فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
| JOURNAL OF TRAFFIC ENGINEERING |

ارائه مدل همزمان قیمت‌گذاری محدوده ای و توسعه معابر در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری

شهریار افندی زاده[1]، یاسر تقی زاده[2]

۱- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت. تهران – نارمک – دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت. تهران – نارمک – دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

توسعه شهرها و افزایش تمایل افراد به استفاده از وسیله نقلیه شخصی، از عواملی هستند که باعث شده شبکه‌های حمل‌ونقلی موجود در بسیاری از شهرهای پیشرفته دنیا نتوانند جوابگوی حجم بالای اتومبیل‌های موجود باشند. در جهت رفع این مشکل، استفاده از روش‌های مدیریت تقاضای سفر مانند قیمت‌گذاری، افزایش یافته است به‌طوریکه سعی شده است سیستم‌های قیمت‌گذاریی اجرا گردد که جوابگوی تغییرات ایجاد شده در اثر گذشت زمان در میزان تقاضا و یا کاربری‌های موجود را داشته باشند. از طرفی ممکن است تصمیم‌گیران حمل‌ونقلی بنا به شرایط موجود، علاوه بر اجرای سیاست قیمت‌گذاری، خواهان اجرای سیاست‌های افزایش عرضه مانند افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه باشند. هدف این مطالعه ارائه مدلی است که بتوان با استفاده از آن مقدار عوارض بهینه و میزان افزایش ظرفیت کمان‌های کاندید در شبکه را تعیین نمود. بدین منظور مدلی دو سطحی باهدف بیشینه نمودن منافع عمومی تعریف شده است که مسئله سطح پایین آن مسئله تخصیص ترافیک با تقاضای متغیر است. به دلیل پیچیدگی مدل مذکور، از روش فرا ابتکاری گرم و سرد کردن شبیه سازی شده برای حل مدل استفاده شده است. درنهایت مدل و روش ارائه شده بر روی یک شبکه فرضی اعمال شد؛ نتایج حاصل برای سیاست‌های مختلف قیمت‌گذاری و طراحی شبکه نشان داد که با اعمال سیاست هم‌زمان، بیشینه منافع عمومی حاصل خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری، طراحی شبکه، تخصیص ترافیک با تقاضای متغیر، روش گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده

[1] دانشیار دانشگاه علم و صنعت، ۰۲۱۷۷۴۵۱۵۰۰، zargari@iust.ac.ir

[2] دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت، ۰۹۱۲۴۲۶۱۳۵۹، Yasertz@gmail.com

فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
سال نوزدهم – شماره ۷۷ – تابستان ۱۳۹۷

۱- مقدمه

توسعه شهرها و تمایل افراد به استفاده از وسایل نقلیه شخصی باعث شده است که ظرفیت های موجود برای حجم زیاد خودروهای شخصی کافی نباشد و معضل تراکم در شبکه به خصوص در نواحی مرکزی شهر به وجود آید. این تراکم باعث اتلاف وقت با ارزش افراد جامعه، ایجاد هزینه‌های اجتماعی، افزایش تعداد تصادفات و بالا رفتن میزان آلودگی خواهد شد[۱]. راهکارهای حل این مشکل را می‌توان در قالب دو زیر مجموعه "افزایش عرضه" و " مدیریت تقاضا " تقسیم‌بندی نمود. افزایش عرضه این است که ظرفیت کمان‌های شلوغ اضافه شود و یا کمان‌های جدیدی ساخته شود کهدر علم حمل‌ونقل تحت عنوان مسئله طراحی شبکه(NDP[۱]) شناخته می شود. در رویکرد مدیریت تقاضا در سطح شبکه، یکی از مؤثرترین راهکارها، اعمال سیاست قیمت‌گذاری در محدوده مرکزی شهرها می باشد که در اکثر شهرهای بزرگ اجرا شده است [۲]. در این مقاله هدف پرداختن به این دو راهکار به صورت همزمان است.

در زمینه قیمت‌گذاری عوارض مطالعات زیادی انجام شده است، اسمیت [۳]نشان داد که هر استفاده‌کننده با ورود به شبکه علاوه بر زمان سفر، هزینه‌های اجتماعی دیگری نیز به سایر استفاده‌کنندگان وارد می‌کند، جبران این هزینه‌ها با اخذ عوارضی برابر با تفاوت بین هزینه حاشیه ای عمومی[۲] و هزینه حاشیه ای هر استفاده‌کننده[۳] امکان‌پذیر است. ورهف [۴] یک راه حل عمومی برای بدست آوردن قیمت عوارض بهینه در شبکه های حمل و نقل ارائه می کند. ورهف در مطالعه دیگر خود [۵] با استفاده از یک مدل شبیه سازی الگوهای مختلف قیمت‌گذاری شامل قیمت‌گذاری محدوده‌ای، قیمت‌گذاری ناحیه‌ای، قیمت‌گذاری پارکینگ در مرکز شهر و قیمت‌گذاری یک معبر اصلی را بررسی می‌کند. یانگ و ژانگ [۶] روشی برای تعیین محل کمربند بهینه و حل مسأله قیمت‌گذاری ارائه کردند، آنها برای یافتن محل کمربند بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. چن و برنشتن [۷] برای حل مساله قیمت‌گذاری، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی به‌جای استفاده از مدل معمول دو سطحی برای بدست آوردن مقدار عوارض و محل اخذ عوارض ارائه کردند. مارویاما و سومالی [۸] در مطالعه خود دو روش قیمت گذاری محدوده‌ای و ناحیه ای[۴] را با هم مقایسه کرده اند. چیو [۹] مساله قیمت گذاری تراکم با تقاضای الاستیک را به صورت نامساوی تغییری تعریف کرد و روشی جدید برای حل

---

[۱] Network design problem
[۱] Marginal Social Cost
[۱] Marginal Private Cost
[۲] Marginal Social Cost
[۳] Marginal Private Cost
[۴] Area pricing

گذاری تراکم با تقاضای الاستیک را به صورت نامساوی تغییری تعریف کرد و روشی جدید برای حل آن ارائه نمود، روش او ترکیبی از روش های تصویر زیر گرادیان[۱] و روش کانونی کردن[۲] است. شفرد و می [۱۰] روشهای اولین- بهترین و دومین- بهترین را براساس تعداد کمان های تحت پوشش قیمت گذاری مقایسه کردند، روش مورد استفاده این محققین برای تعیین عوارض بهینه براساس الگوریتم ژنتیک است.

فنگ و یان [۱۱] نشان دادند که قیمت‌گذاری محدوده‌ای و پارکینگ راه حلی مناسب برای کاهش تراکم در شبکه است، اما آنها قیمت‌گذاری پارکینگ را به صورت پارک سوار[۳] در نظر گرفته و محدوده داخل کمربند را مورد مطالعه قرار داده اند. آنها برای یافتن قیمت عوارض و پارکینگ بهینه از روش شتاب دهی گام به گام[۴] استفاده کردند. جیان و گانگلین [۱۲] نیز مسأله قیمت‌گذاری معابر و قیمت‌گذاری پارکینگ را به صورت همزمان در نظر گرفتند، آنها پارکینگ را با ضرب در یک ضریب ثابت به تابع تقاضا اضافه کردند و تنها مد سواری شخصی را در نظر گرفتند.

تسای مدلی ارائه کرد که تعداد بهینه کمربند برای یک شهر را مشخص می کند و نشان داد که در شهرهای بزرگ معمولا وجود چند کمربند به جای یک کمربند موثرتر است [۱۳]. افندی زاده و عبدالمنافی مساله قیمت گذاری محدوده ای را با در نظر گرفتن انتشار آلاینده ها در سطح شبکه مدل کرده و نتایج آن را برای شهر تهران ارائه کردند [۱۴] و [۱۵]. ژانگ در مطالعه خود تاثیر اجرای کمربند عوارضی در هسته مرکزی شهر، بر انتخاب محل اشتغال را بررسی کرده و در قالب یک مثال نشان داد که اجرای این سیاست موجب شده تا ۱۶ درصد از مشاغل محدوده را ترک کنند [۱۶].

لیندزی در مطالعه خود اثبات می کند که سرمایه گذاری در راستای بهبود تردد خودروهای شخصی بدون اجرای سیاست قیمت گذاری اثرگذاری مناسبی ندارد و تنها یک راه حل کوتاه مدت است [۱۷]. چن نیز مدلی ارائه کرد که سرمایه گذاری در بخش حمل و نقل همگانی را با قیمت گذاری محدوده ای به صورت همزمان در نظر می گیرد [۱۸]. یانگ و منگ قیمت‌گذاری یک بزرگراه و تعیین ظرفیت جاده‌ها در یک شبکه که سیستم ساخت–بهره برداری–انتقال[۵] هر آن حاکم است را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه قیمت گذاری در سطح یک کمان و نه در سطح شبکه مدل شده است [۱۹].

هدف این مطالعه نگاه همزمان به دو روش قیمت‌گذاری محدوده‌ای و طراحی شبکه پیوسته[۶] است که تا به حال کمتر مورد توجه بوده است. در این مطالعه برای اولین بار مدلی ارائه شده‌است که می‌توان با

---

[۱] Sub-Gradient Projection Method
[۲] Bundle Method
[۳] Park & Ride
[۴] Step Acceleration
[۵] B.O.T
[۶] Continuous network design problem(CNDP)

اســتفاده از آن هر دو مســئله CNDP و CPP را حل نمود و همچنین با توجه به اجتناب ناپذیر بودن تأثیر عرضه بر تقاضا و اینکه تا کنون برای حل مسئله CNDP با تقاضای الاستیک از الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده[۱] استفاده نشده‌است، در این مطالعه مدلی معرفی خواهد شد که با استفاده از آن بتوان مسئله CNDP را با تقاضای الاستیک مورد بررسی قرار داد.

۲- فرمولبندی مسئله

در این مطالعه، یک مدل دو سطحی برای تعیین میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه معرفی خواهد شد که مسئله سطح بالا منافع عمومی را بیشینه می‌نماید و مسئله سطح پایین یک مسئله تخصیص ترافیک با تقاضای الاستیک است ۱. مدل موردنظر به‌صورت روابط (۱) تا (۸) است.

مسئله سطح بالا:

$$\max_{\tau,e} \quad SW = \sum_{w\in W} \int_0^{d_w(\tau,e)} D_w^{-1}(\omega)d\omega - \sum_{a\in A} t_a(v_a(\tau,e))v_a(\tau,e) \qquad (۱)$$

s.t

$$0 \le \tau_a \le \tau_a^{max} \quad ,a \in A' \qquad (۲)$$

$$0 \le e_a \le e_a^{max} \quad ,a \in A'' \qquad (۳)$$

$$\sum_{a\in A''} e_a.c_a \le \alpha(\sum_{a\in A''} c_a.e_{max}) \qquad (۴)$$

مسئله سطح پایین:

$$\min_{d,v} \sum_{a\in A} \int_0^{v_a} c_a(\omega,\tau_a,e)d\omega - \sum_{w\in W} \int_0^{d_w} D_w^{-1}(\omega)d\omega \qquad (۵)$$

s.t

$$\sum_{r\in R_w} f_r^w = d_w \ , w \in W \qquad (۶)$$

$$v_a = \sum_{w\in W}\sum_{r\in R_w} f_r^w \delta_{ar}^w , a \in A \qquad (۷)$$

$$f_r^w \ge 0, r \in R_w, w \in W \qquad (۸)$$

شبکه‌ای را فرض کنید که در آن، N تعداد گره‌ها و A مجموعه‌ی تمامی کمان‌های شبکه است SW نشان دهنده منافع عمومی برحسب وسیله نقلیه در دقیقه است. e مقدار افزایش ظرفیت هر کمان است، (این مقدار باید بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد و صفر بودنش به معنی اینست که هیچ‌گونه تغییری نباید در ظرفیت کمان مربوطه انجام شود). W نشان دهنده‌ی مجموعه‌ی تمامی مبدأ-مقصدهای شبکه است

[۱] Simulated annealing (SA)

و d_w مقدار تقاضا بین مبدأ و مقصد w است. D_w^{-1} معکوس تابع تقاضا است که برابر با هزینه سفر یا زمان سفر (دقیقه) بین هر مبدأ و ماستی‌باشد؛ e_{max} حد بالا برای مقدار افزایش ظرفیت روی هر کمان و A' مجموعه کمان‌هایی که روی آنها عوارض دریافت می‌شود؛ A'' مجموعه کمانهای کاندید افزایش ظرفیت (این مجموعه می‌تواند تمامی کمان‌های یک شبکه را در بر گیرد). c_a ظرفیت کمان a است. v_a نشان دهنده‌ی جریان روی کمان $a \in A$ و $t_a(v_a(\tau, e))$ تابع زمان سفر روی برحسب $A \in$ است که بر حسب جریان روی هر کمان یا همان v_a است. f_r^w جریان روی مسیر r بین مبدأ-مقصد w را نشان می‌دهد و R_w مجموعه‌ی تمامی مسیرهایی است که هر جفت مبدأ-مقصد $w \in W$ را به یکدیگر متصل می‌نمایند. δ_{ar}^w پارامتر وقوع کمان است و اگر برابر با یک باشد نشان دهنده‌ی این است که کمان a در مسیر r بین مبدأ-مقصد w قرار دارد، در غیر اینصورت آن را با صفر نشان می‌دهند.

در مدل معرفی شده رابطه (۲) و (۳)، محدودیت‌هایی هستند که بازه مجاز را برای جواب‌های موردنظر مشخص می‌نمایند ولی رابطه (۴) محدودیتی است که مقدار افزایش ظرفیت را در شبکه کنترل می‌نماید، این محدودیت بیانگر این مطلب است که بودجه در اختیار برای افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه، فقط به اندازه α برابر هزینه‌ای است که بتوان با استفاده از آن تمامی کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت را، بهبود بخشید ۱ جهت دستیابی به جوابهای موردنظر برای حل مسئله دوسطحی مطرح شده در این مدل نیز مانند تمامی مسئله‌های دوسطحی دیگر، در ابتدا باید مسئله سطح پایین حل شده تا با استفاده از جواب‌های به‌دست‌آمده از این مرحله بتوان جواب‌های نهایی را از مسئله سطح بالا استخراج نمود. جهت حل مسئله سطح پایین از الگوریتم فرانک-ولف استفاده شده‌است. سپس با جواب‌های حاصله از این مرحله و با استفاده از الگوریتم SA جواب‌های نهایی در حالت کلی، که مقدار عوارض بهینه و میزان افزایش ظرفیت هر کمان است، تعیین خواهند شد.

۳- روش حل مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم SA

الگوریتم SA در شکل ابتدایی خود بر پایه شباهت بین نورد جامدات و حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی شکل گرفته‌است. در این روش ابتدا از یک بازه مجاز که تمامی محدودیت‌های مسئله ارضا شوند، یک جواب انتخاب می‌گردد و سپس مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد. نکته مهم این است که در این الگوریتم جواب‌های بد نیز با احتمالی پذیرفته می‌شوند و سپس با پیشرفت الگوریتم و بالا رفتن تعداد تکرارها، این احتمال ضعیف‌تر می شود. این قابلیت الگوریتم SA این امکان را ایجاد می‌کند که مسئله

در یک بهینه محلی متوقف نشده و به بهینه سراسری همگرا شود ۲. روند کلی الگوریتم SA برای حل مدل ارائه شده، بدین صورت است:[۱]

مرحله آغازین

- ورودی‌های الگوریتم را مقداردهی نمایید:
  - مقادیر اولیه برای جواب‌های مسئله به‌صورت τ_0 و e_0
  - مقدار ماکزیمم عوارض، τ_{max} و مقدار ماکزیمم افزایش ظرفیت هر کمان e_{max}

- ضریب محدودیت هزینه در مسئله طراحی شبکه، α
- مقدار ارزش زمان سفر برحسب واحد پول بر دقیقه، b و مقدار ضریب الاستیسیته تابع تقاضا، γ
- پارامترهای اولیه الگوریتم :SA پارامتر کنترلی اولیه، T_0، پارامتر کنترلی مینیمم، T_s، تعداد تکرارها، M، ضریب کاهش پارامتر کنترلی، α.
- قرار دهید $k = k_1 = 0$ و به مرحله اول بروید.

مرحله ۱: اگر $T_k \prec T_s$ آنگاه $toll_0$ و e_0 جواب بهینه مسئله هستند وگرنه به مرحله بعد بروید.

مرحله ۲: اگر $k_1 \succ M$ به مرحله آخر بروید وگرنه به مرحله بعد بروید.[۲]

مرحله ۳: انتخاب جواب همسایه؛ به دلیل اینکه در این مسئله تعیین دو جواب عوارض بهینه و مقدار افزایش ظرفیت کمان‌ها، مدنظر است، به ۲ صورت جواب همسایه تعیین خواهد شد. (اولویت انتخاب عوارض و یا کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت رندم است)

روند تعیین جواب همسایه برای متغیر عوارض، بدین صورت است که در ابتدا عددی تصادفی از بازه[۰,۱] تعیین می‌شود که r نامیده می‌شود و سپس رابطه (۹) محاسبه می‌شود، البته مقدار عوارض جدید باید در بازه مجاز مشخص‌شده در رابطه (۲) باشد.

$$\tau_0 = \tau_0 + (2.\mathrm{r} - 1) \qquad (۹)$$

اگر فرض شود که تمامی کمان‌های افزایش ظرفیت، برداری را تشکیل دهند به نام e، روند تعیین مقدار افزایش ظرفیت کمان‌ها بدین صورت است که ابتدا یکی از کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت (e_i، یکی از اعضای بردار موردنظر) انتخاب شده و مقدار ظرفیت آن بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه خواهد شد که البته با هر تغییر باید روابط (۳) و (۴) کنترل شوند.

$$\mathrm{e_i} = \mathrm{e_i} + (2.\mathrm{r} - 1)/10 \qquad (۱۰)$$

مرحله ۴: اگر $F(X,I) \geq F(\tau_{k_1}, e_{k_1})$ و یا $F(X,I) \prec F(\tau_{k_1}, e_{k_1})$ زمانی که $random[0,1] \succ \mathrm{e}^{\left[\left(F(X,I)-F(\tau_{k_1},e_{k_1})\right)/T^k\right]}$، جایگزین کنید $\tau_{k_1+1} = X$ و $e_{k_1+1} = I$ و $k_1 = k_1 + 1$ و به مرحله ۲ بروید. وگرنه جایگزین کنید $\tau_{k_1+1} = \tau_{k_1}$ و $e_{k_1+1} = e_{k_1}$ و $k_1 = k_1 + 1$ و به مرحله ۲ بروید.

در این مرحله باید مقدار تابع هدف در مسئله سطح بالا محاسبه شود که برای این کار به مقادیر تقاضا بین هر مبدأ و مقصد یعنی d_w، و جریان روی هر کمان یعنی v_a، نیاز است. این مقادیر از مسئله سطح پایین به دست می‌آیند.

مرحله ۵: مقادیر جدید جایگزین کنید، $T^{k+1} = T^k.\alpha$ و $k = k + 1$ و $\tau_0 = \tau_M$ و $e_0 = e_M$ و $k_1 = 0$ و به مرحله ۲ بروید.[۱]

---

[۱] به دلیل اینکه دو سیاست طراحی شبکه و قیمت‌گذاری، حالت خاصی از سیاست همزمانی طراحی شبکه و قیمت‌گذاری است، الگوریتم بیان شده برای حالت همزمانی معرفی شده است.

[۲]. الگوریتم SA از یک حلقه داخلی تشکیل شده است که به آن اصلاحا الگوریتم متروپلیس گفته می‌شود، این مرحله به‌عنوان معیار پایانی الگوریتم متروپلیس است.

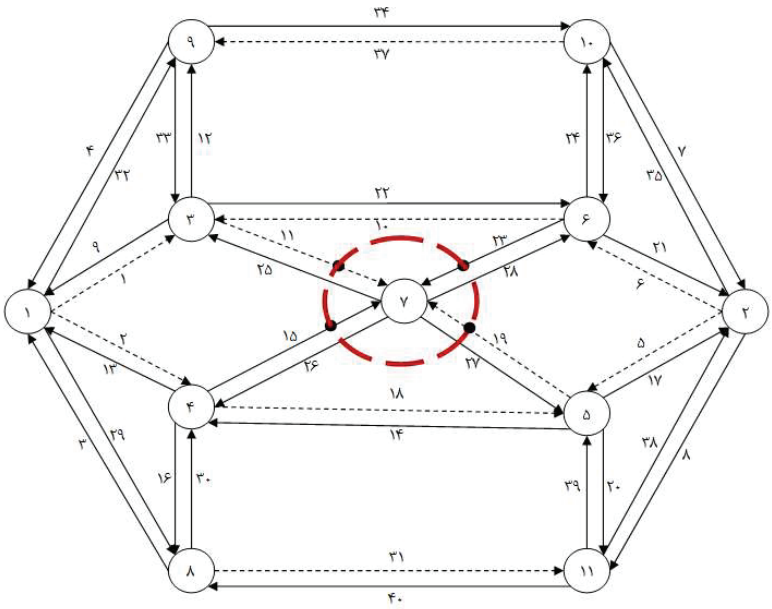
در این مرحله پس از اتمام یک دور الگوریتم مترو پلیس باید پارامتر کنترلی کاهش یابد.

۴- مطالعه موردی

در این مطالعه از یک شبکه با ۱۱ گره و ۴۰ کمان و ۴ زوج مبدأ و مقصد استفاده شده است ۴. سعی شده‌است شبکه مورد استفاده طوری انتخاب شود که بتوانند طیف وسیعی از جواب‌های ممکنه را در مسئله طراحی شبکه پوشش دهد.

جدول ۱: زمان سفر آزاد روی هر کمان و پتانسیل ظرفیتی هر کمان

شماره کمان	t_a^0	C_a	شماره کمان	t_a^0	C_a	شماره کمان	t_a^0	C_a	شماره کمان	t_a^0	C_a
۱	۲۰	۳۰۰۰	۱۱	۶	۲۰۰۰	۲۱	۲۰	۳۰۰۰	۳۱	۳۰	۴۰۰۰
۲	۲۰	۳۰۰۰	۱۲	۲۰	۴۰۰۰	۲۲	۱۵	۳۰۰۰	۳۲	۳۰	۴۰۰۰
۳	۳۰	۴۰۰۰	۱۳	۲۰	۳۰۰۰	۲۳	۶	۲۰۰۰	۳۳	۲۰	۴۰۰۰
۴	۳۰	۴۰۰۰	۱۴	۱۵	۳۰۰۰	۲۴	۲۰	۴۰۰۰	۳۴	۳۰	۴۰۰۰
۵	۲۰	۳۰۰۰	۱۵	۶	۲۰۰۰	۲۵	۶	۲۰۰۰	۳۵	۳۰	۴۰۰۰
۶	۲۰	۳۰۰۰	۱۶	۲۰	۴۰۰۰	۲۶	۶	۲۰۰۰	۳۶	۲۰	۴۰۰۰
۷	۳۰	۴۰۰۰	۱۷	۲۰	۳۰۰۰	۲۷	۶	۲۰۰۰	۳۷	۳۰	۴۰۰۰
۸	۳۰	۴۰۰۰	۱۸	۱۵	۳۰۰۰	۲۸	۶	۲۰۰۰	۳۸	۳۰	۴۰۰۰
۹	۲۰	۳۰۰۰	۱۹	۶	۲۰۰۰	۲۹	۳۰	۴۰۰۰	۳۹	۲۰	۴۰۰۰
۱۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۰	۲۰	۴۰۰۰	۳۰	۲۰	۴۰۰۰	۴۰	۳۰	۴۰۰۰



شکل ۱: شبکه فرضی

جدول ۲: اطلاعات تقاضای شبکه فرضی

مسیر	۱ به ۲	۱ به ۷	۲ به ۱	۲ به ۷
D_w^0	۱۶۰۰۰	۹۰۰۰	۱۶۰۰۰	۹۰۰۰

در شبکه فرضی، ۱۰ کمان از میان کمان‌های شبکه، به‌عنوان کاندید افزایش ظرفیت انتخاب شده‌اند که عبارت‌اند از ۱، ۲، ۵، ۶، ۱۰، ۱۱، ۱۸، ۱۹، ۳۱ و ۳۷. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، کمربند اخذ عوارض در این شبکه از مکان‌های اخذ عوارض قرارگرفته بر روی کمان‌های ۱۱، ۱۵، ۱۹ و ۲۳ تشکیل شده‌است و با یک خط نقطه‌چین مشخص شده‌است. تابع زمان سفر برای تمامی کمان‌ها و تابع تقاضای سفر، به ترتیب مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) است.

$$t = t^0\left[1+\alpha\left(\frac{v_a}{c_a(1+e_a)}\right)^{\beta}\right] \qquad (۱۱)$$

$$d_w = \bar{D}_w \exp(-\gamma\mu_w) \qquad w \in W \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۱) و (۱۲)، t متوسط زمان سفر برای طی یک کیلومتر از طول کمان a برحسب دقیقه است، t_a متوسط زمان سفر آزاد برای طی یک کیلومتر از طول کمان a، x حجم جریان ترافیک برحسب وسیله نقلیه همسنگ سواری برای یک متر عرض عبور در ساعت، C_a ظرفیت هر کمان و μ_w کمترین زمان سفر بین مبدأ و مقصد برحسب دقیقه است. در رابطه (۱۲)، γ پارامتر الاستیسیته است که از ضریب ۰,۰۱ استفشده استاست. ضرایب α و β در رابطه (۱۱) به ترتیب ۰,۰۵ و ۴ فرض شده‌اند. لازم به ذکر است که ضریب α در رابطه (۴) برابر ۰,۴ در نظر گرفته شده‌است و همچنین میزان بیشترین افزایش ظرفیت هر کمان، e_a^{max}، در رابطه (۳) برابر ۰,۲ در نظر گرفته شده‌است که این ۲۰٪ افزایش ظرفیت با استفاده از انواع روش‌های ساماندهی معابر قابل اجرا است.

۵- تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم SA

در الگوریتم SA تعیین برخی پارامترها، می‌تواند به‌نوعی موفقیت الگوریتم را تضمین نماید ۵ که عبارت‌اند از جواب یا پیکربندی اولیه، پارامتر کنترلی اولیه و نهایی، تعیین جواب همسایه، چگونگی کاهش پارامتر کنترلی در هر مرحله و ماکزیمم تعداد تکرارهای مجاز. در این مطالعه از جواب اولیه صفر و رابطه $T^{k+1} = T^k.\alpha$ برای روند کاهش دما استفاده شده‌است. به‌منظور دستیابی به یک جواب بهینه، بر روی ۴ پارامتر الگوریتم SA تحلیل حساسیت شده‌است. بدین منظور با در نظر گرفتن دو حالت بیشتر و کمتر نسبت به حالت پایه، برای هر پارامتر، ۳ مقدار تعیین شده‌است[۱] که در جدول (۳) قابل مشاهده است. تحلیل حساسیت انجام شده به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی است. تحلیل حساسیت دوبعدی بدین صورت است که ابتدا مقادیر پایه‌ای برای ۴ پارامتر موردنظر در نظر گرفته می‌شود و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود، سپس با تغییر دادن مقدار یکی از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها، مجدداً مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود.

جدول ۳: سه مقدار در نظر گرفته شده برای پارامترهای الگوریتم SA

	حالت بیشتر (۱)		حالت پایه (۲)		حالت کمتر (۳)	
تعداد تکرارها در هر دما (M)	۵۰	۱۰۰	۳۰	۵۰	۲۰	۲۵
ضریب کاهش دما (α)	۰,۹۵	۰,۹۵	۰,۹	۰,۹	۰,۸۵	۰,۸۵
دمای نهایی (T_s)	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۵	۰,۰۰۵
دمای اولیه (T_0)	۱۰	۱۰۰۰	۱	۱۰۰	۰,۱	۱۰

به‌منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از اجرای سیاست‌های مختلف، در این مطالعه از سه سیاست استفاده شده است. سیاست اول قیمت‌گذاری محدوده‌ای به‌تنهایی، سیاست دوم طراحی شبکه و سیاست سوم که هدف اصلی این مطالعه است، اعمال هم‌زمان قیمت‌گذاری و طراحی شبکه است. در جدول (۳) برای استراتژی ۱ و ۲ پارامترهای مشابهی در نظر گرفته شده‌است (اعداد سمت راست ستون) ولی برای استراتژی ۳ که تعیین دو متغیر هم‌زمان است، طبیعی است که به تعداد تکرارهای بیشتری نیاز است و به همین دلیل ضرایب متفاوتی انتخاب شده است (اعداد سمت چپ ستون).

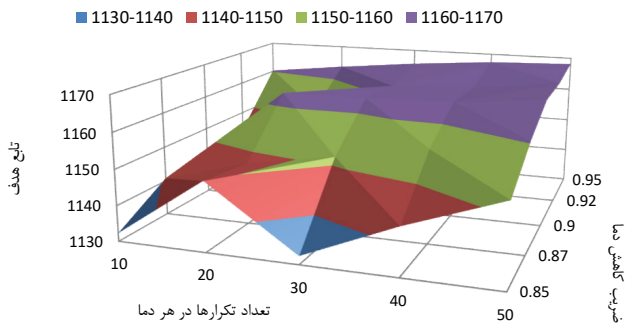
پس از اجرای برنامه، و اعمال سه سیاست مذکور، بهترین نتایج حاصل از تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی صورت گرفته در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین در قالب دو شکل می‌توان نمودارهای تحلیلی حساسیت ۳ بعدی را برای دو سیاست طراحی شبکه و قیمت‌گذاری-طراحی شبکه به‌طور هم‌زمان مشاهده نمود.

جدول ۴: نتایج حاصل از تحلیل حساسیت دوبعدی و سه‌بعدی بر روی شبکه فرضی

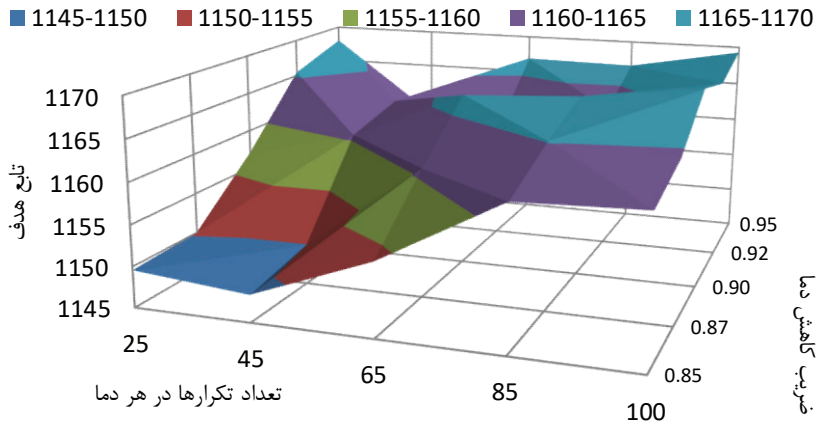
پارامتر / سیاست	M	α	T_0	T_s	تابع هدف×10^2	عوارض
قیمت‌گذاری	۵۰	۰,۹	۱۰	۰,۰۰۵	۹۳۸,۸۱۲	۰,۸۲۶
طراحی شبکه	۵۰	۰,۹۵	۱۰	۰,۰۰۲	۱۱۶۸,۱۹۱	
قیمت‌گذاری و طراحی شبکه به‌طور هم‌زمان	۱۰۰	۰,۹	۱۰۰	۰,۰۰۱	۱۱۶۹,۳۷۵	۳,۳۶۱

جدول ۵: میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه با اجرای سیاست دوم و سوم

شماره کمان	۱	۲	۵	۶	۱۰	۱۱	۱۸	۱۹	۳۱	۳۷
میزان افزایش ظرفیت با اجرای سیاست دوم	۰,۰۳	۰,۰۸	۰,۰۱	۰,۰۹	۰,۱۷	۰,۱۸	۰,۱۵	۲۴۰۰	۰	۰
میزان افزایش ظرفیت با اجرای سیاست سوم	۰,۱۲	۰,۰۸	۰,۱۳	۰,۰۵	۰,۱۶	۰,۰۳	۰,۱۶	۰,۰۵	۰,۰۲	۰



شکل ۲: نمودار سه‌بعدی تحلیل حساسیت پارامترهای M و α در استراتژی طراحی شبکه



شکل ۳: نمودار سه‌بعدی تحلیل حساسیت پارامترهای M و α در استراتژی طراحی شبکه-قیمت‌گذاری به‌طور هم‌زمان

با بررسی نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۶، مشخص است که با اجرای هم‌زمان طراحی شبکه و قیمت‌گذاری محدوده‌ای به‌طور هم‌زمان، بیشینه منافع عمومی حاصل خواهد شد.

جدول ۶: تغییرات میزان منافع عمومی با اجرای سیاست‌های مختلف

طرح اجرایی	مقدار تابع هدف	میزان افزایش نسبت به حالت پایه
حالت پایه	۹۳۷,۴۵۱×۱۰^۲	
قیمت‌گذاری	۹۳۸,۸۱۲×۱۰^۲	۰,۱۴٪
طراحی شبکه پیوسته	۱۱۶۸,۱۹۶×۱۰^۲	۲۴,۶۱٪
قیمت‌گذاری و طراحی شبکه به‌طور هم‌زمان	۱۱۶۹,۳۷۵×۱۰^۲	۲۴,۷۴٪

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با تمرکز بر یک ایده نوین، اثرات اجرای دو سیاست طراحی شبکه پیوسته و قیمت‌گذاری باوجود یک کمربند اخذ عوارض، در کنار یکدیگر موردبررسی قرارگرفته است و بدین منظور مدلی ارائه شده است که بتوان با استفاده از آن مقدار عوارض بهینه و میزان افزایش ظرفیت بهینه را باهدف بیشینه کردن منافع عمومی به دست آورد. با بررسی مدل ارائه شده می‌توان به‌خوبی متوجه شد که با تلفیق توابع هدف و انتخاب محدودیت‌های مناسب، دو سیاست حمل‌ونقلی را در کنار یکدیگر مدل‌سازی نمود و درنهایت یک مدل واحد معرفی نمود و چگونه می‌توان با استفاده از الگوریتم SA به‌طور هم‌زمان دو متغیر از دو جنس متفاوت را تعیین نمود. همچنین در این مطالعه نشان داده‌شده است که بررسی مسئله طراحی شبکه با تقاضای الاستیک تا چه اندازه مهم است چراکه با تغییرات عرضه، تقاضا نیز تغییر خواهد کرد و مهم‌تر اینکه اگر بدون در نظر گرفتن تغییرات تقاضا افزایش عرضه صورت گیرد ممکن است هزینه‌های صرف شده در جهت افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه بیهوده بوده و نتوان نتیجه موردنظر را در مدیریت تقاضا با ارائه این تسهیلات به دست آورد.

درنهایت مدل ارائه شده بر روی یک شبکه فرضی اجرا شد؛ شبکه مورد استفاده طوری انتخاب شده است که بتواند طیف وسیعی از جواب‌های ممکنه را در مسئله طراحی شبکه پوشش دهد. در ادامه با

اجرای سه سیاست: ۱- قیمت‌گذاری، ۲- طراحی شبکه و ۳- قیمت‌گذاری و طراحی شبکه هم‌زمان، نتایج ذیل حاصل شد:

۱. اجرای سیاست سوم، بیشترین افزایش منافع عمومی را نسبت به حالت پایه به دنبال داشته است.
۲. اجرای سیاست اول، کمترین افزایش منافع عمومی را نسبت به حالت پایه به دنبال داشته است.
۳. با افزایش سطح بودجه در دو سیاست ۲ و ۳، مقدار تابع هدف افزایش داشته تا جایی که تغییرات به سمت صفر میل می‌کند.
۴. عوارض بهینه به‌دست‌آمده در سیاست ۳ لزوماً برابر با عوارض بهینه به‌دست‌آمده از اجرای سیاست ۱، برابر نیست.
۵. اولویت افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه در دو سیاست ۲ و ۳، ارتباط مستقیمی با خصوصیات شبکه موردبررسی و محدودیت هزینه در نظر گرفته شده در مدل دارد.
۶. در صورت عدم دریافت عوارض، با توجه به ماهیت محدودیت هزینه در نظر گرفته شده، ابتدا کمان‌های بازمان سفر کمتر و پتانسیل ظرفیتی پایین‌تر، افزایش ظرفیت خواهند داشت.

مقایسه این نتایج با یکدیگر می‌تواند ابزاری باشد در جهت اتخاذ تصمیمی صحیح از طرف سیاست‌گذاران حمل‌ونقلی که با توجه به هدف مدنظر و شرایط موجود، بهترین سیاست انتخاب گردد.

۷- منابع

1. *Pojani, D.; Stead, D. Sustainable Urban Transport in the Developing World: Beyond Megacities. Sustainability 2015, 7, 7784–7805.*
2. YILDIRIM, M.B., *congestion toll pricing models and methods for variable demand networks*. 2001, UNIVERSITY OF FLORIDA.
3. *Smith, M. J, " The marginal cost taxation of a transportation network", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 13, no. 3, pp-242-237, (1979).*
4. *Verhoef, E. T. " Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands", Regional Science and Urban Economics, Vol. 32, No. 3, pp-281-310, (2000).*
5. *Verhoef, E. T., " Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 36, No. 8, pp-707-729, (2002).*
6. *Zhang, X. and Yang, H., "The optimal cordon-based network congestion pricing problem", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 38, No. 6, pp-517-*537, (2004).
7. *Chen, M., Bernstein, D., "Solving the toll design problem with multiple user groups", Transport Research Part B: Methodological, Vol. 38, No. 5, pp-61-79, (2004).*
8. *Maruyama, T. and Sumalee, A. , "Efficiency and equity comparison of cordon- and area based road pricing schemes using a trip-chain equilibrium model", Transportation Research Part A, Vol. 41, No7, pp-655-671, (2007).*
9. *Chiou, S.W., "Bilevel programming for the continuous transport network design problem" Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 39, pp-361-383, (2005).*
10. *Shepherd, S.P. and May, A.D., "How to Design Effective Road Pricing Cordons", ۱۱th World Conference on the Transportation Research, Berkeley, (2007).*
11. *Feng, S. and Chen,Y. , "Class of comprehensive optimization of congested road-use pricing and parking pricing", Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, Vol. 9, No. 1, pp-74-790, (2009).*

12. *Jian, W. and Guanglin, S. , "Combinatorial Optimization of Congested Road and Parking Charging", Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, Vol. 10, No. 3, pp-24-28, (2010)*
13. *Tsai, Jyh-Fa, and Shao-Yu Lu. "Reducing traffic externalities by multiple-cordon pricing." Transportation (2016): 1-26.*
14. *Afandizadeh, Shahriar, and Seyed Ebrahim Abdolmanafi. "Development of a Model for a Cordon Pricing Scheme Considering Environmental Equity: A Case Study of Tehran." Sustainability 8, no. 2 (2016): 192.*
15. *Afandizadeh, Shahriar, and Seyed Ebrahim Abdolmanafi. "Cordon Pricing Considering Air Pollutants Emission." PROMET-Traffic&Transportation 28, no. 2 (2016): 179-189.*
16. *Zhang, Wenjia, and Kara M. Kockelman. "Congestion pricing effects on firm and household location choices in monocentric and polycentric cities." Regional Science and Urban Economics 58 (2016): 1-12.*
17. *Lindsey, Robin. "Road pricing and investment." Economics of transportation 1.1 (2012): 49-63.*
18. *Chen, Ruoyun, and Linda Nozick. "Integrating congestion pricing and transit investment planning." Transportation Research Part A: Policy and Practice 89 (2016): 124-139.*
19. *Yang,H. and Q. Meng, "Highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 34, No. 3, pp-207-222, (2000).*

Integrating cordon pricing and network design in urban networks

Shahriar Afandizadeh, Yaser Taghizadeh

Assoc. Prof. of Civil Eng. Dept., Iran University of Science and Technology
PHD Student of Civil Eng. Dept., Iran University of Science and Technology

Yaser.tz@Gmail.com

Abstract:
Urban growth and increasing tendency to use a private vehicle are such as reasons that cause to congestion in transportation network in many cities. To solve this problem, using the methods of travel demand management, such as congestion pricing and methods of increasing supply, such as network design, has increased.
The purpose of this study is to provide a model that can determine the optimum toll and the increased capacity of the candidate links in the network, simultaneously.This model is formulated as a bi-level program.The objective function at the upper level is defined as maximize the social welfare and Simulated Annealing (SA) algorithm used to determine the optimal solution.The lower level problem is formulated as traffic assignment with elastic demand and Frank–Wolfmethod is used to solve it.
In this study, different policieshave been studied. These policies are the network design, congestion pricing, network design and congestion pricing simultaneously and network design after congestion pricing. The study results indicated that thenetwork design and congestion pricing simultaneously policy, has been lead to the highest increase in the social welfare.

Keywords: ***congestion pricing, network design, social welfare, user equilibrium, frank-wolf, simulated annealing.***