مطالعات ساختار و کارکرد شهری، سال هفتم، شماره‌ی بیست و دو، بهار ۱۳۹۹، صفحات ۶۰-۳۷

بررسی وضعیت تخصیص چندهدفهٔ ایستگاه‌های آتش‌نشانی با مدل میانهٔ تخصیص‌برداری ترتیبی در محیط GIS [۱]

سمیرا بلوری [۲]
دکتر علیرضا وفایی‌نژاد [۳]
دکتر علی‌اصغر آل‌شیخ [۴]
دکتر حسین آقامحمدی [۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶

چکیده

آنالیز مکان‌یابی و تخصیص یکی از مهم‌ترین آنالیزهای شبکه و در زمرهٔ آنالیزهای بسیار کاربردی در GIS است. این آنالیز مدل‌های مختلفی را شامل می‌شود که هریک برای حل مسائل مختلفی کاربرد دارند. اخیراً یک مدل جدید به نام VAOMP (مدل میانهٔ تخصیص‌برداری ترتیبی) توسعه داده شده است که می‌تواند بسیاری از مسائل مختلف را حل کند. با توجه به اینکه مسائل مکان‌یابی و تخصیص در زمرهٔ مسائل بسیار سخت هستند حل آن‌ها به روش‌های دقیق تقریباً ناممکن است. بنابراین تحقیق حاضر جهت حل مسئلهٔ تخصیص مناسب جمعیت به ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود که از جمله تسهیلات اضطراری هستند و بررسی تخصیص بهینه آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است، از مدل VAOMP و الگوریتم ژنتیک و تبرید با سه هدف کمینه کردن زمان رسیدن خودروهای آتش‌نشانی به محل تقاضاها، کمینه کردن فاصله و بیشینه کردن پوشش هر ایستگاه در شعاع ۵ دقیقه، در منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ شهر تهران استفاده می‌کند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در زمان کوتاهتر، جواب‌های با کیفیت‌تری را تولید می‌کند ضمن اینکه تعداد ۱۰ ایستگاه موجود در منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ تهران جهت سرویسدهی به کل تقاضاهای موجود در منطقه کافی نیست و تعداد ۵۵۲۴۰ نفر بدون خدمات خواهند ماند و حداقل باید ۱۳ ایستگاه در منطقه ایجاد کرد.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی و تخصیص، ایستگاه آتش‌نشانی، VAOMP، GIS، الگوریتم ژنتیک و تبرید

---

[۱] مقاله برگرفته از رساله دکتری رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می باشد.

[۲] دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
[۳] استادیار سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه شهید بهشتی a_vafaei@sbu.ac.ir
[۴] استاد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
[۵] استادیار سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۱- مقدمه

مکان‌یابی بهینه تسهیلات و تخصیص بهینه شهروندان به این تسهیلات اهمیت بسیاری دارد. زیرا اگر مکان تسهیلات مناسب نباشد ضمن اینکه قادر به خدمات‌رسانی بهینه به متقاضی‌ها نخواهند بود، اتخاذ تصمیم ناصحیح در مورد مکان‌یابی تسهیلات منجر به کاربری ناصحیح زمین، آسیب به زمین و هدر رفت هزینه ساخت آن تسهیل خواهد شد. اما آنالیزهای مکان‌یابی بیش از ۴ دهه است که مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند. آنالیز مکان‌یابی- تخصیص یکی از مهم‌ترین آنالیزهای GIS است که موقعیت‌های بهینه تسهیلات را برای خدمات‌رسانی بهینه به تقاضاها معرفی می‌کند. خدمات‌رسانی بهینه تسهیلات اضطراری و اورژانسی مانند ایستگاه‌های آتش‌نشانی به دلیل اینکه با جان و مال مردم در ارتباط هستند از اهمیت زیادی برخوردار است. تقاضا، جمعیت یا مشتری‌ها می‌توانند بر اساس فاکتورهایی همچون کمترین فاصله، کمترین هزینه و ... به تسهیلات اختصاص یابند. بهترین موقعیت به شرایطی مانند فاصله بهینه، ظرفیت امکانات، تراکم جمعیت، هزینه بهینه و... بستگی دارد (شمسول آرفین[۱]، ۲۰۱۱). راه‌حل مکان‌یابی- تخصیص می‌تواند برای حل یک مسئله با یک شرط یا هدف، مانند فاصله بهینه و یا ترکیبی از چند هدف و شرط، مانند فاصله بهینه و ظرفیت تسهیلات یا خدمات‌رسانها، و یا ظرفیت تسهیلات و هزینه ساخت تسهیلات و ... استفاده شود. موقعیت بد یک ایستگاه آتش‌نشانی، سرویسدهی نامناسب آن را در پی خواهد داشت. اگر موقعیت یک ایستگاه، از مکان‌های شلوغ و پرجمعیت دور باشد، به خوبی قادر به سرویس‌دهی نخواهد بود. بنابراین موقعیت امکانات باید به خوبی تعیین و توزیع شده باشد تا بتواند پاسخگوی تقاضای مردم باشد.

بنابراین تحقیق حاضر جهت حل مسئلهٔ تخصیص بهینه جمعیت به ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود در منطقهٔ مورد مطالعه و بررسی تعداد جمعیتی که بدون خدمات باقی می‌مانند از GIS جهت انجام تحلیلها، آماده‌سازی داده‌ها و ایجاد خروجی کمک می‌گیرد. از آنجایی که مسئلهٔ مکان‌یابی و تخصیص در گروه مسائل بسیار دشوار است روش‌های دقیق قادر به حل مسئلهٔ بخصوص در ابعاد بزرگ نیستند بنابراین در این تحقیق از دو الگوریتم تبرید و ژنتیک برای حل مسئله استفاده خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه در مسئله تخصیص ایستگاه‌های آتش‌نشانی چندین هدف مؤثر هستند مسئله با در نظر گرفتن سه شرط مهم شامل: کمینه کردن فاصله، کمینه کردن زمان و بیشینه کردن پوشش حل خواهد شد که این پیچیدگی مسئله را چندین برابر افزایش می‌دهد. از طرفی از مدل ترکیبی VAOMP[۲] که اخیراً در زمینه تخصیص توسعه داده شده و می‌تواند بسیاری از مسائل را حل کند استفاده خواهد شد. تاکنون استفاده از این مدل ترکیبی

[۱] Shamsul Arifin

[۲] Vector Assignment Ordered Median Problem

جدید که در حل هیچ مسئله‌ای استفاده نشده است، به‌صورت چندهدفه برای بررسی تخصیص ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود در مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران استفاده خواهد شد.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

به‌طور کلی، ۴ مدل اصلی برای مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص وجود دارد که عبارتند از مدل میانه[۱]، مسئلهٔ مکان‌یابی ساده[۲]، مسئلهٔ مرکز[۳]و پوشش[۴] (برندیو و چیو[۵]، ۱۹۸۹). هدف مسئلهٔ میانه، تعیینP تسهیل در یک مجموعه از پیش تعریف شده با n تسهیل کاندید، به منظور راضی کردن مجموعه‌ای از تقاضاهاست به گونه‌ای که مجموع کل فاصله بین هر نقطه تقاضا و نزدیکترین تسهیلش کمینه شود (کوریا[۶] و همکاران، ۲۰۰۴) هدف مسئلهٔ پوشش، یافتن تسهیلات برای مشتریهاست به گونه‌ای که امکان دسترسی به سرویس در یک فاصله مشخص را فراهم کند (چرچ و ریولی[۷]، ۱۹۷۶). در مدل مرکز به جای در نظر گرفتن فاصله پوششی ثابت، تعداد معین مراکز خدماتی را به گونه‌ای مکان‌یابی می‌کنیم که بیشترین فاصله پوششی کمینه شود (حکیمی[۸]، ۱۹۶۴). هدف مسئلهٔ مکان‌یابی ساده کمینه کردن هزینه‌های سفر جهت استقرار و اجرایی شدن تسهیلات است مانی، ۱۹۶۴؛ بلینسکی[۹]، ۱۹۶۵).

با توسعه تکنیک‌های بهینه‌سازی، برنامه‌نویسی ریاضی، تئوری محاسباتی، الگوریتم‌ها و سخت‌افزار کامپیوترها، آنالیز مکان‌یابی توسعه زیادی داشته است. مدل‌های بسیاری با شروط و قیدهای مختلف توسعه یافته‌اند تا پیچیدگی‌های مسائل دنیای واقعی را پوشش دهند. این مدل‌ها در تابع هدف و ساختارشان متفاوت از یکدیگر هستند اما در واقع برگرفته از همین ۴ مدل اصلی هستند. امروزه استفاده از GIS جهت انجام تحلیل‌ها در مسائل مکان‌یابی (قهری و همکاران، ۱۳۹۳) و مکان‌یابی- تخصیص بسیار رواج یافته است. GIS اغلب برای جمع‌آوری و سازماندهی داده‌های معرفی مکان‌های کاندید و تولید خروجی‌های گرافیکی مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص مورد استفاده قرار می‌گیرد (چرچ[۱۰]، ۲۰۰۲).

---

۱ P-Median Problem

۲ Simple Plant Location Problem (SPLP)

۳ P-Center Problem

۴ Covering Problem

۵ Brandeau and Chiu

۶ Correa et al

۷ Church and Revelle

۸ Hakimi

۹ Manne & Balineski

۱۰ Church

تحقیقات زیادی تاکنون با استفاده از مدل‌های مکان‌یابی و تخصیص در محیط GIS با کمک روش‌های فراابتکاری انجام گرفته است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. مسئلهٔ بهینه‌سازی مکان‌یابی- تخصیص به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک ابتدا به‌وسیلهٔ هوسیج و گوچایلد[۱] در سال ۱۹۸۶ حل شد. آن‌ها از این الگوریتم برای حل مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص از نوع میانه استفاده کردند که هدف آن‌ها کمینه کردن فاصله بین امکانات و نودها بود. نوشته‌های معدودی درباره استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تعیین موقعیت وجود دارد. تحقیق هوسیج و گود چایلد به‌عنوان پیشگام در عرصه تعیین موقعیت ظاهر شد (یانگ[۲] و همکاران، ۲۰۰۷) و حدوداً سه دهه است که مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص به‌صورت موفقیت‌آمیز، به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ژو[۳] و دیگران در سال ۲۰۰۳ یک مسئلهٔ تخصیص مشتری به فروشگاه را به کمک الگوریتم ژنتیک حل کردند. آن‌ها ۲ هدف را در این تحقیق بررسی کردند. در این تحقیق الگوریتم ژنتیکی طراحی شده است تا جواب‌های بهینه پارتو[۴] را برای این نوع مسئله، در یک دوره زمانی کوتاه بیابد (ژو و همکاران، ۲۰۰۳). الگوریتم‌های جست‌وجوی هوشمند می‌توانند به بهبود اجرای جست‌وجوی مکانی کمک کنند. تجربه ثابت کرده است که اجرای الگوریتم ژنتیک بهتر از تبرید و روش جست‌وجوی همسایگی GIS است (لی و یه[۵]، ۲۰۰۵). نیما و اهگی[۶] در ۲۰۱۰ مسئلهٔ بهینه‌سازی مکان‌یابی- تخصیص چندهدفه را به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک انجام دادند و آن‌ها تنها ۹۰ مرکز را بعنوان نقاط تقاضا استفاده کردند. در سال ۲۰۱۳، اقوامی مقدم[۷] و همکاران و دیگران از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای بهینه‌سازی تخصیص مصدومان زلزله به مراکز درمانی استفاده کردند.

در سال ۱۳۸۷ تقوی فرد و شهسواری یک مدل ریاضی جهت حل مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص چندهدفه با استفاده از الگوریتم تبرید ارائه کردند. هدف آنها، کمینه کردن هزینه استقرار تسهیلات و افزایش تأمین فرکانس تقاضا در ساختار موردنظر بود به‌طوریکه هر مشتری حداقل تحت پوشش یک تسهیل قرار گیرد. فضای محاسباتی آن‌ها نیز یک فضای گسسته در نظر گرفته شد. آن‌ها بیان کردند که الگوریتم تبرید طراحی شده، مناسب برای حل مسائل بزرگ و کوچک است (تقوی فرد و شهسواری، ۱۳۸۷). در سال ۲۰۱۳، تورنت[۸] و همکاران و دیگران جهت کاهش زمان حل یک مسئلهٔ مکان‌یابی و تخصیص آن را به کمک الگوریتم تبرید حل کردند. در سال ۲۰۱۸، بلوری[۹] و همکاران و

---

[۱] Hosage & Child
[۲] Yang et al
[۳] Zhou
[۴] Pareto Optimal
[۵] Li & Yeh
[۶] Neeman & Ohgay
[۷] Aghamohammadi
[۸] Torrent at al
[۹] Bolouri

دیگران دو الگوریتم ژنتیک و تبرید را در حل مسئلهٔ مکان‌یابی- تخصیص چندهدفه ایستگاه‌های آتش‌نشانی مقایسه کردند. نتایج کارایی الگوریتم ژنتیک را با حجم تقاضای زیاد نشان داد.

مدل‌های ترکیبی زیادی نیز تاکنون ایجاد شده‌اند که می‌توانند بسیاری از مسائل را حل کنند. ویور و چرچ[۱] نیز مسئلهٔ میانه تخصیص‌برداری[۲] (VAPMP) را ارائه دادند. مدل VAPMP اجازه می‌دهد هر متقاضی خدمات، بتواند از خدمات چندین تسهیلات بهره‌مند شود. ویور و چرچ نشان دادند که VAPMP می‌تواند برای ساختاردهی به بسیاری از مسائل مانند مسئلهٔ پوشش و مسئلهٔ پوشش چند سطحی[۳] استفاده شود (ویور و چرچ، ۱۹۸۶). توسعه مهم دیگر در زمینه مدل‌های مکان‌یابی- تخصیص، مسئلهٔ میانه ترتیبی[۴] (OMP) است که توانایی خلاصه‌سازی مسائل میانه و مرکز را دارد. در این مدل تقاضاها بر اساس نزدیکترین فاصله سرویس و یا کمترین هزینه مرتب می‌شوند. در سال ۲۰۱۴، Lei و Church مدلی را تحت عنوان مدل میانه تخصیص‌برداری ترتیبی (VAOMP) ارائه دادند که هر دو مدلVAPMP و OMP را خلاصه می‌کند و سپس این مدل را با کمک الگوریتم تابو توسعه دادند (Lei et al., 2016) که تاکنون از این مدل در هیچ تحقیقی استفاده نشده است.

۳- روش‌شناسی تحقیق

این تحقیق از نوع کاربردی- توسعه‌ای و روش بررسی آن توصیفی- تحلیلی است. داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش به‌صورت کتابخانه‌ای و حاصل نتایج سرشماری جمعیت، آمار و نقشه‌های موجود در سال ۱۳۹۵ است. ابتدا داده‌ها که شامل شبکهٔ راه‌ها، تقاضاها یا جمعیت موجود در منطقه و ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود هستند آماده‌سازی شده و وارد محیط GIS می‌شوند. سپس برخی از آنالیزها مانند آنالیز شبکه، OD Cost Matrix و ... بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. همان‌طورکه ذکر شد، سه هدف این تحقیق شامل:۱-کمینه کردن فاصله بین تقاضا و ایستگاه‌های آتش‌نشانی ۲-کمینه کردن زمان رسیدن به تقاضا از ایستگاه‌های آتش‌نشانی و ۳-بیشینه کردن پوشش ایستگاه‌های آتش‌نشانی موردنظر است. این سه هدف به کمک جمع خطی وزن‌دار باهم ترکیب می‌شوند. دو هدف اول، مسئلهٔ میانه هستند و هدف سوم، مسئلهٔ پوشش است. هدف کلی، کمینه کردن تابع چندهدفه است، اما در این بین یکی از اهداف از نوع بیشینه است. بنابراین با ضرب عدد ۱- در تابع هدف بیشینه، تابع چندهدفهٔ کمینه حاصل خواهد شد (Erkut et al., 2008).

$$\text{Min Fitness} = w_1 f_1'(v) + w_2 f_2'(v) - w_3 f_3'(v) \quad (۱)$$

[۱] Weaver & Church

[۲] Vector Assignment P-Median Problem (VAPMP)

[۳] Multilevel Covering Problem

[۴] Ordered Median Problem (OMP)

$$W_1 + W_2 + W_3 = 1 \quad (۲)$$

جهت سهولت در حل مسئله، سه وزن W_1 و W_2 و W_3 برابر در نظر گرفته می‌شوند. توابع $f_1'(v)$ و $f_2'(v)$ و $f_3'(v)$ همان مدل VAOMP هستند که a_i یا مقدار وزن در هر کدام از آن‌ها بسته به هدف مسئله متفاوت خواهد بود. در هدف کمینه کردن زمان منظور از a_i همان فاصله میان تقاضا و ایستگاه، در هدف کمینه کردن زمان a_i همان کمترین زمان میان تقاضا و ایستگاه و در هدف پوشش بیشینه زمان تا ۵ دقیقه است. لازم به ذکر است که مدل VAOMP برای تبدیل شدن به مدل پوششی نیاز به اصلاح در پارامتر فاصله خواهد داشت که به‌صورت زیر انجام می‌گیرد.

$$d'_{ij} = \begin{cases} 0 & if \quad d_{ij} \leq s \\ 1 & if \quad d_{ij} > s \end{cases}$$

(۳) ماتریس تبدیل‌شده فاصله

همچنین رویکرد VAOMP برابر مسئلهٔ میانه است زمانی‌که $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = 1$ و بردار تخصیص برابر $\theta = [1]$ با باشد و تعداد سطوح تخصیص نیز یک سطح باشد، (Lei et al., 2016). مدل VAOMP در نرم‌افزار متلب به کمک دو الگوریتم ژنتیک و تبرید توسعه داده می‌شود. پارامترهای بهینه برای هر الگوریتم از طریق آنالیز حساسیت تعیین می‌شود و درنهایت، مدل با یک سیستم با مشخصات 8 GHz CPU،Intel® i7 و حافظهٔ 16 گیگابایت اجرا می‌شود. درصورت کافی نبودن تعداد ایستگاه‌های موجود جهت خدمات‌رسانی به کلیهٔ تقاضاها مکان‌یابی و تخصیص دوباره انجام می‌گیرد تا حداقل ایستگاه‌های لازم در منطقه مشخص شود. شکل ۱ نمایش مراحل اصلی اجرای مدل در منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۳-۱ مدل VAOMP

هدف مسئلهٔ مکان‌یابی و تخصیص، انتخاب موقعیت‌های مناسب دربین تعدادی از تسهیلات برای فراهم کردن سرویس مناسب برای مشتری‌ها و تصمیم‌گیری‌های صحیح در ارتباط با تخصیص مشتری‌ها (مراکز تقاضا)، به تسهیلات با شروط مطرح‌شده است (Abdollahi Demneh et al., 2011). یکی از مدل‌های ترکیبی مکان‌یابی- تخصیص مدل VAOMP است که در سال ۲۰۱۴ به‌وسیلهٔ Lei و Church ایجاد شد و در سال ۲۰۱۶ به کمک الگوریتم تابو توسعه یافت. این مدل می‌تواند بسیاری از مسائل را حل کند. این مدل به‌صورت زیر مطرح می‌شود:

$$Minimize\ Z = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k w_k \quad (۴)$$

$$\sum_{k=1}^{n} w_k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{i=1}^{L} a_i \theta_{il} d_{ij} x_{ij}^{l} \quad \text{برای هر } i \in I \quad (۵)$$

$$w_k \geq \sum_{j \in J} \sum_{i=1}^{L} a_i \theta_{il} d_{ij} x_{ij}^{l} - M.(1 - u_i^k) \quad \text{برای هر } i \in I, k = 1,2, \dots n \quad (۶)$$

$$\sum_{k=1}^{n} u_i^k = 1 \quad \text{برای هر } i \in I \quad (۷)$$

$$\sum_{i \in I} u_i^k = 1 \quad \text{برای هر } k = 1, 2, \dots, n \quad (۸)$$

$$w_k \leq w_{k+1} \quad \text{برای هر } k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (۹)$$

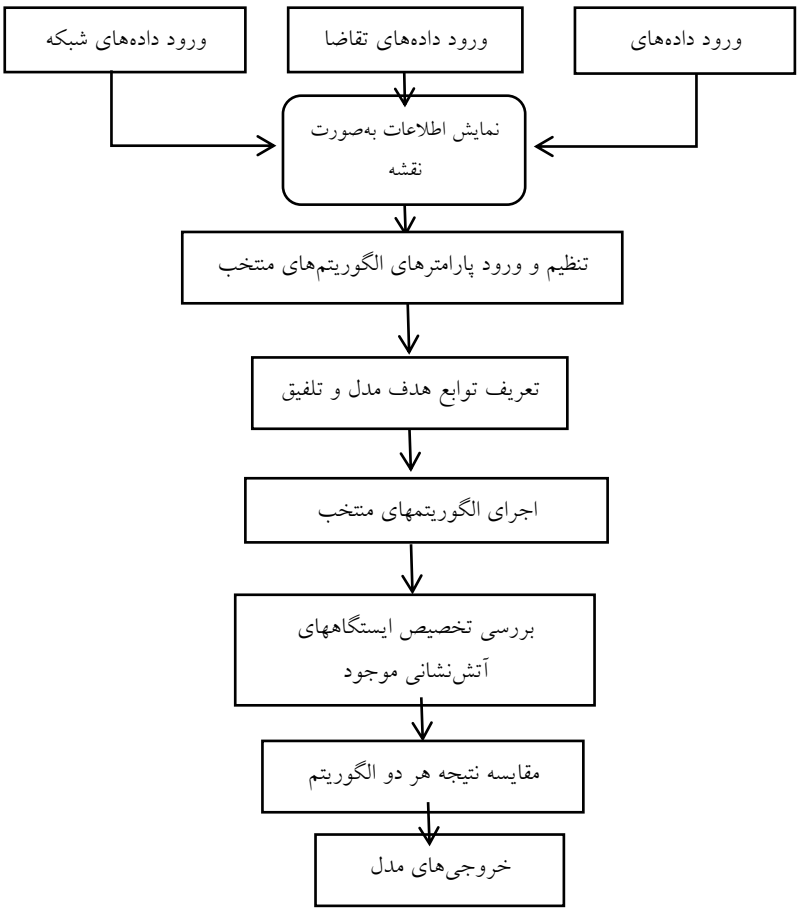
$$\sum_{j\in J}^{L} x_{ij}^{l} \leq y_j \quad \text{برای هر } i \in I, l = 1,2,\dots L \tag{۱۰}$$

$$\sum_{L=1}^{L} x_{ij}^{l} \leq y_j \quad \text{برای هر } i \in I,\ j \in J \tag{۱۱}$$

$$P_2 \leq \sum_{j\in J} y_j \leq P_1 \tag{۱۲}$$

$$0 \leq x_{ij}^{l} \leq 1,\ y_j \text{ and } u_i^k \{0,1\} \tag{۱۳}$$

a_i تقاضا در نقطهٔ i، d_{ij} فاصله یا هزینهٔ بین $i \in I$ و $j \in J$ ، L ماکزیمم تعداد سطوح نزدیکی در نظر گرفته‌شده در مدل برای هر تقاضا، θ_{il} بخشی از تقاضای زمانی در نقطهٔ i که به‌وسیلهٔ l اُمین تسهیل نزدیک به آن خدمات‌رسانی می‌شود، P_1 ماکزیمم تعداد تسهیلات باز و P_2 مینمم تعداد تسهیلات باز



شکل ۱. نمایش مراحل اصلی اجرای مدل در منطقهٔ مورد مطالعه

ترسیم: نگارندگان

قبل از بحث در مورد مدل VAOMP، لازم است که جمع جزئی وزن‌دار فواصل سرویس برای هر تقاضای i (نسبت به L اُمین تسهیل نزدیکش) شرح داده شود. این جمع جزئی وزن‌دار، جمع فواصل تا L اُمین تسهیلات نزدیک است که به‌وسیلهٔ بخشی از سرویس‌دهی به آن تسهیل وزن‌دار شده است. مجموع این جمع‌های جزئی، تابع هدف VAOMP را تشکیل می‌دهد. اندکس k ترتیبی را در بین هزینه‌ها جهت خدمات‌رسانی به تقاضاها معرفی می‌کند حال آنکه اندکس l ترتیب تسهیلات را برحسب فاصله به تقاضای مشخص i معرفی می‌کند.

$$u_i^k = \begin{cases} 1 & \text{اگر تقاضای } i \text{، } k \text{ امین جمع جزئی را تولید کند} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$x_{ij}^l = \begin{cases} 1 & \text{اگر تقاضای } i \text{، به تسهیل } j \text{ به عنوان } l \text{ امین تسهیل باز و نزدیک تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

محدودیت (۵)، برحسب جمع جزئی غیرشرطی w_k در هر سطح ترتیبی یا رنک سرویس k نوشته شده است. محدودیت (۶) به ثابت بزرگی مانند M نیاز دارد این محدودیت‌ها باعث می‌شود زمانی‌که i، k اُمین جمع جزئی کوچک را دارد، جمع جزئی غیرشرطی با جمع جزئی واقعی فاصله‌ها برابر باشد (در ارتباط با تخصیص چندسطحی). محدودیت (۷) و (۸) تعریف می‌کند که هر جمع جزئی تنها و تنها باید به یک ترتیب تخصیص یابد. محدودیت (۹) بیان می‌کند که جمع جزئی k اُمین ترتیب باید کمتر یا برابر با جمع جزئی در ترتیب بعدی باشد. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند هر تقاضا به تسهیلی تخصیص می‌یابد که l اُمین تسهیل نزدیک به آن باشد. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند تنها یک تخصیص در مکان j می‌تواند ایجاد شود، فقط و فقط اگر آن مکان برای یک تسهیل انتخاب شده باشد. محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که تعداد تسهیلات باز باید بین p2 تا p1 باشد. محدودیت (۱۳) محدودهٔ مناسب و محدودیت‌های متغیرهای تصمیم‌گیری را تعریف می‌کند (Lei and Church, 2014).

۲-۳ تبرید

تبرید یکی از قدیمی‌ترین فراابتکاری‌هاست و مطمئناً یکی از اولین الگوریتم‌هایی است که استراتژی صریحی برای گریز از کمینه‌های محلی دارد. ایدهٔ اصلی این است که برای فرار از کمینه‌های محلی اجازهٔ حرکت‌هایی داده شود که منجر به راه‌حل‌هایی با کیفیت پایین‌تر از راه‌حل فعلی می‌شوند. احتمال انجام چنین جابه‌جایی در طول جست‌وجو کاهش می‌یابد. الگوریتم با تولید حالت اولیه (به‌صورت تصادفی یا ابتکاری ساخته می‌شود) و مقداردهی اولیه به پارامتر دمایی T، شروع می‌شود. سپس در هر تکرار یک راه‌حل s’Є N(s) به‌طور تصادفی نمونه‌برداری شده و بسته به f(s)، f(s’) و T، به‌عنوان راه‌حل جاری جدید پذیرفته می‌شود.

مراحل الگوریتم تبرید به‌صورت زیر است:

گام اول: مرحلهٔ اولیه

انتخاب یک جواب اولیه s از S

انتخاب یک درجهٔ حرارت اولیه T_0

تنظیم درجهٔ حرارت مطلق T_a

تنظیم نرخ پایین آمدن درجهٔ حرارت δT// δT می‌تواند هر عدد اعشاری بین ۰ و ۱ باشد.

گام دوم: بهبود جواب

تنظیم شمارندهٔ تعداد دفعات تکرار n=0

تکرار عملیات بالا تا زمانی‌که $T_0 \geq T_a$

ایجاد یک راه‌حل s' در همسایگی هر جواب N(s) به‌صورت تصادفی

محاسبهٔ L=f(s') – f(s) در ازای هر جواب

۱-اگر $L \leq 0$ (درصورت مناسب بودن جواب همسایه) پس s=s'

۲-درصورت مناسب نبودن همسایگی جدید (($L > 0$) انتخاب یک عدد تصادفی، x، از (۰ و ۱)U اگر $x < exp(-L/T)$ پس s = s' و در غیر این صورت ایجاد همسایگی جدید

تنظیم n = n+1

تنظیم $T = T \times \delta T$ t = t+1

درصورت برقرار بودن شرایط توقف، توقف الگوریتم و در غیر این صورت رفتن به گام ۲ (Shamsul Arifin, 2011).

۳-۳ ژنتیک

این الگوریتم به‌دنبال یافتن مقادیر بهینه یا نزدیک به بهینه است. John Holland در دههٔ ۱۹۶۰ درباره این الگوریتم تفکر کرد و روی آن کار کرد (Melanie, 1999). Holland الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان یک روش جست‌وجوی فراابتکاری ابداع کرد. او نه‌تنها جهش را در این الگوریتم معرفی کرد، بلکه از رفتار طبیعی و زیست‌شناسی در سیستم‌های مصنوعی نیز نسخه‌برداری کرد. در حقیقت GA تلاش می‌کند تا به‌صورت محاسباتی پروسهٔ تحول طبیعی را با استفاده از اپراتورهای ژنتیک (انتخاب، تقاطع و جهش) تقلید کند (Didier Lins and Lóez Droguett, 2011).

مراحل اصلی این الگوریتم بسیار ساده است. این الگوریتم با مجموعه‌ای از جواب‌ها آغاز می‌شود و با یک جواب بهینه پایان می‌یابد. مراحل این الگوریتم شامل:

مرحلهٔ اول: ایجاد جمعیت اولیه با تولید مجموعه‌ای از افراد یا کروموزوم‌ها

مرحلهٔ دوم: ارزیابی مناسب بودن ارزش Fitness هر فرد در جامعه

مرحلهٔ سوم: تکرار (ایجاد نسل جدید جمعیت)

a. انتخاب والدین از میان افراد جامعه

b. اجرای ترکیب مجدد یا جهش برای تولید فرد جدید
c. اضافه کردن افراد جدید به جمعیت
d. حذف فرد با فرض مناسب نبودن Fitness یا به‌صورت تصادفی
رفتن به مرحلهٔ سوم تا زمانی‌که شرط پایانی برقرار شود.

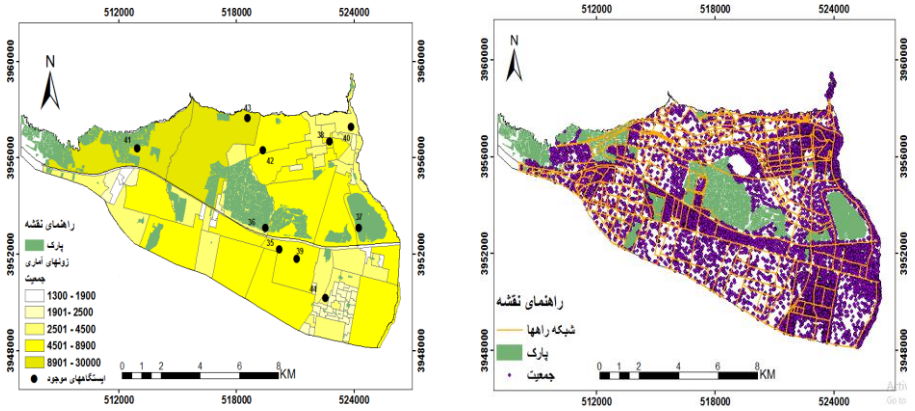
۴- نتایج و یافته‌ها

۴-۱ منطقهٔ مورد مطالعه

در این تحقیق ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود در منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ شهر تهران و جمعیت (تقاضا) ساکن در آن در نظر گرفته می‌شود. مساحت، زون‌های آماری و داده‌های تقاضا از آخرین سرشماری انجام‌شده از وب سایت شهرداری منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ به‌دست آمده است (۱۳۹۷، http://www.Tehransafe.ir). منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ شهر تهران که در سال‌های اخیر رشدی فزاینده را شاهد بوده‌اند و منطقهٔ ۲۲ که دربردارنده برج‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه است، جمعیت زیادی را در خود جای داده است؛ بنابراین گمان می‌رود که با توجه به وسعت زیاد هر دو منطقه و جمعیت موجود در آن‌ها با کمبود تسهیلات شهری و ازجمله ایستگاه‌های آتش‌نشانی مواجه باشند.

منطقهٔ ۲۲ شهر تهران جدیدترین منطقهٔ شهری تهران است که در شمال غرب تهران واقع شده است. این منطقه بین طول‌های شرقی ۵۱ درجه و ۵ دقیقه و ۱۰ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه و ۴۰ ثانیه و عرض‌های شمالی ۳۵ درجه ۳۲ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه و ۱۹ ثانیه واقع شده است. مساحت این منطقه حدود ۶۲۰۰ هکتار است که از این مساحت، ۱۳۰۰ هکتار آن متعلق به فضای سبز است. مطابق با آخرین سرشماری انجام‌شده جمعیت این منطقه بالغ بر ۱۵۰۰۰۰ نفر است که براساس طرح تفصیلی تا سال ۱۴۰۴ جمعیت این منطقه به ۴۵۰۰۰۰ نفر خواهد رسید.

منطقهٔ ۲۱ شهر تهران در طول جغرافیایی ۵۱ درجه حدفاصل اتوبان و جادهٔ قدیم کرج محدود است. مساحت محدودهٔ منطقهٔ ۲۱ بالغ بر ۵۱۵۶ هکتار است که ۷٫۸ مساحت کل مناطق شهر تهران است و در قیاس با مساحت سایر مناطق در زمرهٔ بزرگ‌ترین مناطق شهرداری تهران قرار دارد (www.region21.ir). جمعیت این منطقه مطابق با آخرین سرشماری انجام‌شده برابر ۱۸۶۶۰۰ نفر است و بیش از ۸ درصد جمعیت شهر تهران در این منطقه سکونت دارند (www. Isna.ir). بنابراین با توجه به اینکه مطابق با استانداردهای جهانی هر ایستگاه باید در زمان کمتر از ۵ دقیقه یا در فاصلهٔ ۲ تا ۲٫۷ کیلومتری (فقهی‌فرهمند و حاجی‌کریمی، ۱۳۸۹) بتواند به محل حادثه برسد و با توجه به وسعت کل منطقهٔ مورد مطالعه، تعداد ایستگاه‌های موجود برای پاسخ‌گویی به کل جمعیت منطقه کافی به نظر نمی‌رسد. شکل ۲ جمعیت موجود در منطقه براساس زون‌های آماری و شبکه راه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تقاضاهای جمعیتی واقع در منطقهٔ ۲۱ و ۲۲ شهر تهران و توزیع جمعیت در زون‌های آماری ترسیم: نگارندگان

۴-۲ انجام آنالیز حساسیت و بررسی صحت مدل VAOMP

پس از انجام آنالیز حساسیت جهت تعیین بهترین پارامترها برای هر الگوریتم و اجرای الگوریتم‌ها در منطقهٔ مورد مطالعه با مقایسهٔ نتایج حاصل از هر دو الگوریتم و نمودار هم‌گرایی هر الگوریتم، بررسی صحت مدل انجام می‌گیرد. در هر الگوریتم جهت رسیدن به بهترین نتیجه، پارامترهای مربوط تنظیم خواهد شد. کارایی و اجرای مؤثر هر الگوریتم به پارامترهای آن بستگی دارد. اگرچه این پارامترها می‌توانند مقادیر مختلفی بپذیرند جهت سادگی پردازش، مقادیری برای آن‌ها در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۱ تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

در اجرای آنالیز حساسیت پارامترهای این الگوریتم باید تنظیم شوند که این پارامترها عبارتند از تعداد تکرار، تعداد جمعیت، تقاطع و جهش. منظور از تعداد تکرار، تعداد دفعاتی است که الگوریتم باید اجرا شود تا به جواب بهینه دست یابد. منظور از تعداد جمعیت، تعداد افرادی هستند که در پروسهٔ این الگوریتم وظیفهٔ تولید نسل جدید را برعهده دارند. تقاطع و جهش نیز دو پارامتر هستند که باعث تغییر در ژن‌ها شده و به این ترتیب از افتادن الگوریتم در دام بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کنند.

در زیر به‌طور مفصل در مورد تنظیم آن‌ها بحث خواهد شد.

تأثیر، تعداد، تکرار

برای این الگوریتم نیز تعداد تکرار تا ۱۲۰ مرتبه در نظر گرفته می‌شود. نتیجهٔ آن در شکل ۳ الف نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد با افزایش تعداد تکرار، از مقدار تابع هدف کاسته می‌شود. هم‌چنین هرچقدر که تعداد تکرار افزایش می‌یابد، زمان پردازش نیز افزایش می‌یابد. کمترین مقدار تابع هدف در تعداد تکرار ۱۰۰ مرتبه اتفاق می‌افتد، بنابراین پیشنهاد می‌شود که همین تعداد تکرار به‌عنوان بهینه انتخاب شود.

تأثیر تقاطع

Liao و دیگران از یک تقاطع ۸۰٪ استفاده کردند (Liao et al., 2011). Zhou و دیگران از یک تقاطع ۰,۲-۰,۴ استفاده کردند (Zhou et al., 2003). Wang و دیگران از یک تقاطع ۸۰٪ استفاده کردند (Wang et al., 2011). Kratica و دیگران نیز از یک تقاطع ۸۵٪ استفاده کردند (Kratica et al., 2007). Geroliminis و دیگران بهترین نتیجه را از تقاطع ۰,۴ به‌دست آوردند (Geroliminis et al., 2011). در این تحقیق از تقاطع ۰,۴ تا ۰,۹ استفاده می‌شود. نتیجه در شکل ۳ ب نشان داده شده است. بهترین نتیجه در تقاطع ۰,۶ اتفاق می‌افتد.

تأثیر جهش

Jaramillo بیان می‌کند که میزان جهش باید با مقدار پایین استفاده شود (Jaramillo et al., 2002). Liao و دیگران از یک جهش ۵٪ تا ۱۰٪ استفاده کردند (Liao et al., 2011). Zhou و دیگران از یک جهش ۰,۲-۰,۴ استفاده کردند (Zhou et al., 2003). Wang و دیگران از یک جهش ۱۰٪ استفاده کردند (Wang et al., 2011). Geroliminis و دیگران بهترین نتیجه را از جهش ۰,۱ به‌دست آوردند. آن‌ها میزان جهش را بین ۰,۰۵-۰,۱ و ۰,۲ امتحان کردند (Geroliminis et al., 2011). در این تحقیق، از جهش ۰,۱ تا ۰,۵ استفاده می‌شود. نتیجه در شکل ۳ ج نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد بهترین جهش در ۰,۴ اتفاق می‌افتد.

تأثیر سایز جمعیت

برای رسیدن به نتیجه مطلوب Li وYeh سایز جمعیت ۱۰ را پیشنهاد کردند (Li and Yeh, 2005) . Shamsul Arifin سایز جمعیت ۱۰، ۳۰ و ۵۰ را در تحقیق خود استفاده کرد (Shamsul Arifin, 2011). در این تحقیق از سایز جمعیت ۱۰ تا ۵۰ استفاده می‌شود. نتیجه در شکل ۳ د نشان داده شده است که نشان می‌دهد بهترین نتیجه در سایز جمعیت ۴۰ اتفاق می‌افتد.

۴-۲-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم تبرید

در اجرای آنالیز حساسیت پارامترهای این الگوریتم که باید تنظیم شوند شامل درجهٔ حرارت اولیه، درجهٔ حرارت مطلق و نرخ سرد شدن هستند. مطابق با بیشتر تحقیق‌های انجام‌شده درجهٔ

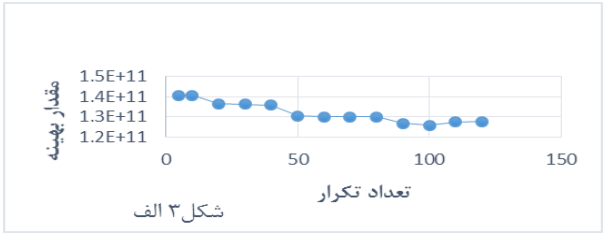
حرارت مطلق ۰,۰۰۱ (Wang et al., 2013) در نظر گرفته می‌شود. در زیر به‌طور مفصل در مورد تنظیم دیگر پارامترها بحث خواهد شد.

درجهٔ حرارت اولیه

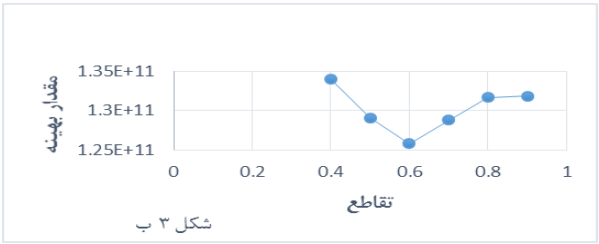
در تحقیق‌های مختلف الگوریتم تبرید، مقادیر مختلفی برای درجهٔ حرارت اولیه استفاده شده است.Murray و Church در مسائل مختلف میانه از مقادیر ۴۰ و ۶۰ استفاده کردند (Murray and Church, 1996). در این تحقیق مطابق با Shamsul Arifin از درجهٔ حرارت اولیه نزدیک به Murray و Church یعنی ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ استفاده می‌شود. شکل ۴ الف نتیجه تنظیم درجهٔ حرارت اولیه را نشان می‌دهد. بهترین نتیجه در ۲۰۰ درجه اتفاق می‌افتد.

نرخ سرد شدن

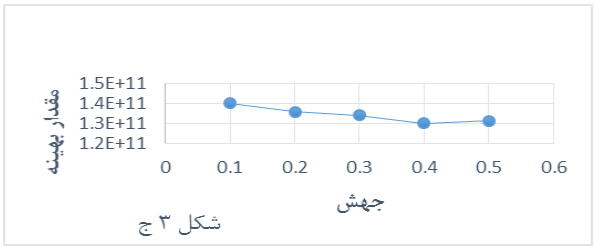
نرخ سرد شدن در یک تحقیق ۰/۹۹۹۹ (Adewole et al., 2012) و در تحقیق دیگر ۰,۹۵ (تقوی فرد و شهسواری، ۱۳۸۷) در نظر گرفته شد. در این تحقیق نرخ سرد شدن بین ۰,۸ تا ۰,۹۹ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ ب نتایج تنظیم این پارامتر را نشان می‌دهد. بهترین نتیجه در ۰,۹ اتفاق می‌افتد.



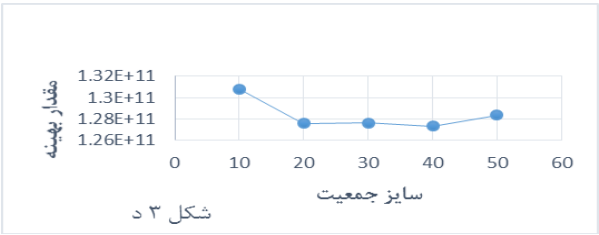
شکل ۳ الف



شکل ۳ ب



شکل ۳ ج



شکل ۳. آنالیز حساسیت الگوریتم ژنتیک

ترسیم: نگارندگان

۴-۳ اجرای مدل

الگوریتم ژنتیک این‌بار به بررسی تخصیص ایستگاه‌های موجود با پارامترهای تنظیم‌شده می‌پردازد. شکل ۵ موقعیت ایستگاه‌های موجود و کاندید را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های کاندید از مکان‌یابی ایستگاه‌های کاندید آتش‌نشانی با در نظر گرفتن معیارهایی زمین‌شناسی مانند شیب، جهت شیب، نوع خاک و گسل و سایر معیارها چون کاربری زمین، دسترسی، شعاع عمکردی، تراکم جمعیتی، تراکم آتش‌سوزی و حوادث و نزدیکی به پارک‌ها و وزن‌دهی معیارها به کمک روش AHP و تلفیق لایه‌ها مانند سایر روش‌های مکان‌یابی (خمر و همکاران، ۱۳۹۳: صابری‌فر، ۱۳۹۷) به‌دست آمده‌اند و تاکنون نیز تحقیقات زیادی نیز در مورد مسئلهٔ مکان‌یابی انجام‌شده است (جعفری مهرآبادی و رخساری، ۱۳۹۷) (که تحقیق حاضر جهت جلوگیری از تکرار به بیان مکان‌یابی نمی‌پردازد). همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، توزیع ایستگاه‌ها در منطقهٔ موردنظر مناسب و عادلانه نیست و بخش‌هایی از منطقهٔ موردنظر با جمعیت زیاد فاقد یک ایستگاه نزدیک برای خدمات‌رسانی در مواقع بحرانی هستند، بنابراین لزوم بررسی وضعیت ایستگاه‌های موجود از طریق آنالیز مکان‌یابی- تخصیص مشهود است. لازم به ذکر است که ایستگاه‌های کاندید در این مرحلهٔ وارد پردازش نمی‌شوند، بلکه در صورت کافی نبودن تعداد ایستگاه‌های موجود در مراحل بعدی وارد پروسه پردازش خواهند شد. شکل ۶ تخصیص مربوط به هر ایستگاه را نشان می‌دهد و جدول ۱ نیز تعداد تخصیص هر ایستگاه و مجموع تقاضاهای تخصیص‌نیافته را نشان می‌دهد.

۴-۳-۱ اجرای الگوریتم ژنتیک

شکل ۴. آنالیز حساسیت الگوریتم تبرید

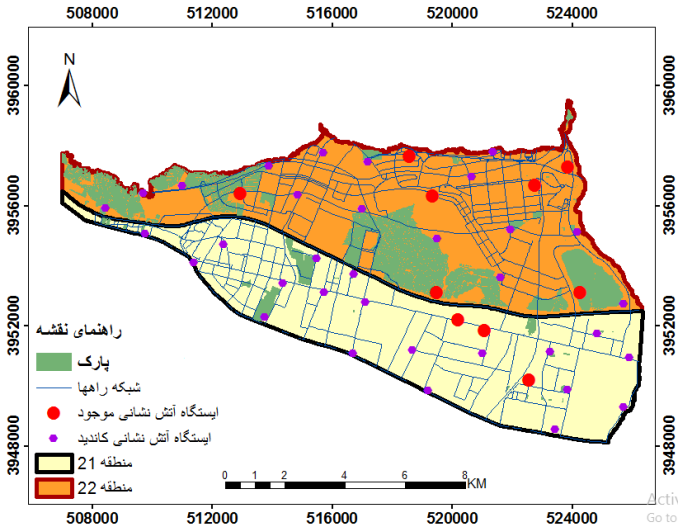
ترسیم: نگارندگان

۴-۳-۲ اجرای الگوریتم تبرید

پس از اجرای الگوریتم تبرید با پارامترهای تنظیم‌شده، نتایج تخصیص در شکل ۷ نشان داده شده است. جدول ۲ نیز تعداد تخصیص هر ایستگاه را نشان می‌دهد.

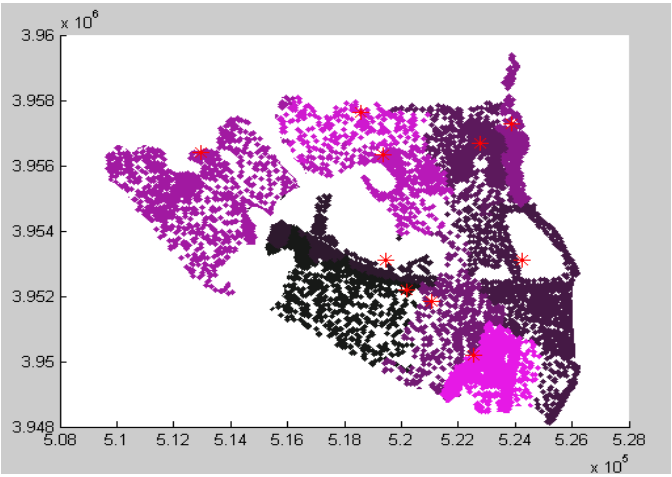
۴-۴ مکان‌یابی و تخصیص دوباره

همان‌طور که نتیجهٔ اجرای الگوریتم تبرید و ژنتیک در منطقهٔ مورد مطالعه (در جداول ۱ و ۲) نشان می‌دهد، ۱۰ ایستگاه آتش‌نشانی موجود برای خدمات‌رسانی به منطقهٔ مورد مطالعه کافی نیست. ازطرفی با توجه به شکل ۵ نیز که توزیع ایستگاه‌های موجود را نشان می‌دهد، مشخص است که ۱۰ ایستگاه موجود در منطقه به‌طور عادلانه توزیع نیافته‌اند و بخش‌های وسیعی از منطقه بدون دسترسی به خدمات خواهند ماند. همین‌طور منطقهٔ ۲۱ که جمعیت زیادی را نیز در خود جای داده است، تنها دارای ۳ ایستگاه آتش‌نشانی است. به همین جهت ازطریق مکان‌یابی، در مکان‌های مناسب جهت ایجاد ایستگاه‌های جدید (با اولویت نزدیکی به راه‌های اصلی و تراکم جمعیت)، تعدادی ایستگاه کاندید (مطابق شکل ۵) ایجاد شد. اکنون جهت برخورداری عادلانهٔ تمام جمعیت از خدمات ایستگاه‌ها، انجام مکان‌یابی و تخصیص دوباره با استفاده از ۱۲،۱۱ و ۱۳ ایستگاه با ۱۰ بار اجرای مستقل مدل مورد توجه قرار می‌گیرد. برای بررسی استحکام روش‌های توسعه‌داده‌شده و میانگین زمان حل هریک از روش‌ها، آزمایش‌هایی با توجه به تعداد متفاوت ایستگاه آتش‌نشانی طراحی شد. سپس برای نتایج به‌دست‌آمده از هر دسته از آزمایش‌های طراحی‌شده (دستهٔ اول ۱۱ ایستگاه، دستهٔ دوم ۱۲ ایستگاه و دستهٔ سوم ۱۳ ایستگاه) که ۱۰ بار به‌طور مستقل اجرا شده‌اند، نرمال‌سازی جواب‌ها (به بازه ۰ و ۱ بردن آنها) انجام گرفت و سپس انحراف معیار جواب‌های به‌دست آمدهٔ نرمال‌شده برای هر دسته و با کمک هر دو الگوریتم محاسبه شد، که در جدول ۳، دقت به‌دست‌آمده برای حالات مختلف نشان داده شده است. جدول ۴ متوسط مقادیر بهینه به‌ازای ۱۰ بار اجرا را برای هر تابع هدف نشان می‌دهد.



شکل ۵. ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود و کاندید (این ایستگاه‌ها از روش مکان‌یابی و روی‌هم‌گذاری لایه‌های مؤثر ایجاد شده‌اند)

ترسیم: نگارندگان

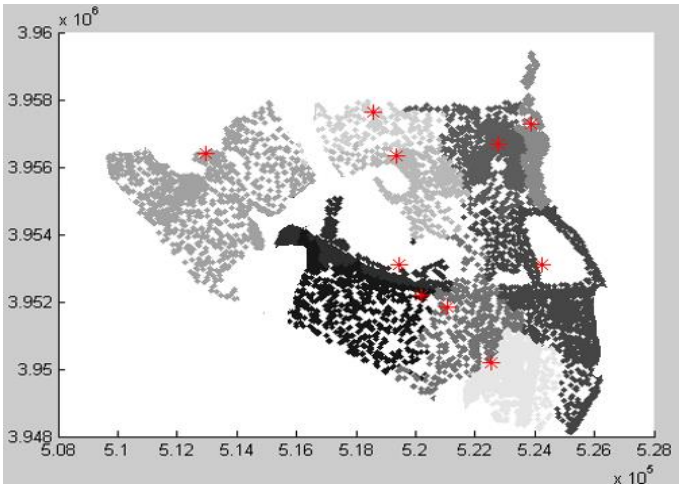


شکل ۶. نمایش تخصیص هر ایستگاه با الگوریتم ژنتیک

ترسیم: نگارندگان

همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد، با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، متوسط مقدار تابع هدف بهبود یافته و کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، تقاضاها می‌توانند به ایستگاه‌های بهینهٔ خود اختصاص یابند. ازآنجاکه خروجی نهایی این روش‌ها، نشان‌دهندهٔ تعداد تخصیص تقاضا به هر ایستگاه است، پس معیار سوم که برای بررسی استحکام جواب‌ها بررسی می‌شود، تفاوت تخصیص‌ها

در تکرارهای مختلف است. نسبت تقاضاهایی که در هر ۱۰ تکرار آزمایش، مشابه هم تخصیص داده شده‌اند، به کل تقاضاها به‌عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، مقدار به‌دست آمده برای حالات مختلف برای دو روش نشان داده شده است.



شکل ۷. نمایش تخصیص هر ایستگاه با الگوریتم تبرید

ترسیم: نگارندگان

جدول ۱. تعداد تخصیص هر ایستگاه، زمان اجرا و مقدار بهینهٔ تابع با الگوریتم ژنتیک

شمارهٔ ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تعداد تخصیص	۱۴۰۰۰	۱۸۰۴۰	۵۳۱۲۰	۲۵۲۴۰	۱۷۳۶۰	۵۳۹۲۰	۱۸۶۰۰	۱۸۰۰۰	۱۰۸۰۰	۵۲۲۸۰
زمان اجرا (ثانیه)	۴۷۹,۱۲۰									
مقدار بهینه	۸۴۶۱۱۱۵۲,۰۱									
تعداد کل تقاضاها	۳۳۶۶۰۰									
تعداد تقاضاهای تخصیص نیافته	۵۵۲۴۰									

جدول ۲. تعداد تخصیص هر ایستگاه، زمان اجرا و مقدار بهینه تابع با الگوریتم تبرید

شمارهٔ ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تعداد تخصیص	۱۴۰۰	۱۸۰۴۰	۵۳۱۲۰	۲۵۲۴۰	۱۷۳۶۰	۵۳۹۲۰	۱۸۶۰۰	۱۸۰۰۰	۱۰۸۰۰	۵۲۲۸۰
زمان اجرا (ثانیه)	۴۵۰,۳۵۱									
مقدار بهینه	۸۴۶۱۱۱۵۲,۰۱									
تعداد کل تقاضاها	۳۳۶۶۰۰									
تعداد تقاضاهای تخصیص‌نیافته	۵۵۲۴۰									

همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد ایستگاه‌ها با توجه به پیچیده‌تر شدن فضای مسئله، از دقت تخصیص در هر دو روش کاسته شده است. پارامتر چهارم مورد بررسی درصد متوسط کل تقاضاهای تخصیص‌یافته به کمک هر دو الگوریتم است. نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش تعداد ایستگاه‌ها با توجه به پیچیده‌تر شدن فضای مسئله، از دقت تخصیص در هر دو روش کاسته شده است. پارامتر آخر، زمان حل مسئله است که در حین انجام آزمایش‌ها، اندازه‌گیری می‌شود. در جدول ۷، میانگین زمان حل در هریک از حالات پیاده‌سازی‌شده برای دو روش نشان داده شده است.

جدول ۳. انحراف معیار نرمال‌شده جواب‌های به‌دست‌آمده مقدار تابع هدف با کمک هر دو الگوریتم

انحراف معیار به‌دست‌آمده میزان تابع هدف بر پایهٔ روش تبرید	انحراف معیار به‌دست‌آمده میزان تابع هدف بر پایهٔ روش ژنتیک	تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی
۰/۰۴۹	۰/۰۳۶	۱۱
۰/۲۹۲	۰/۲۰۱	۱۲
۰/۳۸۰	۰/۳۱۵	۱۳

جدول ۴. متوسط مقادیر بهینه به‌ازای ۱۰ بار اجرا با کمک دو الگوریتم

تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی	متوسط مقدار بهینه بر پایهٔ روش ژنتیک	متوسط مقدار بهینه بر پایهٔ روش تبرید
۱۱	۸۳۵۵۶۱۴۷,۰۴	۸۳۶۴۰۶۵۴,۴۹
۱۲	۸۲۵۸۴۴۹۳,۳۷	۸۲۸۲۹۳۵۷,۳۴
۱۳	۸۱۴۷۳۴۰۷,۸۱	۸۱۷۸۹۷۳۰,۹۵

جدول ۵. مقایسهٔ دقت نتایج به‌دست‌آمده برای تخصیص

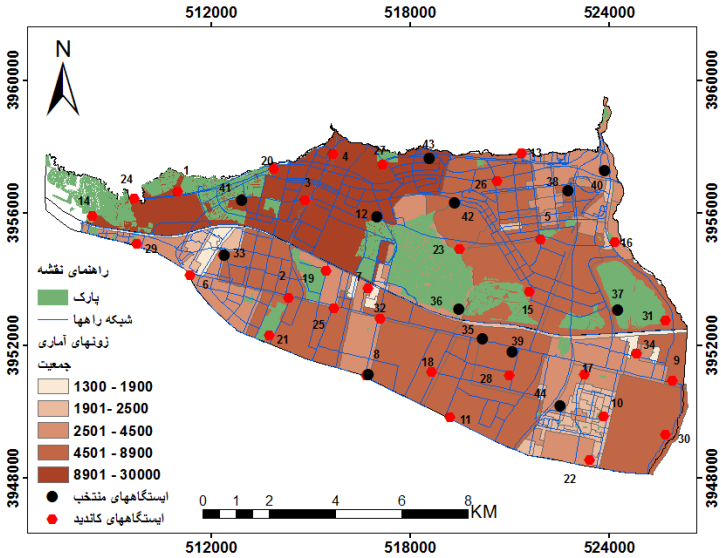
تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی	دقت تخصیص به‌دست‌آمده بر پایه روش ژنتیک	دقت به‌دست‌آمدهٔ تخصیص بر پایه روش تبرید
۱۱	۸۵	۸۳
۱۲	۸۴	۸۰
۱۳	۸۲	۷۷/۵

جدول ۶. درصد متوسط کل تقاضاهای تخصیص یافته به کمک هر دو الگوریتم

تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی	متوسط تعداد کل تقاضاهای تخصیص یافته بر پایهٔ روش ژنتیک	متوسط تعداد کل تقاضاهای تخصیص‌یافته بر پایهٔ روش تبرید
۱۱	۷۳/۵۷	۷۱/۸۹
۱۲	۸۸/۲۴	۷۸/۶۱
۱۳	۹۷/۱۵	۹۶/۲۴

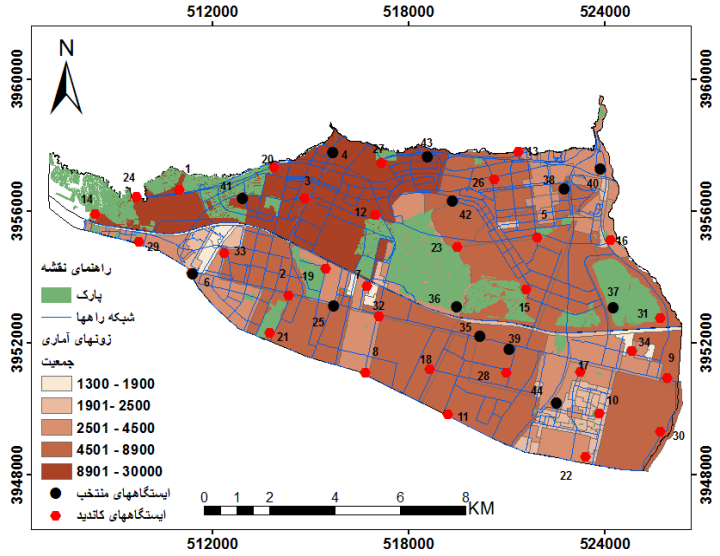
جدول ۷. مقایسهٔ میانگین زمان حل مسئله برحسب ثانیه

تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی	زمان حل بر پایهٔ روش ژنتیک	زمان حل برای روش تبرید
۱۱	۵۱۲/۵۵	۵۲۹/۵۷
۱۲	۵۲۳/۳۶	۵۳۶/۷۰
۱۳	۵۹۸/۸۸	۶۳۲/۴۷



شکل ۸. ایستگاه‌های منتخب الگوریتم ژنتیک

ترسیم: نگارندگان



شکل ۹. ایستگاه‌های منتخب الگوریتم تبرید

ترسیم: نگارندگان

شکل ۸ و ۹، ایستگاه‌های منتخب الگوریتم ژنتیک و تبرید را نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای بررسی‌شده می‌توان گفت، روش ژنتیک دارای ثبات و استحکام بیشتری نسبت به روش

تبرید است. همچنین الگوریتم ژنتیک از نظر کیفیت جواب‌هایی که ایجاد می‌کند، از الگوریتم تبرید بهتر است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

ازآنجاکه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در زمرهٔ تسهیلات اورژانسی هستند، بررسی تخصیص جمعیت یا تقاضاهای موجود در هر منطقه به این تسهیلات جهت سرویس‌دهی بهینهٔ آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تحقیق حاضر از یک مدل ترکیبی به نام VAOMP، که اخیراً توسعه داده شده است، برای بررسی این مسئله با کمک دو الگوریتم تبرید و ژنتیک استفاده کرد. مسئله به‌صورت سه‌هدفه مطرح شد که این فضای مسئله را بسیار پیچیده‌تر می‌کند. پس از آماده‌سازی داده‌ها در GIS اجرای مدل در منطقهٔ مورد مطالعه با الگوریتم‌های فراابتکاری با پارامترهای تنظیم‌شده انجام گرفت. نتایج کاربرد مدل در منطقه نشان داد که تعداد ایستگاه‌های موجود برای خدمات‌رسانی به جمعیت موجود در منطقه کافی نیست و تعداد ۵۵۲۴۰ نفر بدون تقاضا باقی می‌مانند؛ بنابراین با انجام مکان‌یابی و تخصیص دوباره و افزودن تعدادی ایستگاه کاندید به فضای مسئله، مشخص شد که حداقل ۱۳ ایستگاه جهت خدمات‌رسانی بهینه در منطقه مورد نیاز است. ضمن اینکه الگوریتم ژنتیک در زمان کوتاه‌تر جواب‌های باکیفیت‌تری را تولید می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق با تحقیق Shamsul Arifin نیز که در سال ۲۰۱۱ از مدل‌های مکان‌یابی و تخصیص جهت حل مسئلهٔ مربوط به بهینه‌سازی مدارس استفاده کرد و حتی نتایج تحقیق Bolouri و دیگران که در سال ۲۰۱۸ از مدل‌های مکان‌یابی- تخصیص جهت بهینه‌سازی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در منطقهٔ ۱۱ تهران استفاده کردند مطابقت دارد و نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک دارای استحکام بیشتری در حل مسائل مربوط به مکان‌یابی و تخصیص است. هم‌چنین همان‌طور که توسعه‌دهندگان مدل VAOMP (Lei et al., 2016) مطرح کردند، این مدل می‌تواند بسیاری از مسائل مختلف در حوزهٔ مکان‌یابی و تخصیص را به‌خوبی حل نماید و نتایج خوب و قابل قبولی را حتی در حل مسائل چندهدفه ارائه می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر نیز کارایی این مدل جدید را نشان می‌دهد؛ ضمن اینکه جهت حل مسائل مختلف در حوزهٔ مکان‌یابی و تخصیص نیاز به تعریف مدل‌های مختلف مانند مدل پوشش، میانه و ... نیست و VAOMP قادر است تمام مسائل پوششی، میانه، مرکز و... را نیز تنها با فرمول ذکرشده در بالا (فرمول ۴) حل کند. بنابراین مدلی بسیار جامع در حل این‌گونه مسائل است که استفاده از آن می‌تواند مورد توجه سایر محققان قرار گیرد. در پایان شایان ذکر است که سایر محققان می‌توانند با کمک الگوریتم‌های دیگر، مدل را توسعه داده و کاربرد آن را در مناطق مورد مطالعه بررسی نمایند.

منابع

۱. تقوی‌فرد. م.، شهسواری. آ. (۱۳۸۷)، ارائهٔ یک مدل ریاضی جهت حل مسئلهٔ مکان‌یابی– تخصیص چندهدفه با استفاده از روش فوق‌ابتکاری شبیه‌سازی تبرید، **نشریهٔ بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید**، دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱۹، شمارهٔ ۵: ۹۳-۱۰۵.

۲. خمر. غ.، صالح. ح.، حسینی. ز. (۱۳۹۳)، امکان‌سنجی مکان‌گزینی پناه‌گاه‌های شهری با استفاده از مدل IO و روش AHP مطالعهٔ موردی: محلات ۱۳گانهٔ منطقهٔ یک شهر کرمان، **فصل‌نامهٔ مطالعات ساختار و کارکرد شهری**، سال دوم، شمارهٔ ۷: ۲۹-۵۴.

۳. صابری‌فر. ر. (۱۳۹۷). تعیین مناطق مناسب زیرساخت‌های گردشگری سلامت در پیرامون کلان‌شهرها (نمونهٔ موردی: شهر مشهد)، **فصل‌نامهٔ مطالعات ساختار و کارکرد شهری**، سال پنجم، شمارهٔ ۱۶: ۲۷-۴۶.

۴. فقهی فرهمند. ن.، حاجی‌کریمی. ب. (۱۳۸۹)، مکان‌یابی ایستگاه آتش‌نشانی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه TOPSIS و SAW و انتخاب مکان بهینه با استفاده از از روش بردا (شهر صنعتی البرز قزوین)، **فصل‌نامهٔ مطالعات کمّی در مدیریت**، شمارهٔ ۳: ۵۳-۶۷.

۵. قهری. م.، لحمیان. ر.، آزاده‌دل. ی. (۱۳۹۳)، ارزیابی موقعیت ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسی براساس مدل AHP با استفاده از GIS مطالعهٔ موردی منطقهٔ ۴ شهرداری تهران، **فصل‌نامهٔ مطالعات ساختار و کارکرد شهری**، سال دوم، شمارهٔ ۷: ۱۲۷-۱۴۶.

۶. جعفری مهرآبادی. م.، رخساری، ح. (۱۳۹۷). تحلیل فضایی و مکان‌یابی هتل‌ها در ساختار شهری، **فصل‌نامهٔ مطالعات ساختار و کارکرد شهری**، دورهٔ ۵، شمارهٔ ۱۷: ۲۴-۴۶.

7. Abdollahi Demneh. S. M., Ghandehari. M., Ketabi. S. (2011) A location-allocation for loss minimization in large-scale emergency situation, **Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business,** 3(8): 954-964.

8. Adewole. A. P., Otubamowo. K., Egunjobi, T. O. (2012) A comparative study of simulated annealing and genetic algorithm for solving the travelling salesman problem, **Foundation of computer science**, 4(4): 6-12.

9. Aghamohammadi. H., Mesgari. M., Molaei. D., Aghamohammadi. H. (2013) Development a heuristic method to locate and allocate the medical centers to minimize the earthquake relief operation time, **Iranian Journal of Public Health**, 42(1): 63-71.

10. Balinski. M.L. (1965) Integer programming: methods, uses, computations, **Management Science**, 12: 253–313.

11. Brandeau. M. L., Chiu. S. S. (1989) An overview of representative problems in location research, **Management Science**, 35:645–74.

12. Bolouri. S., Vafaeinejad, A., Alesheikh. A., Aghamohammadi. H. (2018) The ordered capacitated multi-objective location-allocation problem for fire stations, ISPRS **International Journal of Geo-Information**, 7(2): 44.

13. Church. R L. (2002) **Geographical information systems and location science**, Computers & Operations Research, 29(6): 541–562.

14. Church. R. L., ReVelle. C. S. (1976) Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem, **Geographical Analysis**, 8(4): 407-415.
15. Church. R. L., Weaver. J. R. (1986) Theoretical links between median and coverage location problems, **Annals of Operations Research**, 6(1): 1–19.
16. Correa. E., Steiner. M., Freitas. A., Carnieri. C. (2001) A genetic algorithm for the p-median problem, Processing 2001 **Genetic and Evolutionary Computation Conference** (GECCO-2001). Sanfrancisco, USA.
17. Didier Lins. I., López Droguett. E. (2011) Redundancy allocation problems considering systems with imperfect repairs using multi-objective genetic algorithms and discrete event simulation, **Simulation Modelling Practice and Theory,** 19(1): 362-381.
18. Erkut. E., Karagiannidis. A., Perkoulidis. G. A.,Tjandra. S. (2008) A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in north Greece, **European Journal of Operational Research**, 187(3): 1402-1421.
19. Geroliminis. N., Kepaptsoglou. K., Karlaftis. M. (2011) A hybrid hypercube-genetic algorithm approach for deploying many emergency response mobile units in an urban network**, European Journal of Operational Research**, 210(2): 287-300.
20. Hakimi. S.L. (1964) Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph, **Operations Research,** 12 (3): 450–459.
21. Hosage. C. M., Goodchild. M. F. (1986) Discrete space location-allocation solutions from genetic algorithms, University of Western Ontario, Annals of **Operations Research**, 6(2): 35-46.
22. Jaramillo. J. H., Bhadury. J., Batta. R. (2002) On the use of genetic algorithms to solve location problems, **Computers and Operations Research**, 29(6): 761-779.
23. Kratica. J., Stanimirovic. Z., Tosic. D., Filipovic, V. (2007) Two genetic algorithms for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem, European **Journal of Operational Research**, 182(1): 15-28.
24. Lei. T. L., Church. R. L. (2014) Vector assignment ordered median problem: a unified median problem, **International Regional Science Review**, 37(2): 194–224.
25. Lei. T., Church. R., Lei. Z. (2016) A unified approach for location- allocation analysis: integration GIS, distributed computing and spatial optimization, **International Journal of Geographic Information Science**, 30: 515-534.
26. Li. X., Yeh. A. (2005) Integration of genetic algorithms and GIS for optimal location search, **International Geographical Information Science**, 19(5): 581-601.
27. Liao. S.H., Hsieh. C.L., Lai. P.J. (2011) An evolutionary approach for multi-objective optimization of the integrated location-inventory distribution network problem in vendor-managed inventory, **Expert Systems with Applications**, 38(6): 6768-6776.
28. Manne. A.S. (1964) Plant location under economies-of-scale-decentralization and computation, **Management Science**, 11(2): 213–235.
29. Melanie. M. (1999) **An introduction to genetic algorithms**, Fifth Printing, MIT Press, Cambridge, MA, USA, London, UK.
30. Murray. A., Church. R. (1996) **Applying simulated annealing to location-planning models**, J. Heuristics, 2: 31–53.
31. Neema. M. N., Ohgai. A. (2010**)** Multi-objective location modelling of urban parks and open spaces: continuous optimization, Computers, **Environment and Urban Systems**, 34: 361-363.
32. Shamsul Arifin. MD. (2011) **Location allocation problem using genetic algorithm and simulated annealing: a case study based on school in Enschede**, Master of Science in Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente.

33. Torrent-Fontbona. F., Munoz. V., Lopez. B. (2013) Solving large immobile location-allocation by affinity propagation and simulated annealing, **Expert Systems with Applications,** 40(11): 4593-4599.
34. Wang. K., Makond. B., Liu. S.Y. (2011) Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand-a genetic-algorithm based solution, **Expert Syst. Appl,** 38: 6125–6131.
35. Wang. Y., Tian. D., Li. Y. H. (2013) An improved simulated annealing algorithm for travelling salesman problem, **IJOE**, 9(4): 28-32.
36. www.Tehransafe.ir, 1397.
37. www.region21.ir, 1397.
38. www. Isna.ir, 1397.
39. Yang. L., B. Jones. F., Yang. S. (2007) A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms, **European Journal of Operational Research,** 181: 903-915.
40. Zhou. G., Min. H., Gen. M. A. (2003) Genetic algorithm approach to the bi-criteria allocation of customers to warehouses, **Int. J. Prod. Econ**, 86: 35–45.