

## مدل بهینه‌سازی توزیع زمانی سفرها در تخصیص ترافیک پویا

### مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی‌زاده\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
احمد عبادی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
نوید کلانتری، دانش‌آموخته دکترا، مدیر مشاور، AECOM - واشنگتن، آمریکا  
حمید بیگدلی‌راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۳۴-۱۵

#### چکیده

رشد سریع شهری منجر به افزایش تقاضای سفر و همچنین افزایش مالکیت وسایل نقلیه خصوصی شده و زیرساخت‌های موجود نتوانسته است با اثرات تقاضا و تراکم ترافیک مطابقت داشته باشد. با افزایش تراکم ترافیک، تأخیر مسافران افزایش و قابلیت اطمینان شبکه کاهش می‌یابد. در تحلیل سیستم‌های حمل‌ونقل، تخمین و تحلیل تقاضای سفر برای دستیابی به سیستم حمل‌ونقلی کارا و مؤثر، اهمیت ویژه‌ای دارد و برآورد و اصلاح ماتریس‌های تقاضا امری بسیار مهم است که با بهره‌گیری از دقت و جزئیات بیشتر در برآورد آن‌ها به نتایج قابل‌اعتمادتر و کاربردی‌تر می‌توان دست‌یافت. در مسئله برآورد و اصلاح ماتریس به خصوص در شبکه‌های متراکم، به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی باعث افزایش قابل‌توجه دقت مدل‌سازی می‌شود. در این پژوهش هدف بهینه‌سازی ضرایب توزیع زمانی ماتریس تقاضا در گام‌های ۱۵ دقیقه برای کل بازه مطالعات است. رویکرد دوسطحی برآورد ماتریس تقاضای سفر از ماتریس‌های پیشین که ماتریس‌های استاتیک مطالعات جامع می‌باشد، استفاده شده است. در سطح بالا به وسیله مدل‌های ترکیبی گوسی ضرایب را تولید نموده و از الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای یادگیری و آموزش در بهینه‌سازی استفاده می‌نماید. تابع هدف کمینه‌کردن خطا از طریق مقدار RMSE است. از ایستگاه‌های استفاده نشده، برای اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شود که ضریب تشخیص  $R^2$  در کل بازه‌ها و کل ایستگاه‌ها مقدار ۰/۹۱ و در ۳ بازه اوج مقدار ۰/۸۸ حاصل شده است که باتوجه به رویکرد بهینه‌سازی با استفاده از ماتریس‌های پیشین به منظور تغییر زمان توزیع سفرها (شروع سفرها) نتایج نشان از عملکرد مناسب فرایند دوسطحی ارائه شده دارد.

واژه‌های کلیدی: توزیع زمانی سفر، تخصیص دینامیک Transims، بهینه‌سازی دوسطحی تقاضا، مدل ترکیبی گوسی

#### ۱-مقدمه

توسعه پایدار، تخصیص اعتبار به پروژه‌های حمل‌ونقلی و نحوه مدیریت سیستم‌های حمل‌ونقل شهری را در شهرهای بسیاری شاهد هستیم و بدین منظور نیاز به اطلاعات جامع‌تر و دقیق‌تری برای تعیین خط‌مشی سیاست‌گذاری در عرصه حمل‌ونقل وجود دارد. هدف از انجام مطالعات حمل‌ونقل، اصلاح یا جایگزینی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری جهت حل مسائل آینده سیستم‌های حمل‌ونقل است. مدل‌های پیش‌بینی اثرات تغییر جمعیت، تغییر کاربری زمین، احداث یا تخریب زیرساخت‌های حمل‌ونقلی و غیره در مطالعات به کار گرفته می‌شود. این مدل‌های تقاضا بسته

رشد سریع شهری منجر به افزایش تقاضای سفر و همچنین افزایش مالکیت وسایل نقلیه خصوصی در مناطق شهری می‌شود. در سناریوی حاضر زیرساخت‌های موجود نتوانسته است با تقاضایی که منجر به تراکم ترافیک، آلودگی وسایل نقلیه و تصادفات می‌شود، مطابقت داشته باشد ( Afandizadeh and Bigdeli Rad, 2021). با افزایش تراکم ترافیک در جاده‌ها، تأخیر مسافران افزایش یافته و قابلیت اطمینان شبکه راه‌ها کاهش یافته است. امروزه در حیطه مدیریت شهری، مسائل و مشکلات مختلفی از قبیل حفظ منابع تجدیدناپذیر، اصلاح الگوی مصرف،

حمل و نقل، کمتر مورد توجه کارشناسان ایرانی قرار گرفته است. نحوه انتشار تقاضا در طول بازه زمانی تخصیص ترافیک پویا و وجود اطلاعات دقیق درباره چگونگی توزیع ماتریس تقاضا در طول زمان، تأثیر بسزایی در خروجی های مدل تخصیص ترافیک پویا برای ساعت اوج دارد. این مشکل باعث شده است تا روش های تحلیلی زیادی در پژوهش های گوناگون، برای برآورد ماتریس تقاضای پویا از ماتریس های اولیه مطرح شوند. در اولین مدل های شبیه سازی کلان، از روش های فیزیکی مانند تئوری سیالات برای مدل سازی ترافیک استفاده شده است (Afandi Zadeh et al., 2019). در این روش سیر تغییرات تدریجی جریان ترافیک در زمان و مکان با استفاده از مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل بیان شده است. روش های تحلیلی نیز برای حل این معادلات دیفرانسیل استفاده شده است. اما عدم توانایی روش های تحلیلی در ارزیابی برهم کنش بین وسیله نقلیه و راه باعث گردیده تا مدل های کلان تخصیص ترافیک پویا از شبیه سازی بهره گیرند. با پیشرفت سریع تکنولوژی، استفاده از مدل های شبیه سازی تخصیص ترافیک پویا برای برنامه ریزی حمل و نقل شبکه های واقعی رایج و محبوب شده است. از دیگر مزیت های مدل های شبیه سازی، آزمایش راهبردهای مدیریت ترافیک بدون منقطع کردن جریان واقعی ترافیک در شبکه است. مدل تخصیص پویا حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای تقاضا در مقایسه با پارامترهای عرضه دارد (Abdi et al., 2020). الگوی جریان ترافیک در هر شبکه، مبنایی برای محاسبه سطح سرویس کمان های شبکه و برآورد هزینه و سود گزینه های موجود برای اصلاح یا توسعه آن شبکه می باشد. تعیین جریان ترافیکی به وسیله مدل های تخصیص ترافیک است که غالباً بر مبنای اصل اول واردراپ تحت عنوان مسئله تعادل استفاده کننده می باشد. اصل اول واردراپ به این صورت است که در شرایط تعادل استفاده کننده، زمان سفر تمامی مسیرهای استفاده شده بین هر زوج مبدأ - مقصد باهم برابر و کمتر یا مساوی زمان سفر مسیرهای استفاده نشده است. در این شرایط، هیچ راننده ای نمی تواند با تغییر یک جانبه مسیر، زمان سفر خود را کاهش دهد. این اصل در حالت پویا به این صورت تعمیم داده می شود که تحت شرایط تعادل در شبکه، زمانی که تراکم در طول زمان تغییر می کند، جریان ترافیک به نحوی منتشر می گردد که در هر لحظه هزینه سفر در مسیرهای استفاده شده کمتر یا حداکثر مساوی با مسیرهای استفاده نشده است (Ortúzar, J.D. and

به ثابت در نظر گرفتن عوامل مؤثرشان و یا ثابت در نظر نگرفتن آنها نسبت به زمان، به ترتیب به دو حالت استاتیک و دینامیک مدل سازی و بکار برده می شوند. (Chiu et al., 2010; Ameri et al., 2021) حجم جریان، زمان و هزینه سفر در کمان های شبکه، از جمله عوامل مهم در زمینه پیش بینی سفر است. این عوامل هزینه و زمان (هزینه می تواند به صورت مالی و یا هر مشخصه یا عاملی که موثر در انتخاب مسیر است باشد) برای ارزیابی کمی اثرات سیاست گذاری های حمل و نقلی در یک شبکه بسیار مهم و اساسی است (Yaquobi and Rasafi and Nouri, 2020). این عوامل در مرحله تخصیص می تواند در طول زمان ثابت در نظر گرفته شود که در این صورت تخصیص ماتریس های تقاضا به صورت استاتیک صورت گرفته است. در صورتی که برنامه ریزان حمل و نقل امروزه به این مسئله پی برده اند که برای توصیف انتخاب مسیر و به عنوان ابزاری جهت ارزیابی سیاست های کوتاه مدت و یا در شرایط خاص (محیطی و یا مدیریتی و ...) برای بهبود مدیریت سیستم و کاهش اثرات زیست محیطی، روش تخصیص استاتیک کارآمد نمی باشد و لذا در این راستا تخصیص دینامیک به منظور ارائه ابزاری دقیق تر برای بیان ارتباط میان انتخاب مسیر سفرها و جریان ترافیک با زمان و هزینه سفر به صورت لحظه به لحظه در شرایط سیاست گذاری های کوتاه مدت و یا مدیریت شبکه در اثر تغییرات ناگهانی و مقطعی همچون شرایط جوی و یا مسدود شدن معبر و یا تقاضای نامتعارف در بازه و مکان به خصوص و مواردی از این قبیل، توسعه یافته است (Xia et al., 2019).

مدل تخصیص ایستا، توصیف قابل قبولی از وضعیت جریان در شبکه های غیر شلوغ دارد. اما زمانی که شبکه شلوغ است محدودیت تابع عملکرد کمان ها مشخص شده و توصیف مناسبی از وضعیت جریان در شبکه به دست نمی آید. مدل های تخصیص ترافیک پویا با هدف بهبود مدل های تخصیص ایستا و حذف برخی از محدودیت های آنها به وجود آمده اند. در مدل های تخصیص پویا می توان چندین ماتریس تقاضا را در طول زمان روی شبکه بارگذاری نمود و همچنین روش شناسی مدل های پویا باعث شده تا مسائلی مانند طراحی و تحلیل خطوط پرسرشتین، قیمت گذاری تراکم، تخلیه شبکه در زمان بحران و تغییر زمان بندی شروع فعالیت های روزانه، در قالب رویکرد پویا قابل تحلیل و بررسی باشند (Naser and Birst, 2010; Wei, 2010). تخصیص ترافیک پویا در فرایند مدل سازی برنامه ریزی

## ۲- شبیه‌سازی با ترنسیمز

در این حوزه همان‌طور که بیان شد انواع مدل‌های شبیه‌سازی و انواع بسته‌های نرم‌افزاری و قابلیت‌ها و محدودیت‌ها و ویژگی‌های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از نرم‌افزار ترنسیمز استفاده شده است. ترنسیمز یک ابزار مفید برای شبیه‌سازی پیچیده و دقیق اثرات بسیار پویا تخلیه است و ترنسیمز به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد تا طرح‌های واکنش اضطراری منطقه‌ای را با توجه به امکان‌سنجی آنها ارزیابی کنند. ترنسیمز قادر به شبیه‌سازی مسافران فردی، مسیرها و حالت حمل‌ونقل آنها است و الگوهای ترافیک را بر اساس تعاملات میکروسکوپی بین وسایل نقلیه فردی در شبکه دقیق خیابان محاسبه می‌کند. به‌عنوان نمونه می‌توان به پروژه مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک سناریوی تخلیه اضطراری که برای منطقه شهری شیکاگو انجام شده است اشاره نمود. این پروژه به منظور بررسی اثرات یک رویداد بدون اطلاع بر روی سیستم حمل‌ونقل منطقه‌ای چندوجهی و مقابله با تأثیر پویا بر سیستم حمل‌ونقل بود. مسیر ترافیک در ترنسیمز برای رفع ازدحام، تغییر مسیر ترافیک یا اجازه دسترسی به وسایل نقلیه اضطراری تغییر داده شد. اول، سفرهایی که پس از رویداد از منطقه تخلیه شروع می‌شوند، در زمان به جلو کشیده شدند و زمان حرکت جدیدی به آنها اختصاص داده شد. سپس توزیع ویژه (منحنی پاسخ تخلیه) از زمان شروع سفر اعمال شد (Lee, Eom and Moon, 2014). لی و هوبیکا (Lee and Hobeika, 2007) با استفاده از ترنسیمز یک خط پویا با عوارض بر خطوط پر سرنشین را تحلیل کردند و همزمان ناهمگونی کاربر را برای برآورد پاسخ مسافران به عوارض در نظر گرفتند. روش معمول بیان تقاضا به‌وسیله ماتریس‌های مبدأ - مقصد است. در حالت کلی ماتریس مبدأ - مقصد ممکن است به طریق یکی از ۳ روش زیر برآورد شود (Xiong et al., 2020).

- برآورد مستقیم نمونه

- مدل‌های برآورد تقاضا

- مدل‌های برآورد ماتریس مبدأ - مقصد با استفاده از اطلاعات حجم کمان‌های شبکه

روش‌های مستقیم سعی در دنبال کردن مسافر با وسیله نقلیه از مبدأ به مقصد را دارند، در این روش‌ها سعی می‌شود از طریق پرسشگری، با مشاهدات نمونه‌ای از سفرها توسط آمارگیران، و تعمیم این اطلاعات به کل جمعیت، به برآوردی از تعداد سفرهای مبدأ - مقصد دست پیدا کرد. از این نوع روش‌ها تنها

(Willumsen, L.G. 2011). مسئله تخصیص ترافیک تعادلی بر پایه قانون UE استوار است. فرمول‌بندی ریاضی این مسئله بر اساس این قانون به ۲ دسته مدل‌های قطعی و تصادفی تقسیم می‌شوند. در مدل قطعی تخصیص ترافیک تعادلی اطلاعات رانندگان از مسیرها کامل و یکسان است، ولی مدل تصادفی به گونه‌ای است که این اطلاعات ناقص و متفاوت هستند. به‌علاوه، اگر نرخ تقاضای سفر متغیر نسبت به زمان باشد مدل دینامیکی و اگر این نرخ ثابت باشد مدل استاتیکی نامیده می‌شود. مدل‌های تخصیص ترافیک تعادلی از نوع استاتیکی و قطعی، از کاربردی‌ترین مدل‌های تخصیص ترافیک به‌ویژه در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت هستند.

رضیات این مدل به شرح زیر است.

- الگوی جریان در شبکه در بازه زمانی موردنظر ثابت است،  
- تمام رانندگان اطلاع دقیقی از همه مسیرهای موجود و زمان سفرهای آنها دارند،  
- هر راننده از یک مسیر دارای کمترین زمان سفر بین زوج مبدأ-مقصد خود استفاده می‌کند که به معنی برقراری تعادل استفاده‌کننده است.

از جمله مهم‌ترین فرض‌های مدل تخصیص ایستا ثابت بودن میزان تقاضا در طول بازه زمانی تخصیص بوده و خروجی آن‌ها به زمان بستگی ندارند (Chiu et al., 2010). مدل‌های تخصیص نیز مانند سایر مدل‌ها، تغییرات زیادی در طول زمان داشته‌اند. نسل دوم این مدل‌ها که تحت عنوان تخصیص پویا بیان شد، به‌منظور نمایش دقیق‌تر عوامل و مسائلی مانند رفتار رانندگان، نحوه انتخاب مسیر، نحوه انتشار ترافیک (ایجاد و از بین رفتن صف) و زمان سفر به وجود آمده‌اند. این مدل‌ها این عوامل را در طول ساعت اوج یا ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت متغیر در نظر می‌گیرند. از کاربردهای مهم مدل‌های پویا انتقال اطلاعات مدل‌ها از سطح کلان به سطح خرد است و واسطی بین مدل‌سازی حمل‌ونقلی و مدل‌سازی ترافیکی محسوب می‌شود (He et al., 2022). مدل‌های شبیه‌سازی حمل‌ونقلی بر اساس سطح عملکرد و میزان جزئیات به ۳ دسته کلان، میانی و خرد تقسیم‌بندی می‌شوند. سطح مورد بررسی و جزئیات مورد انتظار هر مطالعه، معیار انتخاب مدل شبیه‌ساز است. هر یک از سطح‌ها دارای ویژگی‌ها و کاربردهای به خصوصی هستند و در هر سطح نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متعددی توسعه یافته است که در جدول ۱ به‌صورت خلاصه بیانی از ویژگی‌های تخصیص ترافیک پویا در بسته‌های نرم‌افزاری مختلف حمل‌ونقل بیان شده است.

تاریخی همان ماتریس‌های آماربرداری یا مدل‌های تقاضای سفر خواهند بود. در این روش دقت آن‌ها وابستگی به مدل مورد استفاده و داده‌های ورودی جهت انجام مدل‌سازی دارد. در این مدل‌سازی ممکن است از اصول بهینه‌سازی مختلف (مثل بی‌نظمی بیشینه، حداقل مربعات و درست‌نمایی بیشینه)، محدودیت‌های جریان گوناگون (مثل: تعادل استفاده کننده، تخصیص تناسبی) و ورودی‌های متفاوت (مثل: تولید و جذب سفر، حجم ترافیک شمارش شده، زمان سفر و یا ماتریس سفر تاریخی) استفاده شود (Mahpour and Rezaei-Arjarodi, 2022). تمرکز این پژوهش بر روش برآورد تقاضا با استفاده از ترکیب اطلاعات ماتریس‌های تولید و جذب سفر و شمارش حجم کمان‌ها است. به‌طور کلی روش‌های تخمین ماتریس تقاضای مبدأ - مقصد به وسیله شمارش حجم کمان‌ها را می‌توان به ۳ دسته تقسیم‌بندی کرد.

- روش‌های مبتنی بر مفاهیم مدل‌کردن ترافیک (روش‌های تحلیلی)

- روش‌های مبتنی بر مفاهیم استنتاج آماری

- روش‌های حل مبتنی بر گرادیان

روش‌های مبتنی بر مفاهیم مدل‌کردن ترافیک، شامل مدل‌های حداکثر آنتروپی حداقل اطلاعات و مدل‌های ترکیبی تخصیص توزیع هستند. تخمین ماتریس تقاضای مبدأ و مقصد با حل مستقیم (مقدار آنتروپی) و یا با تخمین پارامترهای مدل ترکیبی انجام می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر مفاهیم استنتاج آماری است که از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل حداکثر درست‌نمایی، روش عمومی حداقل مربعات و روش‌های استنتاج بیزین اشاره نمود. در این روش‌ها فرض بر این است که مقادیر حجم جریان کمان‌های شمارش شده و همچنین ماتریس تقاضای سفر هدف توسط توزیع احتمالی تولید می‌شوند و در نتیجه ماتریس تقاضای سفر با تخمین پارامترهای توزیع احتمالی تعیین می‌گردد. در اکثر روش‌های مدل‌کردن ترافیک، یک ماتریس تقاضای سفر قدیمی را به‌عنوان یک ماتریس اولیه در نظر گرفته و به کمک آن ماتریس تقاضای سفر را برای زمان حال تخمین می‌زنند. در روش‌های مبتنی بر توزیع احتمالی، غالباً ماتریس‌های تقاضای سفری را که با استفاده از جمع‌آوری اطلاعات سفرهای مبدأ و مقصد به‌دست‌آمده و نیازمند اصلاح است، تصحیح می‌کنند.

دسته سوم، روش‌های مبتنی بر گرادیان هستند که در این روش ماتریس تقاضای مبدأ و مقصد اولیه به‌صورت یک جواب اولیه برای مسئله برآورد ماتریس تقاضای مبدأ مقصد در نظر

جهت دستیابی به اطلاعات پایه برای تقاضا استفاده می‌شود که معمولاً هرچند دهه (۱۰ الی ۲۰ سال) یک‌بار انجام می‌شود (Rad et al., 2019). روش دوم برآورد ماتریس تقاضا موسوم به مدل‌های تقاضا است. در این روش‌ها ماتریس تقاضا با به‌کارگیری سیستمی از مدل‌های سفرهای انجام شده توسط شیوه خاصی از وسائل حمل‌ونقل، در یک بازه زمانی مشخص برآورد می‌شود. در این روش معمولاً مدل‌های تقاضا برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های جغرافیایی، اجتماعی - اقتصادی و سیستم عرضه شبکه معلوم و ماتریس مبدأ - مقصد مجهول فرض می‌شوند. پارامترهای این مدل‌ها ممکن است بر اساس پیمایش‌های پیشین صورت‌گرفته در همان ناحیه با مدل‌های موجود در شرایط مشابه پرداخت شوند. عدم وجود اطلاعات پایه از سفرهای مبدأ - مقصد برای پرداخت مدل‌ها، مطلوب نبودن مدل‌های محل‌های جغرافیایی دیگر، یا نبود مدل‌های قبلی برای همان مناطق، باعث شده که گرایش به سمت استفاده از مدل‌های دسته سوم که به برآورد ماتریس تقاضا بر اساس اطلاعات ترافیکی می‌پردازند بیشتر شود (Ballis and Dimitriou, 2020). در روش برآورد ماتریس تقاضا که به برآورد این ماتریس با استفاده از اطلاعات حجم کمان‌های شبکه می‌پردازد، واقعیت‌های عملی نظیر محدودیت فراهم‌بودن اطلاعات و راحتی نسبی دسترسی به حجم کمان‌های شمارش شده نسبت به استخراج مستقیم این اطلاعات است. علاوه بر این، با افزایش به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل در سال‌های اخیر، اطلاعات جریان ترافیک در شبکه‌ها به‌صورت پیوسته و بدون هزینه اضافی گردآوری می‌گردد که این امر با تأمین داده‌های موردنیاز، برآورد ماتریس سفر با کمترین هزینه و در کمترین فاصله زمانی را ممکن می‌سازد. به‌منظور بازسازی دقیق داده‌ها و نزدیکی بیشتر آنها به واقعیت، پژوهشگران همواره به دنبال این هستند تا از روش‌ها و ابزارهای محاسباتی و مدل‌سازی دقیق‌تری در تحقیقات خود استفاده کنند. همان‌گونه که اشاره شد برای حل مسئله برآورد ماتریس تقاضا از روش‌های مستقیم با به‌کارگیری آمارگیری مبدأ - مقصد یا مدل‌های تقاضای سفر (نظیر مدل برنامه‌ریزی چهارمرحله‌ای) به‌دست‌آمده و یا از روش غیرمستقیم با استفاده از حجم ترافیک کمان‌های شبکه حمل‌ونقل و به کمک مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به اصلاح و به‌روزرسانی یک ماتریس مبدأ - مقصد قدیمی می‌پردازد (Rostami Nasab and Shafahi, 2020). که در این روش به طور معمول، ماتریس هدف یا همان ماتریس تقاضای

شلوغ باشد، زمان سفر کمان‌ها به نسبت‌های انتخاب مسیر و در نتیجه نسبت‌های تخصیص به حجم جریان کمان‌ها وابسته است. در شبکه‌های واقعی، زمان سفر و حجم عموماً همان‌طور که می‌دانیم برای تمام کمان‌های شبکه موجود نیستند و اطلاعات مشاهده تنها برای برخی از کمان‌ها گردآوری می‌شوند و لذا برای تعیین نمودن آن‌ها باید از یک مدل تخصیص که به این عوامل وابسته باشد، استفاده نمود. وابستگی متقابلی که بین ماتریس مبدأ - مقصد و تخصیص ترافیک شبکه‌های شلوغ وجود دارد، توسط پژوهشگران متعددی بررسی شده است. در این مطالعات اولین مدل توسط نگوین ارائه شده است و در ادامه با ایده دستیابی به ماتریس‌های یکتا، توسط جورنستن و نگوین و گور و همکاران توسعه یافته است. فیسک با یک مدل ترکیبی نشان داد که چگونه فرایند برآورد ماتریس سفر به روش بی‌نظمی پیشنهاد شده توسط ونزوین و ویلامسون می‌تواند با یک مدل تخصیص بهینه کاربر ترکیب شده و یک مدل ریاضی واحد را در اختیار بگذارد، که به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی مشابه روش برآورد ماتریس پیشنهادی توسط نگوین (Nguyen, 1984) تأثیر تراکم ترافیک را در برآورد ماتریس تقاضای سفر منظور کند. مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی معمولاً به دشواری حل می‌شوند، زیرا ارزیابی تابع هدف سطح بالاتر نیازمند حل مسئله بهینه‌یابی سطح پایین‌تر است. علاوه بر این، مسئله سطح پایین‌تر یک مسئله محدودیت‌دار غیرخطی است. در این دسته، مسائل سطح بالایی، مربوط به مسئله برآورد ماتریس سفر و سطح پایینی بیانگر مسئله تخصیص تعادلی شبکه است. الگوریتم ژنتیک که یک روش جست و جوی جهانی احتمالی است نیز می‌تواند برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی مورد استفاده قرار گیرد (Kim, Baek and Lim, 2001) روش‌های حل متنوعی برای حل مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاد شده است. فیسک مدل بی‌نظمی پیشنهادی را با شرایط تعادلی ترکیب نمود و از فرمول بندی نامعادلات تغییراتی برای حل آن استفاده نمود. الگوریتم‌های تکراری ابتکاری دیگری نیز توسط پژوهشگران متعددی برای حل این مسئله برآورد دوسطحی به کار گرفته شده است.

گرفته می‌شود و بر اساس گرادیان تابع هدف و محاسبات تکرارشونده، ماتریس تقاضای سفر اولیه با بازتولید حجم ترافیک کمان‌های شمارش شده، اصلاح می‌گردد (Xiong et al., 2020). برآورد تقاضا در شرایط شبکه خلوت فرض بر این است که زمان سفر کمان‌ها و مسیر با استفاده از مدل شبکه و مستقل از حجم ترافیک روی کمان قابل محاسبه است و بنابراین می‌توان بنا به اطلاعات زمان سفر آزاد، ابتدا سهم هر مسیر از میزان تقاضای مبدأ مقصد مختلف را محاسبه کرده و سپس عناصر ماتریس تخصیص قابل محاسبه خواهد بود. در این بخش روش‌های ارائه شده برای برآورد تقاضای مبدأ - مقصد استاتیکی روی شبکه خلوت شامل روش کمیته‌سازی اطلاعات، بی‌نظمی پیشینه، درست‌نمایی پیشینه، کمیته مربعات تعمیم‌یافته و روش استنتاجی بیزین است. روش‌های برآورد اولیه بر اساس مدل جاذبه بودند. مدل جاذبه مسئله برآورد تقاضای مبدأ - مقصد را به مسئله پرداخت تعداد کمی از پارامترهای مجهول تقلیل می‌دهد، ونزوین و ویلامسون در سال ۱۹۸۰ با گسترش مدل جاذبه، آن را به تکنیک بی‌نظمی پیشینه تبدیل نمودند. ماهر برآوردکننده بیزین ماتریس تقاضای مبدأ - مقصد را ارائه نمود که در آن برای توزیع جریان مشاهده شده و ماتریس تقاضای تاریخی توزیع نرمال چند متغیره فرض شده است (Zuylenand and Willumsen, 1980). کاستا برآوردکننده کمیته مربعات تعمیم یافته را به منظور ترکیب اطلاعات مختلف به کار گرفت. در این روش به طور صریح وجود خطای اندازه‌گیری و تغییرپذیری زمانی در جریان مشاهده شده لحاظ شده است. کاستا و نگوین (Cascetta and Nguyen, 1988) ادعا کردند که در صورت فرض توزیع نرمال چند متغیره برای تقاضای برآورده شده و حجم ترافیک کمان‌ها، برآوردکننده کمیته مربعات تعمیم یافته و درست‌نمایی پیشینه بر یکدیگر منطبق خواهند بود. امکان ارائه برآوردهای منفی برای برخی اعضای ماتریس سفر، یکی از مشکلات این روش است. بل شرط نامنفی بودن را برای حل این مشکل به این روش اضافه نمود (Mahpour and Rezaei-Arjarodi, 2022). زمانی که شبکه

(۳)

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} [f_1(x, x^H) + f_2(A(\hat{x})x, \tilde{y})]; x > 0$$

تعادلی احتمالی و به صورت یک مسئله نقطه ثابت مدل کردند. که در آن  $x^H$  و  $\tilde{x}$  به ترتیب تقاضای تاریخی و تقاضای برآورد شده می‌باشد.  $\tilde{Y}$  بردار شمارش حجم کمان‌ها،  $A$  ماتریس تخصیص و  $f_1$  و  $f_2$  توابع سنجش و اندازه گیری خطا هستند. برای حل مسئله برآورد تقاضای مبدا - مقصد نقطه ثابت، رویکردهای تکراری بر اساس روش میانگین‌های متوالی به کار گرفته شده است. در هر تکرار، برآورد کننده ترتیبی بر پایه کمینه مربعات تعمیم یافته برای ایجاد تقاضای به روز شده استفاده شده است. با گسترش مفاهیم و روش‌های حل مسئله تخمین ماتریس مبدا و مقصد استاتیک، برآوردگر حداقل مربعات توسعه یافته برای تخمین ماتریس مبدا مقصد پویا در یک شبکه عمومی توسط کاستا و همکارانش (Cascetta, Inaudi and Marquis, 1993) پیشنهاد شد. در مطالعه آن‌ها از یک مدل تخصیص ساده استفاده شده است یعنی مسئله انتخاب مسیر، ابتدا با استفاده از یک مدل محاسبه می‌شود و سپس جریان‌های مسیر حاصل شده بر اساس زمان سفر کمان به جریان‌های کمان اضافه می‌شوند. تاوانا (Tavana, 2001) در حالی که به دنبال حفظ انسجام داخلی بین مسئله تخمین تقاضا در سطح بالا و تخصیص ترافیک در سطح پایین بود. یک مدل بهینه‌سازی GLS دوسطحی و یک چهارچوب حل تکرار شونده برای تخمین پویای ماتریس OD ارائه داد. در همین راستا، روش تخمین پویای ماتریس برای استفاده از مشاهدات ترافیکی چند روزه و داده‌های شناسایی خودرو وسیله نقلیه گسترش داده شد. با استقرار سیستم‌های CAV، داده‌های کاوشگر خودرو جمع‌آوری شده توسط حسگرهای ترافیک داخل خودرو، مانند داده‌های گوشی هوشمند و سیستم ناوبری، برای ردیابی مسیرهای خودرو و ارائه اطلاعات در مورد جفت‌های O-D خاص در دسترس هستند. بهارا (Behara, 2019) همچنین با استفاده از داده‌های حلقه‌های القایی و تجهیزات AVI در شبکه، به مشکل تخمین پویای ماتریس OD پرداخت. علاوه بر این، تعداد قابل توجهی از مطالعات از روش فیلتر کالمن برای تخمین O-D های پویا استفاده کردند. اندرسون و همکاران در روند حل مسئله دوسطحی برآورد ماتریس تقاضا برای غلبه بر مشکل تخصیص دینامیک، از یک مدل مزدسکوپی پیاده سازی شده توسط شبیه ساز ترافیک SUMO استفاده نمودند و برای تخمین ماتریس از روش‌های گرادیان و الگوریتم های یادگیری ماشین استفاده نمودند. نکته جالب مد نظر آن‌ها این بود در هر تکرار از روند

اسپایس (Spiess, 1990) مسئله برآورد دوسطحی زیر را همراه با یک رویکرد ابتکاری بر اساس روش گرادیان برای حل آن پیشنهاد داد.

(۴ و ۵)

$$\text{Min } Z(x) = \frac{1}{2} \sum_{l \in L} (y_l - \tilde{y}_l)$$

$$S.T. y = \text{assign}(x)$$

که در این رابطه تابع  $\text{assign}(x)$  برای نگاشت ماتریس تقاضای مبدا - مقصد  $x$  به جریان ترافیک کمان‌ها  $y$  استفاده شده است.  $L$  مجموعه کمان‌های شبکه و  $\tilde{y}_l$  بردار جریان ترافیک مشاهده شده و  $I$  نیز نشان کمان است. بعدها کاستا و پوستورینو (Cascetta and Postorino, 2001)، ماهر (Maher, 1983) و یانگ و همکاران مدل‌هایی را ارائه کردند که با مدل‌های پیشین مبتنی بر فرض تعادل کاربر متفاوت بودند. برای تخمین ماتریس O-D وابسته به زمان ماهر از اصل استنتاج بیزی برای تخمین ماتریس‌های O-D با استفاده از تخمین O-D قبلی و شمارش ترافیک متغیر با زمان استفاده کرد. یانگ و همکاران روشی ابتکاری پیشنهاد دادند که مسئله حداقل مربعات تعمیم یافته / حداقل بی‌نظمی را با یک مدل تخصیص تعادلی ترافیک در قالب یک مسئله بهینه‌سازی را حل می‌کرد. یانگ این مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی را با اضافه کردن تأثیر اندرکنش جریان کمان‌ها بسط داده و مدلی با الگوریتم ابتکاری اصلاح شده ارائه کرد (Yang, Meng and Bell, 2001) کیم و همکاران (Kim, Baek and Lim, 2001) در مدل ارائه شده توسط یانگ و همکارانش کنکاش بیشتری انجام دادند و مدل جایگزینی را ارائه کردند که در سطح بالایی خود به کمک یک روش حل ترکیبی توسط الگوریتم ژنتیک به حل مسئله می‌پرداخت. اما اثبات ریاضی بهینه بودن روش حل آنها مورد مطالعه قرار نگرفت. بعدتر یک مفهوم پیوستگی در تابع هزینه مسیر، توسط گارسیا و همکاران در سال ۲۰۰۸ ارائه و فرمول بندی و بر روی یک شبکه کوچک پیاده‌سازی شد. (Garcia-Rodenas, R. and Verastegui-Rayo, D, 2008). لاندگرن و پترسون (Lundgren and Peterson, 2008) مسئله ابتکاری دوسطحی را ارتقا دادند و با یک الگوریتم نزولی آن را حل کردند. آنها الگوریتم خود را بر روی یک شبکه بزرگ برای شهر استکهلم با ۹۶۴ کمان و ۱۹۶۲ زوج مبدا - مقصد آزمایش کردند. کاستا و پوستورینو مسئله برآورد ماتریس تقاضا را به کمک تخصیص

نگرفته‌اند. در واقع وسیله نقلیه که در زمان  $t$  با ماتریس دینامیک زمان  $t$  وارد شبکه می‌شود تا رسیدن به مقصد درون شبکه هستند و صرفاً تعادل کاربر نمودن ماتریس‌ها از این نکته غافل هستند که تعدادی از وسایل نقلیه در زمانی در آینده به مقصد می‌رسند و در طول این مدت در بازه زمانی  $t+1$  و بازه‌های آینده در شبکه مشاهده می‌شوند و ماتریس‌های آینده تحت تأثیر ماتریس  $t$  نیز هستند. برای در نظر گرفتن این وابستگی در این مطالعه به طور خاص، یک بسته مبتنی بر شبیه‌سازی که نرم‌افزار QueensOD و INTEGRATION را یکپارچه می‌کند، برای تخمین ماتریس O-D پویا توسعه داده شده است. ابتدا، ماتریس‌های O-D استاتیک وابسته به زمان با استفاده از تخمین گر حداکثر احتمال QueensOD O-D برآورد می‌شوند. در مرحله بعد، این ماتریس‌های استاتیک به‌عنوان یک راه‌حل اولیه برای تخمین تقاضای پویای O-D با مدل‌سازی حرکت دقیق وسایل نقلیه با استفاده از انتساب میکروسکوپی ترافیک و نرم‌افزار شبیه‌سازی INTEGRATION اعمال می‌شوند که مطالعات نشان می‌دهد اعمال تأخیر زمان‌های مدنظر برای ماتریس‌های پویا کاهش قابل توجهی در خطای جریان پیوند در مقایسه با انتساب ماتریس‌های O-D استاتیک با زمان متغیر ایجاد می‌کند. نکته‌ای که آن‌ها در فرایند تخصیص ماتریس‌های دینامیک به آن اشاره نمودند این است که با افزایش فرکانس به‌روزرسانی، ماتریس دینامیک O-D در مقایسه با ماتریس‌های استاتیک به تقاضای O-D واقعی نزدیک‌تر می‌شود. (Yang and Rakha, 2019)

بهینه‌سازی، منابع محاسباتی گسترده‌ای صرف انجام DTA می‌شود و هر DTA اطلاعات ارزشمندی تولید می‌کند. این اطلاعات معمولاً دور ریخته می‌شوند و در کارهای بهینه‌سازی بعدی استفاده نمی‌شوند، بنابراین آن‌ها از رویکرد یادگیری ماشین (ML) استفاده نمودند تا امکان استفاده از داده‌های تولید شده توسط بسیاری از DTA‌ها را فراهم کند بدین وسیله رویکردی را برای دور زدن محاسبات پرهزینه و زمان‌بر انجام شده در حل مسئله بهینه‌سازی داخلی با یادگیری مدلی برای رابطه ورودی-خروجی که برای حل این مشکل درونی ایجاد شده است، ارائه نمودند. اما با مقایسه در یک شبکه مصنوعی پی بردند که روش‌های گردادیان از نظر کیفیت راه حل و الزامات محاسبات مدل عملکرد بسیار بهتری داشتند و رویکرد ML در حال حاضر مطلوبیت چندانی برای حذف زمان و منابع پردازش مرحله تخصیص نداشته اما همچنان مطالعات در این زمینه ادامه خواهد داشت (Andersen, Chiarandini and Debrabant, 2022). یانگ و همکاران (Yang and Rakha, 2019) برای دستیابی به ماتریس‌های تقاضای دینامیک نیز الگوریتم جدیدی را توسعه دادند که ماتریس O-D پویا را با محاسبه ماتریس‌های O-D استاتیک برای هر برش زمانی و سپس تنظیم این ماتریس‌ها برای محاسبه وابستگی زمانی در برش‌های زمانی مختلف، تخمین می‌زند. آن‌ها اشاره نمودند از مشکلات رایج در اکثر روش‌های تخمین O-D کنونی این است که تقریباً همه روش‌ها از جریان‌های پیوند متوسط برای محاسبه تقاضا برای هر جفت O-D در هر بازه زمانی استفاده می‌کنند و تأخیر زمانی که وسیله نقلیه درون شبکه در حال حرکت تجربه می‌کند را در نظر

### ۳- روش پژوهش

تقاضای سفر را می‌توان به روش‌های مختلف مدل‌سازی کرد، اما معمولاً با استفاده از ماتریس‌های پویا مبدأ - مقصد (OD) مدل‌سازی می‌شود. این ماتریس‌ها الگوی تقاضای کل در حال تغییر در طول زمان (دینامیک) را در مجموعه‌ای از بازه‌های زمانی یک دوره تحلیل بسیار بزرگ‌تر توصیف می‌کنند. به دلیل سادگی و مختصر بودن، این ماتریس‌های OD پویا معمولاً ورودی موردنیاز بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری شبیه‌سازی ترافیک هستند. به همین دلیل، مشکل تلاش برای تخمین ماتریس‌های OD پویا در سال‌های اخیر توجه زیادی را از سوی محققان به خود جلب کرده است.

#### رویکرد دوسطحی

فرایند بهینه‌سازی دوسطحی به دنبال دستیابی به یک ماتریس تخمین مبدأ و مقصد وابسته به زمان با استفاده از ماتریس مبدأ و مقصد استاتیک و مشاهدات حجم‌های ترافیکی در مسیرهای مشخص است. این فرایند در تهاتر بین دو فرایند تخصیص ترافیک و برآوردگر ماتریس تقاضا (که در اینجا به‌صورت تخمین ضرایب توزیع زمانی است) به‌صورت شکل ۱ به دست می‌آید. فرایند بهینه‌سازی دوسطحی در اینجا بدین صورت است که مسئله سطح بالا در اینجا یک تخمین گر بر اساس مدل‌های ترکیبی محدود تحت عنوان مدل‌های ترکیبی گوسی است که

برای ادغام تقاضای مبتنی بر سفر استاتیک با یک مدل DTA، اعمال پروفایل توزیع زمان برای تقاضای OD استاتیک است. این رویکرد می‌تواند تغییرات تقاضای عمومی، به‌ویژه پدیده انتشار پیک مشاهده‌شده را در یک روز بازتولید کند، اگرچه تفاوت‌های فضایی بین جفت‌های مختلف OD را در نظر نمی‌گیرد. مسافرانی که زمان سفر طولانی‌تری دارند، اغلب مبدأ خود را زودتر از مسافرانی که زمان سفر کوتاه‌تری دارند، ترک می‌کنند. برای غلبه بر این محدودیت، زمان خروج معمولاً به‌عنوان یک متغیر درون‌زا یا برون‌زا در مدل‌های DTA در نظر گرفته می‌شود. با این حال، این چارچوب فرض می‌کند که تقاضای OD دقیق است و هدف آن به‌دست‌آوردن یک پروفایل زمانی است. در این قسمت ابتدا به روند و رویکردهای عمومی پرداخت ماتریس‌های تقاضا و توضیح مختصر لزوم و روند اولیه اشاره شد. در روش تحقیق پژوهش حاضر با به‌کارگیری رویکرد دوسطحی به‌صورت فلوجارت شکل ۲ بیان شده در بالا عمل شده است؛ اما همان‌طور که پیش‌تر به نوآوری و اهمیت پژوهش اشاره شد روند تعیین ضرایب برای کل بازه مطالعات با حداقل گام زمانی ممکن ۱۵ دقیقه انجام شده است و همچنین از رویکرد شبیه‌سازی دینامیک استفاده شده است که تاخیرهای زمانی و وسایل نقلیه در شبکه که در مطالعات توسط یانگ و همکاران (Yang and Rakha, 2019) بیان شده بود، در نظر گرفته شود که بدین منظور با بررسی نرم‌افزارهای این زمینه در فصل دوم، نرم‌افزار ترنسیمز انتخاب شد و به منظور بهینه‌سازی ضرایب نیز از الگوریتم فراابتکاری TLBO که در پایتون پیاده‌سازی شده است، استفاده شد.

به‌وسیله یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه یادگیری و آموزش بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا در بازه‌های زمانی، ماتریس تقاضا را به‌وسیله ضرایب توزیع روزانه تخمین می‌زند. این روند کلی تخمین توزیع زمانی ماتریس پویا تقاضا در شکل ۱ نشان داده شده است. مسئله سطح پایین برای بررسی خطای خروجی حجم معابر در مقایسه با حجم مشاهده شده، می‌باشد که این گام می‌تواند بر مبنای تخصیص باشد که پیش‌تر به اهمیت و دقت تخمین بر مبنای تخصیص اشاره شد و به‌منظور رفع نواقص مدل‌های تخصیص تحلیلی، مدل‌های شبیه‌سازی برهم‌کنش وسایل نقلیه در شبکه را بسیار بهتر لحاظ کرده و به شرایط واقع نزدیک‌تر است و به‌منظور مدیریت برنامه‌ریزی شبکه معابر اطلاعات مفیدی را در اختیار برنامه‌ریز قرار می‌دهد. با توجه به مختصر توضیح بیان شده در این گام بدین منظور از نرم‌افزار ترنسیمز به‌منظور شبیه‌سازی خرد شبکه معابر استفاده شده است. این روند بر مبنای کاهش ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در جریان‌های مشاهده شده انجام می‌شود که رابطه آن را در بخش قبل مشاهده می‌نمایید. برآورد تقاضای TDOD یک جزء حیاتی در کالیبراسیون DTA است که در آن خروجی‌ها مجموعه‌ای از ماتریس‌های تقاضای TDOD هستند که حاوی اطلاعاتی در مورد جریان‌های OD در طول زمان هستند. به دلیل فقدان داده‌های گسترده استفاده از زمان، اکثر برنامه‌های کاربردی DTA موجود برای شبکه‌های مقیاس بزرگ هنوز از مدل‌های مبتنی بر سفر استفاده می‌کنند که تأثیر تغییرات زمان را در نظر نمی‌گیرند. از این رو، خروجی‌های مدل‌های مبتنی بر سفر با الزامات مدل‌های DTA ناسازگار است. یک رویکرد کلاسیک

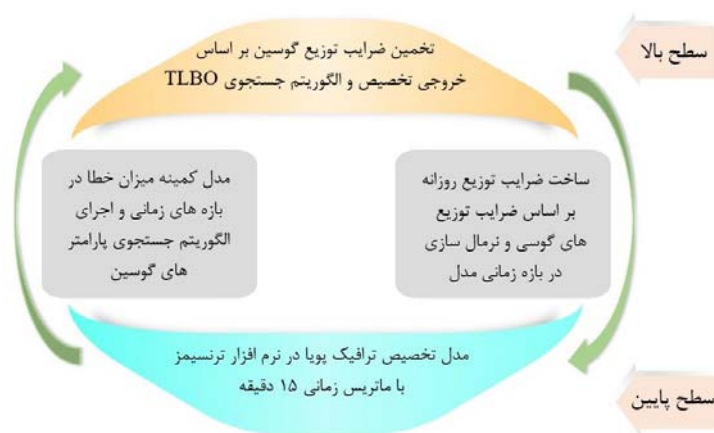


شکل ۱. عملکرد متقابل برآوردگر ضرایب توزیع ماتریس تقاضا و مدل تخصیص ترافیک

$$RMSE = \frac{(\sum_j (Model_j - Count_j)^2 / (Number\ of\ Counts - 1))^{0.5}}{(\sum_j Count_j / Number\ of\ Counts)} * 100 \quad (6)$$

می‌سازند. در آمار، یک مدل مخلوط (ترکیبی)، یک مدل احتمالی برای نشان دادن حضور زیرجمعیت‌ها در یک جمعیت کلی است، بدون اینکه نیاز باشد در کل مجموعه داده‌های مشاهده‌شده، زیرجمعیتی را که یک مشاهده فردی به آن تعلق دارد، شناسایی کند. یک مدل مخلوط مربوط به توزیع مخلوط است که نشان‌دهنده توزیع احتمال مشاهدات در کل جمعیت است که در آن توزیع احتمال کل جمعیت به ۱ نرمال شده است. یک مدل مخلوط گاوسی یک مدل احتمالی است که فرض می‌کند تمام نقاط داده از مخلوطی از تعداد محدودی از توزیع‌های گاوسی با پارامترهای ناشناخته تولید می‌شوند. روابط مدل‌های ترکیبی گاوسی به صورت زیر است.

هدف در مدل‌های ترکیبی گاوسی، یافتن زیرتوزیعات اساسی در مجموعه داده است. در مطالعه مورد نظر به دلیل غیرخطی بودن توزیع و همچنین لزوم پیوسته بودن ضرایب توزیع ماتریس‌های دینامیک مدنظر در این پژوهش که همچنین به نوعی در ساعات پیک می‌توانند توزیع‌هایی نرمال داشته باشند، باعث شده است که این مدل‌ها گزینه خوبی برای تولید توزیع‌های نرمال شده غیرخطی در این فرایند باشند. پس در اینجا ایده این پژوهش در وهله اول در مرحله ساخت این توزیع این است که از چندین تابع گاوسی به عنوان بخشی از مخلوط استفاده شود که هر گاوسی میانگین و واریانس خاص خود را دارد و با تنظیم ضرایب وزنی  $W$  مناسب، ترکیبی از آن‌ها توزیع نهایی را



شکل ۲. روند کلی تخمین توزیع زمانی ماتریس دینامیک تقاضا

$$p(x) = \sum_{i=1}^m W_i \mathcal{N}(x; \mu_i, \sigma_i^2) = \sum_{i=1}^m W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (7)$$

st

$$\sum_{i=1}^m W_i = 1 \quad (8)$$

$$0 \leq W_i \leq 1 \quad (9)$$

$$P = \{\mu_i, \sigma_i, W_i\}_{i=1}^m \quad (10)$$

$W_i$ : ضریب وزنی تابع گاوسی  $i$ ام

$m$ : تعداد توزیع‌های گاوسی تک‌متغیره

$P$ : بردار مقادیر وزن و انحراف معیار و میانگین به‌ازای

$\mu_i$ : میانگین تابع گاوسی  $i$ ام

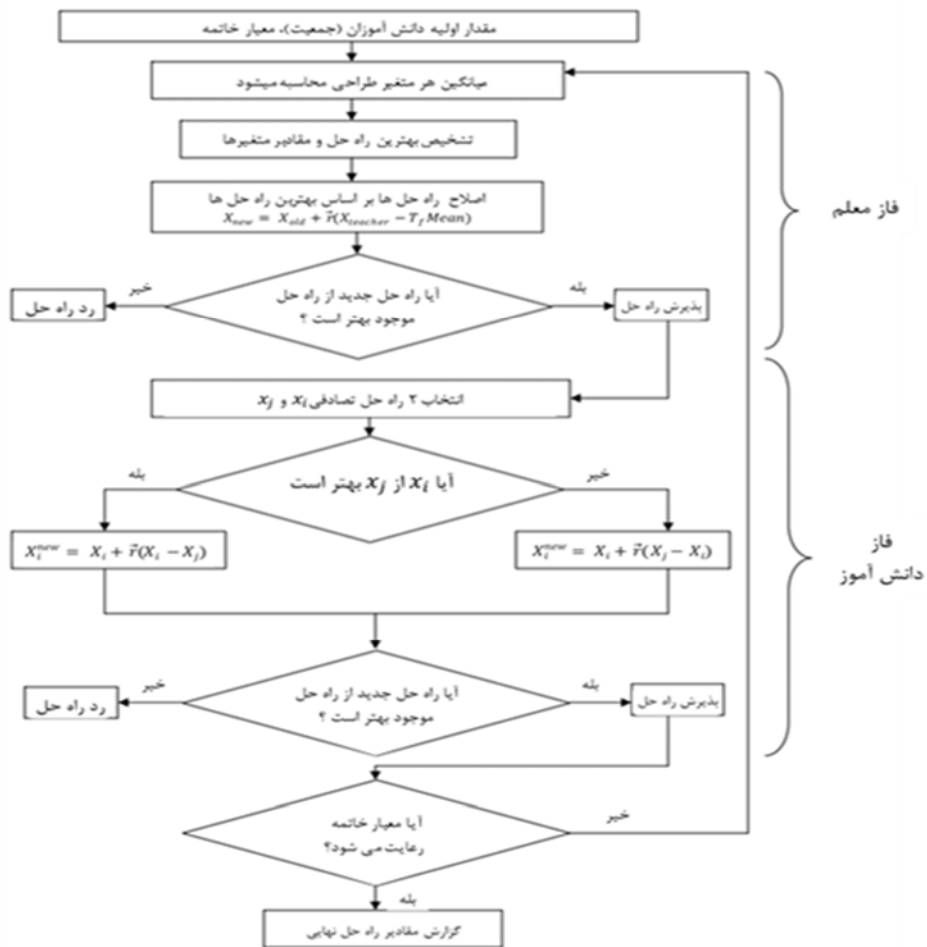
توزیع گاوسی  $i$

$\sigma_i$ : انحراف معیار تابع گاوسی  $i$ ام

### الگوریتم یادگیری و آموزش TLBO

جمعیت، معلم است. متغیرهای طراحی در واقع پارامترهای دخیل در تابع هدف مسئله بهینه‌سازی داده شده هستند و بهترین راه‌حل، بهترین مقدار تابع هدف است. این الگوریتم دارای دو مرحله است که در مرحله اول که فاز آموزش یا مرحله معلم می‌باشد، معلم سعی می‌کند تا میانگین کلاس را به سطح خود برساند و سطح دانش‌آموزان در این مرحله به سمت معلم تغییر می‌نمایند. در این الگوریتم معلم از بین دانش‌آموزان انتخاب می‌شود، یعنی کسی که اطلاعاتش از بقیه بیشتر باشد و بهتر باشند به‌عنوان معلم انتخاب خواهد شد. در مرحله دوم که فاز یادگیری یا مرحله دانش‌آموز است و دانش‌آموزان می‌توانند از یکدیگر نیز آموزش ببینند و بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند و این تعامل باعث می‌شود که سطوح دانش‌آموزان ارتقا پیدا کند. روند کلی بیان شد و لذا در ادامه برای درک بهتر از روند در شکل ۳ یک فلوجارت از روند ارائه شده است.

الگوریتم TLBO یک الگوریتم الهام گرفته از فرایند آموزش - یادگیری است که توسط راتو و همکارانش در سال ۲۰۱۱ پیشنهاد شده و براساس تأثیر معلم بر خروجی فراگیران در یک کلاس عمل می‌کند. الگوریتم دو حالت اساسی یادگیری را توصیف می‌کند. (Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. P., 2011) حالت اول یادگیری افراد از طریق معلم (معروف به مرحله معلم) و حالت دوم یادگیری از طریق تعامل با سایر دانش‌آموزان (معروف به مرحله یادگیرنده) است. در این الگوریتم بهینه‌سازی، گروهی از فراگیران به‌عنوان جمعیت در نظر گرفته می‌شوند و موضوعات مختلف ارائه شده به دانش‌آموزان به‌عنوان متغیرهای طراحی مختلف مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و نتیجه یک یادگیرنده مشابه مقدار «برازندگی» مسئله بهینه‌سازی است. بهترین راه‌حل در کل



## رویکرد شبیه‌سازی با نرم‌افزار ترنسیمز

ترنسیمز (سیستم شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل حمل و نقل) یک سیستم مبتنی بر فعالیت و یک سیستم یکپارچه از پیش‌بینی سفر و مدل‌های شبیه‌سازی میکروسکوپی است که برای برنامه‌ریزی حمل و نقل منطقه‌ای توسعه یافته است. این مدل از الگوی جدیدی از مدل‌سازی مسافران فردی در شبکه میکروسکوپی استفاده می‌کند، بنابراین با مدل‌های سنتی پیش‌بینی تقاضای سفر ۴ مرحله‌ای در مفاهیم و ساختار اساسی خود متفاوت است. تفاوت‌ها شامل نمایش مداوم و پیوسته زمان، نمایش دقیق افراد و خانواده‌ها، مسیریابی وابسته به زمان و میکرو شبیه‌سازی مبتنی بر شخص است. میکرو شبیه‌سازی هر مسافر را شناسایی می‌کند و حرکت افراد و همچنین وسایل نقلیه را بر اساس ثانیه به ثانیه ردیابی می‌کند. مطالعات و تحقیقات موردی مختلفی با استفاده از ترنسیمز در زمینه‌های مختلف حمل و نقل در حال انجام است. ترنسیمز در ابتدا در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس به‌عنوان نماینده نسل بعدی مدل‌های حمل و نقل توسعه یافت. اکنون به‌عنوان یک پروژه منبع‌باز در دسترس و توسعه یافته است. طبق شکل (۴) ترنسیمز بر اساس چهار ماژول اصلی است.

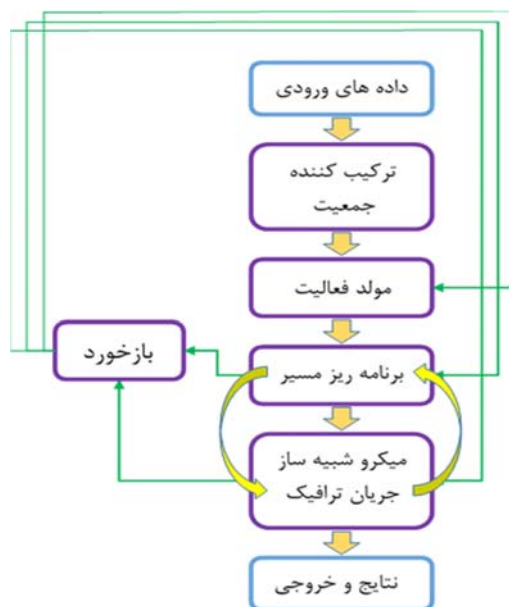
- ترکیب‌کننده جمعیت

- مولد فعالیت

- برنامه‌ریز مسیر

- میکرو شبیه‌ساز ترافیک

ترنسیمز رفتار سفر هر فرد مصنوعی را در طول یک دوره کامل ۲۴ ساعته براساس فعالیت‌های نماینده به‌دست‌آمده از داده‌های نظرسنجی شبیه‌سازی می‌کند. براساس شبکه‌های جاده‌ای و ترانزیت بسیار دقیق، افراد در هر ثانیه از روز هنگام تجزیه و تحلیل تعاملات محلی آنها ردیابی می‌شوند. مسیرها برای مسافران توسط یک ماژول مسیریابی تعیین می‌شوند که تأخیرهای پیوند وابسته به زمان را در طول دوره ۲۴ ساعته در نظر می‌گیرد. از ریز شبیه‌سازی برای تعیین زمان سفر لینک، به‌جای توابع تأخیر حجم استفاده می‌شود. نتایج اصلی ترنسیمز شامل داده‌های لحظه‌ای دقیق، مکان هر مسافر، ماشین یا وسیله نقلیه حمل و نقل، آمار حجم ترافیک، ازدحام، صف‌ها در تقاطع‌ها، تأخیرهای پیوند وابسته به زمان برای کل جاده و شبکه حمل و نقل است. مدل‌های ترنسیمز به طور قابل‌توجهی پیچیده‌تر از مدل‌های حمل و نقل سنتی هستند. این نرم‌افزار به داده‌ها و منابع محاسباتی فشرده نیاز دارد. با این حال، بسیاری از مشخصات شبکه‌های دقیق در شبیه‌سازی به طور پیش‌فرض بر اساس قوانین تولید می‌شوند.



شکل ۴. اجزای اصلی نرم‌افزار ترنسیمز

#### ۴- منطقه مورد مطالعه

شده است. در مطالعات جامع، محدوده مورد مطالعه، شهر شهرکرد، بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، دارای جمعیتی حدود ۱۹۵۵۲۴ نفر بوده است که این تعداد جمعیت در ۵۵۵۶۰ خانواده ساکن بوده‌اند. باتوجه به اینکه سال پایه در این مطالعات سال ۱۳۹۸ است، آمار جمعیت مربوط به شهر شهرکرد در این سال باتوجه به نرخ رشد به دست آمده از آمار سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ محاسبه گردید. مطابق با این محاسبات جمعیت شهر شهرکرد در سال ۱۳۹۸ در حدود ۲۰۶۷۹۹ نفر است که این تعداد جمعیت در ۶۱۶۰۹ خانوار ساکن هستند. مساحت محدوده قانونی شهر شهرکرد نیز که به عنوان محدوده مورد مطالعه برای ناحیه بندی داخلی انتخاب شده، در حدود ۴۹ کیلومترمربع است. در گام نخست شهر شهرکرد به ۷۴ ناحیه ترافیکی تقسیم شده است. ماتریس‌های تقاضا در اینجا از ماتریس‌های دریافت شده از مطالعات طرح جامع حمل و نقل شهر شهرکرد استفاده شده است و داده‌های مشاهده نیز از ماکزیمم داده‌های دارای دقت و اعتبار بهره برده شده است.

در این پژوهش از داده‌های شبکه و مطالعات جامع شهر شهرکرد استفاده شده است. محدوده مورد مطالعه، محدوده‌ای است که در مطالعات جامع حمل و نقل مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای آن تا افق طرح با ساخت و پرداخت مدل‌ها و برآورد تقاضا، برنامه‌ریزی می‌شود. در شهر شهرکرد به منظور مطالعات جامع در سال ۱۳۹۹ اطلاعات سفرهای آن بادقت مناسب به کمک آمارگیری از خانوارهای ساکن توسط شرکت‌های مشاور برداشت شده است. مرز محدوده مورد مطالعه، با کمی تغییر، همانند محدوده مورد مطالعه در طرح جامع شهرسازی پیشین شهر شهرکرد در نظر گرفته شده که این مساحت برابر با ۴۹۶۷ هکتار (۴۹ کیلومترمربع) بوده و مساحت حریم شهر نیز برابر ۱۳۰۶۳ هکتار (۱۳۰ کیلومترمربع) بوده است. سایر شهرهای استان چهارمحال و بختیاری به عنوان حوزه نفوذ مستقیم و سایر استان‌های کشور به عنوان حوزه نفوذ غیرمستقیم در نظر گرفته

#### روابط ضرایب توزیع

$$p(x) = \sum_{i=1}^m W_i \mathcal{N}(x; \mu_i, \sigma_i^2) = \sum_{i=1}^m W_i \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (11)$$

st

$$\sum_{i=1}^m W_i = 1 \quad (12)$$

$$0 \leq W_i \leq 1 \quad (13)$$

$$P = \{\mu_i, \sigma_i, W_i\}_{i=1}^m \quad (14)$$

بهتری باشد؛ اما به هر حال با بررسی توزیع مشاهداتی که از نظر بعد زمان جزئیات مطلوب داشته باشد می‌توان دریافت که توزیع سفرها در ساعات اوج ممکن است دارای چولگی باشند و یا در ساعاتی بین ساعات اوج افزایش مقطعی سفرهای را داریم که نیاز به بررسی توزیع‌های کمی پیچیده‌تر را ایجاد می‌نماید و لذا در گام اولیه پس از تست توزیع‌های مختلف اعم از ترکیب ۲ یا ۳ توزیع گوسی نتایج مدل شبیه‌سازی و شکل توزیع سفرهای تولیدی و جذبی معناداری و مطلوبیت لازم را نداشت، در انتها برای پوشش زمان غیر پیک و چولگی‌های احتمالی داده‌ها، ۳ توزیع برای ساعات اوج و ۲ توزیع برای ساعات غیر اوج در

در تولید ضرایب به نکاتی باید دقت شود که در این بخش برای مطالعه موردی حاضر به آن‌ها پرداخته می‌شود. ضرایب توزیع زمانی همان‌طور که اشاره شد به صورت پیوسته و در بازه مطالعات که از ساعت ۷ الی ۱۹ می‌باشد باید تولید شوند. این ضرایب باید به صورت پیوسته باشند که همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد بنا به ماهیت توزیع پیوسته و شبیه به نرمال در پیک‌های سفر استفاده از مدل‌های ترکیبی گوسی انتخاب شده است. برای ترکیب توزیع‌های گوسی در ابتدا روند تولید این ضرایب با تعداد متعددی از جمله ۲ و ۳ توزیع نرمال انجام شد. حالت ۳ توزیع بنا به ۳ اوج استخراج شده در مطالعات جامع می‌تواند گزینه

یک آرایه یا مجموعه پاسخ به نام Positions یا به اختصار P قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال به‌ازای هر توزیع گوسی از ۵ گوسین در توزیع زمانی PA (تولید به جذب)، این ۳ مشخصه تعیین می‌شوند و در P ذخیره می‌شود. سپس این مقادیر که از الگوریتم TLBO در هر بار بهینه‌سازی تولید می‌شوند برای ساخت ورودی ضرایب موردنیاز ترنسیمز نرمال‌سازی می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد بنا به شرایط خاص داده‌ها و عدم دسترسی به توزیع و داده‌های خارج از بازه مطالعات (۷ الی ۱۹) و عدم بسط داده‌ها در مطالعات برای کل ساعات شبانه‌روز، نیاز به نرمال‌سازی داده‌ها بین بازه ۷ صبح الی ۱۹ می‌باشد که بدین منظور از مفهومی مشابه احتمال شرطی در تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می‌شود بدین معنی که توزیع‌های نرمال در بازه‌های قبل از ۷ و بعد از ۱۹ احتمال وقوع ندارند و لذا مقادیر توزیع احتمالی بنا به این روند تابع توزیع اصلاحی برای بازه‌های ۱۵ دقیقه یا ۰,۲۵ یک ساعت بدین صورت خواهد بود که در کد اولیه بعد از تعیین ضرایب اعمال می‌شود. توزیع هر گوسین تعیین شده با ضرایب منتج از الگوریتم TLBO بدین‌وسیله با گام ۰,۲۵ برای مقادیر k (که معادل گام زمانی ۱۵ دقیقه مدنظر است) بین ۷ الی ۱۹، اصلاح شده و در گام بعد نیز کل ضرایب به مجموع  $W_i$  های فرض شده تقسیم می‌شوند که توزیع نهایی یک توزیع نرمال شده در این بازه مورد نظر باشد.

$$P_f(k, k + 0.25) = \frac{F_T(k + 0.25) - F_T(k)}{F_T(19) - F_T(7)}$$

(۱۵)

s.t

$$7 \leq k \leq 19$$

فعالیت، توزیع زمانی سفرها به‌ازای ۱۵ دقیقه، ماتریس‌های تولید به جذب و جذب به تولید، مشخصات شبکه معابر، نوع وسیله، هدف سفر، قید سفر (زمان رسیدن یا شروع سفر و ...) جدول سفرهایی تولید می‌شود که در این جدول هر کاربر به‌صورت منحصربه‌فرد و به‌صورت رویکرد خردنگر تولید می‌شود و بدین صورت زمان دقیق حرکت و مشخصات کاربر تصادفی در بازه‌های تعریف شده تولید شده و این کاربرها در طول سفر قابل رهگیری هستند. در جدول شماره (۱) نمونه‌ای از فایل سفرهای تولید شده تحت عنوان Trips.csv را مشاهده می‌نمایید.

نظر گرفته شد که پوشش کاملی روی ساعات مطالعات ۷ تا ۱۹ داشته باشد و لذا نظر به ساخت توزیع با ۵ ترکیب گوسی مورد تأیید و اجرا قرار گرفت. در این باره جلوتر اشاره می‌شود که به‌منظور امکان محوشدن دو توزیع که بین ساعات اصلی اوج در نظر گرفته شده است، بازه پارامتر  $w$  و انحراف معیار برای این دو توزیع بازه بزرگی در نظر گرفته شده است که در صورت لزوم جواب بهینه قادر به حذف اثر این دو توزیع اصلاحی باشند که بدین صورت بازه باز جستجوی ضرایب توزیع امکان کاهش تعداد توزیع‌ها را برای جلوگیری از خطاهای احتمالی در جواب از جمله بیش‌برازشی را گرفته و در صورت مطلوبیت بیشتر ۳ توزیع در فرایند جستجوی مبتنی بر یادگیری و آموزش، الگوریتم توانایی حذف ۲ توزیع منظور را داشته باشد. لذا در نتیجه از ۵ توزیع گوسی در ساخت این توزیع‌های غیرخطی استفاده شده است. ۲ توزیع ترکیبی زمانی، که هرکدام متشکل از ۵ توزیع گوسی است، با ورود به برنامه ترنسیمز به همراه ماتریس‌های تولید به جذب و جذب به تولید، سفرهای نهایی به‌منظور بارگذاری در شبکه را ایجاد می‌کنند. در این مرحله ساخت هر توزیع با تعیین بازه به‌ازای ۳ مشخصه هر گوسین انجام می‌شود. البته لازم به ذکر است که بازه پارامترهای گوسین و تولید جمعیت تصادفی جستجوی پاسخ و نحوه بهینه‌سازی جواب در گام بعد شرح داده می‌شود. این ۳ مشخصه یا پارامتر در توزیع گوسین همان پارامترهای  $\mu_i, \sigma_i, W_i$  می‌باشند که در

### سطح تخصیص ترنسیمز

پس از سطح بالا و ساخت جمعیت اولیه و نرمال‌سازی و ساخت ضرایب توزیع به‌ازای دو ماتریس مدنظر، این ضرایب به سطح پایین که یک تخصیص بر مبنای تخصیص دینامیک در شبیه از ترنسیمز است انتقال می‌یابند. در این سطح همان‌طور که مزایا و اهمیت و جایگاه ترنسیمز و تخصیص دینامیک اشاره شد یک فرایند شبیه‌سازی میان‌نگر انجام می‌شود. این فرایند بدین صورت است که پس از تحویل ضرایب توزیع روزانه بین ساعات ۷ الی ۱۹ به ترنسیمز، این ضرایب به فایل ساخت جداول سفر در برنامه انتقال می‌یابند و در این فایل بر اساس مکان‌های

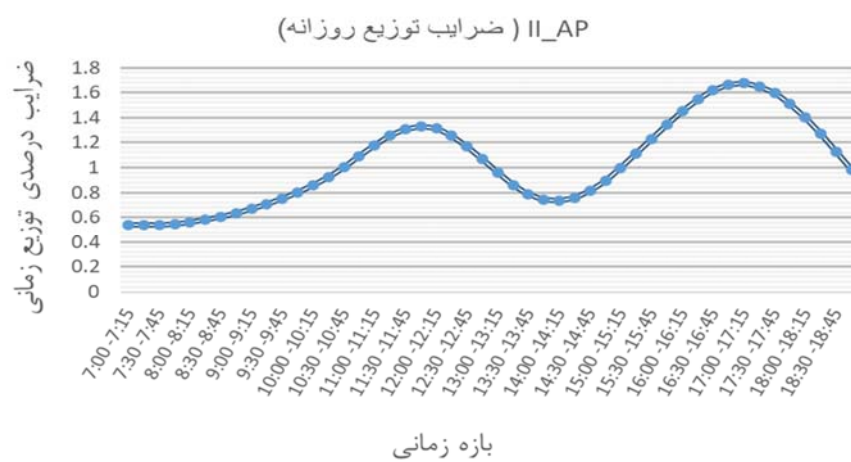
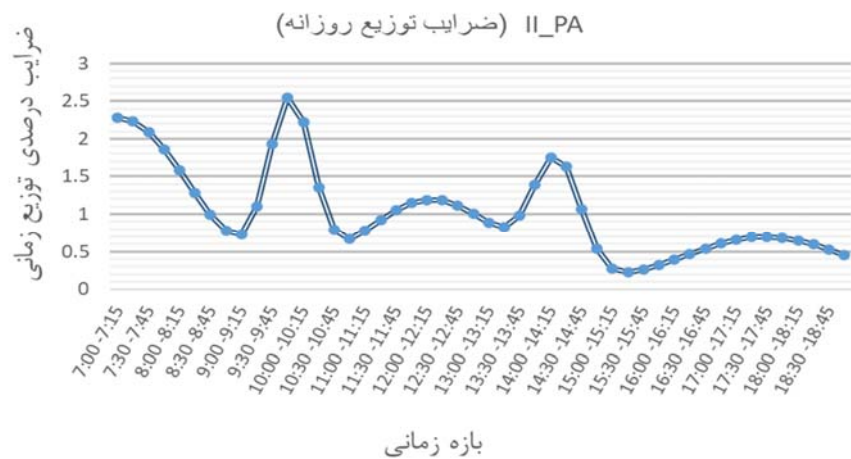
جدول ۱. نمونه‌ای از جداول سفرهای تولید شده در فایل Trips.csv

HHOLD	PERSON	TOUR	TRIP	START	END	DURATION	ORIGIN	DESTINATION	ORG_TYPE	DES_TYPE	PURPOSE	MODE	CONSTRAINT	PRIORITY	VEHICLE	V
1	1	1	1	11:29:29	11:29:46	0:00	292	288	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
2	1	1	1	18:01:31	18:01:48	0:00	286	291	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
3	1	1	1	7:43:27	7:43:43	0:00	293	291	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
4	1	1	1	7:23:52	7:24:04	0:00	293	285	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
5	1	1	1	15:57:21	15:57:33	0:00	293	284	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
6	1	1	1	11:27:28	11:27:40	0:00	285	290	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
7	1	1	1	16:41:14	16:41:30	0:00	292	290	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
8	1	1	1	17:07:39	17:08:22	0:00	287	298	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
9	1	1	1	14:35:38	14:36:21	0:00	292	298	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
10	1	1	1	16:55:29	16:56:38	0:00	288	297	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
11	1	1	1	15:12:56	15:13:57	0:00	285	296	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
12	1	1	1	9:40:39	9:41:12	0:00	291	306	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
13	1	1	1	17:02:28	17:03:02	0:00	292	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
14	1	1	1	18:18:53	18:19:21	0:00	291	308	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
15	1	1	1	8:59:47	9:00:13	0:00	289	306	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
16	1	1	1	17:06:30	17:06:56	0:00	284	307	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
17	1	1	1	16:24:59	16:25:23	0:00	288	308	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
18	1	1	1	19:05:17	19:05:50	0:00	290	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
19	1	1	1	14:14:32	14:15:06	0:00	290	307	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
20	1	1	1	8:28:52	8:29:25	0:00	293	308	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
21	1	1	1	16:01:21	16:01:50	0:00	291	308	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
22	1	1	1	14:46:49	14:47:23	0:00	292	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
23	1	1	1	8:07:49	8:08:20	0:00	291	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
24	1	1	1	7:44	7:44:26	0:00	288	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
25	1	1	1	18:50:44	18:51:17	0:00	293	308	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
26	1	1	1	12:30:17	12:30:47	0:00	287	309	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1
27	1	1	1	16:51:38	16:52:06	0:00	288	307	LOCATION	LOCATION	1	DRIVE	NONE	HIGH	1	1

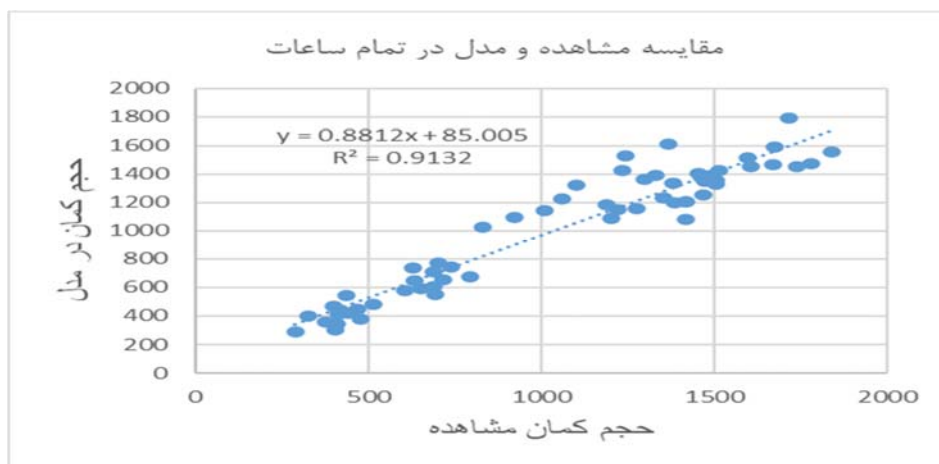
### نتایج و اعتبارسنجی

پس از انجام رویکرد دوسطحی تعیین ضرایب بهینه توزیع، به بررسی نتایج مطابق با روند اشاره شده پرداخته شده است. در نتیجه این فرایند دو توزیع زمانی به منظور ماتریس‌های تولید به جذب و جذب به تولید در الگوریتم TLBO بر مبنای تابع هدف کمینه حاصل از تخصیص دینامیک، حاصل می‌شود که در شکل ۵ و ۶ نتایج نشان داده شده‌اند. پس از ساخت مدل با مشاهدات مربوط به بهینه‌سازی، نتایج مدل به وسیله ۵ ایستگاه استفاده نشده در فرایند بهینه‌سازی که به صورت ۴۸ بازه ۱۵ دقیقه‌ای داده‌های حجم آن در دسترس است، مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. در شکل (۶) اعتبارسنجی در ساعات اوج مطالعات که ۷ الی ۸ و ۱۲ الی ۱۳ و ۱۷ الی ۱۸ است در برداشت‌های ۱۵ دقیقه‌ای انجام شده است. همچنین کل ایستگاه‌ها در کل ساعات در بازه برداشت ساعتی در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار تابع هدف و میزان خطا در فرایند بهینه‌سازی به روش TLBO در تصویر شماره (۸) نمایش داده شده است. شرط همگرایی بر اساس تعداد تکرار و تعداد nfe و میزان منابع پردازش و زمان تعیین شده است که با تعداد جمعیت اولیه ۲۰ در حدود ۴۰ الی ۵۰ تکرار جواب بهینه به دست می‌آید.

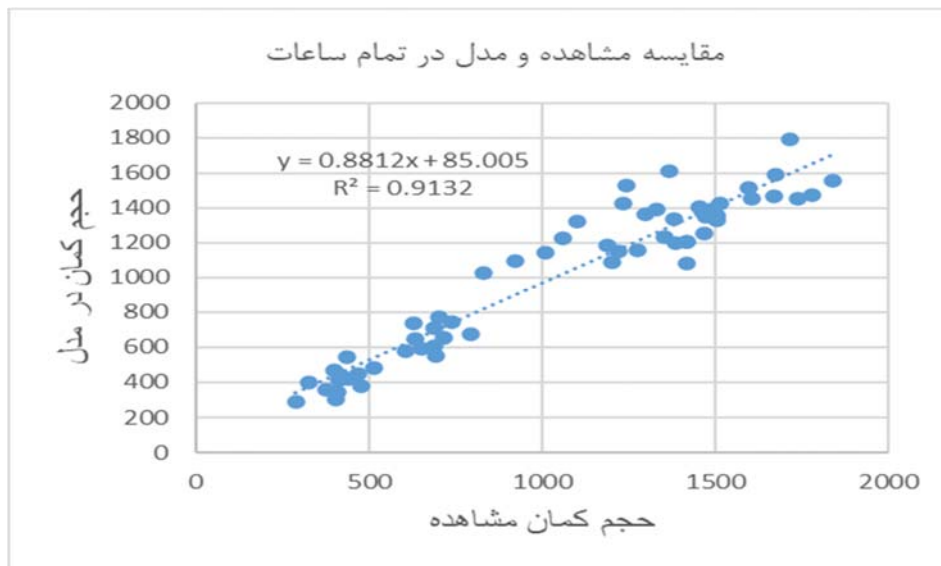
این سفرها به صورت کاربرهایی مجزا با اصل تعادل کاربر به وسیله تخصیص دینامیکی که به صورت تخصیص تعادل کاربر قطعی است، در شبکه بارگذاری و تخصیص داده می‌شوند. پس از اتمام فرایند تخصیص دستورالعمل‌های مقایسه مشاهدات و مدل‌سازی در ایستگاه‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی انجام می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد ایستگاه‌های معتبر از منظر مطالعات که جزئیات ۱۵ دقیقه برداشت مشاهدات داشته باشند تعداد ۲۰ عدد تعیین شده است. در این مراحل به منظور اعتبارسنجی بهینه‌سازی، ۵ ایستگاه به اعتبارسنجی نهایی و ۱۵ ایستگاه به استفاده در مراحل بهینه‌سازی اختصاص یافته‌اند. این ایستگاه‌ها جزئیات برداشت داده معادل ۴۸ بازه ۱۵ دقیقه یا ۱۲ بازه یک‌ساعته دارند که برای بهینه‌سازی و اعتبارسنجی تعداد تحلیل و مقایسه مطلوبی در اختیار مدل قرار می‌دهند. در این گام پس از مقایسه به‌ازای ۱۲ ساعت حجم برداشتی از نتایج تخصیص با لینک‌های مشاهده، مقدار تابع هدف کمینه‌سازی میانگین وزنی RMSE در ۱۲ ایستگاه مشاهده محاسبه و بررسی می‌شود. پس از هر بار تخصیص این مقدار به‌ازای ۱۲ فایل بررسی تحلیلی نرم‌افزار به سطح بالا به‌عنوان مقدار تابع هدف تحویل داده می‌شود و فرایند بهینه‌سازی به منظور کمینه‌کردن این مقدار به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند.



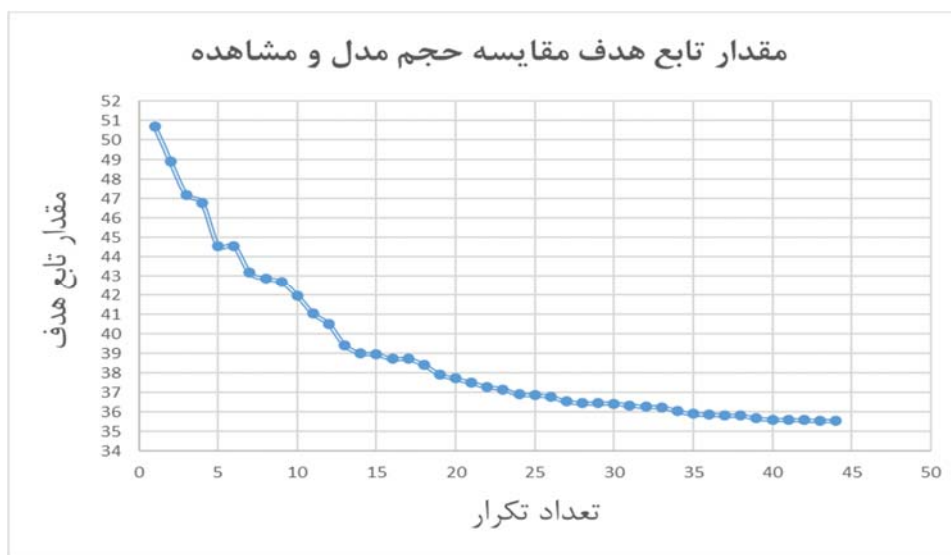
شکل ۵. توزیع زمانی تولید به جذب روزانه (PA)



شکل ۶. مقایسه حجم کمان‌های مشاهده و مدل در بازه زمانی ۱ ساعته در تمام ساعات روز



شکل ۷. مقایسه حجم کمان‌های مشاهده و مدل در بازه زمانی ۱۵ دقیقه در ساعات اوج



شکل ۸. مقدار تابع هدف کمیته‌سازی میانگین وزنی RMSE در روند بهینه‌سازی

## ۵- نتیجه‌گیری

ترنسیمز با تخصیص ماتریس‌های برش زمانی ۱۵ دقیقه در ۱۲ ساعت مطالعات انجام شده است که در این فرایند روند ساخت ضرایب توزیع و بهینه‌سازی آن بر مبنای توزیع‌های ترکیبی گوسی (غیرخطی) و الگوریتم بهینه‌سازی TLBO انجام شده است. در این پژوهش از یک رویکرد دوسطحی به منظور برآورد

در تخمین ماتریس مبدأ و مقصد از روش‌ها و الگوریتم‌های گوناگونی استفاده شده است که با توجه به سطح دقت و نوع داده‌های ورودی و روند و تابع هدف بهینه‌سازی رویکردهای مختلفی وجود دارد که از آن‌ها در این پژوهش ایده گرفته شده است و یک روند بر مبنای تخصیص دینامیک در نرم‌افزار

تخصیص دینامیک با برش زمانی ۱۵ دقیقه را اجرا می‌نماید. سپس حجم ترافیک معابر حاصل از تخصیص با حجم لینک‌های مشاهده مقایسه می‌شود و تابع هدف کمینه نمودن این خطا از طریق مقدار RMSE در گام‌های زمانی به‌ازای ۱۲ ساعت بازه مطالعات است. شرط همگرایی می‌تواند مقدار خطای مشخص و یا متناسب با زمان و منابع پردازش و تعداد تکرار باشد که پس از اتمام، ضرایب بهینه حاصل می‌شود. برای اعتبارسنجی از ایستگاه‌های استفاده نشده در فرایند ساخت مدل استفاده می‌شود که ضریب تشخیص  $R^2$  در کل بازه‌ها و کل ایستگاه‌ها مقدار ۰.۹۱ و در ۳ بازه اوج مقدار ۰.۸۸ حاصل شده که باتوجه به رویکرد بهینه‌سازی با استفاده از ماتریس‌های پیشین به‌منظور تغییر زمان توزیع سفرها (شروع سفرها) نتایج نشان از عملکرد مناسب فرایند دوسطحی ارائه شده دارد.

ماتریس تقاضای سفر از ماتریس‌های پیشین که ماتریس‌های استاتیک مطالعات جامع است، استفاده شده است. مطالعه موردی شهر شهرکرد در این پژوهش بررسی شده است که در سطح بالا با به‌کارگیری مدل‌های ترکیبی گوسی ضرایب را تولید نموده و به‌منظور بهینه‌سازی ضرایب از الگوریتم بهینه‌سازی TLBO در بستر پایتون استفاده شد که توزیع‌های غیرخطی تولید و بهینه‌سازی شده که بر مبنای مدل‌های پیوسته ترکیبی گوسی با ۵ گوسین انجام شده و ضرایب اساسی گوسین‌ها در این الگوریتم بهینه‌سازی می‌شوند و به‌صورت ضرایب نرمال شده در بازه ۱۲ ساعته مدل‌سازی به سطح پایین که تخصیص است تحویل داده می‌شود. در سطح دوم یک شبیه‌سازی تخصیص دینامیک ترنسیمز قرار دارد که با ضرایب تولید به جذب و جذب به تولید منتج از سطح بالا فایل سفرهای منحصربه‌فرد (Trips.csv) را بر اساس زمان شروع سفر توزیع شده تولید کرده و یک

## ۶-مراجع

- Behara, K. N. S. (2019). Origin-Destination Matrix Estimation Using Big Traffic Data: A Structural Perspective (Doctoral Dissertation. *Queensland University Of Technology*).
- Cascetta, E. and Nguyen, S. (1988). A Unified Framework For Estimating or Updating Origin/Destination Matrices From Traffic Counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(6), 437-455.
- Cascetta, E. And Postorino, M.N. (2001). Fixed Point Approaches To The Estimation of O/D Matrices Using Traffic Counts on Congested Networks. *Transportation Science*, 35(2), 134-147.
- Cascetta, E., Inaudi, D. And Marquis, G. (1993). Dynamic Estimators of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts. *Transportation Science*, 27(4), 363-373.
- Chiu, Y. C. Et Al. (2010). A Primer For Dynamic Traffic Assignment. *Transportation Research Board*, 2-3.
- Garcia-Rodenas, R. And Verastegui-Rayo, D. (2008). A Column Generation Algorithm For The Estimation of Origin-Destination Matrices in Congested Traffic Networks. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 860-878.
- Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H. (2020). Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis. *Journal of Transportation Research*, 17(3), 33-44.
- Afandizadeh Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker, H. (2019). Using Optimization And Metaheuristic Method To Reduce The Bus Headway (Case Study: Qazvin Bus Routes). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 833-849.
- Afandizadeh, S., & Bigdeli Rad, H. (2021). Developing A Model To Determine The Number of Vehicles Lane Changing on Freeways By Brownian Motion Method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.
- Ameri, A., Bigdeli Rad, H., Shaker, H., & Ameri, M. (2021). Cellular Transmission and Optimization Model Development To Determine the Distances Between Variable Message Signs. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(1), 1-16.
- Andersen, N.S., Chiarandini, M. And Debrabant, K. (2022). Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation In Urban Traffic Networks. *Arxiv Preprint Arxiv.00099*
- Ballis, H., & Dimitriou, L. (2020). Revealing Personal Activities Schedules From Synthesizing Multi-Period Origin-Destination Matrices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 224-258.

- Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Comput. Des.*, Vol. 43, No. 3, 303-315.
- Rostami Nasab, M., & Shafahi, Y. (2020). Estimation Of Origin-Destination Matrices Using Link Counts and Partial Path Data. *Transportation*, 47(6), 2923-2950.
- Spiess, H. (1990). A Gradient Approach for the OD Matrix Adjustment Problem. *A $\in$ ^A*, 1, 2-3.
- Tavana, H. (2001). Internally Consistent Estimation of Dynamic Network Origin-Destination Flows From Intelligent Transportation Systems Data Using Bi-Level Optimization. *The University of Texas at Austin*.
- Xia, Y., Hu, B., Xie, K., Tang, J., & Tai, H. M. (2019). An EV Charging Demand Model for the Distribution System Using Traffic Property. *IEEE Access*, 7, 28089-28099.
- Xiong, X., Ozbay, K., Jin, L., & Feng, C. (2020). Dynamic Origin-Destination Matrix Prediction With Line Graph Neural Networks and Kalman Filter. *Transportation Research Record*, 2674(8), 491-503.
- Yang, H. and Rakha, H. (2019). A Novel Approach For Estimation of Dynamic From Static Origin-Destination Matrices. *Transportation Letters*, 11(4), 219-228.
- Yang, H., Meng, Q. And Bell, M.G.H. (2001). Simultaneous Estimation of the Origin-Destination Matrices And Travel-Cost Coefficient For Congested Networks in a Stochastic User Equilibrium. *Transportation Science*, 35(2), 107-123.
- Yaqoubi, M.M., And Rasafi, A.A. and Nouri, Z., (2020). Study of Static and Dynamic Traffic Assignment. *6th National Conference of Applied Researches In Civil Engineering, Architecture and Urban Management*.
- Zakai-Ashtiani, H. and Mahmoudabadi, M. (2002). Correction of Origin-Destination Matrix With Volume Count Information (Mashhad City Case Study). *Amirkabir Publication*.
- Zuylen, H. J. Van and L. G. Willumsen (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transp. Res. Part B Methodol.*, Vol. 14, No. 3, 281-293.
- He, Y., Zhao, Y., & Tsui, K. L. (2022). Short-Term Forecasting of Origin-Destination Matrix in Transit System Via A Deep Learning Approach. *Transportmetrica A: Transport Science*, 1-28.
- Kim, H., Baek, S. And Lim, Y. (2001). Origin-Destination Matrices Estimated With A Genetic Algorithm From Link Traffic Counts. *Transportation Research Record*, 1771(1), 156-163.
- Lee, K.-S. and Hobeika, A.G. (2007). Application of Dynamic Value Pricing Through Enhancements To TRANSIMS. *Transportation Research Record*, 2003(1), 7-16.
- Lee, K.S., Eom, J.K. And Moon, D. S. (2014). Applications of TRANSIMS In Transportation: A Literature Review. *Procedia Computer Science*, 32, 769-773.
- Lundgren, J.T. and Peterson, A. (2008). A Heuristic For The Bilevel Origin-Destination-Matrix Estimation Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(4), 339-354.
- Garcia-Rodenas, R. and D. Verastegui-Rayo (2008). A column generation algorithm for the estimation of origin-destination matrices in congested traffic networks. *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 184, No. 3, 860-878.
- Maher, M.J. (1983). Inferences on Trip Matrices From Observations on Link Volumes: A Bayesian Statistical Approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 17(6), 435-447.
- Mahpour, A. and Rezaei-Arjarodi, A. (2022). Classification of Origin-Destination Matrix Estimation Methods In The Road Network. *Road, Housing and Urban Development Research Center*.
- Naser, M. And Birst, S.C. (2010). Mesoscopic Evacuation Modeling For Small-To Medium-Sized Metropolitan Areas. *Mountain-Plains Consortium*.
- Nguyen, S. (1984). Estimating Origin Destination Matrices From Observed Flows. *Publication of: Elsevier Science Publishers BV [Preprint]*.
- Ortúzar, J.D. And Willumsen, L.G. (2011). Modelling Transport. 4th Edition, Wiley, H. (No Date) 'No Title'.
- Rad, V. B., Najafpour, H., Shieh, E., & Rad, H. B. (2019). Questionnaire Design: Relation of Physical Activity and Safety. *Int. J. Architect. Eng. Urban Plan*, 29(1), 113-123.

# A Model for Optimizing the Time Distribution of Trips in Dynamic Traffic Assignment

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

*Ahmad Ebadi, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Navid Kalantari, Ph.D., Grad., Consulting Manager, AECOM, Washington, USA.*

*Hamid Bigdeli Rad, Ph.D., Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: zargari@iust.ac.ir*

Received: November 2024- Accepted: February 2025

## **ABSTRACT**

Rapid Urban Growth Has Led to An Increase in Travel Demand and Private Vehicle Ownership, And the Existing Infrastructure Has Not Been Able to Match the Effects of Demand and Traffic Congestion. As Traffic Density Increases, Passenger Delays Increase and Network Reliability Decreases. In the Analysis of Transportation Systems, Estimation and Analysis of Travel Demand Have Particular Importance to Achieve an Efficient and Effective Transportation System. Estimating and Correcting Demand Matrices is Very Important, and More Reliable and Practical Results Can be Achieved by Using More Accuracy and Details in Their Estimation. In the Problem of Matrix Estimation and Modification, Especially in Dense Networks, the Accuracy of Models Significantly Increases by Using Simulation Models. In This Research, The Goal is to Optimize the Time Distribution Coefficients of the Demand Matrix in 15-Minute Steps for the Entire Study Period. A Bi-Level Approach Has Been Used to Estimate the Travel Demand Matrix from Previous Matrices, which are the Static Matrices of Comprehensive Studies. At the Upper Level, It Produces Coefficients by Gaussian Mixture Models and Uses Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm to Optimize. The Objective Function is to Minimize the Error Through the RMSE Value. Unused Stations Are Used to Validate the Model, And the Detection Coefficient,  $R^2$ , in All Intervals and Stations Is 0.91 And in the 3 Peak Periods, The Value Is 0.88, According to the Optimization Approach Using Previous Matrices, To Change the Time Distribution of Trips (Trips Start), The Results Show the Proper Functioning of the Presented Bi-Level Process.

**Keywords:** Time Distribution of Trips, Transims Dynamic Assignment, Bi-Level Demand Optimization, Gaussian Mixture, Model