاران [۳۹] در تحقیق خود به کالیبراسیون مدل تعامل مکانی Huff با استفاده از داده‌های تاکسی پرداخته‌اند و به این نکته اشاره کرده‌اند که استفاده از داده‌های GPS امکان محاسبه دقیق فاصله و زمان سفرها را فراهم می‌کند. در این مقاله نیز داده‌های تاکسی در الگوریتم Hyman به کار گرفته شد. از آن‌جا که میانگین فاصله سفرها در این الگوریتم یک پارامتر مهم به‌شمار

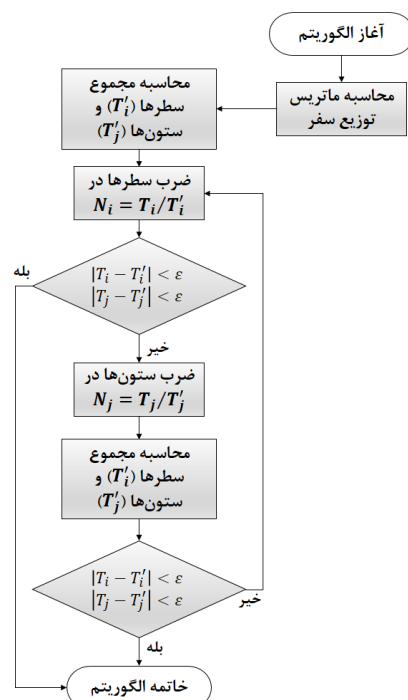
جدول ۱- نتایج حاصل از اعمال روش Hyman جهت تعیین پارامتر

تکرار	مقدار پارامتر γ	دقت (متر)
مقدار اولیه	۰/۳۶۵۹۷۸	۱/۶
۱	۰/۵۹۱۰۷۶	۰/۹
۲	۰/۸۵۱۹۹۱	۰/۰۳
۳	۰/۸۴۲۷۱۸	7×10^{-4}
۴	۰/۸۴۲۵۰۷	10^{-6}
۵	۰/۸۴۲۵۰۸	10^{-11}
۶	۰/۸۴۲۵۰۸	10^{-15}

جدول ۲- نتایج حاصل از اعمال روش Hyman جهت تعیین پارامتر

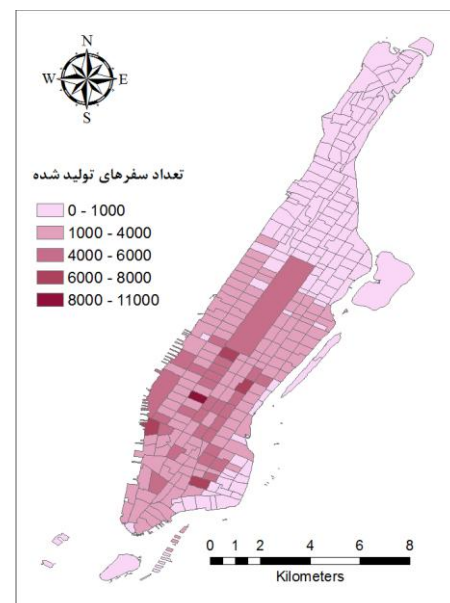
تکرار	مقدار پارامتر β	دقت (متر)
مقدار اولیه	۰/۳۶۵۹۷۸	۱/۹۲
۱	۰/۶۲۳۳۰۵	۱/۲۶
۲	۱/۱۱۴۱۱۱	۰/۰۹
۳	۱/۱۵۴۷۶۱	9×10^{-3}
۴	۱/۱۵۹۲۹۹	10^{-4}
۵	۱/۱۵۹۳۵۳۱۳	10^{-7}
۶	۱/۱۵۹۳۵۳۱۹	10^{-12}
۷	۱/۱۵۹۳۵۳۱۹	10^{-15}

پس از محاسبه اولیه ماتریس مبدأ-مقصد، جهت موازنه سفرهای ورودی و خروجی هر منطقه از روش تکراری Furness استفاده شد. فلوچارت الگوریتم روش Furness در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- فلوچارت الگوریتم Furness جهت موازنه ماتریس توزیع سفر

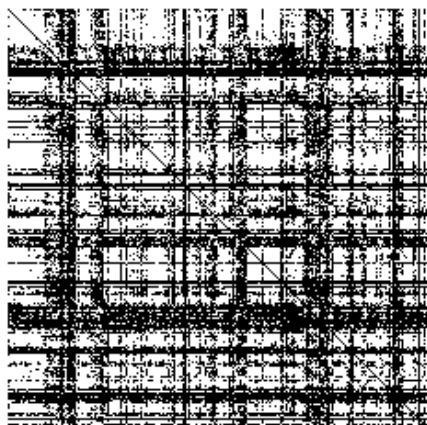
تولیدشده و ارزیابی مدل‌ها از داده‌های GPS تاکسی‌های شهر نیویورک استفاده شده است. این داده‌ها تحت برنامه TPEP/LEP در کمپیون تاکسیرانی نیویورک (TLC) گردآوری شده‌اند [۴۰]. در منهن تاکسی‌های زرد و سبز وجود دارند. تاکسی‌های سبز اجازه سوارکردن مسافر در خارج از منطقه منهن را نیز دارند. از طرفی پیاده‌شدن مسافران با تاکسی‌های سبز تنها در بخش شمالی منهن امکان‌پذیر است. فرمت داده‌های تاکسی خام به صورت نقاط سوار و پیاده‌شدن مسافران است. برای آماده‌سازی این داده‌ها ابتدا باید مشخص شود که هر نقطه سوارشدن متناظر با کدام نقطه پیاده‌شدن است. این کار با استفاده از عملیات Spatial Join انجام شد. سپس سفرهایی که به دلایل مختلف نظیر خطای GPS، مشاهدات اشتباه تلقی می‌شدند، حذف شدند. پس از آن سفرهایی که از خارج منهن شروع شده بودند و یا به خارج منهن ختم می‌شدند با استفاده از ابزار Intersection شناسایی و سپس حذف شدند. در نهایت با استفاده از تحلیل Point in Polygon تعداد سفرهای تولیدشده و جذب‌شده در هر منطقه محاسبه شد. شکل ۵ پراکندگی سفرهای تولیدشده را در روز ۲۱ سپتامبر ۲۰۱۳ با استفاده از خودروهای تاکسی زرد و سبز در بخش منهن نشان می‌دهد.



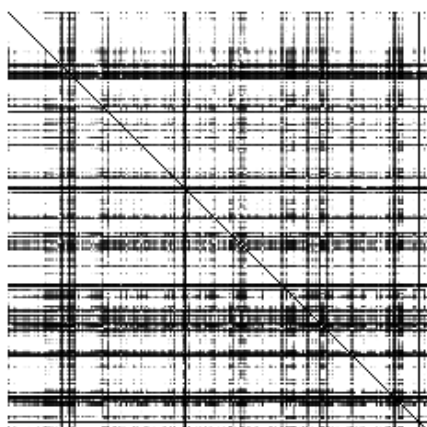
شکل ۵- تعداد سفرهای تولید شده در مناطق تحلیل ترافیک بخش منهن

سپس پارامتر مدل‌ها با استفاده از روش Hyman محاسبه شد. پارامتر مدل جاذبه در ۷ تکرار و پارامتر مدل رتبه‌مبنا در ۶ تکرار محاسبه شد. نتیجه بهینه‌سازی پارامتر و دقت حاصل از استفاده هر یک در هر تکرار برای مدل رتبه‌مبنا و جاذبه در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

مبدأ i به مقصد j را نشان می‌دهد. با مقایسه الگوی شدت جریان واقعی و پیش‌بینی‌شده می‌توان ماتریس توزیع سفر را ارزیابی کرد [۲۶]. در شکل ۷ نمودارهای جریان بین منطقه‌ای در منطقه منتهن نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- الگوی شدت جریان (الف) واقعی و (ب) برآوردشده با استفاده از مدل رتبه‌مینا در منطقه منتهن

در شکل بالا، رنگ‌های تیره شدت جریان کم و رنگ‌های روشن شدت جریان زیاد را نشان می‌دهند. شباهت دو الگوی شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی توانسته است توزیع سفرهای واقعی در سطح منتهن را برآورد کند. شایان ذکر است که مدل جاذبه نیز دارای یک الگوی شدت جریان بسیار شبیه به الگوی شدت جریان حاصل از مدل رتبه‌مینا است.

۳-۶- تحلیل رگرسیون

با استفاده از تحلیل رگرسیون می‌توان میزان نزدیک بودن سفرهای برآوردشده به مقدار سفرهای واقعی را محاسبه نمود. شکل ۸ نمودار پراکندگی سفرها را در

تا کنون جهت ارزیابی مدل‌های توزیع سفر از روش‌های مختلفی نظیر نسبت انطباق^۱، آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف دونمونه‌ای^۲، شاخص همانندی سورسن^۳، شدت جریان^۴ بین منطقه‌ای و غیره استفاده شده است. در این مقاله از شاخص همانندی سورسن، شدت جریان بین منطقه‌ای و تحلیل رگرسیون برای ارزیابی مدل استفاده شده است.

۱-۶- شاخص همانندی سورسن

به منظور ارزیابی مدل‌ها [۷] و یا تعیین پارامترهای مدل [۳۵] می‌توان از شاخص همانندی سورسن استفاده کرد. مقدار این شاخص عددی بین صفر و یک است. میزان همانندی ۱ بدان معنا است که دو ماتریس پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده کاملاً شبیه یکدیگر هستند. شاخص همانندی سورسن از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۶].

$$SSI = \frac{2 \sum_{i,j} \min(T_{ij}^{data}, T_{ij}^{model})}{\sum_{i,j} T_{ij}^{data} + \sum_{i,j} T_{ij}^{model}} \quad (9)$$

که در رابطه بالا T_{ij}^{data} ماتریس توزیع سفر مشاهده‌شده و T_{ij}^{model} ماتریس توزیع سفر پیش‌بینی‌شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل رتبه‌مینا در بخش منتهن نشان می‌دهد که این مدل قادر است حدود ۶۷٪ سفرها را به درستی برآورد کند. این در حالی است که مدل جاذبه می‌تواند حدود ۶۸٪ سفرها را در منتهن پیش‌بینی کند. با توجه به متفاوت بودن شرایط برای هر شهر، تحقیقات دیگر [۷، ۳۵] در برآورد الگوی حرکتی در بهترین حالت به میزان همانندی ۷۵٪ رسیده‌اند.

۲-۶- شدت جریان بین منطقه‌ای

یک روش نمایش ماتریس توزیع سفر استفاده از الگوهای جریان است. الگوی جریان یک نمودار دو بعدی است که محور افقی آن مناطق مبدأ و محور قائم آن مناطق مقصد را نشان می‌دهد. هر سلول از این نمودار، شدت جریان سفر از

^۱ Coincidence Ratio

^۲ Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

^۳ Sorensen Similarity Index (SSI)

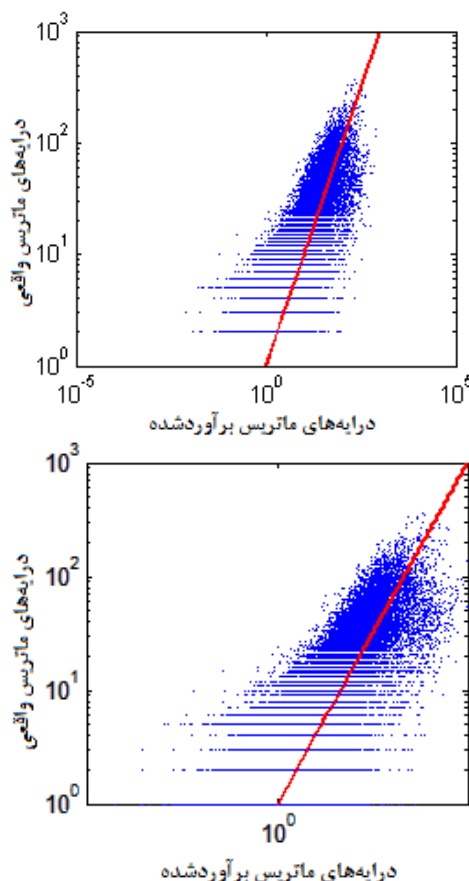
^۴ Flow Intensity

نحوه تصمیم‌گیری کاربران را در نظر گرفته‌اند. از این رو به‌نظر می‌رسد که امکان استفاده از این مدل‌ها در مدل-سازی توزیع سفر وجود داشته باشد. قابل ذکر است که برخی از این مدل‌ها نظیر مدل PWO و تابش بدون پارامتر هستند و محاسبات آن‌ها نسبت به مدل‌های پارامتری نظیر جاذبه بسیار آسان‌تر است. همچنین این مدل‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در مقیاس جهانی پیش‌بینی‌های قابل قبولی انجام می‌دهند. برخی از این مدل‌ها تنها نیازمند متغیرهای ورودی جمعیت هستند و این موضوع بسیاری از هزینه‌های اخذ داده از طریق سرشماری خانگی و یا کنارجاده‌ای را کاهش می‌دهد. یکی دیگر از مزایای استفاده از این مدل‌ها امکان استفاده از داده‌های دیگر نظیر GPS به صورت مستقیم در این مدل‌ها است.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل رتبه‌مبنا در سطح منطقه منتهن شهر نیویورک نشان می‌دهد که مدل‌های پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری پتانسیل بالایی جهت برآورد توزیع سفر در فرآیند پیش‌بینی تقاضای سفر دارند. این مدل توانست حدود ۶۷٪ سفرها را شبیه به واقعیت در بین مناطق تحلیل ترافیک بخش منتهن توزیع کند. این در حالی است که مدل جاذبه نیز قادر به برآورد حدود ۶۸٪ سفرها بود. همچنین r^2 به‌دست‌آمده از تحلیل رگرسیون با مقدار ۰/۳۲ نشان از انطباق مناسب اعداد به‌دست‌آمده در ماتریس توزیع سفر بر تعداد واقعی سفر است. تنها مزیت مدل جاذبه نسبت به مدل رتبه‌مبنا عملکرد بهتر از نظر معیار r^2 در تحلیل رگرسیون است. علت این عملکرد بهتر در استفاده مدل جاذبه از متغیر جمعیت در مدل نهفته است. مدل رتبه‌مبنا مورد استفاده در این مقاله تنها متغیر فاصله را در نظر گرفته است؛ اما به‌عنوان پیشنهاد می‌توان بر روی متغیرهای دیگر نیز تحقیقاتی ارائه نمود.

در پژوهش‌های آتی استفاده از مفاهیم دیگر نظیر جمعیت مقصد، تعداد آثار گردشگری و غیره جهت محاسبه رتبه مناطق می‌تواند کارآمد باشد. همچنین در نظر گرفتن قصد سفر در ماتریس مبدأ-مقصد، یکی دیگر از مسائلی است که در مدل‌های الگوی حرکتی شهری باید به آن پرداخت.

مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. اعداد محور افقی درایه‌های ماتریس توزیع سفر برآوردشده و محور قائم سفرهای واقعی است. خط قرمز نمودار معادله خط همانی ($x=y$) است. هر چه ابر نقاط حاصل از سفرها به این خط نزدیک‌تر باشد، برآوردهای دقیق‌تری صورت گرفته است.



شکل ۸- نمودار پراکندگی سفرهای برآوردشده

به منظور اندازه‌گیری کمی میزان نزدیکی ابر نقاط به خط همانی مقدار r^2 از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد. مقدار r^2 برای مدل رتبه‌مبنا برابر ۰/۳۲ و برای مدل جاذبه برابر ۰/۴۷ محاسبه شد.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

همان‌گونه که روابط مدل‌های پیش‌بینی الگوی حرکتی شهری نشان می‌دهند، همگی دارای فرم احتمالاتی شبیه به رابطه ۱ هستند. علاوه بر این، سازوکار محاسباتی احتمال سفر از یک مبدأ به یک مقصد در این مدل‌ها محدود نیست و بسیاری از مشخصات رفتاری و یا

مراجع

- [1] R. Rezende Amaral, E.-H. Aghezzaf, B. Raa, and E. Yadollahi, "City logistics and mobility: trends, challenges and possible operational solution strategies," *Adaptive mobility: a new policy and research agenda on mobility in horizontal metropolises*, pp. 139-160, 2015.
- [2] R. M. Prothero, "Disease and mobility: a neglected factor in epidemiology," *International journal of epidemiology*, vol. 6, pp. 259-267, 1977.
- [3] G. Sammer, *Travel demand management and road user pricing: success, failure and feasibility*: Routledge, 2016.
- [4] T. V. Mathew and K. Krishna Rao, "Introduction to Transportation engineering," *Civil Engineering-Transportation Engineering*. IIT Bombay, NPTEL ONLINE, <http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Civil%20Engineering>, 2006.
- [5] M. G. McNally, "The four step model," *Handbook of transport modelling*, vol. 1, pp. 35-41, 2007.
- [6] T. R. Board, "NCHRP Report 716: Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques," 2012.
- [7] X.-Y. Yan, C. Zhao, Y. Fan, Z. Di, and W.-X. Wang, "Universal predictability of mobility patterns in cities," *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 11, p. 20140834, 2014.
- [8] M. Ahmadinejad, S. Afandizadeh, and H. S. Yadi, "An Innovative Methodology To Extend Intervening Opportunity Model For Predicting Home-Based Shopping Trips," 2013.
- [9] L. Wang, J. Tang, X. Fei, and M. Gong, "A mixed integer programming formulation and solution for traffic analysis zone delineation considering zone amount decision," *Information Sciences*, vol. 280, pp. 322-337, 2014.
- [10] J. Feng, M. Dijst, B. Wissink, and J. Prillwitz, "The impacts of household structure on the travel behaviour of seniors and young parents in China," *Journal of transport geography*, vol. 30, pp. 117-126, 2013.
- [11] A. Bwambale, C. F. Choudhury, and N. Sanko, "Modelling Car Trip Generation in the Developing World: The Tale of Two Cities," in *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- [12] R. Cordera, P. Coppola, L. dell'Olio, and Á. Ibeas, "Is accessibility relevant in trip generation? Modelling the interaction between trip generation and accessibility taking into account spatial effects," *Transportation*, pp. 1-27, 2016.
- [13] A. Soltani, T. Saghapoor, H. Izadi, and A. Pakshir, "Trip generation and its relationship with land use diversity: Case studies of four urban districts in Shiraz metropolitan area," *Journal of Urban-Regional Studies and Research*, vol. 3, pp. 1-16, 2012.
- [14] J. Doblas and F. G. Benitez, "An approach to estimating and updating origin-destination matrices based upon traffic counts preserving the prior structure of a survey matrix," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 39, pp. 565-591, 2005.
- [15] N. Caceres, J. Wideberg, and F. Benitez, "Deriving origin destination data from a mobile phone network," *Intelligent Transport Systems, IET*, vol. 1, pp. 15-26, 2007.
- [16] J. White and I. Wells, "Extracting origin destination information from mobile phone data," in *Road Transport Information and Control, 2002. Eleventh International Conference on (Conf. Publ. No. 486)*, 2002, pp. 30-34.
- [17] J. Barceló, L. Montero, L. Marqués, and C. Carmona, "Travel time forecasting and dynamic origin-destination estimation for freeways based on bluetooth traffic monitoring," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 19-27, 2010.
- [18] Y. Long, Y. Zhang, and C. Cui, "Identifying commuting pattern of Beijing using bus smart card data," *Acta Geographica Sinica*, vol. 67, pp. 1339-1352, 2012.
- [19] Y. Liu, Z. Sui, C. Kang, and Y. Gao, "Uncovering patterns of inter-urban trip and spatial interaction from social media check-in data," *PloS one*, vol. 9, p. e86026, 2014.
- [20] F. Yang, P. J. Jin, X. Wan, R. Li, and B. Ran, "Dynamic origin-destination travel demand estimation using location based social networking data," in *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, 2014.
- [21] N. J. Garber and L. A. Hoel, *Traffic and highway engineering*: Cengage Learning, 2014.
- [22] E. Hato and R. Kitamura, "Data-oriented travel behavior analysis based on probe person systems," in *TRB conference proceedings*, 2008, pp. 187-196.
- [23] J. Watson and P. Prevedouros, "Derivation of origin-destination distributions from traffic counts: Implications for freeway simulation," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 260-269, 2006.

- [24] B.-S. YOO, S.-P. KANG, K. CHON, and S.-G. KIM, "Origin-destination estimation using cellular phone BS information," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 2574-2588, 2005.
- [25] Z. Zheng, S. Rasouli, and H. Timmermans, "Two-regime Pattern in Human Mobility: Evidence from GPS Taxi Trajectory Data," *Geographical Analysis*, 2015.
- [26] P. J. Jin, F. Yang, M. Cebalak, B. Ran, and C. Walton, "Urban travel demand analysis for Austin TX USA using location-based social networking data," in *TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*, 2013.
- [27] W. Chen, Q. Gao, and H.-G. Xiong, "Uncovering urban mobility patterns and impact of spatial distribution of places on movements," *International Journal of Modern Physics C*, p. 1750004, 2016.
- [28] A. P. Masucci, J. Serras, A. Johansson, and M. Batty, "Gravity versus radiation models: On the importance of scale and heterogeneity in commuting flows," *Physical Review E*, vol. 88, p. 022812, 2013.
- [29] L. Matyas, "The gravity model: Some econometric considerations," *The World Economy*, vol. 21, pp. 397-401, 1998.
- [30] A. Cliff, R. L. Martin, and J. Ord, "Evaluating the friction of distance parameter in gravity models," *Regional Studies: The Journal of the Regional Studies Association*, vol. 8, pp. 281-286, 1974.
- [31] P. Högborg, "Estimation of parameters in models for traffic prediction: a non-linear regression approach," *Transportation Research*, vol. 10, pp. 263-265, 1976.
- [32] J. Gupta and N. Shah, "Origin destination transportation models: methods".
- [33] S. A. Stouffer, "Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance," *American sociological review*, vol. 5, pp. 845-867, 1940.
- [34] F. Simini, M. C. González, A. Maritan, and A.-L. Barabási, "A universal model for mobility and migration patterns," *Nature*, vol. 484, pp. 96-100, 2012.
- [35] C. Kang, Y. Liu, D. Guo, and K. Qin, "A Generalized Radiation Model for Human Mobility: Spatial Scale, Searching Direction and Trip Constraint," *PloS one*, vol. 10, p. e0143500, 2015.
- [36] A. Noulas, S. Scellato, R. Lambiotte, M. Pontil, and C. Mascolo, "A tale of many cities: universal patterns in human urban mobility," *PloS one*, vol. 7, p. e37027, 2012.
- [37] A. Sen and R. Pruthi, "Least squares calibration of the gravity model when intrazonal flows are unknown," *Environment and Planning A*, vol. 15, pp. 1545-1550, 1983.
- [38] G. Hyman, "The calibration of trip distribution models," *Environment and Planning*, vol. 1, pp. 105-112, 1969.
- [39] Y. Yue, H.-d. Wang, B. Hu, Q.-q. Li, Y.-g. Li, and A. G. Yeh, "Exploratory calibration of a spatial interaction model using taxi GPS trajectories," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 36, pp. 140-153, 2012.
- [40] "http://www.nyc.gov/html/tlc/html/about/trip_record_data.shtml ed: NYC Taxi and Limousine Commission (TLC).