فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و دوم، شماره ۸۸، تابستان ۱۴۰۱، ص. ۸۵-۶۷

انتخاب پروژه های خیابانی جهت تعریض در شبکه شهری

نسرین شاه‌حیدری (مسئول مکاتبات)، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سید نادر شتاب بوشهری، دانشیار، دانشکده صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

E-mail: n.shah@in.iut.ac.ir

چکیده

یکی از مسائل مطرح در حوزه حمل‌ونقل، انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل بوده و یکی از زیر فصل‌های انتخاب پروژه‌های حمل‌ونقل انتخاب پروژه‌های ساخت خیابان‌های جدید و یا تعریض خیابان‌های موجود در شبکه های حمل و نقل شهری است. تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی پروژه‌های ساخت و یا تعریض خیابان‌ها در شبکه حمل‌ونقل شهری انجام شده است اما تقریبا هیچ کدام از پژوهش‌های انجام گرفته، ارزیابی پروژه‌های تعریض خیابان‌ها در شبکه حمل‌ونقل شهری را به تنهایی در نظر نگرفته اند.در این پژوهش ابتدا یک مدل ریاضی جهت انتخاب پروژه در شبکه خیابان‌های شهری در حالتی که تنها تعریض خیابان‌های شبکه مورد نظر باشد، معرفی شده، سپس یک الگوریتم ابتکاری جهت تعیین مجموعه خیابان‌های کاندید جهت تعریض ارائه گشته است. از آنجا که مسئله انتخاب پروژه در شبکه‌های حمل‌ونقل، از دیدگاه حل از نوع مسائل NP-hard است و یکی از زمان بر ترین قسمت‌ها در حل این مسئله، حل زیر مسئله تخصیص ترافیک می باشد، یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله تخصیص ترافیک در این حالت، پیشنهاد شده است و در آخر از الگوریتم فراابتکاری تجمع ذرات جهت حل مدل انتخاب پروژه تعریض، استفاده گردیده و نشان داده شد که الگوریتم تجمع ذرات چه از نظر زمان حل و چه از نظر دقت حل نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: انتخاب پروژه در خیابان‌های شهری، الگوریتم تخصیص ترافیک فرانک- ولف، الگوریتم تجمع ذرات

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، فن نظام‌یافته‌ای از تجزیه و تحلیل عناصر حمل‌ونقل و ترافیک است که هدف آن طراحی نزدیک به بهینه مجموعه تسهیلات موجود و روش به کارگیری آن‌هاست. یکی از مسائل مطرح در حوزه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، ارزیابی، اولویت‌بندی و انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل (TIP[1]) می‌باشد. به دلیل حساسیت سیستم حمل‌ونقل و تاثیر قابل توجه آن بر زندگی عموم مردم، اقتضا می‌نماید که فرآیند انتخاب پروژه در این حوزه با رعایت توجه و دقت کافی به انواع تاثیرات آن انجام پذیرد.

مسئله انتخاب پروژه در شبکه حمل‌ونقل شهری به این سوال پاسخ می‌دهد که سیستم حمل و نقل مورد نظر در شرایط محدودیت بودجه چگونه گسترش یابد که عملکرد شبکه برای محدوده زمانی مورد نظر بهبود یابد. ارزیابی و انتخاب پروژه‌ها در شبکه، یک مسئله دو سطحی است که به دلیل غیر محدب بودن تابع هدف مربوطه، حل آن با مشکل روبرو می‌باشد. تاکنون در زمینه حل مسئله دوسطحی یاد شده، تحقیقات بسیاری انجام شده و الگوریتم‌های فراابتکاری بسیاری برای حل مسئله پیشنهاد شده است، که در همه آنها مسئله سطح پایین تر توسط یک الگوریتم تخصیص ترافیک حل می‌شود.

یکی از زیر فصل‌های انتخاب پروژه‌های سرمایه گذاری در شبکه‌های حمل‌ونقلی، پروژه‌های ساخت خیابان‌های جدید و یا تعریض خیابان‌های موجود است. تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی پروژه‌های ساخت و یا تعریض خیابان‌ها در شبکه حمل‌ونقل شهری، انجام شده است. در تمامی تحقیقات یاد شده، "ساخت خیابان‌های جدید" و یا "ساخت خیابان‌های جدید و تعریض خیابان‌های موجود به طور همزمان" مورد توجه قرار گرفته است و تقریبا هیچ کدام از پژوهش‌های انجام گرفته، ارزیابی پروژه‌های تعریض خیابان‌ها در شبکه حمل‌ونقل شهری را به تنهایی در نظر نگرفته‌اند.

از آنجا که مسئله انتخاب پروژه در شبکه‌های حمل‌ونقل، از دیدگاه حل از نوع مسائل NP-hard است و یکی از زمان‌برترین قسمت‌ها در حل این مسئله، حل زیر مسئله تخصیص ترافیک است و با توجه به این موضوع که تعریض خیابان‌های موجود در شبکه، پیکره و توپولوژی شبکه مبنا را تغییر نمی دهد، یکی از اهداف این مقاله، تغییر در الگوریتم حل مسئله تخصیص ترافیک، به گونه ای است که زمان حل مسئله تخصیص ترافیک به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

به طور کلی در این پژوهش، ابتدا مدل ریاضی جهت انتخاب پروژه در شبکه خیابان‌های شهری در حالتی که تنها تعریض خیابان‌های موجود در شبکه، مورد نظر باشد، معرفی می شود. سپس الگوریتمی ابتکاری جهت تعیین مجموعه خیابان‌های کاندید تعریض در شبکه، ارائه می گردد. پس از آن الگوریتم حل مسئله تخصیص ترافیک در حالت یاد شده بالا، بهبود داده می شود و در آخر با استفاده از روش فراابتکاری تجمع ذرات مدل ریاضی انتخاب پروژه های خیابانی جهت تعریض حل می گردد.

۲. مرور ادبیات موضوع

مسئله انتخاب پروژه در شبکه خیابان های شهری، طی پنج دهه اخیر به دلیل سطح پیچیدگی بالای مسئله، جذابیت تئوری، اهمیت عملی و میان رشته ای بودن آن، پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده در این زمینه را می توان به سه دسته تقسیم کرد:۱- طراحی شبکه پیوسته (CNDP[2]) که مرتبط با توسعه ظرفیت بهینه زیرمجموعه‌ای از کمان های موجود در شبکه است و از این‌رو ظرفیت کمان به صورت متغیرهای تصمیم پیوسته در نظر گرفته می‌شود.۲- مسئله طراحی شبکه گسسته (DNDP[3])؛ که درارتباط با اضافه کردن کمان های جدید به شبکه موجود بوده و از این رو ظرفیت کمان ها تنها می توانند مجموعه ای از مقادیر مشخص را به خود بگیرند. ۳- مسئله طراحی شبکه ترکیبی (MNDP[4])؛ که ترکیبی از دومسئله دسته یک و دو را شامل می شود.

بیشتر فعالیت‌های انجام شده در زمینه انتخاب پروژه‌های حمل‌ونقل را می‌توان در حیطه مسائل طراحی شبکه حمل‌ونقل شهری (UTNDP[5]) یافت. فراهانی و همکاران [Farahani et al., 2013] مرور جامعی از تعاریف، طبقه بندی‌ها، اهداف، محدودیت‌ها، متغیرهای تصمیم و روش‌های حل این مسائل را معرفی نمودند که هم شامل مسائل طراحی شبکه خیابان‌ها (RNDP[6]) و هم مسائل طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی (PTNDP[7]) است. آن‌ها در پژوهش خود مسائل طراحی شبکه حمل‌ونقل شهری را به صورت سه تعریف کلی، طبقه بندی کردند: ۱) مسائل مربوط به ساخت خیابان‌های جدید یا افزایش ظرفیت خیابان‌های موجود؛ ۲) تعیین مکان‌های بهینه تسهیلات که به شبکه حمل‌ونقل اضافه می‌شود ویا تعیین افزایش ظرفیت بهینه تسهیلات موجود دریک شبکه؛ ۳)سلسله فرایندهای تصمیم‌گیری کامل در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل که شامل تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و کاربردی می‌شوند.

حسینی نسب و شتاب [Hosseininasab and Shetab,2015] سه مدل برنامه‌ریزی ریاضی متفاوت برای یکپارچه کردن انتخاب و برنامه‌ریزی پروژه های ساخت خیابان های شهری به عنوان مسئله طراحی شبکه گسسته وابسته به زمان ارائه کردند. سپس یک رویکرد تکاملی که ترکیبی از سه تکنیک شناخته شده: فاز اول از روش سیمپلکس دوفازی، الگوریتم فرانک ولف و الگوریتم ژنتیک می باشد، برای حل مدلی که به نظر منعطف تر و واقعی تر به نظر می رسید، بکار بردند.

زو و همکاران [Xu, Wei and Hu, 2009] ، CNDP را با استفاده از شبیه سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک بر روی یک شبکه شبیه سازی شده، مورد مطالعه قرار دادند. آن ها CNDP را به صورت یک مسئله غیر خطی،غیرمحدب و دو سطحی مدل سازی کردند؛ تابع هدف مسئله سطح بالاتر را مجموع زمان سفر در شبکه بعلاوه هزینه های سرمایه گذاری برای توسعه ظرفیت کمان ها قرار دادند و مسئله سطح پایین تر را به عنوان مدل تخصیص ترافیک تعادلی استفاده کننده فرمول بندی کردند و الگوریتم فرانک–ولف را برای حل آن بکار گرفتند. آنها نشان دادند زمانی که تقاضای سفر بین مبدا–مقصدهای شبکه مقادیر زیادی باشد، شبیه سازی تبرید کارآتر از الگوریتم ژنتیک در حل CNDP می باشد، و زمانی که این مقادیر کم باشند، الگوریتم ژنتیک با صرف زمان محاسباتی بیشتر، جواب نزدیک به بهینه را ارائه می دهد.

میاندوآبچی و همکاران [Miandoabchi et al., 2015] مدلی برای مراحل ساخت خیابان ها، پروژه های توسعه خیابان های موجود طی افق زمانی و تخصیص لاین ها برای زمان های اوج ترافیک صبح و غروب در هر سال از افق برنامه ریزی ارائه کردند. آنها مسئله را به عنوان یک DNDP با دو هدف مجموع زمان سفر و میزان کربن منوکسید متصاعد شده، فرمول بندی و از دو متاهیوریستیک چندهدفه برای حل آن استفاده کردند.

گالو، داسرنو و مونتِلا [Gallo, D'Acierno and Montella, 2010] یک مدل بهینه سازی با محدودیت های غیر خطی برای DNDP ارائه کردند و یک الگوریتم فراابتکاری برای حل آن ارائه دادند. رویکرد پیشنهادی آنها رسیدن به حل های بهینه محلی در زمان های محاسباتی معقول را ممکن می سازد. میاندوآبچی و فراهانی [Miandoabchi and Farahani, 2011] ، DNDP شامل طراحی توسعه ظرفیت خیابان ها، تعیین جهت خیابان ها و تخصیص لاین ها در خیابان های دوطرفه را بطور همزمان و بر اساس ماکزیمم کردن ظرفیت ذخیره، بررسی کردند. آنها یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی و یک الگوریتم شبیه سازی تبرید تکاملی را برای حل این مسئله بکار بردند.

فراورش و سپهری [Farvaresh and Sepehri, 2012] نیز مسئله دوسطحی DNDP را بصورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل کردند تا حل بهینه کلی را بیابند و

قیدهای واقعی بیشتری را در نظر بگیرند. لاتپ و همکاران [Luathep et al., 2011] برنامه‌ریزی ریاضی برای MNDP با محدودیت های تعادلی را به مسئله برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط تبدیل کردند و یک الگوریتم بهینه سازی برمبنای روش برش محدودیت برای حل مسئله توسعه دادند. کریمی و همکاران [Karimi et al., 2013] برای انتخاب پروژه در شبکه خیابانی، روش جدیدی بر اساس ترکیب شبیه سازی و برنامه ریزی آرمانی وزن دار با معیار های اقتصادی و محیطی متفاوت، و مطالعه موردی شهر اصفهان ارائه کردند.

با توجه به مطالعات انجام شده، می توان گفت پژوهشی در ارتباط با مسئله انتخاب پروژه، درحالت خاصی که تنها تعریض (افزودن لاین به) خیابان‌های موجود مورد نظر باشد، انجام نشده است. هم چنین در اکثر مطالعات به زمان بر بودن پروسه تخصیص ترفیک در مسئله سطح پایین اشاره شده است، اما تاکنون راه حلی برای کاهش این زمان پیشنهاد نشده است. علاوه بر این، در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده، در مورد چگونگی تعیین مجموعه خیابان‌های کاندید برای تعریض، صحبتی نشده است . بنابراین در ادامه این پژوهش، مدلی که هدف آن انتخاب سبدی از خیابان‌های موجود در شبکه برای تعریض می‌باشد، معرفی می‌گردد و در امتداد آن، روش‌هایی برای ساده سازی حل مدل یاد شده، ارائه می‌شود.

۳. معرفی مدل مسئله

مسئله انتخاب پروژه‌ها که گاهی با نام طراحی شبکه نیز شناخته می‌شود، درحالت کلی، یک مسئله دوسطحی است. مسئله سطح بالای آن مسئله رهبر، مسئله طراحی، یا مسئله تصمیم گیرنده (مثلا دولت) است که شبکه حمل‌ونقل را مدیریت و برنامه‌ریزی می‌کند. مسئله این سطح شامل هدف قابل سنجش (مثلاً کاهش مجموع زمان سفر)، محدودیت‌ها (مثلاً مالی، سیاسی، فیزیکی و محدودیت‌های محیطی) و متغیرهای تصمیم طراحی (مثلاً ساخت خیابان جدید) است. مسئله سطح بالاتر فرض می‌کند که رهبر می‌تواند رفتار مسافران را پیش بینی کند. مسئله سطح پایین تر، مسئله پیرو یا مسئله مسافرانی است که تصمیم می‌گیرند آیا سفر داشته باشند و در صورت سفر، با چه وسیله و کدام مسیر را انتخاب کنند. ساختار دو سطحی به تصمیم گیر اجازه می‌دهد که واکنش مسافران را در نظر بگیرد و شبکه را به گونه ای بهبود دهد که بر تصمیم مسافران تاثیر بگذارد اما هیچ تاثیر مستقیمی بر تصمیم آن‌ها ندارد. این ساختار به مسافران اجازه پیش بینی تصمیم‌های رهبر را نمی دهد و آن‌ها تنها می‌توانند انتخاب خود را پس از اطلاع از تصمیم رهبر، تعیین نمایند. فرم کلی ریاضی مسئله یاد شده در بالا به صورت زیر می‌باشد:

- مسئله بهینه سازی سطح بالا

$$\min_{u} \quad F(u, v(u)) \qquad (۱)$$

$$\text{St.} \quad G(u, v(u)) \le B \qquad (۲)$$

که $v(u)$ از حل مسئله زیر بدست می‌آید.

- مسئله تخصیص ترافیک سطح پایین

$$\min_{v} \quad f(u,v) \qquad (۳)$$

$$st. \quad g(u,v) \le 0 \qquad (٤)$$

F و u به ترتیب تابع هدف و بردار متغیر تصمیم مسئله سطح بالاتر هستند و G یک تابع برداری برای محدودیت‌های سطح بالا است. f و v به ترتیب تابع هدف و بردار متغیر تصمیم (جریان) مسئله سطح پایین هستند و g یک تابع بردار برای محدودیت‌های مسئله سطح پایین است.

$v(u)$ تابع پاسخ نامیده می‌شود که واکنش استفاده‌کننده از شبکه را در قالب جریان ترافیکی به طرح شبکه u ، بیان می‌کند. در هر مسئله طراحی شبکه، $v(u)$ حل بهینه مسئله سطح پایین است. در واقع، هدف مسئله دو سطحی طراحی شبکه یافتن بردار بهینه u^* برای بهینه کردن تابع هدف F است به طوری که محدودیت طراحی شبکه، **Error! Reference source not found.**، همانند محدودیت‌های واکنش استفاده‌کننده،

و **Error! Reference source not found.** در نظر **Error! Reference source not found.** گرفته شود.

۳-۱ مدل پیشنهادی مسئله

چنانچه تنها تعریض خیابان‌های موجود (افزودن لاین جدید به خیابان‌های موجود) در نظر باشد، به دلیل عدم تغییر در پیکره شبکه مبنا در هر تکرار، می‌توان الگوریتم‌های خاص تری برای حل مسئله انتخاب پروژه ارائه کرد. بنابراین، چنانچه مسئله بهبود ظرفیت کمان‌های موجود شبکه با افزودن لاین جدید، یعنی تعریض خیابان‌های فعلی و نه ایجاد خیابان جدید باشد، مدل پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود:

- مسئله سطح بالا

$$\min_{z} \sum_{a\in A\setminus\bar{A}} v_a t_a(v_a) + \sum_{a\in\bar{A}}\sum_{i\in I_a} z_a^i v_a t_a^i(v_a) \qquad (۵)$$

$$s.t. \sum_{i\in I_a} z_a^i = 1 \,, \forall a \in \bar{A} \qquad (۶)$$

$$\sum_{a\in\bar{A}}\sum_{i\in I_a} c_a^i z_a^i \le B \qquad (۷)$$

$$z_a^i \in \{0,1\} \qquad (۸)$$

- مسئله سطح پایین

$$min \sum_{a\in A\setminus\bar{A}} \int_0^{v_a} t_a(x)dx + \sum_{a\in\bar{A}}\sum_{i\in I_a} z_a^i \int_0^{v_a} t_a^i(x)dx \qquad (۹)$$

$$s.t. \sum_{r \grave{o} R_w} f_r^w = q_w \qquad \forall w \in W \qquad (۱۰)$$

$$v_a = \sum_{w\in W}\sum_{r \grave{o} R_w} \delta_{ar}^w f_r^w \qquad ,\forall a \in A \qquad (۱۱)$$

$$f_r^w \ge 0 \quad , \quad r \grave{o} R_w, \ \forall w \in W \qquad (۱۲)$$

نمادهای استفاده شده در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

- مجموعه‌ها

A : مجموعه تمام کمان‌ها در شبکه حمل‌ونقل

$\bar{A}$: مجموعه کمان‌های بالقوه ای که ممکن است تعریض شوند

I_a : مجموعه تعداد لاین‌هایی که می‌تواند به کمان $a \in \bar{A}$ اضافه شود.مثلا $I_a = \{۰,۱,۲\}$

N : مجموعه گره‌ها در شبکه

R_w : مجموعه مسیرهای بین زوج میدا–مقصد w

W : مجموعه زوج مبدا–مقصدها در شبکه

- پارامترها

δ_{ar}^w : ضریبی باینری است که اگر مسیر $r \in R_w$ بین زوج مبدا–مقصد w از کمان a استفاده کند،مقدار یک میگیرد و در غیر اینصورت مقدار آن صفر است.

B : کل بودجه در دسترس

c_a^i : هزینه افزودن i لاین به کمان a

q_w : تقاضای سفر میان زوج مبدا– مقصد w

M : عدد خیلی بزرگ

$t_a(v_a)$: تابع زمان سفر– حجم کمان a

$t_a^i(v_a)$: تابع زمان سفر– حجم کمان a وقتی که i لاین به کمان a اضافه شود.

- متغیرهای تصمیم

z_a^i : متغیر تصمیم باینری که مقدار یک میگیرد اگر و تنها اگر i لاین به کمان a افزوده شود.

v_a : جریان در کمان a

f_r^w : جریان مسیر r بین زوج مبدا– مقصد w

روابط **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** به ترتیب نشان‌دهنده توابع هدف سطوح بالایی و پایینی می‌باشد. تابع هدف سطح بالایی در مدل فوق، کمینه کردن کل هزینه سفر در شبکه است که یک تابع هدف متداول در مسئله DNDP می‌باشد. اما در حالت کلی می‌توان توابع هدف دیگری را نیز بجای آن بکار برد. رابطه **Error! Reference source not found.** نشان‌دهنده محدودیت بودجه، روابط **Error! Reference source not found.** تا **Error! Reference source not found.** بیانگر شرایط تعادل استفاده کننده در شبکه، رابطه **Error! Reference source not found.** تضمین‌کننده

بقاء تقاضا در گره‌ها، و رابطه **Error! Reference source not found.** ارتباط بین جریان کمان و جریان مسیر را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که جریان در هر کمان، برابر با مجموع جریان‌های با مقاصد مختلف بر روی آن کمان است. رابطه **Error! Reference source not found.** نیز نشان دهنده غیر منفی بودن جریان‌هاست. روابط **Error! Reference source not found.** نیز نشان‌دهنده نوع متغیرهای تصمیم می‌باشند.

لازم به توضیح است که در دنیای واقعی تعریض یک خیابان بسیار پیچیده می باشد و به عوامل متعددی از جمله قیمت و وضعیت کاربری زمین های اطراف خیابان وابسته است و این عوامل در هزینه افزودن لاین بسیار تاثیر گذار است. به منظور درنظر گرفتن این هزینه ها و هم چنین ساده سازی معقول مسئله، تمامی این هزینه ها در پارامتر هزینه (c_a^i) درنظر گرفته و خلاصه شده است. مثلا چنانچه خیابان a در مرکز شهر قرار داشته باشد و زمین های اطراف آن کاربری تجاری داشته باشند و خیابان b در حاشیه شهر باشد، به دلیل گرانتر بودن هزینه آزاد سازی خیابان a، پارامتر هزینه در مدل برای خیابان a مقدار بیشتری نسبت به خیابان b دارد $(c_a > c_b)$. و چنانچه وضعیت کاربری زمین های اطراف خیابانی به گونه ای باشد که تعریض غیرممکن باشد، هزینه آن بینهایت در نظر گرفته می شود که منجر به عدم انتخاب آن می شود.

٤. انتخاب مجموعه خیابان‌های کاندید برای تعریض

عامل اصلی انتخاب و اجرای پروژه‌ها، محدودیت منابع(عمدتا منابع مالی) است. در مسئله انتخاب پروژه در شبکه خیابان‌های شهری عموما از کارشناس مربوطه خواسته می‌شود که با یک سطح بودجه معین، خیابان هایی از شبکه را برای تعریض انتخاب کند که وضعیت شبکه را تا بیشترین مقدار ممکن بهبود دهد. شبکه را بهبود دهد. اگر فرض شود شبکه مورد بررسی ۱۰۰۰ کمان داشته باشد، کارشناس مزبور برای انتخاب سبد کمان‌های بهینه بایستی 2^{1000} حالت را بررسی کند، که چنین کاری بسیار زمان بر، هزینه بر و در شبکه‌های بزرگ تقریبا غیر ممکن است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که به دنبال روشی برای کاهش تعداد حالت‌های مورد بررسی یا به عبارت بهتر به دنبال روشی برای حذف کمان‌هایی که به طور حتم برای تعریض مناسب نیستند، باشیم. به همین دلیل برای انتخاب مجموعه خیابان‌های کاندید در حالتی که تنها تعریض مورد نظر است، ابتدا بایستی شرایط فعلی کمان‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرد. معیارهایی که می‌توان برای ارزیابی شرایط خیابان‌ها استفاده کرد عبارتند از:" شلوغی خیابان" و "اهمیت خیابان".

٤-١ شاخص شلوغی خیابان

شکی نیست که اگر خیابانی خلوت باشد، آن خیابان برای تعریض انتخاب نمی شود. برای اینکه بتوان شلوغی یک خیابان را به صورت عددی و قابل سنجش و مقایسه تبدیل کرد تا با کمک آن بتوان خیابان‌ها را بر اساس شلوغی رتبه بندی کرد، از روش "نسبت جریان عبوری به ظرفیت خیابان" استفاده می شود.

منظور از «جریان عبوری از یک خیابان»، معادل سواری تعداد وسایل نقلیه ای است که در یک ساعت از مقطع عرضی آن خیابان عبور می کنند پس از تخصیص ترافیک به شبکه، هر خیابان جریان مشخصی را از خود عبور می‌دهدکه با Va برای خیابان a، نشان داده می‌شود. «ظرفیت خیابان»، به حداکثر معادل سواری تعداد وسایل نقلیه ای که می تواند در یک ساعت از مقطع عرضی آن خیابان، برای یک سطح سرویس خاص عبور کند، اطلاق می‌شود که با نماد Ca برای خیابان a، مشخص می گردد. «نسبت جریان عبوری به ظرفیت خیابان» شاخصی است که از طریق آن می توان وضعیت شلوغی خیابان های شبکه را مورد ارزیابی قرار داد. چنانچه این شاخص را، میزان شلوغ بودن یک خیابان بنامیم، داریم:

$$Crowd_a = \frac{V_a}{C_a} \qquad (۱۳)$$

هرچه این شاخص بزرگتر باشد، یعنی خیابان a شلوغ تر است و چنانچه این شاخص کوچک (کمتر از ۱) باشد، جریان عبوری از آن خیابان کمتر از ظرفیت خیابان است و خیابان نیاز به توسعه ندارد. بنابراین در انتخاب مجموعه خیابان‌های کاندید، اولویت با خیابان‌هایی است که شاخص شلوغی (نسبت جریان عبوری به ظرفیت) بالایی دارند.

٤-۲ شاخص اهمیت خیابان

شاخصی که می‌توان برای ارزیابی اهمیت یک کمان‌مورد استفاده قرار داد، مجموع زمان سفر مسافرینی است که ناگزیرند برای رسیدن به مقصدشان، از آن کمان عبور کنند. این معیار از جمع زمان سفر این مسافرین بدست می‌آید. برای محاسبه میزان اهمیت کمان p ام می‌توان از رابطه *(١٤)* استفاده نمود که در آن t_q، زمان سفر بین مبدا- مقصد q ام است.

$$I_p = \sum_{q=1}^{m} x_{pq} d_q t_q \qquad \forall p=1,2,...,n \qquad (۱)$$

I_p نشان دهنده اهمیت کمان pام و d_q ، تقاضای سفر مبدا- مقصد qام است. هر چه مقدار این معیار برای یک کمان بالاتر باشد، یعنی زمان سفر مسافرینی که ناگزیرند از این کمان بگذرند، بیشتر است و چنانچه شرایط این کمان را بهبود دهیم، مسافرین یاد شده، رضایتمندی بیشتری بدست می‌آورند.

برای اینکه کمان‌های مهم شبکه شناسایی شوند روش زیر پیشنهاد می‌گردد:

شبکه ای با n کمان و m مبدا- مقصد را در نظر بگیرید. پس از تخصیص ماتریس تقاضای سفر به شبکه، هر کمان بخشی از تقاضای هر مبدا-مقصد را از خود عبور میدهد. چنانچه این نسبت‌ها محاسبه شود، ماتریسی همانند آنچه در نمودار ۱ آمده است را می‌توان تشکیل داد که در آن x_{pq} یک متغیر باینری است که اگر حداقل ۹۰ درصد از تقاضای مبدا- مقصد q ام از کمان p ام گذشته باشد، برابر یک است و در غیر این صورت مقدار آن صفر می باشد.

شماره کمان \ مبدا-مقصد	OD_1	OD_2	…	OD_m
۱	x_{11}	x_{12}	…	x_{1m}
۲	x_{21}	x_{22}	…	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	x_{n1}	x_{n2}	…	x_{nm}

شکل ۱. ماتریس کمان - مبدا مقصد

زمانی که تصمیم به تعریض مجموعه ای از کمان‌های شبکه داریم، ابتدا به سراغ خیابان‌های شلوغ می‌رویم تا شرایط آنها را بهبود دهیم. برای انتخاب مجموعه خیابان‌های کاندید تعریض نیز ابتدا شاخص شلوغی هر خیابان را محاسبه کرده و بخشی از خیابان‌هایی را که شاخص شلوغی بالایی دارند را، برای مرحله بعد انتخاب می‌کنیم. سپس، میزان اهمیت خیابان‌های انتخاب شده را محاسبه کرده و خیابان‌ها را براساس اهمیتشان، به صورت نزولی مرتب کرده و در نهایت تعدادی از پروژه‌ها که در صدر جدول هستند وبیشترین اهمیت را دارند، به عنوان مجموعه خیابان‌های کاندید برای تعریض انتخاب می‌کنیم.

۵. تخصیص ترافیک در شبکه‌های همسایه با استفاده از الگوریتم فرانک–ولف ۸ اصلاح شده

مسئله سطح پایین در مسئله انتخاب پروژه، یک مسئله تخصیص سفر[۹] نامیده می‌شود. حل این مسئله تخصیص سفر، الگوی جریان شبکه حمل‌ونقل را برای هر سناریوی طراحی تعیین می‌کند.مسئله تخصیص سفر در شبکه خیابان‌های شهری، تخصیص ترافیک[۱۰] نامیده می‌شود. تخصیص سفر معمولاً تعدادی اصول رفتاری برای شرح رفتار انتخاب مسیر در نظر می‌گیرد؛ از جمله اصل سنتی واردراپ[۱۱] . بر طبق این اصل، با این فرض که تمام مسافران زمان سفر واقعی هر مسیر را می‌دانند، هر مسافر کوتاه ترین مسیر را انتخاب می‌کند. الگوی جریان حاصل از اصل واردراپ، جریان تعادلی کاربر نامیده می‌شود؛ که در آن شرایط هیچ مسافری مسیر بهتری ندارد و در صورتیکه مسیر خود را تغییر دهد، زمان سفرش افزایش خواهد یافت. معمول ترین روش برای حل تخصیص تعادلی کاربر در ادبیات موضوع، روش ترکیبی کوژ (روش فرانک–ولف) است. شرح این الگوریتم در منبع فرانک و ولف [Frank and Wolfe,1956] آمده است .

الگوریتم پیشنهادی، که می‌توان آن را الگوریتم فرانک- ولف اصلاح شده نامید، بدین صورت است که در شبکه‌هایی که تنها ظرفیت برخی از کمان‌های آن تغییر می‌کند و ما این شبکه‌ها را "شبکه‌های همسایه با شبکه مبنا" می‌نامیم، به جای آنکه در اجرای الگوریتم فرانک- ولف بر روی شبکه همسایه، از جواب اولیه صفر (جریان کمان‌های صفر) استفاده شود، از جریان‌های تعادلی بهینه شبکه مبنا به عنوان جواب اولیه شبکه همسایه استفاده کنیم.

٦. روش حل مسئله انتخاب پروژه های خیابانی جهت تعریض

حل دقیق مسئله انتخاب پروژه‌های خیابانی جهت تعریض، با توجه به پیچیدگی محاسبات، در یک مدت زمان مناسب بسیار پیچیده و چه بسا غیر ممکن است. از این رو در این مقاله برای حل دقیق این مسئله از روش شمارش کامل استفاده شده است. بدین منظور جهت محاسبه جواب بهینه، ابتدا تمام حالات امکان پذیر مسئله تولید گردیده و سپس برای این جواب‌ها مقادیر تابع هدف از طریق حل مسئله تخصیص ترافیک (مسئله سطح پایین) محاسبه می شود و بهترین جواب به عنوان جواب بهینه معرفی می‌گردد. این روش به دلیل اینکه تمام جواب‌های ممکن را تولید می‌کند، نیازمند زمان زیادی برای ارائه نتایج در ابعاد بزرگ است. از این رو در مسائلی با ابعاد بزرگ، الگوریتم فراابتکاری تجمع ذرات[۱۲] پیشنهاد شده است.

٦-١ الگوریتم تجمع ذرات

روش بهینه سازی انبوه ذرات، در ابتدا توسط یک روانشناس اجتماعی به نام جیمز کندی و یک مهندس الکترونیک به نام ابرهارت بر اساس تجربیات پیشین در رابطه با الگوریتم‌هایی که رفتار دسته‌جمعی مشاهده شده در گونه‌های بسیاری از پرندگان را مدل‌سازی کرده‌بودند، توسعه داده شد. تحقیقات آنان منجر به ایجاد الگوریتمی‌قوی برای بهینه سازی به نام الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه گردید.

هر ذره در الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات از سه بردار d بعدی تشکیل شده است که d، بعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره i ام این سه بردار عبارتند از: x_i موقعیت فعلی ذره، v_i سرعت حرکت ذره و y_i بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است و $\hat{y}_i$بهترین مکانی که تاکنون توسط پرندگان مجاور یافت گردیده است.الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات چیزی فراتر از یک مجموعه ذرات است. هیچ کدام از ذرات، قدرت حل هیچ مسأله ای را به تنهایی ندارند، و تنها هنگامی‌می‌توانند مسأله را حل نمایند که با یکدیگر تعامل داشته باشند. با این وجود، اگر تابع برازندگی مسأله مفروضی، تابع f

باشد، مقادیر x_i ،v_i ، y_i و $\hat{y}_i$در هر مرحله به صورت زیر بروزرسانی می‌شوند:

$$\begin{cases} v_{i,j}(t+1) = \omega(t) \times v_{i,j}(t) + r_{1,j}(t) \times c_1 \times (y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + r_{2,j}(t) \times c_2 \times (\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t) \end{cases} \quad (۲)$$

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & if \quad f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & if \quad f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (۳)$$

در معادلات فوق، ω ضریب اینرسی،$r_{1,j}$ و $r_{2,j}$ اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله (۱و۰) ، و c_1 و c_2 اعداد ثابت می‌باشند که به ضرایب شتاب دهنده معروف بوده و به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند.c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری برای کل جامعه است. r_1 و r_2 باعث می‌شود که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملتری روی فضا انجام گیرد. معمولاً مقادیر c_1 و c_2 را برابر ۲ اختیار می‌کنند.

٦-۲ الگوریتم باینری تجمع ذرات

برای حل مسائل گسسته، روش باینری این الگوریتم توسط کندی و ابرهارت [Kennedy and Eberhart, 1997] در سال ۱۹۹۷ ارائه شد و به باینری PSO شهرت‌یافت. تفاوت عمده این روش با الگوریتم اصلی در روابط بروز رسانی موقعیت و سرعت است که ابتدا باید مقدار بردار سرعت توسط تابع سیگموید به بازه [۱،۰] منتقل و سپس موقعیت جدید هر ذره در هر بعد با دو مقدار صفر ویک مشخص می‌شود و وضعیت انتخاب ویژگی را نمایش می‌دهد. در الگوریتم نسخه باینری، مفهوم سرعت به مفهوم احتمال، تغییریافته و V_{ij} احتمال‌یک بودن X_{ij} را بیان می‌کند. هر ذره براساس معادله‌های (۱۷) و (۱۸) به روزرسانی می‌شود که سرعت بر اساس رابطه قبلی (۲) بدست می‌آید.

$$S(v_{ij}^{t+1}) = \frac{1}{1+e^{-v_{ij}^{t+1}}} \quad (٤)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} 1 & if \quad Rand < S(v_{ij}^{t+1}) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (٥)$$

در اینجا Rand یک عدد تصادفی در بازه [۱،۰] است. در نسخه باینری الگوریتم، تعاریف متفاوتی از X و Y ارائه شده است. به طوری که سرعت ذره به جای آنکه ذره را به سمت جوابهای بهینه مسائل هدایت کند، به صورت تابع احتمالات،یک‌یا صفر شدن X را مطرح می‌کند؛یعنی، مقدار V_{ij} احتمال اینکه مقدار X_{ij} یک‌یا صفر باشد را تعیین می‌کند. از آنجایی که مقدار احتمال باید در بازه صفر ویک باشد، V_{ij} از تابع محدود کننده سیگموید بدست می آید.

٦-۳ الگوریتم تجمع ذرات پیشنهادی

الگوریتم فراابتکاری تجمع ذرات پیشنهادی برای حل مسئله ارزیابی پروژه‌های خیابانی جهت تعریض، دارای مراحل اصلی زیر است:

۱. شیوه نمایش جواب‌ها: مهم ترین گام برای استفاده از این الگوریتم، نحوه تعریف ذرات است که با توجه به ویژگی‌های مسئله تعیین می‌گردد. در این پژوهش با توجه به مدل سازی انجام شده، ذرات باید نشان دهنده این باشند که کدام پروژه‌ها در سبد پروژه اجرایی قرار می‌گیرند. از این رو ذرات به صورت آرایه ای از اعداد صفر و یک تعریف می‌شوند که طول این آرایه به اندازه تعداد پروژه‌های کاندید است و عدد ۱ در آن نشان دهنده انتخاب شدن پروژه متناظر و عدد صفر به معنی انتخاب نشدن آن پروژه است. در شکل زیر نمونه ای از جواب ایجاد شده برای الگوریتم‌ها نشان داده شده است. در این جواب، ۵ پروژه کاندید وجود دارد که پروژه‌های اول و دوم و پنجم برای تعریض انتخاب شده اند.

۱	۱	۰	۰	۱

شکل ۲. نحوه نمایش جواب برای اجرای الگوریتم

۲. تولید جمعیت اولیه: این الگوریتم برای شروع کار به یک دسته جمعیت اولیه نیازمند است. جواب‌های اولیه که

برای حل مدل این مسئله در نظر گرفته شده اند، به صورت تصادفی و با استفاده از توزیع گسسته یکنواخت با مقادیر صفر و یک تولید می‌شوند.

۳. تولید جمعیت جدید: برای تولید جمعیت‌های جدید، در الگوریتم تجمع ذرات از روابط *(٤)* و *(٥)* استفاده می‌شود.

٤. تابع برازندگی: مقدار تابع هدف به عنوان تابع برازندگی درنظر گرفته شده است؛ لذا، می‌بایست پس از ایجاد جمعیت اولیه و هم چنین تولید جواب‌های جدید، مقدار تابع هدف را برای آن‌ها محاسبه نمود تا بتوان بر اساس این مقادیر،تصمیم‌گیری نهایی را انجام داد.

۵. جایگزینی: در این مرحله از الگوریتم، باید جواب‌های جدید بدست آمده را پس از بررسی، جایگزین جواب‌های قبل نمود.

٦. شرط توقف: در الگوریتم‌های فراابتکاری، از آنجایی که جواب بهینه مشخص نیست، برای اتمام روند الگوریتم باید شروطی را تعیین نمود تا با بررسی آن، اجرای الگوریتم خاتمه یابد. از جمله این شروط می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رسیدن به حد قابل قبولی از جواب
- سپری شدن زمان/تکرار معینی از الگوریتم
- سپری شدن زمان/تکرار معینی بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه
- ...

در الگوریتم مورد استفاده، شرط توقف سپری شدن تکرار معینی بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه است.

۷. مسئله نمونه و ارائه نتایج

برای حل مسئله انتخاب پروژه‌های خیابانی برای تعریض، با توجه به اینکه مدل انتخاب پروژه ارائه شده مربوط به یک شبکه حمل‌ونقل شهری است، نیازمند این است که بر روی یک شبکه شهری مناسب، اجرا و پیاده سازی شود.

برای این منظور، از شبکه خیابانی واقعی سایوکس فالز[۱۳] استفاده شده است. شبکه سایوکس فالز، شبکه ای است در اندازه متوسط با ۲٤ گره و ۷٦ کمان که در مجموع ۵۷٦ زوج مبدأ- مقصد دارد. این شبکه خیابانی، به عنوان شبکه ای آزمایشی در بسیاری از پژوهش‌های حمل‌ونقلی مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به مشخصه‌های کمان‌ها و ماتریس تقاضای مبدأ- مقصد برای این شبکه از مقاله یانگ و ژو [Yang and Zhou, 1998] گرفته شده است.

۷-۱ انتخاب مجموعه خیابان های کاندید

به منظور انتخاب مجموعه خیابان‌های کاندید برای تعریض، موارد مطرح شده را در شبکه سایوکس فالز بررسی می‌کنیم. زمانی که تصمیم می‌گیریم در یک شبکه خیابان‌هایی را برای تعریض انتخاب کنیم، ابتدا به سراغ خیابان‌های شلوغ می‌رویم، بنابراین برای هر یک از خیابان‌های شبکه سایکس فالز شاخص شلوغی را محاسبه کرده و آنها را به صورت نزولی بر اساس این شاخص مرتب می‌کنیم. نتیجه محاسبات شاخص شلوغی، پس از مرتب شدن به صورت نزولی، در پیوست این مقاله آمده است.

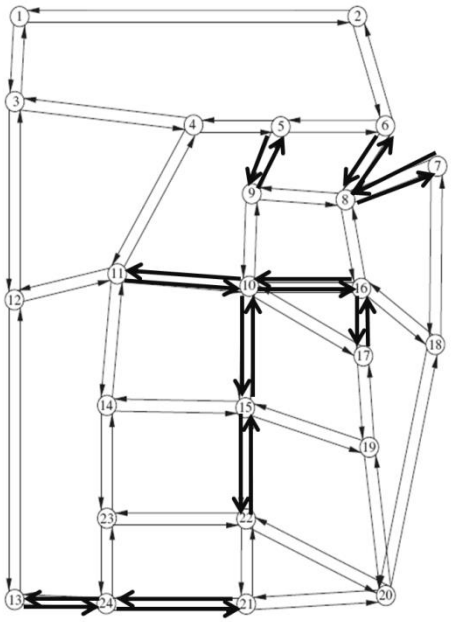
در گام بعدی، ۳۰ خیابان شلوغ شناسایی شده که در صدر جدول پ-۱ قرار دارند را برای ادامه کار انتخاب می‌کنیم. سپس میزان شاخص اهمیت کمان‌ها را که با استفاده از رابطه *(1)*، قابل محاسبه است، برای ۳۰ خیابان انتخاب شده محاسبه کرده و این بار خیابان‌ها را براساس مقدار شاخص اهمیت کمان‌ها به صورت نزولی مرتب می‌کنیم و در نهایت ۲۰ کمان که بیشترین مقدار را دارند به عنوان مجموعه خیابان‌های کاندید انتخاب می‌شوند. خیابان‌های انتخاب شده در

جدول آورده شده است و شکل ۳ این پروژه‌های کاندید را با می‌دهد.

خطوط پر رنگ بر روی شبکه خیابانی سایوکس فالز نشان

جدول ۱. مجموعه خیابان‌های کاندید برای تعریض در شبکه سایکس فالز

هزینه افزودن یک لاین	میزان اهمیت کمان	میزان شلوغی v/c	پارامترشلوغی $(10^{-4} \times hr/(1000veh/day)^4)$	زمان سفر آزاد $(\times 10^{-2} hr)$	گره مقصد	گره مبدا	شماره کمان
۵۹	٤/۸۰۳	۱/۸٦۱	۰/۰۰۲٦۵	۵/۸۷	۱۰	۱۵	۲۸
۵۹	٤/۵۷۹	۱/۸٦۳	۰/۰۰۲٦۵	۵/۸۷	۱۵	۱۰	۲۷
۲۵	٤/۳۵۰	۱/۸٦۲	۰/۰۱۱۸۵	۲/۵	۸	۷	۷۳
۵۱	٤/۳۳۵	۱/۸۲٤	۰/۰۰۷۵۵	۳/۵	۹	۵	۱۷
۵۱	٤/۳۲۲	۱/۸۲۹	۰/۰۰۷۵۵	۳/۵	۵	۹	۱۸
۲۵	٤/۲۱٤	۱/۸۵۳	۰/۰۱۱۸۵	۲/۵	۷	۸	۷٤
۳۸	۳/۹۳۸	۲/٤۰۱	۰/۰۸۹۲۸	۳/۷۲	۲٤	۱۳	۷۱
۳۸	۳/۹۱۹	۲/۳۹٦	۰/۰۸۹۲۸	۳/۷۲	۱۳	۲٤	۷۲
۲۲	۳/۱۷۹	۲/۷٦۹	۰/۰۵۲۰۸	۲/۱۷	۸	٦	٦۹
۲۲	۳/۱٦۸	۲/۷٦۸	۰/۰۵۲۰۸	۲/۱۷	٦	۸	۷۰
۳۵	۲/۹۳٤	۲/۸۹۵	۰/۰۰۵۲۵	۳/۵	۱۵	۲۲	٤۲
٤۵	۲/۷۷۰	۲/۳۳۵	۰/۱۰۸	٤/۵	۱٦	۱۰	۷۵
٤۵	۲/۷۳۸	۲/۳۲۱	۰/۱۰۸	٤/۵	۱۰	۱٦	۷٦
۳۵	۲/٦۹٤	۲/۸۹۰	۰/۰۰۵۲۵	۳/۵	۲۲	۱۵	٤۱
۵۰	۲/۵۳۵	۱/۸۹۸	۰/۰۰۷۵	۵	۱۱	۱۰	۲۵
۵۰	۲/۵۲٤	۱/۹۰۲	۰/۰۰۷۵	۵	۱۰	۱۱	۲٦
۱۷	۲/۳٦۱	۲/٤۱٤	۰/۰٤۰۰۸	۱/٦۷	۱۷	۱٦	٤۳
۱۷	۲/۳۳۹	۲/٤۱۹	۰/۰٤۰۰۸	۱/٦۷	۱٦	۱۷	٤٤
۳۳	۲/۱۹۱	۲/۱۷٤	۰/۰۷۸۹٦	۳/۲۹	۲۱	۲٤	٦۰
۳۳	۲/۱٦۱	۲/۱۷۹	۰/۰۷۸۹٦	۳/۲۹	۲٤	۲۱	۵۹



شکل ۳. شبکه سایکس فالز و خیابان‌های کاندید برای تعریض

۷-۲ ارائه نتایج الگوریتم تخصیص ترافیک اصلاح شده

برای بررسی تاثیر الگوریتم فرانک- ولف اصلاح شده، بر روی زمان حل مسئله تخصیص ترافیک، از شبکه سایوکس فالز استفاده می‌کنیم. بدین صورت که حالت‌هایی که ظرفیت ۱، ۲، ۳ و یا ٤ خیابان از خیابان‌های موجود شبکه تغییر کند، در نظر

جدول آورده شده است.

با توجه به این موضوع که زمان یک بار تخصیص ترافیک توسط الگوریتم فرانک- ولف در شبکه سایکس فالز حدود ۱ ثانیه است و اندازه گیری دقیق این زمان برای یک بار تخصیص ترافیک، کار دشواری است، به جای اندازه گیری زمان اجرای

می‌گیریم و تخصیص ترافیک را برای هر یک از حالت‌های فوق، یک بار با استفاده از روش معمول فرانک- ولف و بار دیگر با روش الگوریتم فرانک- ولف اصلاح شده پیشنهادی، اجرا کرده و جریان‌های تعادلی را بدست می‌آوریم. سپس زمانی را که برای هر بار تخصیص ترافیک با استفاده از هر یک از دو روش صرف می‌شود، با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. نتایج این محاسبات در

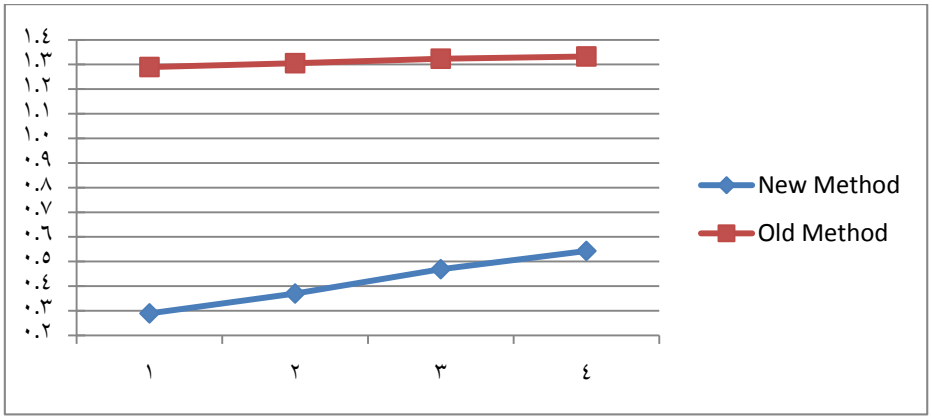
یک بار الگوریتم فرانک- ولف برای هر حالت، k مرتبه الگوریتم فرانک- ولف بر روی شبکه همسایه‌ای که به طور تصادفی ایجاد شده، انجام می‌شود و زمان اندازه‌گیری شده برای این k اجرا، بر k تقسیم می‌شود تا میانگین زمان یکبار اجرا الگوریتم فرانک- ولف در آن حالت، بدست آید.

جدول ۲. مقایسه زمان حل الگوریتم فرانک - ولف با روش معمول و روش پیشنهادی

نسبت زمان حل با روش پیشنهادی به روش معمول	زمان حل با روش پیشنهادی بر حسب ثانیه	زمان حل با روش معمول بر حسب ثانیه	درصد تغییر شبکه	تعداد کمان‌هایی که ظرفیتشان تغییر کرده
۰/۲۲٤٥	۰/۲۸۹٥	۱/۲۸۹٥	۱/٤	۱
۰/۲۸۳۳	۰/۳٦۹۸	۱/۳۰٥۳	۲/۷	۲
۰/۳٥۳۹	۰/٤٦۸٥	۱/۳۲۳٦	٤	۳

ستون آخر در	۰/٤۰۷٤	۰/٥٤۲۷	۱/۳۳۲۲	٥/۳	٤

جدول بیانگر این مطلب است که روش جدید سبب کاهش چشمگیر زمان حل، خصوصا در شبکه‌هایی که تعداد کمان‌های تعریضی کم است، می‌شود. به طوریکه این زمان حل در شبکه‌هایی که تعریض تنها در ۱ تا ۲/۵ درصد از کمان‌های آنها انجام شده، با روش پیشنهادی جدید حدود یک چهارم زمانی است که برای حل با روش معمول الگوریتم فرانک- ولف نیاز دارد.



شکل ٤. نمودار مقایسه زمان حل روش معمول فرانک- ولف با روش فرانک- ولف اصلاح شده

نمودار مقایسه نتایج حاصل از دو روش برحسب زمان حل نیز در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. شیب نموداری که نشان دهنده زمان حل با استفاده از روش معمول فرانک- ولف معمولی است تقریبا صفر است؛ زیرا، در روش فرانک- ولف معمولی زمانیکه شبکه تغییر می‌کند، الگوریتم از جواب اولیه صفر (جریان صفر) شروع کرده و مسئله را حل می‌کند. زمان حل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی شیب افزایشی دارد و هر چه تعداد کمان‌ها بیشتر شود به نمودار حل با روش معمول نزدیکتر می‌شود. این موضوع بدان معنی است که الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌های همسایه، یعنی شبکه‌هایی که تفاوت زیادی با شبکه مبنا ندارند، کاربرد دارد و هر چه تعداد کمان‌هایی که ظرفیتشان تغییر می‌کند، بیشتر باشد، از میزان همسایگی شبکه‌ها کاسته شد و بنابراین زمان حل با روش پیشنهادی کارایی خود را از دست می‌دهد و زمان حل افزایش یافته و به زمان حل با الگوریتم معمول فرانک- ولف معمولی نزدیک می‌شود.

۳-۷ حل مسئله انتخاب خیابان ها برای تعریض در شبکه شهری

مسئله معرفی شده، بر اساس مدلسازی انجام شده دارای پارامترهایی است که قبل از حل باید تعیین شوند. این پارامترها بنا بر شرایط استراتژیک مسئله تعیین شده و متناسب با هر مسئله قابل تغییر است.

یکی از پارامترهای مسئله که باید تعیین شود، تعداد پروژه‌های پیشنهادی است که مسئله از بین آنها ملزم به انتخاب پروژه‌هایی برای تعریض است که اهداف مسئله را ارضا کند. از طرفی، این پارامتر یکی از فاکتورهای تعیین کننده بعد مسئله است، یعنی هر چه تعداد پروژه‌ها بیشتر باشد، ابعاد مسئله تحت تاثیر قرار گرفته و بزرگتر می‌شود. در این مسئله از سبد پروژه با اندازه متوسط استفاده شده است. و فرض بر این است که در ابعاد کوچک، سبد پروژه شامل ۵ پروژه است. زمان حل دقیق مسئله با این بعد، کمتر از ۵ دقیقه است. هم چنین ابعاد متوسط مسئله شامل ۱۰ پروژه است که زمان حل دقیق کمتر از یک

ساعت دارند و ابعاد بزرگ مسئله شامل ۱۸ پروژه به بالاست که دارای زمان حل دقیق بیشتر از ۲٤ ساعت است.

هم چنین، برای هر پروژه که به عنوان یک پروژه پیشنهادی به مسئله معرفی می‌شود، باید هزینه مورد نیاز برای تکمیل آن تعیین شود. در مدل‌سازی مسئله، c_a ، هزینه مورد نیاز مربوط به پروژه تعریض خیابان a ام تعریف شده است. در تولید مسئله، این پارامتر متناسب با زمان سفر آزاد متناظر با خیابان، تعیین شده است. از طرف دیگر، باید بودجه اختصاص داده شده برای بهبود شبکه نیز مشخص گردد. برای تعیین بودجه کل، پس از تعیین مقدار هزینه لازم برای هر یک از پروژه‌ها، از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\frac{B}{\sum_{a\in\bar{A}} c_a} = d \qquad (۱۹)$$

که در این رابطه، B مقدار بودجه کل را نشان می‌دهد و d نشان دهنده نسبتی است که برای این کسر تعیین می‌گردد. برای مقدار d می‌توان سطوح مختلفی در نظر گرفت. برای مثال می‌توان d را در سطوح ٪۳۰، ٪۵۰ و ٪۷۰ قرار داد و مقدار B را محاسبه نمود.

۷-۳-۱ حل دقیق مسئله انتخاب پروژه تعریض

در مسئله انتخاب پروژه تعریض، با توجه به مدل‌سازی ارائه شده، شاخص تعریف شده در تابع هدف بیان کننده مجموع زمان سفر در کل شبکه است که با انتخاب ترکیب بهینه ای از خیابان‌های پیشنهادی برای تعریض، به دنبال کمینه کردن این مقدار هستیم. از طرفی با توجه به وجود پیچیدگی در محاسبه تابع هدف و وجود پدیده بریز، ارائه روش‌های دقیق رایج برای حل مسئله بسیار پیچیده و دشوار است. از این رو برای حل دقیق این مسئله از روش شمارش کامل استفاده شده است. در این روش، تمام حالت‌های موجود تولید شده و جواب‌های امکان پذیر مشخص می‌شوند. سپس برای تعیین مقادیر تابع هدف، مسئله تخصیص ترافیک برای آنها حل شده و طبق نتایج بدست آمده، بهترین جواب به عنوان جواب بهینه معرفی می‌گردد. این روش، به دلیل اینکه تمام جواب‌های ممکن را تولید می‌کند، نیازمند زمان زیادی برای ارائه نتایج در ابعاد بزرگ است. اما در ابعاد کوچک، در زمان قابل قبولی، جواب بهینه را بدست می‌دهد. از این رو، برای ابعاد بزرگ استفاده از الگوریتم تجمعی ذرات ، پیشنهاد شده است.

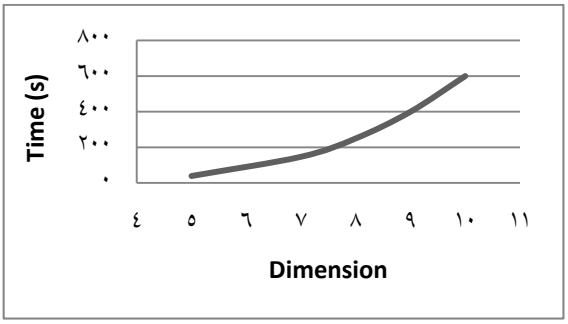
نتایج مربوط به حل دقیق مسئله‌های تولید شده با استفاده از روش شمارش کامل، در جدول ۳ آورده شده است.

لازم به ذکر است برای اجرای الگوریتم‌های مسئله از رایانه شخصی که دارای پردازشگر Core i2 با سرعت ۲/٦ GHz و ٤ GB حافظه است، استفاده شده است.

جدول ۳. نتایج حل شمارش کامل برای ابعاد مختلف با سطح بودجه ۰,۵

تعداد پروژه / پارامترها	۵ پروژه	۷ پروژه	۱۰ پروژه
تعداد کل حالات امکان پذیر	۳۲	۱۲۸	۱۰۲٤
تعداد جواب‌های امکان پذیر	۱۵	٦۳	۵۲۷
سبد پروژه بهینه	[۲۸ ۲۷ ۰ ۰ ۰]	[۰ ۰ ۷۳ ۰ ۰ ۷٤ ۷۱]	[۰ ۰ ۷۳ ۰ ۰ ۷٤ ۷۱ ۷۲ ٦۹ ۷۰]
مقدار جواب بهینه	۱۵۷٤	۱٤۸۹	۱۲۲۲
کل زمان اجرای برنامه(ثانیه)	۲۹	۱۰۸	٦۱۰

همانطور که مشاهده می‌شود، تعداد جواب های امکان پذیر مسئله با افزایش بعد مسئله به صورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. و روند افزایش زمان حل هر جواب نیز با افزایش بُعد مسئله، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. روند نمایی این افزایش در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.



شکل ٥. روند نمایی افزایش زمان حل با افزایش تعداد پروژه ها

جدول آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالیکه جواب بهینه در این حالت طبق جدول ٣ برابر ١٢٢٢ می‌باشد، ١٠ بار اجرا برای الگوریتم تجمع ذرات دارای میانگین ١٢٤٠/٣ و انحراف معیار ٧٣/٩ می‌باشد. بنابراین از نظر نزدیکی به جواب بهینه، می‌توان گفت که الگوریتم انبوه ذرات جواب مناسبی ارائه می‌دهد. ستون آخر در جدول ٤، نشان دهنده تعداد دفعاتی است که تابع برازندگی محاسبه می‌شود. ، زمان حل الگوریتم، ارتباط مستقیم با تعداد دفعات محاسبه تابع برازندگی دارد و هر چه تعداد دفعات محاسبه تابع برازندگی (NFE) بیشتر باشد، زمان حل نیز افزایش می‌یابد مشاهده می شود که الگوریتم انبوه ذرات در مقایسه با روش شمارش کامل که برای تمامی حالات ممکن تابع هدف را محاسبه می کند، تعداد دفعات بسیار کمتری، تابع هدف را محاسبه می کند و در نتیجه زمان حل بسیار کمتری دارد.

٧-٣-٢ نتایج اجرای الگوریتم PSO پیشنهادی

نتایج حاصل از ١٠ بار اجرای الگوریتم تجمع ذرات و با شرایط توضیح داده شده در بخش٦-٣ ، در

جدول ٤. نتایج اجرای الگوریتم تجمع ذرات برای مسئله با ١٠ پروژه پیشنهادی

ردیف	جواب بدست آمده	مقدار تابع هدف	درصد خطا	زمان اجرا (ثانیه)	NFE[14]
١	[٢٨ ٢٧ ٠ ٠ ٠ ٠ ٧١ ٠ ٦٩ ٧٠]	١٢٣٣/٤	٠/٩٣	٤٢	١٧
٢	[٢٨ ٠ ٧٣ ٠ ٠ ٧٤ ٧١ ٠ ٦٩ ٧٠]	١٢٤٧/٥	٠/٠٩	٢٩	٧
٣	[٢٨ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٧١ ٧٢ ٦٩ ٧٠]	١٢٦٣/٣	٣/٣٨	٣٨	١٦
٤	[٠ ٠ ٧٣ ٠ ١٨ ٠ ٧١ ٧٢ ٦٩ ٧٠]	١٢٢٦/١٧	٠/٣٤	٧١	٢٤
٥	[٠ ٠ ٠ ١٧ ١٨ ٠ ٧١ ٧٢ ٠ ٧٠]	١٢٥٧/٢	٢/٨٨	٤٢	١٣
٦	[٢٨ ٢٧ ٧٣ ٠ ٠ ٠ ٠ ٠ ٦٩ ٧٠]	١٢٤٧/٥	٢/٠٩	٣١	٨
٧	[٠ ٠ ٧٣ ٠ ٠ ٧٤ ٧١ ٧٢ ٦٩ ٧٠]	١٢٢٣/٥	٠/١٢	٣٩	١٨
٨	[٠ ٠ ٠ ١٧ ٠ ٧٤ ٧١ ٧٢ ٦٩ ٧٠]	١٢٢٥/٧	٠/٣٠	٥٤	٢١
٩	[٠ ٠ ٠ ٠ ١٨ ٧٤ ٧١ ٧٢ ٦٩ ٧٠]	١٢٢٤/٣	٠/١٩	٦٠	١٥
١٠	[٠ ٠ ٧٣ ١٧ ١٨ ٧٤ ٠ ٠ ٦٩ ٧٠]	١٢٥٤/٣٨	٢/٦٥	٦٨	٢٤
ميانگين	_____	١٢٤٠/٣	١,٥	٤٧,٤	١٦,٣

٨. نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله انتخاب پروژه در شبکه خیابانی شهری در حالتی که تنها تعریض مورد نظر باشد، بررسی شد. در ابتدا روش ابتکاری برای تعیین مجموعه خیابان‌های کاندید با کمک ارزیابی شرایط فعلی خیابان‌ها پیشنهاد شد. پس از آن، مسئله انتخاب پروژه‌های سرمایه‌گذاری در حالتی که تنها تعریض خیابان‌های موجود (افزودن لاین جدید) مورد نظر باشد، مدل‌سازی شد. سپس جهت کاهش زمان حل تخصیص ترافیک در این مسئله، الگوریتم فرانک- ولف اصلاح شده ارائه شد و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم فرانک-ولف اصلاح شده، نشاندهنده کارا بودن این روش در

حل مسئله تخصیص ترافیک به شبکه های همسایه است. نتایج روش حل دقیق مسئله انتخاب خیابان‌ها جهت تعریض، بیانگر آن است که با افزایش بعد مسئله تعداد جواب های امکان‌پذیر مسئله و همچنین زمان حل به صورت فزاینده ای افزایش می یابد. از این رو حل دقیق مدل در مسائل بزرگ نیازمند زمان بسیار زیادی است و این موضوع ضرورت استفاده از الگوریتم های فراابتکاری برای حل این مسئله را توجیه پذیر می نماید. الگوریتم تجمع ذرات ارائه شده برای حل مدل موردنظر عملکرد قابل قبولی را در مسائل نمونه چه از جنبه کیفیت و چه از جنبه زمان حل از خود نشان داد. با این حال هنوز یافتن رویکردهایی جدید برای حل مسئله انتخاب پروژه های خیابانی جهت تعریض در شبکه های بزرگ حمل و نقل شهری از زمینه های مطالعاتی آتی می باشد.

۹. پی‌نوشت‌ها

1. Transportation Investment Projects
2. Continuous network design problem
3. Discrete network design problem
4. Mixed network design problem
5. Urban Transportation Network Design Problem
6. Road Network Design Problem
7. Public Transit Network Design Problem
8. Frank and Wolfe Algorithm
9. Trip Assignment Problem
10. Traffic Assignment
11. Wardrop’s Principle
12. Particle Swarm Optimization
13. Sioux Falls
14. Number of Functions Evaluated

۱۰. مراجع

- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., and Rashidi, H. (2013) "A review of urban transportation network design problems", European Journal of Operational Research ,vol. 229, no. 2, pp. 281–302.

- Farvaresh, H., Sepehri, M.M. (2012) "A single-level mixed integer linear formulation for a bi-level discrete network design problem", Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review 47(5), 623–640.

- Frank, M. and Wolfe, P. (1956) "An algorithm for quadratic programming", Nav. Res. Logist. Q., vol. 3, no. 1–2, pp. 95–110.

- Gallo, M., D'Acierno, L., Montella, B. (2010). "A meta-heuristic approach for solving the urban network design problem", European Journal of Operational Research ,Vol. 201No. 1, pp.144–157.

- Hosseininasab, S. and Shetab-Boushehri, S. (2015) "Integration of selecting and scheduling urban road construction projects as a time-dependent discrete network design problem", European Journal of Operational Research, Vol. 246, pp. 762–771.

- Karimi, H., Rezvan, M.T., Shirmohammadi, A., Vallée, D. (2013) "A solution for urban road selection and construction problem using simulation and goal programming - Case study of the city of Isfahan", Transport Policy, Vol. 29, pp. 46–53.

- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1997) "A Discrete Binary Version Of The Particle Swarm Algorithm", IEEE International Conference on Computational Cyberneticsa nd Simulatio.

- Luathep, P., Sumalee, A., Lam, W.H.K., Li, Z.C., Lo, H.K., (2011) "Global optimization method for mixed transportation network design problem: a mixed-integer linear programming approach", Transportation Research Part B: Methodological, Vol.45 No. 5, pp. 808–827.

- Miandoabchi, E. ,Daneshzand, F.,Farahani,R.Z. and Szeto,W.Y.(2015) "Time-

dependent discrete road network design with both tactical and strategic decisions", Journal of the Operational Research Society ,Vol. 66, pp. 894–913.

- Miandoabchi, M., Zanjirani Farahani, R., (2011) "Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem", Advances in Engineering Software Vol. 42, pp.1041–1050.

- Xu, T., Wei, H., Hu, G. (2009) "Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm", Expert Systems with Applications Vol. 36, No.2, Part 1,pp. 1322–1328.

- Yang, H. and Zhou, J.(1998) "Optimal traffic counting locations for origin–destination matrix estimation", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 32, no. 2, pp. 109–126.

۱۱. پیوست

جدول پ-۱. محاسبه شاخص شلوغی برای خیابان‌های شبکه سایوکس فالز(مرتب شده به صورت نزولی)

شماره کمان	گره مبدا	گره مقصد	میزان شلوغی $(\frac{V_a}{C_a})$
٦٩	٦	٨	٢/٧٦٩٤٠
٧٠	٨	٦	٢/٧٦٧٩٨
٤٤	١٧	١٦	٢/٤١٩٠٠
٤٣	١٦	١٧	٢/٤١٣٧٦
٧١	١٣	٢٤	٢/٤٠٠٥٤
٧٢	٢٤	١٣	٢/٣٩٥٧٤
٧٥	١٠	١٦	٢/٣٣٥٢٤
٧٦	١٦	١٠	٢/٣٢١٤٨
٥٩	٢١	٢٤	٢/١٧٨٥٠
٦٠	٢٤	٢١	٢/١٧٤١٤
٣٤	١٤	١١	٢/٠٧٤٠٤
٣٣	١١	١٤	٢/٠٧٠٤٨
٦٢	٢٣	٢٢	٢/٠٦٢١٢
٦١	٢٢	٢٣	٢/٠٤٤٠٢
٤٨	١٩	١٧	٢/٠٠٧٢٨
٤٧	١٧	١٩	٢/٠٠٤٨٦
٣٨	١٥	١٤	٩٧٠٨٠.١
٣٧	١٤	١٥	١/٩٦٨٣٠
٢٦	١١	١٠	١/٩٠١٧٩
٢٥	١٠	١١	١/٨٩٨٠٦
٤٢	٢٢	١٥	١/٨٩٤٦٠

میزان شلوغی $(\frac{V_a}{C_a})$	گره مقصد	گره مبدا	شماره کمان
۱/۸۸۹۸۱	۲۲	۱۵	٤۱
۱/۸٦۲٥۳	۱٥	۱۰	۲۷
۱/۸٦۱٥٤	۸	۷	۷۳
۱/۸٦۱٤۸	۱۰	۱٥	۲۸
۱/۸٥۳٤۳	۷	۸	۷٤
۱/۸۲۹۱۳	٥	۹	۱۸
۱/۸۲٤٦٦	۱۹	۲۰	٥۲
۱/۸۲٤۰۷	۹	٥	۱۷
۱/۸۱٤۰۲	۱۱	۱۲	۳۲
۱/۸۱۲۱٤	۲۰	۱۹	٥۱
۱/۸۰۰۹۰	۱۲	۱۱	۳۱
۱/۷۹٦۰۸	۱٦	۸	۲۳
۱/۷۸٥٦٤	۲۱	۲۲	٥۸
۱/۷۸۳٥۸	۲۲	۲۱	٥۷
۱/۷۷٤٥٦	۸	۱٦	۲٤
۱/۷٦۳۸۸	٦	٥	۱٥
۱/۷٦۲۲۸	٥	٦	۱٦
۱/۷٥۸۱٦	۱٤	۲۳	٦٤
۱/۷٥۷۱۰	۲۳	۱٤	٦۳
۱/۷٥۳۹۳	۹	۱۰	٦۸
۱/۷٥۰۹٤	۱۰	۹	٦۷
۱/۷۳٦۲۸	۱۷	۱۰	۲۹
۱/۷۲۳٤٦	۱۰	۱۷	۳۰
۱/٦۷٥۱۲	۲٤	۲۳	٦٥
۱/٦۷٤۲۸	۲۳	۲٤	٦٦
۱/٦۰۳۱٤	۸	۹	۲۲
۱/٥۹٥۲۰	۹	۸	۲۱
۱/٥٥۸٦۲	۲۰	۲۲	٥٦
۱/٥٥۲۱٦	۲۲	۲۰	٥٥
۱/٤٦۳٦۸	۲۱	۲۰	٥۳
۱/٤٥۱۳۸	۲۰	۲۱	٥٤
۱/۳٦۰۲٥	۱٥	۱۹	٤۰

میزان شلوغی $(\frac{V_a}{C_a})$	گره مقصد	گره مبدا	شماره کمان
۱/۳۵۶۸۸	۱۹	۱۵	۳۹
۱/۳۴۹۹۶	۲	٦	٦
۱/۳۴۹۷۸	٦	۲	۵
۱/۲٤٦۱٦	۱۱	٤	۱۳
۱/۲۳۵۳۸	٤	۱۱	۱٤
۱/۱۹۹٦۰	٤	۵	۱۲
۱/۱۹٤۳۰	۵	٤	۱۱
۰/۹٦۹۳۳	۳	٤	۸
۰/۹٦۱٤۱	٤	۳	۷
۰/۸۸۸۱۹	۲۰	۱۸	٤۹
۰/۸۸٤۵۲	۱۸	۲۰	۵۰
۰/۸۳٦۸٤	۱۸	۱٦	٤۵
۰/۸۲٦۷۳	۱٦	۱۸	٤٦
۰/۷۱۵۷۸	۷	۱۸	۲۰
۰/۷۱۳۳۸	۱۸	۷	۱۹
۰/۵۹٦۲۱	۱۳	۱۲	۳۵
۰/۵۹۳۲۸	۱۲	۱۳	۳٦
۰/۵۰۲۵٦	۱۲	۳	۹
۰/٤۹۸۹۷	۱۲	۳	۱۰
۰/٤۱۱٦۰	۳	۱	۳
۰/٤۱۱۵٦	۱	۳	٤
۰/۲٤۹۹۱	۲	۱	۱
۰/۲٤۷۹٤	۱	۲	۲