

## مدل بهینه قیمت‌گذاری پویای عوارض در آزادراه‌های شهری

### مقاله علمی-پژوهشی

شهریار افندی زاده\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مهدی گنج خانلو، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حمید میرزاحسین، دانشیار، گروه عمران- برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمينی، قزوین، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۳۴-۱۷

#### چکیده

دریافت عوارض یکی از راه‌کارهای مورد اقبال برنامه‌ریزان حمل‌ونقل در مواجهه با تراکم ترافیک است. در این مطالعه تعیین عوارض برای آزادراه‌های درون‌شهری به شکل یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی ارائه شده است. در سطح بالا، بهینه‌سازی عوارض با متغیرهای تصمیم‌ارقام عوارض آزادراه‌ها قرار دارد و در سطح پایین، مسئله تخصیص سفر در شبکه معابر برای افزایش دقت و کارایی حل می‌شود. تخصیص سفر از دو جنبه‌ی معیارهای عملکرد شبکه و عدالت اجتماعی به صورت پویا و با در نظر گرفتن گروه‌های مختلف جمعیت از لحاظ ارزش زمانی انجام شده است. همچنین در این مقاله از یک مدل تخصیص پویای میان‌تگر که دقت مدل‌های خردتگر و سرعت مدل‌های کلان‌تگر را دارد استفاده شده است. برای حل مسئله در این مقاله الگوریتم فراکاوشی چند جمعیتی توسعه داده شده است. برای تقسیم‌بندی جمعیت به زیر-جمعیت‌های مختلف از روش چند-جمعیتی ترکیبی برای تقویت دو عملکرد جستجوی محلی و جستجوی جهانی استفاده شده است. در هسته‌ی این روش از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا استفاده شده است. نتایج نشان داد که سرعت و دقت همگرایی الگوریتم توسعه داده شده نسبت به سه الگوریتم‌ها رقیب برتری کامل و قابل توجهی داشته است. این الگوریتم زمان سفر کل شبکه را از ۸۲۰۵ ساعت به ۶۶۸۳ ساعت، معادل ۱۸٪ کل زمان سفر، کاهش داده و همچنین سرعت این الگوریتم برای رسیدن به مقادیر تابع هدف مشخص شده نسبت به الگوریتم ژنتیک، ۶ برابر شده است.

واژه‌های کلیدی: عوارض آزادراه، بهینه‌سازی، الگوریتم فراکاوشی، تخصیص پویای سفر

#### ۱- مقدمه

است که به بهبود کارایی، پایداری و قابلیت اطمینان شبکه حمل‌ونقل کمک می‌کند. ابعاد زمانی و مکانی سفر (به‌عنوان مثال، زمان آغاز سفر، مدت حمل‌ونقلی، مسیر) و حتی تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا سفر انجام شود یا نه؟ می‌تواند از طریق مدیریت تقاضای حمل‌ونقل شکل بگیرد. از جمله روش‌های کارآمد در مدیریت تقاضای حمل‌ونقل قیمت‌گذاری بر تسهیلات حمل‌ونقلی و مناطق شهری است. تصمیم‌گیری در خصوص تعیین قیمت عوارض برای تسهیلات شبکه حمل‌ونقل شهری یکی از مشکل‌ترین مسائل حمل‌ونقل است. این موضوع با توجه به اهمیت نقش معابر درون‌شهری در کارآمدی سیستم حمل‌ونقل

مسئله تراکم ترافیک در معابر حمل‌ونقل شهری از اصلی‌ترین مسائل حمل‌ونقل است. این پدیده یک مشکل متداول در شهرهای بزرگ و آزادراه‌های شهری است و بار قابل توجهی در مورد زمان از دست رفته، عدم قطعیت، تشدید ناآرامی‌ها و نگرانی‌های مسافران و آلودگی‌های زیست‌محیطی وارد می‌کند. سالانه میلیاردها دلار در شهرهای مختلف جهان بابت مشکلات اشاره‌شده ناشی از تراکم ترافیک توسط دولت‌ها و مردم پرداخت می‌شود. مدیریت تقاضای حمل‌ونقل که از آن به مدیریت تقاضای سفر یا مدیریت تقاضای ترافیک نیز یاد می‌شود، از جمله راهکارهای کاهش یا توزیع تقاضای سفر، در زمان یا مکان

کرده‌اند. بر این اساس، در انتها، روش پیشنهادی با سایر روش‌های رقیب مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- پیشینه تحقیق

در ابتدا، توسط پیگو در سال ۱۹۱۲ بود؛ که اولین بار مسئله قیمت‌گذاری بر روی تسهیلات حمل‌ونقلی را از جهت تأثیرات اقتصادی، سیاسی و عدالت اجتماعی مطرح کرد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ و ابتدای دهه ۲۰۰۰ میلادی توجه ویژه‌ای به موضوع بهینه‌سازی عوارض و قیمت‌گذاری تراکم بر مبنای برنامه‌ریزی ریاضی و همچنین نظریه‌های اقتصادی شد. از جمله لابه و همکاران مسئله بهینه‌سازی عوارض را به شکل یک مسئله دوسطحی با تابع هدف بیشینه کردن درآمد و فرض رفتار کاملاً منطقی و آگاهانه استفاده‌کنندگان صورت‌بندی کردند.

همچنین کار لیو و همکاران، سه سناریو بر روی یک کریدور با دو مسیر با شبیه‌ساز ترافیکی اجرا کردند.

- اعمال عوارض بر مبنای نظریه اول بهترین (دریافت عوارض از تمامی لینک‌های شبکه)

- اعمال عوارض بر مبنای نظریه دوم بهترین (اعمال عوارض بر روی برخی از لینک‌های شبکه)

- عوارض اعمال نشود.

این مطالعه سه نتیجه مهم را نشان داد:

- اعمال عوارض بر مبنای تئوری دوم، بهترین اثرگذار است، اما کارایی کمتری نسبت به اعمال عوارض بر مبنای نظریه اول بهترین دارد.

- عوارض بر مبنای تئوری دوم، بهترین کمتر از عوارض بر مبنای تئوری اول بهترین است.

- رفاه اجتماعی حاصل از عوارض نظریه اول بهترین، بیشتر از دریافت عوارض ناشی از نظریه دوم بهترین است.

- ینگ در کتاب خود به طور تفصیلی قیمت‌گذاری معابر از لحاظ اقتصادی و ریاضیاتی را بررسی کرده است. همچنین او و سایر همکاران به ضرورت و نحوه تأثیر عوارض بر کنترل تراکم پرداخته‌اند.

دپالما و همکاران در مقاله بازمینی خود به بررسی جامع انواع روش‌ها و فناوری‌های قیمت‌گذاری تراکم پرداختند. سکریس و همکاران نیز مروری بر ادبیات در مورد روش‌ها و الگوریتم‌های قیمت‌گذاری معابر ارائه دادند.

## ۱-۲- قیمت‌گذاری با رویکردهای عدالت اجتماعی

شهری مورد توجه متخصصان قرار گرفته است. مسئله اصلی این است که جهت افزایش بهره‌وری شبکه معابر حمل‌ونقلی باید چگونه قیمت عوارض برای تسهیلات شهری را تعیین کرد؟ آیا باید قیمت عوارض نسبت به زمان ثابت یا متغیر باشد؟

عموماً نحوه دریافت عوارض به شکل ثابت نسبت به زمان، به دلیل سادگی اجرای آن در بسیاری از شهرهای جهان از جمله شهرهای ایران صورت گرفته است؛ که این از طرفی با بنیان‌های عدالت اجتماعی و از طرفی با اصول کارآمدی عوارض در تناقض است. برای مثال خودروهایی که در ساعت اوج از معابر استفاده می‌کنند به همان میزانی باید عوارض پرداخت بکنند که استفاده‌کنندگان از معابر در ساعات غیر اوج پرداخت می‌کنند، درحالی که تأثیر هر یک از این خودروها بر تراکم ترافیک متفاوت است و هر یک هزینه‌های متفاوتی تحمیل می‌کنند. از نگاه دیگر دریافت عوارض همان‌طور که اشاره شد ابزاری برای مدیریت تقاضا است درحالی که اعمال یک میزان مقاومت، در دو ساعت مختلف با تقاضاهای متفاوت، کارآمدی این ابزار برای کنترل تقاضا را بسیار کاهش می‌دهد.

همچنین در طرف عرضه، احداث و یا توسعه معابر شهری به خصوص آزادراه‌ها و یا بزرگراه‌های شهری به دلیل هزینه بسیار بالای تملک اراضی، ساخت پل‌ها، تونل‌ها، هزینه‌های زیرسازی و روسازی و نصب علائم، هزینه بالایی را بر اقتصاد شهرها و کشورها وارد می‌کند. بنابراین استفاده‌کنندگان این تسهیلات به میزان مناسب باید هزینه استفاده این تسهیلات را پرداخت کنند. از طرفی نباید هزینه آن‌قدر بالا باشد، تا هم دریافت عوارض ناعادلانه باشد و هم به کاهش متقاضی منجر شود که خود این به کاهش درآمد کل منجر می‌شود و از طرفی نباید آن‌قدر کم باشد که هم کارایی آن از بین برود و هم درآمد آن ناچیز شود. به موارد ذکر شده اثرات سیاسی و اجتماعی این تصمیمات را نیز باید افزود.

بهینه‌سازی عوارض شبکه‌ی بزرگراه‌های درون‌شهری در دسته مسائل طراحی شبکه و بهینه‌سازی معیارهای عملکرد شبکه حمل‌ونقلی قرار دارد. اغلب مطالعات صورت گرفته بر روی بهینه‌سازی به شکل ایستا صورت گرفته است و مسائل پویا بیشتر به شکل مسئله بهینه‌سازی پویای روز-به-روز بوده است و مطالعات اندکی این مسئله را بر مبنای تخصیص پویای سفر در بازه‌های چنددقیقه‌ای به شکل شبیه‌ساز-مبنا صورت‌بندی و حل

شود. فرض‌های این مدل همگنی استفاده‌کنندگان از تسهیلات و همچنین ایستایی مدل نسبت به زمان است. در این مدل به طور عمده ترکیب دو روش قیمت‌گذاری معابر و محدودیت تردد برخی خودروها مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه این پژوهش این‌گونه بیان شد که در صورت اعمال محدودیت‌ها به شکل محدود و قیمت‌گذاری معابر، بهترین نتیجه از سیاست قیمت‌گذاری حاصل خواهد شد؛ در صورتی که اگر محدودیت تردد از یک دامنه بیشتر شود باعث کاهش شدید کارایی سیاست‌گذاری در خصوص عدالت اجتماعی خواهد شد.

## ۲-۲- قیمت‌گذاری بر مبنای پویایی روزه‌روز تقاضا

در ابتدا فریس و همکاران، تئوری تخصیص عوارض در بازه زمانی روزه‌به-روز در محیط زمانی پیوسته را معرفی کردند. فرمول‌بندی این مسئله دربرگیرنده‌ی تقاضای سفر الاستیک غیر تفکیک‌پذیر و همچنین تابع زمان سفر غیر تفکیک‌پذیر است. هدف این مدل، یافتن پاسخ سریع و یگانه برای کنترل بهینه در محیط پویای عوارض شبکه است. سپس ینگ و همکاران به معرفی یک روش قیمت‌گذاری پویای روزه‌به-روز برای یافتن سریع‌ترین پاسخ برای حالت بهینه تابع هدف پرداخته‌اند. ابتدا مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیر پیوسته‌ی خطی چند ضابطه‌ای فرمول نویسی شده است. سپس به شکل یک مسئله استاندارد برنامه‌ریزی خطی درآمده است.

چنگ و همکاران تحت شرایطی که جریان ترافیک در طی روزهای متعدد متغیر است و سیستم می‌تواند به حالت عدم تعادل در یک بازه زمانی چندروزه بابت اعمال عوارض درآمد، مسئله قیمت‌گذاری تراکم با تغییرات ترافیکی روزه‌روز را مورد بررسی قرار دادند. برنامه‌ریزی مسئله بر مبنای میانگین متغیر عوارض که در آن مسافران کمینه‌کردن میانگین هزینه سفر خود را در نظر می‌گیرند؛ طراحی شده است. مسئله نیز توسط الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهینه‌سازی شده است.

گو و همکاران به منظور کنترل تراکم در مجموعه‌ای از لینک‌های شبکه با رویکرد احتساب کران بالا برای جریان لینک‌ها، برنامه‌ی کنترل تراکم قیمت-مبنا، با توجه به تغییر جریان ترافیک روزه‌روز ارائه دادند. در هر روز رانندگان باید میزان مشخصی عوارض پرداخت کنند، که این عدد تابعی از جریان ترافیک در ارتباط با کران بالای جریان ترافیک و عوارض روز قبل است. هن و همکاران یک برنامه‌ی پویای قیمت‌گذاری تراکم روزه‌به-روز با

داگانزو و همکاران پراکندگی طول سفر افراد را در نظر گرفته‌اند و به معرفی یک مدل پویای استفاده-مبنا پرداخته‌اند؛ که موجب کم کردن تراکم شبکه با اولویت به سفرها با طول کمتر می‌شود. بر خلاف روش‌های سفر-مبنا در این روش هر کس به مقداری که هزینه‌ی تراکم ایجاد می‌کند، عوارض باید پرداخت کند، که موجب افزایش درآمد نیز می‌گردد. این روش موجب افزایش سرعت سفرها با طول سفر کمتر می‌شود. به دلیل پرداخت کم افرادی که سفرهای کوتاه‌تری دارند، نتایجی که در این روش به‌دست‌آمده نیز از لحاظ عدالت اجتماعی بسیار مطلوب است. ون دن برگ و همکاران اثرات پراکندگی یا غیرهمسان بودن ارزش زمانی هر فرد را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین نشان دادند که فرض همگنی ارزش زمانی افراد، اثری در قیمت عوارض با روش اول بهترین ندارد، ولی با غیرهمسانی ارزش زمانی؛ اثرها قابل مشاهده خواهد بود. روش اول بهترین، باعث ایجاد ضرر برای افراد با ارزش زمانی کمتر و برای افراد با ارزش زمانی بیشتر، منفعت مالی به همراه خواهد آورد؛ که این از منظر عدالت اجتماعی مطلوب نیست. در این مطالعه همچنین به ضرورت دریافت عوارض به شکل خصوصی نیز اشاره شده است. الیاسون و همکاران به اثرات مالی و اقتصادی قیمت‌گذاری پرداخته‌اند. برای مثال اگر درآمد حاصل از عایدی، برای حمل‌ونقل عمومی به کار گرفته شود، بیشتر افراد کم‌درآمد و زنان منتفع خواهند بود. همچنین اگر عایدی حاصل، صرف کاهش مالیات‌ها شود هر دو گروه مردان و زنان به یک میزان منتفع خواهند بود اما افراد با درآمد بالا بیشترین سود را خواهند برد.

ینگ و همکاران نشان دادند که با احتساب مالیات یکسان علاوه بر عدم عدالت در پرداخت عوارض جاده‌ای بین گروه‌های کم‌درآمد و پردرآمد جامعه، با اعمال عوارض صرفاً بر روی برخی کمان‌های خاص، این عدم برابری در مکان نیز گسترده شده و افراد با مبدأ-مقصد‌های متفاوت به شکل نابرابری عوارض پرداخت می‌کنند. در این مقاله مسئله بهینه‌سازی عوارض به شکل دوسطحی صورت‌بندی شده و با الگوریتم شبیه‌ساز تبرید حل شده است. همچنین در این باره بین و همکاران به بررسی اثرات عدم تعادل سیستم و نابرابری اجتماعی در اعمال عوارض یکسان به تمامی کاربران پرداخته‌اند. ژو و همکاران سعی کردند تا با ارائه یک چارچوب تحلیلی، ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیرندگان سیاست‌های کنترل تقاضا فراهم آورند؛ تا از میان روش‌های مختلف، مناسب‌ترین تصمیم گرفته

بازه‌های زمانی گسسته، به منظور انتقال جریان ترافیکی موجود به جریان تعادلی مورد نظر ارائه داده‌اند. فرض این مطالعه عدم تقارن توابع هزینه (زمان) سفر است که موجب غیرمحدب شدن فضای جستجو و تکرر تعداد نقاط تعادل ترافیکی می‌شود. برخی نیز این روش را در کنار مفاهیمی دیگر برای ارائه یک روش جامع‌تر ارائه دادند. مانند ونگ و همکاران مفهوم سرعت (به معنی سرعت بازگشت به حالت تعادل)، یکی از شاخص‌های قابلیت اعتماد شبکه ترافیکی، را در کار خود مورد نظر قرار داده‌اند. سپس یک برنامه عوارض روز به روز، برای پیشینه‌سازی سرعت برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک حادثه طبیعی یا انسانی مانند تصادف، زلزله، سیل و یا خرابی زیرساخت‌ها ارائه داده‌اند. در این برنامه برای مدل‌سازی رفتار ناپایدار ترافیکی در مواجهه با خرابی در شبکه از نظریه سیستم‌های دینامیکی تصویر شده استفاده شده است. همچنین لیو و همکاران روش قیمت‌گذاری غیرخطی تراکم مسافت-مبنای شبکه با احتساب تقاضای پویای روز-به-روز تصادفی را مورد بررسی قرار داده‌اند. دلیل این ایده این است که بعد از اعمال عوارض چندین روز زمان می‌برد تا جریان در شبکه به حالت تعادلی برگردد. برای این مدل، حل یک مسئله کمینه-بیشینه؛ به معنی کمینه‌سازی بیشینه‌ی عدم تمایل رانندگان به انتخاب مسیر دارای عوارض، ارائه شده است. از الگوریتم کلونی مصنوعی زنبورهای دوفازی برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است که یک فاز آن حل مسئله‌ی بهینه‌سازی زمان سفر درک شده برای استفاده‌کنندگان برای هرروز است. فاز دوم آن حل مسئله بیشینه-کمینه بازدارندگی مسافران است.

#### ۲-۴- قیمت‌گذاری تراکم بر مبنای مدل‌های رفتاری

بونسال و همکاران اثرگذاری تصمیمات استفاده‌کنندگان از تسهیلات حمل‌ونقلی و همچنین نوع رفتار و تصمیمات آن‌ها در مواجهه با چارچوب‌های قیمت‌گذاری پیچیده را مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اینکه بسیاری از مقالات برای دستیابی به اهداف بهتر در زمینه کنترل تراکم، افزایش درآمد و سایر اهداف به ارائه مدل‌های پیچیده پرداخته‌اند و کارایی آن‌ها را در مدل‌ها اثبات کرده‌اند، اما در عمل علاقه استفاده‌کنندگان برای پیروی از مدل‌های ساده‌تر بیشتر است. در این مقاله از مدل‌های تصمیم‌گیری انسان‌ها از جمله تئوری انتظار، دوری از ریسک، دوری از ابهام و عقلانیت محدود استفاده شده است. همچنین ژنگ و همکاران به ارائه چارچوبی پرداخته‌اند که برای تعیین عوارض، استفاده‌کنندگان به کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی شده‌اند. استفاده‌کنندگان به این صورت که هر کلاس با دو فاکتور، عدم مطلوبیت مسیر را درک می‌کنند؛ گروه‌بندی شده‌اند. اولین فاکتور، زمان سفر مربوط به لینک و دیگری فاکتورهای غیر مرتبط با زمان سفر است. فرض بر این است که استفاده‌کنندگان یا از

بازه‌های زمانی گسسته، به منظور انتقال جریان ترافیکی موجود به جریان تعادلی مورد نظر ارائه داده‌اند. فرض این مطالعه عدم تقارن توابع هزینه (زمان) سفر است که موجب غیرمحدب شدن فضای جستجو و تکرر تعداد نقاط تعادل ترافیکی می‌شود.

برخی نیز این روش را در کنار مفاهیمی دیگر برای ارائه یک روش جامع‌تر ارائه دادند. مانند ونگ و همکاران مفهوم سرعت (به معنی سرعت بازگشت به حالت تعادل)، یکی از شاخص‌های قابلیت اعتماد شبکه ترافیکی، را در کار خود مورد نظر قرار داده‌اند. سپس یک برنامه عوارض روز به روز، برای پیشینه‌سازی سرعت برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک حادثه طبیعی یا انسانی مانند تصادف، زلزله، سیل و یا خرابی زیرساخت‌ها ارائه داده‌اند. در این برنامه برای مدل‌سازی رفتار ناپایدار ترافیکی در مواجهه با خرابی در شبکه از نظریه سیستم‌های دینامیکی تصویر شده استفاده شده است. همچنین لیو و همکاران روش قیمت‌گذاری غیرخطی تراکم مسافت-مبنای شبکه با احتساب تقاضای پویای روز-به-روز تصادفی را مورد بررسی قرار داده‌اند. دلیل این ایده این است که بعد از اعمال عوارض چندین روز زمان می‌برد تا جریان در شبکه به حالت تعادلی برگردد.

برای این مدل، حل یک مسئله کمینه-بیشینه؛ به معنی کمینه‌سازی بیشینه‌ی عدم تمایل رانندگان به انتخاب مسیر دارای عوارض، ارائه شده است. از الگوریتم کلونی مصنوعی زنبورهای دوفازی برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است که یک فاز آن حل مسئله‌ی بهینه‌سازی زمان سفر درک شده برای استفاده‌کنندگان برای هرروز است. فاز دوم آن حل مسئله بیشینه-کمینه بازدارندگی مسافران است.

#### ۲-۳- قیمت‌گذاری خطوط با ضریب سرنشین بالا

جنگ و همکاران با در نظر گرفتن استفاده کمتر از حد پیش‌بینی شده از خطوط مخصوص وسایل با ضریب سرنشین بالا، مدلی ارائه کرده‌اند. این مدل موجب درآمدزایی از این خطوط نیز می‌گردد. این روش به شکل پویا برای جریان دینامیکی ترافیک طراحی شده است. این مدل دربرگیرنده تخمین پارامترهای ضروری ترافیکی از جمله تأخیر مورد انتظار، ظرفیت برای خودروهایی که عوارض پرداخت می‌کنند و توزیع ارزش زمانی هر مسافر است. تابع هدف این روش با انعطاف بالا می‌تواند جهت کاهش تأخیرها و یا افزایش میزان درآمد تغییر یابد. در پژوهش لو و همکاران یک روش خودآموز برای یافتن استراتژی

اصل تعادل استفاده‌کنندگان و یا از اصل کورنوت-نش پیروی می‌کنند و در نهایت به حل مسئله پرداخته‌اند.

لو و همکاران استراتژی قیمت‌گذاری تراکم ایستا در شبکه حمل‌ونقلی با فرض محدود بودن آگاهی تصمیم‌گیرندگان را مورد بررسی قرار داده‌اند. تحت این فرض، استفاده‌کنندگان از شبکه لزوماً سریع‌ترین و یا ارزان‌ترین مسیر را انتخاب نمی‌کنند. به همین دلیل زمان سفر این مسافران به میزان قابل توجهی تحت سناریوهای قیمت‌گذاری کاهش پیدا نمی‌کند. برای این منظور از یک مدل مسیر-مبنای محدودشده به لینک‌ها برای تعادل استفاده‌کنندگان با هوشمندی محدود ارائه شده است. این مسئله، یک مسئله غیرمحدب است. بهترین و بدترین توزیع تعادل استفاده‌کنندگان با حل این مسئله به دست می‌آید.

هسان و همکاران در این مقاله با ارائه یک مدل پویای شبیه‌ساز مبنای حل مسئله قیمت‌گذاری با تابع هدف بیشینه کردن درآمد، با محدودیت میانگین سرعت و میانگین حجم ترافیکی عبوری مشخص شده، پرداخته‌اند. در این مقاله پیوستگی اعداد اختصاص یافته برای عوارض و همچنین فاکتورهای رفتاری رانندگان همچون تمایل به پرداخت آن‌ها در نظر گرفته شده است. با این موارد کارایی این مدل در پروژه‌های واقعی شهری نیز افزایش می‌یابد. در ادامه این مدل به یک مدل در لحظه برای استفاده تبدیل شده است.

## ۲-۵- روش‌های تحلیلی

چانگ و همکاران روش قیمت‌گذاری پویا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا را ارائه داده‌اند. روش بهینه‌سازی استوار با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در جهت یافتن عوارض بهینه در وضعیت تعادل پویای استفاده‌کنندگان به کار گرفته شده است. از آنجا که تقاضا به دقت نمی‌تواند مورد پیش‌بینی قرار گیرد، بنابراین مدل‌های ارائه شده زیر مجموعه‌ای از حالت بهینه خواهند شد. گاردنر و همکاران روش‌هایی برای ارائه‌ی مدلی استوار در برابر عدم قطعیت نوسانات تقاضا را مورد بررسی قرار داده‌اند. سه روش استوار تورم یا تقلیل تقاضای طراحی، میانگین عوارض حاصل از طراحی تحت سناریوهای مختلف تقاضا و الگوریتم ژنتیک ارائه شدند. همچنین این نویسنده در پژوهشی دیگر در همین رابطه دو روش تقرب تورمی تک نقطه‌ای و چند نقطه‌ای را با دو الگوریتم فراکاوشی ژنتیک و شبیه‌ساز تبرید سازگار را از لحاظ میزان محاسبات مورد بررسی قرار داد.

وو و همکاران مدلی بر اساس در نظر گرفتن اثر میزان درآمد مسافران بر ایجاد سفر، انتخاب مد و مسیر در شبکه حمل‌ونقل چندمدی و یافتن اثرات توزیعی سیاست‌های قیمت‌گذاری بر هر یک از گروه‌ها ارائه داده‌اند. این مسئله نیز با برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های تعادلی فرمول‌بندی شده است. نی و همکاران در پژوهشی با ارائه‌ی یک برنامه‌ی اعتبار قابل معامله، برای مدیریت انتخاب‌های سفر مسافران، به دنبال پراکنده‌کردن سفرها به شکل مساوی در راه‌های اصلی و راه‌های جایگزین فرعی می‌باشند. برنامه به این صورت است که یک پنجره زمانی برای ساعت اوج ترافیکی تعریف می‌شود و برای هر فرد، یک اعتبار معین برای استفاده در این ساعات تخصیص داده شده است. به افرادی که در این زمان سفر نمی‌کنند یا از مسیرهای جایگزین استفاده می‌کنند، پاداش داده می‌شود. افرادی که اعتبارشان تمام یافته است می‌توانند از سایر افراد اعتبار خریداری کنند.

لاوفونگپانیش و همکاران دو مدل عوارض دوم بهترین ارائه دادند. یک مدل بر مبنای تقاضای ثابت و دیگری بر مبنای تقاضای متغیر به شکل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت تعادلی است. چند فرم فرمول‌بندی برای برنامه‌ریزی غیرخطی معادل مطرح شده است. یک فرمول‌بندی منجر به ویژگی‌هایی گردید که بیشتر از منظر اقتصادی حمل‌ونقل مورد توجه است. دیگری به ارائه الگوریتم برای حل مسائل بزرگ مقیاس برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی منجر شد. ویژگی این روش آن است که در عمل به راحتی قابل اعمال است.

جاکسیموویچ و همکاران با ارائه مدل دوسطحی، برای بهینه‌سازی عوارض به تأثیرات انواع عوارض ایستا و پویا بر تصمیم استفاده‌کنندگان از مسیر پرداخته‌اند. این تأثیرات هم از نظر تغییر مسیر و هم از لحاظ تغییر ساعت سفر مورد بررسی قرار گرفته است و فرمول‌بندی این مسئله نیز به شکل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های تعادلی است.

بنابر سازمان آژداره‌های فدرال آمریکا بیش از ۲۵ درصد درآمد حاصل از عوارض آژداره‌ها صرف نگهداری آژداره می‌شود و این درصد در حال رشد است. چو و همکاران مدلی ارائه دادند که خودروها بر اساس میزان آسیب‌ی که در جریان‌های ترافیک مختلف بر راه‌ها وارد می‌کنند عوارض پرداخت خواهند کرد.

## ۲-۶- روش‌های شبیه‌ساز مینا

ژنگ و همکاران در این مقاله یک برنامه قیمت‌گذاری تراکم ناحیه-مینا در شبکه چند شیوه‌ای شهری با احتساب ناهمگنی ارزش زمانی کاربران را، مورد مطالعه قرار داده‌اند. این مدل، شبیه‌ساز مینا و به شکل پویا عمل می‌کند. رفتار رانندگان بر اساس عوارض دریافت شده مورد تحلیل قرار می‌گیرد و برای بازه زمانی بعدی، عوارض بهینه انتخاب می‌گردد، همچنین درآمد حاصل از این عوارض به صورت تشویق‌ها و یارانه به استفاده‌کنندگان از حمل‌ونقل عمومی جهت ترغیب برای تغییر مد حمل‌ونقلی بازگردانده می‌شود.

دونگ و همکاران در این مقاله مزایای قیمت‌گذاری بر مینای پیش‌بینی وضعیت جریان ترافیک؛ نسبت به قیمت‌گذاری با اطلاعات گذشته‌ی تقاضا به صورت آفلاین را مورد بررسی قرار داده‌اند. هر دو این روش‌ها نسبت به زمان متغیر هستند، در حالی که حالت اول به شکل در- لحظه جریان را مشاهده کرده و رقم عوارض را انتخاب می‌کند ولی دومی به صورت آفلاین است. تابع هدف این کار، بالاترین سطح سرویس ممکن در مطالعه موردی شهر بالتیمور تعریف شده است. در این مدل از کالیبراسیون آنلاین شبکه استفاده شده است.

هی و همکاران توابع هدف مختلف بر روی مسیر جاده‌ای شامل پنج نقطه عوارض از ماری‌لند را مورد بررسی قرار گرفته داده‌اند. بهینه‌سازی کارآمدی شبکه، فاکتورهای ایمنی، قابلیت اطمینان شبکه، درآمد و فاکتورهای اقتصادی شبکه از جمله اهداف این پژوهش است. در این مقاله از چارچوب شبیه‌ساز مینا استفاده شده است، اما به دلیل هزینه محاسباتی بالای شبیه‌سازهای ترافیکی و توابع هدف، در این مقاله تابع هدف جایگزینی برای شبیه‌سازی نیز ارائه گردیده است، تا با صرف بودجه محاسباتی کمتر فرآیند شبیه‌سازی انجام پذیرد.

چن و همکاران برای کاهش هزینه محاسباتی مدل‌های بهینه‌سازی عوارض شبکه حمل‌ونقلی در مقیاس بزرگ؛ روشی جایگزین برای کاهش میزان محاسبات شبیه‌ساز مینای تخصیص ترافیک پویا ارائه کرده‌اند. برای میزان کردن پارامترهای این مدل از الگوریتم جستجوی قطعی تنظیم شده با بهینه‌سازی لایزیشی استفاده شده است. همچنین برای ایجاد یک تعادل بین توابع هدف مختلف از جمله کمینه‌کردن میانگین زمان سفر، بیشینه کردن میزان گذردهی خودروها و یا بیشینه کردن درآمد حاصل از عوارض، تمامی این اهداف در یک تابع هدف خلاصه شده

است. همچنین الگوی کلی این چارچوب، دریافت عوارض بر مینای میانگین مایل سفر شده تعیین شده است. همچنین همین نویسنده با همان چارچوب قبلی، این بار با تابع هدف بیشینه‌کردن قابلیت اعتماد مدل شبیه‌ساز مینا را توسعه دادند. دپالما و همکاران از مدل شبیه‌ساز مینا برای مطالعه موردی بر روی شهری که ساختار شعاعی با معابر اصلی شعاعی که به مرکز شهر متصل می‌شوند استفاده کرده‌اند. شش تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است.

- ۱- قیمت‌گذاری وابسته به زمان برای کاهش طول صف شبکه
- ۲- قیمت‌گذاری غیر وابسته به زمان
- ۳ و ۴- قیمت‌گذاری وابسته به و مستقل از زمان کوردون مینا
- ۵ و ۶- قیمت‌گذاری وابسته به و مستقل از زمان ناحیه مینا

گاپتا و همکاران، مدل در لحظه‌ی فعال برای پیش‌بینی وضعیت ترافیک و اعمال کنترل‌کننده‌هایی از جمله عوارض و یا محدودیت بر رمپ‌ها ارائه داده‌اند. این مدل به شکل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی با هدف کمینه‌کردن زمان سفر، فرمول‌نویسی شده است، که با یک الگوریتم ژنتیک مقیاس‌پذیر حل و سپس بر روی شبکه آزادراه‌های شهر سنگاپور اعمال شده است. در این بخش مشخص شد، قیمت‌گذاری عوارض به صورت پویا و متغیر نسبت به زمان، از لحاظ کارایی در بهبود معیارهای عملکرد شبکه و عدالت اجتماعی عملکرد بهتری دارد. همچنین ثابت بودن ارزش زمانی افراد موجب نتایجی دور از واقعیت است و در موضوع عدالت اجتماعی، اثرات نامطلوبی دارد.

از این دو نتیجه برای صورت‌بندی این پژوهش استفاده شده است. در این پژوهش زمان سفر شبکه به عنوان مهم‌ترین معیار عملکرد شبکه، برای تابع هدف در نظر گرفته شده است. در مطالعات همچنان مسئله هزینه‌ی محاسباتی برای بهینه‌سازی معیارهای عملکرد شبکه در ابعاد واقعی شهر یک مسئله جدی است. در این مقاله سعی بر آن شده تا علاوه بر کاهش زمان سفر؛ سرعت همگرایی مدل نیز به میزان قابل توجهی نسبت به سایر مدل‌ها افزایش یابد تا در مسائل واقعی کاربردی باشد. در ادامه در بخش روش تحقیق به الگوریتم فراکاوشی استفاده شده و روش‌های روش‌های ناحیه‌بندی جمعیت جستجو پرداخته خواهد شد.

### ۳- روش تحقیق

در این بخش روش تحقیق به کار گرفته شده در این مقاله بیان می‌شود. مساله بهینه‌سازی زمان سفر به وسیله در نظر گرفتن ارقام عوارض آزادراه‌های درون‌شهری به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری یک مسئله دوسطحی است؛ که در سطح پایین این مسئله مدل تخصیص پویای سفر با محدودیت‌های تعادلی قرار دارد و در سطح بالای این مسئله بهینه‌سازی زمان سفر با متغیرهای ارقام عوارض قرار دارد. در این بخش ابتدا مدل‌سازی ریاضی مسئله ارائه می‌گردد. سپس به معرفی مدل تخصیص سفر پویای استفاده شده در این مقاله پرداخته شده است.

$$\min T = \sum_{k \in A} \sum_{t \in D} x_k^{t*} \times f_k^t(y_k^t, x_k^{t*}) \quad (1)$$

Subject to:

$$y_k^t = \frac{1}{100} \times m_k^t \quad \forall k \in A, t \in D \quad (2)$$

$$m_{k \min}^t \leq m_k^t \leq m_{k \max}^t \quad \forall k \in A, t \in D, m \in \mathbb{N} \quad (3)$$

$$\min C = \sum_{k \in A} \sum_{t \in D} \sum_{v \in V} \int_0^{x_{k,v}^{t*}} c_{k,v}^t(y_k^{t*}, w) dw \quad (4)$$

$$x_k^t = \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} h_p^d \times \alpha_{pk}^{dt} \quad \forall k \in A, t \in D \quad (5)$$

$$q_{rs}^d = \sum_{p \in P_{rs}} h_p^d \quad \forall r \in Z, s \in Z, d \in D \quad (6)$$

$$h_p^d \geq 0 \quad \forall p \in P, d \in D \quad (7)$$

$$\alpha_{pk}^{dt} = (0, 1) \quad \forall p \in P, d \in D, t \in D, k \in K_p \quad (8)$$

$$\sum_{t \in D} \alpha_{pk}^{dt} = 1 \quad \forall p \in P, d \in D, k \in K_p \quad (9)$$

$$b_{pn}^d = \sum_{t \in D} \sum_{k \in K_{pn}} f_k^t(x_k^t) \times \alpha_{pk}^{dt} \quad (10)$$

$$\forall p \in P, n \in N, d \in D$$

$$[b_{pn}^d - t\Delta t] \times \alpha_{pk}^{dt} \leq 0 \quad (11)$$

$$\forall p \in P, n \in N, d \in D, t \in D, k \in A_n$$

$$[b_{pn}^d - (t-1)\Delta t] \times \alpha_{pk}^{dt} \geq 0 \quad (12)$$

$$\forall p \in P, n \in N, d \in D, t \in D, k \in A_n$$

در روابط ارائه شده، متغیرها به شرح زیر هستند.

$T$ : زمان سفر کل شبکه به عنوان تابع هدف کمیته‌سازی زمان سفر

$C$ : هزینه کل سفرها به عنوان تابع هدف مسئله تخصیص سفر

$N$ : مجموعه تمام نقاط شبکه

$V$ : مجموعه ارزش زمانی گروه‌های جمعیت

$A_n$ : مجموعه تمام لینک‌های شبکه که به نقطه مرتبط  $n$

$Z$ : مجموعه تمام ناحیه‌ها به عنوان مبدأ یا مقصد سفرها

$P$ : مجموعه تمام مسیرهای بین تمامی مبدأ و مقصدها

$P_{rs}$ : مجموعه تمام مسیرهای بین مبدأ  $r$  و مقصد  $s$

$K_p$ : مجموعه تمام لینک‌ها بر روی مسیر  $p$

$K_{pn}$ : مجموعه تمام لینک‌ها بر روی مسیر  $p$  قبل از نقطه  $n$

$\Delta t$ : مدت هر بازه زمانی

$D$ : مجموعه تمام بازه‌های زمانی در دوره تخصیص سفر

$x_k^t$ : میزان جریان تمام مبدأ به مقصدها در بازه زمانی  $t$

و بر روی کمان  $k$

$x_k^{t*}$ : میزان جریان تمام مبدأ به مقصدها در بازه زمانی  $t$

و بر روی کمان  $k$  در حالت بهینه پس از تخصیص

$f_k^t(x_k^t)$ : زمان سفر کمان  $k$  در بازه زمانی  $t$

$f_k^{t*}$ : زمان سفر بهینه کمان  $k$  در بازه زمانی  $t$  پس از تخصیص

$b_{pn}^d$ : زمان سفرهای شروع شده از مبدأ  $n$  از مسیر  $p$  در بازه

زمانی  $d$

$q_{rs}^d$ : مجموع تمام سفرهای شروع شده از مبدأ  $r$  به سمت

مقصد  $s$  در بازه زمانی  $d$

$h_p^d$ : تعداد سفرهای تخصیص یافته به مسیر  $p$  در زمان شروع

سفر در بازه زمانی  $d$

$\alpha_{pk}^{dt}$ : یک متغیر با مقدار یک یا صفر برای مشخص کردن

وجود یا عدم وجود جریان در بازه زمانی  $t$  در مسیر  $p$  بر روی

کمان  $k$  که در بازه زمانی  $d$  آغاز به سفر کرده

$y_k^t$ : میزان عوارض برای کمان  $k$  در بازه زمانی  $t$

$y_k^{t*}$ : میزان عوارض بهینه برای کمان  $k$  در بازه زمانی  $t$

$m_k^t$ : میزان عوارض به واحد دلار

در این مدل رابطه (۱) تابع هدف مسئله برای بهینه‌سازی زمان

سفر کل شبکه در سطح بالای مدل با استفاده از متغیرهای تصمیم

ارقام عوارض است. روابط (۲) و (۳) محدودیت ارقام عوارض

هستند که به صورت گسسته بافاصله‌های یک سبیتی بین دو مقدار

۰/۵ و ۱۰ دلار است.

از رابطه (۴) تا رابطه (۱۲) مدل تخصیص پویا نشان داده شده

است. رابطه (۴) تابع هدف مسئله تخصیص سفر است که

بیان‌کننده هدف کمیته‌سازی هزینه کل سفرها براساس عوارضی

که در سطح بالای مسئله اختصاص یافته، مربوط به تمام بازه‌های

زمانی و همچنین کل گروه‌های جمعیت متعلق به ارزش‌های

زمانی متفاوت است. در مدل معرفی شده در این مقاله ۵ گروه

برای دسته‌بندی جمعیت با ارزش‌های زمانی متفاوت در نظر

گرفته شده است.

و یا عدم استفاده از آن پاکت به دو بخش تقسیم خواهد شد. یک پاکت مسیر خط پرسرعت را پیش خواهد گرفت و دیگری از سایر خطوط استفاده خواهد کرد. تعداد خودروهای تخصیص یافته به پاکت‌ها توسط مدل انتخاب لوجیت مرکب محاسبه خواهد شد. نقاط تصمیم‌گیری در شبکه تقاطعی هستند که پاکت‌ها تصمیم می‌گیرند که وارد خطوط پرسرعت شوند یا نشوند؟ پس از آنکه تمامی پاکت‌ها بارگذاری شدند، مدل زمان تراکم هر یک از گام‌های زمانی را محاسبه می‌کند. مانند سایر مدل‌های تخصیص ترافیک استاتیک مدل ELTOD درون حلقه‌های تکرار چندین بار الگوریتم را تکرار می‌کند تا به همگرایی مطلوب برسد.

زمان سفر بر روی کمان‌های شبکه بر اساس رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$Delay = (VC Ratio - Min VC) \times \frac{1}{Time Factor \times e^{VC Ratio \times VC Ratio}} \quad (14)$$

که در رابطه‌ی (۱۳) Min VC کمترین نسبت حجم به ظرفیت، VC Ratio نسبت حجم به ظرفیت است و فاکتور زمان و فاکتور نسبت حجم به ظرفیت، اعدادی هستند که از خروجی مدل‌های شبیه‌سازی به دست می‌آیند.

مدل ELTOD سفرها را در گام‌های ۱۵ دقیقه‌ای شبیه‌سازی می‌کند. تمام سفرهای مدل در یک گام زمانی به طور هم‌زمان، نقطه مبدأ را در ابتدای هر بازه‌ی ۱۵ دقیقه‌ای ترک می‌کنند. برخی از کمان‌های شبکه امکان دارد نوسان‌های جریان ترافیکی شدیدی را تجربه کنند. دلیل این امر انطباق قله‌ها و قعرهای امواج سفرهای ایجادشده از مبدأهای مختلف است. مدل ELTOD از رابطه میانگین متحرک برای روان‌سازی حجم لینک‌ها استفاده می‌کند. رابطه ELTOD نشان دهنده رابطه مورد استفاده برای روان‌سازی حجم سفرها در گام زمانی مشخص با در نظر گرفتن حجم‌ها در گام قبل و بعد از آن است.

$$Volume_i = a \times Volume_{i-1} + (1 - 2a) \times Volume_i + a \times Volume_{i+1} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)  $a$  شماره گام زمانی و  $a$  درصد وزنی حجم‌های ترافیکی گام‌های قبل و بعد از گام فعلی است. درنهایت، همگرایی مدل توسط سه متغیر ساعت-خودروی سفر کرده، عوارض، و میزان تأخیر سنجیده می‌شود. مدل زمانی به کار خود پایان می‌دهد که هر سه متغیر به همگرایی تعریف‌شده

رابطه (۵) برای یافتن جریان در کمان‌ها در بازه‌های مشخص است که بر اساس وجود یا عدم وجود کمان مشخص در مسیر سفر مبدأ به مقصد‌های مختلف، در بازه زمانی معین که در بازه زمانی  $d$  مبدأ را ترک کرده‌اند، نشان می‌دهد.

رابطه (۶) محدودیت تعادلی سفرهای آغاز شده از هر مبدأ در زمان مشخص است؛ که با مجموع سفرهای آغازشده بر روی تمام مسیرهای موجود برابر است. رابطه (۷) نیز برای آن است که میزان سفرها همواره عددی مثبت است.

رابطه (۸) و (۹) نشان دهنده آن است که جریان بر روی یک مسیر، در یک بازه‌ی زمانی، بیش از یک بار بر روی کمان مشخص شده نمی‌تواند قرار بگیرد. همچنین روابط (۱۰) تا (۱۲) این اطمینان را می‌دهد که جریان را مجبور می‌کند تا از کمان مشخص شده برای آن مسیر استفاده کند. به عبارت دیگر زمانی که جریان بر روی یک مسیر وارد یک کمان درون آن مسیر می‌شود حتماً آن کمان را تا آخر طی می‌کند و در کوتاه‌ترین مسیر می‌ماند.

در ادامه جهت تخصیص پویای ترافیک مدل زمان روزانه خطوط پرسرعت برای پیش‌بینی ترافیک و درآمد شبکه خطوط پرسرعت طراحی شده است. این مدل در بردارنده یک مدل انتخاب عوارض لوجیت چند جمله‌ای برای پیش‌بینی تفکیک ترافیک بین خطوط استفاده عمومی و خطوط پرسرعت است.

مدل ELTOD از یک عملگر سازنده کوتاه‌ترین مسیر وابسته به زمان و همچنین بارگذاری حجم سفر در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای بهره می‌برد. برخلاف مدل‌های شبیه‌ساز خردنگر که در هر ثانیه هر یک از خودروها را شبیه‌سازی می‌کند این مدل خودروها را درون پاکت‌هایی قرار داده و حرکت هر یک از این پاکت‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. زمان سفر ترافیک بر اساس تابع تأخیر حجم ترافیکی شبیه به آنچه در مدل‌های تخصیص سفر استاتیکی است؛ محاسبه می‌شود. طراحی کلان‌نگر، ملزومات ورودی شبکه را به میزان قابل توجهی کاهش داده و زمان اجرای مدل را کوتاه می‌کند.

پاکت‌ها، نماینده خودروهایی هستند که دارای یک مبدأ-مقصد، یک زمان آغاز سفر، یک کلاس خودرو و یک ارزش زمانی سفر هستند. یک پاکت تعدادی سفر را از ورودی داده‌های سفر دریافت می‌کند و در مسیری که توسط سازنده کوتاه‌ترین مسیر مشخص شده است حرکت می‌کند. زمانی که به نقطه تصمیم‌گیری می‌رسد با محاسبه احتمال ورود به خط پرسرعت

در شکل (۱) شبکه مورد مطالعه که بخشی از شبکه معابر جنوب ایالت فلوریدای آمریکا به طول : ۶۹۷/۴۲۰۳ کیلومتر است نمایش داده شده است. مدل‌سازی سفرها از ساعت ۶:۰۰ صبح تا ۹:۰۰ شب انجام شده است. سایر ویژگی‌های تقاضا در زیر آورده شده است.

- ابعاد ماتریس مبدأ-مقصد : ۲۹۶×۲۹۶

- تعداد بازه های زمانی : ۶۰

- تعداد سفرهای گروه اتومبیل ۱ با ارزش زمانی ۴/۱۷ دلار برای هر ساعت : ۶۸۲۴۲۷/۸

- تعداد سفرهای گروه اتومبیل ۲ با ارزش زمانی ۹/۶۸ دلار برای هر ساعت : ۴۰۱۵۰۸/۱

- تعداد سفرهای گروه اتومبیل ۳ با ارزش زمانی ۱۶/۰۷ دلار برای هر ساعت : ۲۷۹۲۶۴/۲

- تعداد سفرهای گروه اتومبیل ۴ با ارزش زمانی ۲۵/۸۶ دلار برای هر ساعت : ۲۹۲۶۱۴/۶

- تعداد سفرهای گروه اتومبیل ۵ با ارزش زمانی ۵۵/۱ دلار برای هر ساعت : ۳۰۸۳۹۹/۶

- تعداد سفر اتوبوس : ۱۱۹۰۲۳

در جدول (۱) میزان تقاضای سفرها به تفکیک هر بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای نشان داده شده است.

برسند. تفاوت درصد مطلق هر کمان توسط رابطه (۱۳) که بیانگر تکرار حاضر و تکرار قبل است، محاسبه می‌شود.

$$Gap = \frac{\sum_i^k |v_t - v_{t-1}|}{\sum_i^k v_{t-1}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $v$  میزان متغیر است؛ که توسط حجم کمان‌ها وزن دهی،  $t$  شماره تکرار حاضر و  $t-1$  شماره لینک است.

در این مقاله مدل بهینه‌سازی عوارض آزادراه‌های درون‌شهری به روش بهینه‌سازی دوسطحی ارائه شد. زمان سفر کل شبکه که خروجی مدل ELTOD است، به عنوان مقدار تابع هدف آن پاسخ، در نظر گرفته می‌شود. سپس دوباره الگوریتم بر مبنای منطق و روش خود و بر اساس پاسخ‌های مرحله قبل و مقدار تابع هدف آن‌ها، به تولید پاسخ‌های جدید می‌پردازد و مجدد تخصیص سفر با پاسخ‌های جدید که همان میزان عوارض هستند صورت می‌گیرد. این فرآیند تکراری تا برآورده شدن شرط خاتمه الگوریتم ادامه می‌یابد. جهت صحت‌سنجی و رقابت با الگوریتم معرفی شده جهت بهینه‌سازی در این مقاله، الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم محک و الگوریتم شبیه‌ساز تبرید به عنوان الگوریتم رقیب استفاده شده‌اند.

برنامه‌نویسی الگوریتم SAMP-SCE-TLBO که در این مقاله به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی عوارض آزادراه‌های درون‌شهری توسعه داده شده است، در محیط برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده است.

#### ۴- نتایج پژوهش و تفسیر آنها

در این بخش ابتدا به معرفی شبکه مورد مطالعه پرداخته شده است. برای الگوریتم معرفی شده در این پژوهش سه الگوریتم ژنتیک، شبیه‌ساز تبرید و TLBO به عنوان الگوریتم‌های رقیب اجرا شده‌اند. سپس نحوه عملکرد هر یک از چهار الگوریتم تشریح شده، نمودارهای همگرایی و همچنین جواب بهینه هر یک از این الگوریتم‌ها نشان داده خواهد شد. در آخر به مقایسه نتایج و تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که هر یک از الگوریتم‌ها ۶۰۰۰ بار مدل تخصیص سفر را اجرا کرده‌اند. به عبارت دیگر تعداد برآورد تابع (NFE) ۶۰۰۰ بار در نظر گرفته شده است. این میزان محاسبه با سرور ۳۲ هسته‌ای تک رشته‌ای استاندارد، با فرکانس پردازش ۳/۲ گیگاهرتز و رم ۸ گیگابایتی، ۶ روز برای اجرا زمان برده است

صورت گرفته است و در این مقاله فرض بر صحت این داده‌ها است.

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- درصد جمعیت متقاطع یا فرزند: ۷۰٪

- درصد جمعیت جهش: ۳۰٪

- نرخ جهش: ۱

- فاکتور فشار انتخاب: ۱۰

- تعداد اعضای جمعیت: ۲۰

- تعداد برآورد تابع هدف: ۶۰۰۰

تنظیم پارامترهای الگوریتم شبیه ساز تبرید به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- دمای اولیه: ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

- ضریب کاهش دما: ۰/۹۹۸

- تعداد تکرار در هر دما: ۱۰

- تعداد برآورد تابع هدف: ۶۰۰۰

تنظیم پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری-آموزش مینا به شرح زیر در نظر گرفته شده است.

- تعداد اعضای جمعیت: ۲۰

- تعداد برآورد تابع هدف: ۶۰۰۰

تنظیم پارامترهای الگوریتم SAMP-SCE-TLBO به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- بیشینه‌ی تعداد زیر-جمعیت‌ها: ۴

- تعداد اعضای جمعیت در هر زیر-جمعیت: ۵

- تعداد تکرار الگوریتم برای درهم آمیختن زیر-جمعیت‌ها: ۱۰

- تعداد برآورد تابع هدف: ۶۰۰۰

تعداد برآورد تابع هدف برای همه‌ی الگوریتم‌ها یکسان و برابر ۶۰۰۰ در نظر گرفته شده است. جمعیت الگوریتم ژنتیک،

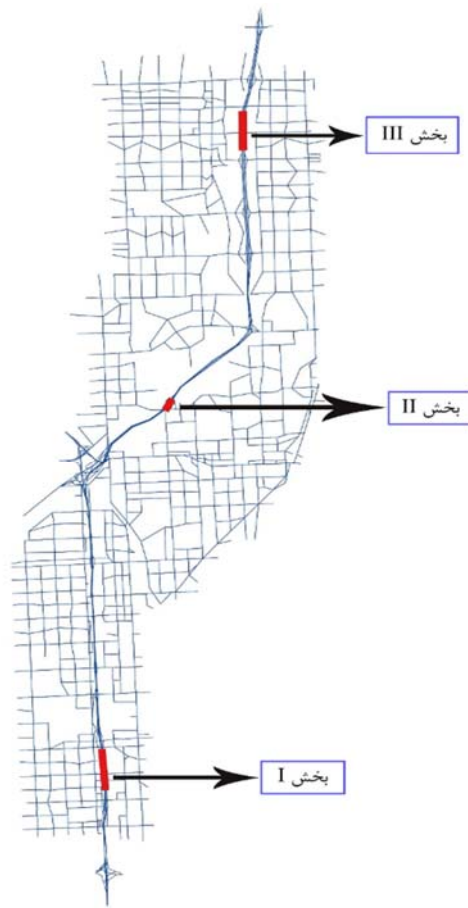
الگوریتم بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا و بیشینه جمعیت الگوریتم SAMP-SCE-TLBO برای رقابت برابر، مساوی

۲۰ در نظر گرفته شده است. از آنجاکه سایر پارامترها مقادیر متفاوتی می‌توانند داشته باشند و ترکیب این مقادیر تنوع بسیاری

زیادی از پارامترها به وجود می‌آورد و بدیهی است که هزینه‌ی محاسباتی کافی برای این مقدار از اجرای مدل مورد نظر برای

یافتن بهترین پارامترها وجود ندارد. بنابراین طبق آنچه در اغلب موارد بهینه‌سازی صورت می‌گیرد؛ تنظیم این پارامترها با استفاده

از توابع محک‌سنجیده شده است.



شکل (۱). شبکه معابر مورد مطالعه

تنظیمات و ورودی‌های مدل ELTOD شامل موارد زیر است: تنظیم بازه‌ی زمانی که در این مقاله به میزان ۱۵ دقیقه از ساعت ۶ صبح تا ۹ شب است.

- فایل ورودی مشخصات کمان‌ها با عنوان LINK.CSV، که در این فایل مشخصات لینک‌ها از جمله ظرفیت لینک‌ها، ضرایب تابع BPR و سرعت جریان آزاد است.

- فایل ورودی مشخصات نقاط با عنوان NODE.CSV، که در این فایل مشخصات عرض و طول نقاط قرار دارد و تعیین‌کننده‌ی نقاط مبدأ و مقصد سفرها نیز است.

- فایل ورودی مشخصات سفرها با عنوان TRIP.CSV، که در این فایل تعداد سفرها به تفکیک گروه‌های مختلف مردم با ارزش زمانی متفاوت و زمان آغاز سفر مشخص شده است.

لازم به ذکر است که تهیه تمامی داده‌های اشاره‌شده برای ورودی مدل ELTOD و کالیبره کردن آن‌ها توسط شرکت AECOM

جدول ۱. تقاضای مربوط به بازه‌های زمانی در طول زمان مورد مطالعه

بازه زمانی	۶:۱۵-۶:۰۰	۶:۳۰-۶:۱۵	۶:۴۵-۶:۳۰	۷:۰۰-۶:۴۵	۷:۱۵-۷:۰۰	۷:۳۰-۷:۱۵
تعداد سفر	۲۴۷۱۹,۱۵	۳۰۸۲۰,۱۷	۳۵۲۴۹,۹۶	۳۸۴۸۹,۶۵	۳۹۵۵۸,۳۹	۴۲۶۸۱,۷۷
بازه زمانی	۷:۴۵-۷:۳۰	۸:۰۰-۷:۴۵	۸:۱۵-۸:۰۰	۸:۳۰-۸:۱۵	۸:۴۵-۸:۳۰	۹:۰۰-۸:۴۵
تعداد سفر	۴۴۶۸۱,۳	۴۵۱۰۹,۷۲	۴۳۶۳۶,۲۵	۴۳۲۰۷,۱۵	۴۲۸۲۴,۲۷	۴۰۹۴۷,۷۲
بازه زمانی	۹:۱۵-۹:۰۰	۹:۳۰-۹:۱۵	۹:۴۵-۹:۳۰	۱۰:۰۰-۹:۴۵	۱۰:۱۵-۱۰:۰۰	۱۰:۳۰-۱۰:۱۵
تعداد سفر	۳۸۲۶۶,۱	۳۶۱۶۴,۳۵	۳۴۵۸۱,۶۹	۳۲۷۹۹,۷۲	۳۰۴۲۰,۳۲	۳۰۱۲۷,۵۱
بازه زمانی	۱۰:۴۵-۱۰:۳۰	۱۱:۰۰-۱۰:۴۵	۱۱:۱۵-۱۱:۰۰	۱۱:۳۰-۱۱:۱۵	۱۱:۴۵-۱۱:۳۰	۱۲:۰۰-۱۱:۴۵
تعداد سفر	۳۰۲۹۴,۹۸	۲۹۷۷۶,۵۷	۲۹۰۹۰,۴۶	۲۹۱۵۲,۳۵	۲۹۹۲۵,۵۷	۲۹۸۸۹,۲۵
بازه زمانی	۱۲:۱۵-۱۲:۰۰	۱۲:۳۰-۱۲:۱۵	۱۲:۴۵-۱۲:۳۰	۱۳:۰۰-۱۲:۴۵	۱۳:۱۵-۱۳:۰۰	۱۳:۳۰-۱۳:۱۵
تعداد سفر	۲۸۹۸۸,۰۶	۲۹۶۹۷,۲۶	۳۰۱۶۲,۰۲	۲۹۸۳۳,۲۱	۲۹۸۶۱,۶۳	۳۰۷۴۲,۵۹
بازه زمانی	۱۳:۴۵-۱۳:۳۰	۱۴:۰۰-۱۳:۴۵	۱۴:۱۵-۱۴:۰۰	۱۴:۳۰-۱۴:۱۵	۱۴:۴۵-۱۴:۳۰	۱۵:۰۰-۱۴:۴۵
تعداد سفر	۳۱۲۹۵,۲۱	۳۱۱۱۶,۸۳	۳۱۱۷۹,۳۸	۳۲۴۹۰,۷۶	۳۳۹۷۰,۲۱	۳۴۲۸۹,۳۶
بازه زمانی	۱۵:۱۵-۱۵:۰۰	۱۵:۳۰-۱۵:۱۵	۱۵:۴۵-۱۵:۳۰	۱۶:۰۰-۱۵:۴۵	۱۶:۱۵-۱۶:۰۰	۱۶:۳۰-۱۶:۱۵
تعداد سفر	۳۴۰۰۰,۵۹	۳۵۴۴۲,۰۵	۳۷۳۱۵,۲	۳۷۹۴۰,۳۳	۳۸۸۱۰,۴	۳۹۵۴۷,۴۷
بازه زمانی	۱۶:۴۵-۱۶:۳۰	۱۷:۰۰-۱۶:۴۵	۱۷:۱۵-۱۷:۰۰	۱۷:۳۰-۱۷:۱۵	۱۷:۴۵-۱۷:۳۰	۱۸:۰۰-۱۷:۴۵
تعداد سفر	۴۰۹۸۱,۲۴	۴۰۹۰۳,۵۵	۴۲۹۴۷,۹۲	۴۴۵۲۵,۲۵	۴۴۰۶۵,۷۷	۴۳۵۵۶,۲۸
بازه زمانی	۱۸:۱۵-۱۸:۰۰	۱۸:۳۰-۱۸:۱۵	۱۸:۴۵-۱۸:۳۰	۱۹:۰۰-۱۸:۴۵	۱۹:۱۵-۱۹:۰۰	۱۹:۳۰-۱۹:۱۵
تعداد سفر	۴۲۴۱۳,۱۴	۴۱۷۵۵,۱۲	۳۸۵۱۴,۰۱	۳۵۲۸۴,۳۲	۳۴۰۴۵,۴۳	۳۲۵۸۹,۷۳
بازه زمانی	۱۹:۴۵-۱۹:۳۰	۲۰:۰۰-۱۹:۴۵	۲۰:۱۵-۲۰:۰۰	۲۰:۳۰-۲۰:۱۵	۲۰:۴۵-۲۰:۳۰	۲۱:۰۰-۲۰:۴۵
تعداد سفر	۳۰۷۰۱,۳۴	۲۷۹۵۵,۴۴	۲۵۹۸۱,۰۲	۲۴۴۰۳,۷۲	۲۲۵۳۸,۹۸	۲۰۹۷۰,۹۶

عوارض در نظر گرفته شده است، بر روی شکل با خط چین‌ها این مقادیر مشخص شده است.

همان طور که در شکل (۲) مشخص است، الگوریتم SAMP-SCE-TLBO که در این مقاله توسعه داده شده است. با سرعت همگرایی بسیار بالایی نه تنها نسبت به الگوریتم TLBO بلکه نسبت به تمامی روش‌های دیگر به جواب برتر دست یافته است. اهمیت بیشتر این موضوع زمانی آشکار می‌شود که برای یافتن جواب برتر به منظور کمینه‌سازی زمان سفر کل شبکه، به خصوص در ابعاد واقعی شهری مانند مطالعه انجام شده در این مقاله، نیاز به هزینه محاسباتی بسیار بالایی است و هر چه قدر سریع‌تر به جواب حاصل شود هزینه‌ی کمتری پرداخته خواهد شد. از طرف دیگر، در عمل نیز زمان سفر کل شبکه بهبود قابل توجهی یافته است و نشان دهنده‌ی آن است که الگوریتم برای هدف تعیین شده در رقابت با سایر الگوریتم‌ها جواب مناسبی را پیدا کرده است.

نتایج حل هر چهار مدل برای شبکه با داده‌های مد نظر محاسبه شد که در شکل (۲) نمودار همگرایی الگوریتم‌های ژنتیک، شبیه‌ساز تبرید، TLBO و SAMP-SCE-TLBO برای مقایسه‌ی بهتر نتایج آورده شده است. زمان سفر شبکه مورد نظر بدون اختصاص عوارض بر روی نقاط مشخص شده، ۸۲۰۵ ساعت خواهد بود، که در شکل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد برای الگوریتم‌ها ۶۰۰۰ بار برآورد تابع هدف برای همگرایی کامل در نظر گرفته شده بود؛ که با توجه به نتایج به دست آمده و این‌که الگوریتم‌ها در بسیاری از برآوردهای تابع هدف در انتهای اجرای مدل‌ها تغییرات اندکی داشته‌اند و محدوده‌ی میزان تابع هدف تقریباً ثابت مانده است؛ نشان دهنده‌ی مناسب بودن تعداد دفعات برآورد تابع هدف است. در رویکرد دیگر به جای تعداد برآورد تابع، رسیدن تابع هدف به میزان مشخصی می‌تواند ملاک باشد. که به این منظور، ۴ میزان کاهش ۸٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۵٪ زمان سفر نسبت به حالت بدون

بیشینه جمعیت الگوریتم است، برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است. بنابراین سه حالت برای تحلیل حساسیت این الگوریتم در نظر گرفته شده است.

- بیشینه تعداد زیر-جمعیت‌ها برابر ۴ و تعداد اعضای هر زیر-جمعیت برابر ۵ که با رنگ سبز در شکل (۳) نشان داده شده است.

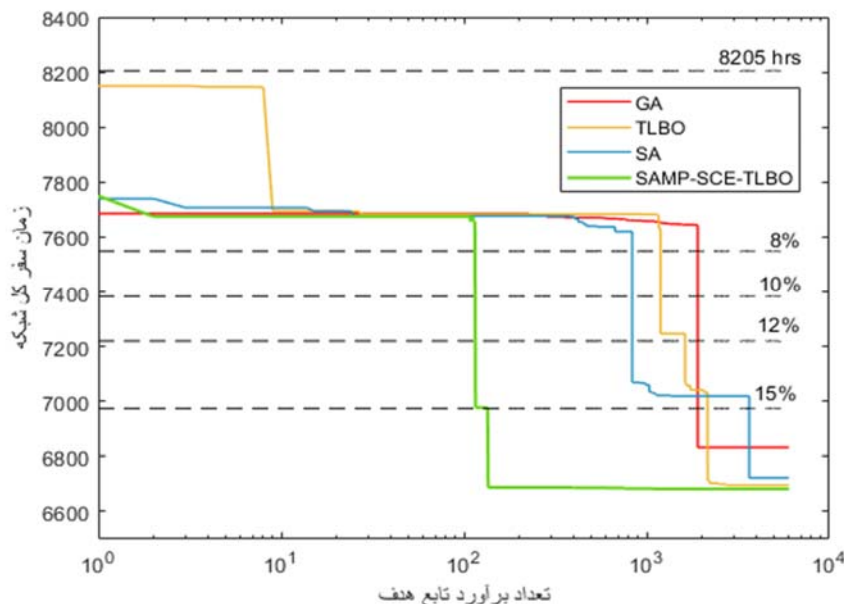
- بیشینه تعداد زیر-جمعیت‌ها برابر ۵ و تعداد اعضای هر زیر-جمعیت برابر ۴ که با رنگ قرمز در شکل (۳) نشان داده شده است.

- بیشینه تعداد زیر-جمعیت‌ها برابر ۱۰ و تعداد اعضای هر زیر-جمعیت برابر ۲ که با رنگ آبی در شکل (۳) نشان داده شده است.

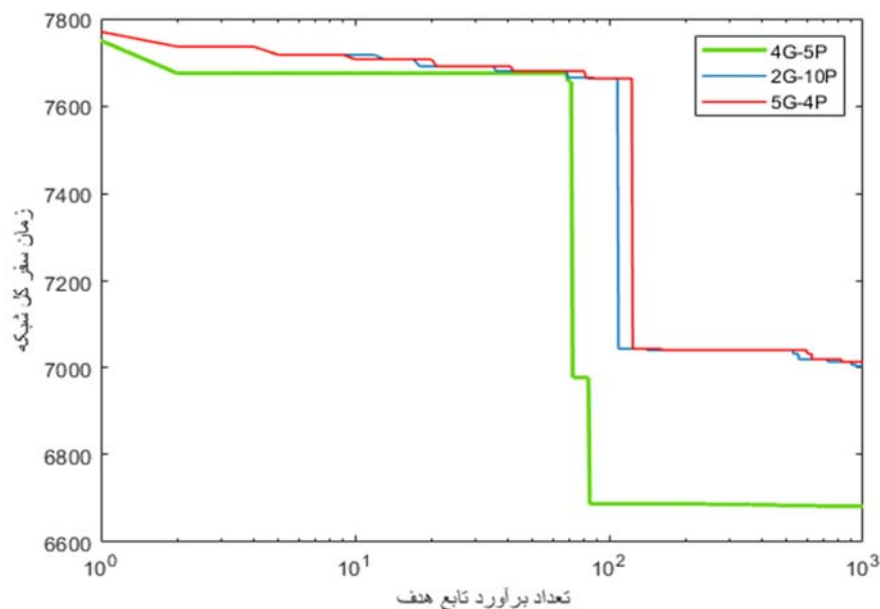
همان‌طور که در شکل (۳) مشخص شده است بهترین نتیجه برای بیشینه ۴ زیر-جمعیت با ۵ عضو برای هر زیر-جمعیت است.

علاوه بر الگوریتم SAMP-SCE-TLBO، الگوریتم شبیه‌ساز تبرید نیز با جستجوی پر دامنه که در ابتدا، نسبت به سایر الگوریتم‌های رقیب، مقدار تابع هدف بیشتری را یافته بود؛ به تدریج با ایجاد پاسخ‌های بهتر به جواب مناسبی دست پیدا کرده است.

از دیگر نقاط قوت الگوریتم توسعه داده شده در این مقاله، تعداد پارامترهای کم است. این ویژگی وابستگی الگوریتم به تنظیم پارامترها را کاهش داده و نتایج معتبری ارائه می‌کند. هر چه قدر تعداد پارامترها بیشتر باشد وابستگی الگوریتم به نحوه‌ی تنظیم این پارامترها را بیشتر می‌کند و در نتیجه با تغییرات پارامترها انواع پاسخ‌ها نیز تغییر کرده و سختی استفاده الگوریتم را بیشتر و هزینه تنظیم و یافتن بهترین پارامترها را بیشتر می‌کند. برای رقابت بهتر الگوریتم‌ها با یکدیگر تعداد جمعیت هم‌ی الگوریتم‌ها در این مقاله ۲۰ عضو و تعداد برآورد تابع هدف ۶۰۰۰ بار در نظر گرفته شده است. تنها دو متغیر در الگوریتم SAMP-SCE-TLBO غیر از پارامترهای اشاره شده که ثابت در نظر گرفته شده‌اند، می‌توانند تغییر کنند. برای حفظ رقابت این الگوریتم با سایر الگوریتم‌ها، حاصل ضرب این دو متغیر که میزان



شکل ۲. نمودار همگرایی الگوریتم‌ها در مقیاس خطی



شکل ۳. نمودار تحلیل حساسیت الگوریتم SAMP-SCE-TLBO

## ۵- نتیجه گیری

الگوریتم های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک استفاده شده است، که البته این الگوریتم ها در یافتن پاسخ جدید سرعت مورد نظر را ندارد. با توجه به اینکه در ابعاد واقعی شهرها، هزینه محاسباتی این مسئله بسیار بالا است لذا سرعت و دقت الگوریتم جستجوگر بسیار مهم است، لذا در این مقاله از یک روش چند جمعیتی فراکاوشی برای حل مسئله استفاده شده است. در این مقاله برای تخصیص سفر در سطح پایین مسئله، از مدل ELTOD که یک مدل مزوسکوپییک است؛ استفاده شده است. در اصل این مدل بین مدل های میکروسکوپییک و ماکروسکوپییک است و سعی دارد مزیت های هر دوی این مدل ها را دربرداشته باشد. یعنی از طرفی دقت مدل های خردنگر و سرعت مدل سازی مدل های تحلیلی را دارد.

در سطح بالای مدل یک الگوریتم فراکاوشی چند جمعیتی مورد استفاده قرار گرفته است. هسته ی این الگوریتم، الگوریتم بهینه سازی آموزش-یادگیری مینا است. الگوریتم بهینه سازی آموزش-یادگیری مینا از دو فاز یادگیری و فاز آموزش تشکیل شده است. در فاز یادگیری میانگین، تمام جمعیت بر روی بهترین جواب منتقل می شود و در فاز آموزش، عضو جمعیت انتخاب شده با یکی از اعضای دیگر که به صورت تصادفی انتخاب شده است مقایسه می شود و اگر بهتر باشد به آن نزدیک و اگر بدتر

قیمت گذاری تراکم و دریافت عوارض از آزادراه ها و بزرگراه های درون شهری در مطالعات از دو رویکرد اقتصادی و بهینه سازی با توجه به معیارهای عملکرد شبکه در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. در رویکرد اقتصادی به دلیل هزینه بالای تملک اراضی، زیرساخت ها، روسازی، نگهداری و سایر هزینه ها و همچنین هزینه هایی که تراکم ترافیک به دنبال دارد دریافت عوارض امری ضروری قلمداد می شود. همچنین از رویکرد بهینه سازی معیارهای عملکرد شبکه با اهدافی همچون کمینه سازی زمان سفر، کمینه سازی آلاینده ها، بیشینه سازی میزان عبوری خودروها، بیشینه سازی درآمد حاصل از عوارض مورد توجه قرار می گیرد. مسئله بهینه سازی عوارض یک مسئله غیر محدب، عدد صحیح و دو سطحی است که در سطح پایین آن مسئله تخصیص سفر حل می شود. در مطالعات صورت گرفته مسئله تخصیص با انواع مدل های میکروسکوپییک و ماکروسکوپییک مدل سازی شده اند. حل مسئله بهینه سازی عوارض به دلیل غیرمحدب بودن با روش های ریاضیاتی دقیق مانند روش شیب-مینا قابل حل نیست؛ زیرا امکان یافتن جواب محلی بسیار بالا می رود به همین منظور استفاده از روش های فراکاوشی که دربرگیرنده مفاهیم ساده تری نیز هستند بسیار کارآمد خواهد بود. در مطالعات صورت گرفته از برخی از

مسافران در شبکه مطالعه شده، می‌توان رقم‌های عوارض یافته‌شده را به عنوان میزان عوارض در ایستگاه‌های مطالعه شده در این پژوهش اختصاص داد که در نتیجه آن کاهش بیش از ۱۸٪ زمان سفر کل شبکه و کاهش بسیاری از مشکلات اشاره شده است. دومین مورد، در این پژوهش یک الگوریتم چندجمعیتی فراکاووشی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا توسعه داده شده است. این الگوریتم در این مسئله که دارای ویژگی‌های خاص و پیچیدگی‌هایی همچون غیرمحدب بودن فضای جستجو، ابعاد بالای مسئله و عدد صحیح بودن آن است، هم از لحاظ بهبود پاسخ و هم از لحاظ سرعت رسیدن به پاسخ‌های بهتر، برتری قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های رقیب دارد. بنابراین در سایر مسائل بهینه‌سازی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۶-مراجع

-Bonsall, P., Shires, J., Maule, J., Matthews, B., & Beale, J. (2007). Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(7), 672-683.

[doi.org/10.1016/J.TRA.2006.06.001](https://doi.org/10.1016/J.TRA.2006.06.001)

-Chen, X. M., Xiong, C., He, X., Zhu, Z., & Zhang, L. (2016). Time-of-day vehicle mileage fees for congestion mitigation and revenue generation: A simulation-based optimization method and its real-world application. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 63, 71-95.

[doi.org/10.1016/J.TRC.2015.12.001](https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.12.001)

-Chen, X. (Michael), Zhang, L., He, X., Xiong, C., & Zhu, Z. (2017). Simulation-based pricing optimization for improving network-wide travel time reliability. *14*(1-2), 155-176.

[doi.org/10.1080/23249935.2017.1379038](https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1379038)

-Cheng, Q., Chen, J., Zhang, H., & Liu, Z. (2021). Optimal Congestion Pricing with Day-to-Day Evolutionary Flow Dynamics: A Mean-Variance Optimization Approach. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 4931, 13*(9), 4931.

[doi.org/10.3390/SU13094931](https://doi.org/10.3390/SU13094931)

-Chu, C.-P., & Tsai, J.-F. (2004). Road Pricing models with maintenance cost. *Transportation* 2004 31:4, 31(4), 457-477.

[doi.org/10.1023/B:PORT.0000037059.61327.13](https://doi.org/10.1023/B:PORT.0000037059.61327.13)

-Chung, B. Do, Yao, T., Friesz, T. L., & Liu, H. (2012). Dynamic congestion pricing with demand

باشد از آن دور می‌شود. روش چند جمعیتی این مدل نیز از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول ابتدا یک جمعیت با تعداد اعضای معین جستجو را آغاز می‌کنند و در هر تکرار شرط همگرایی اعضا بررسی می‌شود و در صورت همگرایی یک جمعیت تصادفی دیگر ایجاد می‌گردد. این فرایند تا رسیدن تعداد جمعیت‌ها به جمعیت مشخص شده ادامه دارد. هر یک از این جمعیت‌ها به شکل جداگانه الگوریتم بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا را اجرا می‌کنند. در آخر نیز با همگرا شدن تمام جمعیت‌ها، جمعیت بدتر حذف شده و مجدد جمعیت تصادفی جدید تشکیل می‌شود. در بخش دوم نیز پس از چندین مرحله تکامل جمعیت‌ها، همگی با هم ترکیب می‌شوند و از نو جمعیت‌ها به تعداد جمعیت قبل از ترکیب، تقسیم‌بندی می‌شوند. این دو مرحله جستجوی کل فضای مورد نظر را در بردارد و در عین حال هزینه محاسباتی را دقیقاً در محلی هزینه می‌کند که ارزش جستجوی بالایی دارد.

برای الگوریتم پیشنهاد شده، سه الگوریتم ژنتیک، شبیه‌ساز تبرید و بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا به عنوان رقیب آورده شده‌اند تا کارایی الگوریتم پیشنهاد شده دقیق‌تر بررسی شود. هر یک از الگوریتم‌ها ۶۰۰۰ بار تابع هدف را که همان مدل ELTOD است را اجرا کرده‌اند؛ الگوریتم ژنتیک میزان زمان سفر کل شبکه را از ۸۲۰۵ ساعت به ۶۸۳۲ ساعت رسانده است. الگوریتم بهینه‌سازی آموزش-یادگیری مینا زمان سفر کل شبکه را از ۸۲۰۵ ساعت به ۶۷۳۲ ساعت رسانده است. الگوریتم بهینه‌سازی شبیه‌ساز تبرید زمان سفر کل شبکه را از ۸۲۰۵ ساعت به ۶۶۹۶ ساعت رسانده است. در نهایت، الگوریتم بهینه‌سازی SAMP-SCE-TLBO که در این مقاله معرفی شده است، زمان سفر کل شبکه را از ۸۲۰۵ ساعت به ۶۶۸۳ ساعت رسانده است. این امر مشخص می‌سازد که الگوریتم ارایه شده در بهبودی زمان سفر در تعداد برآورد تابع هدف یکسان، نسبت به سایر الگوریتم‌ها نتیجه بهتری داشته است.

در این تحقیق، این الگوریتم با هزینه محاسباتی مناسب در رسیدن به مقادیر معینی از بهبود زمان سفر، نتیجه بهتری داده است.

نتایج این تحقیق در دو مورد کاربردی است. اولین مورد برای کنترل و کاهش تراکم ترافیکی و در نتیجه کاهش مشکلات حاصل از آن مانند از دست دادن زمان مسافران، آلودگی هوا، مصرف سوخت بیشتر و مشکلات روانی، پیرو هدر رفتن زمان

- Gupta, S., Seshadri, R., Atasoy, B., Prakash, A. A., Pereira, F., Tan, G., & Ben-Akiva, M. (2020). Real-Time Predictive Control Strategy Optimization. *2674(3)*, 1–11.  
**doi.org/10.1177/0361198120907903**
- Han, L., Wang, D. Z. W., Lo, H. K., Zhu, C., & Cai, X. (2017). Discrete-time day-to-day dynamic congestion pricing scheme considering multiple equilibria. *Transportation Research Part B: Methodological*, *104*, 1–16.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2017.06.006**
- Hassan, A., Abdelghany, K., & Semple, J. (2013). Dynamic Road Pricing for Revenue Maximization: Modeling Framework and Solution Methodology. *2345*, 100–108.  
**doi.org/10.3141/2345-13**
- He, X., Chen, X. (Michael), Xiong, C., Zhu, Z., & Zhang, L. (2016). Optimal Time-Varying Pricing for Toll Roads under Multiple Objectives: A Simulation-Based Optimization Approach. *0661*, *51(2)*, 412–426.  
**doi.org/10.1287/TRSC.2015.0661**
- Jang, K., Chung, K., & Yeo, H. (2014). A dynamic pricing strategy for high occupancy toll lanes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *67*, 69–80.  
**doi.org/10.1016/J.TRA.2014.05.009**
- Joksimovic, D., Bliemer, M. C. J., & Bovy, P. H. L. (2005). Optimal Toll Design Problem in Dynamic Traffic Networks with Joint Route and Departure Time Choice. *1923(1)*, 61–72.  
**doi.org/10.1177/0361198105192300107**
- Labbé, M., Marcotte, P., & Savard, G. (1998). A bilevel model of taxation and its application to optimal highway pricing. *Management Science*, *44(12 PART 1)*, 1608–1622.  
**doi.org/10.1287/MNSC.44.12.1608**
- Lawphongpanich, S., & Hearn, D. W. (2004). An MPEC approach to second-best toll pricing. *Mathematical Programming 2004 101:1*, *101(1)*, 33–55.  
**doi.org/10.1007/S10107-004-0536-5**
- Liu, L. N., & McDonald, J. F. (1999). Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, *33(3)*, 157–188.  
**doi.org/10.1016/S0191-2615 (98)00025-3**
- Liu, Z., Wang, S., Zhou, B., & Cheng, Q. (2017). Robust optimization of distance-based tolls in a network considering stochastic day to day uncertainty: A robust optimization approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, *46(10)*, 1504–1518.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2012.07.007**
- Daganzo, C. F., & Lehe, L. J. (2015). Distance-dependent congestion pricing for downtown zones. *Transportation Research Part B: Methodological*, *75*, 89–99.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2015.02.010**
- de Palma, A., Kilani, M., & Lindsey, R. (2005). Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *39(7–9)*, 588–611.  
**doi.org/10.1016/J.TRA.2005.02.018**
- de Palma, A., & Lindsey, R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *19(6)*, 1377–1399.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2011.02.010**
- Dong, J., Mahmassani, H. S., Erdoğan, S., & Lu, C. C. (2011). State-dependent pricing for real-time freeway management: Anticipatory versus reactive strategies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *19(4)*, 644–657.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2010.10.001**
- Eliasson, J., & Mattsson, L. G. (2006). Equity effects of congestion pricing: Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *40(7)*, 602–620.  
**doi.org/10.1016/J.TRA.2005.11.002**
- Friesz, T. L., Bernstein, D., & Kydes, N. (2004). Dynamic Congestion Pricing in Disequilibrium. *Networks and Spatial Economics 2004 4:2*, *4(2)*, 181–202.  
**doi.org/10.1023/B:NETS.0000027772.43771.94**
- Gardner, L. M., Unnikrishnan, A., & Waller, S. T. (2008). Robust Pricing of Transportation Networks under Uncertain Demand. *2085*, 21–30.  
**doi.org/10.3141/2085-03**
- Gardner, L. M., Unnikrishnan, A., & Waller, S. T. (2010). Solution Methods for Robust Pricing of Transportation Networks under Uncertain Demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *18(5)*, 656–667.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2009.09.004**
- Guo, R.-Y., Yang, H., Huang, H.-J., & Tan, Z. (2015). Day-to-Day Flow Dynamics and Congestion Control. *50(3)*, 982–997.  
**doi.org/10.1287/TRSC.2015.0596**

- Yang, H. (1999). System Optimum, Stochastic User Equilibrium, and Optimal Link Tolls. 354–360.  
**doi.org/10.1287/TRSC.33.4.354**
- Yang, H. (2005). Mathematical and Economic Theory of Road Pricing. In *Mathematical and Economic Theory of Road Pricing*. Emerald Group Publishing Limited.  
**doi.org/10.1108/9780080456713**
- Yang, H., & Bell, M. G. H. (1997). Traffic restraint, road pricing and network equilibrium. *Transportation Research Part B: Methodological*, 31(4), 303–314.  
**doi.org/10.1016/S0191-2615(96)00030-6**
- Yang, H., & Huang, H. J. (1998). Principle of marginal-cost pricing: how does it work in a general road network? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(1), 45–54.  
**doi.org/10.1016/S0965-8564(97)00018-9**
- Yang, H., & Zhang, X. (2002). Multiclass Network Toll Design Problem with Social and Spatial Equity Constraints. *Journal of Transportation Engineering*, 128(5), 420–428.  
**doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:5(420)**
- Yin, Y., & Yang, H. (2004). Optimal Tolls with a Multiclass, Bicriterion Traffic Network Equilibrium. 1882, 45–52.  
**doi.org/10.3141/1882-06**
- Zhang, X., Yang, H., & Huang, H. J. (2008). Multiclass multicriteria mixed equilibrium on networks and uniform link tolls for system optimum. *European Journal of Operational Research*, 189(1), 146–158.  
**doi.org/10.1016/J.EJOR.2007.05.004**
- Zheng, N., Rérat, G., & Geroliminis, N. (2016). Time-dependent area-based pricing for multimodal systems with heterogeneous users in an agent-based environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 62, 133–148.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2015.10.015**
- Zhu, S., Du, L., & Zhang, L. (2013). Rationing and pricing strategies for congestion mitigation: Behavioral theory, econometric model, and application in Beijing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 210–224.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2013.07.013**
- dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 58–72.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2017.03.011**
- Lou, Y., Yin, Y., & Laval, J. A. (2011). Optimal dynamic pricing strategies for high-occupancy/toll lanes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(1), 64–74.  
**doi.org/10.1016/J.TRC.2010.03.008**
- Lou, Y., Yin, Y., & Lawphongpanich, S. (2010). Robust congestion pricing under boundedly rational user equilibrium. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(1), 15–28.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2009.06.004**
- Nie, Y. M., & Yin, Y. (2013). Managing rush hour travel choices with tradable credit scheme. *Transportation Research Part B: Methodological*, 50, 1–19.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2013.01.004**
- Pigou, A. (1912). *Wealth and Welfare*. Macmillan.
- Toledo, T., Mansour, O., & Haddad, J. (2015). Simulation-based Optimization of HOT Lane Tolls. *Transportation Research Procedia*, 6, 189–197. **doi.org/10.1016/J.TRPRO.2015.03.015**
- Tsekeris, T., & Voß, S. (2009). Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking 2008 10:1*, 10(1), 5–52.  
**doi.org/10.1007/S11066-008-9024-Z**
- Van den Berg, V., & Verhoef, E. T. (2011). Congestion tolling in the bottleneck model with heterogeneous values of time. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), 60–78.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2010.04.003**
- Wang, Y., Liu, H., Han, K., Friesz, T. L., & Yao, T. (2015). Day-to-day congestion pricing and network resilience. 11(9), 873–895.  
**doi.org/10.1080/23249935.2015.1087234**
- Wu, D., Yin, Y., Lawphongpanich, S., & Yang, H. (2012). Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(9), 1273–1287.  
**doi.org/10.1016/J.TRB.2012.05.004**
- Yang, F., Yin, Y., & Lu, J. (2007). Steepest Descent Day-to-Day Dynamic Toll. 2039, 83–90.  
**doi.org/10.3141/2039-10**

# The Optimal Model of Dynamic Toll Pricing in Urban Freeways

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

*Mehdi Ganj Khanloo, M.Sc., Grad., 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](mailto:zargari@iust.ac.ir)*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## ABSTRACT

Collecting tolls is one of the solutions favored by transportation planners in dealing with traffic congestion. In this paper, urban tolls for internal freeways are presented in the form of a two-level optimization model. At the top, the decision level of the freeway toll is placed, and at the bottom, the issue of travel characteristics in the road network is solved to increase accuracy and efficiency. Allocation of travel from two aspects of network performance and social justice has been done dynamically, considering different population groups in terms of value. Also, this article considers a novel dynamic allocation model that uses the accuracy of micro-view and the speed of macro-view. To solve the problem in this multi-population metaheuristic algorithm has been developed. The combined multi-population method strengthens the local and global search operations to divide the population into different sub-populations. The teaching learning-based optimization (TLBO) is used in the presented method. The results showed that the speed and accuracy of the developed model are superior to the three competing algorithms. This algorithm reduced the travel time of the entire network from 8205 hours to 6683 hours, equivalent to 18% of the total travel time, and also, the speed of the presented algorithm has increased six times compared to the genetic algorithm.

**Keywords:** Toll Pricing, Teaching learning-based, Optimization (TLBO), Dynamic Traffic Assignment, Metaheuristic Algorithm