فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
| JOURNAL OF TRAFFIC ENGINEERING |

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله قیمت‌گذاری بهینه تراکم

یاسمین قانع[1]، مهدی فلاح تفتی[2]، علی مصطفایی‌پور[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران

۲- استادیار، دکتری مهندسی ترافیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران

۳- استادیار، دکتری مهندسی صنایع، گروهمهندسی صنایع، دانشگاه یزد، ایران

چکیده

در این مقاله مسئله دو سطحی قیمت‌گذاری تراکم با استفاده از روش بهینه‌سازی ژنتیک به منظور یافتن مکان بهینه اخذ عوارض و تعیین سطح بهینه عوارض دریافتی در یک شبکه حمل‌ونقلی حل شده است. در سطح بالای مسئله دو سطحی، با هدف به حداکثر رساندن اختلاف در مازاد رفاه خالص اجتماعی مسئله قیمت‌گذاری تراکم و در سطح پایین مسئله تعادل استفاده کننده به منظور تخصیص جریان ترافیک روی شبکه با استفاده از الگوریتم فرانک‌ولف، حل شده است. با فرض الاستیک بودن تابع تقاضای سفر، الگوریتم ژنتیک روی شبکه سوفالز به‌کار گرفته شده است و مکان بهینه اخذ عوارض و سطح بهینه عوارض دریافتی روی شبکه مشخص شد. مقایسه نتایجبا پژوهش‌های پیشین نشان داد که الگوریتم ژنتیک از عملکرد خوبی برخوردار بوده و خالص مازاد رفاه خالص اجتماعی را بهبود بخشیده است.همچنیننتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد لینک‌های عوارضی شده را کاهش داده است بدون آنکه بر متوسط نرخ عوارض لینکها تاثیر قابل توجهی داشته باشد.

واژگان کلیدی: مدیریت تقاضای سفر، مدل سازی قیمت گذاری بهینه تراکم، محدوده قیمت‌گذاری تراکم، الگوریتم ژنتیک

[1] دانشجو، yasamin.ghane@yahoo.com

[2] عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، fallah.tafti@yazd.ac.ir

[3] عضو هیأت علمی گروه مهندسی صنایع، mostafaei@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

معمولاً قیمت‌گذاری راه به دو منظور صورت می‌گیرد. گاهی با هدف کسب درآمد برای توسعه زیرساخت معابر و ساخت جاده‌های جدید و گاهی به منظور کاهش تراکم. در حالت دوم، طرح قیمت‌گذاری تراکم[۱](ترکیب مسئله یافتن مکان‌های مشمول عوارض و تعیین سطح عوارض دریافتی[۲]) مطرح می‌شود. در واقع در این طرح لازم است استفاده‌کنندگان معابر و جاده‌ها به دلیل تراکمی که به سایر استفاده‌کنندگان تحمیل می‌نمایند و یا حتی به دلیل سایر اثرات منفی از جمله انتشار آلاینده‌ها، سروصدا و حوادثی که هر استفاده‌کننده از راه ایجاد می‌کند، عوارض بپردازند.

مدت زمان زیادی است که محققان و برنامه‌ریزان ترافیک، قیمت‌گذاری تراکم را به عنوان یک بخش مهم از سیاست‌های حمل‌ونقلی مطرح کرده‌اند. اجرای ناچیز سیستم‌های قیمت‌گذاری تراکم نشان می‌دهد که این نوع طرح‌ها به درستی به سیاست‌مداران و عموم مردم ابلاغ نشده است. اولین طرح عملیاتی قیمت‌گذاری تراکم در سنگاپور در سال ۱۹۷۵ بوده است و در سال‌های اخیر این سیستم‌ها در تعداد دیگری از شهرهای دنیا مانند لندن در سال ۲۰۰۳، و استکهلم در سال ۲۰۰۶ اجرا شده‌اند[۱].

برای فرموله کردن مسئله تعیین طرح‌های قیمت‌گذاری تراکم کارآمد در یک چارچوب بهینه‌سازی، از ابزارها و تئوری‌هایی در زمینه بهینه‌سازی استفاده شده است. تاکنون، اکثر طرح‌های قیمت‌گذاری تراکم، روی قیمت‌گذاری بهینه شبکه راه با شرط مشخص بودن مکان‌های مشمول عوارض متمرکز شده‌اند. در حالی‌که تعیین مکان بهینه مشمول عوارض روی شبکه راه نیز بسیار مهم است. یافتن یک راه‌حل بهینه برای مسئله یافتن مکان مشمول عوارض و تعیین سطح عوارض دریافتی، به عنوان موضوع مطرح در این پژوهش دنبال شده است.

اقتصاددانان حمل‌ونقل، میزان کارآیی یک طرح قیمت‌گذاری را توسط معیارهای متفاوتی از جمله زمان سفر و مازاد رفاه اجتماعی[۳]ارزیابی می‌کنند. از این معیارها می‌توان به عنوان تابع هدف در یک مسئله بهینه‌سازی استفاده کرد. اکثر روش‌های قیمت‌گذاری ارائه شده، به دلیل ساده‌سازی مسئله و نادیده گرفتن برخی پارامترها و اثرات ترکیبی آن‌ها بر روی یکدیگر به لحاظ تکنیکی دقیق نبوده و لذا ارائه یک راهکار مناسب برای تعیین میزان عوارض و محل اخذ آن برای مناطق شهری به عنوان رویکرد اصلی در این مقاله دنبال شده است.

---

۱ Congestion pricing
۲ The combined toll location and level setting problem
۳ Social Surplus

۲- پیشینه تحقیق

در اواسط قرن بیستم، تقاضا برای ترافیک خودرو به حد بالای خود رسید و نیاز به شناخت سیستم‌های حمل‌ونقل پیچیده احساس شد. با درک این موضوع توسط مهندسین و اقتصاددانان، شاخه‌ی مدل‌سازی حمل‌ونقل ایجاد شد. این مدل‌ها در ابتدا برای رسیدگی به این موضوع که چطور زیرساخت‌های موجود برای تقاضاهای روزافزون خودروها به کار گرفته می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه مدل‌های حمل‌ونقلی یکی از مهم‌ترین ابزارهای مهندسی حمل‌ونقل به شمار می‌آیند[۱].

شاخه قیمت‌گذاری تراکم یک حوزه بین‌رشته‌ای است که مورد توجه محققان رشته‌های مهندسی ترافیک، اقتصاد حمل‌ونقل و تئوری بهینه‌سازی قرار گرفته است. پیش‌زمینه‌ی تئوری این رشته را می‌توان در کار پیگو[۱] در سال ۱۹۲۰ و نایت[۲] در سال ۱۹۲۴دنبال کرد که پس از آن، افرادی چون بکمن و همکاران[۳] در سال ۱۹۵۶، مارشال[۴] در سال ۱۹۶۸ و ویکری[۵] در سال ۱۹۶۹ آن را ادامه دادند. امروزه قیمت‌گذاری تراکم در چندین شهر از جمله استکهلم، سنگاپور و لندن به کار گرفته شده است [۱].

اغلب پژوهش‌های انجام شده بر روی قیمت‌گذاری بهینه شبکه راه با فرض مشخص بودن مکان‌های مشمول عوارض متمرکز شده‌اند. در این حالت که مکان‌های مشمول عوارض ثابت در نظر گرفته می‌شوند، مسئله باقی‌مانده، تعیین سطح مناسب عوارض می باشد [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸].در این حالت، برای تعیین سطح عوارض، هزینه جمع آوری عوارض نادیده گرفته می‌شود، اما در عمل، هزینه‌های راه‌اندازی و عملیاتی سیستم‌های جمع‌آوری عوارض وجود دارد. اعمال این هزینه‌ها در یک چارچوب بهینه‌سازی به ما این اجازه را می‌دهد که نه تنها مازاد رفاه اجتماعی را به حداکثر برسانیم، بلکه می‌توان تفاضل میزان رفاه مازاد اجتماعی و هزینه‌های جمع‌آوری عوارض را نیز به حداکثر رساند. برای این منظور، این مسئله بایستی به عنوان مسئله ترکیب مکان‌یابی تسهیلات اخذ عوارض و تعیین سطح عوارض دریافتی مورد بررسی قرار گیرد که شامل مکان‌یابی کردن تسهیلات جمع‌آوری عوارض و نیز یافتن سطوح عوارضی است که کاربران راه باید در هر یک از این تسهیلات هزینه بپردازند. این امر نیازمند پرداختن به مسئله در چارچوب یک مسئله دو سطحی است [۱].

برای حل این مسئله دو سطحی، تاکنون تنها تحقیقات معدودی در زمینه ارائه راهکارهای مناسب برای بهینه‌سازی همزمان ترکیب محل‌های مشمول عوارض و نرخ عوارض انجام گرفته است. در مقابل،

---

[۱] Pigou
[۲] Knight
[۳] Beckmann et al
[۴] Marchal
[۵] Vickrey

رویکرد مورد استفاده در این رابطه غالباً از نوع طراحی شبکه با استفاده از روش‌های معمول بهینه‌سازی شبکه مبتنی بر روش‌های تکراری یا سعی و خطائی بوده است [۱، ۹، ۱۰]. با توجه به اینکه در این‌گونه روش‌ها، ترکیبات گسترده‌ای از لینک‌های عوارضی حتی برای شبکه‌های کوچک قابل انتخاب شدن هستند، بکارگیری یک روش موثر برای بررسی ترکیبات ممکن از لینک‌های عوارضی و دستیابی به یک مقدار بهینه محلی و یا کلی برای تابع هدف ضروری می‌باشد. در این زمینه روش‌های فراابتکاری چون الگوریتم ژنتیک به لحاظ اینکه فرآیند طبیعی انتخاب مطلوب در آن نهفته شده است چنین قابلیتی را دارا می‌باشد. همچنین می‌توان انتظار داشت که جواب به دستآمده ناشی از حل الگوریتم‌های فرا ابتکاری به مقدار بهینه کلی بسیار نزدیک‌تر باشد. در این رابطه، روش الگوریتم ژنتیک تاکنون توسط تعداد معدودی از محققین برای حل مسائل طراحی شبکه‌های عوارضی ار نوع بهینهمرتبهدوماستفادهشدهاست [۹، ۱۱، ۱۲]. لکن در این مطالعات الگوریتم ژنتیک تنها برای تعیین موقعیت لینک‌های عوارضی و یا سطح عوارض استفاده شده است و هردوی این‌ها همزمان با یکدیگر صورت نگرفته است.

از جمله مطالعات معدودی که در آنها بهینه‌سازی همزمان ترکیب محل‌های مشمول عوارض و نرخ عوارض مورد توجه قرار گرفته است، مطالعه انجام شده توسط یانگ و ژانگ [۱۲] می‌باشد که در آن در چارچوب یک مسئله دو سطحی، از روش الگوریتم ژنتیک برای تعیین محل‌های بهینه اخذ عوارض و از یک روش فرا ابتکاری به نام الگوریتم تبرید شبیه سازیشدهبرای تعیین مقادیر بهینه سطح عوارض استفاده شد.

همچنین فن در سال ۲۰۱۶، یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک دو سطحی، برای حل هم زمان مکان‌یابی بهینه عوارض و تعیین سطوح عوارض دریافتی در یک شبکه چند کلاسه، ارائه داد. در سطح بالای این روش، هدف، به حداقل رساندن زمان سفر کل سیستم و سطح پایین این روش، یک مسئله تعادل استفاده کننده سنتی بود. در این پژوهش، ماتریس تقاضا ثابت فرض شده بود. در ابتدا دو روش متفاوت برای حل این مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یکی با تعریف ساختار کروزوم جداگانه برای بهینه سازی محل‌های عوارض‌گیری و تعیین سطح بهینه عوارض و دیگری با ساختار کروزوم واحد برای هر دو، توسعه داده شد و روی شبکه سوفالز با فرض همگن بودن استفاده کنندگان به کار گرفته شد. سپس، عملکرد آن‌ها با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش مبتنی بر ساختار کروزوم واحد، حل بهینه‌تری از مسئله را بدست می‌دهد. این راه حل سپس برای یک شبکه متشکل از استفاده کنندگان چند کلاسه با مقادیر ارزش زمانی متفاوت به کار گرفته شد و مکان‌های اخذ عوارض و سطوح عوارض دریافتی محاسبه شدند. یک روش ابتکاری رایج در عمل نیز برای محاسبه سطوح عوارض دریافتی بر اساس متراکم‌ترین لینک‌ها در شبکه، در نظر گرفته شد. این سطوح عوارضی که با استفاده از روش‌های ابتکاری مبتنی بر سعی و خطا به دست آمده بودند، با سطوح عوارضی به دست آمده از روش بهینه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، مقایسه شد. نتایج عددی در این پژوهش نشان داد که متراکم‌ترین لینک‌ها در یک شبکه، لزوماً مکان‌های بهینه برای اخذ عوارض نبوده و لذا نبایستی در پیش فرض حل مسئله به عنوان لینک‌های بهینه در نظرگرفته شوند [۱۳].

بنابراین از مرور تحقیقات گذشته می‌توان این جمع‌بندی را نمود که روش‌های حل مسئله دو سطحی قیمت‌گذاری تراکم در گذشته کمتر مبتنی بر تعیین همزمان مکان‌های بهینه اخذ عوارض و سطوح عوارض دریافتی در یک شبکه معابر بوده است. این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر روش‌های معمول ابتکاری برای

بهینه‌سازی شبکه‌ها بوده و از روش‌های فرا ابتکاری مانند روش‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به این شیوه به ندرت استفاده شده است. لذا در این مقاله، نتایج عملکرد این الگوریتم فرا ابتکاری در مقایسه با روش‌های ابتکاری مرسوم از جنبه های میزان بهینه‌سازی مسئله، تعداد لینک‌های مشمول عوارض و نیز سطح عوارض وضع شده برای کاربران مورد بررسی قرار گرفته است. از ویژگی‌های این تحقیق در مقایسه با تحقیق مشابه انجام شده توسط فن در سال ۲۰۱۶ در این است که محدودیت اعمال شده در پژوهش وی مبنی بر محدود نمودن تعداد لینک‌های عوارضی به حداکثر ۱۰ لینک،بکار نرفته استتا شرایط واقع بینانه‌تری برای دستیابی به جواب بهینه کلی فراهم شود.

۳- فرموله کردن مسئله دوسطحی و مدل‌سازی آن

شبکه ترافیکی مورداستفاده در این پژوهش، شبکه سوفالز است. این شبکه دارای ۲۴ گره، ۵۲۸ زوج مبدأ-مقصد و ۷۶ لینک است.یک شبکه ترافیکی با استفاده از مجموعه‌ای از لینک‌ها (A) و مجموعه‌ای از زوج‌های مبدأ–مقصد (I) تعریف می‌شود. برای هر لینک $a \in A$ یک تابع هزینه سفر $c_a(v_a)$ وابسته به نرخ تردد (v_a) روی لینک a تعریف می‌شود. برای هر زوج OD، $i \in I$ ، مجموعه‌ای از مسیرهای ممکن Π_i، وجود دارد، که هر مسیر $p \in \Pi_i$، یک جریان f_p دارد. نرخ تردد v_a را می‌توان با استفاده از فرمول (۱) محاسبه کرد [۱].

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{p \in \Pi_i} f_p \delta_p^a \quad (۱)$$

که در آن δ_p^a دو مقدار صفر و یک را به خود اختصاص می‌دهد. در صورتی‌که مسیر p از روی لینک a عبور کند، مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود.

میگ‌دالاس[۱] در مقاله خود، مدل‌های دوسطحی به کار رفته در زمینه طراحی یک شبکه کلی را بیان کرده است [۱۴].در سطح بالا سازمان حمل‌ونقلی مسئول تلاش می‌کند سود ناشی از قیمت‌گذاری تراکم را افزایش دهد. در این پژوهش، به این سود، مازاد رفاه خالص اجتماعی گفته می‌شود. در سطح پایین، استفاده‌کنندگان از راه، تصمیم به انجام سفری می‌گیرند که در آن مطلوبیت خود را با سطح عوارض (τ) داده‌شده که منجر به تقاضاهایq، نرخ تردد v، و هزینه سفر c در هر زوج OD می‌شود، به حداکثر برسانند [۱].

مسئله تعادل استفاده‌کننده با تقاضای الاستیک را می‌توان مطابق رابطه (۲) بیان کرد [۱۵].

$$\min G(q, v) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(x)dx - \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} D_i^{-1}(w)\, dw \quad (۲)$$

با در نظر گرفتن شرایط زیر،

$$\sum_{p \in \Pi_i} f_p = q_i, \qquad \forall i \in I$$

$$f_p \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall p \in \Pi_i$$

---

[۱] Migdalas

$$q_i \geq 0, \quad \forall i \in I$$

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{p \in \Pi_i} f_p \delta_p^a, \quad \forall a \in A$$

که در آن D_i^{-1} تابع معکوس تقاضا است. با استفاده از مدل لوجیت چندگانه (MNL) برای تفکیک مد حمل‌ونقل عمومی و شخصی، می‌توان مسئله ترکیب تعادل استفاده کننده و انتخاب مد را مطابق با رابطه (۳) بیان کرد.

$$\min_{q,v} G(q,v) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(w + \tau_a) dw - \sum_{i \in I} \left[\pi_i q_i + \frac{q_i}{\alpha} \ln \frac{A_i(T_i - q_i)}{K_i q_i} + \frac{T_i}{\alpha} \ln\left(\frac{T_i}{T_i - q_i}\right) \right] \quad (۳)$$

با در نظر گرفتن شرایط زیر،

$$\sum_{p \in \Pi_i} f_p = q_i, \quad \forall i \in I$$

$$f_p \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall p \in \Pi_i$$

$$q_i \geq 0, \quad \forall i \in I$$

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{p \in \Pi_i} f_p \delta_p^a, \quad \forall a \in A$$

در معادله (۳)، α پارامتر مقیاس توزیع گامبل است[۱۱].

در مسائل مربوط به کنترل حمل‌ونقل، اخیراً به طرح‌های بهینه مرتبه دوم[1]بسیار توجه شده است. زیرا طرح‌های بهینه مرتبه اول بیش‌تر جنبه تئوری دارند و عملاً از آن‌ها نمی‌توان در شبکه‌های واقعی استفاده کرد، زیرا در عمل لازم است محدودیت‌هایی برای طرح‌های قیمت‌گذاری تراکم صورت گیرد.

می‌توان برای مازاد رفاه اجتماعی از معادله‌ای که شامل درآمد ناشی از عوارض است، استفاده کرد [۱].

$$SS = CS + R \quad (۴)$$

درآمد کل ناشی از عوارض (R) نیز با فرمول (۵) به دست می‌آید[۱].

$$R = \sum_{a \in A} \tau_a v_a \quad (۵)$$

سود خالص استفاده‌کننده که به مازاد رفاه استفاده‌کننده (CS) اشاره دارد، حاصل تفاضل سود استفاده‌کننده از هزینه‌های استفاده‌کننده خواهد بود [۱].

$$CS = UB - UC \quad (۶)$$

سود استفاده‌کننده (UB) مطابق فرمول (۷) اندازه‌گیری می‌شود [۷].

$$UB = \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} D_i^{-1}(w)\, dw \quad (۷)$$

هزینه‌های استفاده‌کننده (UC) هزینه سفر کل در شبکه است که شامل هزینه‌های لینک و هزینه‌های زوج ODاست، و مطابق با فرمول (۸) محاسبه می‌شود [۱].

$$UC = \sum_{a \in A} \hat{c}_a(v_a) v_a = \sum_{i \in I} \hat{\pi}_i q_i \quad (۸)$$

به جای استفاده از مازاد رفاه اجتماعی،میتواناز تغییرات آن استفاده نمود. تغییرات مازاد رفاه اجتماعی را می توان با استفاده از رابطه (۹) محاسبه نمود.

$$\Delta SS = \Delta CS + \Delta R \quad (۹)$$

در مسئله تعیین سطح عوارض دریافتی، هزینه جمع‌آوری عوارض یا هزینه اپراتور در نظر گرفته نمی‌شود و هدف، به حداکثر رساندن مازاد رفاه اجتماعی است، در حالی‌که در ترکیب مسئله یافتن مکان مشمول عوارض و تعیین سطح عوارض دریافتی مربوط به آن، لازم است هزینه اپراتور نیز در نظر گرفته شود، زیرا این هزینه می‌تواند روی تعداد مکان‌های مشمول عوارض تأثیر گذارد [۱]. بنابراین در این مسئله، هدف به حداکثر رساندن اختلاف در مازاد رفاه خالص اجتماعی خواهد بود. این اختلاف مطابق با رابطه (۱۰) است [۱].

$$\Delta NSS = \Delta SS - OC \qquad (۱۰)$$

که در آن OCهزینه جمع‌آوری عوارض است که به آن هزینه اپراتور هم گفته می‌شود.

سومالی در مقاله خود هزینه جمع‌آوری عوارض روی لینک a را با عنوان C_a معرفی کرده است، و برای هزینه کل اپراتور فرمول (۱۱) را ارائه داده است [۱۶].

$$OC = \sum_{a\in A} \lambda_a C_a \qquad (۱۱)$$

که در آن λ_a برابر یک است در صورتی‌که لینک a عوارضی باشد و در غیر این صورت، برابر صفر است.

در نهایت با استفاده از مدل لوجیت چندگانه مقدار مازاد رفاه خالص اجتماعی را می‌توان مطابق با رابطه (۱۲) به دست آورد.

$$\max_{\tau\in\chi} F(v(\tau), \hat{\pi}(\tau), \tau) = \frac{1}{\alpha}\sum_{i\in I} T_i \ln\left[\frac{A_i}{T_i} e^{\alpha(\pi_i - \hat{\pi}_i)} + \frac{K_i}{T_i}\right] + \sum_{a\in A} v_a(\tau)\tau_a - \sum_{a\in A} C_a sign(\tau_a) \qquad (۱۲)$$

که در آن $\hat{\pi}_i$ حداقل هزینه سفر با حمل‌ونقل شخصی در سناریو عوارضی و π_i حداقل هزینه سفر با حمل‌ونقل شخصی در سناریو غیر عوارضی است. بخش سوم معادله (۱۲) همان هزینه اپراتور است. در صورتی که لینک a عوارضی باشد مقدار $sign(\tau_a)$برابر با ۱ و در غیر این‌صورت مقدار آن صفر خواهد بود.

تابع هزینه سفر طبق معادله (۱۳) در نظر گرفته شده است [۱].

$$c_a(v_a) = T_a\left(1 + 0.15\left(\frac{v_a}{K_a}\right)^4\right) \qquad (۱۳)$$

برای حل مسئله دوسطحی موردنظر، در ابتدای امر لازم است مسئله سطح پایین آن که تخصیص ترافیک یا به عبارتی بارگذاری شبکه است، حل شود. در این مقاله تخصیص ترافیک با بکارگیری مدل تعادل استفاده‌کننده مطابق با فرمول (۳) صورت گرفته است. برای حل این معادله از روش مبتنی بر لینک فرانک‌ولف استفاده شده است. با حل این معادله، نرخ تردد بهینه روی لینک v_a و تقاضای بهینه q_a برای شبکه سوفالز به دست آمده و مقدار NSS^* برای سناریو غیر عوارضی محاسبه شده است. سپس از خروجی‌های این مدل به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک استفاده شد. در مرحله بعد لازم است مکان‌های بهینه مشمول عوارض و سطح بهینه عوارض دریافتی مربوط به آن‌ها مشخص شود. بدین منظور از فرمول (۱۲) در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

با حل الگوریتم ژنتیک، بردار عوارض به‌هنگام شده و مجدداً مسئله تعادل استفاده‌کننده حل شده، سپس نرخ تردد روی لینک‌ها و تقاضاها به‌هنگام می‌شود. با استفاده از این خروجی‌ها مسئله سطح بالا مجدداً حل شده و این روند تا زمانی که شرط توقف برقرار باشد، تکرار خواهد شد. درنهایت لینک‌هایی که سطح عوارض مثبتی دارند، به عنوان لینک‌های عوارضی و نرخ عوارض روی آن‌ها، به عنوان نرخ بهینه

عوارض منظور می‌شوند. نهایتاً بهبود در میزان مازاد رفاه خالص اجتماعی بررسی می‌شود.

۴- نتایج عددی

در ابتدا لازم است پارامترهای مربوط به روش الگوریتم ژنتیک تنظیم شوند. به این منظور حد پایین و بالای سطح عوارض با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش اکستروم در سال ۲۰۰۸ [۱]، به ترتیب صفر و ۲۰ کرون سوئد در نظر گرفته شده است. مقدار جمعیت در این الگوریتم، با استناد به پژوهش فن در سال ۲۰۱۶ [۱۳]، برابر۶۴ جمعیت در نظر گرفته شده است. احتمال تقاطع ۰/۱۵، احتمال جهش ۰/۰۵ و نرخ جهش ۰/۱ در نظر گرفته شده است. تعداد کروموزوم‌های والد از رابطه (۱۴) محاسبه شده است.

$$nc = ۲ \times \text{round}\left(pc \times \frac{nPop}{۲}\right) \qquad (۱۴)$$

که در آن pcاحتمال تقاطع و nPop جمعیت کروموزوم‌ها است.

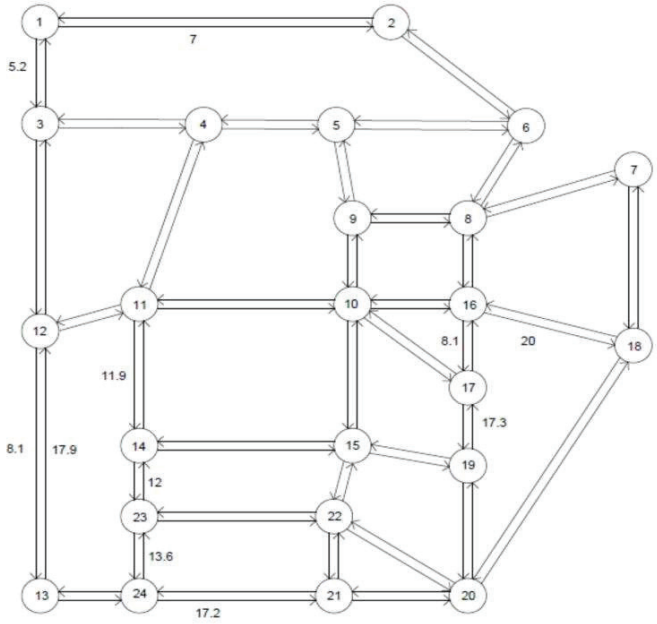
در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک روی شبکه متوسط سوفالز امتحان شده است. در این شبکه هزینه جمع‌آوری عوارض روی تمام لینک‌هایی که قابلیت عوارضی شدن را دارند، ثابت و برابر با ۱۵۰۰ کرون سوئد بر ساعت در نظر گرفته شده است. ارزش زمان برابر با ۱ کرون سوئد بر دقیقه لحاظ شده است. استفاده از واحد پول کرون سوئد در این تحقیق برای مقایسه راحت تر نتایج این تحقیق با پژوهش اکستروم بود. هم‌چنین پارامتر مقیاس توزیع گامبل، ۰/۵ و شرط توقف برای الگوریتم رسیدن به ۵۰ نسل در نظر گرفته شده است. تعداد تکرارهای الگوریتم فرانک‌ولف نیز ۳۵ تکرار در نظر گرفته شد.

در جدول (۱) موقعیت لینک‌های عوارضی و نرخ آن‌ها مشخص شده است.

جدول ۱: *موقعیت لینک‌های عوارضی و سطح عوارض روی آن لینک‌ها*

سطح عوارض روی لینک‌ها	لینک‌های عوارضی شده
۷	۲-۱
۵/۲	۳-۱
۱۱/۹	۱۴-۱۱
۸/۱	۱۳-۱۲
۱۷/۹	۱۲-۱۳
۸/۱	۱۷-۱۶
۲۰	۱۸-۱۶
۱۷/۳	۱۷-۱۹
۱۲	۱۴-۲۳
۱۷/۲	۲۱-۲۴
۱۳/۶	۲۳-۲۴

در شکل (۱) سطح عوارض نهایی برای شبکه سوفالز با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک، نشان داده شده است.



شکل ۲: *سطح عوارض نهایی (کرون سوئد)*

۴- ۱-اعتبار سنجی نتایج

با توجه به جدول (۲) می‌توان نتایج به دست آمده از این الگوریتم را با نتایج به دست آمده از روش تقریبی مورد استفاده در پژوهش اکستروم مقایسه کرد.

جدول ۲:*نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و روش تقریبی مورد استفاده در پژوهش اکستروم*

الگوریتم‌های مورد استفاده	تعداد لینک‌های عوارضی	ΔNSS	بهبود نسبت به روش اکستروم
GA	۱۱	۸۱۸۰۱	۱۱٪
روش تقریبی	۲۷	۷۲۹۱۹	-

مطابق با جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم ژنتیک تعداد لینک‌های عوارضی کم‌تری نسبت به الگوریتم سعی و خطایی تقریبی در پژوهش اکستروم به دست آورده‌و بنابراین رفاه استفاده‌کنندگان از راه را بیش‌تر از روش تقریبی افزایش داده است. هم‌چنین به ازای تعداد لینک‌های عوارضی کم‌تر، میزان مازاد رفاه خالص اجتماعی را بیش‌تر از روش تقریبی در پژوهش اکستروم افزایش داده است. این دلایل، برتری روش ژنتیک را نسبت به الگوریتم سعی و خطایی تقریبی نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک در حل مسائل دوسطحی عملکرد بسیار مناسبی دارند و می‌توانند در مدت‌زمان معقولی به جواب بهینه مطلوب دست یابند. هم‌چنین در مقایسه با الگوریتم‌های سعی و خطایی، جواب بهینه‌تری را ارائه می‌دهند و بنابراین

بسیار مناسب‌تر از الگوریتم‌های سعی و خطایی عمل می‌کنند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از اعتبارسنجی این الگوریتم، می‌توان نتیجه گیری‌های زیر را نمود:

۱- الگوریتم‌های فراابتکاری دقت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های سعی و خطایی داشته و جواب حاصل از آن‌ها به میزان بهینه کلی نزدیک‌تر است.

۲- میزان بهبود در ΔNSS نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است. الگوریتم ژنتیک با اختلاف ۱۱ درصدی نسبت به روش سعی و خطایی در پژوهش اکستروم، بهبود بیش‌تری در ΔNSS ایجاد کرده است.

۳- با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد ۱۱ لینک عوارضی به دست آمده است که در مقایسه با ۱۱ لینک عوارضی بدست آمده در روش اکستروم، این میزان کاهش چشم‌گیری داشته و رفاه استفاده‌کنندگان را به وضوح افزایش می‌دهد.

۴- کم‌تر بودن میانگین سطح عوارض نهائی به دست آمده در الگوریتم، می تواند مقبولیت بیشتری از نظر استفاده‌کنندگان از راه داشته باشد. الگوریتم سعی و خطایی در پژوهش اکستروم با میانگین سطح عوارض ۱۱/۶ کرون سوئد نسبت به الگوریتم ژنتیک با میانگین سطح عوارض ۱۲/۱ کرون سوئد حدود ۴ درصد عملکرد بهتری داشته است. با توجه به ناچیز بودن این اختلاف و در مقابل کاهش قابل توجه لینکهای عوارضی در روش مبتنی بر الگوریتک ژنتیک، می توان ادعا نمود که الگوریتم ژنتیک در حین دستیابی به اختلاف در مازاد رفاه خالص اجتماعی بیشتر، مقبولیت و پذیرش عمومی بیشتری نیز از دید کاربران می تواند داشته باشد.

۷- منابع

1- Ekström, J.,2008, Designing urban road congestion charging systems: models and heuristic solution approaches, in Department of Science and Technology (KTS/Trafiksystem), Linköping University.

2- Marchand, M., (1968). "A note on optimal tolls in an imperfect environment". Econometrica 36, 575–581.

3- Yang, H., Lam, W.H.K., (1996). "Optimal road tolls under conditions of queuing and congestion". Transp. Res. Part A 30 (5), 319–332.

4-Verhoef, E.T., Nijkamp, P., Ritveld, P., (1996). "Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative". J. Urban Econ. 40 (3), 279–302.

5-Liu, L.N., McDonald, G., (1999). "Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems". Transp. Res. Part B 33, 157–188.

6- Lindsey, R., Verhoef, E.T., (2001). Traffic congestion and congestion pricing. In: Button, K.J., Hensher, D.A. (Eds.), Handbook of Transport Systems and Traffic Control. Elsevier Science, pp. 77–105.

7- Verhoef, E.T., 2002, Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands. Regional Science and Urban Economics, 32(3): p. 281-310.

8- Yang, H., Huang, H.J., (2005). Mathematical and Economic Theory of Road Pricing". ElsevierBusiness and Economics.

9- Shepherd, S. and A. Sumalee, 2004, A Genetic Algorithm based approach to optimal toll level and location problems. Networks and Spatial Economics, 4(2): p. 161-179.

10- 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): p. 7-29.
11- Cree, N.D., Maher, M.J., Paechter, B., (1998). "The continuous equilibrium optimal network design problem: a genetic approach". Transportation Networks: Recent Methodological Advances. Pergamon, Amsterdam, pp. 163–174.
12- Yang, H., Zhang, X., (2003). "Optimal toll design in second-best link-based congestion pricing". Transp. Res. Rec. 1857, 85–92.
13- Fan, W., 2016, Optimal Congestion Pricing Toll Design under Multiclass Transportation Network Schemes: Genetic Algorithm Approaches. Case Studies on Transport Policy, Vol (4): p.78-87..
14- Migdalas, A., 1995, Bilevel programming in traffic planning: models, methods and challenge. Journal of Global Optimization, 7(4): p. 381-405.
15- Sheffi, Y., Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, 1985, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
16- Sumalee, A., 2004, Optimal road user charging cordon design: a heuristic optimization approach. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 19(5): p. 377-392.

An **optimal solution for congestion pricing problem using Genetic Algorithm**

YasaminGhane[1], Mehdi FallahTafti[2], Ali Mostafaei Poor[3]

1. MSc. Student inHighways and Transportation Engineering, Civil Engineering Department, Yazd University, Iran
2. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Yazd University, Iran
3. Assistant Professor,Industrial Engineering Division, Yazd University, Iran

Abstract

In this paper the bi-level congestion pricing problemwas formulated usingGenetic Algorithm technique to solveoptimal toll locations and level setting problem for a road network. In upper level, congestion pricing problemis solved to maximize net social surplus and in lower leveluser equilibrium problem is solvedto assign the traffic flow on the network using Frank Wolfe algorithm. Assuming the travel demand is elastic, Genetic Algorithm is applied to the Sioux Falls network to find optimum toll locations and toll levels. Comparing the results with previous researches indicated thatGenetic Algorithm performed efficiently and enhanced the net social surplus. In addition, using Genetic Algorithm reduced the number of tolled links involved in the congestion pricing scheme while the average toll rates did not change significantly.

Keywords:Travel Demand Management (TDM), Optimal Congestion Pricing Modeling,Congestion Pricing Area, Genetic Algorithm

[1]Postgraduate Student, yasamin.ghane@yahoo.com
[2]Faculty Member of Civil Engineering Department, fallah.tafti@yazd.ac.ir
[3]Faculty Member of Industrial Engineering Department, mostafaei@yazd.ac.ir