

# ارائه مدل طراحی شبکه با تقاضای الاستیک با استفاده از الگوریتم SA

شهریار افندی زاده، دانشیار، دانشگاه علم و صنعت

مریم ابراهیمی<sup>\*</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت

نوید کلانتری، دانشجوی دکترای حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت

\*maryam.ebrahimi@gmail.com

تاریخ پذیرش: آبان ۹۱

تاریخ دریافت مقاله: آذر ۹۰

## چکیده

یکی از روش‌هایی که متخصصان حمل و نقل برای کاهش تراکم ترافیکی استفاده می‌نمایند، افزایش ظرفیت شبکه است که به دو صورت افزودن کمان‌های جدید به شبکه و یا بهبود کمان‌های حاضر در شبکه انجام می‌شود. هدف این مطالعه ارائه مدلی جدید برای حل مسئله طراحی شبکه پیوسته با در نظر گرفتن تقاضای انعطاف‌پذیر است. این مسأله که با عنوان مسئله CNDP شناخته می‌شود، در این مطالعه در قالب مدلی به صورت یک مسأله دو سطحی ارائه شده که مسأله سطح بالا بیشینه کردن مازاد منافع مصرف‌کننده<sup>۱</sup> و مسأله سطح پایین، مسأله تخصیص ترافیک با تقاضای انعطاف‌پذیر است. برای حل این مدل از الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه‌سازی<sup>۲</sup> شده استفاده شده است. مدل ارائه شده در این مطالعه برای دو شبکه فرضی حل شده و نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. همچنین با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای الگوریتم SA، مقدار بهینه پارامترها معرفی خواهند شد. در این مطالعه بر روی میزان بودجه نیز تحلیل حساسیت انجام شده است و در نهایت چگونگی تغییرات مقدار مازاد منافع مصرف‌کننده نسبت به تغییرات بودجه گزارش شده است.

**کلیدواژه:** طراحی شبکه پیوسته، مازاد منافع مصرف‌کننده، الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده، تخصیص ترافیک.

## ۱ - مقدمه

کار بردند [۳]. با استفاده از این توابع، منگ و همکاران برنامه دو سطحی CNDP را به مسأله بهینه‌سازی پیوسته مشتق‌پذیر تک سطحی تبدیل کردند [۴]. چپو در مقاله خود ۴ روش مختلف بر پایه گرادیان ارائه کرد تا به طور عمومی CNDP را حل کند [۵]. وی نشان داد که نقاط کوهن-تاکر در مسأله CNDP را میتوان به طور مؤثری از کاربرد روش‌های برپایه گرادیان<sup>۶</sup> در جستجوی محلی به دست آورد. در یکی از جدیدترین تحقیقات انجام شده در این زمینه زو و همکارانش [۷] کاربرد دو الگوریتم SA و ژنتیک را در حل مسئله CNDP با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

در مسئله طراحی شبکه اگر افزایش عرضه و یا همان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه بدون در نظر گرفتن تغییرات ایجاد شده بر میزان تقاضا انجام شود، ممکن است باعث اتلاف هزینه‌های زیادی گردد بدون آن که تصمیم‌گیران شهری را به هدف مورد نظرشان نزدیک نماید. به طور کلی میتوان به مسئله طراحی شبکه به عنوان سیاستی جهت مدیریت تقاضای سفر توجه نمود. به طور مثال با اجرای سیاست طراحی شبکه می‌توان تقاضای سفر را از مسیری به مسیر دیگر منحرف و تراکم ترافیک را از نواحی شلوغ مورد نظر دور نمود.

با توجه به اجتناب‌ناپذیر بودن تأثیر عرضه بر تقاضا و این که تا کنون برای حل مسئله CNDP با تقاضای الاستیک از الگوریتم SA استفاده نشده است، در این مطالعه، مدلی جدید برای مسأله CNDP معرفی خواهد شد که با استفاده از آن بتوان مسأله CNDP را با تقاضای الاستیک مورد بررسی قرار داد.

مسأله طراحی شبکه از مسائل مهم مهندسی حمل و نقل است که سعی در بهبود یا توسعه و گسترش شبکه حمل و نقل با اضافه کردن کمان جدید به شبکه یا بهبود کمان‌های موجود، تحت یک سری از محدودیت‌های موجود و منابع در دسترس دارد. به طور کلی مسأله طراحی شبکه<sup>۳</sup> به اصلاح زیرساخت‌های حمل و نقلی با اضافه کردن کمان‌های جدید یا بهبود کمان‌های موجود می‌پردازد. چگونگی تعیین مکان و محل این کمان‌های جدید و نحوه افزایش ظرفیت کمان‌های موجود، از مسائل مشکلی است که سعی می‌کند تا هزینه کل سیستم را تحت بودجه‌ای محدود، کمینه نماید و یا منافع عمومی را تحت همین محدودیت بیشینه نماید، در حالی که رفتار انتخاب مسیر توسط استفاده‌کنندگان شبکه در نظر گرفته شده باشد. مسأله طراحی شبکه پیوسته<sup>۴</sup> که افزایش ظرفیت بهینه برای زیرمجموعه‌ای از کمان‌های موجود را تعیین می‌کند، یکی از مسائل بسیار مشکل در مهندسی حمل و نقل است و تعیین جواب بهینه سراسری<sup>۵</sup> در این مسائل از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]، عبدالله و لبلانک از اولین محققانی بودند که الگوریتم هوک و جیوز<sup>۶</sup> را برای حل CNDP پیشنهاد کردند [۲]. چن و فلورین توابع حاشیه‌ای را که به وسیله مقدار بهینه تابع مسأله تعادلی سطح پایین تعریف می‌شود، به

- 1- Consumer Surplus
- 2- Simulated Annealing (SA)
- 3- Network Design Problem (NDP)
- 4- Continuous Network Design Problem (CNDP)
- 5- Global
- 6- Hook & Jeeves

۶- توصیفات جزئی این الگوریتم‌های بر پایه گرادیان در کتاب بازار و همکاران آمده است [۶].

## ۲- فرمول بندی مسئله

در این مطالعه، یک مدل دو سطحی برای تعیین میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه معرفی خواهد شد که مسأله سطح بالا مازاد منافع استفاده‌کنندگان را بیشینه می‌نماید و مسئله سطح پایین یک مسأله تخصیص ترافیک با تقاضای انعطاف‌پذیر است [۸]. مدل مورد نظر به صورت روابط (۱) تا (۷) است.

مسأله سطح بالا:

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

$$s.t \quad 0 \leq e_a \leq e_a^{\max}, a \in A' \quad (2)$$

$$\sum_{a \in A'} e_a \cdot c_a \leq \alpha \left( \sum_{a \in A'} c_a \cdot e_a^{\max} \right) \quad (3)$$

مسأله سطح پایین:

$$\min_{d,v} \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(\omega, e_a) d\omega - \sum_{w \in W} \int_0^{d_w(e)} D_w^{-1}(\omega) d\omega \quad (4)$$

$$s.t \quad \sum_{r \in R_w} f_r^w = d_w, w \in W \quad (5)$$

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} f_r^w \delta_{ar}^w, a \in A \quad (6)$$

$$f_r^w \geq 0, r \in R_w, w \in W \quad (7)$$

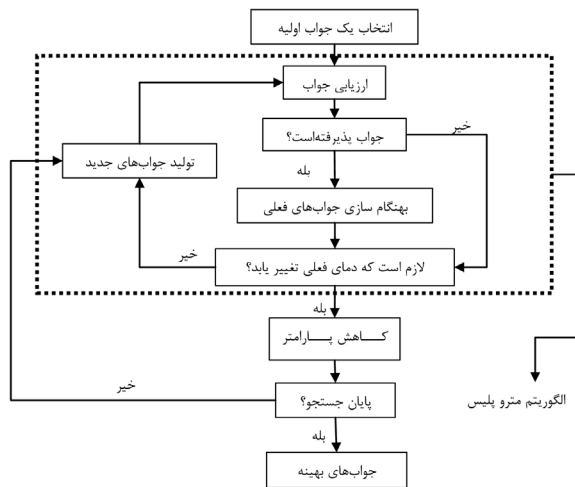
شبکه‌ای را فرض کنید که در آن، تعداد گره‌ها و  $A$  مجموعه‌ی تمامی کمان‌های شبکه است،  $CS$  نشان دهنده مازاد منافع استفاده‌کننده بر حسب وسیله نقلیه در دقیقه است.  $e$  مقدار افزایش ظرفیت هر کمان است،  $W$  نشان دهنده مجموعه‌ی تمامی مبدأ-مقصد‌های شبکه است و  $d_w$  مقدار تقاضا بین مبدأ و مقصد  $w$  است.  $D_w^{-1}$  معکوس تابع تقاضا است که برابر با هزینه سفر یا زمان سفر (دقیقه) بین هر مبدأ و مقصد  $w$  می‌باشد؛  $e_{\max}$  حد بالا برای مقدار افزایش ظرفیت روی هر کمان و مجموعه کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت است.  $c_a$  ظرفیت کمان  $a$  است.  $v_a$  نشان دهنده‌ی جریان روی کمان  $a \in A$  و  $t_a(v_a)$  تابع زمان سفر روی کمان  $a \in A$  است که بر حسب جریان روی هر کمان یا همان  $v_a$  است.  $f_r^w$  جریان روی مسیر  $r$  بین مبدأ-مقصد  $w$  را نشان می‌دهد و  $R_w$  مجموعه‌ی تمامی مسیرهایی است که هر جفت مبدأ-مقصد  $w \in W$  را به یکدیگر متصل می‌نمایند.  $\delta_{ar}^w$  پارامتر وقوع کمان است و در صورتی که برابر با یک باشد نشان دهنده‌ی این است که کمان  $a$  در مسیر  $r$  بین مبدأ-مقصد  $w$  قرار دارد، در غیر این صورت آن را با صفر نشان می‌دهند.

در مدل معرفی شده رابطه (۲)، محدودیتی است که بازه مجاز را برای جواب‌های مورد نظر مشخص می‌نمایند ولی رابطه (۳) محدودیتی است که مقدار افزایش ظرفیت را در شبکه کنترل می‌نماید، این محدودیت بیانگر این مطلب است که بوجه در اختیار برای افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه، فقط به اندازه  $\alpha$  برابر هزینه‌ای است که بتوان با استفاده از آن تمامی کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت را، بهبود بخشید [۹].

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

الگوریتم SA در شکل ابتدایی خود بر پایه شباهت بین نورد جامدات و حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی شکل گرفته است. روند کلی الگوریتم SA برای حل مدل ارائه شده، بدین صورت است [۹]:  
۱- انتخاب یک جواب اولیه (جواب اولیه انتخابی می‌تواند آرایه‌ای با اعضای صفر باشد).

۲- انتخاب شمارنده‌ای جهت کاهش پارامتر کنترلی  $k=0$ ، در شکل (۱) نشان داده شده که الگوریتم SA از دو حلقه درونی تشکیل شده است. شمارنده  $k$  در واقع نشان‌دهنده کل تکرارهای کلی انجام شده الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه است.



شکل (۱) فلوچارت الگوریتم SA در این مطالعه

۳- انتخاب روندی جهت کاهش پارامتر کنترلی  $t_k$  پارامتر کنترلی در تکرار  $k$  می‌باشد).

۴- انتخاب یک پارامتر کنترلی اولیه و یک پارامتر کنترلی پایانی.

۵- انتخاب تعداد تکرارها در هر پارامتر کنترلی  $M_k$ ، به تعداد تکرار حلقه درونی در شکل (۱) باید انجام شود (اصطلاحاً به این حلقه الگوریتم متروپلیس [۱۰] گفته می‌شود) و در هر بار اجرای این حلقه، مسأله سطح پایین و یا همان مسأله تخصیص ترافیک با تقاضای الاستیک، باید حل شود.

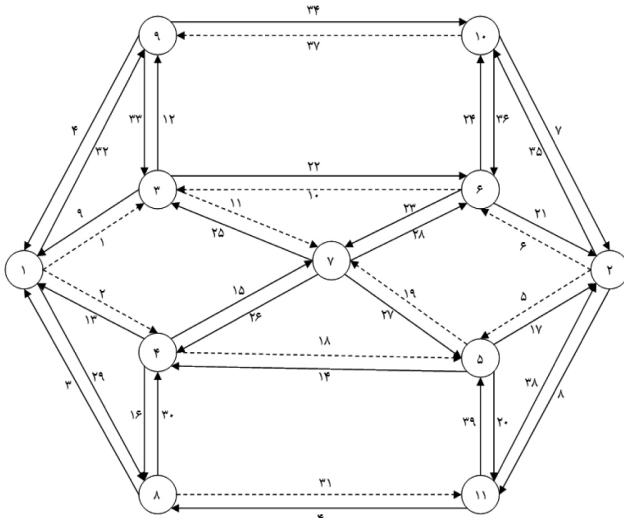
تکرار مراحل زیر تا زمانی که پارامتر کنترلی به پارامتر کنترلی پایانی برسد.

$$۱-۶ \quad m=0 \text{ قرار دهید}$$

$$۲-۶ \quad m=M_k \text{ تکرار کنید تا}$$

۱-۲-۶ - یک جواب جدید تولید کنید (جواب همسایه)، چگونگی انتخاب جواب همسایه در صحت عملکرد الگوریتم بسیار مؤثر است. جواب همسایه با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است. اگر فرض شود که تمامی کمان‌های افزایش ظرفیت، برداری را تشکیل دهند به نام  $e, e_i$ ، یکی از اعضای بردار مورد نظر  $r$  و عددی تصادفی بین صفر و یک است.

در شبکه کوچکتر و یا همان شبکه ۱، به دلیل کم بودن تعداد کمان‌های شبکه، تمامی کمان‌های شبکه کاندید افزایش ظرفیت هستند و در شبکه بزرگتر و یا شبکه ۲، ۱۰ کمان از میان کمان‌های شبکه، کاندید افزایش ظرفیت شده‌اند که عبارتند از ۱، ۲، ۵، ۶، ۱۰، ۱۱، ۱۸، ۱۹، ۳۱ و ۳۷.



شکل (۳) شبکه ۴۰ کمانی (شبکه ۲)

جدول (۳) اطلاعات تقاضای شبکه ۲

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

جدول (۲) زمان سفر آزاد روی هر کمان و پتانسیل ظرفیتی هر کمان در شبکه ۱

کمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
$t_a^0$	۱۰	۲۳	۴۲	۱۰	۱۵	۱۰	۲۳	۴۲
$C_a$	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰

$$e_i = e_i + (2.r-1)/10 \quad (۸)$$

۲-۲-۶- تفاوت مقدار تابع هدف را برای جواب قبلی و جواب جدید،  $\Delta$  بنامید.

۳-۲-۶- اگر  $\Delta \leq 0$  جواب جدید جایگزین جواب فعلی می‌شود و اگر  $\Delta > 0$  جواب جدید با احتمال  $\exp(\Delta/t_k)$  جایگزین جواب فعلی خواهد شد.

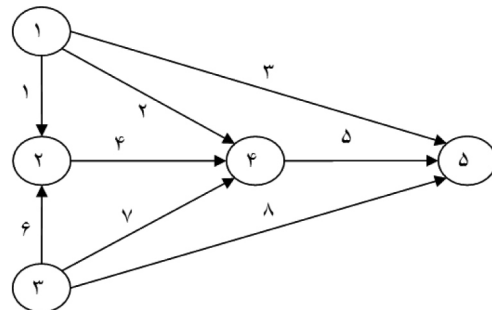
۴-۲-۶- قرار دهید  $1+m=m$

۳-۶- قرار دهید  $1+k=k$

۴-۶- پارامتر کنترلی را کاهش دهید.

#### ۴- مطالعه موردی

در این مطالعه از دو شبکه استفاده شده و سعی شده است شبکه‌های مورد استفاده طوری انتخاب شوند که بتوانند طیف وسیعی از جواب‌های ممکنه را در مسئله طراحی شبکه پوشش دهند.



شکل (۲) شبکه ۸ کمانی (شبکه ۱)

جدول (۱) اطلاعات تقاضای شبکه ۱

مسیر	$D_w^0$
۱ به ۵	۵۵۰۰
۲ به ۵	۲۰۰۰
۳ به ۵	۶۰۰۰
۴ به ۵	۲۰۰۰

جدول (۴) زمان سفر آزاد روی هر کمان و پتانسیل ظرفیتی هر کمان در شبکه ۲

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

یا پیکربندی اولیه، پارامتر کنترلی اولیه و نهایی، تعیین جواب همسایه، چگونگی کاهش پارامتر کنترلی در هر مرحله و ماکزیمم تعداد تکرارهای مجاز. در این مطالعه از جواب اولیه صفر برای هر دو شبکه و رابطه  $T^{k+1} = T^k \cdot \alpha$  برای روند کاهش دما استفاده شده است. به منظور دستیابی به یک جواب بهینه، بر روی ۴ پارامتر الگوریتم SA تحلیل حساسیت شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن دو حالت بیشتر و کمتر نسبت به حالت پایه، برای هر پارامتر، ۳ مقدار تعیین شده است که در جدول (۵) قابل مشاهده است. حالت‌های کمتر و بیشتر بر اساس تعداد تکرارها نام‌گذاری شده‌اند به طور مثال با انتخاب پارامترهای حالت بیشتر، تعداد تکرارهای الگوریتم SA بیشتر از حالت پایه خواهد شد. تحلیل حساسیت انجام شده به دو صورت دو بعدی و سه بعدی است. تحلیل حساسیت دو بعدی بدین صورت است که ابتدا مقادیر پایه ای برای ۴ پارامتر مورد نظر در نظر گرفته می‌شود و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود، سپس با تغییر دادن مقدار یکی از پارامترها و ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها، مجدداً مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. خلاصه نتایج حاصل از این نوع تحلیل در جداول (۶) آورده شده است. علاقه‌مندان می‌توانند جهت بررسی نتایج کامل این پژوهش به مرجع [۹] مراجعه نمایند.

جدول (۵) سه مقدار در نظر گرفته شده برای پارامترهای

#### الگوریتم SA

حالت کمتر (۳)	حالت پایه (۲)	حالت بیشتر (۱)
۲۰	۳۰	۵۰
۰.۸۵	۰.۹	۰.۹۵
۰.۰۰۵	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱
۰.۱	۱	۱۰

جدول (۶) خلاصه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت دو بعدی

تابع هدف $10^4 \times$	$T_s$	T	$\alpha$	M
۱.۹۷۰۴۹۸	۰.۰۰۱	۱	۰.۹	۳۰
۱.۱۶۶.۰۳۳	۰.۰۰۲	۱۰	۰.۹	۵۰

برای هر دو شبکه، تابع زمان سفر برای تمامی کمان‌ها و تابع تقاضای سفر، به ترتیب مطابق رابطه (۹) و (۱۰) است.

$$t = t_a^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{v_a}{c_a(1+e_a)} \right)^\beta \right] \quad (9)$$

$$d_w = \bar{D}_w \exp(-\gamma \mu_w) \quad w \in W \quad (10)$$

در رابطه (۹) و (۱۰)، متوسط زمان سفر برای طی یک کیلومتر از طول کمان  $a$  برحسب دقیقه است،  $t_a^0$  متوسط زمان سفر آزاد برای طی یک کیلومتر از طول کمان  $a$ ،  $x$  حجم جریان ترافیک برحسب وسیله نقلیه هم‌سنگ‌سواری برای یک متر عرض عبور در ساعت،  $C_a$  ظرفیت هر کمان  $\mu_w$  و کمترین زمان سفر بین مبدأ و مقصد  $W$  و بر حسب دقیقه است. در رابطه (۹)،  $\gamma$  پارامتر الاستیسیته است که برای شبکه کوچک از ضریب الاستیسیته ۰.۰۱ و برای شبکه بزرگ تر از ضریب الاستیسیته ۰.۰۲ استفاده شده است. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  در رابطه (۹) به ترتیب ۰.۰۵ و ۴ فرض شده‌اند.

لازم به ذکر است که ضریب  $\alpha$  در رابطه (۳) برابر ۰.۴ در نظر گرفته شده است ولی لازم است برای سیاست‌های مختلف مورد نظر در این مطالعه بر روی ضریب  $\alpha$  تحلیل حساسیت صورت گیرد تا مشخص شود که با چه سطح بودجه‌ای می‌توان به بیشترین مقدار مازاد منافع مصرف‌کننده در شبکه دست یافت و بدین طریق سیاست‌های مختلف قابل اجرا را اولویت‌بندی نمود. همچنین میزان بیشترین افزایش ظرفیت هر کمان،  $e_a^{\max}$ ، در رابطه (۲) برابر ۰.۲ در نظر گرفته شده است که این ۲۰٪ افزایش ظرفیت با استفاده از انواع روش‌های ساماندهی معابر قابل اجرا است.

#### ۵- تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم SA

در الگوریتم SA تعیین برخی پارامترها، می‌تواند به نوعی موفقیت الگوریتم را تضمین نماید [۱۱] که عبارتند از جواب

جدول (۱۱) و (۱۲) تغییرات تابع هدف با سطوح بودجه مختلف برای شبکه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

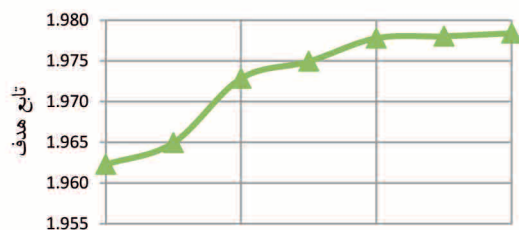
جدول (۱۱) تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه در شبکه ۱

ضریب $\alpha$	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۲	۰.۱
مقدار تابع هدف $\times 10^3$	۱.۹۷۹۶۲	۱.۹۷۹۵۶	۱.۹۷۹۴۰	۱.۹۷۸۱۴	۱.۹۷۷۹۸	۱.۹۷۴۸۸	۱.۹۶۴۴۳

جدول (۱۲) تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه در شبکه ۲

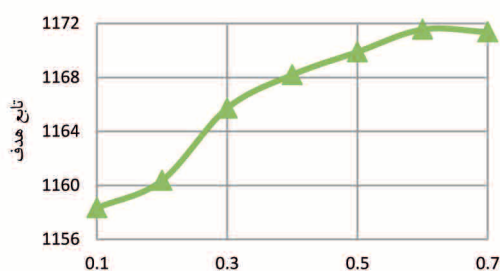
ضریب $\alpha$	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۲	۰.۱
مقدار تابع هدف $\times 10^3$	۱۱۷۳.۴۵	۱۱۷۲.۱۵	۱۱۷۲.۴۴	۱۱۶۹.۳۸	۱۱۶۷.۹۵	۱۱۶۳.۸۵	۱۱۶۲.۸۹

نمودار (۱) تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه در شبکه ۲



تغییرات ضریب بودجه

نمودار (۱) تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه در شبکه ۱



تغییرات ضریب بودجه

در نمودارهای (۱) و (۲) دیده می‌شود که با افزایش میزان بودجه، تغییرات افزایشی در مقدار تابع هدف جزئی‌تر می‌شود. به طور مثال در نمودار (۱) مشاهده می‌شود که در بازه تغییرات ۰.۱ تا ۰.۴ ضریب بودجه، مقدار افزایش تابع هدف کاملاً محسوس است ولی با افزایش ضریب بودجه از ۰.۵ تا ۰.۷، تغییر چندانی در مقدار تابع هدف ایجاد نمی‌شود. این نتایج بیانگر این مطلب هستند که برای به دست آوردن بیشترین مقدار تابع هدف لازم نیست که ظرفیت تمامی کمان‌های کاندید افزایش ظرفیت، ۲۰ درصد افزایش یابد بلکه می‌توان با نصف آن مقدار بودجه، مقدار تابع هدف را به مقداری بسیار نزدیک به بیشترین مقدار ممکن رساند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدلی ارائه شده است که بتوان با استفاده از آن،

روند تحلیل حساسیت سه بعدی انجام شده در این مطالعه، بدین صورت است که با تغییر دو پارامتر  $M$  و  $\alpha$  و ثابت فرض نمودن پارامترهای  $T_s$  و  $T_0$ ، مقدار تابع هدف محاسبه شده و سپس حالت بهینه برای هر شبکه، گزارش می‌شود. مقدار تغییرات پارامترهای مورد نظر در تحلیل حساسیت سه بعدی و مقدار تابع هدف به دست آمده، در جدول (۷) تا (۱۰) آورده شده است.

جدول (۷) تغییرات پارامترها و مقدار تابع هدف در تحلیل

حساسیت سه بعدی در شبکه ۱

ضریب کاهش دما (°C)	تعداد تکرارها در هر دما (M)				
	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
۰.۸۵	۱.۹۶۸۴	۱.۹۶۴۱	۱.۹۵۸۴	۱.۹۶۶۲	۱.۹۶۷۳
۰.۸۷	۱.۹۷۱۹	۱.۹۷۱۲	۱.۹۷۲۵	۱.۹۷۰۳	۱.۹۶۵۳
۰.۹	۱.۹۶۷۱	۱.۹۷۱۸	۱.۹۷۰۵	۱.۹۶۵۳	۱.۹۶۹۹
۰.۹۲	۱.۹۷۳۸	۱.۹۷۴۹	۱.۹۷۳۹	۱.۹۷۳۷	۱.۹۷۰۳
۰.۹۵	۱.۹۷۴۸۸	۱.۹۷۳۵	۱.۹۶۹۹	۱.۹۷۲۷	۱.۹۷۲۱

جدول (۸) میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه ۱

شماره کمان	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
میزان افزایش ظرفیت	۰.۱۸	۰.۱۵	۰.۱۹	۰.۰۱	۰	۰.۰۲	۰.۱۹	۰.۱۸
ظرفیت جدید	۳۵۴۰	۲۳۰۰	۱۱۹۰	۶۰۶۰	۴۰۰۰	۳۰۶۰	۲۳۸۰	۱۱۸۰

جدول (۹) تغییرات پارامترها و مقدار تابع هدف در تحلیل

حساسیت سه بعدی در شبکه ۲

ضریب کاهش دما (°C)	تعداد تکرارها در هر دما (M)				
	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
۰.۸۵	۱۱۵۲.۳۶	۱۱۴۳.۱۲۶	۱۱۳۲.۳۲۶	۱۱۴۹.۳۹۶	۱۱۳۲.۳۰۹
۰.۸۷	۱۱۶۰.۳۳۳	۱۱۵۶.۱۰۹	۱۱۵۱.۷۷۹	۱۱۴۷.۷۵۱	۱۱۴۰.۸۱۴
۰.۹	۱۱۶۶.۰۳۳	۱۱۶۳.۷۵۵	۱۱۶۳.۰۹۱	۱۱۶۲.۹۸۴	۱۱۴۲.۳۶
۰.۹۲	۱۱۶۶.۲۴۵	۱۱۶۳.۳۲۰	۱۱۶۲.۳۴۴	۱۱۵۳.۱۰۷	۱۱۴۴.۳۱۲
۰.۹۵	۱۱۶۸.۱۹۱	۱۱۶۷.۴۲۶	۱۱۶۵.۵۴۱	۱۱۶۳.۰۹۰	۱۱۶۰.۳۱۱

جدول (۱۰) میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه ۲

شماره کمان	۳۷	۳۱	۱۹	۱۸	۱۱	۱۰	۶	۵	۲	۱
میزان افزایش ظرفیت	۰.۰۴	۰.۰۶	۰.۲	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۰۸	۰	۰.۱۶	۰.۱۲	۰
ظرفیت جدید	۴۱۶۰	۴۲۴۰	۲۲۰۰	۳۱۵۰	۲۳۰۰	۲۲۴۰	۳۰۰۰	۳۲۸۰	۲۳۹۰	۳۰۰۰

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت دو بعدی و سه بعدی انجام شده بر روی شبکه کوچک‌تر، می‌توان نتیجه گرفت با اجرای طراحی شبکه پیوسته در این شبکه، بیشترین مقدار تابع هدف برابر  $1.97493 \times 10^4$  وسیله نقلیه در ساعت است که این مقدار نسبت به حالت پایه، ۱۱٪ افزایش داشته است. بر روی شبکه بزرگ‌تر با اجرای طراحی شبکه پیوسته، بیشترین مقدار تابع هدف برابر  $1168,191 \times 10^3$  وسیله نقلیه در ساعت است که این مقدار نسبت به حالت پایه، ۲۴.۶۱٪ افزایش داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود که مقدار تابع هدف در شبکه بزرگ‌تر با افزایش بیشتری نسبت به حالت پایه مواجه است. در این بخش از مطالعه بر روی ضریب  $\alpha$  در محدودیت بودجه در رابطه (۳)، تحلیل حساسیت انجام خواهد شد تا مشخص شود که با یک سطح بودجه مشخص، اجرای کدام یک از سیاست‌های زیر مقرون به صرفه‌تر هستند و تغییرات بودجه چه تأثیری بر مقدار مازاد منافع مصرف‌کننده خواهد داشت. در

۸- مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامتر، مقادیری است که در تحلیل حساسیت دو بعدی، بیشترین مقدار تابع هدف با استفاده از آن‌ها، حاصل شده است.

از تحلیل حساسیت‌های انجام شده بر روی پارامترهای الگوریتم SA است. با توجه به این که الگوریتم SA در صورت انتخاب پارامترهای مناسب، توانایی همگرایی به نقطه بهینه سراسری را دارد، در صورت استفاده از این الگوریتم، تعیین صحیح این پارامترها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت‌های انجام شده نشان می‌دهد که برای شبکه ۱ حدود ۳۵۰۰ تکرار و برای شبکه ۲ حدود ۹۰۰۰ تکرار الگوریتم لازم بوده است و لازم به ذکر است که در هر تکرار، مسأله سطح پایین حل خواهد شد و این موضوع نشان می‌دهد که حل مسئله طراحی شبکه با استفاده از این الگوریتم، مستلزم صرف زمان و هزینه بسیاری است.

با توجه به این که در این مطالعه برای اولین بار مدل طراحی شبکه پیوسته با تقاضای الاستیک با استفاده از الگوریتم SA حل شده است، علاقه مندان می‌توانند از دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مدل مذکور استفاده نمایند و نتایج را با نتایج حاصل از این مطالعه مقایسه نمایند. همچنین برای بررسی کامل‌تر این مدل، میتوان از محدودیت هزینه دیگری استفاده نموده و بررسی کرد که تا چه اندازه تعاریف متفاوت از محدودیت هزینه، در نتایج حاصل از مسأله طراحی شبکه پیوسته دخیل است.

## ۷ - فهرست مراجع

1. Yang, H. and Q. Meng, (2000) "Highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 34, No. 3, pp-207-222.
2. Abdulaal, M. and L. Leblanc, (1979) "Continuous network design models", Transportation Research, Vol 13, pp 136-176.
3. Chen, Y., Florian, M., (1995) "A coordinate descent method for the bi-level O-D matrix adjustment problem", International Transactions in Operational Research, Vol 2, pp 165-179.
4. Meng Q., Y.H.g., Bell M.G.H, (2001) "An equivalent continuously differentiable model and a locally convergence algorithm for the continuous network design problem", Transportation Research Part B: Methodological, Vol 35, pp 83-105.
5. Chiou, S. W. , (2005) "Bilevel programming for the continuous transport network design problem" Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 39, pp-361-383.
6. Bazaraa, Mokhtar S. and et al, (2006) "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms", third edition ed, New Jersey: John Wiley & sons.
7. Xu, T. and et al, (2009) "Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm", Expert Systems with Applications, Vol. 36, No. 2, pp-1322-1328.
8. SHEFFI, Y., (1985) "URBAN TRANSPORTATION NETWORKS: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods", prentice-hall, new jersey, p 400.
۹. ابراهیمی، مریم، (۱۳۸۹) "مدل هم زمان طراحی شبکه پیوسته و قیمت گذاری در شبکه های شهری با استفاده از الگوریتم گرم و سرد کردن شبیه سازی شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
10. Metropolis, N. et al., (1953) "equation of state calculations by fast computing machines",
11. Yang, J. M. Xu, et al., (2009) "Sensitivity Analysis of Simulated Annealing for Continuous Network Design Problems", Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, vol. 9, no. 3, pp-64-70.
12. Michiels, W. and E. Aarts and J. Korst, (2007), "Theoretical Aspects of Local Search (Monographs in Theoretical Computer Science", Springer-Verlag, New York, Inc.

میزان افزایش ظرفیت کمان‌های شبکه را با هدف بیشینه کردن مازاد منافع استفاده کننده به دست آورد. برای حل مدل از الگوریتم SA استفاده شده و برای دو شبکه فرضی مدل مذکور حل شده است.<sup>۹</sup> برای دستیابی به یک نتیجه کامل بر روی پارامترهای الگوریتم SA و میزان بودجه در اختیار، تحلیل حساسیت انجام شده است. نتایج حاصل از حل مدل ارائه شده در هر دو شبکه مورد بررسی نشان می‌دهند که با اجرای طراحی شبکه پیوسته، مازاد منافع استفاده کننده افزایش یافته است ولی روند انتخاب کمان‌های شبکه برای افزایش ظرفیت، با یکدیگر متفاوت است. بر اساس نتایج حاصله، در شبکه ۱ با کمترین سطح بودجه، ابتدا کمان‌های حواشی مرکز یعنی کمان‌های ۱ و ۶، افزایش ظرفیت داشته اند و سپس با افزایش سطح بودجه، ابتدا کمان‌های ۲ و ۷ و سپس کمان‌های موازی مسیرهای منتهی به مرکز یعنی ۳ و ۸، علیرغم زمان سفر بالایی که داشته‌اند، ظرفیت‌شان افزایش داشته است. در سطوح بودجه بالاتر ابتدا کمان ۴ ظرفیت‌اش افزایش داشته و نهایتاً کمان ۵ به عنوان آخرین کمان شبکه افزایش ظرفیت داشته است. در شبکه ۲ با کمترین سطح بودجه، ابتدا کمان‌های منتهی به مرکز یعنی ۱۱ و ۱۹ ظرفیت‌شان افزایش داشته و با افزایش میزان بودجه، کمان‌های موازی مسیرهای منتهی به مرکز یعنی ۱۰ و ۱۸ و در گام بعدی ۴ کمان خروجی از مبادی ۱ و ۲ و در نهایت کمان‌های حواشی مرکز، یعنی ۳۱ و ۳۷ ظرفیت‌شان افزایش یافته است. دلایل زیادی برای توجیه تفاوت در روند افزایش ظرفیت کمان‌های در هر دو شبکه وجود دارد که یکی از مؤثرترین آن‌ها را می‌توان در مبدأ بودن گره ۷ در شبکه ۲ بیان نمود. زیرا مرکز در شبکه ۱ یعنی گره ۵، مقصدی برای دیگر مبادی شبکه است ولی در شبکه دوم این وضعیت متفاوت بوده و مرکز شبکه نه تنها مقصد دیگر مبادی است بلکه خود نیز تولید سفر دارد. مسأله دیگر این است که در شبکه اول کمان‌های منتهی به مرکز بیشترین مقدار پتانسیل ظرفیتی را دارا هستند و این مسئله در شبکه دوم کاملاً متفاوت بوده و کمان‌های منتهی به مرکز دارای کمترین پتانسیل ظرفیتی هستند. از آن جایی که محدودیت بودجه لحاظ شده در این مطالعه رابطه‌ای مستقیم با پتانسیل ظرفیتی کمان‌های شبکه دارد، می‌توان نتیجه گرفت که به همین دلیل است که در شبکه دوم کمان‌های منتهی به مرکز اولین کمان‌هایی هستند که ظرفیت‌شان افزایش داشته است. از طرفی در شبکه دوم کمان‌های حواشی مرکز یعنی ۳۱ و ۳۷ نه تنها پتانسیل ظرفیتی بالایی دارند بلکه زمان سفر بالایی نیز دارند که این خود مزید بر علت است.

به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که در طراحی شبکه پیوسته با تقاضای الاستیک، نمی‌توان دقیقاً بیان نمود که کدام کمان‌های شبکه برای افزایش ظرفیت در اولویت هستند و نمی‌توان انتظار داشت که با استفاده از یک مدل مشترک بر روی هر نوع شبکه‌ای، جواب‌های یکسانی به دست آید. عوامل بسیاری در نتیجه حاصل شده دخیل هستند که عبارتند از:

- مشخصات شبکه (تعداد و مکان مبدأ و مقصدهای شبکه)
- چگونگی تعریف محدودیت بودجه در نظر گرفته شده
- زمان سفر آزاد کمان‌های شبکه، پتانسیل ظرفیتی کمان‌های شبکه
- کمان‌های کاندید در نظر گرفته شده در یک شبکه بزرگ (در نظر گرفتن تمامی کمان‌های شبکه مقرون به صرفه نیست)
- متقارن بودن شبکه

یکی دیگر از نتایج به دست آمده در این مطالعه، نتایج حاصل

۹ - جهت حل مدل مذکور، از فضای برنامه‌نویسی ++C استفاده شده است.