

# قیمت‌گذاری یال‌های شریانی شبکه‌های حمل و نقل شهری با استفاده از برنامه‌ریزی دوسطحی

فاطمه تاری (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

عیسی نخعی کمال آبادی، استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

شکرانه خشخاشی مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: ftari23@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۷ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۲۰

## چکیده:

استراتژی قیمت‌گذاری خیابانها به عنوان راهکاری مناسب در کنترل تقاضا و روشی برای تأمین هزینه‌های بخش حمل و نقل مطرح است. در این مقاله از یک طرح قیمت‌گذاری که شامل یک مدل دوسطحی است، استفاده شده است. این مدل در شبکه‌های بزرگ با چندین زوج مبدا- مقصد و چندین یال، قابل پیاده کردن است. در این طرح تنها به تعدادی از یالهای شریانی شبکه‌های حمل و نقل درون شهری، مفهوم قیمت‌گذاری یا عوارض مسیر تخصیص می‌یابد. با توجه به سخت بودن مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی، بخصوص قیمت‌گذاری در شبکه‌های واقعی با تعداد یالها و گره‌های متعدد، برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۱</sup> استفاده شده است. جهت بررسی اثرات احتمالی مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی از داده‌های واقعی محدوده طرح ترافیک تهران استفاده شده است. نتایج حاصل شده در این پژوهش بیانگر این مطلب است که تغییر نرخ عوارض، مسیر تأثیر مستقیم بر جریان ترافیکی شبکه و تغییر مسیر کاربران دارد.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری شبکه، برنامه‌ریزی دوسطحی، سخت بودن، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات.

## ۱. مقدمه

افزایش روزافزون خودروهای شخصی و محدودیت‌های موجود برای احداث معابر جدید و پیامدهای منفی آن به معضلی برای اکثر شهرهای بزرگ تبدیل شده است. امروزه یکی از مسائل مهم مدیریت شهری، مسئله کنترل تردد خودروها در معابر شهری و نحوه ارائه خدمات حمل و نقل عمومی است. از جمله راهکارهایی که برای رویارویی با این معضل و حل آن می‌توان در نظر گرفت، قیمت‌گذاری معابر به عنوان یکی از روش‌های محدودیت ترافیک است. قیمت‌گذاری خیابانها از طریق گرفتن عوارض از افراد، موجب ترغیب آنها به استفاده از وسایل حمل و نقل عمومی و حتی انتقال سفر افراد به مکانها و ساعاتی از روز با هزینه اجتماعی کمتر می‌شود. این روش علاوه بر فراهم ساختن امکان استفاده بهتر از زیرساخت‌های موجود می‌تواند در کاهش ترافیک، روانی حرکت در خیابانها و کاهش عوارض زیست محیطی ناشی از تراکم ترافیک نیز مؤثر واقع شود.

ایده دریافت عوارض از دارندگان وسایل نقلیه اولین بار توسط پیگو در سال ۱۹۲۰ در کتاب "اقتصاد رفاهی" مطرح شد. والترز در ادامه تحقیقات پیگو، در سال ۱۹۶۱ توضیحی جامع از قیمت‌گذاری ترافیک ارائه داد. در سالهای بعد محققان دیگری همچون ویکری در سال ۱۹۶۳ با انتشار مقاله‌ای در مورد قیمت‌گذاری خیابانها در حمل و نقل شهری و برون شهری، بکمن در سال ۱۹۶۵ با مطالعه عوارض بهینه بزرگراهها، پل‌ها و تونل‌ها و مجدداً ویکری در سال ۱۹۶۹ تئوری‌های دیگری درباره ترافیک ارائه کردند [Morgul, 2010].

موریسون در سال ۱۹۸۶ نظریه عوارض بهینه را که قیمت‌گذاری تراکم بر اساس آن شکل گرفته است، با استفاده از منحنی جریان سرعت طراحی کرد. این نظریه پیشنهاد می‌کند که به منظور رسیدن به حالت بهینه اجتماعی، عوارض در نظر گرفته شده باید با اختلاف هزینه‌های حاشیه‌ای اجتماعی و هزینه متوسط فردی هر یک از کاربران شبکه برابر باشد [Morgul, 2010]. این تئوری منجر به دو طرح قیمت‌گذاری اولین-بهترین<sup>۳</sup> و دومین-بهترین<sup>۴</sup> شد. یانگ و لم در سال ۱۹۹۶ ترکیبی از مسئله تخصیص ترافیک

و قیمت‌گذاری خیابانها را در دو حالت صف و تراکم بررسی کردند [Yang and Lam, 1996]. یانگ و بل برای از بین بردن تأخیرات غیرضروری ناشی از ایجاد صف در شبکه و نگاه داشتن تقاضای تعیین شده در یک سطح مطلوب که در محدودیت‌های ظرفیتی محیط نیز صدق کند، از یک مدل تعادل شبکه با تقاضای منعطف و با در نظر گرفتن صف استفاده کردند [Yang and Bell, 1997]. ژانگ و یانگ قیمت‌گذاری تراکم به روش دومین-بهترین را در محدوده کمربندی از شبکه‌های جاده‌ای، برای انتخاب سطح بهینه عوارض و همچنین محل بهینه اخذ عوارض بررسی کردند [Zhang and Yang, 2004]. بویلس، کاکلمن و والر با در نظر گرفتن طرح اول-بهترین، پویا بودن شبکه‌های حمل و نقل و تغییرات روز به روز در ظرفیت شبکه را مورد توجه قرار دادند [Boyles, Kockelman and Waller, 2010].

لبه و همکاران یک مدل دوسطحی کلی را برای تعیین عوارض کالا و خدمات ارائه کردند [Labbe, Marcotte and Savard, 1998]. بروتکورن و همکاران نیز دو روش ابتکاری برای حل مدل دوسطحی قیمت‌گذاری شبکه (معرفی شده توسط لبه) ارائه کردند که برای به دست آوردن جواب نزدیک به بهینه در مسائلی با مقیاس بزرگ قابل استفاده است [Brotcorne et al., 2001]. راج و همکاران یک الگوریتم تقریبی برای حل مسئله فوق پیشنهاد کردند که تنها یک زوج مبداء-مقصد را در نظر می‌گیرد [Roch, Sevard and Marcotte, 2005]. هوسل نیز روش شاخه و کرانی را برای حل این مسئله بکار برده است که در آن از روش<sup>۵</sup> SPG (گراف کوتاه‌ترین مسیر که توسط بوتو و همکاران در سال ۲۰۰۲ معرفی شد)، استفاده شده است [Ho-esel, 2008]. هیلپورن و همکاران، افزایش سود ناشی از عوارض زیرمجموعه‌ای از یال‌ها در شبکه‌ای با چند زوج مبداء-مقصد را، در حوزه قیمت‌گذاری بزرگراه‌ها مورد بررسی قرار دادند [Heilporn et al., 2011]. اهازولایک، یک طرح عوارض‌بندی منعطف را طراحی کرده است که می‌تواند برای توزیع ترافیک شبکه‌های حمل و نقل و همچنین کمینه کردن اثرات جانبی آن، مثل سر و صدا، انتشار آلودگی، تراکم، تصادفات و غیره، استفاده

گردد [Ohazulike, 2010]. الیاسون و جانسون طی چند مقاله تأثیرات اجرای آزمایشی طرح قیمت گذاری تراکم در استکهلم را در قالب کاهش قابل توجه زمان سفر، کاهش تراکم ترافیک و اثرات زیست محیطی آن، کاهش حوادث سفر، تغییر الگوهای ترافیکی و ... بررسی کردند [Eliasson and Jonsson, 2008; Eliasson, 2009, Eliasson and Jonsson, 2011].

مدل های پایه ای که در زمینه قیمت گذاری معابر توسط محققانی چون یانگ و لم (۱۹۹۶) و یانگ و بل (۱۹۹۷) ارائه شده اند، تنها مسائلی مانند صف و تراکم شبکه را در نظر گرفته و بیشتر برای شبکه های ساده شده ای که شامل دو یال هستند (در واقع شبکه هایی که برای یک یال عوارض تعیین می کنند مثل یک پل، یک تونل و یا یک آزادراه) مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه نیز، پژوهشگران این حوزه بیشتر فعالیت های خود را بر توسعه مدل های مذکور و ارائه روش های حل، متمرکز ساخته اند. بیشتر روش های حل پیشنهادی، بر روی شبکه های نمونه با اندازه های کوچک مورد بررسی قرار گرفته اند. تحقیقاتی که سعی در پیاده سازی مدل های فوق بر روی شبکه های حمل و نقل واقعی دارند نیز تا حد زیادی به ساده سازی شبکه مسئله می پردازند.

هدف اصلی این مقاله پیاده سازی قیمت گذاری تراکم برای مجموعه ای از یال های شریانی و حساس در یک شبکه حمل و نقل چند مبداء - مقصدی است تا از این طریق به کاهش تراکم جریان در این یال ها کمک نموده و کاربران به استفاده از یال ها و مسیرهای جایگزین ترغیب شوند. در اکثر پژوهش های انجام شده در ایران نیز، با تبدیل شبکه به یک مسیر، و محاسبه عوارض برای مسیر به دست آمده، مسئله موجود به نحو چشم گیری ساده سازی شده است. در پژوهش پیش رو مدل ارائه شده روی کل شبکه و برای یال های متعدد و مسیرهای متفاوت طراحی شده است. بنابراین، از این جهت می توان نوآوری اصلی این مقاله را در اجرای مدل بر کل یک شبکه واقعی و همچنین استفاده از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات برای حل آن بیان کرد. الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات تاکنون برای حل این مسئله مورد استفاده قرار نگرفته است، اما نتایج به دست آمده در این پژوهش بیانگر

کارایی بسیار زیاد الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات برای حل مدل موجود است. برای بررسی مدل در محیط واقعی و نتایج مؤثر احتمالی آن روی شبکه، محدوده طرح ترافیکی شهر تهران به عنوان شبکه نمونه در نظر گرفته شده است و مدل برای داده های ترافیکی این محدوده اجرا شده است

مدلی که در این مقاله ارائه می شود، بر اساس مدل دوسطحی ارائه شده توسط لبه و همکاران (۱۹۹۸) است که برای قیمت گذاری معابر در یک شبکه حمل و نقل با چند مبداء - مقصد و در اندازه های بزرگ کاربرد دارد. مدل های دوسطحی نوعی از بازی استکلبرگ<sup>۶</sup> هستند و در آنها سطح اول مدل، رهبر و سطح دوم، پیرو نامیده می شود. در سطح بالای مدل دوسطحی مورد نظر، متولیان شبکه قرار دارند که به تنظیم عوارض برای مجموعه ای از یال های شبکه می پردازند. تابع هدف در سطح بالا، بیشینه کردن درآمد حاصل از مجموع عوارض اخذ شده است. در سطح پایین مدل کاربران شبکه قرار دارند که در جستجوی کوتاهترین مسیر بین مبداء و مقصد خود هستند. تابع هدف در این سطح، کمینه کردن هزینه سفر روی یال های شبکه است.

## ۲. مدل مسئله

یک شبکه حمل و نقل را با چند زوج مبداء - مقصد در نظر می گیریم. با فرض اینکه  $G = (N, A)$  نشان دهنده گراف شبکه حمل و نقل باشد.  $K$  را مجموعه اندیس گروه هایی از کاربران شبکه که بین هر زوج مبداء - مقصد مشخص سفر می کنند (یا برای ساده تر شدن مسئله به صورت مجموعه مبداء - مقصدها) در نظر گرفته و هر زوج مبداء - مقصد را به صورت  $(o(k), d(k))$  نمایش می دهیم. سایر متغیرها و پارامترهای مسئله به صورت زیر تعریف می شوند:

$A$  مجموعه یال های شبکه

$N$  مجموعه گره های شبکه

$A_1 \subset A$  مجموعه یال های دارای عوارض،

$A_2 = A - A_1$  مجموعه یال های بدون عوارض

$T_a$  عوارض یال  $a \in A_1$

$$s.t. \sum_{a \in i^+} (x_a^k + y_a^k) - \sum_{a \in i^-} (x_a^k + y_a^k) = b_i^k \quad \forall k \in K, \forall i \in N \quad (5)$$

$$x_a^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall a \in A_1 \quad (6)$$

$$y_a^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall a \in A_2 \quad (7)$$

که  $i^+$  و  $i^-$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$i^+ = \{(i, k) \in A : k \in N\} \quad (8)$$

$$i^- = \{(k, i) \in A : k \in N\} \quad (9)$$

رابطه (۲) تابع هدف سطح بالا و مفهوم آن بیشینه‌سازی درآمد حاصل از عوارض است، رابطه (۳) بیان می‌کند که عوارض هر یال بین یک کران بالا و پایین است، رابطه (۴) تابع هدف سطح پایین و به دنبال یافتن کوتاهترین مسیر برای هر زوج مبدا-مقصد است و در نهایت، رابطه (۵) بیان می‌کند که مقدار جریان ورودی به هر گره برابر میزان جریان خارج شده از آن است.

### ۳. الگوریتم حل مسئله

با وجود اینکه برخی حالات خاص مسئله مورد بحث در زمان چند جمله‌ای قابل حل هستند، مدل مذکور در حالت کلی - زمانی که چند زوج مبدا-مقصد و چند یال دارای عوارض وجود دارد- در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. لبه، مارکوت و ساوارد (۱۹۹۸) در مقاله خود برای نشان دادن NP-hard بودن مسئله پایه، اثباتی با اقتباس از مسئله یافتن مسیر همیلتونی جهت‌دار ارائه کردند. همچنین در مقاله‌ای دیگر راج، ساوارد و مارکوت (۲۰۰۵) با متناظر کردن مسئله به مسئله 3-Sat (یکی از مسائل NP-hard شناخته شده)، ثابت کردند که مسئله پیش‌رو نیز NP-hard است. علاوه بر نکات فوق، بکارگیری چنین مدل‌هایی برای شبکه‌های واقعی، به دلیل بزرگ بودن مقیاس، بر سختی حل آنها می‌افزاید و بنابراین این مسائل با استفاده از روش‌های معمول، قابل حل نیستند. از جمله رویکردهای موجود برای حل مسائلی از این دست، استفاده از روش‌های فراابتکاری است. روشی که در این مقاله به کار گرفته شده است، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۱</sup> برای مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی است.

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات یک الگوریتم جستجوی تصادفی بر پایه هوش جمعی و مبتنی بر قوانین احتمال است. ایده اولیه این

$T_a^{\max}$  حد بالای عوارض برای یال  $a \in A_1$

$T_a^{\min}$  حد پایین عوارض برای یال  $a \in A_1$

$c_a$  هزینه ثابت یال  $a \in A_1$

$d_a$  هزینه ثابت یال  $a \in A_2$

$b^k$  بردار تقاضا برای هر زوج مبدا-مقصد  $k$

$n^k$  تعداد کاربران هر زوج مبدا-مقصد  $k$

$x_a^k$  مقدار جریان بین هر زوج مبدا-مقصد  $k$  که از یال  $a \in A_1$

عبور می‌کند

$y_a^k$  مقدار جریان بین هر زوج مبدا-مقصد  $k$  که از یال  $a \in A_2$

عبور می‌کند

هزینه‌های ثابت  $c_a$  و  $d_a$  شامل اجزایی چون مصرف سوخت، زمان سفر، ... هستند. برای هر زوج مبدا-مقصد  $k$  بردار تقاضا  $b^k$  به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (با فرض ثابت بودن تقاضا):

$$b_i^k = \begin{cases} n^k & \text{if } i = o(k) \\ -n^k & \text{if } i = d(k) \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (1)$$

در این مدل ترافیک تمام مسیرها یکسان در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر تراکم ترافیک، نادیده گرفته می‌شود (ماهیت مدل‌هایی که تراکم را در نظر می‌گیرند متفاوت و اغلب برای شبکه‌هایی با تعداد یال‌های محدود است). با توجه به این نکته برای هر مقدار عوارض  $T_a$  که توسط تصمیم‌گیرنده رهبر تعیین می‌شود، کاربران کوتاه‌ترین مسیری که هر زوج مبدا-مقصد را به هم وصل می‌کند، برای سفر انتخاب می‌کنند. با مفروضات بیان شده مسئله تعیین عوارض برای یال‌های یک شبکه حمل و نقل به صورت مسئله دوسطحی خطی با توابع هدف دوخطی<sup>۲</sup> و محدودیت‌های خطی زیر فرموله می‌شود (توابع دوخطی توابعی هستند که نسبت به متغیرهای هر سطح به تنهایی خطی و با در نظر گرفتن هم‌زمان متغیرهای دو سطح، غیرخطی هستند):

$$\max_{T, x, y} \sum_{a \in A_1} \sum_{k \in K} T_a x_a^k \quad (2)$$

$$s.t. \quad T_a^{\min} \leq T_a \leq T_a^{\max} \quad \forall a \in A_1 \quad (3)$$

$$\min_{x, y} \sum_{k \in K} \left( \sum_{a \in A_1} (c_a + T_a) x_a^k + \sum_{a \in A_2} d_a y_a^k \right) \quad (4)$$

## قیمت گذاری یال های شریانی شبکه های حمل و نقل شهری با استفاده ...

استفاده می شود. گام های این الگوریتم برای مسئله مورد بررسی به صورت زیر است.

۱. ابتدا جمعیتی از جوابها یا ذرات اولیه ایجاد می کنیم. در این مسئله ذرات، همان بردار متغیرهای سطح بالا و یا به عبارت دیگر، عوارض یال های پرتردد هستند. اگر تعداد یال های دارای عوارض  $n$  باشد و تعداد زوج مبدا- مقصدها  $m$  باشد آنگاه داریم:

$$T \begin{matrix} T_{a_1} & T_{a_2} & \dots & T_{a_n} \end{matrix}$$

۲. مقادیر به دست آمده تصادفی برای متغیر سطح بالا را در مسئله سطح پایین قرار داده و آن را با الگوریتمی برای یافتن کوتاه ترین مسیر (دایکسترا<sup>(۱)</sup>) حل کرده و متغیرهای سطح پایین را به دست می آوریم، متغیرهای سطح پایین به صورت ماتریسی در نظر گرفته می شوند که تعداد ستون های آن برابر تعداد یال های دارای عوارض، و تعداد سطرها ی آن برابر تعداد زوج مبدا- مقصدها است.

	$a_1$	$a_2$	...	$a_n$
$K_1$	$x_{a_1}^{k_1}$	$x_{a_2}^{k_1}$	...	$x_{a_n}^{k_1}$
$K_2$	$x_{a_1}^{k_2}$			
.	.			
.	.			
$K_m$	$x_{a_1}^{k_m}$			$x_{a_n}^{k_m}$

۳. مقادیر pBest و gBest را به مقادیر فعلی جواب های اولیه تنظیم می کنیم،

۴. گام های زیر را برای همه ذرات تکرار می کنیم:

۴-۱) بردارهای موقعیت و سرعت ذرات و همچنین  $w$  را با معادلات (۱۰) تا (۱۲) بهنگام می کنیم،

۴-۲) مسئله سطح پایین را برای متغیرهای سطح بالای بهنگام شده حل کرده و مقادیر متغیرهای سطح پایین را به دست می آوریم،  
۴-۳) مقدار متغیرهای سطح بالا و پایین را در تابع هدف سطح بالا

الگوریتم، در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهارت و کندی برای دسته ای از مسائل بهینه سازی که ماهیت پیوسته بر جوابهای آنها حاکم است، ارائه شد. این الگوریتم یک مثال ساده از یادگیری اجتماعی است و از رفتار اجتماعی پرندگان در حین جستجوی غذا، برای هدایت جمعیت به منطقه امیدبخش (محل غذا)، نشأت گرفته است. در این الگوریتم ابتدا مجموعه ای از ذرات به شیوه ای تصادفی تولید می شوند که گروه نام دارند. هر ذره معادل یک جواب مسئله است، فضای اطرافش را برای پیدا کردن کمینه یا بیشینه محلی جستجو می کند و دارای دو مولفه موقعیت و سرعت است که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و جهت حرکت آن در فضای جواب هستند. در هر مرحله از حرکت جمعیت، هر ذره با دو مقدار بهترین بهنگام می شود. اولین مقدار، بهترین موقعیتی است که با توجه به مقدار مطلوبیت آن، تاکنون به صورت جداگانه به دست آمده است. این مقدار pBest نامیده می شود. دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط تمام ذرات گروه به دست آمده است. این مقدار با gBest نمایش داده می شود. بعد از یافتن pBest و gBest برای هر ذره، سرعت و موقعیت جدید آن طبق روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می شوند:

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^t + c_1 * rand1(pBest - x_{id}^t) + c_2 * rand2(gBest - x_{id}^t) \quad (10)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (11)$$

به ترتیب معرف موقعیت و سرعت بعد  $d$  ام از  $i$  امین ذره، در  $t$  امین تکرار الگوریتم هستند. تعداد ابعاد ذرات برابر تعداد متغیرهای تصمیم مسئله است. رابطه (۱۰) برای محاسبه سرعت جدید ذره با توجه به سرعت قبلی و فاصله ذره از موقعیت فعلی تا بهترین موقعیت محلی و بهترین موقعیت سراسری بکار می رود. در این رابطه  $w$  ضریب وزنی اینرسی<sup>۹</sup> است و با استفاده از رابطه (۱۲) جایگزین می شود.  $c_1$  و  $c_2$  نیز ضرایب شتاب هستند.

$$w = w_{max} - iter * (w_{max} - w_{min}) / iter_{max} \quad (12)$$

در این پژوهش برای حل مدل دوسطحی مسئله، از رویکرد بهبود یافته ای از PSO که الگوریتم تکراری دوسطحی<sup>۱۰</sup> PSO نامیده می شود و در سال ۲۰۰۶ توسط ژائو و گیو ارائه شده است،

عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای ۱۶ مسئله مورد بررسی قرار گرفت. برخی از این مسائل از ادبیات موضوع استخراج شده‌اند [Labe, 1998]. با ایجاد پاره‌ای تغییرات (تغییر در هزینه یال، افزایش تعداد یال‌های موجود در شبکه، تغییر یال‌های دارای عوارض و...) در مسائل مذکور، تعدادی مسئله نمونه مشابه نیز ساخته شد. در راستای حل مدل دو سطحی موجود به روش دقیق، ابتدا بایستی این مدل به یک مدل یک سطحی تبدیل شود. با تغییر مدل به یک مدل یک سطحی تعداد محدودیت‌های موجود در مدل، بسیار بیشتر از حالت اولیه خواهد شد و بنابراین حل مدل زمانی بسیار طولانی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین در پاره‌ای از موارد، پس از یک سطحی شدن، هیچ تضمینی برای محذب بودن فضای جواب وجود نداشته و ممکن است حتی با صرف زمان بسیار زیاد به جواب درستی نرسیم. بنابراین حل اندازه‌های کوچک مسئله در زمانی معقول و مقایسه نتایج حل دقیق با نتایج به دست آمده از الگوریتم PSO منطقی به نظر می‌رسد.

کارایی الگوریتم PSO ارائه شده طبق جدول (۱) برای مسائل کوچک از طریق مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از حل دقیق (با استفاده از نرم‌افزار لینگو ۱۱ و از طریق یک سطحی کردن مدل) مورد ارزیابی قرار گرفته است. معیار مقایسه برای مسائل با ابعاد کوچک محاسبه خطا بر طبق رابطه (۱۴) است.

$$error = \frac{Sol_{PSO} - Sol_{Lingo}}{Sol_{Lingo}} \quad (14)$$

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، میزان خطای موجود بین نتایج حل با PSO و نتایج حاصله از حل صورت گرفته توسط نرم‌افزار لینگو تنها ۵ درصد است. همین امر نشان‌دهنده توانایی بالای الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات در حل مسائل است.

#### ۴. مطالعه موردی

اولین دشواری و محدودیتی که در تحقیقات انجام شده در زمینه مسائل حمل و نقل در شبکه‌هایی با ابعاد واقعی، نمود پیدا می‌کند،

قرار داده و مقدار تابع شایستگی ذرات است، به دست می‌آوریم، ۴-۴) مقدار شایستگی ذرات را با مقادیر فعلی pBest و gBest مقایسه می‌کنیم و در صورت بهتر بودن pBest و gBest را بهنگام می‌کنیم،

۵. اگر شرط اختتام محقق شده بود به گام ۷ رفته در غیر این صورت به گام ۶ می‌رویم،

۶. مقدار gBest را با رابطه (۱۳) بهنگام می‌کنیم و دوباره مسئله سطح پایین را برای مقدار جدید gBest حل کرده و به گام ۳ می‌رویم، در رابطه (۱۳)،  $\eta$  عددی تصادفی است که دارای توزیع نرمال استاندارد است.

$$gBest = gBest * (1 + \eta) \quad (13)$$

۷. گام پایانی: مقدار gBest و متغیر سطح پایین و مقدار شایستگی متناظر با آن را به عنوان جواب‌های نهایی الگوریتم نمایش می‌دهیم. در این مقاله، الگوریتم مورد نظر با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای تعداد تکرار الگوریتم و تعداد ذرات مورد استفاده، بر روی مسائل کوچک و متوسط، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم (بیشتر از ۱۰۰) کیفیت جواب‌های به دست آمده تغییر چندانی نخواهد داشت. همچنین نتایج مشابه حاکی از عدم تغییر کیفیت جواب‌های به دست آمده با افزایش تعداد ذرات (بیش از ۳۰) است. بنابراین در الگوریتم پیشنهادی شرط اختتام برنامه، انجام آن برای ۱۰۰ تکرار متوالی است و تعداد ذرات مورد استفاده نیز ۳۰ در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای الگوریتم نیز با توجه به مقادیر مشابه موجود در مقاله ژائو و گیو (۲۰۰۶) به صورت زیر تعیین شده‌اند:

تعداد تکرار	۱۰۰
تعداد ذرات	۳۰
$C_1$	۲
$C_2$	۲
$W$	بین ۰,۴ تا ۰,۹

قیمت گذاری یال های شریانی شبکه های حمل و نقل شهری با استفاده ...

جدول ۱. بررسی کارایی الگوریتم PSO در مقایسه با حل مسئله از طریق لینگو

شماره مسئله نمونه	تعداد گره ها	تعداد یال ها	تعداد زوج مبدا - مقصدها	تعداد یال های دارای عوارض	حل با لینگو به روش			
					یک سطحی		حل با PSO	
					جواب زمان (ثانیه)	جواب زمان (ثانیه)	جواب زمان (ثانیه)	خطا
۱	۳	۴	۱	۲	۲۰	<۱	۲۰	۰
۲	۳	۴	۲	۲	۲۰	-	۲۰	۰
۳	۳	۴	۲	۲	۰	-	۰	۰
۴	۳	۴	۲	۲	۰	-	۰	۰
۵	۴	۸	۳	۳	۱۱۸	-	۱۱۸	۰
۶	۴	۸	۳	۳	۱۸۹,۹	-	۱۹۰	۰,۰۰۰۵
۷	۴	۸	۳	۳	۱۱۲	-	۱۱۲	۰
۸	۴	۸	۳	۳	۱۵۴	-	۱۵۳,۸	-۰,۰۰۱
۹	۴	۸	۲	۳	۱۶۱	-	۱۶۳	۰,۰۱
۱۰	۵	۱۱	۳	۳	۲۴۸,۱	-	۲۴۷,۳۳	-۰,۰۰۳۱
۱۱	۵	۱۱	۳	۳	۱۸۹,۴۶	-	۱۸۷,۶۸	-۰,۰۰۹۳
۱۲	۵	۱۱	۳	۳	۳۲۱,۲	-	۳۱۹,۵	-۰,۰۰۵۳
۱۳	۵	۱۱	۳	۳	۴۴۵	-	۴۴۴,۸۲	-۰,۰۰۰۴
۱۴	۶	۱۳	۴	۴	۶۰	-	۶۰	۰
۱۵	۶	۱۳	۴	۴	۱۳۹,۲	-	۱۳۵	-۰,۰۳۱
۱۶	۶	۱۳	۴	۴	۱۳۷,۸۳	-	۱۳۵	-۲,۸۳

دسترسی به داده های مورد نیاز مساله تحقیق است. حتی در صورت دسترسی به داده های واقعی نیز، پیچیدگی ها و مشکلاتی که در استفاده از این داده ها وجود دارد بسیار است. یکی از مشکلاتی که

این پژوهش نیز به نوبه خود با آن مواجه بود، سختی دسترسی به داده های واقعی، و در مرحله بعد تبدیل نمودن آنها به اطلاعات مورد نیاز تحقیق بود. یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش،

ترین عوامل ترافیکی بویژه در کلان شهری مانند تهران به شمار می‌روند. همچنین هزینه‌های نگهداری آنها در مقایسه با معابر هم‌سطح، بیشتر است. بنابراین انتخاب آنها به عنوان یال‌های دارای عوارض، جهت جبران هزینه‌های نگهداری قابل توجیه است. تعداد پل‌های موجود در محدوده ۱۰ فقره است که ۴ عدد از این پل‌ها دوطرفه و ۶ عدد یک‌طرفه هستند (از آنجا که هر جهت موجود بر روی پل در نقشه ترافیکی، نمایانگر ۲ یال است، هر پل دو طرفه ۴ یال را تشکیل می‌دهد و در کل، پل‌های دوطرفه ۱۶ یال را نمایش می‌دهند. پل‌های یک طرفه نیز در مجموع ۱۲ یال را تشکیل خواهند داد). مشخصات هر کدام از پل‌ها به تفکیک در جدول (۲) آورده شده است.

همان طور که پیش‌تر بیان شد، برای اجرای مدل، اطلاعات و داده‌های مربوط به بازه زمانی ۷-۱۱ صبح مبنای قرار داده شده است. برای سایر بازه‌های زمانی هم به صورت مشابه می‌توان مدل را اجرا نمود. تعداد کل زوج مبدا- مقصدهای روی مرز محدوده، ۱۲۱۵۴ مورد است. پس از حذف زوج‌هایی که تقاضای سفر آنها صفر یا یک بوده و همچنین زوج مبدا- مقصدهایی که پل‌های فوق روی کوتاه‌ترین مسیر آنها قرار نگرفته‌اند، تعداد ۱۸۰۰ زوج مبدا- مقصد برای بکارگیری مدل شناسایی شدند. برای هر یال یک هزینه ثابت  $C_a$  در مدل وجود دارد که به هر کاربر تخصیص داده می‌شود. در اجرای مدل این هزینه طبق رابطه (۱۵) به صورت ترکیبی از دو جزء  $I_a$  طول یال  $a$ ، و  $t_a$  زمان تأخیر در یال  $a$ ، در نظر گرفته شده است.

$$C_a = I_a + t_a \quad (15)$$

#### ۴-۱ نتایج

با توجه به اینکه در مدل ارائه شده، عوارض بایستی در یک بازه معین (بین یک کران پایین که صفر در نظر گرفته شده و یک کران بالا) قرار گیرد، برای اجرای مدل بر اساس کران بالا، دو سناریو در نظر گرفته شده است؛ در سناریوی اول که حالتی بدبینانه دارد، فرض می‌شود فقط وسایل حمل و نقل عمومی مثل تاکسی و

چگونگی تبدیل این اطلاعات به داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی مسائل شبکه است. شبکه مورد مطالعه که در شکل (۱) نمایش داده شده است، محدوده معابر اصلی ۶۴۲ ناحیه ترافیکی درون محدوده طرح ترافیک شهر تهران است که شامل ۱۶۰۹ یال و ۱۰۴۲ گره است. در اجرای مدل، مفروضات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- تنها زوج مبدا- مقصدهای روی مرز محدوده در نظر گرفته شده اند.

- ارزش زمان سفر برای کاربران یکسان است.

- تقاضای در نظر گرفته شده شامل همه انواع خودروها بوده و بر حسب خودروهای مختلف تفکیک نشده است.

- عوارض به دست آمده برای انواع خودروها یکسان در نظر گرفته می‌شود.

- مقدار تقاضای سفر هر یال از جمع تقاضای مربوط به زوج مبدا- مقصدهایی که با در نظر گرفتن استراتژی کوتاه‌ترین مسیر از این یال‌ها عبور می‌کنند، به دست می‌آید.

داده‌های مورد استفاده شامل مشخصات فیزیکی شبکه (مانند طول، جهت حرکت و ظرفیت خیابانها) و داده‌های مربوط به حجم ترافیک (مانند زمان سفر، سرعت و .. در یال‌ها) است. این داده‌ها تلفیقی از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی منطقه طرح ترافیک تهران بر اساس خروجی دوربین‌های کنترل مکانیزه سازمان کنترل ترافیک در بهار ۱۳۹۱، و داده‌های ماتریس مبدا- مقصد (ماتریس توزیع) به روز شده در سال ۱۳۹۰ بوده که از مطالعات جامع شهر تهران به دست آمده است. اطلاعات مربوط به حجم ترافیک در بازه‌های زمانی (۷-۱۱)، (۱۱-۱۴) و (۱۴-۱۷) پس از ثبت در سیستم کنترل مکانیزه وارد نرم افزار شبیه ساز شده است و به ترتیب، برای بازه‌های زمانی مختلف تفکیک شده، و شبیه سازی برای هر بازه به طور مجزا انجام شده است. در این پژوهش داده‌های بازه زمانی (۷-۱۱) برای اجرای الگوریتم بکار گرفته شدند.

در اجرای مدل، پل‌ها و زیرگذرهای موجود در محدوده، به عنوان یال‌های دارای عوارض انتخاب شدند. پل‌ها از مهم



قیمت گذاری یال های شریانی شبکه های حمل و نقل شهری با استفاده ...

جدول ۲. مشخصات پل های انتخاب شده

نام پل یا زیرگذر	یک طرفه	دو طرفه	جهت
۱ پل کریمخان	✓		غرب به شرق و بلعکس
۲ پل روشندلان	✓		غرب به شرق و بلعکس
۳ پل حافظ (۱) (بین خیابان کریمخان تا انقلاب)	✓		شمال به جنوب
۴ پل حافظ (۲) (بین خیابان انقلاب تا جمهوری)	✓		شمال به جنوب
۵ پل کالج	✓		غرب به شرق و بلعکس
۶ پل ری	✓		جنوب به شمال
۷ وحدت اسلامی	✓		شمال به جنوب
۸ زیرگذر حسن آباد	✓		شمال به جنوب
۹ زیرگذر مفتح	✓		جنوب به شمال
۱۰ زیرگذر امیر کبیر	✓		غرب به شرق و بلعکس



شکل ۱. شبکه مورد مطالعه

در ابتدا بایستی به این نکته اشاره کرد که عدم تعیین یک کران بالای ثابت برای عوارض دریافتی در سناریوی اول الزاما به این معنی نیست که میزان عوارض تعیین شده در این سناریو همواره نسبت به سناریوی دوم بیشتر است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار عوارض به دست آمده پس از حل مدل، در سناریوی اول در پاره‌ای از موارد کمتر از دومین سناریو است (پل حافظ (۲) و زیر گذر حسن‌آباد) و بنابراین میزان جریان عبوری بیشتر بوده و همین امر ممکن است موجب دریافت درآمد بیشتر باشد. نکته قابل توجه بعدی با توجه به اطلاعات به دست آمده از جدول (۴) این است که برای برخی یال (پل)‌های مورد بحث، به عنوان مثال زیرگذر امیرکبیر، تفاوت بسیار زیاد مقدار عوارض تعیین شده در دو سناریوی مختلف، تأثیری در مقدار جریان عبوری از یال مورد نظر نداشته است. مطمئناً یکی از دلایل این امر شریانی بودن یال ذکر شده در محدوده بین مناطقی است که توسط این یال به یکدیگر متصل می‌شوند. به عبارت دیگر یافتن مسیرهایی دیگر بین آن دسته از زوج مبدا- مقصدهایی که یال مورد نظر روی کوتاه‌ترین مسیر آنها قرار دارد، و دارای هزینه‌ای نزدیک و یا کمتر از هزینه کوتاه‌ترین مسیر هستند، به راحتی امکان‌پذیر نیست. در نتیجه جایگزین کردن یک مسیر مناسب برای این زوج مبدا - مقصدها میسر نبوده است. این مسئله حیاتی بودن این یال‌ها را در شبکه‌های حمل و نقل شهری نشان می‌دهد و لزوم اندیشیدن تدابیری دیگر جهت حفظ و نگهداری آنها را می‌طلبد.

نقطه مقابل این یال‌های شریانی یال‌هایی هستند که در جدول (۴) پس از در نظر گرفتن عوارض برای آنها میزان جریان عبوریشان به صفر رسیده است (مانند پل کریم‌خان، غرب به شرق، پل روشندان). صفر شدن جریان این یال‌ها به این معنی است که در هنگام اجرای مدل، مسیرهایی با هزینه کمتر وجود داشته، که کاربران شبکه ترجیح داده‌اند، از این مسیرها استفاده کنند. همچنین با توجه به اینکه یکی

اتوبوس از هر یال عبور می‌کنند (تقاضای بدبینانه) و کران بالای عوارض برای هر یال از تقسیم هزینه‌های نگهداری هر پل بر حجم تقاضای بدبینانه به دست می‌آید. سناریوی دوم حالتی غیربدبینانه دارد و مقدار کران بالای عوارض برای همه پل‌ها ثابت، و برابر ۳۰۰۰ ریال (حدوداً برابر با بیشترین هزینه ثابت یال‌ها در شبکه) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB در جداول (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. مجموع درآمد دریافتی

مجموع درآمد دریافتی به ریال	
سناریو اول	۵۸۰/۲۲۹/۵۰۰
سناریو دوم	۲۶/۶۷۴/۰۰۰

همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود مجموع درآمد دریافتی در سناریوی اول با وجود تقاضای بدبینانه به مراتب بیشتر از سناریوی دوم است. هم‌چنین در جدول (۴) در برخی موارد جریان عبوری از یک مسیر صفر است. این نتایج می‌تواند علل مختلفی داشته باشند که در قسمت ۵ به تفصیل به آنها پرداخته شده‌است.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به جدول (۳) میزان درآمد دریافتی در سناریوی اول که حالتی بدبینانه دارد، نسبت به سناریوی دوم بیشتر است. این در حالی است که انتظار می‌رود با توجه به ثابت نبودن کران بالای مقدار عوارض تعیین شده و کمتر بودن میزان تقاضا، درآمد دریافتی کل نسبت به سناریوی دوم (تقاضای بیشتر و ثابت بودن کران بالای عوارض) کمتر باشد و متقاضیان مسیرهایی دیگری را برای رسیدن به مقصد خود انتخاب کنند. در راستای توجیه این تفاوت درآمدی می‌توان به نکات زیر را اشاره کرد.

قیمت گذاری یال های شریانی شبکه های حمل و نقل شهری با استفاده ...

جدول ۴. مقدار عوارض و جریان یال ها، قبل و بعد از اجرای طرح برای دو سناریوی در نظر گرفته شده

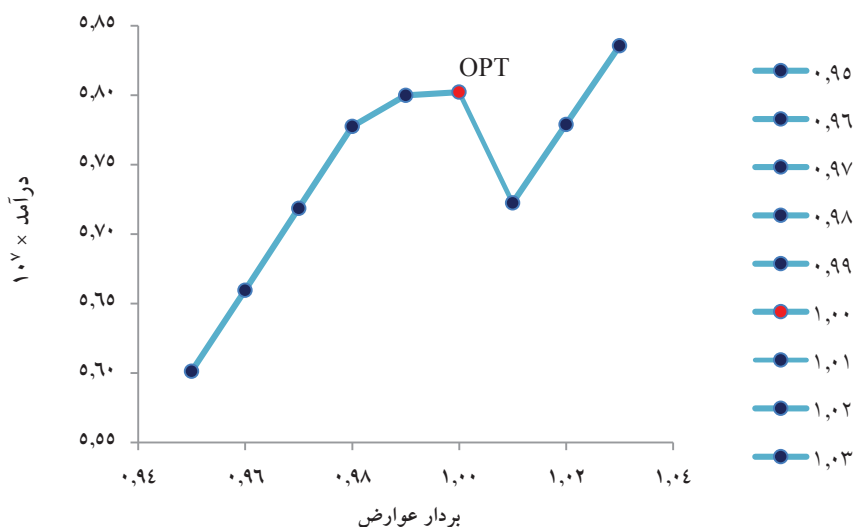
نام پل یا زیرگذر	جهت	مقدار جریان قبل از اجرای مدل		مقدار عوارض (ریال)		مقدار جریان بعد از اجرای مدل	
		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو اول	سناریو دوم
پل کریمخان	غرب به شرق	۱۷۰۵	۲۸۴۰۰	۱۸۰۰	۰	۰	۰
	شرق به غرب	۴۵۶۰	۱۳۳۰۰	۱۵۰۰	۱۲۷۶	۴۵۶۲	۰
پل روشندلان	غرب به شرق	۹۹۴	۴۳۱۰۰	۲۴۰۰	۰	۰	۰
	شرق به غرب	۱۰	۲۷۶۰۰	۲۲۰۰	۰	۰	۰
پل حافظ (۱)	شمال به جنوب	۱۲۱۶۱	۸۲۰۰	۲۷۰۰	۱۰۹۷۹	۱۲۱۶۱	۰
پل حافظ (۲)	شمال به جنوب	۱۰۰۸۴	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۹۹۵۰	۹۷۰۵	۰
پل ری	غرب به شرق	۷۸۷	۳۳۳۰۰	۱۱۰۰	۰	۷۸۲	۰
	شرق به غرب	۲۹۹۷	۲۷۹۰۰	۱۲۰۰	۰	۰	۰
وحدت اسلامی	جنوب به شمال	۱۶۵۳۵	۴۷۰۰	۱۹۰۰	۱۶۵۳۵	۱۶۵۳۵	۰
	شمال به جنوب	۲۰۲۰۱	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۰۰۴۷	۱۶۸۲۴	۰
زیرگذر حسن آباد	شمال به جنوب	۲۰۲۰۱	۳۰۰	۲۸۰۰	۲۰۰۴۷	۱۶۸۲۴	۰
	جنوب به شمال	۴۷۶۷	۴۲۰۰	۲۳۰۰	۰	۴۷۶۷	۰
زیر گذر امیرکبیر	غرب به شرق	۱۳۷۷۱	۱۱۲۰۰	۳۰۰۰	۱۳۷۷۱	۱۳۷۷۱	۰
	شرق به غرب	۶۳۹۵	۲۴۹۰۰	۳۰۰۰	۶۳۹۵	۶۳۹۵	۰

جریان هر یک از یال های شبکه، به چه مقدار تغییر خواهد کرد. علاوه بر این، در صورت بروز تغییر نیز، توزیع مجدد جریان، کاملاً مشخص نخواهد بود. با توجه به نکات ذکر شده در می یابیم که تنظیم مقادیر کران بالای عوارض دریافتی، در به دست آوردن مقادیر بهینه عوارضی که تأثیر قابل ملاحظه ای نیز در جریان ترافیکی داشته باشند، از اهمیت بسیاری برخوردار است. در نمودار (۱) تغییرات درآمد نسبت به کاهش و افزایش درصدی مقدار عوارض نشان داده شده است. این نمودار نشان می دهد که

از مفروضات در نظر گرفته شده در مدل موجود فرض "همه یا هیچ" (یا همه ی کاربران از یک مسیر خاص عبور می کنند و یا هیچ یک از آن مسیر عبور نمی کنند) است جریان عبوری از این یال ها صفر شده؛ یعنی تمامی کاربران شبکه که قبلاً از طریق این یال به مقصد خود می رسیدند، مسیر خود را عوض کرده اند. همچنین لازم به ذکر است که در دنیای واقعی، رفتار و عکس العمل کاربران، متأثر از مسائل و عوامل ترافیکی زیادی خواهد بود و نمی توان به طور قطع تعیین کرد که بعد از اجرای چنین طرحی در دنیای واقعی،

## فاطمه تاری، عیسی نخعی کمال آبادی، شکرانه خشخاشی مقدم

درصد عوارض اعمال شده	%۹۶	%۹۷	%۹۸	%۹۹	%۱۰۰	%۱۰۱	%۱۰۲	%۱۰۳
درآمد کل $\times 10^{-4}$	۵۶۵۹,۸	۵۷۱۸,۸	۵۷۷۷,۷	۵۸۰۰,۰۷	۵۸۰۲,۲۹۵	۵۷۲۲,۶	۵۷۷۹,۲	۵۸۳۵,۹



نمودار ۱. نمودار تحلیل حساسیت درآمد با افزایش و کاهش مقدار عوارض

از پتانسیل موجود و ساماندهی آن، از مهم ترین راهکارهای برطرف کردن تراکم ترافیک بویژه در نقاط مرکزی شهر است. هزینه‌های زیرساخت از جمله هزینه‌های تحمیل شده به مسئولان راه است. بنابراین پرداخت عوارض عبور از معابر از سوی کاربران می‌تواند به عنوان راهی برای مشارکت مالی استفاده‌کنندگان از آنها برای تأمین اعتبارات مالی مورد نیاز تلقی شود. همچنین به عنوان راهکاری با محوریت کاهش تقاضا باعث کاهش حجم عبور و مرور خودروها از آنها شود که این مسئله خود به حفظ معابر در شرایط مطلوب کمک خواهد نمود.

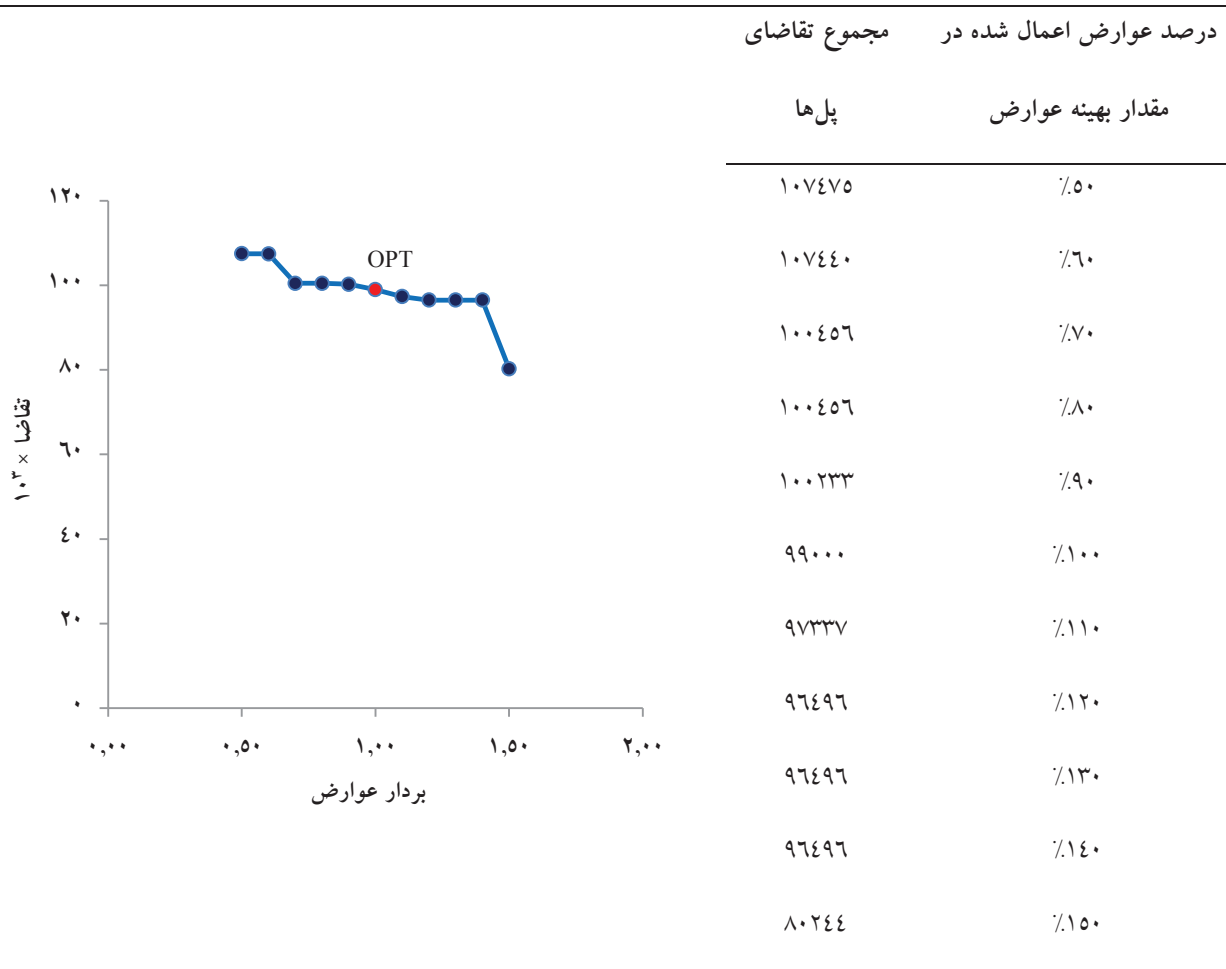
در این مقاله برای قیمت‌گذاری شبکه، پل‌های موجود در محدوده شبکه مورد مطالعه، که محدوده طرح ترافیک شهر تهران است، به عنوان معابر شریانی جهت تعیین عوارض انتخاب شدند. برای تعیین عوارض از یک مدل دوسطحی استفاده شده است. در این مدل علاوه بر این که افزایش درآمد حاصله از عوارض، برای متولیان مد نظر بوده، به انتخاب مسیر کاربران که غالباً در جستجوی کوتاه‌ترین مسیر ممکن با توجه

با افزایش عوارض پل‌ها در شبکه تا یک حد معین، درآمد حاصله افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن عوارض به مقدار بهینه و عبور از این مقدار، از آنجا که استفاده از این معابر دیگر برای کاربران مقرون به صرفه نخواهد بود، میزان درآمد سیر نزولی پیدا می‌کند. البته با افزایش بیشتر مقدار عوارض دریافتی و بیشتر شدن این مقدار از کران بالای در نظر گرفته شده درآمد نیز مجدداً افزایش پیدا خواهد کرد.

نمودار (۲) نیز روند تغییرات جریان عبوری از پل‌ها را نسبت به افزایش و کاهش درصدی مقدار عوارض نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش عوارض مجموع تقاضای عبور از پل‌ها به صورت نزولی در حال تغییر است.

## ۶. جمع بندی و تحقیقات آتی

از آنجا که هدف تمامی مدیران در سطوح عالی، فراهم نمودن بیشترین میزان ممکن رفاه اجتماعی با توجه به امکانات موجود است و محدودیت‌های بسیاری نیز در خصوص گسترش امکانات و زیرساخت‌ها مطرح است، استفاده حداکثر



نمودار ۲. نمودار تحلیل حساسیت مجموع تقاضای پلها با افزایش یا کاهش عوارض

مقاله روشی برای قیمت گذاری چند مورد از زیرساخت ها، به صورت هم زمان و با در نظر گرفتن اهداف هر دو گروه متولیان و کاربران شبکه، ارائه شده است.

از دیگر دستاوردهای این مقاله به دست آوردن مقادیری پایه برای عوارض پلها بر اساس هزینه های تعمیرات و نگهداری است که سالانه برای آنها صرف می شود. با توجه به نکات فوق، روش به کار گرفته شده در این مقاله می تواند به عنوانی روشی پایه در انجام پژوهش هایی این چنین مورد استفاده قرار گیرد.

از جمله مفروضات این پژوهش در نظر گرفتن مقدار عوارض یکسان برای همه وسایل نقلیه است. تعیین مقدار عوارض متفاوت برای انواع مختلف وسایل نقلیه اعم از خودروهای

به هزینه های سفر یا زمان سفر خود هستند نیز توجه شده است و در سطح پایین مدل مسئله کوتاه ترین مسیر قرار دارد. در نهایت برای حل مسئله تعریف شده که در دسته مسائل سخت قرار دارد از الگوریتم فراابتکاری گروه بهینه ذرات استفاده شد. نتایج نهایی به صورت مقدار عوارض تعیین شده برای هر پل و مجموع درآمد کسب شده از عوارض - با توجه به تغییر جریان ایجاد شده در شبکه به دلیل در نظر گرفتن عوارض - رخ خواهد داد، به دست آمده اند.

همان طور که بیان شد، قیمت گذاری تسهیلات در شبکه های حمل و نقل برای زیرساخت های خاصی چون پلها، تونلها، آزادراه ها، مسیرها و یا یالها، معمولاً به صورت مجزا و با در نظر گرفتن یک نمونه خاص انجام می شود. در حالی که در این

tation Science, Vol. 35, pp. 345-358.

- Eliasson, J. (2008) "Lessons from the Stockholm congestion charging trial", *Transport Policy*, Vol. 15, pp. 395-404.

- Eliasson, J. (2009) "A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system", *Transportation Research, part A*, Vol. 43, pp. 468-480.

- Eliasson, J. and Jonsson, L. (2011) "The unexpected "yes": Explanatory factors behind the positive attitudes to congestion charges in Stockholm", *Transport Policy*, Vol. 18, pp. 636-647.

- Heilporn, G., Labbe, M., Marcotte, P. and Savard, G. (2011) "Valid inequalities and branch-and-cut for the clique pricing problem", *Discrete Optimization*, Vol. 8, pp. 393-410.

- Hoesel, S.V. (2008) "An overview of Stackelberg pricing in networks", *European Journal of Operation Research*, Vol. 189, pp. 1393-1402.

- Labbe, M., Marcotte, P. and Savard, G. (1998) "Bi-level model of taxation and its application to optimal highway pricing", *Management Science*, Vol. 44, pp. 1608-1622.

- Morgul, E. F. (2010) "Simulation based evaluation of dynamic congestion pricing algorithms and strategies", M.S. Thesis. New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey.

- Ohazulike, A. E. (2009) "Multi-objective road pricing problem: a cooperative and competitive bilevel optimization approach", M.A. Dissertation. University of Twente.

- Roch, S., Savard, G. and Marcotte, P. (2005) "An approximation algorithm for Stackelberg network pricing", Published online in Wiley Interscience, Available from <http://www.interscience.wiley.com>.

- Yang, H. and Bell, M. G. H. (1997) "Traffic restraint, road pricing and network equilibrium", *Transportation Research, Part B*, Vol. 31, No. 4, pp. 303-314.

- Yang, H. and Lam, W. H. K. (1996) "Optimal road

شخصی، اتوبوس، ... می‌تواند از جمله زمینه‌هایی برای تحقیقات آینده باشد. همچنین می‌توان با توجه به رویکردی که در مدل‌سازی دو سطحی چنین مسائلی در پیش گرفته می‌شود، مدل‌های متفاوتی را پیشنهاد داد. رویکردهای متفاوت می‌تواند با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف با معیارهای مختلف در سطح بالای مساله باشد.

سطح پایین مساله این تحقیق مساله کوتاه‌ترین مسیر بوده و فرض بر این است که ظرفیت معابر، جوابگوی تقاضای به‌دست آمده از مدل است. در واقع محدودیت ظرفیت در این تحقیق نادیده گرفته شده است. وارد کردن محدودیت ظرفیت در مدل می‌تواند بر جنبه‌های عملی‌تر مدل بیافزاید. ممکن است بتوان با جایگزین کردن مساله سطح پایین با مساله کمترین هزینه جریان، یا مسائلی از این دست، امکان در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت را نیز راهم نمود.

## ۷. پی‌نوشتها

- 1- Np-Hard
- 2- Particle Swarm Optimization
- 3- First-best Pricing
- 4- Second-best pricing
- 5- Shortest path graph
- 6- Stackelberg
- 7- Bilinear
- 8- Particle Swarm Optimization
- 9- Inertia Weight Coefficient
- 10- Bilevel Iterative Algorithm based on PSO (PSO-BLIA)
- 11- Dijkstra

## ۸. مراجع

- Boyles, S. D., Kockelman, K. M. and Waller, S.T. (2010) "Congestion pricing under operational, supply-side uncertainty", *Transportation Research, Part C*, Vol. 18, pp. 519-535.

- Brotcorne, L., Labbe, M., Marcotte, P. and Savard, G. (2001) "A bilevel model for toll optimization on a multicommodity transportation network", *Transportation Research, Part B*, Vol. 35, pp. 163-176.

tolls under conditions of queuing and congestion”,  
Transportation Research, Part A, Vol. 30, No. 5, pp.  
319-332.

- Zhang, X. and Yang, H. (2004)“The optimal cor-  
don-based network congestion pricing problem”,  
Transportation Research, Part B, Vol. 38, pp.517-537.

- Zhao, Z. and Gu, X. (2006) “Particle swarm opti-  
mization based algorithm for bilevel programming  
problems”, Proceedings of the 6th International Con-  
ference on Intelligent Systems Design and Applica-  
tions, IEEE Computer Society.

