فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران/ سال بیست‌وچهارم/ شماره ۷۸/ بهار ۱۳۹۸/ صفحات ۱۶۲-۱۲۷

قیمت‌گذاری بهینه در محدوده‌ای از شبکه معابر شهری (مطالعه موردی شهر اصفهان)

ناصر یارمحمدیان [۱]

علی مریدیان پیردوستی [۲]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۸/۲۰

چکیده

وجود ازدحام در شبکه حمل‌ونقل شهری هزینه‌های زیادی مانند آلودگی هوا، تأخیر برای مسافران و افزایش مصرف سوخت را دربر دارد. ازاین‌رو، استفاده از سیاست‌های قیمت‌گذاری ازدحام یکی از سیاست‌هایی بوده که در بسیاری از شهرهای بزرگ مورد پذیرش قرار گرفته است. مبنای استفاده از سیاست قیمت‌گذاری ازدحام، درونی کردن اثرات بیرونی ازدحام است. از جمله روش‌های مورد استفاده برای قیمت‌گذاری ازدحام شبکه، استفاده از یک کمربند قیمت‌گذاری است. کمربند قیمت‌گذاری از تعدادی کمان تشکیل شده است که منطقه شلوغ شهر را احاطه کرده و مسافرانی را که قصد عبور از این کمان‌ها و ورود به این منطقه را دارند، ملزم به پرداخت عوارض می‌کند. مهم‌ترین مسئله در اجرای این روش قیمت‌گذاری تعیین عوارض بهینه اعمال شده بر این کمان‌هاست. هدف این مقاله، تعیین عوارض بهینه روی یک حلقه ترافیکی در شهر اصفهان است، به نحوی که میزان منفعت کاربران حداکثر شود. در این مطالعه، برای پیدا کردن مقدار عوارض بهینه، ابتدا یک مدل قیمت‌گذاری دوسطحی بیان می‌شود، بدین صورت که در سطح بالا بیشینه کردن منفعت عمومی و در سطح پایین تعادل استفاده‌کنندگان با در نظر گرفتن تقاضای با کشش با فرم نمایی مدنظر است، سپس، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، در محیط نرم‌افزار MATLAB الگوریتمی برای حل این مدل ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد، با وضع عوارض ۱۳،۰۰۰ ریالی برای سال ۱۳۹۵ به‌منظور ورود به حلقه ترافیکی برای یک ساعت، تابع منفعت کاربران حداکثر می‌شود و به‌اندازه ۴۱ درصد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ازدحام، قیمت‌گذاری بهینه، حلقه ترافیکی، شهر اصفهان.

طبقه‌بندی JEL: *R40, R41, R48.*

۱- استادیار، گروه اقتصاد و کارآفرینی، دانشکده پژوهش‌های عالی هنر و کارآفرینی، دانشگاه هنر اصفهان (نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی: n.yarmohamadian@aui.ac.ir

۲- کارشناس ارشد رشته اقتصاد شهری، دانشگاه هنر اصفهان، پست الکترونیکی: alimoridian@yahoo.com

۱- مقدمه

بدون شک، ازدحام ترافیکی از جمله مسایلی بوده که بیشترین توجه مدیران شهری را به خود اختصاص داده است. در گذشته از جمله سیاست‌های محبوب در بین مدیران شهری برای مقابله با ترافیک سنگین توجه به سمت عرضه و افزایش ظرفیت جاده‌ای در شهرها بود، اما از نظر مطالعات جدید مانند مطالعه لئوناردو و همکاران[1] (۲۰۱۲)، این سیاست‌ها در سال‌های اخیر جای خود را به سیاست‌های قیمت‌گذاری ازدحام و اولویت دادن به حمل‌ونقل عمومی داده است. از جمله سازوکارهایی که موجب تحریک تقاضا برای استفاده از حمل‌ونقل عمومی می‌شود، افزایش هزینه‌های استفاده از خودروی شخصی از طریق قیمت‌گذاری ازدحام است. با این حال، چن و نوزیک[2] (۲۰۱۶)، اشاره می‌کنند که به‌کارگیری روش‌های قیمت‌گذاری تراکم دارای مخالفان سیاسی نیز هست.

ویتون[3] (۱۹۹۶)، اشاره می‌کند، در مواقعی که امکان کنترل‌های مقداری و نظارت‌های اداری بر مدیریت ترافیک وجود ندارد یکی از راه‌های مناسب برای این موضوع، استفاده از قیمت‌گذاری ازدحام است. البته، نباید از نظر دور داشت که قیمت‌گذاری ازدحام جاده‌ای، بر تمام ابعاد تصمیمات سفر، از جمله انتخاب مقصد، زمان سفر، روش حمل‌ونقل، مسیر و... تأثیرگذار است. علاوه بر این، قیمت‌گذاری ازدحام در مواردی که انعطاف‌پذیری بالاتری وجود داشته باشد و مسافران دارای حق انتخاب بالاتری باشند، موجب می‌شود ساختار فضایی شهرها[4] به شکل متراکم‌تر، با استفاده‌های متنوع‌تر از زمین و اختصاص منابع کمتر برای گسترش شبکه‌های جاده‌ای برای اتصال به مناطق مجاور تغییر یابد. بیشتر مناطق شهری تحت تأثیر ترافیک سنگین، آلودگی هوا و آلودگی صوتی قرار دارند و در اثر این موارد، سالیانه خسارت‌های زیادی به شهروندان وارد می‌شود. هزینه‌های زمانی رفت و آمد، تأخیر در رسیدن به مقصد، مصرف بیش از حد سوخت در صف‌ها و

1- Leonardo et al.
2- Chen and Nozick
3- Wheaton
4- Urban Spatial Structure

اثرات زیست‌محیطی ناشی از ازدحام، سالیانه خسارت‌های زیادی به اقتصاد جوامع وارد می‌کند، ازاین‌رو، قیمت‌گذاری ازدحام از طریق مدیریت تقاضا با درونی کردن این هزینه‌ها به ایجادکننده آن، قادر به رفع این خسارت‌هاست. بدین صورت که از بخشی از شبکه راه هزینه‌ای دریافت می‌شود و با صرف این منابع برای کاهش تراکم و بهبود مشکلات زیست‌محیطی، هم به ساخت زیرساخت‌ها کمک می‌شود و هم افزایش کیفیت زندگی شهری را به دنبال دارد.

مسافران به‌طور معمول هزینه‌هایی مانند هزینه ازدحام یا آلودگی و همچنین احتمال افزایش تصادفات را که ممکن است با ورود آنها به شبکه حمل‌ونقل رخ دهد، در محاسبات خود لحاظ نمی‌کنند. به همین دلیل، مطابق نظریه هزینه نهایی[1]، کاربران باید کل هزینه تحمیل شده را پرداخت کنند. براساس این، هزینه‌ای برابر با اختلاف بین هزینه نهایی اجتماعی[2] و هزینه نهایی خصوصی[3] به‌عنوان عوارض از استفاده‌کنندگان جاده، دریافت می‌شود. این نوع عوارض با تغییر هزینه‌های سفر برای کاربران باعث تغییر واکنش مسافران می‌شود و وضع موجود را به وضع بهینه تغییر می‌دهد. سوگیانتو[4] و همکاران (۲۰۰۹)، با بررسی تأثیر قیمت‌گذاری بر انتخاب شیوه سفر به این نتیجه رسیدند که قیمت‌گذاری ازدحام می‌تواند تقاضا را به‌اندازه ۶/۸ درصد از موتورسیکلت به اتوبوس انتقال دهد. باندریا[5] و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از اطلاعات برداشت شده در خصوص قیمت‌گذاری یک آزادراه، وضعیت تغییر مسیر کاربران را در تقابل با قیمت‌گذاری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که قیمت‌گذاری می‌تواند تا حد قابل توجهی در کاهش آلاینده‌های NO_x و CO مؤثر باشد.

از آنجا که اطلاعات در سیستم‌های حمل‌ونقل کامل نیست و میزان اثرات بیرونی که هر کاربر در هر مکان ایجاد می‌کند قابل کشف نیست، ناگزیر در قیمت‌گذاری تراکم از

1- Marginal Cost
2- Marginal Social Cost
3- Marginal Private Cost
4- Sugiyanto
5- Bandeira

شیوه‌های مبتنی‌بر اطلاعات ناقص استفاده می‌شود؛ برای مثال، برای یک جاده یا یک حلقه ترافیکی عوارض وضع می‌شود، در صورتی که هر خیابان یا هر بخش از یک مسیر می‌تواند اثرات جانبی متفاوتی داشته باشد. به همین سبب، مسئله دیگر در قیمت‌گذاری ازدحام تعیین موقعیت دریافت عوارض یا محدوده دریافت عوارض ازدحام است. اکستروم[1] (۲۰۱۴)، چهارچوبی برای بهینه‌یابی مکان‌های دریافت عوارض و همچنین مقدار عوارض دریافتی در طرح‌های قیمت‌گذاری ازدحام برای شبکه‌های راه‌های بزرگ شهری، با هدف به حداکثر رساندن رفاه مازاد اجتماعی، ارایه داد. این مسئله بهینه‌یابی که به مکان اخذ عوارض و تعیین مقدار عوارض دریافتی (TLLP[2]) مشهور بوده، یک مسئله غیرمحدب و ناهموار است که شامل متغیرهای تصمیم دوتایی می‌شود و بنابراین، از جمله مسایل بسیار دشوار به شمار می‌آید. اکستروم در پژوهش خود، روش حلی برای این مسئله ارایه داد که به‌جای حل مستقیم TLLP، از راه‌حل تعیین سطح طرح بهینه مرتبه اول استفاده می‌کند که در آن، هیچ محدودیتی روی مکان‌های دریافت عوارض و سطوح عوارض دریافتی تحمیل نمی‌شود. همچنین فن[3] (۲۰۱۶)، یک روش حل براساس الگوریتم ژنتیک دوسطحی، برای حل هم‌زمان مکان‌یابی بهینه عوارض و تعیین سطوح دریافتی در یک شبکه چندکلاسه، ارایه داد. در سطح بالای این روش، هدف به حداقل رساندن زمان سفر کل سیستم و سطح پایین این روش، یک مسئله تعادل سنتی است. در این پژوهش، ماتریس تقاضا ثابت فرض شده است. ابتدا، دو نسخه متفاوت از راه‌حل‌هایی براساس الگوریتم ژنتیک، توسعه داده و روی شبکه فرضی سیوکس فالز[4] با فرض همگن بودن استفاده‌کنندگان، به کار گرفته شده است. سپس، عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه و گزینه برتر شناسایی و برای یک شبکه متشکل از استفاده‌کنندگان چندکلاسه با مقادیر زمانی متفاوت، به کار گرفته شد. پس از آن، مکان‌های اخذ عوارض و سطوح عوارض دریافتی محاسبه شد. در عمل یک روش سعی و خطای رایج نیز برای محاسبه سطوح عوارض

1- Ekström
2-Toll Location and Level Setting Problem
3- Fan
4- Sioux Falls

دریافتی براساس متراکم‌ترین لینک‌ها در شبکه، در نظر گرفته شد. این سطوح عوارضی که به صورت سعی و خطایی به‌دست آمده است، با راه‌حل به‌دست آمده از ترکیب مسئله مکان‌های اخذ عوارض و سطوح عوارض دریافتی، مقایسه شد. نتایج عددی در این پژوهش نشان داد که متراکم‌ترین لینک‌ها در یک شبکه، ممکن است به‌عنوان مکان‌های بهینه اخذ عوارض کاندید نشوند.

ایده وضع عوارض به‌اندازه تفاضل هزینه نهایی اجتماعی و هزینه نهایی خصوصی در هر نقطه از شبکه راه‌های شهری که در شرایط وجود اطلاعات کامل از ترجیحات مصرف‌کنندگان، مسیرها و اثرات بیرونی ایجاد شده توسط کاربران قابل اجراست، در ادبیات نظری به‌عنوان روش اولین- بهترین[1] شناخته می‌شود (ر.ک به: وروف[2] و همکاران، ۱۹۹۶؛ نان لیو و مکدونالد[3]، ۱۹۹۹؛ وروف، ۲۰۰۲؛ وروف، ۲۰۰۵؛ کیدو[4] و ماسودا[5]، ۲۰۱۰؛ تیراچینی[6] و همکاران، ۲۰۱۴). از نظر تیراچینی و هنشر[7] (۲۰۱۲)، تحلیل برنامه‌های قیمت‌گذاری حمل‌ونقل به‌طور معمول به دو بخش سیاست‌های اولین - بهترین (که در آن همه قیمت‌ها معادل هزینه نهایی است) و دومین- بهترین[8] تقسیم می‌شود. به نقل از و هنشر (۲۰۱۲)، همان‌گونه که کوئینت (۲۰۰۵)، بررسی کرده است، در دنیای اولین - بهترین هیچ اثرات خارجی و کالاهای عمومی وجود ندارد، بنگاه‌ها قیمت‌گیرنده هستند، هیچ مالیات یا مالیاتی که بهینه باشد وجود ندارد، هیچ نااطمینانی و عدم تقارن اطلاعاتی وجود ندارد، هیچ هزنیه مبادله و هیچ مسئله بازتوزیعی وجود ندارد، اما سیستم‌های حمل‌ونقل در دنیای واقعی این شرایط را تأمین نمی‌کنند که باعث پدید آمدن نتایج دومین - بهترین می‌شود (برای بررسی جزییات دقیق‌تر در ارتباط با وضعیت دومین - بهترین ر.ک

1- First-best
2- Verhoef
3- Nan Liu and McDonald
4- Kido
5- Masuda
6- Tirachini
7- Hensher
8- Second-best

به: رووندال[1] و وروف، ۲۰۰۶؛ اسمال[2] و وروف، ۲۰۰۷). قیود فنی و امکان‌ناپذیری در بخش حمل‌ونقل موجب تحمیل شرایط دومین - بهترین می‌شود و این محدودیت‌ها مانع وضع مالیات معادل هزینه نهایی برای همه شیوه‌های سفر در همه مکان‌های شبکه می‌شود. در روش دومین - بهترین تنها بخشی از شبکه، مشمول اخذ عوارض می‌شود (حق‌شمار و صفارزاده، ۱۳۹۱).

این مطالعه به دنبال تعیین عوارض بهینه ازدحام برای یک حلقه ترافیکی در شهر اصفهان با هدف حداکثر کردن منافع اجتماعی کاربران شبکه معابر با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک است. در ادامه، ابتدا مبانی نظری مربوط به قیمت‌گذاری ازدحام به بحث گذاشته می‌شود. سپس، روش پژوهش در قالب تصریح مدل، قلمروی مکانی و روش حل مسئله بهینه‌یابی بررسی می‌شود. بعد یافته‌ها و در بخش پایانی، جمع‌بندی و پیشنهادها ارایه می‌شود.

۲- مبانی نظری

۱-۲- سیاست‌های مدیریت تقاضا در مقابل سیاست‌های مدیریت عرضه

به‌طور کلی دو رویکرد در مواجهه با مشکلات و معضلات برآمده از ازدحام وجود دارد؛ سیاست‌های مبتنی‌بر گسترش طرف عرضه و سیاست‌های مدیریت تقاضا. در سیاست‌های طرف عرضه سعی می‌شود ظرفیت‌ها برای ارایه خدمات بیشتر گسترش یابد، اما تجربه نشان می‌دهد این نوع سیاست‌ها خود تحریک‌کننده تقاضا هستند و نه‌تنها مشکل را حل نمی‌کنند، بلکه گاهی مشکل مضاعف می‌شود. سیاست‌های طرف تقاضا بیشتر بر مدیریت رفتار تقاضاکنندگان و استفاده‌کنندگان از خدمات تمرکز دارد. به‌طور کلی می‌توان سه نوع سیاست طرف تقاضا را به این صورت بر شمرد:

- افزایش هزینه‌های استفاده از برخی وسایل نقلیه
- اقدام‌های بازدارنده یا تنظیم‌کننده

1- Rouwendal
2- Small

- اعطای امتیاز ویژه در برخی وسایل نقلیه (چیت‌ساز، ۱۳۸۱)

در سیاست‌های گروه نخست، با افزایش هزینه‌های استفاده از وسایل نقلیه شخصی مانند مالیات بر مالکیت وسایل نقلیه شخصی، مالیات بر سوخت، قیمت‌گذاری استفاده از جاده و افزایش نرخ پارکینگ در مناطق پرازدحام، سعی می‌شود تقاضا کاهش یابد. در سیاست‌های گروه دوم، کاهش تقاضا با ایجاد محدودیت‌های مقداری مانند ایجاد محدودیت بر حرکت وسایل نقلیه شخصی، امکان‌پذیر می‌شود. همچنین ایجاد محدودیت‌های ممنوعیت ورود وسایل نقلیه شخصی به یک محدوده ترافیکی، ممنوعیت پارکینگ و محدودیت‌های سرعت در این گروه جای می‌گیرند. سیاست‌های گروه سوم با ایجاد تغییراتی در سیستم حمل‌ونقل، تقاضای استفاده از وسایل نقلیه شخصی را کاهش می‌دهد. تمایل به استفاده از روش‌های حمل‌ونقل جانشین، در بیشتر موارد با اعطای امتیازهایی به شیوه‌های حمل‌ونقلی رقیب ایجاد می‌شود؛ مانند تخصیص خطوط ویژه‌ای از جاده به هم‌پیمایی[1]، استفاده از سیستم‌های پارک-سوار[2] و تخصیص خطوط ویژه‌ای از راه به وسایل نقلیه همگانی. تمام راهکارهایی که در چهارچوب یکی از سیاست‌های بالا قرار می‌گیرند، برپایه اصل آگاه کردن استفاده‌کنندگان از هزینه‌ای که با استفاده از وسیله شخصی به سایر استفاده‌کنندگان شبکه یا سایر افرادی که از شبکه استفاده نمی‌کنند وارد می‌کنند، استوار است و سعی می‌شود با دریافت این هزینه (درونی‌سازی هزینه‌های بیرونی) از میزان تقاضا و تعداد استفاده‌کنندگان از وسایل نقلیه شخصی کاسته شود (لیویز[3]، ۱۹۹۴).

برخی از هزینه‌های اجتماعی استفاده از وسایل نقلیه را می‌توان از طریق وضع انواع مالیات و عوارض جبران کرد، مانند هزینه‌های تعمیر، نگهداری، روسازی جاده‌ها و اختصاص فضای جاده‌ای به متقاضیان، اما موارد بسیار دیگری از هزینه‌های اجتماعی وجود دارند که به صورت مستقیم متوجه استفاده‌کنندگان نمی‌شود و نمی‌توان این هزینه‌ها را از ایجادکنندگان آنها جبران کرد، علت اینکه نمی‌توان این هزینه‌ها را از کسانی که آنها را

1- Vanpooling/Carpooling
2- Park & Ride
3- Lewis

ایجاد می‌کنند دریافت کرد، در بیرونی بودن این هزینه‌هاست. به عبارت دیگر، این هزینه‌ها آن‌قدر کوچک هستند که هر فرد در تحلیل هزینه فایده خود از آنها چشم‌پوشی می‌کند، اما سرجمع آن به‌قدری بزرگ است که موجب مشکلاتی برای جامعه می‌شود. برخی از این هزینه‌ها که استفاده‌کنندگان به شکل غیرمستقیم بر سیستم تحمیل می‌کنند، عبارت‌اند از: هزینه‌های آلودگی هوا، آلودگی صوتی، افزایش زمان سفر و کاهش ایمنی و رخداد حوادث جاده‌ای. به‌طور کلی، دریافت این هزینه‌ها از استفاده‌کنندگان و غیراستفاده‌کنندگان به صورت مالیات ناعادلانه است و به لحاظ اجرایی نیز امکان‌پذیر نخواهد بود، زیرا نمی‌توان این مالیات‌ها را متناسب با میزان تولید هزینه‌ها وضع کرد، در حالی که سهم هریک از استفاده‌کنندگان باید متناسب با هزینه‌ای باشد که به سیستم وارد می‌کنند. یانگ و منگ[1] (۲۰۰۹)، نشان دادند، از آنجا که سیاست‌های قیمت‌گذاری روی محدوده‌ای از شبکه معابر شهری برپایه میزان و نوع بهره‌مندی استفاده‌کنندگان از آن است، اعمال قیمت‌گذاری بر شبکه که با عنوان قیمت‌گذاری ازدحام جاده‌ای نیز شناخته می‌شود، راهکاری مناسب برای کنترل ازدحام شبکه بوده و به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل و مدیریت تقاضا مطرح شده است.

۲-۲- قیمت‌گذاری ازدحام جاده‌ای

بزرگراه‌ها و جاده‌هایی که به مراکز اشتغال و هسته‌های مرکزی شهر وصل می‌شوند و به عبارتی، حلقه اتصال مناطق حومه‌ای به مراکز تجاری هستند، به‌طور معمول در ساعاتی از روز که تقاضای سفر بسیار زیاد است دچار ازدحام می‌شوند. وجود ازدحام و ترافیک سنگین در این مسیرها از طریق افزایش هزینه‌های زمانی بخشی از تقاضای استفاده از جاده را کنترل می‌کند، اما برای جلوگیری از ایجاد ترافیک و هزینه‌های تأخیر در رسیدن می‌توان از طریق تغییر هزینه پولی استفاده از جاده، اقدام کرد. اگر T بیان‌کننده میزان تقاضا از جاده باشد، برای ترسیم رابطه بین هزینه رفت و آمد و T باید هزینه زمانی و هزینه پولی تعریف شود. فرض می‌شود، هزینه پولی کل سفر برابر m و هزینه زمانی سفر برابر ضرب

1- Yang and Meng

دستمزد در مدت زمان سفر است. مدت زمان سفر برابر است با D/S ساعت که از طریق تقسیم فاصله به کیلومتر بر سرعت یک کیلومتر در ساعت و دستمزد برابر است با w به‌دست می‌آید. بنابراین، هزینه استفاده از بزرگراه، g، برابر است با:

$$g = m + w(D/S)$$

با فرض اینکه سرعت با افزایش ازدحام افزایش می‌یابد، بنابراین، رفتار S ابتدا ثابت و برابر با حداکثر سرعت است و به‌محض اینکه جمعیت بزرگراه به سطح ظرفیت بزرگراه ($\bar{T}$) رسید، شروع به افزایش می‌کند. وقتی بزرگراه بدون ازدحام است، افزایش در T اثری بر هزینه رفت و آمد ندارد، اما در دامنه پرازدحام ترافیکی، T بالاتر به کاهش سرعت ترافیکی، S منجر می‌شود که به‌نوبه‌خود باعث افزایش مدت زمان مسافرت و بنابراین، هزینه زمانی سفر می‌شود (وقتی S کاهش می‌یابد، جزء $w(D/S)$ در معادله g افزایش می‌یابد). بنابراین، فرض کنید، هزینه رفت و آمد به‌عنوان تابعی از T نوشته شود، بنابراین، داریم: $g = g(T)$.

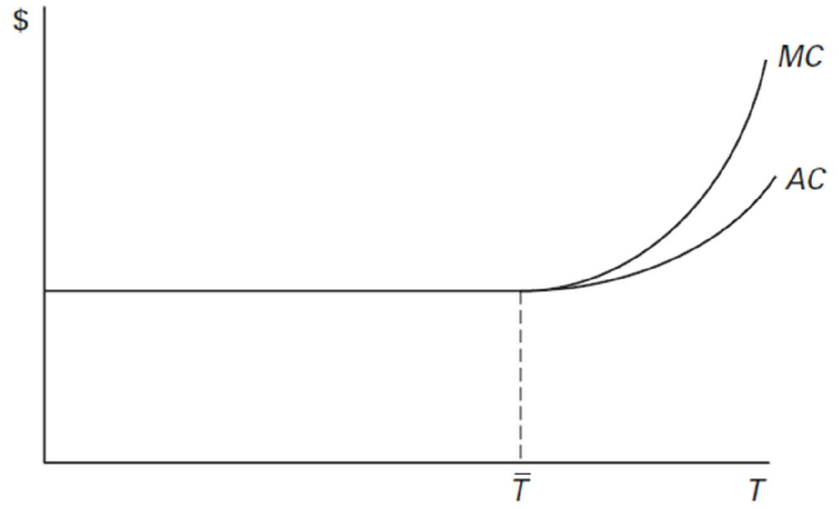
وقتی بزرگراه با ازدحام روبه‌روست، تابع $g(T)$ دارای شیب صعودی بوده و اضافه شدن یک خودروی بیشتر (افزایش T) هزینه‌های رفت و آمد هر راننده را افزایش می‌دهد. این اثر موجب پدید آمدن هزینه‌های بیرونی ازدحام می‌شود. برای درک این اثرات بیرونی، در نظر بگیرید چگونه افزایش در T، بر کل هزینه‌های رفت و آمد ایجاد شده به‌وسیله همه رانندگان در بزرگراه اثر می‌گذارد. کل هزینه‌های رفت و آمد برابر است با $Tg(T)$، که حاصل‌ضرب تعداد خودروها در هزینه هر خودرو است. وقتی یک خودرو به بزرگراه اضافه می‌شود، تأثیر افزوده شدن یک خودرو بر کل هزینه‌های رفت و آمد با مشتق گرفتن از این عبارت نسبت به T به‌دست می‌آید که برابر است با:

$$\frac{d}{dT}(Total\ cost) = g(T) + Tg'(T)$$

این فرمول نشان می‌دهد، وقتی یک خودرو به یک بزرگراه پرازدحام اضافه می‌شود، کل هزینه‌های رفت و آمد به دو دلیل افزایش می‌یابد: ۱- خودروی اضافه شده به بزرگراه خودش هزینه را متقبل می‌شود که برابر با $g(T)$ است. ۲- خودروی اضافه شده به بزرگراه

باعث تحمیل هزینه‌ای به همه خودروهای موجود در بزرگراه می‌شود. افزایش هزینه برای هریک از این خودروها با مشتق تابع هزینه رفت و آمد، $g'(T)$ قابل اندازه‌گیری است. از آنجا که T خودرو وجود دارد، هزینه همه آنها با هم، به‌اندازه ضرب T در این مقدار افزایش می‌یابد، یعنی به‌اندازه $Tg'(T)$. این عبارت بیان‌کننده خسارت ناشی از اثرات بیرونی در نتیجه افزایش یک خودرو است و در واقع، مقدار اثرات بیرونی ازدحام را کمی‌سازی می‌کند.

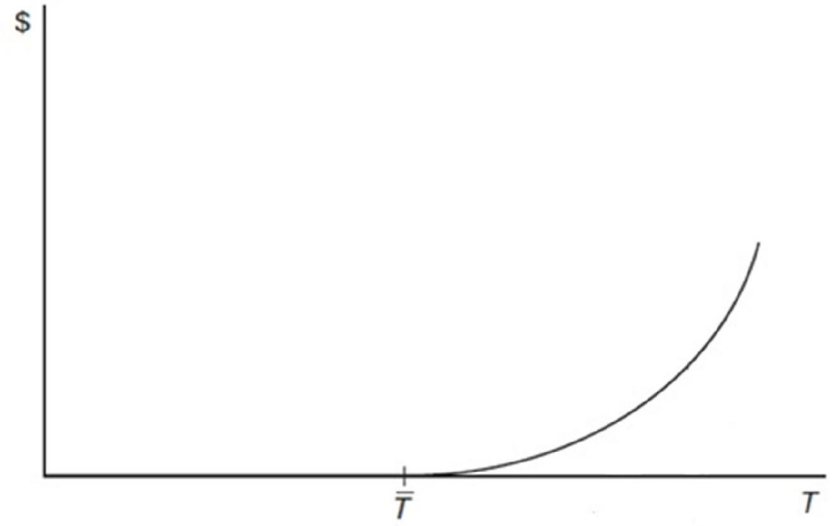
از آنجا که فرمول بالا میزان افزایش در کل هزینه‌ها را به سبب اضافه شدن یک خودرو بیان می‌کند، به نوعی فرمول هزینه نهایی آخرین خودرو افزوده شده نیز هست که آن را با MC بیان می‌کنیم. متناظر با MC، یک هزینه متوسط نیز داریم که آن را با AC نشان می‌دهیم. هزینه متوسط برابر هزینه‌های کل تقسیم بر تعداد خودروها، یا $Tg(T)/T$ است که به‌راحتی برابر می‌شود با $g(T)$. بنابراین، $AC = g(T)$، هزینه انفرادی هر خودرو است، در حالی که $MC = g(T) + Tg'(T)$ است. دقت کنید که $MC = AC +$ $Tg'(T)$. به عبارت دیگر، مقدار MC و AC، هر دو به حجم ترافیک، T بستگی دارد. اگر بزرگراه ازدحام نداشته باشد، بنابراین، خسارت ناشی از اثرات بیرونی در نتیجه افزایش یک خودرو صفر است و منحنی‌های MC و AC منطبق بر یکدیگر هستند، اما وقتی بزرگراه با ازدحام همراه می‌شود، منحنی MC بالاتر از منحنی AC قرار می‌گیرد. به‌علاوه، مطابق با نتیجه بالا فاصله عمودی بین هر دو منحنی برابر خسارت ناشی از اثرات بیرونی در نتیجه افزایش یک خودرو است.



شکل ۱- منحنی‌های هزینه متوسط و هزینه نهایی استفاده از بزرگراه

مأخذ: بروکنر (۲۰۱۱).

آنچه کاربران شبکه در حالت عادی به‌عنوان هزینه باید بپردازند، منحنی AC است، اما به لحاظ اجتماعی و با لحاظ هزینه‌های بیرونی و خسارت‌هایی که هر خودرو به دیگران وارد می‌کند، باید به‌اندازه MC هزینه بپردازند. بنابراین، برای اینکه در وضعیت ازدحام، هزینه استفاده از جاده برای کاربران شبکه به سطحی برسد که کارآیی رخ دهد و سطح بهینه تخصیص ترافیکی را منجر شود، باید به‌اندازه اختلاف منحنی‌های MC و AC که برابر با اثرات بیرونی یا خسارت ناشی از اثرات بیرونی در نتیجه افزایش یک خودرو است، عوارض وضع شود و هر خودرو ناگزیر به تحمل هزینه به‌اندازه منحنی MC شود. به این منظور، برنامه وضع عوارض باید به شکل شماره ۲، وضع شود، به‌طوری که تا سطح ظرفیت شبکه هیچ عوارضی وجود نداشته باشد و با ورود به سطح ازدحام، میزان عوارض با افزایش شدت ازدحام افزایش یابد.



شکل ۲- برنامه وضع عوارض

مأخذ: بروکنر (۲۰۱۱).

۳-۲- شیوه‌های قیمت‌گذاری جاده‌ها

یکی از مشکلاتی که در مسئله قیمت‌گذاری ازدحام مورد توجه بوده، محدودیت اطلاعات و عدم اشراف اطلاعاتی نسبت به هزینه‌های بیرونی شامل هزینه‌های تأخیر و زیست‌محیطی است، بنابراین، دستیابی به ایده‌آل‌هایی که در قیمت‌گذاری اولین -بهترین مطرح می‌شود، غالباً ممکن نیست. در ادبیات اقتصاد حمل‌ونقل قیمت‌گذاری اولین - بهترین به آن حالت از قیمت‌گذاری اطلاق می‌شود که در آن، ایده‌آل اطلاعات کامل رخ دهد و در هر لحظه و هر مکان سطح عوارض وضع شده به‌طور دقیق با هزینه بیرونی ایجاد شده برابر باشد. با داشتن چنین ایده‌آلی، شیوه قیمت‌گذاری را که در دنیای واقعی استفاده می‌شود، می‌توان دومین - بهترین نامید که در آن سعی می‌شود با طراحی قیمت‌گذاری مناسب به معیارهای اولین- بهترین دست یافت (برای اطلاعات بیشتر، ر.ک به: وروف و همکاران، ۱۹۹۶؛ نان لیو و مکدونالد، ۱۹۹۹؛ وروف، ۲۰۰۲؛ وروف، ۲۰۰۵؛ کیدو و ماسودا، ۲۰۱۰؛ تیراچینی و

همکاران، ۲۰۱۴ و به‌خصوص تیراچینی و هنشر، ۲۰۱۲).

براساس اصول شناخته شده قیمت‌گذاری اولین- بهترین شبکه بر این فرض استوار است که اگر عوارضی برابر با میزان تفاوت هزینه نهایی اجتماعی و هزینه نهایی خصوصی هر استفاده‌کننده (انفرادی) در هر کمان شبکه اخذ شود، جریان بهینه‌ای از شبکه عبور خواهد کرد. در نتیجه، هر استفاده‌کننده به‌جای هزینه نهایی خصوصی با هزینه نهایی اجتماعی استفاده از شبکه روبه‌رو خواهد بود؛ به‌طور مثال، در یک خیابان پرازدحام، این هزینه شامل ارزش زمان ازدست‌رفته سایر کاربران خیابان، مقدار هزینه‌های مالی، سروصدا و خطر تصادف به‌وجود آمده، است. مازاد منافع مصرف‌کننده[1] که براساس تعریف برابر است با تفاوت بین منافع کلی و هزینه‌های کلی، اغلب به‌عنوان یک شاخص مناسب منافع اجتماعی مورد توجه قرار می‌گیرد و بیشینه‌سازی آن به‌عنوان یک شرط اساسی کارآیی اقتصادی مطرح است. براساس این فرض، والترز[2] (۱۹۶۱)، یک سیستم کارآمد را به‌منظور تعیین مالیات (عوارض) برای شبکه آزادراهی با استفاده از اطلاعات واقعی مربوط به حجم ترافیک و سرعت برآورد کرد. پس از آن، مطالعاتی در زمینه قیمت‌گذاری شبکه براساس هزینه نهایی توسط بکمن[3] (۱۹۶۵)، دافرموس[4] (۱۹۶۹) و اسپارو[5] (۱۹۷۱) انجام شد. تحقیقات روی چگونگی کارکرد این اصل اقتصادی روی یک شبکه معابر پرازدحام با وسایل نقلیه چندگانه مانند کامیون و وسیله نقلیه شخصی توسط دافرموس (۱۹۷۱) و سپس، با در نظر گرفتن تعامل وسایل نقلیه چندگانه و جریان روی کمان توسط اسمیت[6] (۱۹۷۹)، انجام گرفت. یانگ و هوانگ[7] (۱۹۹۸) نیز همین اصول قیمت‌گذاری شبکه را براساس هزینه نهایی و با در نظر گرفتن صف و تأخیر ناشی از آن در شبکه به کار بردند.

یانگ (۱۹۹۹)، همین کار را روی شبکه، همراه با تراکم ترافیک و با استفاده از روش تعادل

1- Social Surplus
2- Walters
3- Bechmann
4- Dafermos
5- Sparrow
6- Smith
7- Yang and Huang

استفاده‌کننده تصادفی[1] انجام داد. بلی[2] (۲۰۰۲)، مدل دیگری برای بهینه‌سازی قیمت‌گذاری شبکه معابر در حالت چند کاربر[3] و چند مد[4] ارایه کرد. به‌علاوه، ژانگ و منگ[5] (۲۰۰۴)، قیمت‌گذاری به‌وسیله هزینه نهایی را در مسئله تعادل جریان در شبکه‌های چند لایه و چند مرکز وارد و یک تابع هدف با روش حل سعی و خطا را برای قیمت‌گذاری شبکه مبتنی‌بر استراتژی اولین- بهترین و در شرایط نامشخص بودن تابع تقاضا پیشنهاد کردند.

فارغ از مبانی نظری قیمت‌گذاری اولین- بهترین، این روش از جذابیت اجرایی کمی برخوردار است. این روش مستلزم گرفتن عوارض معین در هریک از کمان‌های شبکه است و ازاین‌رو، چه از نظر هزینه‌های اجرا و چه از نظر پذیرش افراد، برای استفاده‌کنندگان شبکه مطلوب نیست. بنابراین، روش‌های مختلف قیمت‌گذاری شبکه منطبق با استراتژی دومین- بهترین مدنظر قرار گرفته‌اند، به‌ویژه روش قیمت‌گذاری شبکه از طریق حلقه ترافیکی دریافت عوارض براساس استراتژی دومین-بهترین به‌منظور مدیریت ترافیک در نواحی پرازدحام شهری، در برخی شهرهای کشورهای جهان مانند سنگاپور، اسلو، تروندهیم[6] و برگن[7] مورد استفاده قرار گرفته‌اند (یانگ و هوانگ، ۲۰۰۵).

در سال‌های اخیر در زمینه قیمت‌گذاری شبکه کارهای زیادی انجام گرفته است. برخی از این کارها به معرفی راه‌های استفاده بیشتر از این روش‌ها در شهرها و کشورهای مختلف می‌پردازند، دسته‌ای دیگر به ارزیابی این روش در شهرهایی که این شیوه را برگزیده‌اند و گروهی دیگر، به مطالعه در موارد تئوری این روش‌ها می‌پردازند. برخی روش‌های قیمت‌گذاری که مبتنی‌بر این اصل در شهرهای دنیا استفاده شده‌اند به‌اختصار بیان می‌شوند.

1- Stochastic User Equilibrium
2- Bellei
3- Multi-User
4- Multi-Model
5- Zhang and Mang
6- Trondheim
7- Bergen

طرح‌های مبتنی‌بر تسهیلات[1]

برای سال‌های متمادی عوارض بر جاده‌ها، پل‌ها و تونل‌ها وضع شده‌اند و این، هنوز معمول‌ترین شکل قیمت‌گذاری راه‌هاست. در این روش، برخی از تسهیلات شبکه مانند آزادراه‌های خصوصی، برخی پل‌ها یا تونل‌ها قیمت‌گذاری می‌شوند. این دسته از تسهیلات اغلب دارای موقعیت خاصی در شبکه هستند که با قیمت‌گذاری آنها، کنترل تراکم در محدوده‌ای از شبکه امکان‌پذیر می‌شود. در سایر موارد، قیمت‌گذاری با هدف تأمین هزینه صورت می‌گیرد. عوارض می‌تواند در همه خطوط یک جاده وضع شود یا در بعضی از خطوط مانند خطوط وسایل نقلیه تک‌سرنشین (HOT)[2] اعمال شود. همچنین عوارض می‌تواند در یک نقطه از آن تسهیلات یا در چند نقطه از آن، دریافت شود؛ برای نمونه، اخذ عوارض در بزرگراه ۴۰۷ تورنتو و خطوط تندروی سان دیگوی آمریکا که در سال ۲۰۰۹ بازگشایی شد از این نوع طرح‌ها هستند (اسچرانک و لوماکس[3]، ۲۰۰۹).

استفاده از کمربندها[4]

عوارض کمربندی یکی از فرم‌های قیمت‌گذاری مبتنی‌بر ناحیه است که در آن، وسایل نقلیه به‌منظور عبور از یک کمربند برای ورود یا خروج یا احتمالاً در هر دو جهت، عوارض می‌پردازند. یک طرح کمربندی می‌تواند کمربندهای متعددی را دربر گیرد می‌تواند شامل خطوط کناری برای کنترل حرکت‌های چرخشی ناحیه نیز باشد. تمام طرح‌های موجود، کمربندهای یکپارچه هستند. حلقه‌های عوارضی نروژ، نخستین کمربندهایی بودند که ایجاد شدند، اما هدف آنها کسب درآمد بود نه کاهش تراکم، بنابر مطالعه الیاسون[5](۲۰۰۹)، تنها طرح کمربندی طراحی شده برای مدیریت تراکم، طرح عوارض شهر استکهلم بوده که کمربند مرکز شهر را احاطه کرده و دارای ۱۸ نقطه کنترل

1- Facility-based Schemes
2- High Occupancy Toll
3- Schrank and Lomax
4- Cordons
5 -Eliasson

است. عوارض ورودی روزانه حداکثر تا ۸/۴۷ دلار قیمت، در روزهای غیرتعطیل از ساعت ۶:۳۰ تا ۱۸:۳۰ اعمال می‌شود و مقدار عوارض ۱/۴۱، ۲/۱۲ یا ۲/۸۲ دلار است و بستگی به این دارد که چه زمانی از روز باشد. هیچ عوارضی در تعطیلات آخر هفته، تعطیلات رسمی و یک روز قبل از تعطیلات اعمال نمی‌شود (الیاسون، ۲۰۰۹).

طرح‌های منطقه‌ای[1]

با یک طرح منطقه‌ای، وسایل نقلیه برای ورود یا خروج از منطقه یا سفر در داخل منطقه بدون عبور از مرز آن، هزینه‌ای را می‌پردازند. مرزهای منطقه می‌تواند ویژگی‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها وکوهستان‌ها و همچنین عناصر ساخته شده مانند راه‌ها، تونل‌ها و مناطق مسکونی باشند. تنها مناطق کاربردی از این نوع، طرح‌های عوارض تراکم لندن و نیویورک است. با توجه به مطالعه لیتمن[2] (۲۰۰۵)، طرح لندن در سال ۲۰۰۳ آغاز شد. منطقه تحت عوارض، متشکل از ناحیه‌ای ۲۱ کیلومترمربعی اطراف شهر لندن است. عوارض ثابت آن برای روزهای غیرتعطیل از ساعت ۷ صبح تا ۱۸:۳۰ عصر برای رانندگی در هر نقطه در داخل منطقه یا برای پارکینگ در جاده‌های عمومی، ۵ یورو تعیین شده بود. در سال ۲۰۰۷، عوارض به ۸ یورو افزایش و منطقه شامل عوارض نیز به سمت غرب گسترش یافت. سفر در امتداد مرز منطقه بدون عوارض است. چندین گروه از وسایل نقلیه از پرداخت عوارض معاف هستند و ساکنان منطقه قیمت‌گذاری شده نیز از ۹۰ درصد تخفیف برخوردارند (لیتمن، ۲۰۰۵).

طرح‌های مبتنی‌بر مسافت طی شده[3]

با طرح مبتنی‌بر مسافت طی شده عوارض با مسافت طی شده چه به صورت خطی باشد و چه غیرخطی تغییر می‌کند. در این طرح، شبکه‌های خطوط عوارضی مخصوص کامیون‌ها و همچنین شبکه‌هایی با خطوط عوارض وسایل نقلیه تک‌سرنشین (HOT) مورد توجه

1- Zonal Schemes (Area Charge)
2- Litman
3- Distance-based Schemes

هستند و بهتر است عوارض اعمال شده روی این شبکه‌ها برحسب مسافت طی شده باشد. برای طرح‌هایی که شامل جاده‌ها یا مناطق متعددی می‌شوند، نرخ عوارض می‌تواند به نوع جاده بستگی داشته باشد. با توجه به مطالعه کانوی و والتون[1] (۲۰۰۹)، چهار ایالت آمریکا عوارض مبتنی‌بر مسافت طی شده یا براساس وزن را برای وسایل نقلیه حامل بارهای سنگین (HGV)[2] اجرا کرده‌اند، اما قیمت‌گذاری‌های در نظر گرفته شده برای جبران هزینه‌های زیرساختی تحمیلی توسط وسایل نقلیه سنگین هستند نه برای مدیریت تقاضا و تراکم، عوارض بر وسایل نقلیه حمل‌کننده بارهای سنگین در سوییس، اتریش و چند کشور اروپایی درحال‌توسعه نیز وجود دارد (کانوی و والتون، ۲۰۰۹).

در این مطالعه، از قیمت‌گذاری ازدحام به روش کمربندی یا حلقه ترافیکی استفاده شده است. در روش کمربندی ابتدا کمان‌های شبکه مشخص می‌شود و روی کمان‌ها قیمت‌گذاری صورت می‌گیرد. مسئله قیمت‌گذاری کمان‌های شبکه برای نخستین بار توسط پیگو[3] در کتاب «اقتصاد رفاه» مطرح شد (پیگو، ۱۹۲۰). پس از آن، اقتصاددانان و برنامه‌ریزان حمل‌ونقل تحقیقات گسترده‌ای را در این زمینه انجام دادند که دو هدف کلی را دنبال می‌کرد؛ یکی، قیمت‌گذاری با هدف تأمین مالی پروژه و دیگری، قیمت‌گذاری با هدف کاهش ازدحام. دریافت عوارض از استفاده‌کنندگان جاده‌های برون‌شهری می‌تواند به‌عنوان منبع مناسبی برای تأمین مالی پروژه‌های احداث یا تعمیر و نگهداری راه‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. دولت‌ها سرمایه محدودی را در اختیار دارند که برای تأمین ساخت تسهیلات جدید به‌منظور افزایش ظرفیت‌های مورد نیاز کافی نیست. راهکارهایی برای جذب سرمایه بخش خصوصی و مشارکت در زمینه ساخت و بهره‌برداری ارایه شده‌اند که مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند (اصغرزاده، ۱۳۸۵).

با توجه به اینکه ساخت تسهیلات جدید در شبکه معابر شهری به‌منظور افزایش عرضه برای پاسخگویی به تقاضای در حال رشد و حفظ تعادل بین آنها (در صورتی که

1- Conway and Walton
2- Heavy Good Vehicles
3- Pigou

امکان‌پذیر باشد) نیازمند صرف سرمایه‌گذاری‌های کلان و تحمل هزینه‌های سنگین سیستم است، امکان دارد قادر به حل مشکل نباشد و حتی با تولید و جذب بیشتر تقاضا بر تراکم جریان کمان‌های شبکه بیفزاید، بنابراین، قیمت‌گذاری کمان‌های شبکه نه‌تنها ابزاری مناسب برای کنترل تقاضاست، بلکه امکان ایجاد تغییرات در توزیع این تقاضا در شبکه و بین وسایل نقلیه مختلف را فراهم می‌کند (براس[1]، ۱۹۶۸). بدین‌ترتیب، قیمت‌گذاری می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب برای نزدیک کردن سیستم به حالت بهینه خود، مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که قیمت‌گذاری به شکل نادرست یا در شرایط نبود امکانات مناسب اجرا شود، ممکن است هزینه‌های اجتماعی سنگینی را بر جامعه تحمیل کند. به بیان دیگر، در صورتی که شبکه دارای مسیرها و وسایل نقلیه جایگزین نباشد، اعمال قیمت‌گذاری بر شبکه تنها افزایش نارضایتی استفاده‌کنندگان و کاهش رفاه را در پی خواهد داشت، اما در صورت وجود امکانات و قیمت‌گذاری مناسب روی کمان‌های خاصی از یک شبکه، تقاضا برای سفر، مقصد سفر، زمان سفر، مسیر سفر و وسیله سفر تحت تأثیر قرار می‌گیرند و تعادل شبکه از استفاده‌کننده به سیستم بهینه تغییر می‌کند و در نتیجه، از شبکه موجود با ظرفیت محدود استفاده بهتری می‌شود. همچنین درآمد به‌دست آمده از دریافت عوارض می‌تواند در تأمین مالی پروژه‌های تعمیر و نگهداری شبکه موجود، ایجاد زیرساخت‌های جدید و گسترش سیستم حمل‌ونقل همگانی و... مورد استفاده قرار گیرد. در ۵۰ سال اخیر مطالعات زیادی در زمینه سیاست‌های قیمت‌گذاری با هدف کنترل ازدحام و مدیریت تقاضای سفر انجام گرفته است. هرچند به دلیل وجود مخالفت‌های عمومی و نبود سیستم‌های ارتباطی و فناوری الکترونیکی مناسب تنها چند سالی است که مورد پذیرش قرار گرفته‌اند (هیرن و اسمیت، ۲۰۰۶).

۳- روش پژوهش

در این مقاله، ابتدا یک مدل دوسطحی برای قیمت‌گذاری ارایه و سپس، مسئله به صورت

1- Braess

یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی با توابع هدف و محدودیت‌های خطی فرمول‌بندی می‌شود. مدل سطح اول، بیشینه کردن منافع اجتماعی استفاده‌کنندگان از شبکه را به‌عهده دارد و مدل سطح دوم، مدل تعادل جریان استفاده‌کننده با تقاضای انعطاف‌پذیر است. روش حل پیشنهادی برای این مدل بهینه‌یابی، استفاده از الگوریتم ژنتیک است. در این پژوهش، قیمت‌گذاری تراکم به روش دومین- بهترین مورد نظر است، یعنی تنها برخی از لینک‌های مشخص در کل شبکه معابر شهری دارای عوارض هستند و هدف این مسئله حداکثر کردن منفعت اجتماعی کاربران است. بنابراین، ابتدا یک مدل قیمت‌گذاری به شکل دوسطحی بیان و سپس، الگوریتمی برای حل این مدل ارایه می‌شود.

۱-۳- معرفی مدل

مدل ارایه شده یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی با هدف بیشینه کردن منافع اجتماعی است که برای پیدا کردن نرخ عوارض بهینه برای یک کمربند مشخص و با در نظر گرفتن تابع تقاضای انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. مدل سطح اول، شامل بیشینه کردن منافع عمومی و مدل سطح دوم، مسئله تعادل جریان استفاده‌کننده با تقاضای انعطاف‌پذیر در شبکه است. منافع اجتماعی شبکه که عبارت است از: مجموع مطلوبیت‌های کاربران منهای مجموع هزینه‌های کاربران، شاخص مناسبی برای ارزیابی عملکرد شبکه بوده و ازاین‌رو، در این مطالعه، بیشینه‌سازی آن به‌عنوان تابع هدف مسئله قیمت‌گذاری در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان افزایش منافع عمومی شبکه پس از قیمت‌گذاری نسبت به حالت بدون عوارض، میزان بهبود وضعیت شبکه برای کاربران قابل اندازه‌گیری است. در این قسمت، ابتدا تابع هدف و محدودیت‌های مسئله قیمت‌گذاری شبکه معرفی می‌شود و سپس، پارامترهای به کار گرفته در مدل تعریف می‌شوند.

مدل سطح اول که به دنبال بیشینه کردن منافع اجتماعی بوده، عبارت است از:

$$maxSW = \sum_{w\in W} \int_0^{d_w(x)} D_w^{-1}(\omega)d\omega - \sum_{a\in A} t_a\left(v_a(x)\right).v_a(x) \quad (۱)$$

که در آن، $a\in A$, $v_a(x)$ و $w\in W$, $d_w(x)$ حاصل حل مسئله تخصیص ترافیک با

تقاضای متغیر هستند.

و مدل سطح دوم که تعادل استفاده‌کننده (UE)[1] (شفی[2]، ۱۹۸۵) را بیان می‌کند، عبارت است از:

$$min = \sum_{a\in A}\int_0^{v_a} C_a(\omega.x)d\omega - \sum_{w\in W}\int_0^{d_w} D_w^{-1}(\omega)d\omega \qquad (۲)$$

$$\sum_{r\in R_w} f_r^w = d_w \qquad r \in R_w\ .\ w \in W \qquad (۳)$$

$$f_r^w \geq 0\ .r \in R_w\ .w \in W \qquad (۴)$$

$$v_a = \sum_{w\in W}\sum_{r\in R_w} f_r^w \delta_{ar}^w \qquad a \in A \qquad (۵)$$

و پارامترهای مدل بالا به شرح زیر است: A مجموعه کمان‌های شبکه، A_K زیرمجموعه‌ای از کمان‌های کمربند عوارض با مقدار عوارض X، W مجموعه زوج‌های مبدأ - مقصد، R_w مجموعه تمام مسیرهای بین مبدأ - مقصد $w\in W$، f_r^w جریان ترافیک روی مسیر $r\in R_w$ و $w\in W$، v_a جریان روی کمان $a\in A$، v بردار جریان روی تمام کمان‌ها $(v_a\ ,\ a\in A)$، $t_a(v_a)$ زمان سفر روی کمان $a\in A$ به‌عنوان یک تابع پیوسته و صعودی از جریان روی کمان v_a، d_w تقاضا بین زوج مبدأ - مقصد $w\in W$، d بردار تقاضاهای تمام مبدأها - مقصدها $w\in W,\ d_w$، $C_a(v_a,x)$ هزینه کلی سفر روی کمان $a\in A$، $D_w(m_w)$ تقاضای بین مبدأ - مقصد $w\in W$ به‌عنوان تابعی از هزینه سفر m_w بین مبدأ - مقصد $w\in W$، D_w^{-1} معکوس تابع تقاضا یا تابع منفعت، d_{ar}^w اگر کمان $a\in A$ روی مسیر r بین زوج مبدأ - مقصد $w\in W$ باشد برابر با یک و در غیر این صورت، صفر است.

در این مدل، برای هزینه استفاده از کمان a با شرط، $a\in A_k$ (کمان دارای عوارض) داریم:

$$C_a(v_a.x) = t_a(v_a) + \frac{x}{\beta} \qquad (۶)$$

که در آن، β برابر با ارزش زمان کاربران شبکه است. همچنین برای کمان‌های بدون عوارض داریم:

$$C_a(v_a.x) = t_a(v_a) \quad a \in A - A_k \qquad (۷)$$

1- User-Equilibrium
2- Sheffi

زمان سفر روی کمان‌ها $t_a(v_a)$ تابعی اکیداً صعودی و پیوسته از جریان v_a روی کمان است و تقاضای بین مبدأ - مقصد $D_w(\mu_w)$، تابعی اکیداً نزولی و پیوسته از زمان سفر μ_w بین مبدأ - مقصد $w \in W$ است.

پارامترهای مربوط به تابع زمان سفر- حجم براساس نوع راه از نظر کارکردی به تفکیک دسترسی، جمع‌کننده، شریانی درجه ۲، تندراه و جاده اصلی با استفاده از جدول شماره ۱، برای هر کمان مشخص و در فایل ورودی مربوط وارد شد.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای تابع زمان سفر- حجم

ردیف	مشخصات کمان	شکل تابع*
۱	دسترسی	$t = 0.75\left[1+0.15(\frac{V}{370})^4\right]$
۲	جمع‌کننده	$t = 1.33\left[1+0.15(\frac{V}{165})^4\right]$
۳	شریانی درجه ۲ (تجاری)	$t = 1.20\left[1+0.15(\frac{V}{180})^4\right]$
۴	شریانی درجه ۲ (غیرتجاری)	$t = 1.20\left[1+0.15(\frac{V}{190})^4\right]$
۵	شریانی درجه ۲ (تجاری یک‌طرفه)	$t = 1.10\left[1+0.15(\frac{V}{210})^4\right]$
۶	شریانی درجه ۱ (بلوار با عرض کم)	$t = 1.00\left[1+0.15(\frac{V}{210})^4\right]$
۷	شریانی درجه ۱ (بلوار با عرض زیاد)	$t = 1.00\left[1+0.15(\frac{V}{250})^4\right]$
۸	تندراه شهری	$t = 0.75\left[1+0.15(\frac{V}{370})^4\right]$
۹	آزادراه شهری	$t = 0.75\left[1+0.15(\frac{V}{370})^4\right]$

* V= جریان سفر t= زمان سفر

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

همچنین تقاضای مربوط به هر مبدأ- مقصد در ساعت اوج صبح به تفکیک سواری، وانت، تاکسی، مینی‌بوس، اتوبوس واحد، اتوبوس غیرواحد، موتور و دوچرخه و وسایل

باری سنگین به‌عنوان تقاضای ورودی در نظر گرفته شد. برای تبدیل وسایل نقلیه مختلف به هم‌سنگ سواری از جدول شماره ۲ ضرایب استفاده شد.

جدول ۲- ضرایب تبدیل مورد استفاده در همگن‌سازی وسایل نقلیه

دوچرخه	موتورسیکلت	سواری	سایر وسایل	تاکسی و مسافرکش	وانت	مینی‌بوس	اتوبوس واحد	اتوبوس غیرواحد	تریلر و تانکر	کامیون و کمپرسی
۰/۳	۰/۵	۱	۱	۲	۱	۲	۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

فرم تابع تقاضای مورد استفاده برای شبکه آزمایشی مانند تابع تقاضای مورد استفاده در بیشتر مطالعات شبکه‌های شهری به صورت نمایی و به شکل رابطه ۸ در نظر گرفته شده است.

$$d_w = D_w^0 exp\left[\rho\left(1-\frac{\mu_w}{\mu_w^0}\right)\right] \qquad w \in W \qquad (۸)$$

که در آن، d_w میزان تقاضای موجود بین مبدأ- مقصد $w \in W$ و D ظرفیت تقاضای مبدأ- مقصد، $w \in W$ که متناسب با تقاضای طراحی مبدأ- مقصد $w \in W$ است، یعنی:

$$D_w^0 = k \times q_w \qquad (۹)$$

که در آن، q_w همان تقاضای طراحی مبدأ- مقصد $w \in W$ بوده که به‌عنوان ورودی به برنامه داده شده است. پس از کالیبره کردن رابطه، مقدار ضریب k در شبکه آزمایشی، ۵ به‌دست آمده و ازاین‌رو، رابطه بالا به صورت رابطه زیر است:

$$D_w^0 = 5 \times q_w \qquad (۱۰)$$

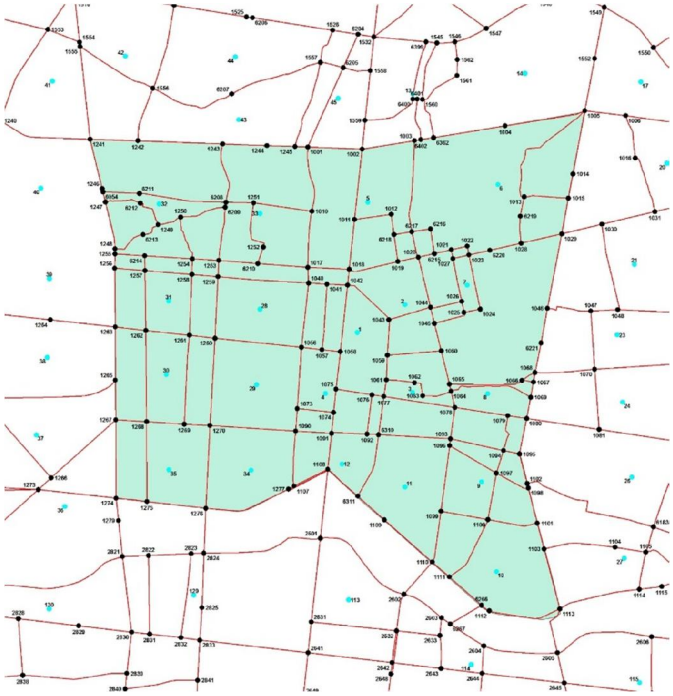
همچنین در رابطه ۸، μ_w هزینه سفر کنونی بین مبدأ- مقصد $w \in W$، μ_w^0 هزینه سفر جریان آزاد بین زوج مبدأ- مقصد $w \in W$ و $\frac{\rho\mu_w}{\mu^0{}_w}$ کشش تقاضا نسبت به هزینه سفر مبدأ- مقصد بوده که در آن ρ پارامتر بدون بعد الاستیسیته است و در نتیجه کالیبره کردن، مقدار $\rho \tilde{=} ۲۵$ به‌دست آمده است.

برای حل این مدل بهینه‌سازی دوسطحی و یافتن عوارض بهینه برای یک کمربند مشخص، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. روند کلی کار به این شکل است که به‌ازای هر x (عوارض) تولید شده در الگوریتم ژنتیک یک بار مدل سطح پایین حل می‌شود و در نتیجه آن جریان در کمان‌ها و تقاضای مبدأ- مقصدها به‌دست می‌آید و با استفاده از آن مقدار تابع هدف سطح بالا (منافع عمومی) محاسبه می‌شود.

۲-۳- شبکه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق شامل حلقه اول ترافیکی شهر اصفهان بوده که این حلقه دربرگیرنده خیابان عبدالرزاق، مسجد سید، خیابان آیت‌الله کاشانی، خیابان شهید دکتر بهشتی، خیابان شهید مطهری، خیابان کمال‌الدین اسماعیل، خیابان چهارباغ خواجو، خیابان نشاط و خیابان هاتف است. محدوده مورد مطالعه در شکل شماره ۳، نشان داده شده است.

شکل ۳- حلقه ترافیکی شهر اصفهان



شکل ٤- گره‌های ترافیکی در حلقه ترافیکی شهر اصفهان

۳-۳- روش حل مسئله

به‌منظور حل مدل پژوهش، از روش الگوریتم ژنتیک با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. ابتدا اطلاعات مربوط به گره‌های شروع،گره‌های پایان، شماره کمان، پارامترهای مربوط به تابع زمان سفر- حجم و همچنین ماتریس تقاضای مبدأ- مقصدهای شبکه به برنامه ارایه می‌شود. مقادیر ثابت عوارض به صورت تصادفی براساس کروموزوم‌های تولید شده به مسئله داده می‌شود، به‌اصطلاح به این مجموعه اعداد، جمعیت اولیه گفته می‌شود. براساس این، عوارض برحسب اعداد صفر و یک (۱ و ۰) که طول این رشته کروموزوم‌ها با رابطه $2n-1 \le X_i{}^U - X_i{}^L$ تعیین می‌شود، به‌دست می‌آید که در آن، $X_i{}^U$ و $X_i{}^L$ به ترتیب برابر با حد بالا و حد پایین عوارض بوده که در این پژوهش

۵۰۰ تا ۳۰۰۰ تومان در سال ۱۳۹۵ در نظر گرفته شده است.

الگوریتم کلی روش ژنتیک به این صورت است که ابتدا برای تعدادی کروموزوم، پاسخ‌های تابع هدف به‌دست می‌آید. برای این منظور، از روش حل فرانک- ولف (شفی، ۱۹۸۵) استفاده شده است. در این روش، فرض می‌شود، تقاضای مبدأ- مقصد در یک زوج مبدأ- مقصد تابعی از زمان سفر یا هزینه سفر تعادلی بین آن زوج مبدأ- مقصد، به صورت $d_w = D_w(\mu_w)$ باشد که μ_w عبارت است از: زمان سفر یا هزینه سفر کوتاه‌ترین مسیر بین زوج مبدأ- مقصد $w \in W$. همچنین فرض می‌شود که تابع تقاضا، تابعی اکیداً یکنوا، مشتق‌پذیر و نزولی از زمان سفر باشد و $\mu_w = D_w^{-1} = B_w(d_w),\ w \in W$ بیان‌کننده تابع معکوس تقاضا یا تابع منفعت است. تابع معکوس تقاضا یا تابع منفعت را می‌توان به صورت مقداری که یک مسافر یرای خود، حاضر به پرداخت است یا منفعتی از سفرش عایدش می‌شود، در نظر گرفت.

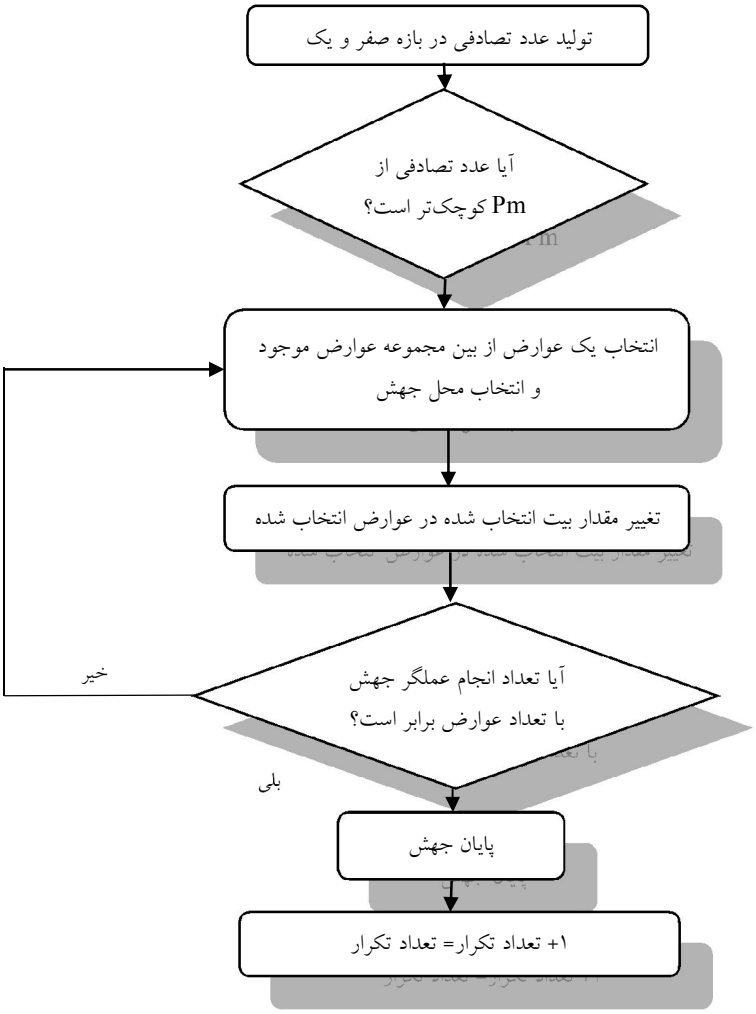
مسئله تعادل استفاده‌کننده با تقاضای انعطاف‌پذیر به‌راحتی با افزودن یک کمان مصنوعی به‌ازای هر زوج مبدأ- مقصد قابل تبدیل به مسئله تعادل استفاده‌کننده با تقاضای ثابت است. مسئله سطح دوم در مدل قیمت‌گذاری در واقع، یک مسئله تخصیص با تقاضای انعطاف‌پذیر است، در این مطالعه برای حل این مسئله از الگوریتم فرانک- ولف (شفی، ۱۹۸۵) با تقاضای انعطاف‌پذیر استفاده شده که برای استفاده از این الگوریتم در مسئله قیمت‌گذاری باید کمان‌های روی کمربند در مجموعه کمان‌های دارای عوارض قرار گیرند.

در مرحله انتخاب، مقدار تابع هدف به‌دست آمده در مرحله قبل، پایه‌ای برای انتخاب جفت‌هایی است که در زمان تولیدمثل با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در خلال فاز تولیدمثل، به هرشخص براساس مقدار خام تابع هدف، شاخص برازندگی تعلق می‌گیرد. اشخاص با برازندگی بالا نسبت به کل جمعیت، احتمال بیشتری برای انتخاب شدن و جفت‌گیری دارند. از تابع برازندگی برای تبدیل مقدار تابع هدف به مقدار برازندگی نسبی استفاده می‌شود؛ برای مثال، در تابع $F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} f(x_i)}$، تابع $f(x_i)$ بیان‌کننده مقدار تابع هدف

و n نشان‌دهنده اندازه جمعیت است.

در مرحله ترکیب، شخص جدیدی تولید می‌شود که برخی ژن‌های هر دو والدین را داراست. در این مطالعه از عملگر ترکیب دونقطه‌ای استفاده شده است. پس از انتخاب جفت‌ها، این عملگر با احتمال Pc به کار برده می‌شود. Pc عبارت است از: نسبت تعداد فرزندان تولید شده توسط عملگر ترکیب در هر نسل به کل جمعیت. این نسبت تعداد کروموزوم‌هایی را که انتظار می‌رود تحت عملیات ترکیب قرار گیرند، کنترل می‌کند. برای تعیین مقدار احتمال عملگر ترکیب، تحلیل حساسیت صورت گرفته است که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

عملگر جهش مکانیسمی است که در اثر آن یک تغییر غیرسازمان‌یافته و کاملاً تصادفی به یک کروموزوم داده می‌شود و نقش آن به‌عنوان ضامنی است که احتمال جست‌وجوی کروموزوم‌های جدید هرگز صفر نشود. به عبارت دیگر، عملگر جهش کمک می‌کند که ژنتیک در بهینه‌های محلی متوقف نشود. مانند عملگر ترکیب، عملگر جهش نیز با احتمالی تحت عنوان p_m که در ابتدای برنامه تعریف شده است، اعمال می‌شود. برای تعیین مقدار این احتمال، تحلیل حساسیت صورت گرفته است. در مرحله جهش الگوریتمی به شکل زیر اجرا می‌شود.



شکل ۵- الگوریتم مرحله جهش

معیار پایان بخشیدن به الگوریتم، رسیدن تعداد تکرارها به یک حد نصاب است. از آنجا که الگوریتم ژنتیک یک روش جست‌وجوی تصادفی است، تعیین یک ملاک هم‌گرایی مشخص، دشوار است، زیرا امکان دارد صلاحیت یک جمعیت در نسل‌های متمادی ثابت بماند و سپس، ناگهان یک عضو بسیار برتر در جمعیت پیدا شود. به این دلیل، روش‌های متداول برای سنجش

میزان هم‌گرایی و شرط توقف الگوریتم‌ها در اینجا با مشکل مواجه می‌شوند. یک روش متداول این است که اجرای الگوریتم پس از تعداد مشخصی تکرار متوقف شود.

٤- یافته‌های پژوهش

در این مرحله بهترین مقدار تابع هدف در اجراهای مختلف برنامه به‌ازای مقادیر متفاوت p_m و p_c به‌دست آمده است. همان‌طور که نتایج در جدول شماره ۳، مشاهده می‌شود، بهترین مقدار تابع هدف مربوط به $p_c = ۰/۷$ و $p_m = ۰/۰۶$ بوده که در جدول مربوط مشخص شده است. در این جدول که نشان‌دهنده میزان عوارض و منفعت اجتماعی در حالت‌های مختلف الگوریتم ژنتیک بوده، با وضع عوارض ۱۳۰۰ تومان بیشترین منفعت حاصل شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی میزان عوارض و بهترین مقادیر تابع هدف در تحلیل حساسیت p_m و p_c (واحد عوارض: تومان)

Pc		Pm				
		۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲
۰/۵	عوارض	۱۴۵۶	۱۲۶۲	۱۲۹۶	۱۱۲۱	۹۸۹
	منفعت اجتماعی	۵۲۶۲۱۵۷	۵۲۷۴۶۳۸	۵۲۷۵۸۳۶	۵۲۴۶۶۴۹	۵۶۶۰۴۲۶
۰/۶	عوارض	۱۱۹۰	۱۲۵۸	۱۴۴۰	۱۳۴۷	۱۹۷۴
	منفعت اجتماعی	۵۲۷۲۲۸۰	۵۲۷۵۵۷۵	۵۲۷۱۳۸۹	۵۲۷۴۳۷۰	۴۹۸۴۸۱۳
۰/۷	عوارض	۱۳۰۶	۱۲۳۹	۱۳۰۰	۱۲۶۸	۱۲۹۱
	منفعت اجتماعی	۵۲۷۵۸۲۴	۵۲۷۳۵۷۶	۵۲۷۵۸۴۷	۵۲۷۴۸۹۶	۵۲۷۵۷۷۴
۰/۸	عوارض	۱۱۴۴	۹۱۳	۱۳۷۱	۱۴۹۷	۸۹۱
	منفعت اجتماعی	۵۲۶۴۳۴۵	۵۱۶۶۸۷۶	۵۲۷۳۹۹۶	۵۲۴۰۴۹۵	۵۲۷۴۹۵۶
۰/۹	عوارض	۱۰۸۹	۱۳۶۰	۶۵۷	۱۶۸۲	۱۰۱۰
	منفعت اجتماعی	۵۲۵۷۱۱۷	۵۲۷۵۸۲۸	۴۹۵۳۶۲۵	۵۱۵۷۵۷۰	۵۲۴۶۴۹۹

مأخذ: محاسبات پژوهش.

بنابراین، نتایج تحلیل حساسیت حاکی از آن است که بهترین مقادیر تابع هدف در حالتی به حداکثر می‌رسد که عوارض ورودی به حلقه ترافیکی معادل ۱۳۰۰ تومان در سال ۱۳۹۵ به‌ازای یک ساعت در نظر گرفته شود. این در حالی بوده که برای دستیابی به بهترین مقادیر تابع هدف احتمال عملگر ترکیب ۰/۷ و احتمال عملگر جهش ۰/۰۶ به‌دست آمده است.

براساس جدول شماره ۳، حداکثر منفعت اجتماعی کاربران شبکه در حالت قیمت‌گذاری با عوارض ۱۳۰۰ تومان به ازای یک ساعت در حلقه ترافیکی مشخص شده در شکل شماره ۱، برابر ۵۲۷۵۸۴۷ واحد بوده است که در مقایسه با منافع عمومی شبکه در حالت اولیه به مقدار ۳۷۳۹۶۱۴ واحد، نشان از افزایش آن به‌اندازه ۱۵۳۶۲۳۳ دارد. به عبارت دیگر، برقراری سیستم عوارض ازدحام با توجه به نتایج الگو موجب می‌شود منافع اجتماعی کاربران شبکه به‌اندازه ۴۱ درصد افزایش یابد. علت افزایش منافع اجتماعی به سبب درونی شدن اثرات بیرونی است، به این معنا که اگر هرفرد به‌اندازه‌ای که هزینه برای شبکه و سایر کاربران شبکه به خاطر ازدحام ایجاد کرده است را تأمین کند، تقاضای استفاده از شبکه به‌گونه‌ای کاهش می‌یابد که مجموع منافع اجتماعی حداکثر شود. در قالب تحلیل نهایی، در حالت وضع عوارض منحنی هزینه متوسط منطبق بر منحنی هزینه نهایی اجتماعی می‌شود و کاربران شبکه هنگام تصمیم‌گیری گویا منافع اجتماعی را در محاسبات خود لحاظ می‌کنند. نتیجه به‌دست آمده در این الگو، مطابق نتیجه موردنظر برنامه‌ریز مرکزی است که در آن، علاوه بر هزینه‌های خصوصی، هزینه‌های اجتماعی را نیز حداقل می‌کند.

یادآوری می‌شود، اجرای چنین سیاست‌هایی از آنجا که موجب افزایش هزینه‌های خصوصی کاربران شبکه می‌شود ممکن است با اعتراض‌های اجتماعی همراه باشد یا حمایت‌های سیاسی لازم را جلب نکند، زیرا با وضع عوارض، عده‌ای که همچنان به همان اندازه از حلقه ترافیکی استفاده می‌کنند با افزایش هزینه مواجه می‌شوند و این گروه از افراد به‌طور بالقوه مخالفان اجرای چنین طرح‌هایی هستند. بروکنر (۲۰۱۱)، ضمن جلب توجه

سیاست‌گذاران و مدیران شهری به این نکته، راهکار مقابله با این مشکل را منتفع‌سازی متضرران می‌داند. از نظر او، جلب حمایت‌های سیاسی و اجتماعی از چنین طرح‌هایی، بازگرداندن منابع حاصل از این طرح‌ها به کسانی است که از آنها متضرر می‌شوند. البته، این بازگشت منابع نباید به صورت پرداخت‌های انتقالی باشد، بلکه باید از طریق افزایش خدمت‌رسانی یا افزایش کیفیت خدمات ارایه شده به این افراد صورت پذیرد. شیوه‌های دیگر بازگرداندن این منابع به کاربران و متضرران از طریق کاهش مالیات بر درآمد یا مالیات بر بنزین (که شامل مسافرانی که از بزرگراه استفاده نمی‌کنند نیز می‌شود) است، در این صورت، نه‌تنها متضرران، بلکه ممکن است اکثریت مسافران از اعمال سیستم وضع عوارض حمایت کنند که باعث می‌شود اجرای آن به لحاظ سیاسی امکان‌پذیر شود. چنین حمایتی برای اجرایی شدن عوارض ازدحام ضروری است.

جدول ٤- مقدار منفعت اجتماعی در حالت عدم وضع عوارض و وجود عوارض (تومان)

در صورت عدم وضع عوارض	۳۷۳۹۶۱۴
در صورت وضع عوارض	۵۲۷۵۸۴۷
رشد (درصد)	۴۱

مأخذ: محاسبات پژوهش.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

مطالعات نظری و تجربی نشان داده‌اند که دریافت عوارض اگر درست طراحی و تعیین شود، می‌تواند نقش بسیار مؤثری در کاهش ازدحام شبکه ترافیک شهری داشته باشند (ییلدیریم[1]، ۲۰۰۱). امروزه، توسعه شهرها و به دنبال آن، ازدحام در شبکه معابر شهری سبب شده است که ظرفیت‌های موجود برای حجم تقاضای بالای خودروهای شخصی کافی نباشند و معضل ترافیک سنگین در نواحی مرکزی شهرها به‌وجود آید. وجود نیروهای منفی ناشی از ازدحام رفت و آمد موجب هزینه به کاربران شبکه معابر شهری می‌شود. این هزینه‌ها که بعضاً غیرمستقیم هستند و در محاسبات شخصی کاربران وارد نمی‌شوند، عبارت‌اند از: هزینه‌های

1- Yildirim

اتلاف وقت، تأخیر در رسیدن، آلودگی هوا و آلودگی صوتی. از آنجا که هریک از استفاده‌کنندگان از معابر شهری سهم اندکی در ایجاد این هزینه‌ها دارند و هیچ‌کدام از آنها این هزینه‌ها را تحمل نمی‌کنند، نتیجه وضعیت تعادلیِ استفاده بیش از حد از سیستم است که با مقدار بهینه آن فاصله دارد. راه‌حل اولی که برای این مشکل به نظر می‌رسد افزایش عرضه است، اما امکان دارد این روش علاوه بر اعمال هزینه‌های گزاف باعث تشویق بیشتر استفاده‌کنندگان برای استفاده از خودروی شخصی شود. راه‌حل دوم، مدیریت تقاضاست. یکی از شیوه‌های نوین در مدیریت تقاضا استفاده از سیاست قیمت‌گذاری ازدحام یا عوارض ازدحام است. در سیاست قیمت‌گذاری ازدحام سعی می‌شود هزینه‌های ازدحام که هریک از خودروها ایجاد می‌کنند، درونی شود و آنها ملزم به پرداخت آن سطح از هزینه‌های نهایی شوند که با ورودشان به شبکه، بر کل سیستم تحمیل می‌کنند. از آنجا که محدودیت‌های اجرایی این شیوه قیمت‌گذاری مانع اجرای کامل آن می‌شود، شیوه قیمت‌گذاری دومین - بهترین مطرح می‌شود. یکی از این شیوه‌های قیمت‌گذاری وضع عوارض برای مجموعه‌ای از کمان‌های شبکه با عنوان عوارض حلقه ترافیکی است. در این مقاله، برای یک حلقه ترافیکی مشخص در شهر اصفهان، عوارض بهینه ورود به این حلقه با هدف حداکثرسازی منفعت اجتماعی کاربران شبکه به‌دست آمده است.

با توجه به پیچیدگی مدل و دشواری حل مسئله توسط روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک در صورت اجرا و کنترل صحیح پارامترها می‌تواند نتایج قابل قبولی به‌دست دهد. به‌منظور بررسی کارآیی روش حل مورد استفاده، الگوریتم موردنظر روی محدوده ترافیکی شهر اصفهان انجام و از اطلاعات زمان سفر- حجم و ماتریس تقاضای سفر این شهر استفاده شد. با توجه به اینکه اعمال عوارض روی تقاضای سفر مؤثر است، تقاضای سفر به صورت انعطاف‌پذیر و تابع تقاضا به فرم نمایی در نظر گرفته شد. با توجه به اطلاعات موجود از زمان سفر و تقاضای شبکه پارامترهای تابع تقاضا کالیبره شدند. با مطالعه و تحلیل حساسیت نتایج مدل، مشاهده شد که منافع اجتماعی کاربران شبکه در صورت انتخاب حلقه و عوارض بهینه که مقدار آن ۱۳۰۰ تومان است، نسبت به حالت

بدون عوارض، به میزان قابل توجهی افزایش یافته و ازاین‌رو، مدل پیشنهادی تا حد زیادی در تحقق هدف مطالعه موفق بوده است.

با توجه به نتایج ارایه شده، پیشنهاد می‌شود، با برقراری یک سیستم پرداخت عوارض الکترونیکی در حلقه ترافیکی اول شهر اصفهان و وضع عوارض بهینه برای ورود به این محدوده در هر ساعت، منافع اجتماعی در مقایسه با وضع موجود افزایش یابد.

این سیستم مشتمل بر صفحه‌های نمایشگر روی کمان‌های ورودی به این حلقه ترافیکی است و برای هر خودرو یک دستگاه پرداخت الکترونیکی با کارت شارژ تعبیه می‌شود که در صورت ورود به این حلقه از اعتبار کارت کسر می‌شود (بروکنر، ۲۰۱۱).

همچنین با توجه به نکات ارایه شده در مقاله، زمینه‌های پیشنهادی برای ادامه تحقیقات در این حوزه را می‌توان در قالب موارد زیر مطرح کرد:

- از آنجا فرم تابع تقاضای مورد استفاده برای مطالعه موردی مانند تابع تقاضای به کار گرفته در بیشتر مطالعات شبکه‌های شهری به صورت نمایی در نظر گرفته شد، بدیهی است که سایر انواع فرم‌های تابع تقاضا در مدل ارایه شده قابل کاربرد است.
- با طراحی یک مدل پویا، عوارض بهینه ازدحام در ساعات مختلف روز با توجه به پویایی‌های تقاضای سفر نیز بررسی شود.
- در این پژوهش، روش وضع عوارض براساس حلقه ترافیکی بوده است، در حالی که می‌توان عوارض را براساس یال‌ها، خطوط یا نواحی شهری وضع کرد.

یکی از محدودیت‌های این مطالعه، عدم توجه به هزینه اجرای طرح است. با توجه به تجربه سایر کشورها می‌توان تابع منافع کل را با در نظر گرفتن هزینه اجرای طرح به‌دست آورد.

منابع

آقابابازاده، بابک (۱۳۸۴). مدیریت تقاضای سفر شهری برای کاهش آلودگی هوا با قیمت‌گذاری شبکه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

اصغرزاده، محمد (۱۳۸۵). عوارض جاده‌ای بهینه برای تأمین مالی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

بروکنر، جان (۲۰۱۱). درس‌هایی در اقتصاد شهری، ترجمهٔ ناصر یارمحمدیان، دانشگاه هنر اصفهان.

چیت‌ساز، مسعود (۱۳۸۱). مدیریت ترافیک شبکه از طریق قیمت‌گذاری حرکت در منطقه شلوغ مرکز شهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

خدادادیان، مسعود، آرمان، محمدعلی، محمدی، آرش و عابدینی، مهدی (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات قیمت‌گذاری تراکم ترافیکی بر رفتار انتخاب مد سفرهای کاری در شهر تهران، *چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک*، تهران، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران.

صفارزاده، محمود، ادیب‌فر، علیرضا و میربها، بابک (۱۳۹۱). کارکردها و محدودیت‌های به‌کارگیری انواع طرح‌های قیمت‌گذاری معابر در تهران با توجه به تجارب جهانی، *یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک ایران*، تهران، سازمان حمل‌ونقل و ترافیک تهران، معاونت حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران.

صیاد حق‌شمار، سعید و صفارزاده، محمود (۱۳۹۱). بررسی پارامترهای مؤثر در تعیین نوع طرح‌های قیمت‌گذاری تراکم در معابر شهری با هدف کاهش ترافیک و آلودگی هوا و صدا، *اولین کنفرانس مدیریت آلودگی هوا و صدا*، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

Bandeira, J., Almeida, T.G., Khattak, A.J., Rouphail, N.M., and Coelho, M.C., (2012). "Generating Emissions Information for Route Selection: Experimental Monitoring and Routes Characterization". *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17(1), 3–17

Beckmann, M.J., (1965). "On optimal tolls for highways, tunnels and bridges. In: Vehicular Traffic Science". *American Elsevier, New York*, pp. 331–341.

Braess, D., (1968). "Uber ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung". *Untemenhmenforschung* vol. 12, 258-268.

Bellei,G. Gentile,G. Papola N.,(2002). "Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand" .*Transportation Research B*, 36, pp. 779-798.

Chen, R., & Nozick, L. (2016). "Integrating congestion pricing and transit investment planning". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 89, pp. 124–139.

Conway, A. and M.C. Walton (2009). "Policy options for truck user charging", paper presented at the 88th Transportation Research Board Annual Meeting 2009 Conference, CD Paper #09- 2699, Washington, D.C.

Dafermos, S., and F. T. Sparrow (1971). "Optimal resource allocation and toll patterns in useroptimized transport networks". *Journal of Transport Economics and Policy*. Vol. 5, pp. 184-200.

Ekström, J., (2014). "Finding second-best toll locations and levels by relaxing the set of first-best feasible toll vectors".*European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 14(1), pp.7-29.

Eliasson, J. (2009). "A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system", *Transportation Research Part A*, Volume 43, Issue 4, May 2009, Pages 468-480

Hearn, D. W., Smith, M. J., (2006). "*Mathematical and computational models for congestion charging*", springer, USA.p.240.

Kido, Toyokazu, Yasushi Masuda, (2010). "Second-Best Congestion Pricing and User Heterogeneity in Static Transportation Networks", *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 53, No. 2, pp. 157-171

Lewis, N . C., (1994) ."*Road pricing: theory and practice"*, Thomas Telford Services Ltd . , London.

Leonardo ,C . Mauro ,D .Mario ,M .Michele ,O., (2012). "A metaheuristic dynamic traffic assignment model for O-D matrix estimation using aggregate data" .*Social and Behavioral Sciences* 54 , pp. 685 – 695

Litman, Todd (2005). *Socially Optimal Transport Prices and Markets*, VTPI

(www.vtpi.org).
Nan Liu, Louie, John F. McDonald (1999). "Economic efciency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems", *Transportation Research Part* B 33 (1999) 157-188
Pigou, A. C., (1920). "*Economics of Welfare*". Macmillan Co. Ltd, London.
Quinet, E. (2005). Alternative Pricing Doctrines. Research in Transportation Economics 14: 19-47.
Rouwendal, J. and E. T. Verhoef (2006). Basic Economic Principles of Road Pricing: From Theory to Applications. Transport Policy 13(2): 106-114.
Smith, M.J., (1979). "The marginal cost pricing of a transportation network". *Transportation Research* 13, 237– 242
Sugiyanto, G., Malkhamah, S., Munawar, A., Sutomo, H., (2009). "*Modeling the effect of congestion pricing on mode choice in yogyakarta*", Jenderal Soedirman University, Indonesia
Schrank, D. and T. Lomax (2009). The 2009 Urban Mobility Report. College Station: Texas Transportation Institute, Texas A&M University. http://mobility.tamu.edu.
Sheffi, Y., (1985). "*Urban Transportation Network: equilibrium analysis with Mathematical Programming Methods*". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
Small, K. A. and E. T. Verhoef (2007). The Economics of Urban Transportation, Routledge, Taylor & Francis Group.
Tirachini, Alejandro, David A. Hensher, John M. Rose, (2014). "Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding", *Transportation Research Part B* 61 (2014) 33–54
Tirachini, Alejandro & Hensher, David. (2012). Multimodal Transport Pricing: First Best, Second Best and Extensions to Non-motorized Transport. Transport Reviews - TRANSP REV. 32. 181-202. 10.1080/01441647.2011.635318.
Verhoef , E . T. , (2007). "Second-best road pricing through highway franchisting" .*Journal of Urban Economics* 62 (2007) 337-361.
Verhoef , E . T. , (2007). " Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city" .*Journal of Urban Economics*, 58 (2005). 367–388
Verhoef, Erik, Peter Nijkamp, and Piet Rietveld, (1996). " Second-Best Congestion Pricing: The Case of an Untolled Alternative"" .*Journal of Urban Economics*, 40, 279–302
Verhoef , E . T. , (2002). Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands" . *Regional Science and Urban Economics* 32 (2002) 281–310

William C. Wheaton,(1998). "Land Use and Density in Cities with Congestion", *Journal of Urban Economics* 43, pp. 258-272

Walters, A. A. (1961). "The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion", *Econometrica*, 29(4): 676-699.

Fan ,W., (2016). "Optimal congestion pricing toll design under multiclass transportation network schemes: Genetic algorithm approaches". *Case Studies on Transport Policy*. 2(4), pp.78-87.

Yang, H., Huang, H., (2005). "*Mathematical and Economic Theory of Road Pricing*". Emerald Group Publishing Limited.

Yang, H., Huang, H.J., (1998). "Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?" *Transportation Research* 32A, 45–54.

Yang, H., Meng, Q., (2000). "Highway pricing and capacity choice in a road network under abuild-operate-transfer scheme", *Transportation Research* 32A, 207-222.

Yang, h., Meng, Q., Lee, D.H., (2003). "Trial-and-Error implementation of marginal-cost pricing on network in the absence of demand functions", *Transportation Research Part B*, 477–493.

Yildirim, Mehmet Bayram (2001). "Congestion toll pricing models and methods for variable demand networks." Ph.D. Dissertation, University of Florida.

Zhang, H.Mang.Q, (2004). "Modeling variable demand equilibrium under second-best road pricing". *Transportation research Part B* 38, 733-749.