

# قیمت‌گذاری معابر مربوط به حوزه محدودیت ترافیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

انسبه نیشابوری جامی، مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بناب، بناب، ایران  
مهدی یوسفی‌نژاد عطاری\*، عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بناب، بناب، ایران

E-mail: mahdi108108@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۱۰ - پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۳۰

## چکیده

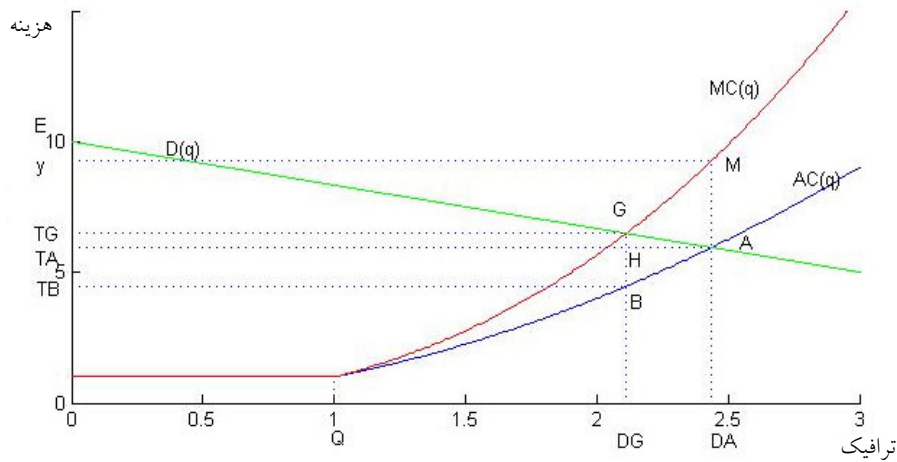
برای کنترل مشکلات ناشی از افزایش جمعیت و پیامدهای متعدد آن اقدامات زیادی انجام شده است که می‌توان به قیمت‌گذاری مربوط به محدودیت ترافیک اشاره نمود. در طرح ترافیک یکی از مهم‌ترین مسایل پیش رو تعیین قیمت بهینه است. مفاهیم اقتصادی در زمینه قیمت‌گذاری معابر محدودیت ترافیک بیان می‌دارد که کاربرانی که از معابر پر ترافیک عبور می‌کنند، به منظور حداکثر کردن سود شبکه اجتماعی باید هزینه‌ای برابر با اختلاف میان هزینه اجتماعی نهایی و هزینه متوسط پرداخت کنند. بنابراین، در این مقاله سعی شده است با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری و در نظر گرفتن عوامل بیشتر و کلاسه‌بندی روی کاربران، وسایل نقلیه و نیز ترکیب روش‌های به‌کارگرفته شده در بررسی‌های قبلی، اقدامی مؤثر در کاهش و کنترل ترافیک در معابر پررفت و آمد انجام شود. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم فرنک-ولف که با مسئله مورد مطالعه تطبیق داده شده است قیمت بهینه معابر در محدودیت ترافیک مدل‌سازی شده است. در پایان مقاله جهت پیاده‌سازی مدل از یک مثال استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی دوسطحی، معابر موجود در محدودیت ترافیک

## ۱- مقدمه

سابقه تئوری اقتصادی قیمت‌گذاری ترافیک، به پیگو<sup>۱</sup> (Pigou, 1920) بر می‌گردد. مفاهیم اقتصادی در زمینه قیمت‌گذاری محدوده محدودیت ترافیک بیان می‌دارد که کاربرانی که از معابر پر ترافیک عبور می‌کنند، به منظور حداکثر کردن سود شبکه اجتماعی باید هزینه‌ای برابر با اختلاف میان هزینه اجتماعی نهایی و هزینه متوسط پرداخت کنند. والترز<sup>۲</sup> (Walters, 1961)، ویکری<sup>۳</sup> (Vickery, 1993)، بیسلی<sup>۴</sup> (Beesley, 1972) و اونز<sup>۵</sup> (Evans, 1992a) تحقیقاتی در زمینه مفاهیم اقتصادی قیمت طرح انجام داده‌اند که نتایج این تحقیقات را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد. وقتی حجم وسایل نقلیه عبوری از معبر کم باشد ترافیکی وجود ندارد و وسایل نقلیه می‌توانند تا سقف سرعت مجاز به‌طور آزادانه در طول مسیر حرکت کنند. شکل ۱ بیانگر اصول اقتصادی قوانین قیمت‌گذاری است.

رشد روز افزون جمعیت، مشکلات و پیامدهای متعددی به همراه دارد. از جمله این پیامدها می‌توان به ازدیاد وسایل نقلیه و ایجاد ترافیک در مناطق مرکزی و پر رفت و آمد شهرهای بزرگ اشاره کرد. این افزایش ترافیک، مشکلات و پیامدهای منفی بسیاری از جمله افزایش آلودگی هوا، افزایش آلودگی‌های صوتی و ایجاد اختلال در عبور و مرور وسایل نقلیه را به همراه دارد. بررسی دلایل به‌کارگیری و انواع مختلف قوانین عبور و مرور در معابر محدودیت ترافیک می‌تواند روش مناسبی برای انتخاب و پیاده‌سازی مناسب‌ترین آنها بر حسب شرایط موجود باشد. یکی از عواملی که می‌تواند نقش مؤثری در تعیین قیمت طرح بهینه ایفا نماید و وضعیت ترافیک و مشکلات ناشی از آن را بیش از پیش بهبود بخشد، بررسی اصول و مفاهیم اقتصادی حاکم بر قیمت‌گذاری معابر موجود در محدودیت ترافیک و عوامل تأثیرگذار بر آن است که تاکنون مورد بررسی علمی قرار نگرفته‌اند.



شکل ۱. اصول قیمت گذاری ترافیک

هزینه نهایی (MC) نیز که عبارت است از افزایش هزینه ناشی از ورود یک کاربر جدید به شبکه طبق معادلات (۴) و (۵) برابر خواهد بود با:

$$MC(x) = TC(x) - TC(x - 1) \quad (4)$$

$$MC(x) = \frac{dTC(x)}{dx} = \frac{dVC(x)}{dx} \quad (5)$$

## ۲- بیان مسئله

پیاده‌سازی محدودیت ترافیک انواع مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به انواع طرح‌های محدود‌ه‌ای و قیمت‌گذاری خیابان‌ها و معابر پرتراffیک اشاره داشت. قیمت‌گذاری معابر بر اساس روش‌های مختلفی پیاده‌سازی می‌گردد که از آن جمله می‌توان به قیمت‌گذاری بر اساس زمان یا تأخیر، قیمت‌گذاری بر مبنای مسافت و قیمت‌گذاری بر مبنای محدوده محدودیت ترافیک اشاره نمود (Holland and Watson, 1978; Oldridge, 1990; Smith et al., 1994; Ison, 1998).

پیاده‌سازی محدودیت ترافیک آزادی سفر افراد را تا حدی مختل می‌کند. برای ایجاد مقبولیت عمومی در مورد محدودیت ترافیک، باید مسیرهای جایگزین و هم‌چنین شیوه‌های حمل و نقل جایگزین برای افراد تهیه کرد (Holland and Watson, 1978; May, 1992; Hua, 1992; Jones, 1998). بهبود حمل و نقل عمومی به همراه ایجاد محدودیت ترافیک می‌تواند به عنوان شیوه‌ای مؤثر در کاهش ترافیک و مشکلات محیطی و نیز پذیرش

مسائل پیش رو، یکی آگاه کردن کاربران از هزینه‌های تراffیک است که با وارد شدنشان به مسیر بر دیگران تحمیل خواهند کرد و دیگری کاستن حجم تراffیک تا نقطه  $D_G$  خواهد بود (Yang, 1998; Lee, 2002; Yang, Bell and Micheal, 1996; Akiyama and Ogawa, 2000; Yang, Meng and Lee, 2004).

طبق بررسی‌هایی که توسط یانگ<sup>۱</sup> (Yang, 1998) و لی<sup>۲</sup> (Lee, 2002) انجام شده است، قیمت‌گذاری معابر برای رسیدن به اهداف ذکر شده پایه‌گذاری شده است. قیمت تعیین شده در سطح جریان بهینه تراffیک یعنی  $D_G$ ، باید برابر با اختلاف میان MC و AC باشد که مطابق با شکل ۱ برابر می‌شود با  $r = T_G - T_B$  که به مالیات پیگویی<sup>۳</sup> معروف است. به عبارت دیگر، اگر کاربری بخواهد از معبری که در محدوده محدودیت تراffیک قرار دارد عبور کند، باید هزینه‌ای برابر با  $r$  بپردازد، به این ترتیب حجم بهینه وسایل نقلیه،  $D_G$ ، به دست خواهد آمد.

بنابراین طبق معادله شماره (۱) خواهیم داشت:

$$\tau_a = (MC - AC), \quad \forall a \in A \quad (1)$$

$\tau_a$  برابر با قیمت طرح مربوط به یال  $a$  است.

همان‌طور که می‌دانید، هزینه کلی ( $TC^A$ ) عبارت است از مجموع هزینه‌های ثابت ( $FC^A$ ) و هزینه‌های متغیر ( $VC^A$ ). بنابراین، طبق معادله (۲) خواهیم داشت:

$$TC(x) = FC + VC(x) \quad (2)$$

بر طبق معادله (۳) نیز، هزینه متوسط (AC) برابر است با:

$$AC(x) = \frac{TC(x)}{x} = \frac{FC}{x} + \frac{VC(x)}{x} \quad (3)$$

محدودیت ترافیک نزد عموم مردم به حساب آید (May, 1992; Goodwin, 1989).

محدوده محدودیت ترافیک در سنگاپور توسط خیابانی حلقه‌ای شکل از سایر مناطق متمایز می‌شود (Holland and Watson, Goodwin, 1989). وقتی هدف افزایش درآمد باشد، ایجاد مسیرهای جایگزین راهکار مناسبی نبوده و به جای آن بایستی قیمت طرح کاهش داده شود تا مورد قبول عموم مردم قرار گیرد (Larsen and Ranjerdi, 1991; Lewis, 1993).

از آن‌جا که هدف از انجام این بررسی، کاهش بیشتر ترافیک در معابر پررفت و آمد است تا در یک محدوده خاص، از قیمت‌گذاری خیابان‌ها به جای محدودیت ترافیک محدوده‌ای بهره گرفته شده است.

هدف دیگری که در این بررسی دنبال می‌شود، کاهش آلودگی هوا است، به همین دلیل، کاهش کلی سفرها و جلوگیری از انتقال آن‌ها به سایر نقاط در شهر ایده اصلی خواهد بود. این هدف می‌تواند با پیاده‌سازی محدودیت ترافیک و نیز ایجاد نکردن مسیرهای جایگزین به دست آید.

در ادامه با توجه به مطالب ذکر شده و نیز توضیحاتی که در مطالب گذشته آمده است، به شرح مسئله و روابط موجود پرداخته خواهد شد.

در این بررسی قیمت طرح برای تعدادی یال در شرایطی به دست آورده می‌شود، که علاوه بر کلاس‌بندی کاربران شبکه ترافیکی که در بعضی از مقالات گذشته مورد توجه قرار گرفته است، وسایل نقلیه شبکه ترافیکی نیز کلاس‌بندی می‌شوند. این امر در راستای کنترل ترافیک و کاهش پیامدهای منفی آن مانند آلودگی هوا صورت می‌پذیرد. کاربران بر اساس سطوح اجتماعی متفاوتی که دارند به کلاس‌های مختلفی تقسیم می‌گردند. یکی از این ملاک‌ها برای کلاس‌بندی کاربران شبکه اجتماعی، داشتن ارزش‌های زمانی متفاوت است. ارزش زمانی در واقع همان هزینه فرصتی<sup>۱۲</sup> است که رانندگانی که در حال حرکت در مسیری هستند پرداخت می‌کنند. هزینه فرصت که به آن عباراتی چون هزینه اقتصادی، هزینه واقعی یا قیمت سایه نیز می‌گویند، همان هزینه‌ای است که برای فرصت‌های از دست رفته پرداخت می‌شود. بنا بر تحقیقات یانگ و هانگ (۲۰۰۴) (Nagurney, 2000)، علاوه بر کلاس‌های مختلف کاربر که ذکر گردید، وسایل نقلیه نیز به Z

کلاس مختلف تقسیم می‌شوند. برخلاف کلاس‌های کاربر که تفاوت آن‌ها از نظر ظاهری قابل مشاهده نیست و تمایز کلاس‌های مختلف مربوط به تفاوت در ارزش‌های زمانی است، کلاس‌های مختلف وسایل نقلیه از نظر مشخصات ظاهری با یکدیگر تفاوت دارند. این تقسیم‌بندی می‌تواند شامل وسایل نقلیه سبک و سنگین، وسایل نقلیه عمومی و خصوصی و سایر طبقه‌بندی‌ها باشد. هر کلاس وسیله نقلیه در هر لحظه بر تابع هزینه خود و سایر کلاس‌ها تأثیر می‌گذارد. برای هر کلاس وسیله نقلیه قیمت طرح متفاوتی در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم ژنتیک ( ${}^{3}GA$ ) تکنیک جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجو است. ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌هاست. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های علم زیست‌شناسی مانند وراثت، جهش، انتخاب طبیعی و ترکیب الهام گرفته شده است.

قانون انتخاب طبیعی بدین صورت است که تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آنهایی که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طی زمان از بین می‌روند. طبیعت با بهره‌گیری از یک روش بسیار ساده (حذف تدریجی گونه‌های نامناسب و در عین حال تکثیر بالاتر گونه‌های بهینه)، توانسته است دائماً هر نسل را از لحاظ خصوصیات مختلف ارتقا بخشد.

موتور الگوریتم ژنتیک یک جمعیت اولیه از فرمول ایجاد می‌کند. هر فرد در برابر مجموعه‌ای از داده‌های مورد آزمایش قرار می‌گیرند و مناسب‌ترین آنها (شاید ۱۰ درصد از مناسب‌ترین‌ها) باقی می‌مانند و بقیه کنار گذاشته می‌شوند. مناسب‌ترین افراد به عنوان والد نسل بعد انتخاب شده و تغییر می‌یابند. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان از میان تعداد زیادی از نسلها، الگوریتم ژنتیک به سمت ایجاد فرمول‌هایی که دقیق‌تر هستند، میل می‌کند.

مجموعه خصوصیات انسان توسط کروموزوم‌های او به نسل بعدی منتقل می‌شوند. هر ژن در این کروموزوم‌ها نماینده یک خصوصیت است. به عنوان مثال ژن ۱ می‌تواند رنگ چشم باشد، ژن ۲ طول قد، ژن ۳ رنگ مو و الی آخر. حال اگر این کروموزوم به تمامی، به نسل بعد انتقال یابد، تمامی خصوصیات نسل بعدی

## ۲-۱- روند حل مسئله

قیمت گذاری طرح در صورت کلاس بندی کاربران شبکه های ترافیکی از جمله موضوعات جدیدی است که در سال های اخیر (از سال ۲۰۰۰) مورد توجه قرار گرفته است (Nagurney, 2000; Sumalee, 2004; Yang, Meng and Lee, 2004). این کلاس بندی از آن جهت صورت می پذیرد که کاربران شبکه ترافیکی بر اساس سطوح مختلف زندگی اجتماعی، دارای ارزش های زمانی متفاوتی هستند.

با توجه به مقالات منتشر شده تاکنون، ملاحظه می شود که یکی از پارامترهایی که تاکنون در هیچ مقاله ای مورد بررسی قرار نگرفته است، کلاس بندی وسایل نقلیه در تعیین قیمت طرح و نیز بررسی ترکیب کلاس بندی های مختلف کاربران و وسایل نقلیه است. همان طور که در ادامه نیز ذکر خواهد شد، وسایل نقلیه نیز از نظر شکل ظاهری می توانند به کلاس های مختلفی تقسیم شوند، مانند وسایل نقلیه شخصی، عمومی، سبک و سنگین. در بعضی از جوامع از این امر در جهت بهبود زندگی اجتماعی بهره برده شده است. برای مثال، در شهرهای بزرگی مانند تهران، ورود وسایل نقلیه به منطقه مرکزی و پر رفت و آمد شهر بر اساس زوج یا فرد بودن شماره پلاک و به منظور کاهش ترافیک محدودیت داشته و به این ترتیب ترافیک وسایل نقلیه در این مناطق کاهش می یابد.

پارامتر دیگری که در بسیاری از مقالات، به دلیل پیچیده تر شدن حل مسئله به آن پرداخته نشده است، تابع تقاضای کشسان-متغیر با هزینه-می باشد. در این مقالات تقاضا به صورت ثابت و غیر کشسان در نظر گرفته شده است. بر اساس مفاهیم اقتصادی، کشسان بودن تابع تقاضا این مفهوم را می رساند که در شبکه های ترافیکی تقاضای ورود وسایل نقلیه به شبکه تابع هزینه ای است که کاربران متقبل می شوند. شیب منفی تابع تقاضا نشان از منفی بودن این رابطه دارد، یعنی هرچه هزینه بیشتر گردد، تقاضای ورود به شبکه نیز کمتر خواهد شد، تا آن جا که اگر این هزینه به حد کافی زیاد گردد، هیچ کاربری از شبکه عبور نخواهد کرد.

روش ها و الگوریتم های متنوعی برای حل مقالات موجود بکار گرفته شده است. از جمله این الگوریتم ها و روش ها، می توان به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم فرنک-ولف<sup>۱۱</sup> اشاره کرد. در بسیاری از این مقالات، هریک از این الگوریتم ها به تنهایی و یا به صورت ترکیبی با الگوریتم های دیگر مورد استفاده قرار گرفته اند. بر

شبهه به خصوصیات نسل قبل خواهد بود. بدیهی است که در عمل چنین اتفاقی رخ نمی دهد. در واقع به صورت هم زمان دو اتفاق برای کروموزوم ها می افتد. اتفاق اول تقاطع<sup>۱۴</sup> است. تقاطع چسبیدن ابتدای یک کروموزوم به انتهای یک کروموزوم دیگر است. علاوه بر تقاطع اتفاق دیگری که می افتد و البته این اتفاق به تعداد بسیار کمتری نسبت به تقاطع رخ می دهد، جهش<sup>۱۵</sup> نام دارد. جهش به این صورت است که بعضی ژن ها به صورت کاملاً تصادفی تغییر می کنند و از بروز بهینه محلی جلوگیری می شود. با توجه به موارد ذکر شده مراحل انجام الگوریتم ژنتیک را می توان به شکل زیر خلاصه کرد:

گام ۰: پارامترهای حل مسئله (اندازه جمعیت، حداکثر تعداد نسل ها، احتمال رخداد عملگرهای تقاطع و جهش، تعداد انتخاب شایسته ترین کروموزوم ها برای ورود به نسل بعد بدون تغییر و شرط خاتمه الگوریتم) به عنوان ورودی انتخاب و ساختار کروموزوم تعیین شود.

گام ۱: تعداد اندازه جمعیت تعریف شده و مناسب با ساختار مسئله، کروموزوم به صورت تصادفی ایجاد گردد.

گام ۲: تابع برازش مربوط به هر کروموزوم محاسبه گردد.

گام ۳: به تعداد تعریف شده، کروموزوم هایی که بهترین تابع برازش را دارند بدون تغییر به نسل بعد منتقل شوند.

گام ۴: سایر کروموزوم ها به صورت جفت جفت و بر اساس روش انتخاب دسته بندی شده، کاندید ورود به نسل بعد شوند.

گام ۵: بر روی هر جفت کروموزوم انتخاب شده و بر اساس احتمال های تعیین شده، عملگرهای تقاطع و جهش، اعمال می شوند و کروموزوم های تغییر یافته به نسل بعد منتقل می گردند.

گام ۶: در صورتی که شرط توقف حاصل شده باشد، تکرار الگوریتم خاتمه می یابد و کروموزومی که بهترین تابع برازش را دارد، به عنوان جواب مسئله انتخاب می شود. در غیر این صورت تکرار الگوریتم از گام ۲ ادامه می یابد (Wikipedia; Holland, 1975).

همان طور که قبلاً نیز بیان گردید، برای حل مسئله از ترکیب تمام الگوریتم های یاد شده بهره برده شده است. در ادامه این بخش، به توضیح روند حل مسئله و چگونگی تلفیق الگوریتم های ذکر شده، پرداخته خواهد شد.

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	...	$\tau_a$
----------	----------	----------	-----	----------

شکل ۲. ساختار کروموزوم‌ها

- ۲- جمعیت اولیه از تعدادی کروموزوم تشکیل می‌گردند که مقدار هر یک از ژن‌های هر کروموزوم، بر اساس برنامه‌ریزی دو سطحی قرار داده می‌شود.
  - ۳- هر کروموزوم تولید شده، به مسئله سطح پایین‌تر فرستاده می‌شود.
  - ۴- با استفاده از الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر دیکسترا و الگوریتم همه-یا-هیچ کدام، گام‌های الگوریتم فرنک-ولف انجام شده و  $x(\tau)$  و  $q(\tau)$  (جواب‌های به‌دست آمده از حل مسئله تعادل-کاربر در سطح پایین‌تر مسئله دو سطحی هستند) متناظر با کروموزوم به دست می‌آید.
  - ۵- مقادیر به‌دست آمده در تابع هدف برنامه‌ریزی دو سطحی که مربوط به مسئله سطح بالا است، جایگذاری شده و بر این اساس مقدار تابع برازش متناظر با هر کروموزوم به‌دست می‌آید.
  - ۶- سایر مراحل الگوریتم ژنتیک تا رسیدن به شرط خاتمه تکرار می‌شوند.
- شکل ۳ روند گفته شده برای حل مسئله را نشان می‌دهد.

همین اساس، ترکیب این دو روش حل اساسی (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم فرنک-ولف) برای حل قسمت‌های مختلف مسئله، مفید به نظر می‌رسد.

با توجه به توضیحاتی که بیان شد، عدم بررسی ترکیب کلاس‌بندی‌های مختلف اعم از کلاس بندی‌های کاربران و وسایل نقلیه همراه با تابع تقاضای کشسان در شبکه‌های ترافیکی، یکی از نقاط ضعف تحقیقات علمی است که تا به امروز انجام شده‌اند و بررسی آن با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و فرنک-ولف که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌تواند نقش بسیار مهمی در پیشبرد و بروزرسانی مطالعات انجام شده در خصوص رفع مشکلات ترافیک زندگی شهرنشینی ایفا نماید.

بر اساس آنچه گفته شد، چگونگی به‌کارگیری الگوریتم‌ها و روند حل مسئله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- ابتدا کروموزوم‌های مناسب با ساختار مسئله، تعریف می‌شوند. در این مسئله تعداد ژن‌های هر کروموزوم برابر با تعداد یال‌هایی در شبکه است که برای قیمت‌گذاری نامزد شده‌اند. هر ژن نیز نشان دهنده قیمت یال متناظر می‌باشد. برای مثال، اگر شبکه ترافیکی متشکل از  $a$  یال باشد، هر کروموزوم دارای  $a$  ژن خواهد بود. شکل ۲ ساختار کروموزوم را نشان می‌دهد.

با استفاده از الگوریتم فرنک-ولف و سایر الگوریتم‌های وابسته مانند الگوریتم همه-یا-هیچ‌کدام، مسئله تعادل کاربر حل می‌گردد.
با حل مسئله تعادل کاربر، میزان تقاضای هر جفت مبدأ-مقصد و حجم وسایل نقلیه در گردش بر اساس قیمت‌های طرح هر یال به‌دست آورده می‌شود.
بر اساس مقادیر به‌دست آمده از مسئله تعادل کاربر و جایگذاری آنها در مسئله سطح بالاتر (منفعت اجتماعی)، تابع برازش متناظر با هر کروموزوم به‌دست آورده می‌شود.
بر اساس روش نخبه‌گرایی تعداد مشخصی کروموزوم با بیشترین تابع برازش مستقیماً به نسل بعد می‌روند.
سایر کروموزوم‌ها نیز بر اساس مقدار تابع برازش و روش انتخاب دسته‌بندی شده به عنوان والد نسل بعد انتخاب می‌گردند و بر اساس پارامترهای انتخاب شده به ترتیب عمل تقاطع دو نقطه‌ای و جهش انجام می‌گیرد و کروموزوم‌های تولید شده به نسل بعد وارد می‌شوند.
تا زمانی که تعداد نسل‌های ایجاد شده کمتر از حد تعیین شده است و نیز در صورت عدم برقراری معیار توقف، روند یاد شده ادامه می‌یابد. پس از اتمام، ژن‌های کروموزومی که بیشترین تابع برازش را داشته به عنوان قیمت یال‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

شکل ۳. روند به‌کارگیری الگوریتم‌های حل مسئله

۲-۲- الگوریتم فرنک- ولف تطبیق داده شده با مسئله

الگوریتم فرنک-ولفی مفاهیم کلی الگوریتم و چگونگی به کارگیری آن در حل مسایل ساده حمل و نقل را بیان داشته است. در معادلات الگوریتم پارامترهایی به کار رفته اند که بدین قرار می باشد  $t_a^0$  برابر با زمان لازم برای طی یال در شرایطی است که ترافیکی در مسیر وجود نداشته باشد؛  $x_a$  برابر با جریان وسایل نقلیه در یال  $a$  و  $Cap_a$  برابر با ظرفیت یال  $a$  است.  $x_{am}$  عبارت از جریان مسافران از کلاس  $m$  در یال  $a$  است.  $x_{azm}$  برابر با جریان وسایل نقلیه از کلاس  $z$  و کاربران از کلاس  $m$  در یال  $a$  است.  $D_{rszm}^{-1}(\omega)$  تابع معکوس تقاضا میان مبدأ- مقصد  $rs$  مربوط به وسایل نقلیه از کلاس  $z$  و کاربران از کلاس  $m$  و  $q_{rs}^{zm}$  نیز تقاضای وسایل نقلیه از کلاس  $z$  و کاربران کلاس  $m$  بین مبدأ- مقصد  $rs$  می باشد.  $\tau_{az}$  معرف هزینه طرح یال  $a$  برای کلاس  $z$  وسایل نقلیه می باشد. به منظور استفاده از این الگوریتم در حل مسئله کنونی، مراحل انجام آن را می توان به طریق زیر خلاصه نمود:

گام ۰- مقدار دهی اولیه: الگوی جریان شدنی و اولیه ای برای شبکه منظور می شود. بر اساس این مقادیر،  $\{q_{rs}^{zm}\}$  و  $\{x_{azm}\}$  به دست آورده شده و مقدار شمارنده  $n=1$  قرار داده می شود.

گام ۱- بروز رسانی. قراردادده می شود:  $T_{azm}^n = D_{rszm}^{-1}(q_{rs}^{zm}), \forall r, s$  و  $T_{azm}(x_a^n), \forall a$  می گردد ( $T_{azm}(x_a^n)$  نشان دهنده تابع هزینه می باشد).

گام ۲- جهت یابی. بر اساس  $T_{azm}^n$  کم هزینه ترین مسیر،  $l$ ، برای هر کلاس وسيله نقلیه و هر کلاس کاربر برای مبدأ- مقصد  $r-s$  به دست آورده می شود ( $c_{rs}^{lzm}$  هزینه کل مربوط به وسایل نقلیه کلاس  $z$  و کاربران کلاس  $m$  در مسیر شماره  $l$  را نشان می دهد).

مسئله تخصیص (۶) باید برای تمام انواع کلاس ها انجام گیرد:

$$\text{If } c_{rs}^{lzm} \leq D_{rszm}^{-1}(q_{rs}^{zm}), \text{ set } g_{rs}^{lzm} = \bar{q}_{rs}^{zm} \text{ and } g_{rs}^{kzm} = 0 \quad \forall k \neq l \quad (6-f)$$

$$\text{If } c_{rs}^{lzm} > D_{rszm}^{-1}(q_{rs}^{zm}), \text{ set } g_{rs}^{kzm} = 0 \quad \forall k \quad (6-b)$$

$c_{rs}^{lzm} = \min \{c_{rs}^{kzm}\}$  و  $\bar{q}_{rs}^{zm}$  نیز به عنوان حد بالایی برای میزان تقاضا به حساب می آید که برای مثال می تواند تعداد جمعیت در محدوده محدودیت ترافیک در نظر گرفته شود و فقط

برای حل مسئله جایگذاری می شود و اگر مقدار آن به حد کافی بزرگ در نظر گرفته شود، تأثیری در جواب به دست آمده نخواهد داشت.

پس از انجام عمل تخصیص، متغیرهای کمکی جریان یال و نرخ سفر مبدأ- مقصد به کمک معادلات (۷-الف) تا (۷-د) به دست آورده می شوند:

$$y_{azm}^n = \sum_{rs} \sum_k g_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a, z, m \quad (7-f)$$

$$y_{az}^n = \sum_{rs} \sum_k \sum_m g_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a, z \quad (7-b)$$

$$y_a^n = \sum_{rs} \sum_k \sum_z \sum_m g_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (7-c)$$

$$v_{rs}^{zm} = \sum_k g_{k,z,m}^{rs} \quad \forall r, s, z, m \quad (7-d)$$

در ادامه باید در جهت کاهش حرکت کرد. این جهت برابر با بردار  $d^n$  می باشد، المان های این بردار عبارتند از  $(y_a^n - x_a^n)$  و  $(v_{rs}^n - q_{rs}^n)$ .

گام ۳- تعیین گام حرکت.  $\alpha_n$  با حل مسئله ریاضی (۸) به دست آورده می شود:

(۸-الف)

$$\min z(\alpha) = \sum_{a \in A} \sum_{z \in Z} \sum_{m \in M} \int_0^{x_{amz}^n + \alpha(y_{amz}^n - x_{amz}^n)} t_a(\omega) d\omega + \sum_{a \in A} \sum_{z \in Z} \sum_{m \in M} \frac{1}{b_m} \tau_{az} (x_{amz}^n + \alpha(y_{amz}^n - x_{amz}^n)) - \sum_{rs} \sum_{z \in Z} \sum_{m \in M} \int_0^{q_{rs}^{zm} + \alpha(v_{rs}^{zm} - q_{rs}^{zm})} D_{rszm}^{-1}(\omega) d\omega$$

s.t.

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8-b)$$

برای به دست آوردن  $\alpha$  می توان از الگوریتم دوبخشی استفاده کرد.

گام ۴- بروز رسانی جریان. با استفاده از معادلات (۹-الف) تا (۹-د)  $\{x_a^{n+1}\}$ ،  $\{x_{az}^{n+1}\}$ ،  $\{x_{amz}^{n+1}\}$  و  $\{q_{rs}^{zm, n+1}\}$  به دست آورده می شوند.

$$x_{amz}^{n+1} = x_{amz}^n + \alpha(y_{amz}^n - x_{amz}^n) \quad (9-f)$$

$$x_{az}^{n+1} = \sum_{m \in M} x_{amz}^{n+1} \quad (9-b)$$

$$x_a^{n+1} = \sum_{z \in Z} x_{az}^{n+1} \quad (9-c)$$

$$q_{rs}^{zm, n+1} = q_{rs}^{zm, n} + \alpha_n(v_{rs}^{zm, n} - q_{rs}^{zm, n}) \quad (9-d)$$

جدول ۱. پارامترهای شبکه ترافیکی

شماره یال (a)	زمان طی یال در صورت نبود ترافیک ( $t_a^0$ )	ظرفیت یال (cap <sub>a</sub> )
۱	۶	۲۰۰
۲	۵	۲۰۰
۳	۶	۲۰۰
۴	۷	۲۰۰
۵	۶	۱۰۰
۶	۱	۱۰۰
۷	۵	۱۵۰
۸	۱۰	۱۵۰
۹	۱۱	۲۰۰
۱۰	۱۱	۲۰۰
۱۱	۱۵	۲۰۰

با در نظر گرفتن  $\alpha=0.15$  و  $\beta=4$  در تابع هزینه (مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  در اکثر رفرنس‌های مورد مطالعه این مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند)، این تابع برای هر یک از ۱۱ یال موجود در شبکه شکل ۳ برای وسایل نقلیه کلاس  $z$  و کاربران کلاس  $m$  به شکل رابطه (۱۱) در خواهد آمد:

$$T_{azm}(x_a) = \left( t_a^0 \left[ 1 + 0.15 * \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] + \frac{\tau_{az}}{b_m} \right) \quad (11)$$

هزینه کل مربوط به وسایل نقلیه کلاس  $z$  و کاربران کلاس  $m$  در مسیر شماره  $k$  هر یک از چهار جفت مبدأ-مقصد نیز به شکل معادله (۱۲) نوشته خواهد شد:

$$c_{rs}^{kzm} = \sum_{a=1}^{11} T_{amz} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall k, z, m, rs. \quad (12)$$

بنابراین، تابع هزینه مربوط به هر یال در شبکه ترافیکی برای تمام کلاس‌های وسایل نقلیه و کلاس‌های کاربر برابر با معادله (۱۳) خواهد بود:

$$T_a(x_a) = \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \left( t_a^0 \left[ 1 + 0.15 * \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] + \frac{\tau_{az}}{b_m} \right) = \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 t_a^0 \left[ 1 + 0.15 * \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] + \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \frac{\tau_{az}}{b_m} \quad (13)$$

گام ۵- معیار همگرایی. اگر عبارت (۱۰) به تحقق بیندند الگوریتم خاتمه خواهد یافت، در غیر این صورت  $n = n + 1$  قرار داده می‌شود و تکرار الگوریتم از گام ۱ ادامه می‌یابد.

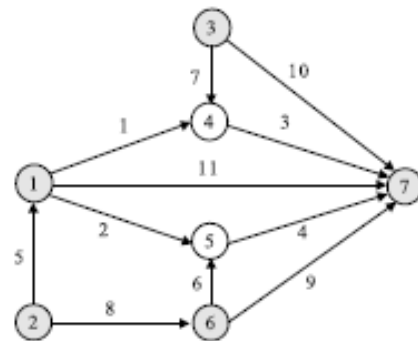
$$\sum_{rs} \frac{|D_{rszm}^{-1}(q_{rs}^{zmn}) - c_{rs}^{zmn}|}{c_{rs}^{zmn}} + \sum_{rs} \frac{|c_{rs}^{zmn} - c_{rs}^{zmn-1}|}{c_{rs}^{zmn}} \leq 0.1 \quad (10)$$

### ۳- مطالعه موردی

#### ۳-۱- تعریف روابط مسئله بر اساس شرایط مثال

برای استفاده از الگوریتم از شبکه ترافیکی شکل (۳) که توسط یانگ، منگ و لی (۲۰۰۴) (Yang, Meng and Lee, 2004) ارائه گردیده، بهره گرفته شده است. به دلیل سادگی بیش از حد شبکه‌های به‌کار رفته در سایر مقالات، ترجیح داده شد از این شبکه استفاده شود تا پیاده‌سازی دقیق‌تری از مسئله ذکر شده ارائه شده باشد.

به دلیل آن‌که وسایل نقلیه و کاربران شبکه ترافیکی به دو کلاس تقسیم گشته‌اند،  $Z$  و  $M$  هر کدام برابر ۲ ( $m \in M, z \in Z$ ) که نشانگر جفت مبدأ-مقصد‌های موجود در شبکه ترافیکی است، برابر با ۴ قرار داده می‌شوند ( $r - s \in R - S$ ). مقدار عددی  $k$  مربوط به شبکه شکل (۳) نیز که نشان‌دهنده تعداد مسیرهای موجود میان هر جفت مبدأ-مقصد است، برای جفت مبدأ-مقصد ۱ به ۷ برابر ۳، برای جفت مبدأ-مقصد ۲ به ۷ برابر ۵، برای جفت مبدأ-مقصد ۳ به ۷ برابر ۲ و برای جفت مبدأ-مقصد ۶ به ۷ نیز برابر ۲، قرار خواهد گرفت.



شکل ۴. شبکه ترافیکی

پارامترهای ظرفیت و زمان طی یال در صورت نبود ترافیک برای شبکه ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است.

برای حل مسئله بر اساس روند ذکر شده در بخش قبلی، جمعیت اولیه کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک به طریقی ایجاد می‌شود که هر ژن در هر کروموزوم نشان دهنده قیمت طرح یکی از ۱۱ یال موجود در شبکه باشد. به عبارت دیگر ساختار هر کروموزوم مانند شکل ۴ خواهد بود:

$0 \leq \tau_1 \leq 0.6t_1^0$	$0 \leq \tau_2 \leq 0.6t_2^0$	...	$0 \leq \tau_a \leq 0.6t_a^0$
-------------------------------	-------------------------------	-----	-------------------------------

شکل ۴. ساختار کروموزوم برای حل مثال

هر کروموزوم ایجاد شده به رابطه (۱۳) فرستاده شده و توسط الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر دیکسترا و الگوریتم همه-یا-هیچ کدام، گام‌های الگوریتم فرک-ولف انجام شده و  $x(\tau)$  و  $q(\tau)$  متناظر با کروموزوم به دست آورده می‌شود. مقادیر به دست آمده در تابع هدف رابطه (۱۵) جایگذاری شده و بر این اساس مقدار تابع برازش متناظر با هر کروموزوم به دست آمده و سایر مراحل الگوریتم ژنتیک تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد.

پس از آن‌که الگوریتم خاتمه یافت، کروموزومی که بهترین تابع برازش را دارد، به عنوان جواب مسئله انتخاب می‌گردد.

### ۳-۲- توابع تقاضا و پارامترهای حل مثال

توابع تقاضای جریان وسایل نقلیه مرجع مثال (Akiyama and Okushima, 2006) براساس انتخاب محل و قیمت طرح با استفاده از تئوری گراف در شبکه بوده است که بالتبع چند کلاسه بودن در آن منظور نشده است. شرایط کنونی مسئله مطرح شده در مقاله و چند کلاسه بودن آن سبب تغییر در روابط گردیده و آنها به شکل روابط (۲۰) تعریف می‌گردند:

$$D_{1 \rightarrow 7}(c_{1 \rightarrow 7}) = 150 \exp(-0.04c_{1 \rightarrow 7}) \quad \forall m, z \quad (20-f)$$

$$D_{2 \rightarrow 7}(c_{2 \rightarrow 7}) = 125 \exp(-0.03c_{2 \rightarrow 7}) \quad \forall m, z \quad (20-b)$$

$$D_{3 \rightarrow 7}(c_{3 \rightarrow 7}) = 125 \exp(-0.05c_{3 \rightarrow 7}) \quad \forall m, z \quad (20-c)$$

$$D_{4 \rightarrow 7}(c_{4 \rightarrow 7}) = 100 \exp(-0.05c_{4 \rightarrow 7}) \quad \forall m, z \quad (20-d)$$

به این ترتیب، سطح پایین‌تر مسئله دو سطحی با در نظر گرفتن شرایط کنونی مسئله به شکل روابط (۱۴) نوشته خواهد شد:

$$\begin{aligned} \min z(x, q) = & \sum_{a=1}^{11} \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \int_0^{x_{azm}} t_a(\omega) d\omega + \\ & \sum_{a=1}^{11} \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \frac{1}{b_m} \tau_{az} x_{azm} - \\ & \sum_{rs=1}^4 \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \int_0^{q_{rs}^{zm}} D_{rszm}^{-1}(\omega) d\omega \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_k f_{k,z,m}^{rs} = q_{rs}^{zm} \quad \forall r, s, z, m \quad (14-b)$$

$$f_{k,z,m}^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s, z, m \quad (14-c)$$

$$q_{rs}^{zm} \geq 0 \quad \forall r, s, z, m \quad (14-d)$$

$$x_{azm} = \sum_{rs=1}^4 \sum_k f_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a, z, m \quad (14-e)$$

$$x_{az} = \sum_{rs=1}^4 \sum_k \sum_{m=1}^2 f_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a, z \quad (14-g)$$

$$x_a = \sum_{rs=1}^4 \sum_k \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 f_{k,z,m}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} = \sum_{z=1}^2 x_{az} \quad \forall a \quad (14-z)$$

سطح بالاتر مسئله مورد نظر نیز به شکل روابط زیر نوشته خواهد شد:

$$\max F(\tau, x(\tau), q(\tau)) = \sum_{rs=1}^4 \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 \int_0^{q_{rs}^{zm}} D_{rszm}^{-1}(\omega) d\omega - \quad (15-f)$$

$$\sum_{rs=1}^4 \sum_{z=1}^2 \sum_{m=1}^2 c_{rs}^{zm} q_{rs}^{zm}$$

s.t.

$$\tau_{az}^{\min} \leq \tau_{az} \leq \tau_{az}^{\max}, \quad \forall a \in A, z \in Z \quad (15-b)$$

قیمت طرحی که برای هر یال در شبکه در نظر گرفته خواهد شد، برابر با اختلاف بین هزینه اجتماعی نهایی (MC) و متوسط هزینه عملیاتی (AC) است.

از سوی دیگر، طبق تعریف رابطه BPR، میانگین هزینه برابر با معادله زیر خواهد بود (Shepherd, May and Koh, 2007):

$$AC = t_a^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] \quad (16)$$

طبق معادله (۱۷) هزینه کل (TC) برابر خواهد شد با:

$$TC = t_a^0 \left[ 1 + 0.15 * \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] x_a \quad (17)$$

هزینه اجتماعی نهایی (MC) طبق معادله (۱۸) برابر با مشتق تابع هزینه کل نسبت به  $x_a$  است، بنابراین:

$$MC = \frac{dT C(x_a)}{dx_a} = t_a^0 \left[ 1 + 0.75 \left( \frac{x_a}{Cap_a} \right)^4 \right] \quad (18)$$

به این ترتیب، معادله (۱۹) به دست خواهد آمد:

$$MC - AC = 0.6t_a^0 \left[ \frac{x_a}{Cap_a} \right]^4 \quad (19)$$



با تعریف  $W$ ‌های متفاوت، جواب‌های متنوعی برای مسئله حاصل می‌شود. هرچه  $W$  بزرگتر انتخاب گردد، این مفهوم را می‌رساند که خودروهایی که شماره پلاکشان با روز هفته هم‌خوانی ندارد و بخواهند به خیابان‌های قیمت‌گذاری شده وارد شوند، موظف به پرداخت قیمت طرحی بیشتر و  $W$  برابر خودروهایی نوع دیگر که شماره پلاکشان با روز هفته هم‌خوانی دارد، هستند. برای مثال و با فرض فرد بودن روز هفته، اگر  $W = 1$  انتخاب شود، خودروهایی که زوج هستند و وارد خیابان‌های قیمت‌گذاری شده می‌شوند، هزینه‌ای (قیمت‌های مندرج در جداول ۳ تا ۶ بر حسب دلار می‌باشند) برابر با خودروهایی فرد پرداخت خواهند کرد. نتایج این انتخاب در جدول ۳ آورده شده است.

با فرض فرد بودن روز هفته، اگر  $W=2$  انتخاب شود، خودروهایی که زوج هستند و وارد خیابان‌های قیمت‌گذاری شده می‌شوند، هزینه‌ای ۲ برابر خودروهایی فرد پرداخت خواهند کرد. نتایج این انتخاب در جدول ۴ آورده شده است.

با فرض فرد بودن روز هفته، اگر  $W=5$  انتخاب شود، خودروهایی که زوج هستند و وارد خیابان‌های قیمت‌گذاری شده می‌شوند، هزینه‌ای ۵ برابر خودروهایی فرد پرداخت خواهند کرد. نتایج این انتخاب در جدول ۵ آورده شده است.

با فرض فرد بودن روز هفته، اگر  $W=\infty$  انتخاب شود، خودروهایی که زوج هستند اجازه ورود به خیابان‌های قیمت‌گذاری شده را ندارند. نتایج این انتخاب در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که نتایج به‌دست آمده در جداول نشان می‌دهند و پیشتر نیز گفته شد، بر اساس تابع سنجش آلودگی هوای ۱۵، می‌توان مقدار  $W$  را طوری قرار داد که تعداد وسایل نقلیه‌ای که در روزی متفاوت با زوج یا فرد بودن شماره پلاک وسیله نقلیه‌شان وارد محدوده قیمت‌گذاری می‌شوند، به حد دلخواه کاهش یا افزایش یابد و به این طریق بر میزان آلودگی و ترافیک منطقه قیمت‌گذاری شده اعمال مدیریت کرد. برای مثال، در روزهایی که آلودگی هوا در بیشترین حد خود قرار دارد،  $W=\infty$  قرار داده شود تا وسایل نقلیه‌ای که شماره پلاکشان با فرد یا زوج بودن روز هفته در تناقض است، اجازه ورود به محدوده قیمت‌گذاری شده را نیابند و از این طریق تقاضا و تعداد وسایل نقلیه در منطقه مذکور به نصف کاهش یابد، با استدلالی مشابه، می‌توان در روزهایی که تمام المان‌های آلوده‌کننده هوا کم و در حد مجاز باشند، به تمام خودروها اجازه ورود به منطقه قیمت‌گذاری داده شود (یعنی  $W=1$  قرار داده شود).

رابطه (۲۰-الف) تقاضای جریان وسایل نقلیه میان مبدأ- مقصد ۱ به ۷ را نشان می‌دهد. این تقاضا برای تمام کلاس‌های وسایل نقلیه و کلاس‌های کاربر یکسان در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب سایر روابط نیز تقاضای جریان در دیگر جفت مبدأ- مقصدها را نشان می‌دهند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بنابر آنچه شرح داده شد، مسئله مورد بحث حل گردیده و برای این منظور از پارامترهای جدول ۲ و نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

از آن جهت که مسئله‌ای که در این مقاله ارائه شده، مسئله قیمت‌گذاری معابر را برای اولین بار از دیدگاهی جدید و با در نظر گرفتن فرضیات و راه‌حل‌های جدید حل نموده است، بنابراین، نمی‌توان نتایج به‌دست آمده را با جواب‌های موجود در بررسی‌های گذشته و یا نتایج به‌دست آمده از سایر روش‌ها مقایسه نمود. به همین دلیل، نتایج به‌دست آمده در ادامه در جداولی ارائه خواهند شد.

مقاله‌های مشابه نیز از همین روش برای ارائه نتایج استفاده نموده‌اند. برای مثال، می‌توان به بررسی‌های انجام گرفته توسط لی (Lee, 2002)، سومالی<sup>۱۷</sup> (Yang and Huang, 2004)، یانگ و هانگ (Yang, 1998)، می<sup>۱۸</sup> و همکاران (May et al., 1992) و ژانگ<sup>۱۹</sup> و یانگ (Palma and Lindsey, 2003) اشاره نمود.

جدول ۲. پارامترهای به‌کار رفته در حل الگوریتم ژنتیک

پارامتر مورد نظر	مقدار تعریف شده
اندازه جمعیت	۵۰
حداکثر تعداد نسل‌ها	۱۰۰
شرط توقف	حداکثر تعداد نسل‌ها ایجاد شود و یا ۳۰ نسل متمادی باعث بهبود جواب مسئله نشود
احتمال رخداد عملگر تقاطع	۰/۸
احتمال رخداد عملگر جهش	۰/۰۱
تعداد انتخاب شایسته‌ترین کروموزوم‌ها	۲

جدول ۳. اگر در روز فردی از هفته باشیم و  $W = 1$  باشد.

قیمت‌های طرح به‌دست آمده				تعداد وسایل نقلیه				پال
کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		
کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	
۰/۷۱۱	۰/۷۱۱	۰/۷۱۱	۰/۷۱۱	۲۸	۲۲	۲۸	۲۲	۱
۰/۲۴۹	۰/۲۴۹	۰/۲۴۹	۰/۲۴۹	۱۰۶	۱۰۵	۱۰۶	۱۰۵	۲
۱/۲۷۳	۱/۲۷۳	۱/۲۷۳	۱/۲۷۳	۴۷	۳۱	۴۷	۳۱	۳
۰/۳۱۲	۰/۳۱۲	۰/۳۱۲	۰/۳۱۲	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵	۴
۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲	۵
۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۶
۰/۷۵۶	۰/۷۵۶	۰/۷۵۶	۰/۷۵۶	۱۸	۹	۱۸	۹	۷
۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۸
۰/۸۲۹	۰/۸۲۹	۰/۸۲۹	۰/۸۲۹	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۹
۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۵۰	۶۰	۵۰	۶۰	۱۰
۳/۳۰۰	۳/۳۰۰	۳/۳۰۰	۳/۳۰۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
-	-	-	-	۵۵۷	۵۳۵	۵۵۷	۵۳۵	جمع وسایل نقلیه

جدول ۴. اگر در روز فردی از هفته باشیم و  $W = 2$  باشد.

قیمت‌های طرح به‌دست آمده				تعداد وسایل نقلیه				پال
کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		
کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	
۱/۵۹۲	۱/۵۹۵	۰/۷۹۷	۰/۷۹۷	۲۷	۱۰	۴۳	۳۸	۱
۲/۳۸۶	۲/۳۸۷	۱/۱۹۳	۱/۱۹۳	۵۵	۱۰	۵۷	۵۷	۲
۳/۴۹	۳/۴۹	۱/۷۴۸	۱/۷۴۸	۲۹	۱۳	۶۴	۴۱	۳
۲/۰۸۶	۲/۰۸۳	۱/۰۴۱	۱/۰۴۱	۱۴۸	۱۰۳	۱۵۱	۱۵۱	۴
۰/۱۳۲	۰/۱۳۲	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۱۳	۱۳	۲۴	۱۹	۵
۰/۲۱۶	۰/۲۱۵	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۹۳	۹۳	۹۵	۹۵	۶
۱/۸۸۸	۱/۸۸۸	۰/۹۴۴	۰/۹۴۴	۳	۳	۲۱	۳	۷
۱/۲۷۸	۱/۲۷۱	۰/۶۳۵	۰/۶۳۵	۴۸	۴۸	۴۹	۴۹	۸
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۱۲	۱۲	۱۷	۱۷	۹
۰/۵۷۸	۰/۵۷۱	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۵۵	۵۵	۴۸	۶۲	۱۰
۱/۲۲	۱/۲۰۵	۰/۶۰۲	۰/۶۰۲	۱۰	۷۱	۱۱	۱۱	۱۱
-	-	-	-	۴۹۳	۴۳۱	۵۸۰	۵۴۳	جمع وسایل نقلیه

قیمت‌گذاری معابر مربوط به حوزه محدودیت ترافیک ...

جدول ۵. اگر در روز فردی از هفته باشیم و  $W = 0$  باشد.

قیمت‌های طرح به‌دست آمده				تعداد وسایل نقلیه				یال
کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		
کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	
۱۱/۰۰۷	۱۱/۰۰۷	۲/۲۰۱	۲/۲۰۱	۱۱	۱۱	۴۵	۳۵	۱
۶/۵۶	۶/۵۶	۱/۳۱۳	۱/۳۱۳	۱۱	۱۱	۵۷	۵۷	۲
۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	۱۴	۱۴	۶۴	۵۴	۳
۲/۶۴۲	۲/۶۴۲	۰/۵۲۸	۰/۵۲۸	۱۱۳	۱۱۳	۱۵۳	۱۵۳	۴
۴/۱۴۱	۴/۱۴۱	۰/۸۲۸	۰/۸۲۸	۱۳	۶	۲۲	۱۷	۵
۰/۰۶۱	۰/۰۶۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۱۰۲	۱۰۲	۹۶	۹۶	۶
۵/۳۷۴	۵/۳۷۴	۱/۰۷۴	۱/۰۷۴	۳	۳	۲۰	۲۰	۷
۴/۳۶	۴/۳۶	۰/۸۷۲	۰/۸۷۲	۵۳	۵۳	۵۰	۵۰	۸
۷/۳۷۱	۷/۳۷۱	۱/۴۷۴	۱/۴۷۴	۴	۴	۱۶	۱۶	۹
۰/۳۷۴	۰/۳۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۶۹	۶۹	۴۹	۴۹	۱۰
۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۷۵	۶۸	۱۱	۱۱	۱۱
-	-	-	-	۴۶۸	۴۵۴	۵۸۳	۵۵۸	جمع وسایل نقلیه

جدول ۶. اگر در روز فردی از هفته باشیم و  $W$  بسیار بزرگ انتخاب شده باشد.

قیمت‌های طرح به‌دست آمده				تعداد وسایل نقلیه				یال
کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		کلاس وسایل نقلیه زوج		کلاس وسایل نقلیه فرد		
کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	کلاس کاربر ۲	کلاس کاربر ۱	
		۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	۰	۰	۱۲۰	۱۲۰	۱
		۱/۲۸۲	۱/۲۸۲	۰	۰	۱۶	۱۶	۲
		۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰	۰	۱۲۳	۱۲۳	۳
		۰/۵۳۹	۰/۵۳۹	۰	۰	۸۸	۸۵	۴
		۰/۷۶۰	۰/۷۶۰	۰	۰	۶۰	۶۰	۵
		۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰	۰	۷۱	۶۹	۶
		۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰	۰	۳	۳	۷
		۰/۴۰۵	۰/۴۰۵	۰	۰	۱۲	۹	۸
		۰/۹۳۰	۰/۹۳۰	۰	۰	۴	۴	۹
		۰/۳۶۱	۰/۳۶۱	۰	۰	۷۰	۶۹	۱۰
		۰/۰۶۷	۰/۰۶۷	۰	۰	۱۰	۱۱	۱۱
-	-	-	-	۰	۰	۵۷۷	۵۶۹	جمع وسایل نقلیه

## ۵- نتیجه گیری

همانطور که در ابتدای مقاله نیز ذکر گردید مقالاتی که در این زمینه منتشر شده‌اند همزمان به بررسی کلاس‌بندی کاربران و وسایل نقلیه نپرداخته‌اند. در این مقاله سعی شده است این دو موضوع همزمان مورد بررسی قرار گیرند. برای انجام مطالعات بیشتر در آینده می‌توان علاوه بر کلاس‌بندی‌های ذکر شده، تک سرنشین بودن افراد را نیز مد نظر قرار داد و به منظور کاهش ترافیک در محدوده محدودیت ترافیک، هزینه محدودیت بیشتری از افراد تک سرنشین دریافت کرد. بنابراین تعیین قیمت طرح مناسب برای این افراد می‌تواند به عنوان هدف مناسبی برای تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر، قیمت‌گذاری طرح در این مقاله به صورت خیابانی انجام گرفته است و هر کاربر برای عبور از هر خیابان، موظف به پرداخت هزینه‌ای متفاوت با سایر معابر است. پیاده‌سازی این نوع قیمت‌گذاری در عمل مستلزم صرف هزینه بسیار زیادی است. بنابراین، برای آسان‌تر شدن پیاده‌سازی طرح ذکر شده، می‌توان از دیگر انواع طرح ترافیک و مفاهیم مرتبط با آن بهره گرفت.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- Akiyama, T. and Okushima, M. (2006) "Implementation of cordon pricing on urban network with practical approach."
- Beesley, M. E. (1972) "Technical possibilities of special taxation in relation to congestion caused by private cars." European Conference of Ministers of Transport, 2<sup>nd</sup> International Symposium in Theory and Practices in Transport Economics, Paris.
- Evans, A. W. (1992a) "Road congestion: The diagrammatic analysis", J. Political Economy, Vol. 100, pp. 211-217.
- Goodwin, P. B. (1989) "The rule of three-a possible solution to the political problem of competing objectives for road pricing", J. Traffic Engineering and Control, Vol. 30, pp. 495-497.
- Holland, E. P. and Watson, P. L., (1978) "Traffic restraint in Singapore. 1. Measuring the effects of the area of license scheme; and 2. Some design factors in traffic pricing schemes.", J. Traffic Engineering and Control, Vol. 19, pp. 14-25.
- Holland, J. H. (1975) "Adaption in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor.
- <http://www.wikipedia.org>
- Hua, T. D. (1992) "An evaluation of current practices in congestion pricing.", 71<sup>st</sup> Annual Meeting of Transport Research Board, Washington.
- Ison, S. (1998) "A concept in the right place at the wrong time; Congestion metering in the city of Cambridge.", J. Transport Policy, Vol. 5, pp. 139-146.
- Jones, P. M. (1998) "Urban road pricing: Public acceptability and barriers to implementation", In Button K, J and Verhoef E.T (eds) Road pricing, Traffic Congestion and the Environment, Issues of Efficiency and Social Feasibility, pp. 263-284.
- Larsen, O. and Ramjerdi, F. (1991) "Road pricing as a means of financing investment in

1. Pigou
2. Walters
3. Vickrey
4. Beesley
5. Evans
6. Yang
7. Lee
8. Pigouvian
9. Total Cost
10. Fixed Cost
11. Variable Cost
12. Opportunity Cost
13. Genetic Algorithm
14. Cross Over
15. Mutation
16. Frank- Wolfe Algorithm
17. Sumalee
18. May
19. Zhang

## ۷- مراجع

- Akiyama, T. and Ogawa, K. (2000), "Estimation of congestion price with traffic simulation on urban expressway."

- four road-user charging systems.", J. Traffic Engineering and Control, Vol. 35, PP. 311-316.
- Sumalee, A. (2004) "Optimal road user charging cordon design: A heuristic optimization approach", J. Computer- Aided Civil and Infrastructure Eng., Vol. 19, pp. 377-392.
  - Vickery, W. (1993) "Point of view: Principles and applications of congestion pricing." TR News. Vol. 167, pp. 4-5.
  - Walters, A. A. (1961) "The theory and measurement of private and social cost of highway congestion", J. Econometrica, Vol. 29, pp. 676-697.
  - Yang, H. (1998) "Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?", J. Transpn. Res. A., Vol. 32, pp. 45-54.
  - Yang, H., Bell and Michael G. H. (1996) "Traffic restraint, Road pricing and network equilibrium", J. Transpn. Res. B, Vol. 31. No. 4., pp. 303-314.
  - Yang, H. and Huang, H. (2004) "The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and system optimum problem", J. Transpn Res. B, Vol. 38, pp. 1-15.
  - Yang, H., Meng, Q. and Lee, D. (2004) "Trial-and-error implementation of marginal-cost pricing on networks in the absence of demand functions", J. Transpn Res. B, Vol. 38, pp. 477-493.
  - transport infrastructure-The case of Oslo", Institute of Transport Economics, Oslo.
  - Lewis, N. C. (1993) "Road pricing: Theory and practice". Thomas Telford, London.
  - Li, Michael Z. F. (2002) "The role of speed-flow relationship in congestion pricing implementation with an application to Singapore" J. Transpn. Res. B., Vol. 36, pp. 731-754.
  - May, A. D. (1992) "Road pricing: An international perspective", J. Transportation, Vol. 19, pp. 313-333.
  - Nagurney, A. (2000) "A multiclass, multicriteria traffic network equilibrium model", J. Mathematical and Computer Modelling, Vol. 32, pp. 393-411.
  - Oldridge, B. (1990) "Electronic road pricing: An answer to traffic congestion?" Proc. Information Technology and Traffic Management. London, NEDO.
  - Palma, A. and Lindsey, R. (2003) "How should road pricing be phased in on a network?", TRB Annual Meeting.
  - Pigou, A. C. (1920) "Wealth and welfare", Macmillan (London), 4<sup>th</sup> Edition.
  - Shepherd, S., May, A. and Koh, A. (2007) "How to design effective road pricing cordons", 11<sup>th</sup> World Conference on the Transportation Research.
  - Smith, M. J., May, A. D., Wisten, M.B., Van Vliet, D. and Ghali, M.O. (1994) "A comparison of the network effects of