مقایسهٔ قابلیت الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسئلهٔ مکان‌یابی مراکز آتش‌نشانی

حسین شورورزی[1*]، محمد سعدی مسگری[2]، عباس علیمحمدی[3]، حسین آقامحمدی[4]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
۲- دانشیار سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
۳- دانشیار سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
۴- دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

دریافت: ۹۰/۱۲/۷ پذیرش: ۹۱/۴/۲۱

چکیده

مکان‌یابی و تخصیص از نوع مسائل NP-Hard است که با افزایش تعداد نقاط تقاضا و مراکز خدماتی، پیچیدگی و حجم محاسبات مسئله به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. برای حل این‌گونه مشکلات، از روش‌های فراابتکاری متناسب با شرایط مسئله استفاده می‌شود. در این تحقیق، روش‌های فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع، ژنتیک و شبیه‌سازی بازپخت به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی برای مکان‌یابی مراکز آتش‌نشانی و تخصیص مناطق شهری به آن‌ها استفاده شده‌اند. این روش‌ها با توجه به معیارهای زمان حل مسئله، مقدار تابع هدف، تعداد تکرار و نحوهٔ پوشش منطقه در سناریوهای مختلف ارزیابی شده‌اند. سناریوهای مختلف در روش ژنتیک براساس تغییر در تعداد تکرار و جمعیت اولیه و در روش شبیه‌سازی بازپخت براساس تغییر در تعداد تکرار حرکات و تغییرات دما تولید شده‌اند. روش جست‌وجوی ممنوع دارای بیشترین زمان محاسباتی (۳۸ دقیقه و ۴۲ ثانیه) و کمترین (بهترین) مقدار تابع هدف ($۴/۷۴۹\times۱۰^{۴}$) است و با توجه به نقشهٔ تولیدشده، بهترین پوشش را در منطقه توسط مکان‌های بهینهٔ برگزیده ایجاد می‌کند. الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، در بین روش‌های اجرا، دارای کمترین زمان حل مسئله است و هنگامی‌که تعداد تکرارها در این روش از اندازهٔ مسئله (در اینجا تعداد پارسل‌ها) بزرگ‌تر باشد، جواب‌های مطلوبی تولید می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در سناریوی دوم روش SA در این تحقیق، صحّت این ادعا را اثبات کرده است. براساس یافته‌های این تحقیق، می‌توان

* نویسندهٔ مسئول مقاله: E-mail: shurvarzy@sina.kntu.ac.ir

نتیجه‌گیری کرد که درصورت نیاز به اجرای سریع (زمان بسیار کوتاه عملکرد الگوریتم) روش شبیه‌سازی بازپخت سریع‌ترین روش خواهد بود؛ در شرایط نیاز به سرعت و دقت مناسب و متوسط، الگوریتم ژنتیک گزینهٔ مناسبی است و سرانجام در حالت نیاز به دقت و کیفیت بالای جواب و بدون محدودیت زمان، روش جست‌وجوی ممنوع گزینهٔ برتر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، مراکز آتش‌نشانی، مکان‌یابی و تخصیص مکان.

۱- مقدمه

مکان‌یابی عبارت است از تعیین مکان مناسب برای انجام یک فعالیت معین با انجام روال اجرایی مشخص و با توجه به معیارها و عامل مؤثر بر آن. این مقوله از ابتدای استقرار بشر در زمین جهت دست‌یابی بهتر به منابع، غذا، محل سکونت و غیره مورد توجه بوده است (Schilling, 1980). پژوهشگران علوم مکانی درزمینهٔ ارائه و گسترش مدل‌های ریاضی و روش‌های حل آن‌ها دربارهٔ تعیین مکان مراکز خدماتی برای انواع مختلف مسائل مکان‌یابی و تخصیص منابع تحقیقات زیادی انجام داده‌اند. مدل‌های ریاضی ارائه‌شده حتی برای مسائل سادهٔ LA [1] نیز به‌راحتی قابل حل نبوده و به محاسبات پیچیده نیاز دارد و حل آن‌ها نیازمند زمان چندجمله‌ای[2] (زمان بالا جهت حل مسئله) است و جزء مسائل از درجهٔ سختی N به‌شمار می‌آیند. به همین دلیل، روش‌های اکتشافی و غیرقطعی برای انواع مسائل مکان‌یابی و تخصیص منابع توسعه داده شده‌اند. در این تحقیق با توجه به کارایی بالا و رسیدن به جواب‌های مناسب در زمان‌های مختلف، از روش‌های ژنتیک (GA)[3]، جست‌وجوی ممنوع (TS)[4] و شبیه‌سازی بازپخت (SA)[5] برای مکان‌یابی و تخصیص بهینه استفاده شده است. در بخش مقدمه، مشکلات موجود در مسائل مکانی مطرح، و با توجه به مشکلات در حل این‌گونه مسائل، روش‌های یادشده پیشنهاد شده است. الگوریتم‌های نام‌برده در سناریوهای مختلف در منطقهٔ مورد مطالعه اجرا شده و نتایج حاصل از اجرای روش‌ها ازدیدگاه زمان حل مسئله، مقدار تابع

1. location-allocation
2. polynomial time
3. genetic algorithm
4. tabu search
5. simulated annealing

هدف و میزان پوشش منطقه ارزیابی و مقایسه شده است. در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای تحقیقات آتی بیان شده است.

۲- پیشینه و توجیه تحقیق

مطالعهٔ مکان‌یابی به‌صورت رسمی از سال ۱۹۰۹م با پژوهش وبر[1] (1929) دربارهٔ چگونگی تعیین مکان یک منبع و سپس در سال ۱۹٦٤م با تحقیقات حکیمی[2] آغاز شد. از زمان پیدایش مسائل مکان‌یابی و تخصیص تا کنون، روش‌های زیادی (دقیق- ابتکاری) برای حل آن‌ها معرفی شده است. کوپر[3] در سال ۱۹٦۳م روش تست کردن همهٔ تخصیص‌ها را مطرح کرد. لاو[4] و همکارانش (1988) در سال ۱۹۷۵م روش کاهش مجموعه و الگوریتم P-median را برای حل این مسائل ارائه کردند. اولین روش ابتکاری توسط کوپر در سال ۱۹٦٤م به‌نام الگوریتم تکرار مکان‌یابی و تخصیص شناخته شد. عادل عالی و جان وایت[5] (1978) مسئلهٔ تعیین مکان‌های بهینه برای احداث مراکز خدمات (مراکز پلیس، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و بیمارستان‌ها) را در آمریکا بررسی کردند. پژوهشگران از روش‌های جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم ژنتیک و روش شبیه‌سازی بازپخت برای حل مسائل مکان‌یابی و تخصیص استفاده کرده‌اند.

مسائل مکان‌یابی برای اولین‌بار در سال ۱۹۹٦م به‌روش الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت حل شد (Murray et al., 1996). بریمبرگ[6] و همکارانش (2000) از روش جست‌وجوی ممنوع برای حل این مسئله استفاده کردند. گانگ[7] و همکارانش (1997) یک روش ابتکاری براساس ترکیب الگوریتم ژنتیک و توابع لاگرانژ ارائه کردند. ارس[8] و همکارانش (2007 و 2008) در مراجع چند روش ابتکاری غیرقطعی را براساس الگوریتم ژنتیک و روش شبیه‌سازی بازپخت برای حل انواع مسائل CMSWP[9] پیشنهاد کردند. چی‌یوشی [1] و همکارانش (2000) و لوانوا[2]

1. Weber
2. Hakimi
3. Cooper
4. Love
5. A. A. Adel & John W.
6. Brimberg
7. Gong
8. Aras
9. Capacitated Multi Source Weber Problem

و همکارانش (2004) الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت را با مجموعه داده‌های تحقیقاتی OR آزمایش کردند و در یافتن راه‌حل بهینهٔ برخی از این مسائل و مشکلات استاندارد موفق شدند. آرستوگوا[3] و همکارانش (2005) روش شبیه‌سازی بازپخت، الگوریتم ژنتیک و روش جست‌وجوی ممنوع را با مسائل مکان‌یابی تسهیلات مختلف تحت محدودیت زمانی، محدودیت راه‌حل و شرایط نامحدود با یکدیگر مقایسه کردند. روش شبیه‌سازی بازپخت را می‌توان در اجرا و نتایج، با الگوریتم ژنتیک ساده مقایسه کرد. لی و یه[4] (2005) نیز روش شبیه‌سازی بازپخت را با الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی ممنوع مقایسه کردند. آن‌ها در تحقیقات خود به مقایسهٔ روش شبیه‌سازی بازپخت با الگوریتم ژنتیک در تخصیص مکان پرداختند.

مزیت تحقیق حاضر به‌دست دادن نتایج مناسب و مطلوب از مقایسهٔ سه روش ژنتیک، جست‌وجوی ممنوع و شبیه‌سازی بازپخت به‌صورت هم‌زمان با یکدیگر ازنظر زمان حل مسئله، مقدار تابع هدف، و میزان پوشش و عملکرد در منطقهٔ مورد مطالعه (بخش مرکزی منطقهٔ ۱۷ شهر تهران) است.

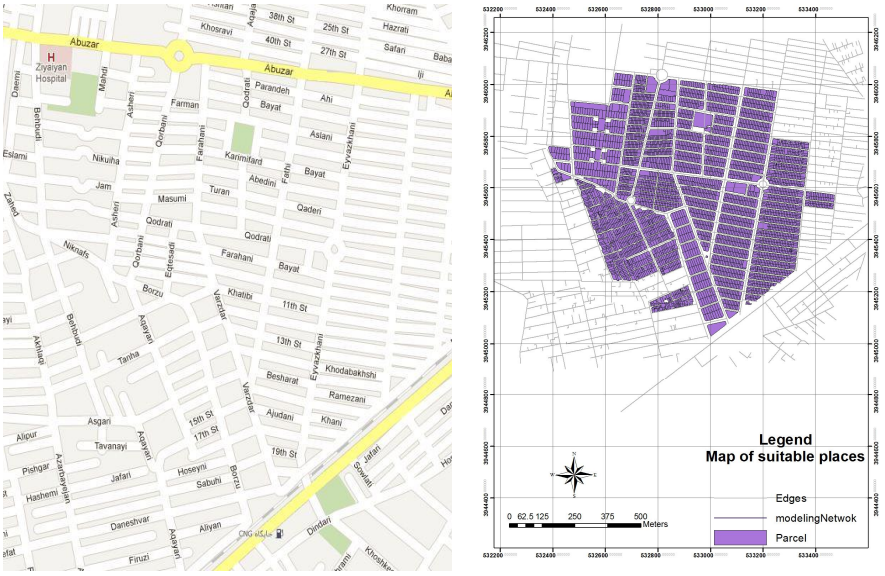
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- معرفی منطقهٔ مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

برای اجرای روش‌های برگزیده، بخش مرکزی منطقهٔ ۱۷ تهران (محدودهٔ بین خیابان ابوذر در بخش شمالی، اتوبان قلعه‌مرغی در بخش جنوبی، خیابان عیوض‌خانی در بخش شرقی و خیابان سجاد در بخش غربی) به‌عنوان منطقهٔ نمونهٔ آزمایشی انتخاب شد. جمعیت کل این بخش ۳۲/۲۳۹ نفر با تراکم جمعیتی معادل ٤٦٥ نفر در هر هکتار، و تعداد کل ساختمان‌ها نیز ٤٨٤٣ است. برای اجرای الگوریتم‌های طراحی‌شده در این محدودهٔ مطالعاتی، اطلاعات مربوط به نحوهٔ کارایی این شبکه مثل سرعت در بخش‌های مختلف مسیر، سطح دسترسی و انسداد از اطلاعات شبیه‌سازی استفاده شد. این داده‌ها به فرمت

1. Chiyoshi
2. Levanova
3. Arostegui
4. Li & Yeh

geodatabase درآمده و یک مجموعه‌دادهٔ شبکه‌ای[1] با توجه به اطلاعات معابر ایجاد شده و خطاهای توپولوژیکی آن‌ها حذف شده است تا بتوان آنالیزهای شبکه را روی آن‌ها انجام داد. نقشه‌های تولیدشده از داده‌های موجود در بخش مرکزی منطقهٔ ۱۷ تهران است که در مقیاس ۱:۸۰۰۰ تولید شده است.



شکل ۱ نقشه و شمای کلی منطقهٔ مورد مطالعه جهت ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی

۳-۲- معیارها و تابع هدف

در مسائل مکان‌یابی معمولاً هدف، بهینه‌سازی یک تابع موسوم به تابع هدف است که متناسب با شرایط مسئله و پارامترهای مؤثر در تصمیم‌گیری تعریف می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های قطعی چندجمله‌ای برای حل این مسائل درجهٔ چندجمله‌ای را به‌قدری بزرگ کرده که زمان حل مسئله طولانی شده است و در بیشتر موارد عملاً نمی‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. برای حل این مشکل، روش‌های ابتکاری متناسب با شرایط مسئله گسترش یافته است (Hansen et al., 1997). این روش‌ها جواب‌های تقریبی نزدیک به حالت بهینه و یا حتی در بعضی موارد، جواب بهینه را برای یک مسئله با شروط و قیود خاص عرضه می‌کنند

1. network dataset

(Zhou et al., 2003). از میان مراکز خدمات شهری، با توجه به اهمیت و جنبهٔ امدادی، ایستگاه‌های آتش‌نشانی به‌عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شده است. پارامترهای مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی باید به شکل ریاضی تبدیل شوند تا با استفاده از روش‌های اجرا و بهینه‌سازی تابع هدف، مکان‌های بهینه در منطقهٔ مورد مطالعه تعیین شود. از سوی دیگر، وارد شدن برخی پارامترها به شکل ریاضی بسیار دشوار است و زمان حل و پیچیدگی مسئله را بالا می‌برد؛ بنابراین پارامترهای مسئله به دو گروه تقسیم می‌شوند: پارامترهای گروه اول به‌عنوان شرایط و معیارهای لازم، مکان‌های مستعد جهت ایجاد مراکز آتش‌نشانی را در منطقه مشخص می‌کنند. پارامترهای لازم برای انتخاب مکان‌های مستعد عبارت‌اند از: نزدیکی به شبکهٔ معابر (دسترسی‌ها)، کاربری اراضی، پتانسیل خطر و شبکهٔ ترافیک. پارامترهای گروه دوم که به روابط ریاضی تبدیل می‌شوند و به‌شکل تابع هدف در بهینه‌سازی و یافتن مکان‌های بهینه جهت ایجاد مراکز آتش‌نشانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، شعاع پوششی و جمعیت و تراکم آن هستند. در طراحی تابع هدف با توجه به نوع و ساختار مسئله، از مسئلهٔ پوششی استفاده شده است. برای فرمول‌سازی مسئله، ابتدا باید متغیرهای تصمیم‌گیری ۳-۱ تا ۳-۳ معرفی شوند.

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{اگر سرویس‌دهنده در نقطهٔ j باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \qquad (۳-۱)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر سرویس‌دهندهٔ } j \text{ به نقطهٔ } i \text{ سرویس دهد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \qquad (۳-۲)$$

$$U_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر نقطهٔ } i \text{ در مدت زمان مشخص ۳ تا ۵ دقیقه پوشش دهد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \qquad (۳-۳)$$

در این روابط i اندکس نقطهٔ تقاضا و j اندکس مکان مستعد ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی برای سرویس‌دهی است. حال با استفاده از سه تعریف یادشده، مسئلهٔ حداقل پوشش را می‌توان با استفاده از روابط ۳-٤ تا ۳-٦ فرمول‌بندی و به یک مسئلهٔ بهینه‌سازی تبدیل کرد.

$$Z(x) = \min \sum_i \sum_j u_i z_{ij} x_j P_i t_{ij} \quad (۴-۳)$$

$$t_{ij} \leq 5 \quad (۵-۳)$$

$$\sum_j x_j = N \quad (۶-۳)$$

در تابع هدف طراحی‌شده i: نقاط تقاضا، p_i : جمعیت نقطهٔ i، t_{ij}: زمان رسیدن از مرکز آتش‌نشانی jبه نقطهٔ تقاضای i، N: تعداد مراکزی که در منطقهٔ مورد مطالعه باید ایجاد شود؛ با توجه به معیارها، پارامترها و شرایط منطقه سه مرکز درنظر گرفته شد.

۳-۳- روش مطالعه

در محدودهٔ مطالعاتی این تحقیق، با توجه به شرایط و پارامترهای لازمِ گروه اول، چهارده مکان به‌عنوان مکان‌های مستعد جهت ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی درنظر گرفته شد. با توجه به نبود ایستگاه‌های آتش‌نشانی در منطقهٔ مورد مطالعه و درنظر گرفتنِ ابعاد و شرایط منطقه فرض می‌شود که از میان این چهارده مکان مستعد، سه ایستگاه به‌عنوان مکان‌های بهینه جهت پوشش بهینهٔ کل منطقه با توجه به پارامترهای گروه دوم لحاظ شود. با لحاظ کردن هر ترکیبی از سه نقطه به‌عنوان یک جواب کاندید، بلوک‌های شهری به هرکدام از این سه نقطه تخصیص می‌یابد. مبنای تخصیص هر بلوک به هر مرکز شرط وقوع آن بلوک در فاصلهٔ زمانی استانداردِ سه تا پنج دقیقه از مرکز است. به عبارت دیگر، با توجه به استاندارد فاصلهٔ زمانی سه تا پنج دقیقه (میانگین فاصلهٔ شعاعی پانصد متر)، بلوک‌های ساختمانی به مراکز آتش‌نشانی تخصیص می‌یابند؛ به‌گونه‌ای که یک بلوک ممکن است با توجه به فاصلهٔ زمانی به یک، دو و یا هر سه مرکز تخصیص یابد و یا به‌دلیل دوری، به هیچ‌کدام از نقاط تخصیص نیابد. نتیجهٔ این امر تولید سه منطقهٔ (زون) تخصیص‌یافته پیرامون مراکز آتش‌نشانی است که تاحدودی با هم هم‌پوشانی دارند و الزاماً کل منطقه را پوشش نمی‌دهند. در این تحقیق، مطلوب‌ترین حالت، انتخاب سه نقطه‌ای است که مناطق تخصیص‌یافته به آن‌ها دارای کمترین هم‌پوشانی باشد و در عین حال کل منطقهٔ مورد

مطالعه را پوشش دهد. به عبارت دیگر، یکی از شرایط بهینگی، مینیمم بودن هم‌پوشانی بین این مناطق و نیز مینیمم بودن بلوک‌های تخصیص‌نیافته است. روش‌های فراابتکاری یادشده جهت یافتن مکان‌های بهینه بررسی و اجرا شد. در این بخش، طراحی روش‌های پیشنهادی بیان شده و هریک از پارامترهای روش‌های پیشنهادی به پارامترهای مکان‌هایی ترجمه شده است.

۳-۴- طراحی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به جمعیتی متشکل از اعضای متعدد اجازه می‌دهد تا تحت قواعد مشخصی به‌سمت حالتی که در آن برازندگی بیشینه می‌شود و یا به‌عبارتی، تابع هزینهٔ کمینه می‌شود، حرکت کند. کروموزم‌ها از تعدادی ژن تشکیل شده‌اند و تعداد ژن‌های کروموزم به نوع مسئله بستگی دارد و در هر مرحله بخش‌هایی از جواب مسئله را شامل می‌شوند. در حل مسائل مکان‌یابی، مختصات مراکز خدماتی به‌عنوان ژن‌های کروموزم به‌صورت رشته‌ای درنظر گرفته شده است (شکل ۲). از آنجایی که برای هر مرکز خدماتی دو مؤلفهٔ x و y معرفی می‌شود، طول کروموزم دوبرابر تعداد مراکز خدماتی مورد نظرِ مسئله- که کل منطقه را پوشش می‌دهد- درنظر گرفته شده است. در منطقهٔ مورد مطالعه، با توجه به مکان‌های ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، فرض شده است که در منطقه ایستگاهی وجود ندارد؛ بنابراین و با توجه به پارامترها و معیارهای تصورشده، سه مکان به‌عنوان مکان‌های بهینه جهت پوشش کل منطقه با بهینه‌سازی روش‌های موجود انتخاب می‌شود. در این تحقیق، با توجه به تعداد ایستگاه‌های لازم در منطقه، طول هر کروموزم برابر با شش است.

X_1	Y_1	X_2	Y_2	X_3	Y_3

شکل ۲ ساختار کروموزم

الگوریتم‌های ژنتیک با پاره‌ای از متغیرهای کدشده کار می‌کند. روش کدگذاری به نوع ژن‌های کروموزم بستگی دارد و تابع نوع دادهٔ هر ژن تغییر می‌کند. در این تحقیق، کدگذاری با اعداد صحیح انجام شده است. جابه‌جایی در الگوریتم ژنتیک نقش اصلی را در همگرایی و

رسیدن به نقطهٔ بهینه داراست. در این تحقیق، به‌دلیل سادگی و رسیدن به همگرایی لازم از جابه‌جایی تک‌نقطه‌ای استفاده شده است. تابع هزینه درواقع همان معیار بهینه‌سازی است که برمبنای آن صورت می‌گیرد و بیانگر میزان نزدیکی و بهبود کروموزم‌هاست. جمعیت اولیه پاره‌ای از جواب‌های مسئله است که به‌صورت اولیه وارد الگوریتم شده و یا می‌تواند به‌صورت تصادفی ایجاد شود. درمورد مسئلهٔ طرح‌شده، جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی درنظر گرفته شد. در این پژوهش، ادغام تک‌نقطه‌ای به‌عنوان عملگر ادغام فرض شده است. میزان ادغام (p_c) بیانگر احتمال ادغام و مقدار آن بین صفر و یک است. تعدادی از محققان پس از پژوهش‌های گسترده دربارهٔ پارامترهای الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه را برای عملگر ادغام بین ۰/۱۵ تا ۰/۷۵ توصیه می‌کنند (Melaine, 1998). در این پژوهش، مقدار ۰/۷ به‌عنوان میزان احتمال ادغام درنظر گرفته شده است. پس از عمل ادغام، نوبت به عمل جهش می‌رسد. تعدادی از محققان که درزمینهٔ پارامترهای ژنتیک مطالعه کرده‌اند، میزان عملگر جهش را بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ توصیه می‌کنند (Ibid). در این پژوهش، عدد ۰/۰٤ میزان احتمال جهش درنظر گرفته شده است. در ادامه، مراحل الگوریتم ژنتیک به‌صورت کلی آمده است. این مراحل می‌تواند در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی استفاده شود:

گام اول: ایجاد جمعیت اولیه به‌وسیلهٔ تولید مجموعه‌ای از اشخاص یا کروموزم‌ها؛

گام دوم: ارزیابی تابع تناسب هر شخص یا جمعیت؛

گام سوم: تکرار (ایجاد نسل جدید از جمعیت):

- انتخاب والدین از اشخاص در جمعیت،
- انجام جفت‌گیری یا جهش برای تولید فرد جدید،
- اضافه کردن افراد جدید به جمعیت،
- حذف افراد با توجه به تابع تناسب پایین به‌صورت تصادفی.

رفتن به گام سوم تا هنگامی که معیار خاتمه ارضا شود.

در مرحلهٔ اول، الگوریتم ژنتیک به‌صورت تصادفی به راه‌حل مقدار اولیه می‌دهد و جمعیت تولید می‌شود. سپس مقدار تناسب هر فرد از جمعیت را از طریق تابع هدف اندازه‌گیری می‌کند. از مرحلهٔ سوم، عمل جفت‌گیری و جهش برای تولید جمعیت جدید انجام می‌شود. مقدار تناسب برای همهٔ افراد بررسی می‌شود. فرد با ارزش بالاتر تکامل یافته

است. این روند تا زمانی که به‌وسیلهٔ هر معیاری متوقف شود، ادامه خواهد داشت. درنهایت، یک فرد با بهترین مقدار تناسب به‌عنوان راه‌حل انتخاب خواهد شد. در این تحقیق، از روش انتخاب تورنمنت چهارتایی استفاده شده است. معیار خاتمهٔ الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، حداکثر نسل و مقدار جمعیت بدون تغییر درنظر گرفته شده است که الگوریتم در چهار سناریوی مختلف اجرا می‌شود.

۳-۵- طراحی روش شبیه‌سازی بازپخت (SA)

شبیه‌سازی بازپخت روش بهینه‌سازی جست‌وجوی تصادفی است که با راه‌حل‌های اولیهٔ تصادفی شروع می‌شود. سپس برای یافتن راه‌حل بهتر با تکرار ادامه می‌یابد. در داخل تکرار، این روش به‌طور تصادفی یک راه‌حل جدید در همسایگی راه‌حل قبلی درون تکرار انتخاب می‌کند. اگر تابع تناسب راه‌حل جدید بهتر از تابع تناسب راه‌حل قبلی باشد، راه‌حل جدید به‌عنوان راه‌حل رایج و جدید پذیرفته می‌شود. اگر مقدار تابع تناسب بهتر نشده باشد، راه‌حل‌های جدید فقط با یک احتمال طبق رابطهٔ ٤-١ غالب می‌شود:

$$P = e^{-\frac{f(x)-f(y)}{T}} \qquad (۱-۴)$$

در رابطهٔ بالا *f(x) -f(y)* تفاوت تابع تناسب بین راه‌حل‌های قدیمی و جدید است. اگر مقدار درجهٔ حرارت T بالا باشد، امکان بیشتری برای پذیرش حرکت از مقدار تناسب وجود خواهد داشت. اما اگر مقدار T به‌سمت صفر حرکت کند، بیشترین حرکات از مقدار تناسب رد خواهد شد. به همین دلیل است که در روش شبیه‌سازی بازپخت، دمای اولیه با درجهٔ حرارت بالا شروع می‌شود؛ به‌طوری که می‌تواند از به دام افتادن زودرس در بهینهٔ محلی دوری کند. در هر دما، روش شبیه‌سازی بازپخت تلاش می‌کند تعداد معینی از حرکت‌ها و درجهٔ حرارت را کم‌کم و به‌آرامی کاهش دهد. از آنجا که روش شبیه‌سازی بازپخت فرایندی تکراری است، تعداد تکرار نیز بر کیفیت راه‌حل تأثیر زیادی دارد. در حل مسئلهٔ مورد نظر در تحقیق، باید تصمیم‌هایی اتخاذ شود. این تصمیم‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروه اول تصمیم‌های کلی

هستند که با پارامترهای خود الگوریتم مرتبط‌اند. این پارامترها شامل دمای اولیه و زمان‌بندی سردشدن هستند که با پارامترهای *nerp* (تعداد تکرار تعیین‌شده) و تابع کاهش دما تعیین می‌شوند. گروه دوم تصمیم‌های مربوط به مسئلهٔ خاص (مراکز خدماتی) هستند که دربردارندهٔ انتخاب فضای جواب موجه، شکل تابع هزینه و ساختار همسایگی‌اند. این تصمیم‌ها در سرعت الگوریتم و کیفیت جواب‌های به‌دست آمده مؤثرند. دمای اولیهٔ (T_0) درنظر گرفته‌شده، ٤٥٠٠ درجه سلسیوس و تعداد تکرارهای مشخص‌شده (*nerp*) در دو درجه حرارت (T_r) ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰ مقادیر ۲۰۰۰ و ٤۰۰۰ تعیین شده است. تابع کاهش دما با تعداد تکرار در هر دما و میزان کاهش دما مشخص می‌شود که از رابطهٔ $\alpha(t) = aT$ به‌دست می‌آید که در آن $a<1$ است. تجربه نشان داده است مقدار نسبتاً بزرگ a بهترین نتیجه را دارد و اکثر موفقیت‌های گزارش‌شده از مقادیر بین ۰/۸ و ۰/۹۹ با یک اریبی به‌سمت ۰/۹۹ استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، مقدار ۰/۹۵ درنظر گرفته شده است. این مقادیر با سرد شدن آهسته متناظرند. روشی که برای مقادیر کنترلی پیوسته در این تحقیق معرفی شده است، از رابطهٔ ٤-۲ حاصل می‌شود:

$$x_{i+1} = x_i + Qu \qquad (۲-۴)$$

که در آن u بردار اعداد تصادفی است که در بازهٔ $(-\sqrt{3}, \sqrt{3})$ قرار دارد؛ بنابراین هرکدام از آن‌ها میانگین صفر و واریانس برابر یک دارد. Q نیز ماتریسی است که اندازهٔ گام توزیع را کنترل می‌کند. در این تحقیق، مقدار نهایی دما (T_f) ٤٥ درجه سانتی‌گراد حاصل شده است. همچنین، حالات سیستم، جواب‌های موجه درنظر گرفته شده است. دما به‌عنوان پارامتر کنترلی، تغییر حالت به‌عنوان جواب همسایگی، انرژی و مینیمم انرژی به‌عنوان هزینه و مینیمم هزینه و حالت انجماد به‌عنوان جواب هیوریستیک تعیین شده است. نخست پارامترهای روش شبیه‌سازی بازپخت معرفی و سپس مراحل اجرای الگوریتم مذکور بررسی شده است.

T_0: درجهٔ حرارت اولیه، T_f: درجهٔ حرارت نهایی، T_r: درجهٔ حرارت در مرحلهٔ r ام، M: حداکثر تعداد تعویض پذیرفته‌شده در هر درجهٔ حرارت، e: تعداد تعویض‌های پذیرفته‌شده در هر «دوره» جهت بررسی شرط تعادل، α: ضریب کاهش درجهٔ حرارت در هر مرحله، ε_1: عدد مثبت و کوچک جهت بررسی شرط تعادل سیستم در درجهٔ حرارت T_r، ε_2: عدد مثبت

و کوچک جهت بررسی شرط توقف (نقطهٔ انجماد). در مرحلهٔ صفر، مقادیر اولیهٔ پارامترهای ورودی ε_1، ε_2، m و e را قرار می‌دهیم که مقادیر آن‌ها ε_1=۰/۰۰۵، ε_2=۰/۰۱، m=۱۵۰ و e=۱۵ است. در مرحلهٔ اول مقادیر T_0 و T_f را محاسبه کرده، مقدار T_f را برابر T_0 قرار می‌دهیم. مقادیر t ،r و n را مساوی صفر قرار می‌دهیم (r مربوط به تعداد دفعات انجام فرایند آنیل کردن، t مربوط به تعداد جواب‌های پذیرفته‌شده در هر درجهٔ حرارت و n مربوط به تعداد جواب‌های پذیرفته‌شده در هر «دوره» است). در مرحلهٔ دوم، میزان تابع هدف را به‌ازای جواب امکان‌پذیر اولیه محاسبه می‌کنیم (f_0). این مقدار را حداقل مقدار فعلی تابع هدف قرار می‌دهیم ($E = f_0(T_r)$) و جواب اولیه را بهترین جواب تاکنون درنظر می‌گیریم ($x^* = x_0$). در مرحلهٔ سوم، با توجه به تولید مکانیزم همسایگی، جواب جدید (x_j) را در همسایگی جواب قبلی (x_i)ایجاد می‌کنیم. در مرحلهٔ چهارم میزان تغییر تابع هدف را به‌ازای جواب جدید از رابطهٔ ٤-۳ محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta f(T_r) = f_j(T_r) - f_i(T_r) \qquad (۳-۴)$$

اگر $\Delta f(T_r) \le 0$ باشد، به مرحلهٔ ششم می‌رویم. در مرحلهٔ بعد، یک عدد تصادفی مانند y را بین صفر و یک انتخاب می‌کنیم. مقدار $P(\Delta f)$ را با استفاده از رابطهٔ ٤-٤ محاسبه می‌کنیم:

$$P(\Delta f) = \exp[-\Delta f(T_r)/T_r] \qquad (۴-۴)$$

اگر $y > p(\Delta f)$ بود، به مرحلهٔ سوم می‌رویم. در مرحلهٔ ششم جواب جدید پذیرفته می‌شود و $n = n+1$. اگر مقدار تابع هدف به‌ازای جواب جدید از بهترین مقدار تابع هدف تاکنون بهتر باشد، این مقدار را جایگزین مقدار قبلی می‌کنیم. اگر $n < e$ باشد، به مرحلهٔ سوم برمی‌گردیم. در مرحلهٔ هفتم $n = 0$ و $t = t + e$، سپس شرط تعادل را بررسی می‌کنیم. اگر $t > M$ باشد، به مرحلهٔ هشتم می‌رویم. در مرحلهٔ هشتم، مقادیر $V(T_r)$ و $S(T_r)$ را محاسبه می‌کنیم: $t = 0$

$$S(T_r)=\frac{V(T_r)}{T_r^*[\bar{f}(T_0)-\bar{f}(T_r)]} \qquad (۵-۴)$$

$$V(T_r)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i^2(T_r)-[\bar{f}(T_r)]^2 \qquad (۶-۴)$$

اگر $T_r \le T_f$ باشد و $S(T_r) \le \varepsilon_2$ باشد، به مرحلهٔ نهم می‌رویم. در مرحلهٔ نهم مقدار درجهٔ حرارت T_{r+1} را محاسبه می‌کنیم. $r=r+1$ در مرحلهٔ آخر جواب نهایی مشخص می‌شود (E, x^*).

۳-۶- طراحی روش جست‌وجوی ممنوع (TS)

در روش جست‌وجوی ممنوع، جهت اجرا و یافتن مکان‌های بهینه از ساختار حافظه‌ای انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود (حافظهٔ انطباقی) و می‌تواند به‌عنوان چارچوبی کلی برای روش‌های نوین جست‌وجوی فراابتکاری به‌کار رود. همگرایی این روش به‌سمت جواب بهینه، درصورت زیاد شدن تکرارها به اثبات رسیده است. این روش برای فرایندهایی به‌کار می‌رود که از مجموعه‌ای از حرکات برای انتقال از یک جواب به جواب دیگر در همسایگی جواب قبلی استفاده می‌کند. مراحل روش جست‌وجوی ممنوع عبارت‌اند از: ایجاد جواب اولیه، سازکار ایجاد همسایگی، ارزیابی جواب‌های همسایه و انتخاب جواب مناسب، تعیین شکل جواب و نحوهٔ محاسبهٔ تابع هدف برای هر جواب، تعیین ویژگی‌هایی از حرکت‌ها یا جواب‌ها که باید در فهرست ممنوع ثبت شوند، به‌هنگام‌سازی جواب‌ها و فهرست ممنوع، طول فهرست نتایج، نحوهٔ انتخاب معیارهای رضایت و فهرست کاندید، و کنترل و نحوهٔ انتخاب شرایط توقف الگوریتم. در مرحلهٔ اول، از فضای مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله (X) یک جواب اولیه (x_0) را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کنیم. از جواب اولیه دلخواه (x_0) که $x_0 \in X$ است، شروع می‌شود و در مرحلهٔ بعدی یک جواب جدید (x_1) از میان مجموعهٔ همسایگی جواب فعلی (x_0) یعنی $V(x_0)$ انتخاب می‌شود. همسایگی x به این صورت تعریف می‌شود که به هر نقطه $x \in X$ یک زیرمجموعه $V(x) \subseteq X$ به‌نام همسایگی x نسبت داده می‌شود. معیار برای انتخاب جواب بعدی (x_{n+1})، انتخاب بهترین جواب از میان همسایه‌های جواب فعلی (x_n) است. سپس x_{n+1} به‌عنوان جواب کنونی درخواهد آمد که البته، هیچ‌گاه بدتر از جواب قبلی x_n نخواهد بود؛ یعنی $f(x_{n+1}) \le f(x_n)$ درصورت نبود جواب بهتر (یا مساوی) در همسایگی جواب فعلی، جست‌وجو متوقف می‌شود. حافظهٔ انطباقی روش جست‌وجوی ممنوع از دو

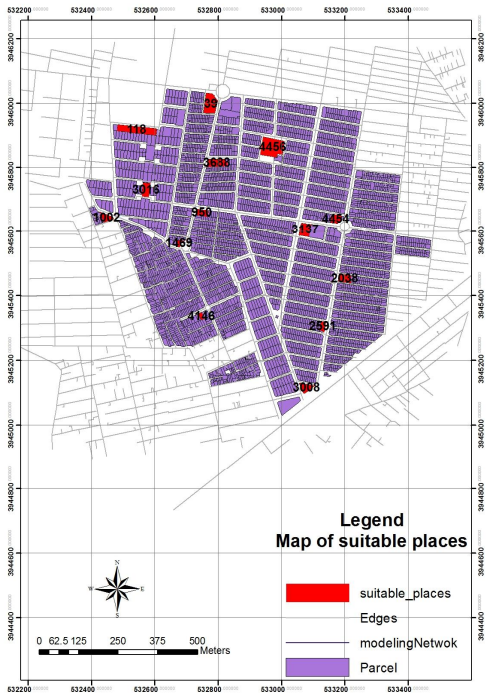
جزء کوتاه‌مدت و بلندمدت تشکیل شده است. حافظهٔ بلندمدت به‌منظور رسیدن به نتایج محاسباتی بهتر است. ازدید حافظهٔ کوتاه‌مدت در استراتژی گریز از مینیمم‌های محلی، هنگامی‌که $V(x_n)$ بسیار بزرگ‌تر از آن باشد که بتوان تمام آن را مورد کاوش قرار داد، از زیرهمسایگی $V'(x_n) \subseteq V(x_n)$ به‌جای آن استفاده می‌کنیم. برای جلوگیری از قرار گرفتن در سیکل تکرار شدن جواب‌های مشابه، آخرین جواب‌های به‌دست‌آمده در برداری با عنوان فهرست ممنوع ذخیره می‌شود و انتخاب آن‌ها توسط الگوریتم برای مدتی ممنوع خواهد بود. جواب انتخاب‌شده توسط الگوریتم به انتهای فهرست ممنوع، و به‌ازای آن جوابی از ابتدای فهرست خارج می‌شود. در این تحقیق، از استراتژی زیربخش[1] استفاده شده است. در این استراتژی، حرکات مرکب با هدف جدا کردن، اجزای خوب را که ممکن است قسمتی از بهترین حرکات باشند، تجزیه می‌کند. با توجه به اینکه در فهرست ممنوع[2] ثبت و نگهداری تمام اطلاعات جواب‌هایی که به‌تازگی بازدید شده‌اند و نیز بررسی هریک از جواب‌های کاندید در فهرست موجود فرایندی زمان‌بر است؛ به‌جای ثبت تمام اطلاعاتِ مربوط به جواب‌ها، یک خاصیت یا ویژگی خاص از آن‌ها ثبت می‌شود. در تحقیق حاضر، مساحت مکانِ انتخاب‌شده، فاصله از شبکهٔ دسترسی و تراکم جمعیت در منطقهٔ پوشش داده‌شده ثبت شده است. معیارهای رضایت در تحقیق شامل دو معیار است: در معیار رضایت اول، اگر مقدار تابع هدف جواب جدید از مقدار تابع هدف جواب به‌دست‌آمدهٔ قبل بهتر باشد، جواب از حد رضایت بالاتر است. در معیار رضایت دوم، با توجه به ساختار روش و فهرست ممنوع، اگر در یک تکرار از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع به‌گونه‌ای باشد که امکان هیچ حرکتی وجود نداشته باشد، در این حالت آن حرکت یا جوابی از فهرست ممنوع که در صف خروج از فهرست ممنوع از سایر جواب‌ها به خروج نزدیک‌تر است، انتخاب و ممنوعیت آن برداشته می‌شود. در تحقیق حاضر، شرط توقف، تعداد تکرار حرکات و اختلاف میزان تابع هدف قبل و بعد درنظر گرفته شده است.

۴- اجرای روش‌های کاندید

در این بخش، نخست براساس برخی پارامترها مثل نزدیکی به شبکهٔ معابر (دسترسی‌ها)، کاربری اراضی، پتانسیل خطر و شبکهٔ ترافیک- که شرایط حداقلی و ضروری را بیان

1. subdivision strategy
2. tabu list

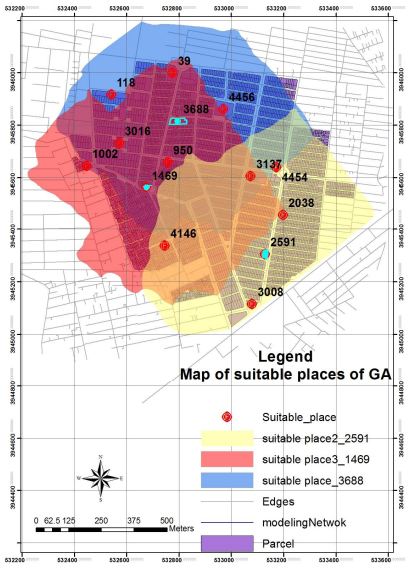
می‌کنند- تعدادی مکان مستعد اولیه به‌عنوان مکان‌های کاندید انتخاب شدند. با توجه به اینکه پارامترهای مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی باید به شکل ریاضی تبدیل شوند تا با استفاده از روش‌های اجرا و بهینه‌سازی تابع هدف، مکان‌های بهینه در منطقهٔ مورد مطالعه جهت ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی تعیین شود و همچنین وارد شدن برخی پارامترها به شکل ریاضی بسیار دشوار بوده، زمان حل و پیچیدگی مسئله را بالا می‌برد؛ بنابراین پارامترهای مسئله به دو گروه تقسیم می‌شوند: پارامترهای گروه اول به‌عنوان شرایط و معیارهای لازم درنظر گرفته می‌شوند تا با استفاده از آن‌ها مکان‌های مستعد جهت ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی انتخاب شوند. پارامترهای لازم برای انتخاب مکان‌های مستعد عبارت‌اند از: نزدیکی به شبکهٔ معابر (دسترسی‌ها)، کاربری اراضی، پتانسیل خطر و شبکهٔ ترافیک. نخست کاربری‌های خالی و فضاهای بایر با مساحت بیشتر از ۲۵۰ مترمربع در منطقهٔ مورد مطالعه مشخص شد. سپس با استفاده از آنالیز proximity در نرم‌افزار Arc GIS، اطلاعات معابر با عرض بالای ۱۵متر در منطقه تعیین شد. در مرحلهٔ بعد، کارخانجات و مراکز صنعتی در منطقهٔ مطالعاتی مشخص شد. در ادامه، اطلاعات متوسط شبکهٔ ترافیک منطقه در نقاط مختلف در یک دورهٔ ده‌روزه بررسی و تعیین شد. سرانجام، با استفاده از آنالیزهای GIS، چهارده مکان به‌عنوان مکان‌های مستعد برای ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی در منطقهٔ مطالعاتی معرفی شد. مکان‌های حاصل از این آنالیز تمام شرایط و پارامترهای لازم برای انتخاب مکان‌های مستعد را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، مکان‌های برگزیده به معابر با عرض بالاتر از ۱۵ متر، کارخانجات و مراکز صنعتی نزدیک‌اند و مساحت بیش از ۲۵۰ مترمربع دارند. پارامترهای گروه دوم که به روابط ریاضی تبدیل می‌شوند و به‌شکل تابع هدف در بهینه‌سازی و یافتن مکان‌های بهینه برای ایجاد مراکز آتش‌نشانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، شعاع پوششی و جمعیت و تراکم آن هستند. نقشهٔ مکان‌های مستعد برای ایجاد مراکز آتش‌نشانی در منطقهٔ مورد مطالعه در شکل شمارهٔ سه نمایش داده شده است. در مرحلهٔ بعد، مکان‌های برگزیده به‌عنوان فضای جست‌وجو به الگوریتم‌های نام‌برده معرفی شد.



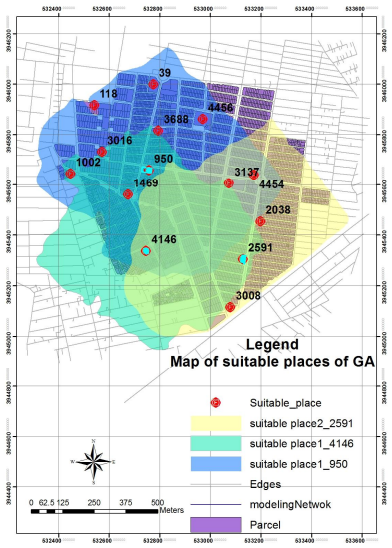
شکل ۳ نقشهٔ مکان‌های مستعد جهت ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی در منطقهٔ مورد مطالعه

۴-۱- اجرای الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک در چهار سناریو با توجه به پارامترهای درنظر گرفته‌شده در منطقهٔ مطالعاتی اجرا شده است. در سناریوی اول، با جمعیت اولیهٔ ۱۰۰، اگر تعداد نسل‌ها به ۲۰۰ برسد یا اگر ۵۰ نسل جمعیت بدون تغییر باقی بماند، الگوریتم متوقف خواهد شد. مشاهده می‌شود هنگامی‌که تعداد نسل‌ها به ۲۰۰ رسید، الگوریتم متوقف شد. میزان تابع هدف در این سناریو $۵/۵۱۸\times۱۰^{٤}$ است و حل مسئله ۱۲ دقیقه و ٤٥ ثانیه به‌طول انجامید. در سناریوی دوم با جمعیت اولیهٔ ۱۰۰، اگر تعداد نسل‌ها به ٤۰۰ برسد یا اگر ۱۰۰ نسل جمعیت بدون تغییر باقی بماند، الگوریتم متوقف خواهد شد. هنگامی‌که الگوریتم به نسل ٤۰۰ رسید، متوقف شد. میزان تابع هدف در این سناریو $۵/۰۱۹\times۱۰^{٤}$ است و حل مسئله ۱۸ دقیقه و ۳۲ ثانیه طول کشید. نقشهٔ مکان‌های بهینه و نحوهٔ پوشش منطقه در شکل شمارهٔ چهار و نمودار تغییرات میزان تابع هدف به تعداد نسل در شکل شمارهٔ پنج ارائه شده است.

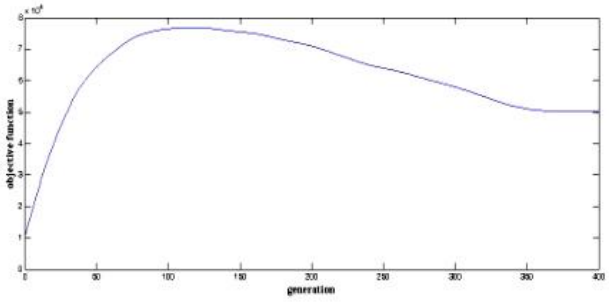


الف

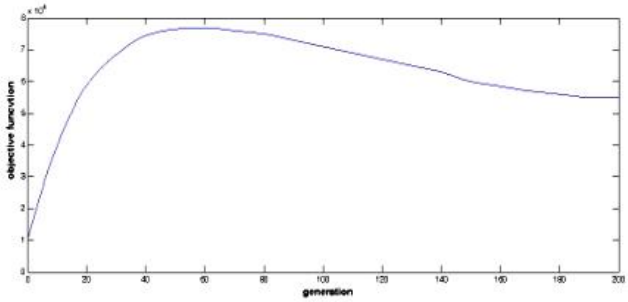


ب

شکل ۴ نقشهٔ مکان‌های بهینهٔ روش (**GA**) با جمعیت اولیهٔ ۱۰۰
سناریوی دوم با تعداد نسل ٤۰۰ (نقشهٔ الف)، سناریوی اول با تعداد نسل ۲۰۰ (نقشهٔ ب)



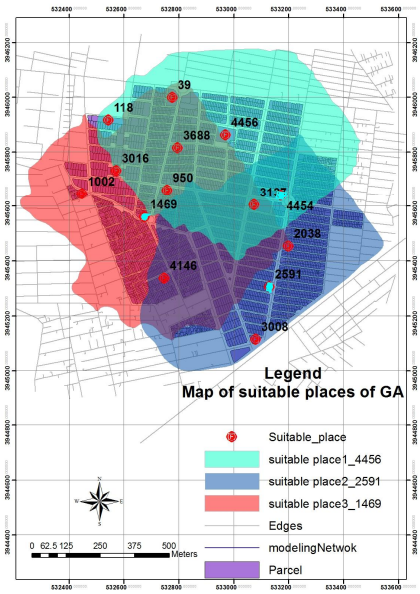
الف



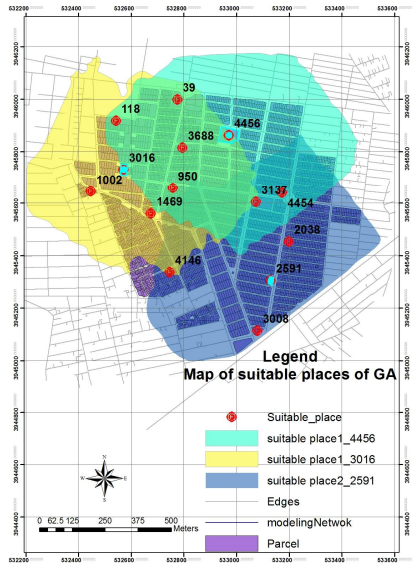
ب

شکل ۵ نمودار تعداد نسل و میزان تابع هدف روش **GA** با جمعیت اولیهٔ ۱۰۰
سناریوی دوم با تعداد نسل ٤۰۰ (نمودار الف)، سناریوی اول با تعداد نسل ۲۰۰ (نمودار ب)

در سناریوی سوم با جمعیت اولیهٔ ۲۰۰، اگر تعداد نسل‌ها به ۲۰۰ برسد یا اگر ۵۰ نسل جمعیت بدون تغییر باقی بماند، الگوریتم متوقف می‌شود. مشاهده می‌شود هنگامی‌که الگوریتم به نسل ۱۹۰ رسید، الگوریتم متوقف شد. میزان تابع هدف $٤/٩٨٦\times١٠^{٤}$ است و حل مسئله ٢٦ دقیقه و ۱۳ ثانیه به‌طول انجامید. در سناریوی چهارم با جمعیت اولیهٔ ۲۰۰، اگر تعداد نسل‌ها به ٤۰۰ برسد یا اگر ۱۰۰ نسل جمعیت بدون تغییر باقی بماند، الگوریتم متوقف می‌شود. مشاهده می‌شود هنگامی‌که به نسل ۳٦۰ رسید، الگوریتم متوقف شد. میزان تابع هدف در این سناریو $٤/٨١٣\times١٠^{٤}$ است و حل مسئله ۲۹ دقیقه و ٥٦ ثانیه طول کشید. نقشهٔ مکان‌های بهینه و نحوهٔ پوشش منطقه در شکل شمارهٔ شش و نمودار تغییرات تعداد نسل‌ها به میزان تابع هدف در شکل شمارهٔ هفت نمایش داده شده است.



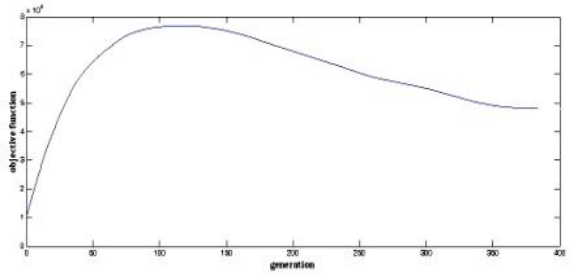
الف



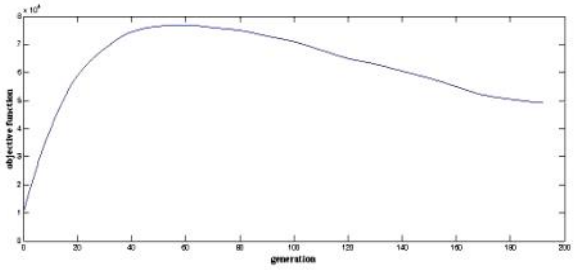
ب

شکل ۶ نقشهٔ مکان‌های بهینهٔ روش **GA** با جمعیت اولیهٔ ۲۰۰

سناریوی چهارم با تعداد نسل ۴۰۰ (نقشهٔ الف)، سناریوی سوم با تعداد نسل ۲۰۰ (نقشهٔ ب)



الف

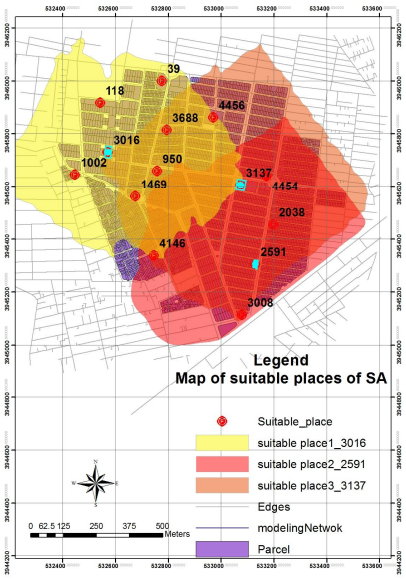


ب

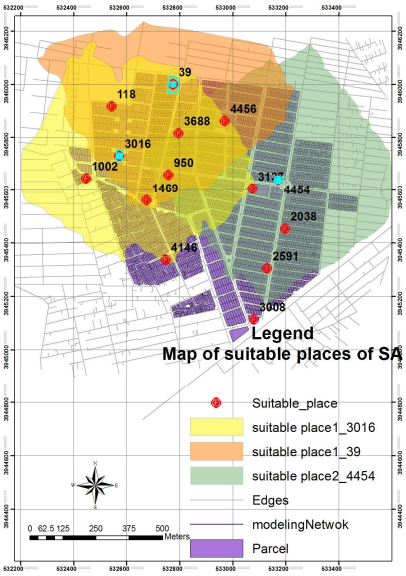
شکل ۷ نمودار تعداد نسل و میزان تابع هدف روش **GA** با جمعیت اولیهٔ ۲۰۰
سناریوی چهارم با تعداد نسل ۴۰۰ (نمودار الف)، سناریوی سوم با تعداد نسل ۲۰۰ (نمودار ب)

۴-۲- اجرای روش شبیه‌سازی بازپخت (SA)

در روش SA، معیار خاتمه به تعداد تکرارها و شرط دما وابسته است. این روش در دو سناریو طراحی و اجرا می‌شود. در سناریوی اول، اگر تعداد تکرارها به ۲۰۰۰ برسد یا میزان تغییر دمای قبل و بعد دو تکرار متوالی از (10^{-3}) کوچک‌تر باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد. میزان تابع هدف در این سناریو $5/728\times10^{4}$ است و حل مسئله ٦ دقیقه و ۱۸ ثانیه به‌طول انجامید. در سناریوی دوم، اگر تعداد تکرارها به ٤۰۰۰ برسد یا اگر تغییر دمای قبل و بعد از عدد (10^{-4}) کوچک‌تر باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد. مشاهده می‌شود که الگوریتم پس از تکرار ۳۸۵۰ متوقف شد. میزان تابع هدف در این سناریو $4/991\times10^{4}$ است و حل مسئله ۱۱ دقیقه و ۲۷ ثانیه طول کشید. نقشهٔ مکان‌های بهینه و نحوهٔ پوشش منطقه در شکل شمارهٔ هشت و نمودار تغییرات میزان تابع هدف به تعداد تکرار در شکل شمارهٔ نه نمایش داده شده است. مکان‌های انتخاب‌شده در سناریوی دوم در مقایسه با سناریوی اول پوشش بهتری داشته است.



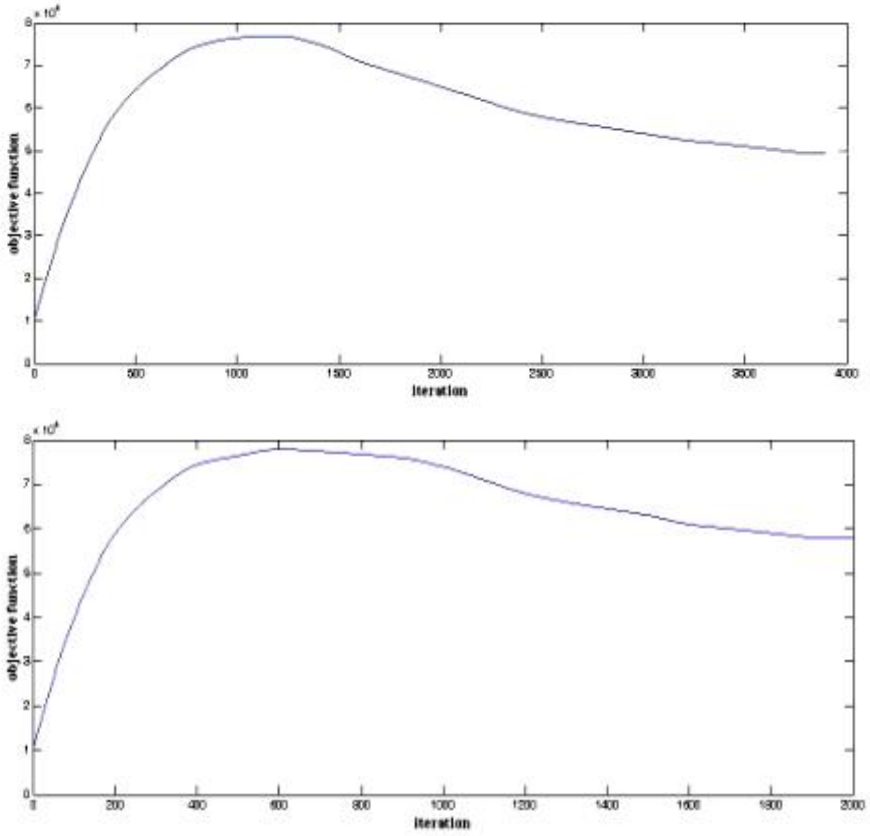
الف



ب

شکل ۸ نقشهٔ مکان‌های بهینهٔ روش **SA**

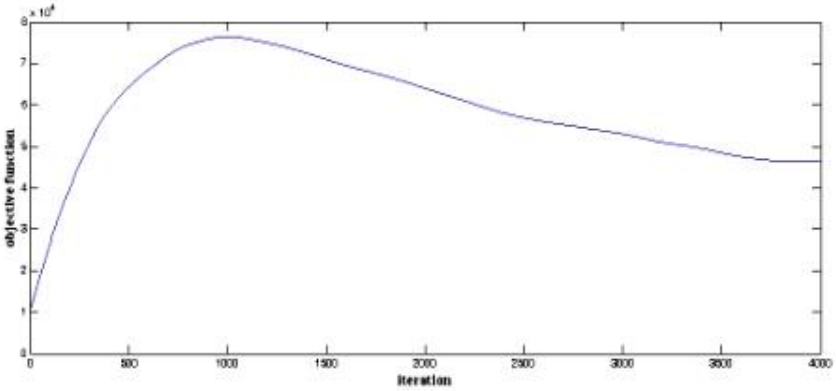
سناریوی دوم با تکرار ۴۰۰۰ (نقشهٔ الف)، سناریوی اول با تکرار ۲۰۰۰ (نقشهٔ ب)

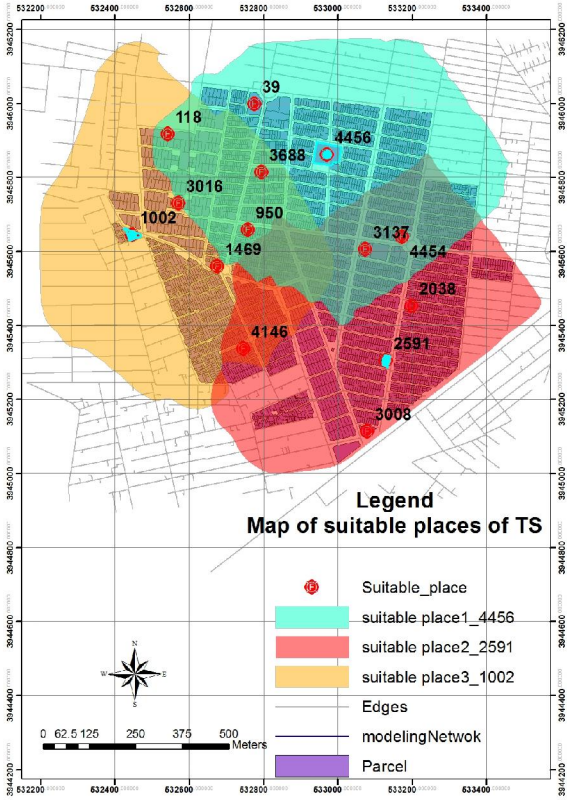


شکل ۹ نمودار تعداد تکرار و میزان تابع هدف روش **SA**

۴-۳- اجرای الگوریتم جست‌وجوی ممنوع

در روش TS شرط توقف، تعداد تکرار حرکت‌ها و اختلاف میزان تابع هدف دو حرکت متوالی است. اگر تعداد تکرارها به ٤٠٠٠ برسد و یا میزان تابع هدف دو حرکت متوالی از عدد ($۱۰^{-٦}$) کمتر شود، الگوریتم متوقف خواهد شود. میزان تابع هدف در این روش $٤/٧٤٩\times۱۰^{٤}$ است و حل مسئله ۳۸ دقیقه و ٤٢ ثانیه به‌طول انجامید. نمودار تعداد تکرار حرکات به میزان تابع هدف و نقشهٔ مکان‌های بهینه و نحوهٔ پوشش منطقه توسط مکان‌های بهینه در شکل شمارهٔ ده آمده است:





شکل ۱۰ نقشهٔ مکان‌های بهینه و نمودار تعداد تکرار حرکات به میزان تابع هدف در روش جست‌وجوی ممنوع

۵- ارزیابی و مقایسهٔ روش‌های اجرا

در این تحقیق، روش‌های اجرا از دیدگاه‌های زمان حل مسئله، مقدار تابع هدف، تعداد تکرار و نحوهٔ پوشش منطقه مقایسه و ارزیابی شده است. در بین روش‌های اجرا، روش جست‌وجوی ممنوع بیشترین زمان محاسباتی (۳۸ دقیقه و ٤۲ ثانیه) و کمترین مقدار تابع هدف ($٤/٧٦٩\times١٠^{٤}$) را دارد. سه مکان انتخاب‌شده (۱، ۷ و۱۳) در این روش تمام منطقهٔ مورد مطالعه را به‌خوبی پوشش داده است. در میان سناریوهای روش GA، سناریوی چهارم دارای بالاترین زمان حل مسئله (۲۹ دقیقه و ٥٦ ثانیه) و کمترین مقدار تابع هدف ($٤/٨١٣\times١٠^{٤}$) است و ازنظر دقت، بعد از روش جست‌وجوی ممنوع در جایگاه دوم قرار دارد. در سناریوهای روش GA، با افزایش جمعیت اولیه، پوشش منطقه توسط مکان‌های بهینه بهبود می‌یابد. سناریوی دوم روش SA با تعداد تکرار ٤۰۰۰، زمان حل مسئلهٔ بالاتر و مقدار تابع هدف کمتری نسبت به سناریوی اول این روش دارد. سناریوی اول روش SA ازنظر زمان حل مسئله در جایگاه اول قرار دارد که نشان‌دهندهٔ پایین بودن زمان حل روش SA نسبت به سایر روش‌های اجراست. زمان حل مسئله در دو سناریوی روش SA، در مقایسه با سناریوهای روش GA کاهش یافته است؛ ولی پوشش منطقه در حالت کلی در روش اجرای الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری دارد. در روش SA هنگامی‌که تعداد تکرارها از اندازهٔ مسئله بزرگ‌تر شود، نتایج مطلوبی به‌دست می‌آید. این مطلب در سناریوی دوم روش SA در تحقیق حاضر به اثبات رسیده است. نقشهٔ مکان‌های تولیدشده در سناریوی دوم این روش عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با سناریوی اول داشته است و همچنین با مکان‌های تولیدشده در سناریوی سوم روش GA هم‌پوشانی خوبی دارد.

جدول ۱ ارزیابی و مقایسهٔ نتایج روش‌های اجرا

روش اجرا	مقدار تابع هدف	زمان حل مسئله	رتبه‌بندی ازنظر دقت	رتبه‌بندی (زمان حل)
روش جست‌وجوی ممنوع (TS)	٤.٧٤٩×١٠^٤	٣٨′ ٤٢″	١	٧
روش ژنتیک (GA) سناریوی ١	٥.٥١٨×١٠^٤	١٢′ ٤٥″	٦	٣
روش ژنتیک (GA) سناریوی ٢	٥.٠١٩×١٠^٤	١٨′ ٣٢″	٥	٤
روش ژنتیک (GA) سناریوی ٣	٤.٩٨٦×١٠^٤	٢٦′ ١٣″	٣	٥
روش ژنتیک (GA) سناریوی ٤	٤.٨١٣×١٠^٤	٢٩′ ٥٦″	٢	٦
روش شبیه‌سازی بازپخت (SA) سناریوی ١	٥.٧٢٨×١٠^٤	٦′ ١٨″	٧	١
روش شبیه‌سازی بازپخت (SA) سناریوی ٢	٤.٩٩١×١٠^٤	١١′ ٢٧″	٤	٢

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله پارامترهای مورد نظر به دو گروه تقسیم شد. پارامترهای مربوط به شرایط لازم و ضروری به‌عنوان فیلتر اولیه برای گزینش نقاط با حداقل شرایط لازم استفاده شد. در مرحلهٔ دوم هم سایر پارامترها به‌عنوان بخشی از شرایط بهینگی به‌کار رفت. برخلاف سایر تحقیقات موجود، تمام بلوک‌های شهری براساس یک فاصلهٔ زمانی سفر درطول شبکه به مراکز آتش‌نشانی تخصیص یافت. یکی از شرایط بهینگی کمینه کردن هم‌پوشانی این مناطق تخصیص‌یافته و افزایش پوشش هم‌زمان کل منطقهٔ مورد مطالعه توسط این سه مرکز است. چنین روندی برای لحاظ کردن پارامترها در دو مرحله و نحوهٔ استفاده از پوشش و تخصیص مناطق کاری جدید است که در سایر تحقیقات مشاهده نشد. در بین روش‌های اجرا، روش جست‌وجوی ممنوع بیشترین زمان محاسباتی (۳۸ دقیقه و ٤٢ ثانیه) و کمترین مقدار تابع هدف (٤/٧٦٩×١٠^٤) را دارد. روش اجرای ژنتیک هم ازنظر مقدار تابع هدف و دقت روش

اجرا- با توجه به پوشش منطقه توسط مکان‌های بهینهٔ سناریوی چهارم الگوریتم ژنتیک- بعد از روش جست‌وجوی ممنوع در جایگاه دوم قرار دارد. در روش SA هنگامی‌که تعداد تکرارها از اندازهٔ مسئله بزرگ‌تر می‌شود، این روش نتایج مطلوبی دربردارد. این مطلب در سناریوی دوم روش SA در این تحقیق به اثبات رسیده است. نقشهٔ مکان‌های تولیدشده در سناریوی دوم روش SA عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با سناریوی اول دارد و همچنین با مکان‌های تولیدشده در سناریوی سوم روش GA هم‌پوشانی خوبی دارد که تأییدکنندهٔ ارائهٔ جواب‌های مناسب با افزایش تکرارهای بیشتر از اندازهٔ مسئله در روش اجرای SA است. سناریوی اول روش شبیه‌سازی بازپخت ازنظر زمان حل مسئله در جایگاه اول قرار دارد. این مطلب نشان‌دهندهٔ پایین بودن زمان حل روش SA در مقایسه با سایر روش‌های اجراست.

طراحی تابع هدف براساس مسئلهٔ میانه و مسئله مرکز و استفاده از دیگر روش‌های فراابتکاری مانند روش کلونی مورچگان و الگوریتم ممتیک در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق، مسئلهٔ مکان‌یابی مراکز آتش‌نشانی از نوع ایستاست. بنابراین مکان‌یابی مراکز خدماتی ازجمله مراکز آتش‌نشانی به‌صورت پویا با توجه به حفظ کارایی برای مدت طولانی‌تر و صرفه‌جویی در هزینه‌ها در تحقیقات آتی از دیگر پیشنهادهای نگارندگان است. همچنین، پیشنهاد می‌شود در ادامهٔ تحقیق، مجموعه‌آزمون‌های کاملی ازنظر حساسیت به پارامترها، مقادیر اولیه و... برای هریک از روش‌های پیشنهادی صورت گیرد.

۷- منابع

- بهزادی، سعید و علی‌اصغر آل‌شیخ، «توسعهٔ روش‌های مسیریابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، دانشکدهٔ نقشه‌برداری و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۷.
- دهقانیان، ولدان زوج محمدجواد، «استخراج عوارض توسط الگوریتم ژنتیک»، دانشکدهٔ نقشه‌برداری و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۵.

- Adel, A. A. & John A. W., "Probabilistic Formulation of the Emergency Service Location Problem", *Journal of Operational Research Society*, Pp. 1116-1179, 1978.
- Aras, N., M. Orbay & I. K. Altinel, "Efficient Heuristics for the Rectilinear Distance Capacitated Multi-Facility Weber Problem", *Journal of the Operational Research Society, Vol. 59,* Pp. 64-79, 2008.
- Aras, N., S. Yumusak & I. K. Altinel, "Solving the Capacitated Multi-Facility Weber Problem by Simulated Annealing Threshold Accepting and Genetic Algorithms", *Journal of Springer*, Pp. 91-112, 2007.
- Arostegui, Jr. M. A., S. N. Kadipasaoglub & M. Khumawal, "An Empirical Comparison of Tabu Search, Simulated Annealing, and Genetic Algorithms for Facilities Location Problems", *Journal of International Journal of Production Economics*, *Vol. 103*, Pp. 742-754, 2006.
- Brimberg, J., P. Hansen & N. Mladenovi, "Improvements and Comparison of Heuristics for Solving the Uncapacitated Multisource Weber Problem", *Journal of Operations Research*, *Vol. 48,* Pp. 444-460, 2000.
- Chiyoshi, F. & R. Galvão, "A Statistical Analysis of Simulated Annealing Applied to the P-median Problem", *Journal of Annals of Operations Research, Vol. 96,* Pp. 61-74, 2000.
- Cooper, L., "Heuristic Methods for Location- Allocation Problem", *Journal of Operation Research, Vol. 48,* Pp. 444-460, 1964.
- Cooper, L., "Location- Allocation Problems", *Journal of Operations Research, Vol. 11*, Pp. 331-343, 1963.

- Gong, D. Gen M., G. Yamazaki & W. Xu, "Hybrid Evolutionary Method for Capacitated Location- Allocation Problem", *Journal of Computers and Industrial Engineering*, *Vol. 33*, Pp. 577-680, 1997.
- Hakimi, S. L., "Optimum Location of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph", *Journal of Operations Research, Vol. 12*, Pp. 450-459, 1964.
- Hansen, P., N. Mladenvic & E. Taillard, "Heurestic Solution of the Multisource Weber Problem as a P-median Problem", *Journal of Operation Research Letters, Vol. 22*, Pp. 55-62, 1997.
- Levanova, T. V. & M. A. Loresh, "Algorithms of Ant System and Simulated Annealing for the P-median Problem", *Journal of Automation and Remote Control, Vol. 65,* Pp. 431-438, 2004.
- Li, X. & Yeh A. Gar-On, "Integration of Genetic Algorithms and GIS for Optimal Location Search", *Journal of International Journal of Geographical Information Science, Vol. 19*, Pp. 581-601, 2005.
- Love, R. F., J. G. Morris & G. O. Wesolowshy, *Facilities Layout and Location: Models and Meyhods*, New York: North-Holland : [s.n.], 1988.
- Melaine, M., *An Introduction to Genetics Algorithms,* [s.l.] : The MIT Press, 1998.
- Murray, A. T. & R. L. Church, "Applying Simulated Annealing to Location-Planning Models", *Journal of Heuristics, Vol. 2*, Pp. 31-53, 1996.
- Schilling, D. A., "Dynamic Location Modeling for Public-Sector Facilities: A Multicriteria Approach"*, Journal of Decision Sciences, Vol. 11,* Pp. 174-274, 1980.

– Weber, A., *Alfred Weber's Theory of the Location of Industries,* Univercity of Chicago : [s.n.], 1929.

– Zhou, J. & B. Lin, "New Stochastic Models for Capacitated Location-Allocation Problem", *Journal of Computers and Industrial Engineering*, *Vol. 45*, Pp. 111-125, 2003.