ارایه مدلی برای طراحی و توسعه شبکه‌های پایدار حمل و نقل بر مبنای الگوریتم ژنتیک

ژاله نجاری الموتی*، دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد، پژوهشکدهٔ حمل و نقل، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران
افشین شریعت مهیمنی، استادیار، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود احمدی‌نژاد، دانشیار، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: zhaleh_alamouti@yahoo.com
دریافت: ۱۳۹۰/۰۱/۲۰– پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۲۸

چکیده

شبکه‌های حمل و نقل که در معرض آسیب‌های روزانه مثل تصادفات ترافیکی، بارندگی و نیز آسیب‌های مربوط به حوادث طبیعی مثل سیل و زلزله قرار دارند، جزءِ شبکه‌های آسیب‌پذیر محسوب می‌شوند. در پایداری شبکه، عوامل متفاوتی مانند میزان آسیب‌پذیری اجزای شبکه، ظرفیت شبکه و شکل یا فرم شبکه تأثیر دارد و در این میان شکلی از شبکه که پایداری را در شرایط بیشتری فراهم کند از نیازهای خاص می‌باشد. در این مقاله به تأثیر توپولوژی یا شکل شبکه در برابر بیشتر شاخص های مختلف طراحی پرداخته می شود و روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله طراحی توپولوژی شبکه راه‌ها بر اساس شاخص‌های زمان سفر، کارایی و قابلیت اطمینان (پایداری) شبکه معرفی می‌شود، سپس در بحث توسعه شبکه، به تأثیر شاخص‌های مختلف در طراحی شبکه پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که طراحی یک شبکه بر اساس شاخص زمان سفر، لزوماً به یک شبکه قابل اطمینان و پایدار در برابر حوادث ترافیکی منتج نمی‌شود و جواب‌های متفاوتی برای توسعه شبکه بر مبنای شاخص‌های پایداری، کارایی و زمان سفر در شبکه به‌دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: توپولوژی، طراحی شبکه، پایداری، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

حمل و نقل مسافر و کالا، جزیی جدانشدنی از هر جامعه توسعه یافته است که از برهم‌کنش اقتصادی – اجتماعی، بین گروه‌های آن جامعه ناشی می‌شود. شبکه‌های حمل و نقل هر جامعه‌ای که طراحی ضعیفی دارند، برای آن جامعه هزینه بر خواهند بود.

وجود یک شبکه کارا و مناسب حمل و نقلی، موجب کاهش هزینه‌های تحمیلی بر سیستم حمل و نقل، هزینه‌های گردانندگان سیستم و هزینه‌های استفاده کنندگان آن و حتی کاهش هزینه‌های غیر استفاده‌کنندگان (آلودگی، تصادفات و مانند آنها) می‌شود. تاکنون تحقیقات اندکی در ادبیات طراحی شبکه‌های حمل و نقل صورت گرفته است که در آنها طراحی توپولوژی شبکه یا مسایل طراحی شبکه گسسته، مد نظر بوده است. بیشتر تحقیقات مربوطه، بر افزایش ظرفیت راه‌ها یا مسایل طراحی شبکه پیوسته تمرکز داشته‌اند.

کوانت (Quandt, R. E., 1969)، اولین بار مسئله طراحی شبکه را به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی خطی حمل و نقل دارای محدودیت ظرفیت کمان و محدودیت سقف بودجه، مدل کرده است. متغیر تصمیم‌گیری در مسئله کوانت، مقدار توسعه ظرفیت کمان می‌باشد.

* نویسنده مسئول

لبلانک (LeBlanc, L. J., 1975)، مسئله طراحی شبکه را برای افزایش ظرفیت کمان‌های پیشنهادی و با یک روش حل دقیق با به‌کارگیری روش شاخه و کرانه ارایه می‌کند. تحقیقات دیگری که به مسئله طراحی شبکه در حالت پیوسته پرداخته شامل تحقیق فریز و همکاران (Freisz, T. L. et al., 1993)، موسکوس (Moskos, K. 1992)، درزنر و وسلاوسکی (Drezner, Z. and G. O. Wesolowsky, 2003) و . . . بوده است که از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم سرد و گرم کردن، تابو و ژنتیک در حل مسئله خود استفاده کرده‌اند.

برای حل مسئله گسسته طراحی شبکه، بیلهیمر و گِری (Billheimer, J. W; Gray, P. 1973)، مسئله طراحی توپولوژی شبکه را با استفاده از روش ابتکاری اضافه و حذف حل کردند. این روش دارای دو مرحله متناوب می‌باشد که در یک مرحله کمان‌ها به شبکه اضافه می‌شوند و در مرحله بعد کمان‌ها حذف می‌شوند. روش ابتکاری شاخه و کرانه توسط چن و آلفا (Chen, M.; Alfa, A. S. 1991)، برای حل مسئله طراحی گسسته شبکه به‌کار گرفته شد. کانترلا و ویتا (Cantarella, G. E.; Vitetta, A. 1994)، مسئله طراحی شبکه گسسته را با هدف حداقل کردن زمان سفر در شبکه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند. متغیر تصمیم‌گیری در مسئله آنها افزودن کمان‌های جدید در شبکه و مکان‌یابی محل‌های پارک می‌باشد. در تحقیق دیگری، کانترلا و همکاران (Cantarella, G. E. et al., 2002) و (Cantarella, G. E. et al., 2006)، از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی تابو و سرد و گرم کردن و شکل ترکیبی الگوریتم ژنتیک و جستجوی تابو برای حل مسئله گسسته طراحی شبکه (توپولوژی شبکه) استفاده کرده‌اند. الگوریتم‌های آنها در یک فرآیند تکراری، ابتدا متغیرهای تصمیم‌گیری گسسته (افزودن کمان‌های جدید) را به‌دست آورده، سپس مقادیر متغیرهای پیوسته (زمان‌بندی چراغ‌ها) را تعیین می‌کردند.

در زمینه شاخص‌های عملکرد شبکه، ناگورنی و کیانگ (Anna Nagurney ;Q. Qiang, 2007)، شاخصی برای کارایی شبکه حمل و نقل معرفی کرده‌اند. این شاخص با معیارهای دیگر که برای شبکه‌های پیچیده پیشنهاد شده است، تفاوت دارد؛ زیرا در آن اطلاعات مربوط به جریان، هزینه و رفتار استفاده‌کنندگان سیستم به همراه توپولوژی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اسکات و همکاران (D. M. Scott et al., 2006)، شاخص NRI را برای تعیین ارزش کمان‌ها در یک شبکه راه به منظور معرفی کمان‌های بحرانی و برای پروژه‌های توسعه راه‌ها معرفی کردند. آنها ثابت کردند که برای تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ریزی و توسعه حمل و نقل، این شاخص نسبت به V/C که یک روش محلی و نه کلی است، مناسب‌تر می‌باشد.

شبکه‌های حمل و نقل را می‌توان برای اهداف متفاوتی طراحی کرد اما تاکنون در مسایل طراحی شبکه از تابع هدف کل زمان سفر در شبکه (وسیله – ساعت) به عنوان معیاری از کارکرد سیستم حمل و نقل استفاده شده است، در صورتی‌که طراحی یک شبکه بر اساس شاخص زمان سفر، لزوماً به یک شبکه قابل اطمینان و پایدار در برابر حوادث ترافیکی و یا طبیعی منتج نمی‌شود و از طرفی شاخص‌های قابلیت اطمینان و پایداری شبکه برای یک شبکه موجود نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در مورد اینکه چه شکلی از شبکه بیشترین پایداری و قابلیت اطمینان را داراد، تحقیقی صورت نگرفته است. با داشتن طرح توپولوژی یک شبکه پایدار می‌توان در جهت توسعه شبکه آینده و حذف کمان‌هایی که تأثیر کمی در عملکرد شبکه دارند، بهره گرفت.

بنابراین، در این مقاله به تأثیر توپولوژی یا شکل شبکه در برابر حوادث محتمل پرداخته می‌شود و از یک متدولوژی بر پایه الگوریتم ژنتیک برای مسئله طراحی توپولوژی شبکه راه‌ها بر مبنای شاخص‌های زمان سفر، کارایی و پایداری شبکه استفاده می‌شود و سپس تأثیر این شاخص‌های مختلف در توسعه شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ادامه پس از معرفی شاخص مورد نظر، تابع هدف و محدودیت‌ها به صورت ریاضی تعریف می‌شود، سپس روند طراحی توپولوژی شبکه و توسعه آن با ارایه مثالی از یک شبکه نمونه تشریح می‌گردد.

۲- معرفی شاخص‌ها

برای طراحی توپولوژی شبکه، ابتدا شاخصی برای شبکه تعریف و سپس شبکه بر اساس آن طراحی می‌گردد.

۲-۱- شاخص کارایی (E)

برای تعریف شاخص کارایی، از شاخص ارایه شده در تحقیق ناگورنی و کیانگ استفاده می‌شود که این شاخص برای ارزیابی کارایی شبکه حمل و نقل معرفی شده است. در این تحقیق نشان داده می‌شود که در مواردی که گسستگی بین مبدأ و مقصد به وجود می‌آید، این شاخص جواب‌های منطقی‌تری نسبت به سایر شاخص‌های کارایی استفاده شده تاکنون به‌دست می‌دهد (A. Nagurney and Q. Qiang, 2007).

شاخص کارایی (E)، به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$E = \frac{\sum_{ij \in W} \frac{d_{ij}}{\lambda_{ij}}}{n_W} \qquad (۱)$$

که در آن:

W = مجموعه‌ای شامل تمامی زوج‌های مبدأ – مقصد؛

λ_{ij} = هزینه سفر روی کوتاه‌ترین مسیر بین هر زوج مبدأ- مقصد (i-j)؛

d_{ij} = تقاضای سفر بین هر زوج مبدأ- مقصد (i-j)؛

n_W = تعداد زوج‌های مبدأ – مقصد.

۲-۲- شاخص پایداری (A)

این شاخص به صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد:

$$A = \sum_a \frac{x_a \times p_a}{C_a} \qquad (۲)$$

که در آن:

x_a = جریان ترافیک روی کمان a؛

p_a = احتمال پایداری کمان a؛

C_a = هزینه ساخت کمان a.

این شاخص، پایداری یا قابلیت عبور جریان ترافیک در شبکه را بر حسب پایداری کمان‌ها و به ازای هزینه صرف شده در ساخت آنها به دست می‌دهد. احتمال پایداری یک کمان، احتمال برقرار بودن اتصال یک کمان، برای عبور تقاضا از آن خواهد بود که بسته به احتمال بروز حوادث و آسیب‌پذیری کمان در برابر آن، تغییر می‌کند. این احتمال پایداری، مقداری بین صفر و یک دارد که بسته به حوادث مختلف، مانند زلزله یا حتی بروز تصادفات ترافیکی، می‌تواند تعریف شود.

۲-۳- شاخص زمان سفر

شاخص کل زمان سفر در شبکه (T) به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$T = \sum_a x_a t_a(x_a) \qquad (۳)$$

که در آن:

x_a = جریان روی کمان a؛

t_a = زمان سفر روی کمان a.

۳- تابع هدف و محدودیت‌ها

مسئله طراحی شبکه مورد نظر، یک مسئله دو سطحی است که در سطح اول، حداکثر کردن مقدار شاخص طراحی مد نظر می‌باشد. با فرض اینکه 1, 2, . . . , m، کمان‌های پیشنهادی برای تشکیل شبکه یا اضافه کردن به شبکه و شاخص طراحی شبکه، شاخص کارایی (E) باشد، تابع هدف و محدودیت آن در سطح اول به صورت رابطه (٤) نشان داده می‌شود:

$$MaxE \qquad (٤)$$

s.t: به طوری‌که:

$$\sum_{i=1}^{i=m} c_i a_i \le B \qquad (٥)$$

$$A = \{ a = (a_1, a_2, ..., a_m) | a_i = 0 \text{ یا } 1 \} =$$

مجموعه کمان‌های تشکیل‌دهنده شبکه،

اگر $a_i = 1$ باشد، به این معنی است که کمان i در تشکیل شبکه استفاده می‌شود و در غیر این‌صورت استفاده نمی‌شود.

c_i = هزینه ساخت کمان i،

B = حداکثر بودجه مجاز برای طراحی شبکه،

سطح دوم مسئله، طراحی شبکه مربوط به تخصیص ترافیک می‌باشد که از طریق حل مسئله بهینه‌سازی روابط (٦) الی (٩) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\min\ z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x)dx \qquad (٦)$$

s.t :

$$\sum_k f_k^{ij} = d_{ij} \qquad \forall i,j \qquad (٧)$$

$$f_k^{ij} \ge 0 \quad \forall k,i,j \qquad (٨)$$

$$x_a = \sum_i \sum_j \sum_k f_k^{ij} \delta_{a,k}^{ij} \qquad \forall a \qquad (٩)$$

به‌طوری‌که :

x_a = جریان روی کمان a؛

t_a = زمان سفر روی کمان a؛

f_k^{ij} = جریان روی مسیر k، برای زوج مبدأ- مقصد (i-j)؛

d_{ij} = تقاضای سفر بین مبدا i و مقصد j.

$$\delta_{a,k}^{ij} = \begin{cases} 1 & \text{کمان a روی مسیر k برای زوج مبدأ- مقصد i-j} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

یادآوری می‌شود که تنها متغیر تصمیم‌گیری در این مسئله طراحی شبکه a_i می‌باشد، یعنی تعیین لینک‌های تشکیل‌دهنده شبکه، نه جریان در شبکه. هرچند برای تعیین جریان بهینه در شبکه که منتج از شبکه خاص $a \in A$ می‌باشد، باید مسئله حداقل‌سازی دوم حل شود.

٤- ارایه روش پیشنهادی

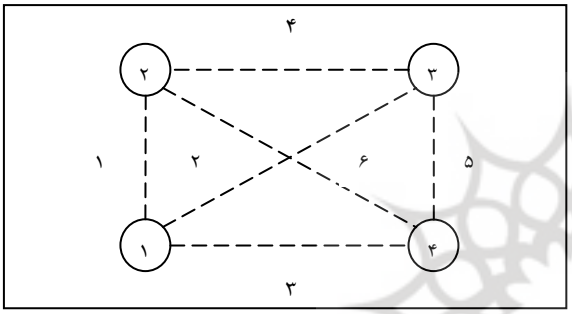
همان‌طور که در قسمت ۳ مطرح شد، مسئله طراحی شبکه مورد نظر، یک مسئله دو سطحی است که در یک سطح تابع هدف خاصی بهینه می‌شود یا به‌عبارت دیگر در این سطح، هدف یافتن شکلی از شبکه یا گزینه‌هایی از کمان‌ها برای افزودن به شبکه (طراحی گسسته) یا افزایش ظرفیت (طراحی پیوسته) در حالت محدودیت سرمایه‌گذاری تعیین شده است، به‌طوری‌که شاخص‌های طراحی شبکه بهینه شود و در سطح دوم، تخصیص ترافیک صورت می‌گیرد. سطح اول از مسئله در روابط ٤ و ٥ آمده است. در مسئله طراحی گسسته، با افزایش تعداد پروژه‌های نامزد، فضای جستجو بزرگ شده و حل مسئله در شرایط واقعی بسیار سخت می‌شود. در حالت عمومی مسئله طراحی شبکه از نوع مسایل بهینه‌سازی ترکیبی است که به شکل مدل‌های برنامه‌ریزی دو سطحی قابل بیان است. روش‌های حل متفاوتی برای این مسایل به‌کار گرفته شده‌اند. از جمله این روش‌ها الگوریتم‌های فراابتکاری یا الگوریتم‌های ابتکاری پیشرفته هستند. بنابراین، برای حل قسمت اول مسئله، با توجه به ابعاد بزرگ مسئله مورد نظر و دامنه جواب نسبتاً زیاد، از میان الگوریتم‌های فراابتکاری موجود، از الگوریتم ژنتیک به علت سرعت همگرایی بهتر و محاسبات کمتر استفاده می‌شود (Cantarella, G. E. et al., 2002) و (Cantarella, G. E. et al., 2006).

سطح دوم از مسئله در روابط ٦ الی ۹ آمده است. فرض بر این است که تخصیص به‌صورت تعادلی در شبکه انجام می‌شود و با توجه به اینکه روش تخصیص جزیی مطلوب‌تر و واقعی‌تر از روش‌های مختلف نزدیک شدن به تخصیص تعادلی یا به عبارت دیگر تعادل واردراپ می‌باشد، از الگوریتم تخصیص جزیی برای حل سطح دوم مسئله طراحی شبکه استفاده می‌شود.

این دو الگوریتم به زبان فورترن کدگذاری شده است.

٥- طراحی توپولوژی شبکه پایدار برای یک شبکه نمونه بر اساس شاخص کارایی

در شکل ۱، چهار گره ۱ و ۲ و۳ و ٤ و گزینه‌های کمان‌ها، به همراه شماره آنها برای افزودن به شبکه نشان داده شده است.



شکل ۱. شبکه نمونه با ٦ کمان و ٤ گره

ماتریس O-D برای هر زوج مبدأ و مقصد، بر حسب وسیله نقلیه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ماتریس O-D

شماره مبدأ و مقصد	۱	۲	۳	٤
۱	۰	۵۰۰	۱۲۰۰	۵۰۰
۲	۵۰۰	۰	۸۰۰	۵۰۰
۳	۱۲۰۰	۸۰۰	۰	۸۰۰
٤	۵۰۰	۵۰۰	۸۰۰	۰

در این مسئله، تمامی کمان‌ها دو طرفه فرض می‌شوند.

تابع هزینه مربوط به هر دو گره متوالی بر حسب جریان روی کمان‌ها (f) به‌صورت جدول ۲ تعریف می‌شود.

هدف، یافتن شکلی از شبکه (توپولوژی) روی ٤ گره فوق یا ترکیبی از کمان‌ها برای افزودن به شبکه می‌باشد، به‌طوری‌که کارایی شبکه ماکزیمم شود.

جدول ۲. تابع هزینه هر کمان

کمان‌ها	تابع هزینه کمان
(۲,۱) و (۱,۲)	**f**
(۳,۱) و (۱,۳)	**۰/۱f**
(٤,۱) و (۱,٤)	**f**
(۳,۲) و (۲,۳)	**۰/۱f + ۲۰۰**
(٤,۲) و (۲,٤)	**f**
(٤,۳) و (۳,٤)	**۰/۱f + ۲۰۰**

جدول ۳. نمونه‌ای از ترکیب پروژه‌ها برای شکل ۳

شماره کمان	اجزای انتخابی
۱	۱
۲	۰
۳	۰
٤	۱
۵	۱
٦	۱

۵-۱- روند حل مسئله

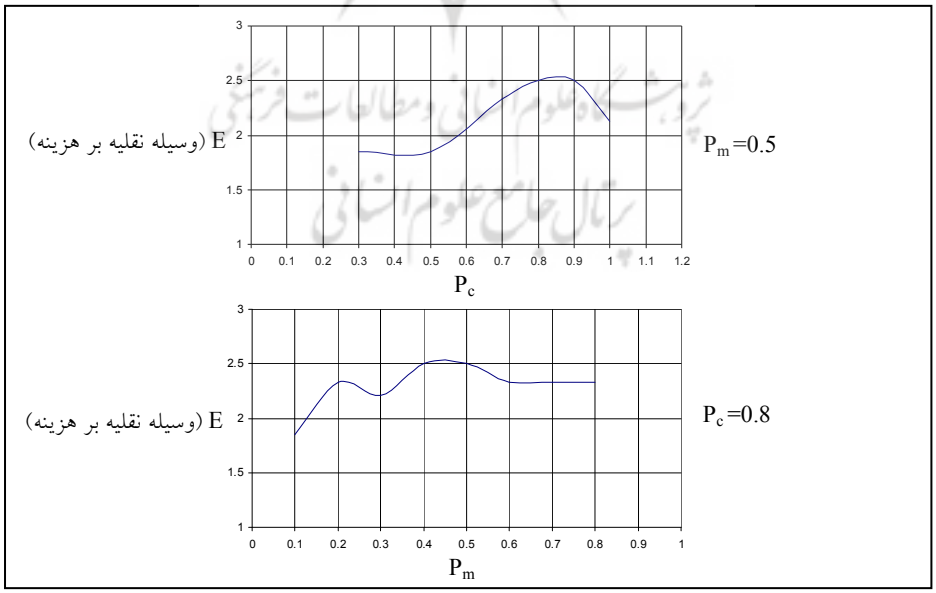
با توجه به اینکه ٦ گزینه برای افزودن کمان به شبکه موجود می‌باشد، به تعداد ٦٤ (2^6) ترکیب وجود خواهد داشت، بنابراین، نحوه نمایش ترکیب‌های فوق در الگوریتم به‌کار رفته، به صورت یک رشته ٦ بیتی می‌باشد که عدد هر بیت با توجه به موجود بودن یا نبودن کمان مربوطه بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند و بیت اول تا ششم، مربوط به کمان‌های ۱ تا ٦ می‌باشد.

نمونه‌ای از ترکیب پروژه‌ها به شکل یک رشته ٦ بیتی در جدول ۳ نشان داده شده است که مقادیر جدول ۳ نشان‌دهنده وجود کمان‌های ۱ و ٤ و ۵ و ٦ در شبکه می‌باشد.

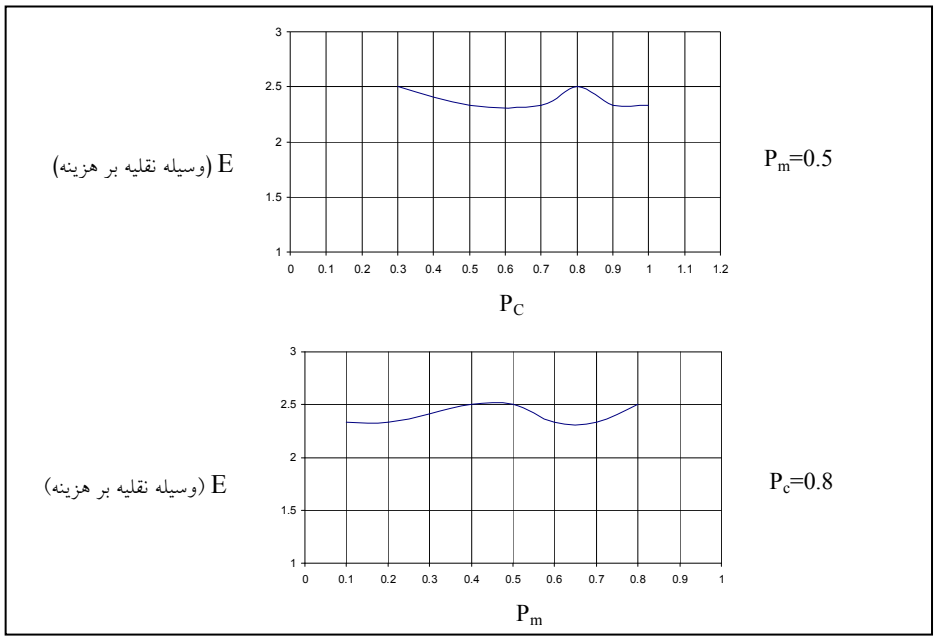
پارامترهای کنترلی الگوریتم ژنتیک، در رسیدن به جواب بهینه و سرعت همگرایی بسیار مهم می‌باشد. از مهم‌ترین این پارامترها، احتمال ترکیب Pc و احتمال جهش Pm می‌باشد.

نتایج به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک برای شاخص کارایی، نشان‌دهنده بیشترین میزان افزایش در مقدار کارایی برای مقادیر پارامترهای کنترلی pc =۰/۸، pm = ۵/۰ می‌باشد. نمودارهای زیر، حساسیت تابع هدف (شاخص کارایی E) را نسبت به جمعیت ٦ و ۸ تایی که بیشترین میزان همگرایی را با پارامترهای کنترلی فوق دارند، نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای pc و pm برای جمعیت ۸ تایی همگرایی بهتری را نشان می‌دهند؛ بنابراین، مسئله با مقادیر پارامترهای کنترلی pc =۰/۸، pm = ۵/۰ و جمعیت برابر با ۸، حل می‌شود. در شکل ٤ و ۵ شبکه بهینه و نمودار همگرایی به‌دست آمده از اجرای برنامه، نشان داده شده است.

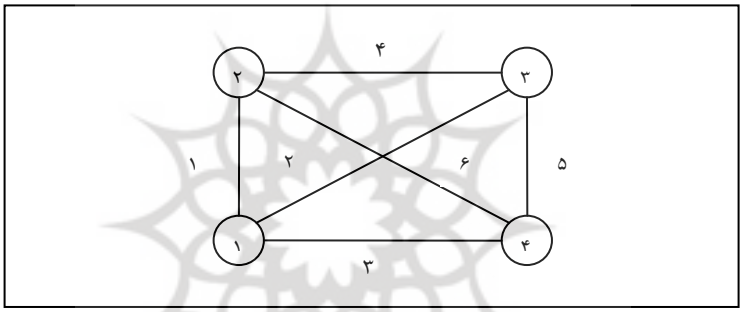
روش پیشنهادی با انتخاب جمعیت ۸ تایی، پس از ۳ نسل، حداکثر کارایی را برای یک شبکه کامل و با مقدار کارایی ۲/۵ وسیله نقلیه بر هزینه به‌دست می‌دهد.



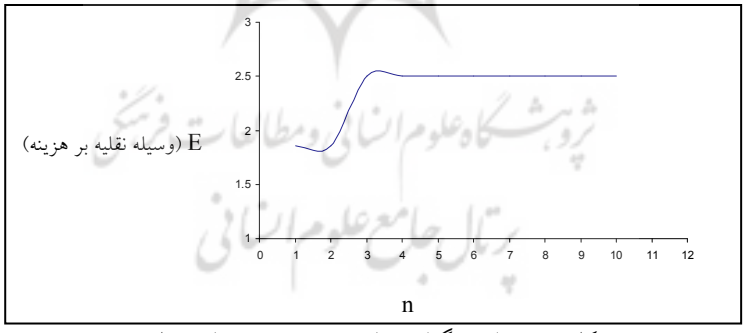
شکل ۲. نمودارهای $E\text{-}p_c$ و $E\text{-}p_m$ برای جمعیت ٦ تایی



شکل ۳. نمودارهای $E-p_c$ و $E-p_m$ برای جمعیت ۸ تایی



شکل ٤. شکل شبکه بهینه



شکل ۵. نمودار همگرایی شاخص نسبت به شماره نسل

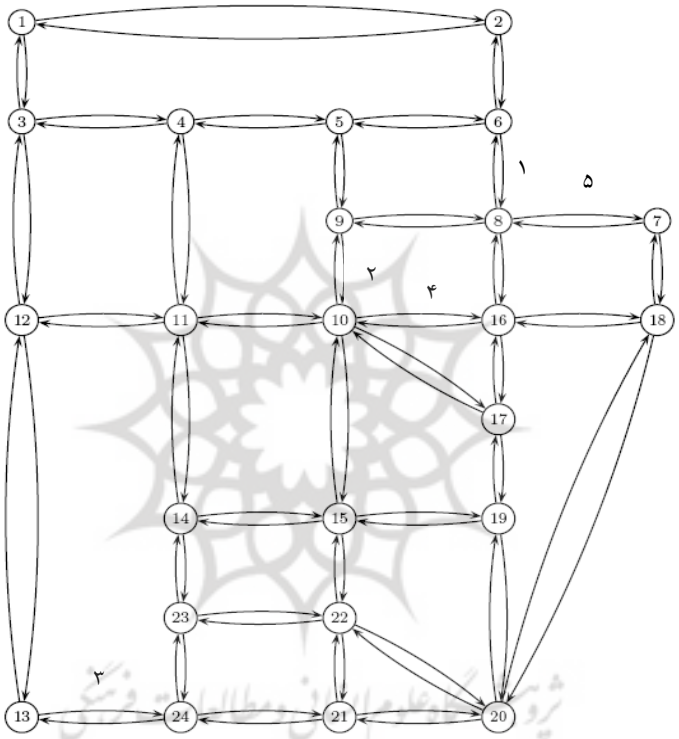
٦- توسعه شبکه پایدار برای یک شبکه نمونه برای شاخص‌های مختلف

در این بخش، مسئله طراحی شبکه برای مورد شهر سایوکس فالز واقع در ایالت داکوتای جنوبی در کشور آمریکا معرفی و سپس الگوریتم مورد نظر برای حل مسئله ارایه و نتایج ناشی از به‌کارگیری الگوریتم روی این شهر بررسی می‌شود. علت انتخاب شبکه این شهر، استفاده مکرر از شبکه شهر سایوکس فالز در مقالات و مطالعات مختلف و وجود تجربه‌های روش‌های مختلف روی آن است که مقایسه کار صورت گرفته در این

مطالعه با دیگر مطالعات را ساده‌تر می‌کند (LeBlanc. L. J., 1975; Meng, Q. et al., 2001; Hearn, D. W. et al., 2005; Poorzahedi. H. and Abulghasemi. (F. 2005; Duthie. J. and Travis W. S., 2007 و (محمدزاده روحانی، امید، ۱۳۸۳).

این شبکه دارای ۲٤ گره و ۷٦ کمان است. کمان‌ها در شبکه به صورت دو کمان جهت‌دار، نماینده خیابان‌های دو طرفه هستند. ۵ زوج کمان به عنوان کاندید برای افزایش ظرفیت کمان مد نظر است که از میان آنها با توجه به محدودیت بودجه مورد نظر (۳/۰۰۰/۰۰۰ دلار)، یک ترکیب انتخاب می‌شود.

توابع زمان سفر برای کمان i به‌صورت $t_i(x_i)$ نشان داده شده‌اند که شکل کلی آنها به‌صورت $t_i(x_i) = a_i + b_i x_i^4$ است که a_i و b_i پارامترهای ثابت برای کمان i و xi حجم ترافیک در کمان i هستند. شبکه شهر سایوکس فالز و شماره پروژه‌های کاندید، در شکل ٦ نشان داده شده است. مشخصات شبکه شامل ماتریس گراف شبکه، ماتریس تقاضای سفر بین هر زوج مبدأ- مقصد و پارامترهای زمان سفر کمان‌ها، همانند مسئله لبلانک (LeBlanc. L. J., 1975) می‌باشد. هزینه توسعه و احتمال پایداری برای ۵ زوج کمان کاندید در جدول ٤ آمده است.



شکل ٦. شبکه شهر سایوکس فالز

جدول ٤. هزینه و تغییر پارامتر کمان‌های کاندید

کمان‌ها	احتمال پایداری (p_a)	هزینه (دلار)	شماره پروژه
(٨,٦) و (٦,٨)	۰/۲۵	٦۵۰/۰۰۰	۱
(۱۰,۹) و (۹,۱۰)	۰/۳	٦۲۵/۰۰۰	۲
(۲٤,۱۳) و (۱۳,۲٤)	۰/۲۵	۸۵۰/۰۰۰	۳
(۱٦,۱۰) و (۱۰,۱٦)	۰/۲۵	۱/۲۰۰/۰۰۰	٤
(۸,۷) و (۷,۸)	۰/۳	۱/۰۰۰/۰۰۰	۵

٦-١- تشریح حل مسئله

شبکه شهر سایوکس فالز توسط لبلانک برای افزودن زوج کمان‌های نشان داده شده، به‌طوری که زمان سفر کل در شبکه حداقل شود، با استفاده از روش شاخه و کرانه طراحی شده است. در این بخش ابتدا مسئله لبلانک با استفاده از روش ارایه شده در این پژوهش طراحی شده و نتایج آن با روش لبلانک مقایسه می‌گردد و سپس شبکه فوق مجدداً با شاخص‌های دیگر معرفی شده، طراحی می‌گردد و نتایج برای شاخص‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ٥ گزینه برای افزایش ظرفیت کمان موجود می‌باشد، به تعداد ٣٢ (2^5) ترکیب وجود خواهد داشت. بنابراین، نحوه نمایش ترکیب‌های فوق در الگوریتم به‌کار رفته، به‌صورت یک رشته ٥ بیتی می‌باشد که عدد هر بیت بر حسب اینکه ظرفیت زوج کمان افزایش می‌یابد یا نه، بین ٠ و ١ تغییر می‌کند و بیت اول تا پنجم مربوط به زوج کمان‌های ١ الی ٥ می‌باشد. نمونه‌ای از ترکیب پروژه‌ها به شکل یک رشته ٥ بیتی در جدول ٥ نشان داده شده است.

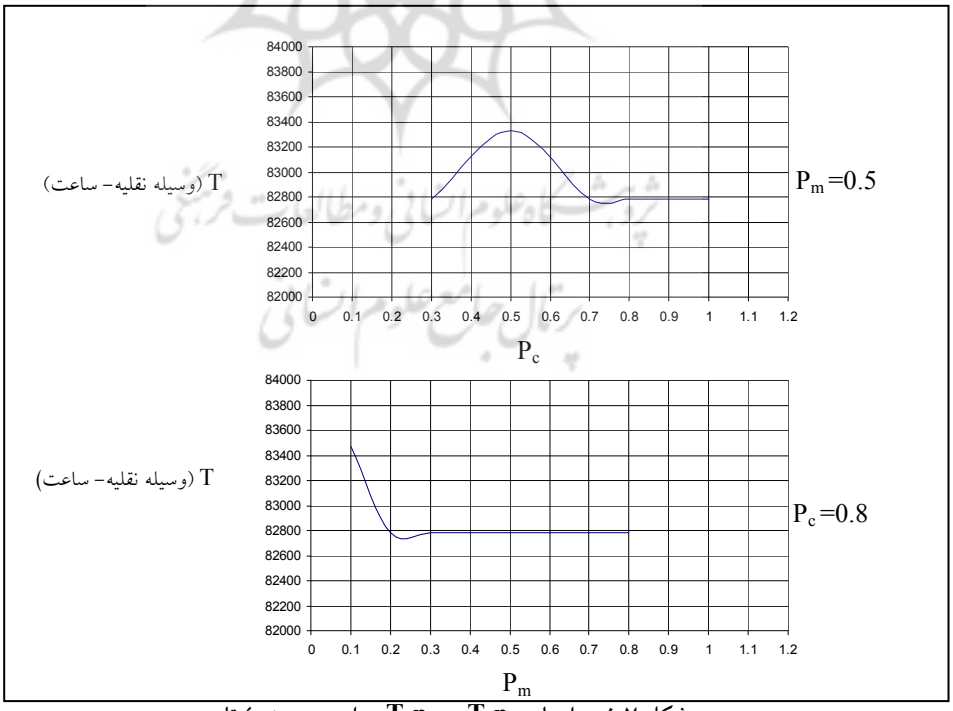
جدول ٥ نشان‌دهنده افزایش ظرفیت زوج کمان‌های ١ و ٤ و ٥ در شبکه می‌باشد.

٦-٢- طراحی شبکه برای شاخص زمان سفر (مسئله لبلانک)

نتایج به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک برای شاخص زمان سفر، نشان‌دهنده بیشترین میزان کاهش در مقدار زمان سفر برای مقادیر پارامترهای کنترلی pc =٠/٨ ، pm =٠/٥ و جمعیت ٤ تایی می‌باشد.

جدول ٥. نمونه‌ای از ترکیب پروژه‌ها برای ٥ گزینه کاندید

شماره پروژه	اجزای انتخابی
١	١
٢	٠
٣	٠
٤	١
٥	١



شکل ٧. نمودارهای $T\text{-}p_c$ و $T\text{-}p_m$ برای جمعیت ٤ تایی

همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای p_c و p_m همگرایی خوبی را نشان می‌دهند، بنابراین، مسئله با مقادیر پارامترهای کنترلی p_c =۰/۸، p_m =۰/۳ و ٤ = جمعیت حل می‌گردد.

با استفاده از روش پیشنهادی، با انتخاب جمعیت ٤ تایی و بعد از ۲ نسل، ترکیب پروژه‌های به‌دست آمده از حل مسئله به‌صورت جدول ٦ می‌باشد.

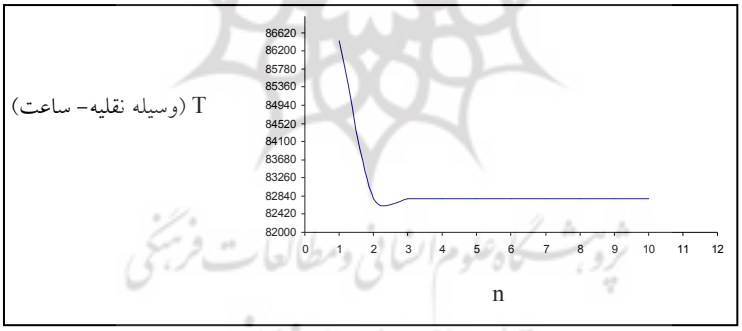
این جدول، نشان‌دهنده افزایش ظرفیت زوج کمان‌های ۱ و ۳ و ٤ در مسئله لبلانک می‌باشد.

در شکل ۸، نمودار همگرایی به‌دست آمده از اجرای برنامه نشان داده شده است. روش پیشنهادی با انتخاب جمعیت ٤ تایی، پس از ۲ نسل، شبکه بهینه را با افزودن ظرفیت زوج کمان‌های ۱ و ۳ و ٤ به‌دست می‌آورد که مقدار زمان سفر کل در شبکه برای این ترکیب، ۸۲۷۸۰ وسیله نقلیه – ساعت و هزینه ساخت آن ۲/۷۰۰/۰۰۰ دلار می‌باشد.

ترکیب پروژه‌های به‌دست آمده توسط برنامه، به طور دقیق مطابق با ترکیب پیشنهادی لبلانک می‌باشد. زمان سفر کل در مدل پیشنهادی ۸۲۷۸۰ وسیله نقلیه – ساعت و در حل لبلانک ۸۳۷۰۰ وسیله نقلیه– ساعت می‌باشد که تطابق نسبی مشاهده می‌شود و تفاوت اندک مشاهده شده مربوط به تفاوت روش تخصیص می‌باشد. این مقایسه در جدول ۷ آمده است.

جدول ٦. ترکیب پروژه‌ها برای مسئله لبلانک

شماره پروژه	اجزای انتخابی
۱	۱
۲	۰
۳	۱
٤	۱
٥	۰



شکل ۸. نمودار همگرایی شاخص زمان سفر نسبت به شماره نسل برای محدودیت بودجه مورد نظر

جدول ۷. مقایسه روش پیشنهادی و روش لبلانک

روش‌ها	روش پیشنهادی					روش لبلانک				
ترکیب پروژه‌های پیشنهادی	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰
زمان سفر کل در شبکه (وسیله نقلیه– ساعت)	۸۲۷۸۰					۸۳۷۰۰				
هزینه ساخت (دلار)	۲/۷۰۰/۰۰۰					۲/۷۰۰/۰۰۰				

٦-٣- تأثیر شاخص‌های مختلف در نتایج

با انتخاب شاخص کارایی(E)، شبکه بهینه با انتخاب جمعیت ٥ تایی، پس از ٣ نسل، با افزودن ظرفیت زوج کمان‌های ٢ و ٤ و ٥ و با مقدار کارایی ٤٨٥٦ وسیله نقلیه بر ساعت به‌دست می‌آید.

ترکیب پروژه‌های به‌دست آمده از حل مسئله به‌صورت جدول ٨ می‌باشد. در شکل ٩، نمودار همگرایی به‌دست آمده از اجرای برنامه نشان داده شده است. با انتخاب شاخص پایداری (A)، شبکه بهینه با انتخاب جمعیت ٤ تایی، پس از ٣ نسل، با افزودن ظرفیت زوج کمان‌های ١ و ٢ و ٥ و با مقدار پایداری ٥٦/٦٥ به‌دست می‌آید. ترکیب پروژه‌های به‌دست آمده از حل مسئله به‌صورت جدول ٩ می‌باشد. در شکل ١٠ نمودار همگرایی به‌دست آمده از اجرای برنامه نشان داده شده است.

خلاصه نتایج تأثیر شاخص‌های مختلف در طراحی شبکه بهینه و مقادیر آن در جدول ١٠ و ١١ آمده است.

در شکل ١١، نمودار تغییرات شاخص‌ها بر حسب افزایش هزینه ساخت نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر زمان سفر، کارایی و پایداری شبکه به‌دست آمده از طریق شاخص‌های کارایی و پایداری بسیار شبیه یکدیگر می‌باشد و با شبکه به‌دست آمده از طریق شاخص زمان سفر، تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند. نمودار شکل ١١ نشان می‌دهد که با افزایش هزینه ساخت، مقادیر شاخص‌ها نوسان دارند و این موضوع، اهمیت تصمیم‌گیری درست در مورد انتخاب مناسب هزینه سرمایه‌گذاری و انتخاب کمان‌های مناسب برای ساخت را نشان می‌دهد.

جدول ٨. ترکیب پروژه‌ها برای شاخص کارایی (E)

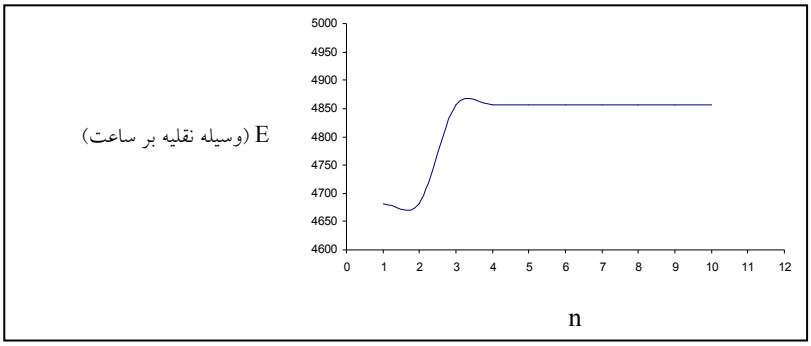
شماره پروژه	اجزای انتخابی
١	١
٢	٠
٣	١
٤	١
٥	٠

جدول ٩. ترکیب پروژه‌ها برای شاخص پایداری (A)

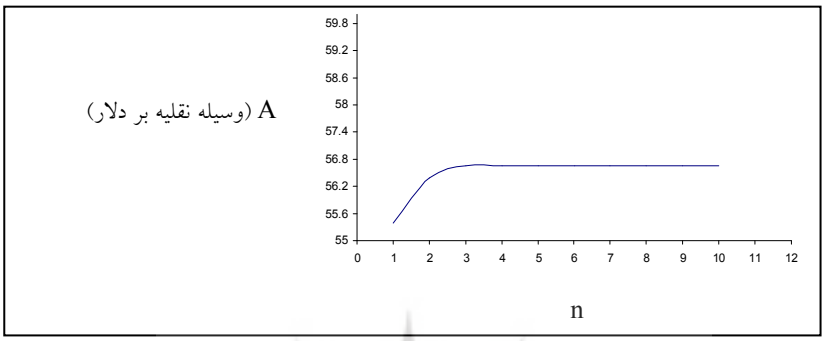
شماره پروژه	اجزای انتخابی
١	١
٢	٠
٣	١
٤	١
٥	٠

جدول ١٠. مقایسه تأثیر شاخص‌های مختلف در نتایج طراحی شبکه

شاخص	ترکیب پروژه‌ها				
شاخص زمان سفر (T)	١	٠	١	١	٠
شاخص کارایی (E)	٠	١	٠	١	١
شاخص پایداری (A)	١	١	٠	٠	١



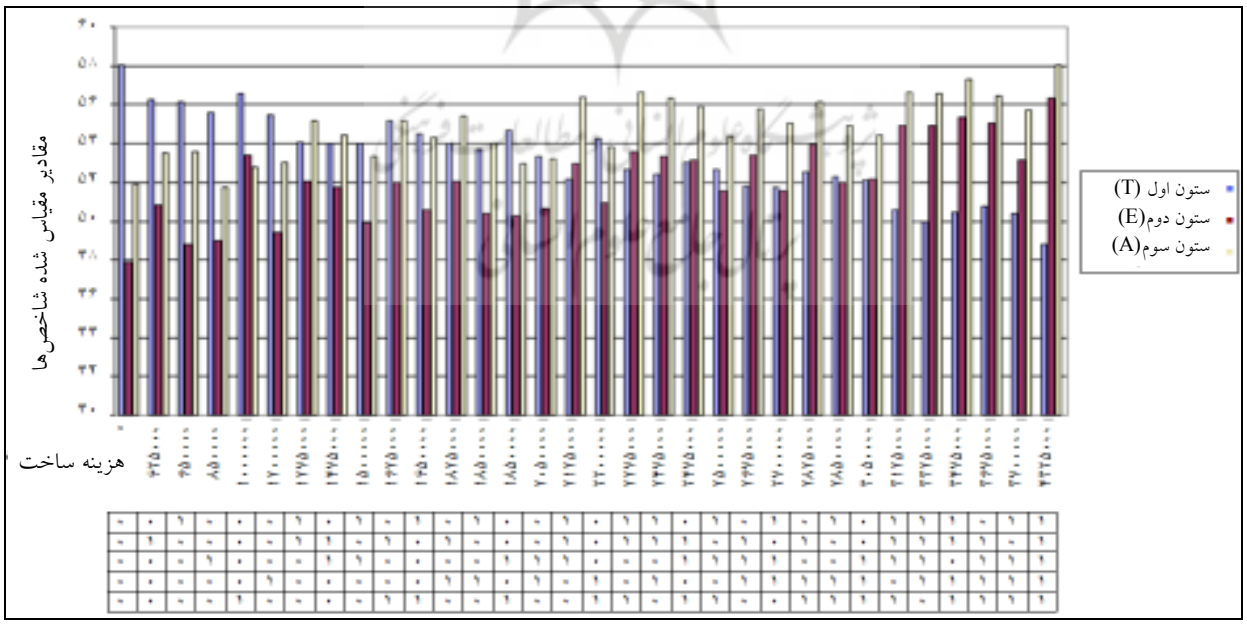
شکل ۹. نمودار همگرایی شاخص کارایی نسبت به شماره نسل برای محدودیت بودجه مورد نظر



شکل۱۰. نمودار همگرایی شاخص پایداری نسبت به شماره نسل برای محدودیت بودجه مورد نظر

جدول ۱۱. مقایسه مقادیر شاخص‌های مختلف در ترکیب‌های مختلف طراحی شبکه

شاخص پایداری (A)	شاخص کارایی (E)	شاخص زمان سفر (T)	ترکیب پروژه‌ها				
۵۵/۰۳	٤٦٣٩	۸۲۷۸۰	۰	۱	۱	۰	۱
٥٦/١٧	٤٨٥٦	۸٤١٠٤	۱	۱	۰	۱	۰
٥٦/٦٥	٤٨٢٢	۸٤٢٤٥	۱	۰	۰	۱	۱



شکل ۱۱. نمودار تغییرات مقادیر شاخص‌ها بر حسب هزینه ساخت

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک متدولوژی برای طراحی توپولوژی شبکه پایدار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارایه شده است. روش پیشنهادی برای یک شبکه نمونه کوچک با ٦ کمان و ٤ گره، حل شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که چنان‌چه از اهمیت کمان‌ها در شبکه و مقدار تأثیر آنها بر پایداری شبکه اطلاعات درستی در دست نباشد، ممکن است با ساخت کمان‌های نامناسب، هم هزینه‌های زیادی صرف شود و هم نتیجه مورد نظر در ساخت کمان مربوطه به دست نیاید. در مورد شبکه‌های موجود نیز، داشتن الگوی شبکه پایدار، می‌تواند در توسعه شبکه مفید واقع شود.

همین‌طور شاخص‌های مختلف عملکرد شبکه در توسعه شبکه مورد استفاده قرار گرفته است که روش پیشنهادی برای شبکه شهر سایوکس فالز با ٧٦ کمان و ٢٤ گره حل شده و نتایج آن، نشان‌دهنده ترکیب‌های متفاوتی از پروژه‌ها برای شاخص‌های مختلف است و شبکه‌های به‌دست آمده از طریق شاخص‌های کارایی و پایداری، دارای مقادیر شاخص‌های نزدیک به یکدیگر می‌باشد که با شبکه به‌دست آمده با شاخص زمان سفر تفاوت بسیاری دارند. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان به جای انتخاب ترکیب‌هایی از اجزای شبکه که صرفاً یک شاخص خاص را بهینه می‌کند و اهمیت شاخص‌های دیگر را در نظر نمی‌گیرد، ترکیب‌هایی از اجزا را برای ساخت، انتخاب کرد که دارای مقادیر قابل قبولی برای تمام شاخص‌ها باشند.

این پژوهش تنها گام کوچکی در جهت توسعه و طراحی شبکه‌های پایدار حمل و نقل می‌باشد. بنابراین، برای پر کردن خلاء موجود، برای مطالعات آینده می‌توان به موارد استفاده از تئوری گراف‌ها در طراحی ساختار شبکه‌های پایدار حمل و نقل، استفاده از روش‌های ارایه شده در طراحی شبکه‌های حمل و نقل عمومی، استفاده از تقاضای متغیر به جای تقاضای ثابت برای واقعی‌تر کردن مسئله طراحی، استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری موجود و ترکیب آنها و پیشنهاد مؤثرترین الگوریتم در حل مسئله، استفاده از شاخص‌های جدید و پیشنهاد مؤثرترین شاخص‌ها در طراحی شبکه‌های حمل و نقل، اشاره کرد.

۸- مراجع

- محمدزاده روحانی، امید (۱۳۸۳) "یک دستور فرا یابنده (متاهیوریستیک) ترکیبی برای حل مسئله طراحی شبکه"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- Billheimer, J. W., Gray, P., (1973) "Network design with fixed and variable cost elements", Transportation Science (7), pp. 49-74.
- Cantarella, G. E., Vitetta, A., (1994) "A multicriteria analysis for urban network design and parking location ", Preprints of conference Tristan II .Capri, Italy, pp. 945-955.
- Cantarella, G. E.; G. Pavone; and A. Vitetta (2002), "Heuristics for the Network Design Problem", EWGT 2002, Bari, Italy.
- Cantarella, G. E.; G. Pavone; and A. Vitetta (2006) "Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal setting ", European Journal of Operational Research, pp.1682-1695.
- Chen, M., Alfa, A S., (1991) "A network design algorithm using a stochastic incremental traffic assignment approach", Transportation Science 25 (3), pp. 215-224.
- Darren M. Scott, David C. Novak, Lisa Aultman-Hall, Feng Guo, (2006) "Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks", Journal of Transport Geography 14, pp. 215-227.
- Drezner, Z.; G. O. Wesolowsky (2003) "Network Design: Selection and Design of Links and Facility Location", Transportation Research, Part A, Vol. 37, pp. 241-256.
- Duthie, J. and Travis Waller S., (2007) "Incorporating Environmental Justice Measures into Equilibrium-based Transportation Network Design Models", Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- Freisz, T. L.; G. Anandalingam; N. J. Mehta; K. Nam; S. Shah; R. L. Tobin (1993) "The Multi Objective Equilibrium Network Design Problem Revisited: A Simulated Annealing Approach",

- Nagurney, A. and Qiang, Q. (2007) "A Transportation Network Efficiency Measure that Captures Flows, Behavior and Costs with Applications to Network Component Importance Identification and Vulnerability", Massachusetts Univ., Proceedings of the POMS 18th Annual Conference, Dallas, Texas, U.S.A.
- Poorzahedy H., Abulghasemi F., (2005) "Application of Ant System to network design problem", Transportation Vol. 32, pp. 251-273.
- Quandt, R. E. (1969) "Models of Transportation and Optimal Network Construction", Journal of Regional Science, Vol. 2, No. 1.
- Sheffi, Y. (1985) "Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods", Englewood Cliffs. NY, USA: Prentice-Hall.

European Journal of Operational Research, Vol. 65, No. 1, pp. 44-57.

- Hearn, D. W., Yidirim, M. B., Ramana, M. V., Bai, L. H., (2001) "Computational methods for congestion toll pricing models", Proceedings of Intelligent Transportation Systems, pp. 257-262.
- Le Blanc. L. J. (1975) "An Algorithm for Discrete Network Design Problem", Transportation Science, Vol. 9, pp. 183-199.
- Meng, Q., Yang H., Bell, M.G.H., (2001) "An Equivalent Continuously Differentiable Model and a Locally Convergent Algorithm for the Continuous Network Design Problem", Transportation Research, Part B, Vol. 35, pp. 81-105.
- Moskos, K. (1992) "A Taboo Search Based Approach for Network Design", Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, Texas, USA.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی