فصلنامه مطالعات مدیریت شهری
سال سیزدهم/ شماره چهل و هشتم/ زمستان ۱۴۰۰

مطالعه تخصیص ایستگاه‌های آتش‌نشانی با روش هیبریدی

(نمونه موردی: شهر مشهد)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

حامد خرقانی
دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی (*GIS*)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،ایران.*ha.kharaghani@gmail.com*
حسین اعتمادفرد
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
etemadfard@um.ac.ir (نویسنده مسئول)
احمد سالم رفیش
دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی (*GIS*)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،ایران. *ahmedsalimgudy@gmail.com*

چکیده

مقدمه و هدف پژوهش: ایجاد خدمات شهری، نیازمند استقرار صحیح این خدمات در سطح شهر است. یکی از مراکز خدماتی که نقش به سزایی را در ایمنی شهر دارا است، ایستگاه‌های آتش‌نشانی هستند. دسترسی سریع و به‌موقع از این ایستگاه‌ها به محل وقوع حادثه نیازمند توزیع بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در سطح شهر است. هدف این پژوهش بررسی تخصیص مکان مناسب برای احداث یک ایستگاه آتش‌نشانی در سطح شهر مشهد به کمک روش‌های هیبریدی است.

روش پژوهش: این پژوهش از نوع هدف کاربردی بوده و از نظر ماهیت توصیفی تحلیلی است. لایه‌های اطلاعاتی معیارهای فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، مراکز درمانی، راه‌ها، مراکز اداری و مراکز آموزشی در محیط سیستم اطلاعات مکانی آماده شده و با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) وزن دهی شده‌اند. سپس، نقشه همپوشانی این معیارها به پنج کلاس طبقه‌بندی‌شده و ۲۰ نقطه اولیه در کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی انتخاب شدند. پس از آن با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) و به کمک معیارهای فاصله از مراکز ورزشی، مراکز مذهبی، پمپ‌بنزین‌ها و گازها، مراکز فرهنگی و تاریخی و تجاری این ۲۰ نقطه انتخاب‌شده با یکدیگر موردقیاس قرارگرفته و نقطه بهینه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی پیشنهاد شده است.

یافته‌ها: GA و PSO نقطه یکسانی را با میزان تابع برازش ۴/۹۸ به‌عنوان بهترین مکان جهت احداث ایستگاه آتش‌نشانی در شهر مشهد پیشنهاد داده‌اند.

نتیجه گیری: نتایج عملکردی دو الگوریتم فرا ابتکاری نشان می‌دهد که با توجه به پارامترهای تعریف‌شده برای هر یک از الگوریتم‌ها، PSO در زمان کمتری نسبت به GA به جواب بهینه برسد.

واژگان کلیدی: GIS، AHP، الگوریتم ژنتیک، PSO، مدیریت شهری

مقدمه

امروزه با تراکم بیش‌ازحد جمعیت در شهرها و افزایش روزافزون جمعیت، تقاضا برای توسعه شهری و به همان نسبت خدمات شهری نیز افزایش یافته است. نیاز به توسعه شهری یکی از مهم‌ترین مسائلی است که اگر درباره آن تدبیری صورت نگیرد به یکی از بزرگ‌ترین بحران‌ها تبدیل خواهد شد. دستگاه‌های خدماتی و ایمنی شهری باید در همین راستا توسعه و گسترش پیدا کرده و تمامی مناطق شهری را پوشش دهند. در واقع ایمنی شهر به مجموعه وظایفی که جهت جلوگیری از بروز یا کاهش خسارات ناشی از عوارض طبیعی و غیرطبیعی صورت می‌گیرد گفته می‌شود (زیاری و یزدان‌پناه، ۱۳۹۰). این تصور درگذشته وجود داشت که حوادث و بلایای طبیعی در مناطق شهری، نسبت به روستاها آثار و صدمات کمتری دارد؛ اما امروزه با توجه به تغییرات زیادی که در ساختار و سازمان شهرها به وجود آمده، بایستی ایمنی شهر نیز در برابر حوادث غیرمترقبه تأمین گردد (دهقانی و چمی، ۱۳۹۸). ایستگاه‌های آتش‌نشانی به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر و کاربری‌های خدماتی-اورژانسی در شهرها، نقشی مهم و حیاتی در حفاظت جان و مال مردم در برابر حوادث مختلف، به‌خصوص مخاطرات انسانی دارند. ایستگاه‌های آتش‌نشانی در برابر خطرات آتش‌سوزی در کاربری‌های مختلف و تضمین امنیت جانی و مالی شهروندان، ایمنی شهر را بر عهده دارند (شکوهی و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به خطرات زیاد ناشی از آتش‌سوزی و امکان وارد نمودن صدمات جبران‌ناپذیر برای جامعه، انتخاب مکان ایستگاه‌های آتش‌نشانی یک تصمیم بسیار مهم برای تصمیم‌گیرندگان شهرها است. در حقیقت مدیران شهری باید اقدامات احتیاطی را در برابر آتش‌سوزی انجام داده و خدمت‌رسانی به مناطق آتش‌گرفته را در حداقل زمان انجام دهند تا از قرار گرفتن سایرین در شرایط نامساعد جلوگیری کنند. سالانه افراد بسیاری بر اثر سوانح مختلف نظیر آتش‌سوزی جان خود را از دست می‌دهند. از دلایل این امر می‌توان به پراکندگی نامناسب ایستگاه‌های آتش‌نشانی، قرارگیری آن‌ها در مناطق پرترافیک و عدم پاسخ‌گویی در زمان استاندارد در اطفای حریق اشاره نمود. درحالی‌که با اتخاذ تدابیر مناسب مانند اطفای حریق به‌موقع، می‌توان از گسترش آتش‌سوزی جلوگیری کرد (آلپر و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق حاضر جهت حل مسئله مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر مشهد، از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جهت انجام تحلیل‌ها، آماده‌سازی داده‌ها و ایجاد خروجی‌ها کمک گرفته‌شده است. ازآنجایی‌که مسئله مکان‌یابی ازجمله مسائل دشوار به شمار می‌آید، روش‌های دقیق قادر به حل مسئله نیستند، بنابراین در این تحقیق از دو الگوریتم تکاملی ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) برای حل دقیق و یافتن بهترین نقطه جهت احداث ایستگاه آتش‌نشانی استفاده شده است. از این ترکیب روش‌ها به عنوان روش هیبریدی یاد شده و نوآوری پژوهش حاضر نیز می‌باشد.

اهمیت و هدف پژوهش

شهر مشهد با بیش از سه میلیون نفر جمعیت ساکن، سالانه میزبان میلیون‌ها نفر زائر از سراسر کشور ایران است که خود موجب افزایش احتمال وقوع حوادث آتش‌سوزی در این شهر است. به بیان دیگر، رشد جمعیت و شهرنشینی، تأثیرات بلایای طبیعی و حوادث را تشدید می‌کند. این اتفاق یک چالش بزرگ برای گروه‌های اورژانسی است که باید در کمترین زمان ممکن برای به حداقل رساندن تلفات امدادرسانی را انجام دهند (فرناندز و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین، بایستی امکانات مناسبی جهت واکنش سریع به چنین حوادثی به وجود آید. پژوهش حاضر با درنظر گرفتن محدودیت‌های مالی که در احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی برای سازمان‌های مدیریت شهری وجود دارد، به دنبال انتخاب بهترین مکان برای احداث یک ایستگاه آتش‌نشانی با استفاده از روشی هیبریدی است.

پیشینه پژوهش

پیشینه تحقیق در مورد انتخاب مکان برای امکانات امدادرسانی شهری تاریخچه طولانی دارد. هاگ (۱۹۶۸) برای به حداقل رساندن خسارات اقتصادی ناشی از آتش‌سوزی و هزینه خدمات امداد و نجات استدلال کرد که مهم‌ترین تصمیمی که آتش‌نشانان با آن مواجه می‌شوند این است که چه تعداد گروه آتش‌نشانی داشته باشند و کجا آن‌ها را مستقر کنند. هلی (۱۹۷۵) بیان کرد که مهم‌ترین ویژگی مکان ایستگاه آتش‌نشانی باید این باشد که زمان واکنش اضطراری را به حداقل برساند و این ویژگی را به‌عنوان اساس مدل مکانیابی آتش‌نشانی در نظر گرفت. این عامل به‌عنوان مبنایی برای مدل انتخاب مکان آتش‌نشانی توسط پلان و هندریک (۱۹۷۷) توسعه داده شد. آن‌ها از زمان پاسخ به عنوان معیار پوشش استفاده کردند و تئوری پوشش مجموعه انتخاب

مکانی را برای مسئله مکان‌یابی به کار بردند. ریلی و میرچندانی (۱۹۸۵) انتخاب تعداد مشخصی ایستگاه را از ایستگاه‌های کاندید برای به حداقل رساندن صدمات با در نظر گرفتن زمان سفر واحدهای آتش‌نشانی ورودی به محل‌های آتش‌سوزی تحت محدودیت‌های خاصی را مورد بررسی قرار دادند. طی یک دهه گذشته نیز مطالعات متعددی در زمینه مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی به کمک GIS در سراسر جهان صورت گرفته است که می‌توان به‌عنوان نمونه به مواردی که در ادامه مطرح می‌شود اشاره کرد. لیو و همکاران (۲۰۰۶) به موقعیت‌یابی مناسب ایستگاه‌های آتش‌نشانی جدید، با در نظر گرفتن اهداف متعدد، با استفاده از GIS و الگوریتم کلونی مورچگان پرداختند. هدف آن‌ها کاهش زمان واکنش به حادثه که در مسیرهای حمل‌ونقل مواد خطرناک از ۸ به ۵ دقیقه بود. هدف دیگر این پژوهش شامل محاسبه فاصله مناسب بین ایستگاه‌های آتش‌نشانی و به حداکثر رساندن مساحت منطقه‌ای قابل سرویس‌دهی توسط این ایستگاه‌های آتش‌نشانی در ۶ دقیقه بود. رویکرد مورد استفاده این محققان عملکرد مناسبی در جهت حل مشکلات بهینه‌سازی دارد. حبیبی و همکاران (۲۰۰۸)، اردن و همکاران (۲۰۱۰) و چاودهاری و همکاران (۲۰۱۶) از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و GIS برای انتخاب سایت‌های آتش‌نشانی و تجزیه‌وتحلیل بهینه‌سازی در مناطق مختلف شهری استفاده کرد. وی و جونچنگ (۲۰۱۶) در پژوهشی GA و GIS را از طریق زبان C# یکپارچه کردند تا مشکل انتخاب مکانی را برای ایستگاه‌های آتش‌نشانی حل کنند. نتایج آن‌ها نشان داد ماژول طراحی شده توسط آن‌ها نیاز پاسخ سریع به آتش‌سوزی را برآورده می‌کند. آکتاس و همکاران (۲۰۱۳)، مقاله‌ای را تحت عنوان «بهینه‌سازی مکانی ایستگاه آتش‌نشانی برای شهرداری کلان‌شهر استانبول به کمک GIS» را تهیه نموده‌اند. نتایج اجرای سناریوی موجود در این مقاله پوشش ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر استانبول را از ۵۸،۶ درصد به ۸۵،۹ درصد افزایش داد. کاظمی و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی باهدف به حداکثر رساندن سطح خدمات کلی تعداد تأسیسات آتش‌نشانی و بیان قابلیت GIS برای استقرار مناطق خدماتی مناسب ایستگاه‌های آتش‌نشانی، شهر فاماگوستا قبرس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از QGIS و پایتون جهت دستیابی به حداکثر منطقه پوشش خدمات و حداقل رساندن پاسخ استفاده کردند و به مکان مناسب جهت ایجاد ایستگاه مناسب در این شهر رسیدند. در پژوهشی دیگر نیم‌بیلی و اردن (۲۰۲۰) در مقاله‌ای به بررسی مکان‌های مناسب جهت احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی به کمک روش‌های AHP و FUZZY-AHP در شهر استانبول پرداخته‌اند. آن‌ها در این پژوه به ۳۴ محل برای ایجاد ایستگاه جدید دست یافتند که مکمل برای ۱۲۱ ایستگاه موجود در شهر استانبول است. حاجی‌پور و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود، یک فرمول ریاضی برای مکان‌یابی ایستگاه آتش‌نشانی و امکانات تخصیص یافته به ایستگاه‌ها در دوره‌های مختلف و شرایط اضطراری (جنگ‌ها و بلایای طبیعی) ارائه کردند. در مدل این پژوهش الگوریتم‌های (PSO) و کلنی زنبورهای مصنوعی (ABC) برای حل مسئله ارائه شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که PSO از نظر کیفیت راه‌حل‌ها و زمان محاسباتی بهتر از ABC است.

در مطالعات پیشین داخلی می‌توان به پژوهشی توسط نظریان و کریمی (۱۳۸۸) اشاره نمود که با استفاده از AHP و تلفیق آن باقابلیت‌های GIS، مناسب‌ترین مکان‌ها برای احداث ۲۶ ایستگاه آتش‌نشانی جدید در شهر شیراز را در مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی توزیع فضایی و مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر شیراز با استفاده از GIS» تعیین نمودند. هادیانی و کاظمی (۱۳۸۹) با استفاده از AHP در محیط GIS نتیجه گرفتند که برای پوشش دادن کل فضای شهر قم و استاندارد ۳ دقیقه‌ای زمان رسیدن خودروهای آتش‌نشانی، به استقرار ۵ ایستگاه آتش‌نشانی جدید نیاز است. عادلی (۱۳۹۰) نیز در پژوهشی باهدف تعیین بهترین مکان‌ها برای تأسیس ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر گرگان یا جابجایی مکانی برخی از آن‌ها، چند مکان مستعد جهت احداث ایستگاه آتش‌نشانی را به کمک روش AHP در شهر گرگان پیشنهاد داده است. بلوری و وفایی‌نژاد (۱۳۹۲) برای تعیین موقعیت و تخصیص ظرفیت بهینه به ایستگاه‌های آتش‌نشانی منطقه ۱۱ شهر تهران سه هدف اصلی شامل کمینه کردن فاصله بین ایستگاه آتش‌نشانی، کمینه کردن زمان رسیدن به تقاضا از ایستگاه‌های آتش‌نشانی و بیشینه کردن پوشش ایستگاه‌های آتش‌نشانی را دنبال کردند. رهنما و آفتاب (۱۳۹۳) در مقاله‌ای با عنوان «مکانیابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر ارومیه با استفاده از GIS و AHP» ۴ ایستگاه جدید را مکان‌یابی و پیشنهاد دادند. در تحقیق آن‌ها شعاع عملکردی ایستگاه‌های پیشنهادی و ایستگاه‌های موجود بر اساس زمان استاندارد رسیدن

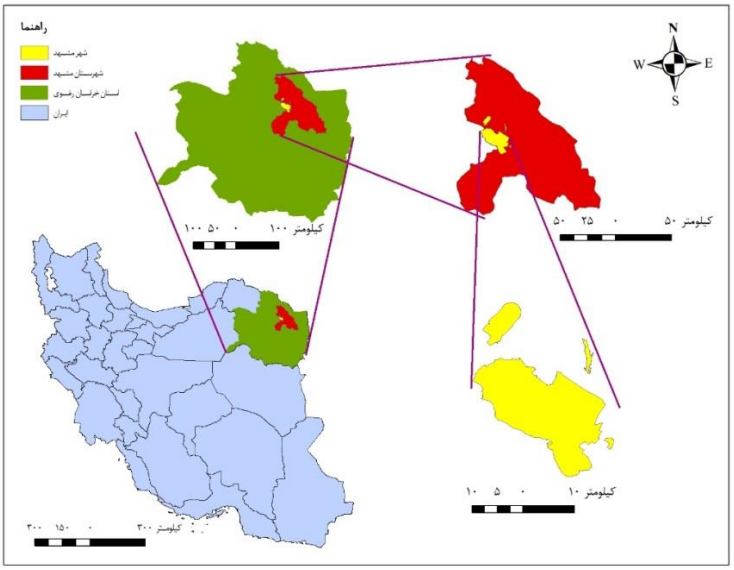
خودروهای آتش‌نشانی به محل حریق، به‌منظور تعیین سطح پوشش شهر ارومیه توسط این مراکز با استفاده از تحلیل شبکه به‌صورت تصویری بررسی گردیده است. تقی‌زاده فانید و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل AHP و روش تحلیل شبکه در محیط GIS الگویی برای مکان‌یابی و اولویت‌بندی احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر تبریز ارائه داد. نظریان و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به مطالعه شهر کرمانشاه پرداختند و نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که ایستگاه‌های موجود، شهر را به‌طور کافی تحت پوشش قرار نمی‌دهند و برخی از آن‌ها در مکان‌های نامناسب احداث گردیدند و مکان‌های بهینه برای استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر کرمانشاه ارائه شد. پوررمضان و جوان (۱۳۹۵) با بهره‌گیری از GIS، شهر رشت را موردمطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که این شهر با کمبود ۱۰ ایستگاه آتش‌نشانی روبه‌رو است و با توجه به بافته‌ای فرسوده در شهر، ایجاد ایستگاه‌های جدید هرچه سریع‌تر باید صورت گیرد. حلی ساز و همکاران (۱۳۹۷) نیز در پژوهش خود به مکان‌گزینی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با منطق فازی و AHP در منطقه یک بندرعباس پرداختند و مناطق اولویت‌دار جهت استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی را مشخص نمودند.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی – تحلیلی است. برای تخصیص بهترین مکان به ایستگاه آتش‌نشانی از روش هیبریدی استفاده شده است. این روش از AHP، GIS و الگوریتم‌های تکاملی GA و PSO تشکیل شده است که در ادامه تشریح می‌شوند. همچنین محدوده مورد مطالعاتی در این بخش معرفی خواهد شد.

محدوده مطالعاتی

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی و واقع در شمال شرق کشور ایران است. این شهر بین عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۷ دقیقه شمالی و طول ۵۹ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی واقع شده است. ارتفاع متوسط شهر مشهد از سطح دریا ۹۸۵ متر و وسعت آن حدود ۳۰۰ کیلومترمربع است. شهر مشهد از شمال غرب با زمین-های بایر و از شمال، شمال شرق، شرق و جنوب شرق عمدتا با اراضی کشاورزی هم‌جوار است. از نظر جمعیت، در نخستین سرشماری رسمی ایران (۱۳۳۵) مشهد با جمعیت ۲۴۱۹۸۹ نفر، چهارمین شهر پرجمعیت ایران بوده است. در سرشماری سال ۱۳۹۵ مشهد دارای جمعیتی معادل ۳۰۰۱۱۸۴ نفر بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). تراکم جمعیتی بالا در برخی از نقاط مشهد، حضور میلیونی زائران حرم مطهر رضوی به طور سالانه و همچنین تمرکز واحدهای صنعتی و اداری در شهر مشهد احتمال وقوع آتش‌سوزی در این شهر را افزایش داده است. لذا وجود مراکز خدماتی نظیر ایستگاه‌های آتش‌نشانی به‌صورتی که کل شهر پوشش داده شود، الزامی است. در شکل (۱) موقعیت شهر مشهد نمایش داده‌شده است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی

تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یا Analytic Hierarchy Process یکی از روش‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره است که نخستین بار توسط توماس ال ساعتی در دهه‌ی ۱۹۷۰ ابداع شد(ساعتی، ۱۹۸۰). AHP برای حل مسائل غیرساختاری در موقعیت‌های مختلف تصمیم‌گیری، از تصمیم‌های شخصی ساده تا تصمیم‌های پیچیده‌ی اقتصادی کاربرد دارد (یوسفی و دیگران، ۱۳۹۹). AHP به عنوان یک تکنیک منعطف می‌تواند مسائل پیچیده را در سطوح مختلف حل نماید و معیارهای کیفی غیر مشهود را به معیارهای کمی مشهود تبدیل کند تا از این طریق قابل قضاوت شود (جلالی و همکاران، ۱۴۰۰). روش AHP بر مبنای سه بخش است که شامل مدل‌سازی، قضاوت ترجیحی و تلفیق اولویت‌ها می‌باشد. در گام نخست، AHPمسئله پیچیده MCDM را به صورت سلسله مراتبی به اجزای تصمیم به هم مرتبط (معیارها و گزینه‌های تصمیم‌گیری) تجزیه می‌کند. در واقع در AHP، اهداف، معیارها و گزینه‌ها در یک ساختار سلسله مراتبی درختی مرتب می‌شوند. گام دوم انجام مقایساتی بین گزینه‌ها و معیارها است. زمانی که مسئله تجزیه می‌شود و سلسله‌مراتب ساخته می‌شود، فرآیند اولویت‌دهی به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها انجام می‌گردد. درAHP چندین مقایسه دوبه‌دو بر مبنای یک مقیاس مقایسه استاندارد ۹ سطحی انجام می‌شود (ساعتی، ۱۹۸۰). در این روش ابتدا به‌منظور مشخص شدن ارجحیت عوامل مختلف نسبت به یکدیگر و تبدیل آن‌ها به مقادیر کمی، از قضاوت‌های نظرات خبرگان بر اساس مقایسات زوجی استفاده می‌شود، به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده ارجحیت یک عامل را نسبت به علل دیگر در نظر گرفته و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمی بین ۱ الی ۹ (از کم‌اهمیت‌ترین تا پراهمیت‌ترین) تبدیل می‌نماید. پس از انجام این مرحله و ایجاد ماتریس مقایسات زوجی، شاخص سازگاری هریک از ماتریس‌ها باید محاسبه شود و با شاخص استاندارد مشخص شده متناسب با شرایط مسئله مقایسه شود (شفیعی و قنبرزاده، ۱۳۹۷). توماس ساعتی (۱۹۸۰)، عدد ۰/۱ را به‌عنوان حد قابل‌قبول شاخص سازگاری ارائه می‌نماید؛ در صورتی که مقدار شاخص بیشتر از ۰/۱ باشد بایستی در مقایسات تصمیم‌گیرنده تجدید نظر شود و اگر کمتر باشد پذیرفته است و وزن هریک از معیار و گزینه‌ها نسبت به سلسله مراتبی که در آن قرارگرفته‌اند تعیین می‌شود.

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک یا Genetic Algorithm از تکامل بیولوژیکی در طبیعت و نظریه تکامل داروین الهام گرفته‌شده است و از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جستجو می‌باشد. این الگوریتم اولین بار توسط هالند (۱۹۷۵) معرفی شد و توسعه آن به سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۷۰ برمی‌گردد (چن و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۱۳). GA در طیف وسیعی از مسائل طراحی مهندسی موفق و محبوب هستند. GA برای مدل‌سازی فرآیندهای سازگاری ابداع شد که عمدتا بر روی رشته‌های باینری کار می‌کردند و از یک عملگر نوترکیبی با جهش به عنوان عملگر پس‌زمینه استفاده می‌کردند (پیاده کوهسار و همکاران، ۱۳۹۸). عملگرهای GA شامل انتخاب، تقاطع و جهش است که به ترتیب از آن‌ها برای ایجاد نسل بعدی استفاده می‌شود. وظیفه عملگر انتخاب، انتقال کروموزوم-های قوی‌تر به نسل‌های بعدی است. عملگرهای تقاطع و جهش با ترکیب و تغییر کروموزوم‌ها به تولید کروموزوم-های جدید و جست‌وجو در فضای مسئله برای رسیدن به جواب‌های بهتر کمک می‌کند (دیپانکار و همکاران، ۱۹۹۷). فلوچارت مراحل اجرای GA در شکل (۲) نمایش داده شده است.

GA از چهار قسمت کلی زیر تشکیل‌شده است (عفتی و همکاران، ۱۳۹۶):

- کروموزوم: هر کروموزوم نمایانگر یک جواب تصادفی است که سطح صلاحیت آن باید مورد بررسی قرار گیرد و در نتیجه کروموزوم‌هایی که باقی می‌مانند، تعیین می‌شوند.
- ژن: هر کروموزوم از پارامترهایی به نام ژن تشکیل‌شده است. در این الگوریتم ژن‌ها اجزای منحصربه‌فرد جواب را تشکیل می‌دهند. برای حل درست مسئله باید راهی را برای تجزیه آن به اجزاء مرتبط با ژن‌ها تعیین کرد. ژن‌های انفرادی اصلاح نمی‌شوند و همچون تکامل موجودات زنده، این کروموزوم‌ها توسط تغییر منظم و ترکیب ژن‌ها نمو می‌یابند.
- جمعیت: مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها در هر نسل، تشکیل جمعیت می‌دهند. درواقع جمعیت مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مسئله است.
- تابع برازش: تابع برازندگی برای تبدیل مقادیر تابع هدف به مقیاسی برای سازگاری و کارایی نسبی افراد

به کار می‌رود. در بعضی از موارد مقدار تابع برازندگی (برازش) متناسب با تعداد فرزندانی است که انتظار می‌رود از آن کروموزوم تولید شود. به‌منظور حل هر مسئله با استفاده از GA ابتدا باید یک تابع برازندگی برای آن مسئله ابداع شود. برای هر کروموزوم این تابع عددی غیر منفی را برمی‌گرداند که نشان‌دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است.

الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات یا Particle Swarm Optimization از الگوریتم‌های تکاملی است که اولین بار توسط کندی و همکاران (۱۹۹۵) معرفی شد. PSO به‌عنوان یک الگوریتم فرا ابتکاری، نتایج خوبی در بهینه‌سازی مشکلات غیرخطی دارد و دارای همگرایی فوری، محاسبات نسبتا کم و نتایج قابل‌قبول در مطالعات مختلف و در سال‌های اخیر محبوبیت یافته است. طراحی این الگوریتم از حرکت گله‌ها و ماهی‌ها برای بهینه‌سازی مسیر رسیدن به مواد غذایی الهام گرفته شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۱۶). فلوچارت مراحل اجرای PSO در شکل (۲) به نمایش درآمده است.

در PSO، موقعیت هر ذره در هر تکرار به‌روز می‌شود تا بهترین حالت را از طریق تغییر موقعیت و سرعت پیدا کند، سپس موقعیت ذرات برای انتخاب بهترین موقعیت جهانی برای گروه مقایسه می‌شود؛ بنابراین، یک‌ذره به‌عنوان یک نقطه در فضای n بعدی در نظر گرفته می‌شود و وضعیت آن با توجه به موقعیت و سرعت آن مشخص می‌شود. موقعیت n بعدی برای ذره i در تکرار t را می‌توان به‌صورت معادله ۱ نمایش داد.

معادله ۱: $$x_i^t = \left(x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{in}^t\right)$$

درحالی‌که سرعت ذره i در تکرار t را می‌توان به‌صورت معادله ۲ توصیف کرد.

معادله ۲: $$V_i^t = \left(V_{i1}^t, V_{i2}^t, \dots, V_{in}^t\right)$$

معادله ۳ نشان‌دهنده بهترین موقعیت ذره i در تکرار t و معادله ۴ نشان‌دهنده بهترین موقعیت جهانی در تکرار t است (بوی و همکاران، ۲۰۱۶).

معادله ۳: $$P_i^t = \left(P_{i1}^t, P_{i2}^t, \dots, P_{in}^t\right)$$

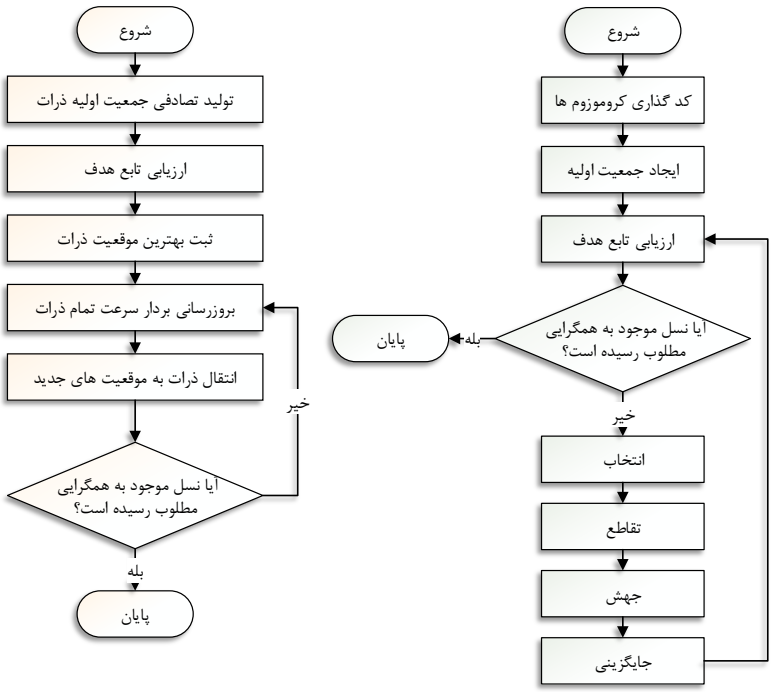
معادله ۴: $$P_g^t = \left(P_{g1}^t, P_{g2}^t, \dots, P_{gn}^t\right)$$

برای جستجوی راه‌حل بهینه، هر ذره سرعت و موقعیت خود را بر اساس معادله ۵ تغییر می‌دهد.

معادله ۵:

$$V_{in}^t = WV_{in}^{t-1} + C_1 r_1 \left(P_{in}^t - x_{in}^t\right) + C_2 r_2 \left(P_{gn}^t - x_{in}^t\right), n = 1,2, \dots, N$$

معادله ۶: $$X_{in}^{t+1} = X_{in}^t + V_{in}^t$$



شکل ۲: فلوچارت‌های پیاده‌سازی الگوریتم‌های ژنتیک (راست) و ازدحام ذرات (چپ)

جدول ۱: فواصل طبقه‌بندی معیارها

معیار	فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود (متر)	فاصله از مراکز درمانی (متر)	فاصله از راه‌ها (متر)	فاصله از مراکز اداری (متر)	فاصله از مراکز آموزشی (متر)
ارزش ۱	۵۰۰-۰	بزرگ‌تر از ۴۰۰	بزرگ‌تر از ۴۰۰	بزرگ‌تر از ۴۰۰	بزرگ‌تر از ۲۰۰
ارزش ۲	۱۰۰۰-۵۰۰	۴۰۰-۳۰۰	۴۰۰-۳۰۰	۴۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۱۵۰
ارزش ۳	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۳۰۰-۲۰۰	۳۰۰-۲۰۰	۳۰۰-۲۰۰	۱۵۰-۱۰۰
ارزش ۴	۲۰۰۰-۱۵۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۱۰۰-۵۰
ارزش ۵	بزرگ‌تر از ۲۰۰۰	۱۰۰-۰	۱۰۰-۰	۱۰۰-۰	۵۰-۰

جایی‌که W وزن اینرسی است؛ C_1 عامل یادگیری شناخت را نشان می‌دهد؛ C_2 عامل یادگیری اجتماعی را نشان می‌دهد؛ r_1 و r_2 اعداد تصادفی هستند که به‌صورت یکنواخت در بازه‌ی بین ۰ تا ۱ می‌باشند.

روند اساسی الگوریتم PSO به شرح زیر است (بوی و همکاران، ۲۰۱۶):

مرحله ۱ (شروع): یک دسته اولیه ذرات به طور تصادفی تولید می‌شود.

مرحله ۲ (ارزیابی تابع برازش): برازش هر ذره از ازدحام بر اساس RMSE ارزیابی می‌شود.

مرحله ۳ (به‌روزرسانی): محاسبه سرعت هر ذره بر اساس معادله ۵ و به دست آوردن موقعیت هر ذره بر اساس معادله ۶.

مرحله ۴ (ساخت و ساز): ذره، بر اساس معادله ۶ به موقعیت بعدی می‌رود.

مرحله ۵ (خاتمه): توقف الگوریتم در صورت تائید شرط خاتمه در غیر این صورت بازگشت به مرحله ۲.

پیاده‌سازی و یافته‌های پژوهش

به منظور تعیین بهترین نقطه جهت ایجاد ایستگاه جدید آتش‌نشانی در شهر مشهد، پژوهش حاضر دو گام اصلی را طی می‌کند. در گام اول با استفاده از AHP، نواحی و نقاط مناسب برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی در سطح شهر مشهد تعیین می‌گردد و در گام دوم نیز بهترین نقطه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی توسط GA و PSO پیشنهاد می‌شود.

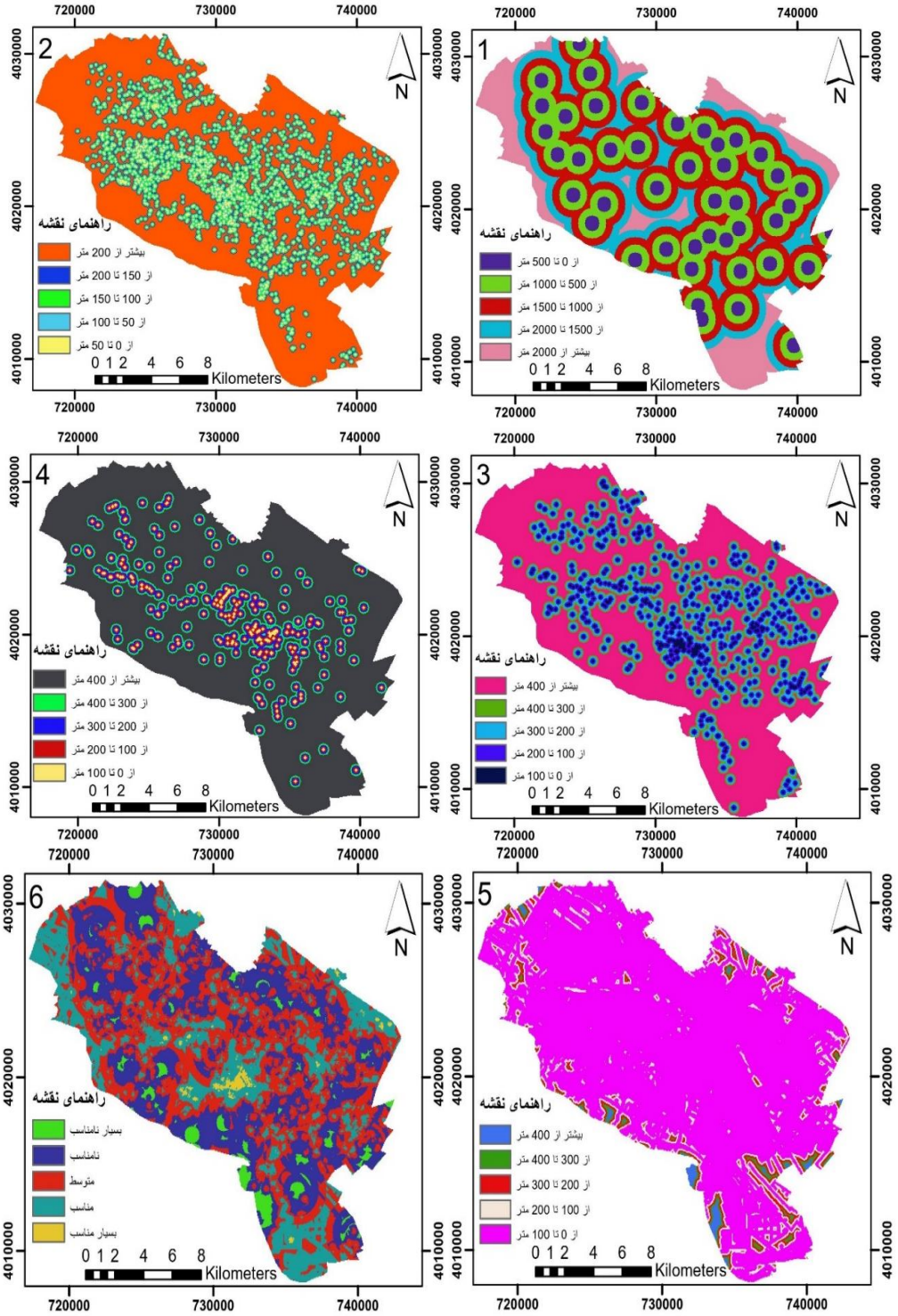
برای تعیین نواحی و نقاط مناسب برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی از معیارهای فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، مراکز درمانی، راه‌ها، مراکز اداری و مراکز آموزشی استفاده شده است. بدین منظور لایه‌های اطلاعاتی معیارهای مذکور در محیط GIS آماده‌شده‌اند. سپس لایه‌های اطلاعاتی طبق فواصل موجود در جدول ۱ در نرم‌افزار ArcGIS استانداردسازی و طبقه‌بندی شده‌اند. در استانداردسازی لایه‌ها کلیه مقادیر لایه‌های نقشه‌ای به دامنه یکسانی بین ۱ تا ۵ برده شدند که مقدار ۱ کمترین ارزش و مقدار ۵ بیشترین ارزش را نشان می‌دهد. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده معیارها در شکل (۳) نمایش داده‌شده است.

به دلیل وجود معیارهای متعدد، بایستی وزن هریک از معیارهای مورد استفاده مشخص شود که به این منظور از AHP استفاده‌شده است. برای این کار ابتدا جدول مقایسات زوجی معیارها ایجاد و توسط کارشناسان تکمیل شده و اوزان معیارها توسط AHP و با استفاده از امکانات نرم‌افزار اکسل محاسبه شدند. نرخ ناسازگاری در این پژوهش برای هریک از ماتریس‌های مقایسات زوجی بررسی شد و در صورت بزرگ‌تر بودن از ۰/۱، ماتریس با کمک خبره تصحیح گردید. اوزان به دست آمده برای هر معیار در جدول (۲) نمایش داده‌شده است.

جدول ۲: وزن‌های محاسبه‌شده برای معیارها

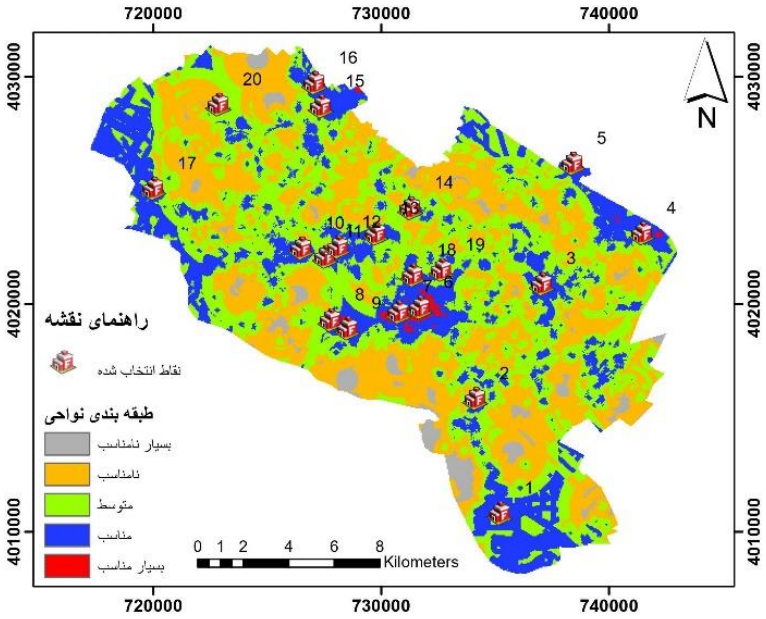
معیار	وزن
ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود	۰/۴
مراکز درمانی	۰/۲
راه‌ها	۰/۲
مراکز اداری	۰/۱
مراکز آموزشی	۰/۱

پس از محاسبه‌ی اوزان، لایه‌های طبقه‌بندی‌شده معیارها در نرم‌افزار ArcGIS و به کمک آنالیز weighted sum همپوشانی و نقشه حاصل از آن به ۵ کلاس بسیار مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب و بسیار نامناسب طبقه‌بندی شد. کلاس ۵ مناسب‌ترین و کلاس ۱ نامناسب‌ترین نواحی برای احداث یک ایستگاه آتش‌نشانی جدید در شهر مشهد را نشان می‌دهد. نقشه حاصل از همپوشانی معیارها در شکل (۳) نمایش داده‌شده است.



شکل ۳) نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده معیارها: ۱) فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود ۲) فاصله از مراکز آموزشی ۳) فاصله از مراکز درمانی ۴) فاصله از مراکز اداری ۵) فاصله از راه‌ها ۶) نقشه حاصل از همپوشانی معیارها

به‌منظور تعیین مکان بهینه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی، ۲۰ نقطه در نواحی بسیار مناسب و مناسب انتخاب شدند تا از بین آن‌ها بهترین نقطه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی به کمک الگوریتم‌های GA و PSO پیشنهاد شود. موقعیت این ۲۰ نقطه در شکل (۴) نشان داده‌شده است.



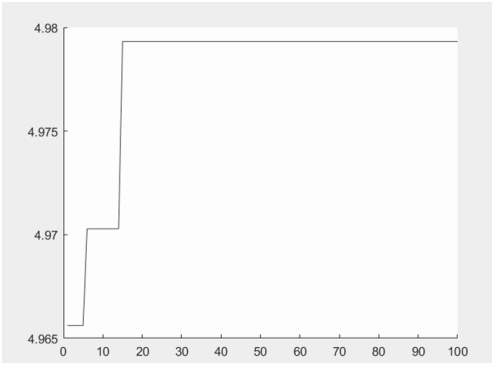
شکل ۴: موقعیت ۲۰ نقطه انتخاب‌شده اولیه

در گام دوم به کمک GA، نقطه بهینه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی جدید در شهر مشهد از بین ۲۰ نقطه‌ای که در بخش قبلی ذکر شد پیشنهاد می‌شود. برای مقایسه نقاط با یکدیگر معیارهای فاصله از مراکز ورزشی، مراکز مذهبی، پمپ‌های بنزین و گاز، مراکز فرهنگی و تاریخی و مراکز تجاری انتخاب شده‌اند. هر پنج معیار مذکور سازگار می‌باشند بدین معنا که در هریک، فاصله کمتر از مراکز مذکور بهتر است. به‌منظور مقایسه نقاط، جدول (۳) کمترین فاصله میان هر یک از نقاط را تا هر یک از پنج معیار بیان شده نشان می‌دهد. همچنین قابل ذکر است که وزن‌های برابری برای معیارهای این بخش در نظر گرفته‌شده است. علامت منفی اوزان به معنی سازگار بودن این معیارها است که از این علامت‌های منفی برای تبدیل شاخص‌های منفی به مثبت در فرآیند برنامه‌نویسی استفاده شده است.

جدول ۳: کمترین فاصله میان هر یک از ۲۰ نقطه تا هر یک از معیارها

وزن	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲
نقاط	مراکز ورزشی (متر)	مراکز مذهبی (متر)	پمپ‌های بنزین و گاز (متر)	مراکز فرهنگی و تاریخی (متر)	مراکز تجاری (متر)
۱	۲۱۶	۳۶۲	۶۹۷	۱۸۱۷	۱۵۵۱
۲	۹۰	۱۶۴	۷۹۶	۲۲۷۸	۸۳۳
۳	۱۹۸	۲۴۱	۶۴۳	۲۹۰	۱۰۹۹
۴	۸۸	۳۵۸	۳۲۹۹	۸۵۸	۳۲۱۵
۵	۵۵۵	۱۲۶۶	۱۰۶۵	۷۹۳	۲۶۴۱
۶	۱۲۸	۲۴۷	۱۱۱۳	۱۷۴	۱۲۰
۷	۸۲	۱۹۷	۱۳۱۵	۹۷۹	۴۴۶
۸	۷۱	۴۳۰	۱۷۸۸	۹۷۴	۲۱۷۶
۹	۶۱	۳۱۲	۱۰۵۹	۱۰۶۳	۱۳۶۸
۱۰	۱۵۸	۲۲۵	۱۵۳۸	۱۲۲۴	۹۳۹
۱۱	۲۹۲	۷۸۹	۱۹۹۷	۵۴۶	۶۴۷
۱۲	۸۰	۱۶۶	۱۴۶۸	۲۷۰	۷۴۸
۱۳	۶۲	۴۱۲	۱۷۸۱	۱۱۴۱	۲۴۵
۱۴	۲۵۳	۴۰۳	۲۱۶	۸۰۶	۵۳۱
۱۵	۲۸۳	۲۷۵	۸۵۳	۷۷۲	۱۱۰۰
۱۶	۴۸	۱۰۱	۱۷۵۵	۱۶۹۷	۶۶۵
۱۷	۳۳	۱۰۸	۳۳۱۲	۱۰۱۹	۹۳۰
۱۸	۹۵	۲۰۸	۱۰۸۰	۱۰۳۳	۵۵۲
۱۹	۴۶	۱۴۹	۸۰۹	۴۶۰	۳۲۲
۲۰	۴۱۷	۹۸	۱۷۵۸	۱۲۹۵	۲۲۶۴

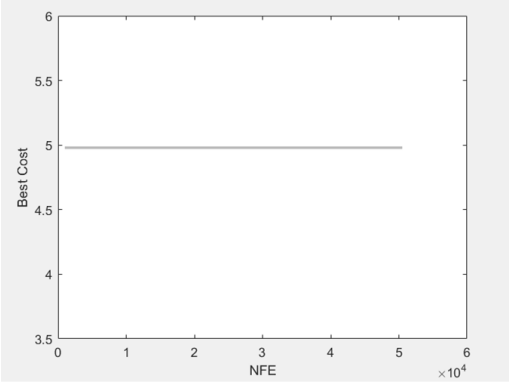
به‌منظور پیاده‌سازی GA دو کروموزوم، با تعداد ۵ ژن در هرکدام، تولید شده است که مقادیر موجود این ژن‌ها شماره نقاط می‌باشند. در هر تکرار بررسی‌های لازم جهت عدم وجود شماره نقطه مشابه در کروموزوم‌ها انجام می‌گردد. تابع هدف مسئله از نوع Fitness Function بوده و در هر تکرار مجموع مقادیر در جدول ۳ را برای نقاط موجود در هر ژن محاسبه می‌کند. در مرحله انتخاب ۲۰ درصد از ژن‌هایی که بهترین تابع برازش را دارا باشند مستقیما به تکرار بعد می‌روند و بر روی ۸۰ درصد باقی‌مانده از ژن‌ها عملیات تقاطع انجام می‌شود. پس از عملیات تقاطع کروموزوم‌های جدید بررسی می‌شوند تا نقاط تکراری در آن‌ها وجود نداشته باشد. در صورت وجود نقاط تکراری در کروموزوم‌ها عملیات جهش انجام شده و نقاط غیرتکراری جدید تولید می‌شوند. این عمل ۱۰۰ بار ادامه پیدا کرده و پس از اتمام بهترین تابع برازش انتخاب‌شده و نقطه‌ای که بهترین تابع برازش را دارا باشد به‌عنوان بهترین نقطه برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی جدید در شهر مشهد معرفی می‌شود. پس از اجرای GA نقطه شماره ۱۹ با میزان تابع برازش ۴/۹۷۹۳ به‌عنوان بهترین مکان برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی پیشنهاد شد. عملکرد GA در شکل (۵) نشان داده‌شده است که در آن محور عمودی نشان‌دهنده مقدار تابع برازش و محور افقی تعداد تکرار است. نقطه شماره ۱۹ از نظر مکانی در نزدیکی حرم مطهر رضوی و جز مناطق پر تردد شهر مشهد است.



شکل ۵: عملکرد GA

به‌منظور اجرای الگوریتم PSO نیز همانند GA از معیارهای فاصله از مراکز ورزشی، مراکز مذهبی، پمپ-های بنزین و گاز، فرهنگی و تاریخی و مراکز تجاری و اطلاعات موجود در جدول ۳ بهره گرفته‌شده است. پارامترهای الگوریتم PSO شامل c_1، c_2 و w به ترتیب مقادیر ۱ و ۲ و ۰/۰۲ و با اندازه جمعیت ۵۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شدند و با این مقادیر الگوریتم در زمان کمتری به جواب بهینه دست پیدا می‌کند. پس از اجرای الگوریتم PSO، نقطه شماره ۱۹ با میزان تابع برازش ۴/۹۷۹۳ به‌عنوان بهترین مکان برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی پیشنهاد می‌شود. عملکرد PSO در شکل (۶) نمایش داده‌شده است که در آن محور عمودی مقدار تابع برازش و محور افقی تعداد تابع هدف ارزیابی شده (NFE) است. همان‌طور که در عملکرد PSO مشخص است، الگوریتم توانسته با استفاده از پارامترهای تعریف شده از همان تکرار اول به بهینه‌ترین جواب برسد.

از مقایسه عملکردهای دو GA و PSO می‌توان یافت که هر دو الگوریتم نقطه شماره ۱۹ را به‌عنوان بهترین نقطه پیشنهاد داده‌اند و فرق اساسی بین آن‌ها این است که الگوریتم PSO از همان تکرار اول به جواب بهینه دست یافته اما GA از تکرار ۱۸ به بعد به جواب بهینه دست یافته است.



شکل ۶: عملکرد الگوریتم PSO

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

ایستگاه‌های آتش‌نشانی از جمله مراکز حیاتی و مهم خدماتی در شهرها هستند و نقش مهمی در تأمین امنیت و آسایش شهروندان ایفا می‌کنند. این نقش مهم باعث می‌شود که جانمایی مناسب این ایستگاه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار باشد. در این مقاله تخصیص مکانی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، از قابلیت‌های AHP و GA و PSO و GIS به عنوان روشی هیبریدی، بهره گرفته شده است. از معیارهای فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، مراکز درمانی، راه‌ها، مراکز اداری و مراکز آموزشی برای تعیین نواحی مناسب برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی به کار گرفته شد که به کمک AHP، وزن دهی به معیارهای مذکور انجام گردید. پس از

استانداردسازی و طبقه‌بندی لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه همپوشانی معیارها با وزن‌های حاصل از AHP تهیه شد. سپس نقشه همپوشانی به پنج کلاس بسیار مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب و بسیار نامناسب طبقه‌بندی‌شده و در نواحی بسیار مناسب و مناسب ۲۰ نقطه انتخاب گردید تا از میان آن‌ها بهینه‌ترین مکان برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی پیشنهاد شود. در بخش دوم با استفاده از GA و PSO و به کمک معیارهای فاصله از مراکز ورزشی، مراکز مذهبی، پمپ‌های بنزین و گاز، مراکز فرهنگی و تاریخی و مراکز تجاری نقطه بهینه از میان ۲۰ نقطه انتخاب‌شده در مرحله قبل، به‌عنوان مکان مستعد جهت احداث ایستگاه آتش‌نشانی پیشنهاد گردید. هر دو الگوریتم GA و PSO نقطه شماره ۱۹ که جز نقاط نزدیک به حرم مطهر رضوی به شمار می‌رود را با میزان تابع برازش ۴/۹۷۹۳ به‌عنوان مکان مناسب جهت احداث ایستگاه آتش‌نشانی جدید در شهر مشهد پیشنهاد دادند. نتایج عملکردی دو الگوریتم نشان می‌دهد که با توجه به پارامترهای تعریف شده برای هر کدام از الگوریتم‌ها، PSO توانسته در زمان کمتری نسبت به GA به جواب بهینه برسد.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که از دیگر روش‌های وزن‌دهی مانند فرآیند تحلیل شبکه‌ای و دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم کلونی زنبور عسل استفاده شود. همچنین با در نظر گرفتن معیارهای متفاوت نسبت به این پژوهش می‌توان فرآیند تحقیق را تکرار نمود.

منابع و مآخذ

اجزاء شکوهی، محمد. شایان، حمید. و درودی، محمدهادی. (۱۳۹۳). «مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر مشهد». جغرافیا و مخاطرات محیطی؛ ۳(۳): ۱۰۷-۱۲۸.

بلوری، سمیرا. وفایی‌نژاد، علیرضا. (۱۳۹۲). «استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی برای بهینه‌سازی مسئله مکان‌یابی ـ تخصیص چندهدفه در محیط سیستم اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های آتش‌نشانی منطقه ۱۱ شهر تهران) ». مطالعات مدیریت شهری، ۵(شماره ۴ (پیاپی ۱۶))، ۳۸-۵۰.

پوررمضان، عیسی. جوان، فرهاد. (۱۳۹۵). تحلیل محدودیت‌های ایمنی و مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهر رشت) ». جغرافیایی سرزمین. ۱۳(۵۰): ۱-۱۶.

پیاده کوهسار، جواد. مازندرانی‌زاده، حامد. صدر، سیدمحمدکاظم. (۱۳۹۸). «ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و PSO در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه مطالعه موردی: سدهای حوضه گرگان رود». مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۶(۲): ۲۳۹-۲۵۰.

تقی زاده فانید، ابوالقاسم. سالکی ملکی، محمدعلی. رنجبرنیا، بهزاد. قاسمی خوئی، معصومه. (۱۳۹۴). «ارائه الگویی برای استقرار منطقی ایستگاه‌های آتش‌نشانی (نمونه موردی: شهر تبریز) ». امداد و نجات. ۷(۲). ۸۱-۹۲.

جلالی، ریحانه. اعتمادفرد، حسین. خرقانی، حامد. شاد، روزبه. و صادقی، وحید. (۱۴۰۰). «مدل اولویت‌بندی و تخصیص واکسن کرونا در محلات شهر مشهد با استفاده از AHP و منطق فازی». طلوع بهداشت. ۲۰ (۴) :۷۸-۶۳.

حسین پورکوهشاهی، بهرام. مهدوی نجف‌آبادی، رسول. و حلی ساز، ارشک. (۱۳۹۷). «مکان گزینی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (مطالعه موردی: منطقه یک شهری بندرعباس)». جغرافیا و توسعه فضای شهری. ۱۴۵-۱۶۳.

دهقانی، مصطفی. و چمی، مهدی. (۱۳۹۸). «نقش مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی با رویکرد مدیریت بحران». ششمین کنفرانس ملی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.

رهنما، محمدرحیم. و آفتاب، احمد. (۱۳۹۳). «مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر ارومیه با استفاده از GIS و AHP». جغرافیا و توسعه. ۱۲(۳۵): ۱۵۳-۱۶۵.

زیاری، یوسفعلی. و یزدان پناه، سمانه. (۱۳۹۰). «مکانیابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از مدل AHP در محیط GIS (مطالعه موردی: شهر آمل) ». مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی (چشم‌انداز جغرافیایی). (۱۴)۶: ۷۴-۸۷.

شفیعی، مهدی. و قنبرزاده لک، مهدی. (۱۳۹۷). «مدل‌سازی فرآیند مکان‌یابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی جهت پخش سیلاب مبتنی بر تکنیک GIS و روش AHP (مطالعه موردی:

آبخوان دشت خوی) ». تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۵): ۲۱۹-۲۳۶.

عادلی، محسن. (۱۳۹۰). «مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر گرگان با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی.» *مجله آمایش جغرافیایی فضا*. ۱(۲): ۸۹-۱۲۸.

عفتی، میثم. کارگرخوش طبع، علی. و نسیمی، عمادالدین. (۱۳۹۶). «بهینه‌سازی مکانی سفرهای درون‌شهری با الهام از مسئله فروشنده دوره‌گرد و الگوریتم‌های فرا ابتکاری». همایش ملی ژئوماتیک، دوره ۲۴، تهران.

نظریان، اصغر. و کریمی، ببراز. (۱۳۸۸). «ارزیابی توزیع فضایی و مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر شیراز با استفاده از GIS». فصل‌نامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس، ۱(۲): ۵-۱۹.

نظریان، اصغر. یاری، پروانه. و کرمی نژاد، طیبه. (۱۳۹۴). «مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS (مطالعه موردی: شهرکرمانشاه) ». امداد و نجات. ۷(۲): ۲۶-۳۷.

هادیانی، زهره. کاظمی زاد، شمس اله. (۱۳۸۹). «مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از روش تحلیل شبکه و مدل AHP در محیط GIS مطالعه موردی: شهر قم». جغرافیا و توسعه. ۸(۱۷): ۹۹-۱۱۲.

یوسفی، حسین، و [دیگران]. (۱۳۹۹). «مکان‌یابی پخش سیلاب با تلفیق مدل‌های AHP و Fuzzy با استفاده از روش WLC در GIS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز خرم‌آباد) ». اکوهیدرولوژی. ۷(۱): ۲۵۱-۲۶۱.

Aktaş, E., Özaydın, Ö., Bozkaya, B., Ülengin, F., & Önsel, Ş. (2013). Optimizing fire station locations for the Istanbul metropolitan municipality. Interfaces, 43(3), 240-255.

Bui, D. T., Pradhan, B., Nampak, H., Bui, Q. T., Tran, Q. A., & Nguyen, Q. P. (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibilitgy modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. Journal of Hydrology, 540, 317-330.

Chaudhary, P., Chhetri, S. K., Joshi, K. M., Shrestha, B. M., & Kayastha, P. (2016). Application of an Analytic Hierarchy Process (AHP) in the GIS interface for suitable fire site selection: A case study from Kathmandu Metropolitan City, Nepal. Socio-economic planning sciences, 53, 60-71.

Chen, W., Panahi, M., & Pourghasemi, H. R. (2017). Performance evaluation of GIS-based new ensemble data mining techniques of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with genetic algorithm (GA), differential evolution (DE), and particle swarm optimization (PSO) for landslide spatial modelling. Catena, 157, 310-324.

Dasgupta, D., & Michalewicz, Z. (1997). Evolutionary algorithms in engineering applications. Springer Science & Business Media.

Erden, T., & Coşkun, M. Z. (2010). Multi-criteria site selection for fire services: the interaction with analytic hierarchy process and geographic information systems. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(10), 2127-2134.

Habibi, K., Lotfi, S., & Koohsari, M. J. (2008). Spatial analysis of urban fire station locations by integrating AHP model and IO logic using GIS (a case study of zone 6 of Tehran). Journal of Applied Sciences, 8(19), 3302-3315.

Hajipour, V., Fattahi, P., Bagheri, H., & Babaei Morad, S. (2022). Dynamic maximal covering location problem for fire stations under uncertainty: soft-computing approaches. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 13(1), 90-112.

Helly,W. (1975). Urban Systems Models; Academic Press: Cambridge, MA, USA.

Hogg, J. (1968). The siting of fire stations. J. Oper. Res. Soc. 19, 275–287.

Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press.

Kazemi, M., Kunt, M. M., Aghayan, I., & Larijani, R. J. (2013). Optimization model for fire station location based on GIS and Python: a case study in North Cyprus. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 330, pp. 1059-1064). Trans Tech Publications Ltd.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.

Liu, N., Huang, B., & Chandramouli, M. (2006). Optimal siting of fire stations using GIS and

ANT algorithm. Journal of computing in civil engineering, 20(5), 361-369.

Martín-Fernández, S., Martínez-Falero, E., Peribáñez, J. R., & Ezquerra, A. (2021). GIS-Based Simulated Annealing Algorithm for the Optimum Location of Fire Stations in the Madrid Region, Spain: Monitoring the Collapse Index. Applied Sciences, 11(18), 8414.

Nyimbili, P. H., & Erden, T. (2020). GIS-based fuzzy multi-criteria approach for optimal site selection of fire stations in Istanbul, Turkey. Socio-Economic Planning Sciences, 71, 100860.

Plane, D. R., & Hendrick, T. E. (1977). Mathematical programming and the location of fire companies for the Denver fire department. Operations Research, 25(4), 563-578.

Reilly, J. M., & Mirchandani, P. B. (1985). Development and application of a fire station placement model. Fire technology, 21(3), 181-198.

Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process McGraw-Hill. New York, 324.

Şen, A., İsmail, Ö., Gökgöz, T., & Şen, C. (2011). A GIS approach to fire station location selection.

Zhang, W., & Jiang, J. C. (2012). Research on the location of fire station based on GIS and GA. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 130, pp. 377-380). Trans Tech Publications Ltd.