

Locating Fire Stations using Deterministic and Fuzzy Multiple Criteria Decision Making Methods and GIS Information: A Case Study of Isfahan City

Zahra Motamedi*, Kamran Kianfar**

Abstract

This paper aims to identify the optimal locations for new fire stations in Isfahan city using multiple criteria decision-making (MCDM) methods and geographic information system (GIS) data. AHP, fuzzy AHP, and TOPSIS methods are used to identify potential locations for new fire stations based on decision criteria such as population density, proximity to main roads, distance from existing fire stations, density of hazardous materials, radius of the fire brigade, traffic network, land use, age of buildings, and potential for danger. The candidate locations for new fire stations are ranked according to these criteria, and the results are validated by the Statistics and Strategic Planning Unit of the Isfahan Central Fire Department. The fuzzy AHP results indicate that districts 8, 9, and 4 have the highest priority for new fire stations, respectively. Sensitivity analysis of the criteria weights reveals that district 8 has the highest priority, while districts 12 and 15 have the lowest. This study also provides managerial insights, including the need to modify municipal building regulations and relocate dangerous sites to improve fire safety in Isfahan city. The proposed approach provides a useful tool for decision-makers to identify optimal locations for new fire stations and improve fire safety in urban areas.

Keywords: Locating Fire Stations; Multiple-Criteria Decision Making; AHP; Fuzzy Theory; TOPSIS.

Received: Aug. 20, 2022; Accepted: Feb. 18, 2023.

* Ms.c, University of Isfahan.


** Assistant Professor, University of Isfahan (Corresponding Author).

Email: k.kianfar@eng.ui.ac.ir



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره قطعی و فازی و اطلاعات GIS (مورد مطالعه: شهر اصفهان)

زهرا معتمدی*، کامران کیانفر** 

چکیده

در این پژوهش سعی می‌شود، مکان‌یابی مطلوبی برای احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر اصفهان صورت گیرد. مکان‌های کاندید برای ایستگاه‌های جدید، با استفاده از تکنیک AHP به روش ساعتی، تکنیک فازی به روش چانگ و تاپسیس و سپس ترکیب آن‌ها با اطلاعات GIS تحلیل می‌شوند. با در نظر گرفتن معیارهای مختلف مانند تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی موجود، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها، شبکه ترافیک، کاربری اراضی، قدمت ساختمان‌ها و پتانسیل خطر، مکان‌های کاندید برای احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر اصفهان اولویت‌بندی خواهند شد. نتایج پژوهش حاضر با واحد آمار و برنامه‌ریزی استراتژیک سازمان مرکزی آتش‌نشانی شهر اصفهان در میان گذاشته شد و آن‌ها اولویت‌بندی حاصل از روش AHP فازی را تأیید کردند که در این روش، سه اولویت بالاتر به ترتیب منطقه هشت، منطقه نه و منطقه چهار شهر اصفهان است. تحلیل حساسیت روی وزن معیارها مشخص کرد که منطقه هشت در تمامی حالت‌ها دارای بالاترین اولویت برای احداث ایستگاه آتش‌نشانی است و مناطق دوازده و پانزده آخرین اولویت‌ها را به خود اختصاص دادند. چند پیشنهاد مدیریتی برای کنترل و بهبود شرایط احداث ایستگاه‌ها ارائه شد که شامل تغییر موقعیت اماکن خطرآفرین و اصلاح ضوابط ساختمان‌سازی شهرداری است.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ تحلیل سلسله‌مراتبی؛ نظریه فازی؛ تاپسیس.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹.

* کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.

** استادیار، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول).

Email: k.kianfar@eng.ui.ac.ir



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

۱. مقدمه

تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهرهای مختلف با داده‌های قطعی صورت گرفته است. در کلان‌شهر اصفهان نیز که دارای جمعیت بالایی است، موضوع مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی حائز اهمیت است؛ اما با توجه به اینکه همه داده‌ها همواره قطعی نیستند، در نظر گرفتن مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در محیط فازی ضروری است.

به‌طور کلی اعتبار و اهمیت شهرها به کیفیت خدمت‌رسانی عمومی به شهروندان بستگی دارد و یکی از مهم‌ترین خدماتی که با جان و مال مردم ارتباط مستقیم دارد، خدمات مربوط به آتش‌نشانی است. امروزه بحث ایمنی یکی از مهم‌ترین مسائل شهری است که توجه مدیران شهری را به خود جلب نموده است. آتش‌سوزی یکی از تهدیدات ناشی از بحران‌های طبیعی و مصنوعی است که می‌تواند چالش‌های وسیعی را در ابعاد مختلف زندگی شهری پدید آورد. چاودهاری^۱ (۲۰۱۶)، معتقد است ساخت منطقی تأسیسات آتش‌نشانی و نحوه استقرار ایستگاه‌های آن‌ها می‌تواند توانایی دولت‌ها را در کاهش یا جلوگیری از حوادث آتش‌سوزی در شهرها به میزان زیادی بهبود بخشد و باعث ایمنی شهروندان به هنگام وقوع هر گونه حادثه می‌شود [۲۱].

خسارات ناشی از آتش‌سوزی غیرمترقبه در منازل مسکونی، هر ساله به‌طور میانگین حدود ۰/۱ تا ۰/۴ درصد از تولید ناخالص ملی هر کشور است [۳۸]. از سوی دیگر هزینه احداث و بهره‌برداری ایستگاه‌های آتش‌نشانی در مقایسه با سایر خدمات عمومی در مناطق شهری، پرهزینه‌تر است [۳۱]. به نظر رئیس «کمیسیون سلامت، محیط‌زیست و خدمات شهری شورای شهر تهران» برای تجهیز و ساخت یک ایستگاه آتش‌نشانی در سال ۱۳۹۹ حدود ۴۵ تا ۵۰ میلیارد تومان لازم است. به همین دلیل لزوم مکان‌یابی و سامان‌دهی بهینه ایستگاه‌ها بیش‌ازپیش احساس می‌شود. متأسفانه ایجاد ایستگاه‌های آتش‌نشانی در ایران عمدتاً بدون برنامه مشخص بوده است و کارشناسان اعتقاد دارند وجود یک برنامه علمی برای توسعه و احداث این ایستگاه‌ها می‌تواند کیفیت زندگی شهری و هزینه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

در این پژوهش سعی می‌شود که با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و *GIS* به بررسی مکان‌هایی برای ایستگاه‌های جدید مراکز آتش‌نشانی در شهر اصفهان و مقایسه بین نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته شود. معیارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی موجود، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها، شبکه ترافیک، کاربری اراضی، قدمت ساختمان‌ها و

پتانسیل خطر است. این معیارها از مبانی نظری موضوع و پژوهش‌های اخیر به‌دست آمده است و با توجه به وزن معیارها اولویت مکان‌های ایستگاه‌ها تعیین می‌شود.

از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. ارائه یک رابطه جدید برای شعاع پوششی ایستگاه‌ها که برای هر منطقه از شهر متفاوت است؛ ۲. استفاده از داده‌های قطعی و فازی به‌صورت هم‌زمان در تصمیم‌گیری؛ ۳. استفاده از روش تاپسیس برای نخستین بار در کنار روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای مکان‌یابی اماکن شهری؛ ۴. ترکیب کردن داده‌های GIS با مدل‌های تصمیم‌گیری در مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی. در این پژوهش با استفاده از تحلیل حساسیت مشخص خواهد شد که هر یک از معیارها چگونه بر اولویت‌بندی ایستگاه‌های کاندید تأثیر می‌گذارند و توصیه‌های مدیریتی برای بهبود وضعیت هر معیار ارائه می‌شود؛ همچنین اطلاعات معیارها برای ایستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS محاسبه می‌شود که دارای دقت بالایی است و در فواصل زمانی کوتاهی به‌نگام می‌شود.

بخش دوم این مقاله به بررسی مبانی نظری موضوع به تفکیک مطالعات داخلی و خارجی اختصاص دارد. در بخش سوم تعریف دقیقی از مسئله موردنظر ارائه می‌شود. در بخش چهارم به تشریح روش حل شامل تعریف نقاط کاندید، محاسبات نرخ ناسازگاری برای پرسشنامه، رتبه‌بندی معیارها، مقدار هر معیار برای ایستگاه‌های کاندید، روش AHP، روش FAHP و TOPSIS پرداخته خواهد شد. تحلیل حساسیت روی وزن معیارها و پیشنهادها مدیریتی در بخش پنجم ارائه می‌شود و در نهایت بخش ششم شامل نتیجه‌گیری و مقایسه نتایج روش‌ها است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تعدادی از پژوهش‌های داخلی در حوزه مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در جدول ۱، ارائه شده است. طبق این جدول، در ۳ پژوهش از طریق مدل‌سازی به مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی پرداخته شده و مدل مسئله به روش‌های قطعی و ابتکاری حل شده و در ۱۱ پژوهش روش‌های دیگری برای مکان‌یابی انتخاب شده است. تلفیق روش AHP و نقشه‌های GIS بیشترین تعداد پژوهش‌ها را در این حوزه به خود اختصاص داده است. بر اساس ستون چهارم این جدول، در ۲ پژوهش از لحاظ محیط، محیط فازی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی انتخاب شده و در ۱۲ پژوهش در محیط قطعی به مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی پرداخته شده است. بر اساس ستون پنجم جدول، تنها در یک پژوهش مکان‌یابی ایستگاه‌ها به‌صورت چنددوره‌ای انجام شده و در ۱۳ پژوهش دیگر مکان‌یابی ایستگاه‌ها به‌صورت تک‌دوره‌ای در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های داخلی

| پژوهشگر (سال) | معیارهای مدنظر | محیط | هدف | دوره | روش حل |
|----------------------|--|------|---|-------------|------------------------------|
| زیاری، (۱۳۹۰) | کاربری‌های اراضی، تراکم جمعیت، نزدیکی به شیرهای آبرسانی آتش‌نشانی، نزدیکی به پمپ گاز و بنزین | فازی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| شیخ-الاسلامی، (۱۳۹۱) | شعاع پوششی، فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، فاصله از بازار، فاصله از بافت فرسوده، ساختار فضایی | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تحلیل شبکه و GIS و AHP |
| رهنما، (۱۳۹۳) | تراکم جمعیت، دسترسی، کاربری اراضی | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تحلیل شبکه و GIS و AHP |
| محمدی، (۱۳۹۳) | مکان‌های مستعد آتش‌سوزی، شیب، شبکه ارتباط اصلی، کاربری اراضی، تراکم جمعیت، دوربودن از اراضی ناسازگار، فاصله از ایستگاه‌های موجود، فاصله از خیابان‌های پرتراфик | فازی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| صابری‌فر، (۱۳۹۳) | سازگاری، آسایش، مطلوبیت، سلامتی، استانداردهای ایمنی، دسترسی، جمعیت، اندازه و کاربری زمین | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تحلیل شبکه و GIS و AHP |
| حیدری، (۱۳۹۳) | فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی، تراکم جمعیت بالا، فاصله از معابر شهری، فاصله از کاربری‌های سازگار و ناسازگار | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تحلیل شبکه و GIS و AHP |
| نظریان، (۱۳۹۴) | شعاع پوششی، تراکم جمعیت، نزدیکی به معابر، همسایگی‌های ناسازگار و سازگار | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| علی‌آبادی، (۱۳۹۶) | دسترسی، تراکم جمعیت، تراکم ساختمانی، کاربری‌های سازگار، شعاع عملکردی، کیفیت ابنیه، اندازه قطعات | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی در منطقه ۳ اصفهان | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| پوررمضان، (۱۳۹۵) | میزان جمعیت، فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی، فاصله از معابر اصلی، کاربری اراضی، فاصله از مراکز اضطراری | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| زنگی‌آبادی، (۱۳۹۶) | کاربری‌های اراضی، شیب، شبکه‌های ارتباطی، مکان ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | مدل سلسله-مراتبی معکوس و GIS |
| فتاحی، (۱۳۹۶) | پویایی، ظرفیت محدود وسایل نقلیه | قطعی | ماکزیمم کردن پوشش تقاضا | چند دوره‌ای | مدل‌سازی ریاضی و الگوریتم |

| پژوهشگر (سال) | معیارهای مدنظر | محیط | هدف | دوره | روش حل |
|--------------------|---|------|---|------------|---------------------------------------|
| زنبور عسل و PSO | | | | | |
| محقر، (۱۳۹۶) | اقتصادی و اجتماعی، جمعیت، دسترسی، وجود شعب بانک، خدمات و تسهیلات شهری | قطعی | مکان‌یابی شعب بانک | تک دوره‌ای | مدل حداکثر پوشش وزن‌دار |
| صالحی، (۱۳۹۷) | - | قطعی | مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تحلیل شبکه |
| قنبریان، (۱۳۹۷) | احتمال در دسترس نبودن ماشین‌ها، درجه اهمیت مختلف برای حادثه | قطعی | حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌ها و حداکثر پوشش تقاضا | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و حل به روش اِپسِلون محدودیت |

۱۶ پژوهش خارجی در جدول ۲، آورده شده است که بر اساس ستون آخر این جدول در ۷ پژوهش با روش مدل‌سازی، مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی انجام شده و مدل مسئله به روش‌های قطعی و ابتکاری حل شده است. در ۹ پژوهش از طریق روش‌های دیگر مکانی مناسب برای ایستگاه‌ها تخصیص داده شده است. بر اساس ستون سوم این جدول در یک پژوهش، مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در محیط فازی انجام شده و در ۱۵ مورد در محیط قطعی ایستگاه‌های آتش‌نشانی مکان‌یابی شده است. بر اساس ستون پنجم جدول، در همه پژوهش‌ها به صورت تک‌دوره‌ای به مکان‌یابی ایستگاه‌ها پرداخته شده است.

جدول ۲. خلاصه پژوهش‌های خارجی

| پژوهشگر (سال) | معیارهای مدنظر | محیط | هدف | دوره | روش حل |
|-------------------------------|--|------|---|------------|----------------------|
| اردن ^۱ ، (۲۰۱۰) | تعداد در هکتار، مساحت، پوشش ناحیه در دقیقه، تعداد در ناحیه، نسبت در کل مساحت ساخته شده | قطعی | مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی استانبول برای کاهش زمان پاسخگویی به ۵ دقیقه یا کمتر | - | تلفیق GIS و AHP |
| لیو ^۲ ، (۲۰۱۱) | حداکثر فاصله ایستگاه‌ها تا نقاط تقاضا باید ۷ کیلومتر باشد. | قطعی | حداقل‌کردن تلفات آتش‌سوزی و هزینه خدمات و تعداد ایستگاه آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و GIS و AHP |
| سن ^۳ ، | ظرفیت محدود ایستگاه‌ها | قطعی | به حداقل رساندن هزینه کل و | تک | مدل‌سازی و GIS و |

1. Erden
2. Liu
3. Sen

| پژوهشگر (سال) | معیارهای مدنظر | محیط | هدف | دوره | روش حل |
|-------------------------------|--|------|--|------------|---|
| (۲۰۱۱) | | | به حداکثر رساندن تعداد کل شبکه‌های تحت پوشش | دوره‌ای | حل مدل به روش قطعی |
| چوالیر ^۱ ، (۲۰۱۲) | - | قطعی | مینیمم کردن تعداد ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و حل مدل به روش شبکه‌های عصبی |
| ژنگ ^۲ ، (۲۰۱۲) | - | قطعی | مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | GIS و الگوریتم ژنتیک |
| کاظمی، (۲۰۱۳) | - | قطعی | به حداقل رساندن زمان پاسخ، به حداکثر رساندن سطح کلی خدمات | تک دوره‌ای | GIS و پایتون |
| چاودهار ^۳ ، (۲۰۱۶) | فاصله از جاده، پوشش زمین، فاصله از رودخانه‌ها، تراکم جمعیت | قطعی | مکان بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | - | تلفیق GIS و AHP |
| لین ^۴ ، (۲۰۱۹) | - | قطعی | مکان بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی و توزیع وسایل نقلیه آتش‌نشانی بین آن‌ها | - | شبیه‌سازی GIS و Anylogic |
| دبروت ^۵ ، (۲۰۱۹) | دسترسی، ترافیک، تراکم جمعیت، منطقه‌بندی، تعداد آتش‌نشانان موجود، افکار عمومی | قطعی | مکان بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | - | تلفیق GIS و AHP |
| رودریگز ^۶ ، (۲۰۲۰) | چندین ناحیه، انواع تقاضا، انواع وسایل نقلیه و قوانین اعزام وابسته به مناطق | قطعی | حداکثر کردن پوشش تقاضا | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و حل مدل توسط یک الگوریتم تکرارشونده |
| اودین ^۷ ، (۲۰۲۰) | زمان پاسخ ۵ دقیقه | قطعی | حداکثر کردن پوشش تقاضا | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و حل الگوریتم حریمانه |
| بلوری، (۲۰۲۰) | اولویت‌بندی ایستگاه‌ها با توجه به نزدیکی تا محل حادثه | قطعی | حداقل کردن زمان پاسخ | تک دوره‌ای | مدل‌سازی و الگوریتم Tabu و الگوریتم ژنتیک |
| زرین‌پنجه، (۲۰۲۰) | - | قطعی | تعیین مسیرهای بهینه بین ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مکان‌های حادثه | تک دوره‌ای | الگوریتم کلونی مورچگان |
| ساکالارو ^۸ ، | در هر حادثه حداقل ۲ کامیون در | قطعی | حداکثر رساندن پوشش | تک | مدل‌سازی و حل |

1. Chevalier
2. Zhang
3. Chaudhary
4. Linn
5. D' brot
6. Rodriguez
7. Uddin
8. Sakellariou

| پژوهشگر (سال) | معیارهای مدنظر | محیط | هدف | دوره | روش حل |
|-------------------------------|---|------|--------------------------------------|------------|----------------------|
| (۲۰۲۰) | موقعیت باید قرار بگیرد. | | تقاضا و حداقل کردن تعداد وسایل نقلیه | دوره‌ای | مدل به روش قطعی |
| نیمبلی ^۱ (۲۰۲۰) | تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی و ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود، تراکم تأسیسات مواد خطرناک، فاصله از مناطق در معرض خطر زلزله | فازی | مکان بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GIS و AHP |
| خراقانی (۲۰۲۲) | فاصله از مراکز ورزشی، مراکز مذهبی، پمپ‌بنزین‌ها و پمپ‌بنزین‌ها، مراکز فرهنگی، تاریخی و تجاری | قطعی | مکان بهینه ایستگاه‌های آتش‌نشانی | تک دوره‌ای | تلفیق GA و AHP و PSO |

بر اساس جدول‌های ۱ و ۲، مشخص است که مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی به دو طریق، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و GIS و مدل‌سازی و حل مدل انجام می‌شود. در مسائلی که از روش مدل‌سازی استفاده می‌شود، هدف‌های مختلفی با تعداد دوره‌های متفاوت در محیط قطعی یا فازی مطرح می‌شود. در مسائلی که روش حل با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، معیارهای مختلف در محیط‌های قطعی یا فازی مطرح می‌شود.

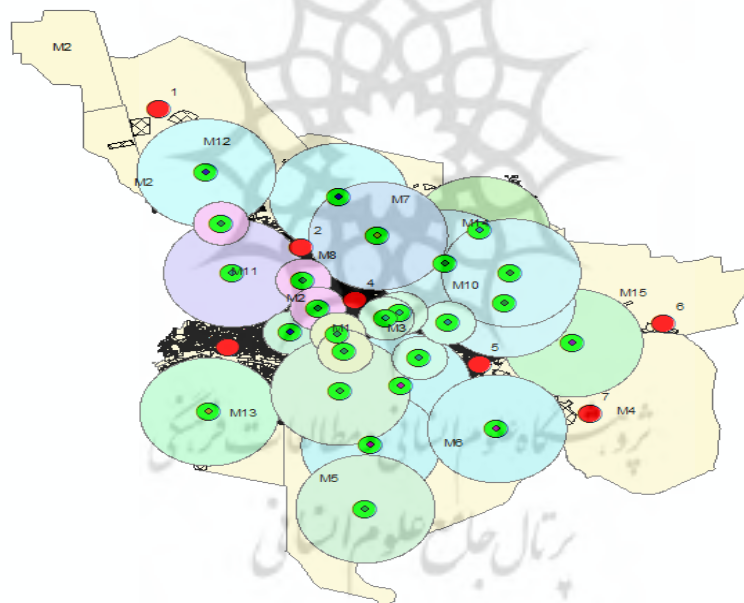
در پژوهش‌های اخیر به مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی فقط با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته شده است. در پژوهش حاضر مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر اصفهان با استفاده از سه روش AHP و FAHP و TOPSIS و مقایسه بین آن‌ها و تلفیق آن با GIS صورت می‌گیرد. معیارهای مورد استفاده، تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی موجود، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها، شبکه ترافیک، کاربری اراضی، قدمت ساختمان‌ها و پتانسیل خطر است. در هیچ یک از پژوهش‌های ذکر شده در جدول‌های ۱ و ۲، معیار شعاع پوششی متفاوت برای ایستگاه‌های آتش‌نشانی در مناطق مختلف در نظر گرفته نشده و همچنین از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و مقایسه بین نتایج روش‌های دقیق و فازی استفاده نشده است. این دو مورد به‌عنوان نوآوری در این پژوهش مطرح می‌شود و باید در نظر داشت که اطلاعات مربوط به محاسبه معیارها در این پژوهش به‌صورت بهنگام از نرم‌افزار ArcGIS استخراج شده است. این نرم‌افزار شامل مجموعه‌ای پیچیده و کامل از امکانات و ابزارهای متنوع است که با استفاده از آن‌ها می‌توان داده‌ها را تحلیل و پردازش کرد. در این نرم‌افزار اطلاعات مکانی و اطلاعات توصیفی با یکدیگر تلفیق می‌شوند و هر نقشه‌ای که توسط این نرم‌افزار ساخته شود با همان مختصات در طبیعت قابل تطبیق و

مشاهده است. استفاده از نرم‌افزار ArcGIS در تولید داده‌ها برای پژوهش‌های حوزه مکان‌یابی بسیار متداول است. برای مثال، از این نرم‌افزار در مکان‌یابی شعب بانک‌ها، مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و یا اسکان اضطراری زلزله‌زدگان استفاده می‌شود [۴، ۱۵، ۸].

۳. روش‌شناسی پژوهش

استان اصفهان، ششمین استان پهناور و سومین استان پرجمعیت ایران است. مناطق پانزده‌گانه شهر اصفهان در شکل ۱، مشاهده می‌شود که ۲۵ ایستگاه آتش‌نشانی موجود با رنگ سبز مشخص شده است. در مکان‌هایی که جمعیتی وجود دارد و توسط بقیه ایستگاه‌ها پوشش داده نشده است، ۷ ایستگاه کاندید با رنگ قرمز در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، داده‌های لازم برای شهر اصفهان از سازمان آتش‌نشانی و «سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری» و در قالب نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. این داده‌ها شامل نقشه مناطق شهرداری، نقشه حوادث و آتش‌سوزی سه‌ساله اخیر، نقشه تراکم جمعیت، نقشه ایستگاه‌های پمپ‌بنزین و گاز و شهرک‌های صنعتی، نقشه ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود و نقشه خیابان‌های اصلی از شهر اصفهان است.



شکل ۱. ایستگاه‌های کاندید و ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود شهر اصفهان

در این پژوهش، ابتدا ۲۴ عدد پرسشنامه در میان ۱۲ ایستگاه آتش‌نشانی در ۴ نقطه اصفهان (هر نقطه ۳ ایستگاه) توزیع شد و در هر ایستگاه پرسشنامه‌ها توسط ۲ نفر پر شد و در مجموع ۲۴ عدد پرسشنامه تهیه شد. در این پرسشنامه ۹ معیار استخراج شده از مبانی نظری موضوع به شرح تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی موجود، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها، شبکه ترافیک، کاربری اراضی، قدمت ساختمان‌ها و پتانسیل خطر به‌صورت دوه‌دو از لحاظ درجه اهمیت نسبت به هم مقایسه می‌شوند. در این پرسشنامه برای درجه اهمیت معیارها از طیف پنج گزینه‌ای لیکرت استفاده شد. اعداد فازی مورد استفاده در این پژوهش، اعداد فازی مثلثی به‌صورت (l, m, u) هستند. عبارتهای کلامی به‌صورت جدول ۳، با اعداد قطعی و فازی امتیازبندی شده‌اند.

جدول ۳. امتیازبندی قطعی و فازی

| عبارت کلامی | عدد قطعی | عدد فازی | عبارت کلامی | عدد قطعی | عدد فازی |
|-----------------|----------|-------------|-------------------|----------|----------------------------|
| ترجیح برابر | ۱ | $(1, 1, 3)$ | معکوس «تا حدودی» | 3^{-1} | $(5^{-1}, 3^{-1}, 1)$ |
| تا حدودی مرجح | ۳ | $(1, 3, 5)$ | معکوس «متوسط» | 5^{-1} | $(7^{-1}, 5^{-1}, 3^{-1})$ |
| ترجیح متوسط | ۵ | $(3, 5, 7)$ | معکوس «زیاد» | 7^{-1} | $(9^{-1}, 7^{-1}, 5^{-1})$ |
| ترجیح زیاد | ۷ | $(5, 7, 9)$ | معکوس «خیلی زیاد» | 9^{-1} | $(9^{-1}, 9^{-1}, 7^{-1})$ |
| ترجیح خیلی زیاد | ۹ | $(7, 9, 9)$ | | | |

پس از تبدیل پرسشنامه‌ها به ماتریس مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری ماتریس با اعداد فازی به روش گوگوس و بوچر^۱ (۱۹۹۸) و با اعداد قطعی به روش ساعتی^۲ (۱۹۸۷) محاسبه شد [۲۵]. به‌منظور بهبود نرخ ناسازگاری، پرسشنامه‌هایی که نرخ ناسازگاری آن‌ها در حالت قطعی بیشتر از ۰/۵ بود، حذف شدند؛ سپس رتبه‌بندی با اعداد قطعی و اعداد فازی بین ۹ معیار صورت گرفت و معیارها با رتبه بیشتر از بین ۹ معیار انتخاب شدند. مقدار هر یک از معیارها برای ایستگاه‌های کاندید با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به‌دست آمد.

مواد خطرناک در پژوهش نیمبلی و اردن^۳ (۲۰۲۰) شامل ایستگاه‌های نفتی، مواد شیمیایی، گاز مایع پترولیوم (LPG) و گازهای فشرده‌شده در شهر استانبول به ۵ دسته کمی تقسیم شده و به هر دسته وزنی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده شده است؛ به‌صورتی که هر چه تعداد تأسیسات خطرناک بیشتر باشد وزن آن بیشتر است [۳۲]. در پژوهش حاضر مشابه پژوهش نیمبلی و اردن (۲۰۲۰)، تعداد تأسیسات مواد خطرناک شهر اصفهان شامل ایستگاه‌های پمپ‌بنزین و گاز و گازوئیل و شهرک‌های صنعتی هر منطقه به ۳ دسته تقسیم شد و وزن‌دهی قطعی و فازی برای

1. Gogus & Boucher

2. Saaty

3. Nyimbili & Erden

این معیار بر اساس منطقه به‌دست آمد؛ سپس برای ایستگاه‌های کاندید نیز بر اساس منطقه خود وزن قطعی و فازی و وضعیت محاسبه شد.

معیار نزدیکی به جاده اصلی نیز مشابه پژوهش نیمبلی و اردن (۲۰۲۰)، محاسبه می‌شود [۳۲]. به‌صورتی که فاصله ایستگاه‌های موجود تا خیابان اصلی به ۵ دسته تقسیم شد و وزن دهی ۱ تا ۵ برای آن صورت گرفت؛ به‌صورتی که هر چه فاصله بیشتر باشد، وزن آن کمتر است؛ سپس ایستگاه‌های کاندید بر اساس فاصله‌ای که تا خیابان اصلی دارند در این بازه‌ها قرار گرفتند و وزن فازی و قطعی و وضعیت برای آن‌ها محاسبه شد.

پتانسیل خطر (فراوانی حریق و حوادث) در بازه زمانی ابتدای ۱۳۹۷ تا انتهای ۱۳۹۹ در نظر گرفته شده است. با مشخص‌بودن تعداد ایستگاه‌های موجود در هر منطقه و تقسیم پتانسیل خطر به تعداد ایستگاه موجود در هر منطقه، میزان پتانسیل خطر نسبی هر منطقه به‌دست آمد. این مقادیر به ۵ دسته تقسیم شدند و وزن دهی قطعی و فازی برای این معیار بر اساس منطقه به‌دست آمد؛ به‌طوری‌که هرچه تعداد حوادث و آتش‌سوزی بیشتر باشد، وزن آن نیز بیشتر است. برای ایستگاه‌های کاندید نیز بر اساس منطقه خود وزن قطعی و فازی و وضعیت به‌دست آمد.

برای محاسبه معیار تراکم جمعیت، با داشتن مقادیر جمعیت هر منطقه در اصفهان و مساحت آن منطقه و تقسیم این دو مقدار بر هم تراکم جمعیت هر منطقه به‌دست می‌آید. مقادیر تراکم جمعیت، طبق پژوهش ابراهیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) به پنج دسته تقسیم شد و وزن دهی قطعی و فازی برای این معیار بر اساس منطقه به‌دست آمد [۳]؛ به‌صورتی که هر چه مقدار جمعیت بیشتر باشد، وزن بیشتری برای معیار تراکم در نظر گرفته می‌شود.

منطقی است که سرعت وسایل نقلیه در مناطق مختلف شهر متفاوت باشد؛ بنابراین در این پژوهش، مطابق پژوهش تاتاری و همکاران (۲۰۱۵)، سرعت خودروها در مناطق پرجمعیت و مرکز شهر اصفهان ۲۰ کیلومتر بر ساعت و در مناطق حاشیه اصفهان با جمعیت کمتر ۵۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است [۱۷]؛ همچنین طبق استاندارد جهانی زمان رسیدن به مکان آتش‌سوزی ۳ تا ۵ دقیقه در نظر گرفته شده است که با احتساب هدررفتن یک دقیقه برای رسیدن پیام آتش‌سوزی به ایستگاه و خروج خودرو از ایستگاه، ۴ دقیقه زمان برای خروج خودروها تا رسیدن به مکان حادثه لازم است؛ بنابراین طبق رابطه ۱، شعاع پوششی در مرکز اصفهان برابر $۱/۳۳$ کیلومتر و در حاشیه اصفهان برابر با $۳/۳۳$ کیلومتر است. در نظر گرفتن شعاع پوششی متفاوت برای ایستگاه‌های آتش‌نشانی در مناطق مختلف یکی از نوآوری‌های این پژوهش است.

رابطه (۱) $\text{سرعت خودروها} \times \text{حداکثر زمان مطلوب برای رسیدن به حادثه} = \text{شعاع پوششی}$

با توجه به شعاع پوششی، جمعیت پوشش‌داده‌نشده در هر منطقه به ۵ دسته تقسیم شد و وزن دهی قطعی و فازی برای این معیار بر اساس منطقه به‌دست آمد؛ به‌طوری‌که هرچه جمعیت

پوشش داده‌نشده بیشتر باشد، وزن آن نیز بیشتر است؛ سپس برای ایستگاه‌های کاندید نیز بر اساس منطقه خود، وزن قطعی و فازی و وضعیت به‌دست آمد. در ادامه از میان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تاپسیس، اولویت‌بندی ایستگاه‌های کاندید صورت گرفت و نتایج روش‌های مختلف با هم مقایسه شدند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

ایستگاه‌های کاندید و موجود طبق شکل ۱، در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه، روند حل مسئله ارائه شده است. ابتدا نرخ ناسازگاری پرسشنامه‌ها محاسبه می‌شود تا پرسشنامه‌هایی که با دقت کافی تکمیل نشده‌اند از نتایج حذف شوند؛ سپس نحوه اجرای محاسبات فازی و استخراج داده‌های لازم برای محاسبه معیارها از نرم‌افزار ArcGIS تشریح خواهد شد. در ادامه نیز نتایج سه روش مورد استفاده در این پژوهش ارائه می‌شود.

محاسبات نرخ ناسازگاری پرسشنامه‌ها. ابتدا پرسشنامه‌ها در میان کارشناسان ایستگاه‌های آتش‌نشانی شهر اصفهان تقسیم شدند. تمامی ۲۴ پرسشنامه جمع‌آوری شده به ۲۴ ماتریس مقایسات زوجی قطعی تبدیل شد که عبارت‌های کلامی در پرسشنامه طبق جدول ۳ به اعداد قطعی تبدیل شدند؛ به‌صورتی که اگر معیارها در سطرها نسبت به معیارها در ستون‌ها مرجح‌تر بودند، اعداد صحیح قطعی و اگر معیارها در ستون‌ها نسبت به معیارها در سطرها مرجح‌تر بودند، اعداد کسری قطعی نوشته شدند. هر عضو در ماتریس ۱ تا ۲۴ به‌صورت A_1 تا A_{24} نامگذاری شد و با میانگین‌گیری از این اعضا طبق رابطه ۲، ماتریس تلفیقی جدول ۴ به‌دست می‌آید.

$$A_T = \frac{\sum_{n=1}^{24} A_n}{24}$$

رابطه (۲)

جدول ۴. ماتریس مقایسه زوجی تلفیقی

| تراکم جمعیت | تراکم اصلی | نزدیکی به جاده | فاصله از ایستگاه | آتش نشانی موجود | تراکم مواد خطرناک | شعاع پوشش آتش-نشانی ها | شبکه ترافیک | کاربری اراضی | قدمت ساختمان ها | پتانسیل خطر |
|-------------|------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-------------|--------------|------------------------|-------------|
| ۱ | ۰/۵۵۲۹ | ۳/۲۴۵۴ | ۰/۷۰۶۶ | ۱/۵۶۴۱ | ۱/۲۹۷۰ | ۱/۶۶۲۹ | ۲/۶۹ | ۰/۵۰۳۳ | تراکم جمعیت | |
| ۰/۶۴۳۹ | ۱ | ۱/۸۶۷۹ | ۱/۸۱۷۵ | ۳/۵۳۸۷ | ۱/۹۴۸۷ | ۱/۷۳۳۹ | ۲/۸۴۰۴ | ۰/۳۱۷۹ | نزدیکی به جاده اصلی | |
| ۰/۳۰۸۱ | ۰/۵۳۵۳ | ۱ | ۰/۶۸ | ۱/۶۶۷۵ | ۱/۶۷۶۶ | ۲/۱۴۷۵ | ۲/۱۵۶۶ | ۰/۷۷۵ | فاصله از ایستگاه موجود | |
| ۱/۴۱۵۰ | ۰/۵۵۰۲ | ۱/۴۷۰۵ | ۱ | ۳/۹۰۵۴ | ۳/۳۴۷۰ | ۴/۲۳۰۴ | ۴/۲۹۳۷ | ۲/۰۴۶۶ | تراکم مواد خطرناک | |
| ۰/۶۳۹۳ | ۰/۲۸۲۵ | ۰/۵۹۹۷ | ۰/۲۵۶۰ | ۱ | ۱/۱۳ | ۱/۷۶۸۷ | ۲/۰۹۴۵ | ۱/۱۳۲ | شعاع پوشش آتش-نشانی ها | |
| ۰/۷۷۰۹ | ۰/۵۱۳۱ | ۰/۵۹۶۴ | ۰/۲۹۸۷ | ۰/۸۸۴۹ | ۱ | ۱/۹۲۵ | ۲/۶۰۸۳ | ۱/۰۲۷ | شبکه ترافیک | |
| ۰/۶۰۱۳ | ۰/۵۷۷۰ | ۰/۴۶۵۶ | ۰/۳۳۶۳ | ۰/۵۶۵۳ | ۰/۵۱۹۴ | ۱ | ۱/۸۳۸۷ | ۰/۴۲۰۸ | کاربری اراضی | |
| ۰/۳۷۱۷ | ۰/۳۵۲۰ | ۰/۴۶۳۶ | ۰/۳۳۲۸ | ۰/۴۷۷۴ | ۰/۳۸۳۳ | ۰/۵۴۳۸ | ۱ | ۰/۴۴۲۰ | قدمت ساختمان ها | |
| ۱/۹۸۶۷ | ۳/۱۴۵۴ | ۱/۲۹۰۳ | ۰/۴۸۸۵ | ۰/۸۸۳۳ | ۰/۹۷۳۶ | ۲/۳۷۶۲ | ۲/۲۶۲۰ | ۱ | پتانسیل خطر | |

نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی با اعداد قطعی با استفاده از روش ساعتی (۱۹۸۷)، برابر با ۰/۰۶۸۸ به دست آمد و چون این مقدار کمتر از ۰/۱ است، ماتریس جدول ۴ سازگار است. در ادامه، ۲۴ پرسشنامه جمع آوری شده به ۲۴ ماتریس مقایسات زوجی فازی تبدیل شد که عبارت‌های کلامی در پرسشنامه‌ها به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند؛ به صورتی که اگر معیارها در سطرها نسبت به معیارها در ستون‌ها مرجح بودند، اعداد صحیح فازی و اگر معیارها در ستون‌ها نسبت به معیارها در سطرها مرجح بودند، اعداد کسری فازی نوشته شدند. ماتریس‌های مقایسات زوجی طبق رابطه ۳، به یک ماتریس تلفیقی تبدیل شد. در این رابطه هر عدد فازی مثلثی i با نماد (L_i, m_i, U_i) مشخص شده است و مقادیر تلفیقی اعداد فازی با نماد (L_T, m_T, U_T) مشخص شده‌اند.

$$(L_T, m_T, U_T) = (\min\{L_1, \dots, L_{24}\}, \text{average}\{m_1, \dots, m_{24}\}, \max\{U_1, \dots, U_{24}\}) \quad (3)$$

برای محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس تلفیقی فازی به روش فازی با استفاده از روش گوگوس و بوچر (۱۹۹۸) باید ماتریس بالا به دو ماتریس میانگین هندسی حد پایین و بالا و

ماتریس حد میانی تبدیل شود. میزان نرخ ناسازگاری برای ماتریس میانگین هندسی برابر با $0/2152$ است. چون این مقدار بیشتر از $0/1$ است، این ماتریس ناسازگار است. میزان نرخ ناسازگاری ماتریس حد میانی معادل $0/0725$ به‌دست آمد که با توجه به اینکه کمتر از $0/1$ است، ماتریس سازگار است؛ اما برای اینکه یک ماتریس مقایسه زوجی فازی سازگار باشد، باید میزان نرخ ناسازگاری ماتریس اول و دوم آن کوچک‌تر از $0/1$ باشد و با توجه به اینکه در این ماتریس، این مقدار برای ماتریس دوم بیشتر از $0/1$ است، این ماتریس در مجموع یک ماتریس ناسازگار است.

در ادامه برای گرفتن نتیجه بهتر، پرسشنامه‌هایی که نرخ ناسازگاری آن‌ها در حالت قطعی بیشتر از $0/5$ بود، حذف شدند (پرسشنامه‌های ۱، ۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷). با حذف پرسشنامه‌های بالا، میزان نرخ ناسازگاری ماتریس حد میانی اعداد فازی در پرسشنامه تلفیقی عدد $0/0593$ و میزان نرخ ناسازگاری ماتریس دوم، یعنی ماتریس میانگین هندسی حد بالا و پایین اعداد فازی در پرسشنامه تلفیقی عدد $0/1206$ به‌دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با حذف پرسشنامه‌هایی که نرخ ناسازگاری آن‌ها بیشتر از $0/5$ بود، میزان نرخ ناسازگاری ماتریس تلفیقی در دو حالت قطعی و فازی بهبود یافته است. ملاک ادامه محاسبات در این فصل حذف پرسشنامه‌های بالا و استفاده از ۱۹ پرسشنامه باقیمانده است.

رتبه‌بندی معیارها با اعداد فازی. برای رتبه‌بندی معیارها با اعداد فازی، ابتدا ماتریس مقایسات زوجی تلفیقی طبق رابطه ۳، محاسبه شد و تنها تفاوت آن حذف ۵ پرسشنامه از ۲۴ پرسشنامه حاضر است. این ماتریس به‌عنوان ماتریس اولیه در نظر گرفته شده و سپس مراحل وزن‌دهی معیارها در روش FAHP طی شد. معیارها بر اساس وزن، طبق جدول ۵، رتبه‌بندی شدند.

جدول ۵. وزن هر معیار از طریق رتبه‌بندی فازی

| رتبه‌بندی | فازی‌زدایی وزن‌ها | معیارها |
|-----------|-------------------|----------------------------------|
| ۴ | $0/6911$ | تراکم جمعیت |
| ۲ | $0/7960$ | نزدیکی به جاده اصلی |
| ۷ | $0/5975$ | فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی موجود |
| ۱ | $0/8054$ | تراکم مواد خطرناک |
| ۵ | $0/6714$ | شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها |
| ۶ | $0/6411$ | شبکه ترافیک |
| ۸ | $0/5887$ | کاربری اراضی |
| ۹ | $0/5596$ | قدمت ساختمان‌ها |
| ۳ | $0/7864$ | پتانسیل خطر |

در ادامه، معیارهای با وزن کمتر از ۰/۶۵ حذف می‌شوند؛ به عبارتی ۵ معیار تراکم مواد خطرناک، نزدیکی به جاده اصلی، پتانسیل خطر، تراکم جمعیت و شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها با وزن بیشتر از ۰/۶۵ انتخاب و بقیه معیارها کنار گذاشته شدند. دلیل حذف برخی از معیارها در این پژوهش این بود که نتایج محاسباتی اولیه نشان داد اگر تمام ۹ معیار در محاسبات روش تحلیل سلسله‌مراتبی وارد شوند، وزن نهایی گزینه‌ها بسیار به هم نزدیک می‌شود و نمی‌توان اولویت‌بندی مناسبی روی گزینه‌ها انجام داد. از سوی دیگر، نزدیک‌شدن وزن گزینه‌ها باعث می‌شد تا تحلیل حساسیت روی پارامترهای ورودی، نتایج مناسبی تولید نکند. این معیارها نسبت به یکدیگر هیچ‌گونه وابستگی ندارند و مستقل از یکدیگر هستند و با حذف تعدادی از آن‌ها مشکلی در محاسبات تحلیل سلسله‌مراتبی ایجاد نمی‌شود. در بسیاری از پژوهش‌ها مانند تاتاری و همکاران (۲۰۱۵) برای حالتی که تعداد معیارها زیاد باشد، برخی از معیارها با وزن کمتر حذف شده است [۱۷].

مقادیر معیارها برای ایستگاه‌های کاندید. مقادیر معیارها برای ایستگاه‌های کاندید به کمک نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد؛ سپس مقادیر حاصل بازه‌بندی شدند و وزن قطعی و فازی و وضعیت برای هر بازه تخصیص داده شد. در نرم‌افزار ArcGIS با کمک منوی Selection و قسمت Select By Location، در کادر Target layer لایه مواد خطرناک انتخاب شده و در کادر Source layer لایه مناطق مختلف انتخاب می‌شود. در شکل ۲، مواد خطرناک منطقه ۵ در نرم‌افزار مشخص شده است.

Untitled.mxd - ArcMap

File Edit View Bookmarks Insert Selection Geoprocessing Customize Window

1:250,000

Table

mavad khatarnak

| FID | Shape * | name | osm id | fuel | an |
|-----|---------|----------------------------|------------|------|----|
| 0 | Point | شهرک صنعتی محمدآباد مرع | 0 | | |
| 1 | Point | شهرک صنعتی جی | 0 | | |
| 2 | Point | پمپ بنزین شهرک‌کار | 411334874 | fuel | |
| 3 | Point | | 483031074 | fuel | |
| 4 | Point | | 485995170 | fuel | |
| 5 | Point | پمپ بنزین چوران | 1561129506 | fuel | |
| 6 | Point | پمپ بنزین حکیم نظامی | 2086276670 | fuel | |
| 7 | Point | پمپ گاز سیاهان شهر | 3232010766 | fuel | |
| 8 | Point | پمپ بنزین سیاهان شهر | 3234205817 | fuel | |
| 9 | Point | پمپ گاز | 3718895707 | fuel | |
| 10 | Point | پمپ گاز cng | 3718895714 | fuel | |
| 11 | Point | | 3983421000 | fuel | |
| 12 | Point | جایگاه سوخت پترو آیریک | 4120857189 | fuel | |
| 13 | Point | پمپ بنزین | 4202409849 | fuel | |
| 14 | Point | | 4226177972 | fuel | |
| 15 | Point | پمپ بنزین وحید | 4330664057 | fuel | |
| 16 | Point | پمپ گاز نوشاح | 4378743892 | fuel | |
| 17 | Point | پمپ گاز شمس کهنذر | 4378773491 | fuel | |
| 18 | Point | رشدای CNG جایگاه | 4378783392 | fuel | |
| 19 | Point | پمپ قدیمی گاز LPG | 4397071495 | fuel | |
| 20 | Point | پمپ بنزین | 4414118181 | fuel | |
| 21 | Point | خودرو CNG تعمیرات | 4419501199 | fuel | |
| 22 | Point | جایگاه سوخت مهدی | 4485186040 | fuel | |
| 23 | Point | پمپ بنزین | 4505097989 | fuel | |
| 24 | Point | جایگاه سوخت سیاهان پارسه | 4524227314 | fuel | |
| 25 | Point | پمپ بنزین پترو آیریک | 4549464141 | fuel | |
| 26 | Point | پمپ بنزین | 4589091542 | fuel | |
| 27 | Point | پمپ بنزین رسالت | 4694962747 | fuel | |
| 28 | Point | پمپ بنزین | 4794990821 | fuel | |
| 29 | Point | پمپ بنزین گلستان | 5017359592 | fuel | |
| 30 | Point | پمپ بنزین ایمان | 5023487241 | fuel | |
| 31 | Point | جایگاه اختصاصی آرهش | 5056842570 | fuel | |
| 32 | Point | پمپ بنزین | 5121598644 | fuel | |
| 33 | Point | پمپ گاز کهنذر شمس جای درست | 5122423923 | fuel | |

(1 out of 60 Selected)

شکل ۲. مواد خطرناک منطقه ۵

برای محاسبه این مقدار از تابع Near استفاده شد که این تابع نزدیک‌ترین فاصله خیابان اصلی تا ایستگاه‌های موجود را طبق شکل ۳، محاسبه می‌کند.

| FID | Shape | shomareh | nafarat | telefon | masahat | khodro | NEAR DIST |
|-----|-------|-------------|---------|----------|---------|--------|-------------|
| 0 | Point | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 588/124739 |
| 1 | Point | پنج | 0 | 0 | 0 | 0 | 55/704693 |
| 2 | Point | چهار | 0 | 0 | 0 | 0 | 43/869314 |
| 3 | Point | هفت | 0 | 0 | 0 | 0 | 67/230414 |
| 4 | Point | نوزده | 0 | 0 | 0 | 0 | 26/518066 |
| 5 | Point | شصت | 0 | 0 | 0 | 0 | 127/130155 |
| 6 | Point | هجده | 0 | 0 | 0 | 0 | 206/329037 |
| 7 | Point | ده | 0 | 0 | 0 | 0 | 62/048592 |
| 8 | Point | بیست و دو | 0 | 0 | 0 | 0 | 118/13186 |
| 9 | Point | بیست و یک | 0 | 0 | 0 | 0 | 286/040721 |
| 10 | Point | دو | 0 | 0 | 0 | 0 | 59/854877 |
| 11 | Point | شانزده | 0 | 0 | 0 | 0 | 45/575502 |
| 12 | Point | هشت | 0 | 0 | 0 | 0 | 45/936062 |
| 13 | Point | چهارده | 0 | 0 | 0 | 0 | 21/325466 |
| 14 | Point | یک | 24 | 32366072 | 1500 | 8 | 57/698751 |
| 15 | Point | نه | 0 | 0 | 0 | 0 | 18/437941 |
| 16 | Point | هفده | 0 | 0 | 0 | 0 | 359/485261 |
| 17 | Point | بیست | 0 | 0 | 0 | 0 | 21/323419 |
| 18 | Point | دوازده | 0 | 0 | 0 | 0 | 82/128301 |
| 19 | Point | سیزده | 0 | 0 | 0 | 0 | 28/456889 |
| 20 | Point | یازده | 0 | 0 | 0 | 0 | 28/861895 |
| 21 | Point | سه | 0 | 0 | 0 | 0 | 29/40535 |
| 22 | Point | یازده | 0 | 0 | 0 | 0 | 1670/331375 |
| 23 | Point | بیست و سه | 0 | 0 | 0 | 0 | 434/893745 |
| 24 | Point | بیست و چهار | 0 | 0 | 0 | 0 | 673/534489 |

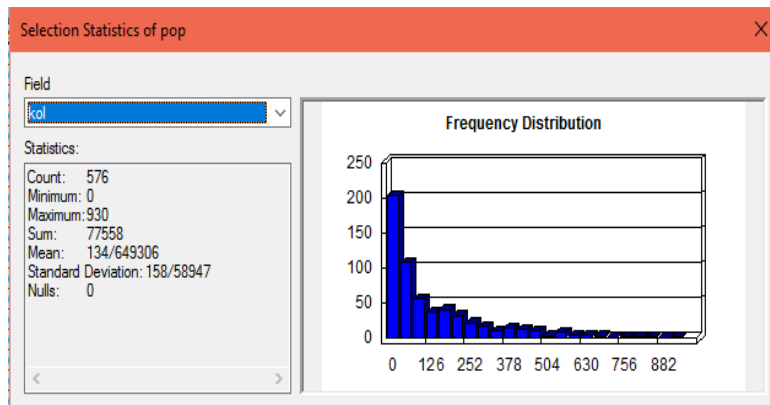
شکل ۳. خروجی تابع near

برای محاسبه تعداد حریق و حوادث در هر منطقه از نرم افزار ArcGIS استفاده شد؛ به صورتی که با کمک منوی Selection و قسمت Select By Location، در کادر Target layer، لایه حریق و حوادث انتخاب شده و در کادر Source layer لایه مناطق مختلف انتخاب شد و با رفتن به Attribute Table لایه حریق و حوادث، میزان پتانسیل خطر در هر منطقه به دست آمد. شکل ۴، خروجی نرم افزار برای پتانسیل خطر در منطقه ۱ را نشان می دهد.

| FID | Shape * | نوع | ایستگاه | منطقه | تاریخ | X | Y | فراها |
|-----|---------|------|------------|-------|------------|--------|--------|-------------|
| 0 | Point | حریق | ایستگاه ۱۸ | ۸ | 1396/01/01 | 32/712 | 51/636 | منزل مسکونی |
| 1 | Point | حریق | ایستگاه ۳ | 13 | 1396/01/01 | 32/609 | 51/623 | منزل مسکونی |
| 2 | Point | حریق | ایستگاه ۱۸ | 12 | 1396/01/01 | 32/717 | 51/645 | منزل مسکونی |
| 3 | Point | حریق | ایستگاه ۷ | 14 | 1396/01/01 | 32/701 | 51/714 | منزل مسکونی |
| 4 | Point | حریق | ایستگاه ۱۰ | 12 | 1396/01/02 | 32/718 | 51/595 | منزل مسکونی |
| 5 | Point | حریق | ایستگاه ۱۲ | 6 | 1396/01/03 | 32/615 | 51/676 | منزل مسکونی |
| 6 | Point | حریق | ایستگاه ۱۸ | 8 | 1396/01/05 | 32/713 | 51/619 | منزل مسکونی |
| 7 | Point | حریق | ایستگاه ۶ | 7 | 1396/01/05 | 32/688 | 51/673 | منزل مسکونی |
| 8 | Point | حریق | ایستگاه ۲۴ | 10 | 1396/01/05 | 32/687 | 51/731 | منزل مسکونی |
| 9 | Point | حریق | ایستگاه ۱۶ | 8 | 1396/01/05 | 32/685 | 51/651 | منزل مسکونی |
| 10 | Point | حریق | ایستگاه ۱۴ | 1 | 1396/01/06 | 32/656 | 51/662 | منزل مسکونی |
| 11 | Point | حریق | ایستگاه ۱۶ | 8 | 1396/01/11 | 32/687 | 51/66 | منزل مسکونی |
| 12 | Point | حریق | ایستگاه ۴ | 4 | 1396/01/11 | 32/656 | 51/71 | منزل مسکونی |
| 13 | Point | حریق | ایستگاه ۲۱ | 11 | 1396/01/13 | 32/682 | 51/608 | منزل مسکونی |
| 14 | Point | حریق | ایستگاه ۲ | 8 | 1396/01/15 | 32/689 | 51/651 | منزل مسکونی |
| 15 | Point | حریق | ایستگاه ۷ | 10 | 1396/01/17 | 32/691 | 51/727 | منزل مسکونی |
| 16 | Point | حریق | ایستگاه ۱۳ | 5 | 1396/01/18 | 32/548 | 51/674 | منزل مسکونی |
| 17 | Point | حریق | ایستگاه ۱۶ | 1 | 1396/01/21 | 32/668 | 51/658 | منزل مسکونی |
| 18 | Point | حریق | ایستگاه ۱۴ | 1 | 1396/01/22 | 32/658 | 51/658 | منزل مسکونی |
| 19 | Point | حریق | ایستگاه ۱۴ | 1 | 1396/01/22 | 32/648 | 51/657 | منزل مسکونی |
| 20 | Point | حریق | ایستگاه ۶ | 7 | 1396/01/23 | 32/69 | 51/683 | منزل مسکونی |
| 21 | Point | حریق | ایستگاه ۱۹ | 14 | 1396/01/24 | 32/718 | 51/733 | منزل مسکونی |
| 22 | Point | حریق | ایستگاه ۶ | 8 | 1396/01/26 | 32/703 | 51/67 | منزل مسکونی |
| 23 | Point | حریق | ایستگاه ۱۶ | 8 | 1396/01/26 | 32/685 | 51/651 | منزل مسکونی |
| 24 | Point | حریق | ایستگاه ۴ | 4 | 1396/01/27 | 32/654 | 51/716 | منزل مسکونی |
| 25 | Point | حریق | ایستگاه ۲۲ | 2 | 1396/01/29 | 32/735 | 51/567 | منزل مسکونی |
| 26 | Point | حریق | ایستگاه ۶ | 8 | 1396/02/01 | 32/703 | 51/638 | منزل مسکونی |
| 27 | Point | حریق | ایستگاه ۲۰ | 6 | 1396/02/03 | 32/632 | 51/679 | منزل مسکونی |
| 28 | Point | حریق | ایستگاه ۲ | 8 | 1396/02/04 | 32/69 | 51/659 | منزل مسکونی |
| 29 | Point | حریق | ایستگاه ۱۰ | 12 | 1396/02/05 | 32/725 | 51/605 | منزل مسکونی |
| 30 | Point | حریق | ایستگاه ۱۶ | 2 | 1396/02/07 | 32/672 | 51/628 | منزل مسکونی |
| 31 | Point | حریق | ایستگاه ۸ | 9 | 1396/02/08 | 32/65 | 51/627 | منزل مسکونی |
| 32 | Point | حریق | ایستگاه ۴ | 4 | 1396/02/08 | 32/67 | 51/706 | منزل مسکونی |
| 33 | Point | حریق | ایستگاه ۲۰ | 6 | 1396/02/15 | 32/63 | 51/678 | منزل مسکونی |

شکل ۴. پتانسیل خطر در منطقه ۱

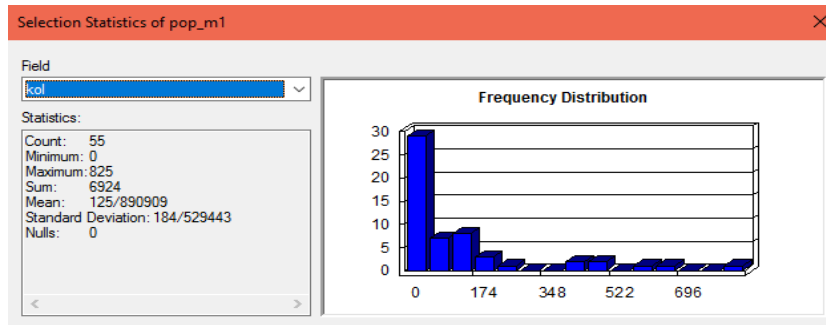
در این پژوهش، در نرم‌افزار ArcGIS با کمک منوی Selection و قسمت Location، در کادر Target layer لایه جمعیت انتخاب شده و در کادر Source layer لایه مناطق مختلف انتخاب شد و با رفتن به Attribute Table لایه جمعیت و استفاده از تابع Statistics، جمعیت در هر منطقه به‌دست آمد. خروجی نرم‌افزار برای جمعیت منطقه ۱ به‌صورت شکل ۵، است. با داشتن جمعیت هر منطقه در اصفهان و مساحت آن منطقه و تقسیم این دو مقدار بر هم تراکم جمعیت هر منطقه به‌دست می‌آید.



شکل ۵. جمعیت منطقه ۱

برای مشخص کردن شعاع پوششی در نرم‌افزار ArcGIS از منوی Geoprocessing، گزینه Buffer انتخاب شد؛ به‌صورتی که برای هر ایستگاه موجود در مناطق مختلف بافر جداگانه با مقدار متفاوت زده می‌شود. در کادر Input Feature لایه ایستگاه‌های آتش‌نشانی موجود و در کادر Output Feature Class، نام لایه خروجی به‌دلخواه وارد شد و در کادر Distance مقدار ۱/۳۳ برای ایستگاه‌های در مرکز و مقدار ۳/۳۳ برای ایستگاه‌های در حاشیه بر حسب کیلومتر انتخاب شد. به این صورت بافرهای مختلف در قالب لایه‌های مختلف که همان شعاع پوششی آتش‌نشانی‌ها هستند، برای ایستگاه‌ها زده شد؛ سپس لایه‌های بافرهای مختلف به کمک ابزار Merge ترکیب شده و لایه خروجی شعاع پوششی تشکیل شد.

حال در نرم‌افزار ArcGIS با کمک منوی Selection و قسمت Select By Location، در کادر Target layer، لایه جمعیت انتخاب شده و در کادر Source layer لایه مناطق مختلف انتخاب شد و با کلیک راست روی لایه جمعیت و انتخاب گزینه Export Data، لایه جدید جمعیت هر منطقه تشکیل شد؛ سپس با ورود مجدد به منوی Selection و قسمت Select By Location، در کادر Target layer لایه جمعیت هر منطقه که در مرحله قبل تشکیل شد، انتخاب شده و در کادر Source layer لایه شعاع پوششی انتخاب می‌شود و با رفتن به Attribute Table لایه جمعیت هر منطقه، جمعیت پوشش داده‌شده توسط ایستگاه‌های آتش‌نشانی در هر منطقه به‌دست آمد و با کلیک روی گزینه Switch Selection جمعیت پوشش داده‌نشده توسط ایستگاه‌های آتش‌نشانی در هر منطقه محاسبه شد. خروجی نرم‌افزار برای جمعیت پوشش داده‌نشده در منطقه ۱ به‌صورت شکل ۶ است.



شکل ۶. جمعیت پوشش داده‌نشده در منطقه ۱

وزن و وضعیت معیارهای تراکم مواد خطرناک (ایستگاه‌های پمپ‌بنزین و گاز و شهرک‌های صنعتی)، نزدیکی به جاده اصلی، پتانسیل خطر (حوادث و آتش‌سوزی سه ساله اخیر)، تراکم جمعیت و شعاع پوششی (در مرکز اصفهان برابر ۱/۳۳ کیلومتر و در حاشیه اصفهان برابر با ۳/۳۳ کیلومتر) برای ایستگاه‌های کاندید طبق جدول ۶ به‌دست آمد.

جدول ۶. وزن و وضعیت معیارها در ایستگاه‌های کاندید

| شماره ایستگاه | منطقه | معیار | وضعیت | وزن قطعی | وزن فازی |
|---------------|----------|-------------------------|----------------|----------|-------------|
| ایستگاه ۱ | منطقه ۱۲ | تراکم مواد خطرناک | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | پتانسیل خطر | نسبتاً نامناسب | ۲ | (۳، ۲، ۱) |
| | | تراکم جمعیت | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | شعاع پوششی آتش‌نشانی‌ها | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| ایستگاه ۲ | منطقه ۸ | تراکم مواد خطرناک | متوسط | ۳ | (۴، ۳، ۲) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| | | پتانسیل خطر | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| | | تراکم جمعیت | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| | | شعاع پوششی آتش‌نشانی‌ها | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| ایستگاه ۳ | منطقه ۹ | تراکم مواد خطرناک | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| | | پتانسیل خطر | متوسط | ۳ | (۴، ۳، ۲) |
| | | تراکم جمعیت | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | شعاع پوششی آتش‌نشانی‌ها | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| ایستگاه ۴ | منطقه ۱ | تراکم مواد خطرناک | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | مناسب | ۵ | (۵۰، ۵، ۴) |
| | | پتانسیل خطر | نامناسب | ۱ | (۲، ۱، -۵۰) |
| | | تراکم جمعیت | نسبتاً مناسب | ۴ | (۵، ۴، ۳) |

| شماره ایستگاه | منطقه | معیار | وضعیت | وزن قطعی | وزن فازی |
|---------------|----------|-------------------------|---------------|----------|-------------|
| ایستگاه ۵ | منطقه ۶ | شعاع پوششی آتش نشانی‌ها | نسبتا نامناسب | ۲ | (۱، ۲، ۳) |
| | | تراکم مواد خطرناک | متوسط | ۳ | (۲، ۳، ۴) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | نسبتا مناسب | ۴ | (۳، ۴، ۵) |
| | | پتانسیل خطر | نسبتا نامناسب | ۲ | (۱، ۲، ۳) |
| | | تراکم جمعیت | نامناسب | ۱ | (-۵۰، ۱، ۲) |
| ایستگاه ۶ | منطقه ۱۵ | شعاع پوششی آتش نشانی‌ها | نسبتا مناسب | ۴ | (۳، ۴، ۵) |
| | | تراکم مواد خطرناک | نامناسب | ۱ | (-۵۰، ۱، ۲) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | نامناسب | ۱ | (-۵۰، ۱، ۲) |
| | | پتانسیل خطر | متوسط | ۳ | (۲، ۳، ۴) |
| | | تراکم جمعیت | نامناسب | ۱ | (-۵۰، ۱، ۲) |
| ایستگاه ۷ | منطقه ۶ | شعاع پوششی آتش نشانی‌ها | نسبتا نامناسب | ۲ | (۱، ۲، ۳) |
| | | تراکم مواد خطرناک | متوسط | ۳ | (۲، ۳، ۴) |
| | | نزدیکی به جاده اصلی | نسبتا مناسب | ۴ | (۳، ۴، ۵) |
| | | پتانسیل خطر | نسبتا نامناسب | ۲ | (۱، ۲، ۳) |
| | | تراکم جمعیت | نامناسب | ۱ | (-۵۰، ۱، ۲) |
| | | شعاع پوششی آتش نشانی‌ها | نسبتا مناسب | ۴ | (۳، ۴، ۵) |

روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP. ماتریس مقایسات زوجی تلفیقی طبق جدول ۴ در نظر گرفته شده و هر عنصر این ماتریس $a_{i,j}$ نامیده می‌شود. با تقسیم هر $a_{i,j}$ بر جمع ستونی خودش، ماتریس وزن نسبی معیارها نسبت به معیارها طبق رابطه ۴، به دست می‌آید. در این فرمول، $w_{i,j}$ نمایانگر وزن معیار i نسبت به معیار j است و وزن نهایی هر معیار طبق رابطه ۵، مشخص می‌شود. در این فرمول، w_i وزن نهایی معیار i است. وزن معیارها مطابق جدول ۷ است.

$$w_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sum_{i=1}^n a_{i,j}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j}}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

جدول ۷. وزن معیارها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

| تراکم جمعیت | تراکم به نزدیکی به جاده اصلی | تراکم مواد خطرناک | شعاع پوشش | پتانسیل خطر | وزن نهایی |
|-------------|------------------------------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| ۰/۱۶۲۰ | ۰/۲۴۸۰ | ۰/۱۴۰۲ | ۰/۱۱۱۹ | ۰/۱۱۰۵ | ۰/۱۵۴۵ |
| ۰/۱۰۰۶ | ۰/۱۵۴۰ | ۰/۳۹۹۷ | ۰/۳۳۵۲ | ۰/۰۶۸۵ | ۰/۲۱۱۶ |
| ۰/۲۹۷۵ | ۰/۰۹۹۱ | ۰/۲۵۷۴ | ۰/۳۶۴۶ | ۰/۳۹۳۳ | ۰/۲۸۲۲ |
| ۰/۱۴۴۲ | ۰/۰۴۵۷ | ۰/۰۷۰۳ | ۰/۰۹۹۶ | ۰/۲۲۶۹ | ۰/۱۱۴۷ |
| ۰/۳۹۵۵ | ۰/۴۵۳۹ | ۰/۱۳۲۲ | ۰/۰۸۸۵ | ۰/۲۰۱۵ | ۰/۲۳۴۱ |

در ادامه، امتیاز نسبی گزینه z نسبت به معیار i به دست می‌آید که به صورت S_{ij} نشان داده می‌شود و نمایانگر ترجیح نسبی به گزینه z با توجه به معیار i است. این مقدار از پرسشنامه‌ها به دست آمده و در جدول ۸، ارائه شده است.

جدول ۸. وزن قطعی گزینه‌های کاندید

| معیارها | ایستگاه ۱ | ایستگاه ۲ | ایستگاه ۳ | ایستگاه ۴ | ایستگاه ۵ | ایستگاه ۶ | ایستگاه ۷ |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| تراکم جمعیت | ۱ | ۵ | ۱ | ۴ | ۱ | ۱ | ۱ |
| نزدیکی به جاده اصلی | ۱ | ۵ | ۵ | ۵ | ۴ | ۱ | ۴ |
| تراکم مواد خطرناک | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱ | ۳ |
| شعاع پوشش | ۱ | ۵ | ۵ | ۲ | ۴ | ۲ | ۴ |
| پتانسیل خطر | ۲ | ۵ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ |

مقادیر p_j ، یعنی امتیاز نهایی هر گزینه، با استفاده از وزن هر معیار و امتیاز نسبی گزینه z نسبت به تمامی معیارها طبق رابطه ۶، محاسبه می‌شود. ایستگاه‌های کاندید طبق این امتیاز به روش AHP در جدول ۹، اولویت‌بندی شده‌اند.

$$p_j = \sum_{i=1}^n w_i * S_{ij}$$

رابطه (۶)

جدول ۰۹. ارزیابی نهایی ایستگاه‌های کاندید

| شماره ایستگاه کاندید | منطقه شهری | امتیاز نهایی | اولویت |
|----------------------|------------|--------------|--------|
| ۱ | ۱۲ | ۱/۲۳۱۲ | ۶ |
| ۲ | ۸ | ۴/۴۲۱۱ | ۱ |
| ۳ | ۹ | ۲/۷۷۰۵ | ۳ |
| ۴ | ۱ | ۲/۴۲۱۷ | ۴ |
| ۵ | ۴ | ۲/۷۷۴۵ | ۲ |
| ۶ | ۱۵ | ۱/۵۸ | ۵ |
| ۷ | ۴ | ۲/۷۷۴۵ | ۲ |

روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی FAHP. در این پژوهش از میان روش‌های مختلف AHP فازی از روش چانگ^۱ (۱۹۹۲) استفاده شده است [۲۰] و ماتریس مقایسات زوجی فازی طبق رابطه ۳، در نظر گرفته می‌شود. مقادیر S_i ، یعنی وزن معیار i ، برای هر سطر ماتریس مقایسه زوجی فازی طبق فرمول ۷، محاسبه می‌شود. درحقیقت هنگام محاسبه ماتریس k ، هر یک از اجزای اعداد فازی، نظیر به نظیر جمع شده و در معکوس فازی مجموع کل ضرب می‌شود. این مرحله شبیه محاسبه وزن‌های نرمال شده در روش AHP قطعی، منتها با اعداد فازی است. این مقادیر طبق جدول ۱۰ محاسبه شده است.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{ji} * \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ji} \right] \quad \text{رابطه (۷)}$$

جدول ۱۰. وزن فازی معیارها

| معیارها | وزن‌ها | معیارها |
|------------------------|--------|---------|
| تراکم جمعیت | ۰/۰۰۸۳ | ۰/۱۵۲۹ |
| نزدیکی به جاده اصلی | ۰/۰۰۸۵ | ۰/۲۱۷۹ |
| تراکم مواد خطرناک | ۰/۰۰۹۵ | ۰/۲۸۷۹ |
| شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها | ۰/۰۰۸۳ | ۰/۱۱۳۶ |
| پتانسیل خطر | ۰/۰۰۹۹ | ۰/۲۲۷۵ |

بر اساس رابطه ۸، مقدار n ، یعنی میزان بزرگی (درجه ارجحیت) هر S_i بر S_k محاسبه می‌شود. این مقادیر مطابق جدول ۱۱، است.

$$v(s_i > s_k) = \begin{cases} 1 & m_i \geq m_k \\ 0 & l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

جدول ۱۱. میزان بزرگی هر S_i بر S_k

| S_5 | S_4 | S_3 | S_2 | S_1 | |
|--------|-------|--------|--------|--------|-------------------------|
| ۰/۹۸۲۷ | ۱ | ۰/۹۶۹۲ | ۰/۹۸۴۹ | ۱ | $V(S_1, \text{column})$ |
| ۰/۹۹۷۴ | ۱ | ۰/۹۸۱۶ | ۱ | ۱ | $V(S_2, \text{column})$ |
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | $V(S_3, \text{column})$ |
| ۰/۹۷۴۲ | ۱ | ۰/۹۶۱۱ | ۰/۹۷۶۳ | ۰/۹۹۰۹ | $V(S_4, \text{column})$ |
| ۱ | ۱ | ۰/۹۸۸۲ | ۱ | ۱ | $V(S_5, \text{column})$ |

وزن‌های خام با استفاده از رابطه ۹، محاسبه می‌شوند. با تقسیم هر وزن خام بر مجموع وزن‌های خام، وزن نرمال به دست می‌آید. این مقادیر مطابق جدول ۱۲ است.

$$\begin{aligned} v(s \geq s_1, s_2, \dots, s_k) &= [v((s \geq s_1), (s \geq s_2), \dots, (s \geq s_k))] & \text{رابطه (۹)} \\ &= \min\{v((s \geq s_1), (s \geq s_2), \dots, (s \geq s_k))\} \\ &= \min v(s \geq s_i) \quad \forall i = 1, 2, \dots, k \end{aligned}$$

جدول ۱۲. وزن خام و وزن نرمال هر معیار

| نرمال شده | w' | معیار |
|-----------|--------|-------------------------|
| ۰/۱۹۷۷ | ۰/۹۶۹۲ | تراکم جمعیت |
| ۰/۲۰۰۳ | ۰/۹۸۱۶ | نزدیکی به جاده اصلی |
| ۰/۲۰۴۰ | ۱ | تراکم مواد خطرناک |
| ۰/۱۹۶۱ | ۰/۹۶۱۱ | شعاع پوششی آتش‌نشانی‌ها |
| ۰/۲۰۱۶ | ۰/۹۸۸۲ | پتانسیل خطر |
| - | ۴/۹۰۰۳ | مجموع |

در ادامه، وزن هر گزینه بر اساس هر معیار محاسبه شده که در جدول ۱۳، ارائه شده است.

جدول ۱۳. وزن فازی گزینه‌های کاندید

| معیارها | ایستگاه ۱ | ایستگاه ۲ | ایستگاه ۳ | ایستگاه ۴ | ایستگاه ۵ | ایستگاه ۶ | ایستگاه ۷ |
|-------------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| تراکم جمعیت | (-۵۰، ۱، ۲) | (۴، ۵، ۵۰) | (-۵۰، ۱، ۲) | (۳، ۴، ۵) | (-۵۰، ۱، ۲) | (-۵۰، ۱، ۲) | (-۵۰، ۱، ۲) |
| نزدیکی به جاده | (-۵۰، ۱، ۲) | (۴، ۵، ۵۰) | (۴، ۵، ۵۰) | (۴، ۵، ۵۰) | (۳، ۴، ۵) | (-۵۰، ۱، ۲) | (۳، ۴، ۵) |
| تراکم مواد خطرناک | (-۵۰، ۱، ۲) | (۲، ۳، ۴) | (-۵۰، ۱، ۲) | (-۵۰، ۱، ۲) | (۲، ۳، ۴) | (-۵۰، ۱، ۲) | (۲، ۳، ۴) |
| شعاع پوششی | (-۵۰، ۱، ۲) | (۴، ۵، ۵۰) | (۴، ۵، ۵۰) | (۴، ۵، ۵۰) | (۱، ۲، ۳) | (۳، ۴، ۵) | (۳، ۴، ۵) |
| پتانسیل خطر | (۱، ۲، ۳) | (۴، ۵، ۵۰) | (۲، ۳، ۴) | (۲، ۳، ۴) | (-۵۰، ۱، ۲) | (۱، ۲، ۳) | (۱، ۲، ۳) |

امتیاز نهایی هر گزینه، مانند روش *AHP* قطعی، به صورت فازی محاسبه می‌شود؛ سپس وزن‌های فازی طبق فرمول طبق فرمول ۱۰، فازی‌زدایی می‌شود. گزینه‌ها بر اساس وزن خود اولویت‌بندی می‌شوند؛ به صورتی که هر چقدر مقدار وزن بیشتر باشد، اولویت گزینه بالاتر است. این مقادیر در جدول ۱۴، ارائه است.

$$W = \frac{L_w + 4m_w + U_w}{6} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

جدول ۱۴. ارزیابی نهایی ایستگاه‌های کاندید

| شماره ایستگاه | منطقه | وزن فازی | وزن قطعی | اولویت |
|---------------|-------|-----------------------------|----------|--------|
| ۱ | ۱۲ | (-۳۹/۷۰۳۴، ۱/۲۰۱۳، ۲/۲۰۱) | -۵/۴۴۹۵ | ۷ |
| ۲ | ۸ | (۳/۵۹۰۸، ۴/۵۹۰۵، ۴۰/۶۰۱) | ۱۰/۴۲۵۶ | ۱ |
| ۳ | ۹ | (-۱۸/۰۹۶۲، ۲/۹۸۸۵، ۲۱/۴۲۹۸) | ۲/۵۴۷۹ | ۲ |
| ۴ | ۱ | (-۱۸/۷۱۹۶، ۲/۵۹۰۱، ۱۲/۴۰۳) | -۰/۶۷۳۹ | ۴ |
| ۵ | ۴ | (-۸/۰۸۶۲، ۲/۷۹۸۵، ۳/۷۹۸۲) | ۱/۱۵۱ | ۳ |
| ۶ | ۱۵ | (-۲۹/۵۰۰۷، ۱/۵۹۹، ۲/۵۹۸۷) | -۳/۴۱۷۶ | ۶ |
| ۷ | ۴ | (-۸/۰۸۶۲، ۲/۷۹۸۵، ۳/۷۹۸۲) | -۰/۷۱۴۴ | ۵ |

روش تاپسیس. این روش نخستین بار به منظور حل مسئله مکان‌یابی کارخانه معرفی و ارائه شد [۲۶]. ایده اصلی در این روش، مفهوم جواب توافقی است. جواب توافقی در روش تاپسیس به معنای انتخاب بهترین گزینه بر مبنای نزدیکی به جواب ایده‌آل و میزان دوری از جواب ضدایده‌آل است. برای انجام روش تاپسیس، ابتدا ماتریس تصمیم اولیه مشابه جدول ۶ در نظر گرفته می‌شود؛ سپس نرخ عملکرد گزینه‌های تصمیم توسط روش برداری بی‌مقیاس‌سازی می‌گردد؛ به صورتی که برای معیارهای سود و معیارهای هزینه از فرمول ۱۱، استفاده می‌شود. این مقادیر در جدول ۱۵، ارائه شده است.

$$r_{kj} = \frac{x_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

جدول ۱۵. ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس‌سازشده

| تراکم جمعیت | نزدیکی به جاده اصلی | تراکم مواد خطرناک | شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها | پتانسیل خطر | ایستگاه کاندید |
|-------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------|
| ۰/۱۴۷۴ | ۰/۰۹۵۷ | ۰/۱۷۹۶ | ۰/۱۰۴۸ | ۰/۲۶۷۲ | ایستگاه کاندید ۱ |
| ۰/۷۳۷۲ | ۰/۴۷۸۹ | ۰/۵۳۸۸ | ۰/۵۳۴۱ | ۰/۶۶۸۱ | ایستگاه کاندید ۲ |
| ۰/۱۴۷۴ | ۰/۴۷۸۹ | ۰/۱۷۹۶ | ۰/۵۳۴۱ | ۰/۴۰۰۸ | ایستگاه کاندید ۳ |
| ۰/۵۸۹۷ | ۰/۴۷۸۹ | ۰/۱۷۹۶ | ۰/۲۰۹۶ | ۰/۱۳۳۶ | ایستگاه کاندید ۴ |
| ۰/۱۴۷۴ | ۰/۳۸۳۱ | ۰/۵۳۸۸ | ۰/۴۱۹۳ | ۰/۲۶۷۲ | ایستگاه کاندید ۵ |
| ۰/۱۴۷۴ | ۰/۰۹۵۷ | ۰/۱۷۹۶ | ۰/۲۰۹۶ | ۰/۴۰۰۸ | ایستگاه کاندید ۶ |
| ۰/۱۴۷۴ | ۰/۳۸۳۱ | ۰/۵۳۸۸ | ۰/۴۱۹۳ | ۰/۲۶۷۲ | ایستگاه کاندید ۷ |

نرخ عملکرد بی‌مقیاس‌شده موزون مطابق رابطه ۱۲، به دست می‌آید. در این رابطه، نماد w_j نشان‌دهنده وزن معیار j ام و نماد r_{kj} نشان‌دهنده مقادیر ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس است. این مقادیر در جدول ۱۶، مشاهده می‌شود.

$$v_{kj} = w_j * r_{kj} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

جدول ۱۶. ماتریس تصمیم‌بی‌مقیاس‌سازشده و موزون

| تراکم جمعیت | نزدیکی به جاده اصلی | تراکم مواد خطرناک | شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها | پتانسیل خطر | ایستگاه کاندید |
|-------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------|
| ۰/۰۲۲۷ | ۰/۰۲۰۲ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۰۱۲۰ | ۰/۰۶۲۵ | ایستگاه کاندید ۱ |
| ۰/۱۱۳۸ | ۰/۱۰۱۳ | ۰/۱۵۲۰ | ۰/۰۶۰۱ | ۰/۱۵۶۴ | ایستگاه کاندید ۲ |
| ۰/۰۲۲۷ | ۰/۱۰۱۳ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۰۶۰۱ | ۰/۰۹۳۸ | ایستگاه کاندید ۳ |
| ۰/۰۹۱۱ | ۰/۱۰۱۳ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۰۳۱۲ | ایستگاه کاندید ۴ |
| ۰/۰۲۲۷ | ۰/۰۸۱۰ | ۰/۱۵۲۰ | ۰/۰۴۸۰ | ۰/۰۶۲۵ | ایستگاه کاندید ۵ |
| ۰/۰۲۲۷ | ۰/۰۲۰۲ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۰۲۴۰ | ۰/۰۹۳۸ | ایستگاه کاندید ۶ |
| ۰/۰۲۲۷ | ۰/۰۸۱۰ | ۰/۱۵۲۰ | ۰/۰۴۸۰ | ۰/۰۶۲۵ | ایستگاه کاندید ۷ |

سپس جواب ایده‌آل (PIS) و ضد ایده‌آل (NIS) مشخص می‌شود. جواب ایده‌آل یک گزینه آرمانی است که برای تمام شاخص‌ها دارای بهترین عملکرد است و جواب ضدایده‌آل یک گزینه آرمانی است که برای تمام شاخص‌ها دارای ضعیف‌ترین عملکرد است؛ بنابراین طبق روابط ۱۳ و ۱۴، این مقادیر محاسبه می‌شود. در اینجا V_j^+ برای معیارهای سود برابر با $\max v_{kj}$ و برای معیارهای هزینه برابر با $\min v_{kj}$ است. در ضمن V_j^- برای معیارهای سود برابر با $\min v_{kj}$ و برای معیارهای هزینه برابر با $\max v_{kj}$ است.

$$PIS = A^+ = (V_1^+, V_2^+, \dots, V_j^+, \dots, V_m^+) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$NIS = A^- = (V_1^-, V_2^-, \dots, V_j^-, \dots, V_m^-) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

مقادیر مربوط به V_j^+ و V_j^- مطابق جدول ۱۷، محاسبه شده است.

جدول ۱۷. ماتریس تصمیم بی‌مقیاس‌ساز شده و موزون

| تراکم جمعیت | نزدیکی به جاده اصلی | تراکم مواد خطرناک | شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها | پتانسیل خطر | |
|-------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------|---------|
| ۰/۱۱۳۸ | ۰/۰۲۰۲ | ۰/۱۵۲۰ | ۰/۰۶۰۱ | ۰/۱۵۶۴ | V_j^+ |
| ۰/۰۲۳۷ | ۰/۱۰۱۳ | ۰/۰۵۰۶ | ۰/۰۱۲۰ | ۰/۰۳۱۲ | V_j^- |

در ادامه فاصله گزینه‌ها از جواب ایده‌آل و ضدایده‌آل محاسبه می‌شود. اگر فاصله گزینه k از گزینه ایده‌آل و ضدایده‌آل به ترتیب با D_K^+ و D_K^- نشان داده شود، آنگاه فاصله گزینه موردنظر بر مبنای فاصله اقلیدسی طبق روابط ۱۵ و ۱۶، در جدول ۱۸، محاسبه می‌شود.

$$D_K^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{kj} - v_j^+]^2} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$D_K^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{kj} - v_j^-]^2} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

جدول ۱۸. فاصله از ایده‌آل و ضدایده‌آل

| D_K^- | D_K^+ | |
|---------|---------|------------------|
| ۰/۰۸۶۸ | ۰/۱۷۲۳ | ایستگاه کاندید ۱ |
| ۰/۱۹۱۱ | ۰/۰۸۱۰ | ایستگاه کاندید ۲ |
| ۰/۰۷۸۹ | ۰/۱۷۰۴ | ایستگاه کاندید ۳ |
| ۰/۰۶۹۳ | ۰/۱۸۵۲ | ایستگاه کاندید ۴ |
| ۰/۱۱۳۸ | ۰/۱۴۴۷ | ایستگاه کاندید ۵ |
| ۰/۱۰۳۱ | ۰/۱۵۴۲ | ایستگاه کاندید ۶ |
| ۰/۱۱۳۸ | ۰/۱۴۴۷ | ایستگاه کاندید ۷ |

در آخر در این روش نرخ شباهت به‌عنوان شاخصی برای رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها محاسبه می‌شود. نرخ شباهت نشان‌دهنده میزان شباهت هر یک از گزینه‌های تصمیم به جواب ایده‌آل است که طبق رابطه ۱۷، محاسبه می‌شود. گزینه‌ای که دارای بیشترین C_k^* باشد، به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب خواهد شد. این مقادیر در جدول ۱۹، ارائه شده است.

$$C_K^* = \frac{D_K^-}{(D_K^-) + (D_K^+)} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

جدول ۱۹. ارزیابی نهایی ایستگاه‌های کاندید

| شماره ایستگاه | منطقه | C_K^* | اولویت |
|---------------|-------|---------|--------|
| ۱ | ۱۲ | ۰/۳۳۵۲ | ۴ |
| ۲ | ۸ | ۰/۷۰۲۲ | ۱ |
| ۳ | ۹ | ۰/۳۱۶۴ | ۵ |
| ۴ | ۱ | ۰/۲۷۲۴ | ۶ |
| ۵ | ۴ | ۰/۴۴۰۳ | ۲ |
| ۶ | ۱۵ | ۰/۴۰۰۶ | ۳ |
| ۷ | ۴ | ۰/۴۴۰۳ | ۲ |

تحلیل حساسیت و پیشنهادهای مدیریتی. پس از اینکه اولویت‌بندی ایستگاه‌های آتش‌نشانی حاصل از سه روش AHP، FAHP و تاپسیس با کارشناسان واحد آمار و برنامه‌ریزی استراتژیک «سازمان مرکزی آتش‌نشانی شهر اصفهان» در میان گذاشته شد، آن‌ها نتایج حاصل از روش FAHP را نسبت به دو روش دیگر بیشتر پسندیدند؛ بنابراین به‌منظور تحلیل حساسیت روی وزن‌های شاخص‌ها از نتایج روش FAHP استفاده خواهد شد.

به‌منظور انجام تحلیل حساسیت ابتدا وزن‌های معیارهای فازی (تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها و پتانسیل خطر) مطابق جدول ۱۰، در نظر گرفته می‌شوند؛ سپس در هر مرحله یکی از وزن‌های معیارها انتخاب شده و در ضرایب اولیه جدول ۱۰ ثابت نگه داشته شده‌اند. بدین ترتیب می‌توان تأثیر تغییرات وزن معیارها بر ترتیب اولویت ایستگاه‌های آتش‌نشانی را مشخص کرد. لازم به ذکر است که ترتیب اولیه حاصل از روش FAHP برای ایستگاه‌های آتش‌نشانی به‌صورت ۲، ۳، ۵، ۷، ۴، ۶، ۱ است. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۲۰، ارائه است.

جدول ۲۰. تحلیل حساسیت روی وزن معیارها

| معیار | آلفا (α) | اولویت گزینه‌ها |
|---------------------|-------------------|-----------------|
| تراکم جمعیت | صفر تا ۱ | ۲ ۳ ۵ ۷ ۴ ۶ ۱ |
| | ۱/۲ | ۲ ۳ ۵ ۴ ۷ ۶ ۱ |
| | ۱/۴ تا ۱/۸ | ۲ ۳ ۴ ۵ ۷ ۶ ۱ |
| | ۲ | ۲ ۴ ۳ ۵ ۷ ۶ ۱ |
| نزدیکی به جاده اصلی | صفر | ۲ ۷و۵ ۳ ۴ ۶ ۱ - |
| | ۱ تا ۰/۲ | ۲ ۳ ۵ ۷ ۴ ۶ ۱ |
| | ۱/۲ | ۲ ۳ ۵ ۴ ۷ ۶ ۱ |
| | ۱/۴ تا ۲ | ۲ ۳ ۴ ۵ ۷ ۶ ۱ |

| اولویت‌گزیندها | | | | | | | آلفا (α) | معیار |
|----------------|---|---|---|---|---|---|-------------------|---------------------------|
| ۱ | ۶ | ۷ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | صفر تا ۰/۶ | تراکم مواد خطرناک |
| ۱ | ۶ | ۴ | ۷ | ۵ | ۳ | ۲ | ۱/۶ تا ۰/۸ | |
| ۱ | ۶ | ۴ | ۳ | ۷ | ۵ | ۲ | ۲ تا ۱/۸ | |
| ۱ | ۶ | ۳ | ۷ | ۴ | ۵ | ۲ | صفر | شعاع پوشش آتش‌نشانی‌ها |
| ۱ | ۶ | ۷ | ۴ | ۵ | ۳ | ۲ | ۰/۲ | |
| ۱ | ۶ | ۴ | ۷ | ۵ | ۳ | ۲ | ۲ تا ۰/۴ | |
| ۱ | ۶ | ۷ | ۵ | ۳ | ۴ | ۲ | صفر | پتانسیل خطر |
| ۱ | ۶ | ۷ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۰/۲ تا ۰/۶ | |
| ۱ | ۶ | ۷ | ۴ | ۵ | ۳ | ۲ | ۰/۸ | |
| ۱ | ۶ | ۴ | ۷ | ۵ | ۳ | ۲ | ۲ تا ۱ | |

در این جدول با در نظر گرفتن مقادیر صفر تا ۲ برای پارامتر α و قراردادن این مقادیر در رابطه ۱۸، وزن‌های جدید معیارها به دست می‌آید که با استفاده از وزن‌های جدید مراحل FAHP طی می‌شود و اولویت ایستگاه‌های کاندید طبق جدول ۲۰، به دست می‌آید.

$$w'_{new} = w' * \alpha \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

برای مثال، برای مقدار $\alpha = 0.2$ و با مقدار اولیه وزن ۰/۹۶۹۳ برای معیار تراکم جمعیت، وزن جدید به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$w'_{new} = 0.9693 * 0.2 = 0.1939 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در جدول ۲۰ به ازای هر یک از ۵ معیار مورد نظر، یازده مقدار مختلف برای پارامتر α از صفر تا ۲ در نظر گرفته شده است که در مجموع ۵۵ مرتبه آزمایش را تشکیل می‌دهد. طبق این جدول به ازای ۵۵ مرتبه تغییرات آلفا، نخستین اولویت را ایستگاه شماره ۲ در منطقه ۸ و آخرین اولویت را ایستگاه شماره ۱ در منطقه ۱۲ دارد؛ بنابراین با اطمینان کامل می‌توان درباره ایستگاه‌های آتش‌نشانی که بالاترین و پایین‌ترین اولویت را دارند، اظهار نظر کرد؛ همچنین ایستگاه شماره ۶ در منطقه ۱۵ بعد از ایستگاه ۱ پایین‌ترین اولویت را در تمامی حالات به خود اختصاص داده است؛ بنابراین تکلیف این سه ایستگاه کاملاً مشخص است و تحلیل حساسیت روی سایر ایستگاه‌ها صورت می‌گیرد.

با توجه به معیار تراکم جمعیت، هر چقدر وزن این معیار نسبت به سایر معیارها افزایش یابد، میزان اولویت ایستگاه شماره ۴ افزایش می‌یابد؛ بنابراین مشخص است که معیار تراکم جمعیت تأثیر مستقیمی بر ایستگاه شماره ۴ در منطقه ۱ اصفهان دارد. به لحاظ مدیریت شهری بهتر است تراکم جمعیتی از نقاط مرکزی شهر به سمت حاشیه‌ها منتقل شود؛ به خصوص در مناطق مرکزی

شهر که ترافیک بالا و دسترسی دشوارتری به مناطق مسکونی وجود دارد، بهتر است شهرداری ترتیبی اتخاذ کند تا با اعمال محدودیت‌های ساخت‌وساز ساختمان‌های مسکونی و خارج کردن کارگاه‌های صنعتی، تا حدودی از خطرهای ناشی از آتش‌سوزی و سایر حوادث کاسته شود. در رابطه با معیار نزدیکی به جاده اصلی، با افزایش وزن این معیار، اولویت ایستگاه‌های ۵ و ۷، کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که این دو ایستگاه از نظر نزدیکی به جاده اصلی در وضعیت مطلوبی به سر می‌برند. از لحاظ مکان‌یابی اماکن شهری، بسیار مهم است که یک ایستگاه آتش‌نشانی دسترسی مستقیم به جاده اصلی داشته باشد؛ همچنین باید موقعیت ایستگاه‌ها به گونه‌ای باشد که با توجه به حجم ترافیک و امکان یک‌طرفه بودن خیابان‌ها به تمامی اماکن شهری دسترسی سریع و آسان داشته باشد. یکی از مشکلات اساسی در دسترسی خودروهای آتش‌نشانی به برخی مناطق، وجود کوچه‌ها و جاده‌های بسیار تنگ و باریک و در برخی موارد ساخت‌وسازهای غیرقانونی و سد معبرهایی است که دسترسی به منطقه حادثه را مختل می‌کنند.

با توجه به معیار تراکم مواد خطرناک، هر چقدر اهمیت این معیار افزایش یابد، اولویت ایستگاه‌های ۵ و ۷ افزایش یافته و از اولویت ایستگاه ۴ کم می‌شود. وجود مواد خطرناک، به‌خصوص در مناطق مسکونی مرکز شهر، یک معضل بسیار مهم است. از مصداق‌های وجود مواد خطرناک می‌توان به احداث برخی صنایع خطرناک مانند مواد شیمیایی و حتی چوب‌بری‌ها در میان مناطق مسکونی اشاره کرد. بهترین توسعه مدیریتی در این زمینه این است که تا جای ممکن صنایع خطرناک به خارج از مرکز شهر انتقال یابد و در قالب شهرک‌های صنعتی سازمان‌دهی شوند. بر اساس استانداردهای مربوطه برای شهرک‌های صنعتی می‌توان اقدامات حفاظتی خاصی را تدارک دید که احتمال وقوع حادثه را کاهش دهد و در صورت وقوع حوادث آتش‌سوزی، تعداد کمتری از افراد و خانه‌های شهری آسیب ببینند.

با در نظر گرفتن معیار شعاع پوشش، تنها ایستگاه شماره ۴ است که اولویت آن رابطه معکوس با وزن این معیار دارد. یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر این است که شعاع پوشش برای هر یک از مناطق شهر اصفهان بر اساس میانگین سرعت خودروها و میزان ترافیک به صورت متفاوت تعریف شده است. دو عاملی که در این حوزه می‌تواند تأثیرگذار باشد، یکی احترام رانندگان خودروها به قوانین و بازکردن راه برای خودروهای آتش‌نشانی و دیگری احداث مسیرهای دسترسی مخصوص برای خودروهای آتش‌نشانی و سایر خودروهای امدادی مانند آمبولانس‌ها است.

آخرین معیار، پتانسیل خطر است که با افزایش وزن این معیار از اولویت ایستگاه شماره ۴ کاسته می‌شود. با جمع‌بندی تحلیل حساسیت روی هر پنج معیار موردنظر در این پژوهش می‌توان تشخیص داد که اولویت ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۶ کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات

وزن معیارها از خود نشان می‌دهد و تصمیم‌گیری برای احداث کردن یا نکردن یک ایستگاه جدید در این مناطق با اطمینان بیشتری می‌تواند صورت گیرد. ایستگاه‌های ۴، ۵ و ۷ بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات وزن معیارها دارند و قاعده‌تاً باید برای تصمیم‌گیری در مورد آن‌ها با دقت بیشتری اقدام شود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر به مکان‌یابی احداث ایستگاه‌های آتش‌نشانی در شهر اصفهان پرداخته شده است. معیارهای مختلفی برای رتبه‌بندی ایستگاه‌های کاندید در نظر گرفته شد که از جمله آن‌ها می‌توان به شاخص‌های تراکم جمعیت، نزدیکی به جاده اصلی، فاصله از ایستگاه‌های موجود، تراکم مواد خطرناک، شعاع پوشش، شبکه ترافیک، کاربری اراضی، قدمت ساختمان‌ها و پتانسیل خطر اشاره کرد. داده‌های ورودی از طریق پرسشنامه و نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد و نتایج حاصل از سه روش AHP، FAHP و TOPSIS در این پژوهش مقایسه شدند.

بر اساس نتایج محاسباتی، اولویت نخست در هر سه روش مربوط به ایستگاه شماره ۲ در منطقه ۸ شهرداری اصفهان است و بقیه اولویت‌ها تفاوت‌های جزئی با هم دارند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ایستگاه شماره ۲ در منطقه ۸ شهرداری و ایستگاه شماره ۱ در منطقه ۱۲ به ترتیب با بیشترین و کمترین اولویت برای احداث ایستگاه جدید، کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات وزن معیارهای ارزیابی دارند. بیشترین حساسیت نسبت به تغییر وزن معیارها مربوط به ایستگاه ۴ است که باید با دقت بیشتری درباره آن تصمیم‌گیری شود.

نتایج پژوهش حاضر با «واحد آمار و برنامه‌ریزی استراتژیک سازمان مرکزی آتش‌نشانی شهر اصفهان» در میان گذاشته شد و مسئول این واحد بیان کردند ایستگاه شماره ۲ در منطقه ۸ جزو سه ایستگاه پیشنهادی طبق نظر رئیس سازمان آتش‌نشانی است و به شدت کمبود این ایستگاه حس شده و تأسیس آن پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه بودجه لازم برای تأسیس ایستگاه‌های آتش‌نشانی توسط شهرداری تخصیص داده می‌شود، مسئولان مربوطه از نتایج روش FAHP در این پژوهش استقبال کردند و تأکید کردند در صورت تخصیص بودجه، بعد از تأسیس ایستگاه کاندید شماره ۲، ایستگاه‌های دیگر طبق اولویت‌بندی این روش مدنظر قرار خواهند گرفت.

به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. برنامه‌ریزان شهری می‌توانند معیارهای مؤثر دیگر مانند همسایگی‌های سازگار و ناسازگار، قدمت ساختمان‌ها و غیره را متناسب با مطالعه موردی خود، ملاک کار قرار دهند؛
۲. تهیه پرسشنامه‌هایی متناسب با داده‌های ورودی هر روش و استفاده از روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چندمعیاره متناسب با داده‌های ورودی می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی شود؛

۳. برای مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی می‌توان از مدل‌سازی ریاضی بهره‌گرفت و برای حل مدل و دستیابی به مقدار مطلوب برای متغیر تصمیم نیز می‌توان از روش‌های قطعی، ابتکاری و یا فراابتکاری استفاده کرد.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.



منابع

1. Aliabadi, Z., Nastaran, M., Pirani, F., & Sheikhzade, F. (1396). Fire Station Location Using AHP and GIS Compilation Case Study: Third Zone of Esfahan City. *Geographical Data*, 26(103), 123-136. (In Persian)
2. Boloori, S., & Vafaeinezhad, A. (1392). Using Simulated Annealing Algorithm for Optimizing Multi Objective Location-Allocation Problems in GIS Environment (Case Study: Firestations in District 11 of Tehran). *Urban Management Studies*, 5(16), 43-56. (In Persian)
3. Ebrahimzadeh, E., Hosseini, A., & Kashefi Doost, D. (1395). Analysis of the Location of Urban Fire Stations Case Study: Piranshahr City. *Journal of Geometry and Planning*, 20(58), 1-21. (in Persian)
4. Esmaeeli Kakhaki, F., Azimi, Z.N., Pooya, A., & Tavakoli, A. (1399). A New Stochastic Model for Emergency Location Problem with Minimax Regret Model (Case Study: Mashhad). *The Journal of Industrial Management Perspective*, 10(2), 161-191. (In Persian)
5. Fattahi, P., Bagheri, H., & Babaei Morad, S. (1396). A Mathematical Model for Fire Station Locating with Maximal Covering Location and Multi Period Approach. *Modern Researches in Decision Making*, 2(3), 193-213. (In Persian)
6. Ghanbarian, F., & Atighehchian, A. (1397). *Optimum location of fire stations considering reliability of demand coverage (case study: Isfahan city)*. Paper presented at the 15th International Industrial Engineering Conference, Yazd. (In Persian)
7. Heidari, R., & Rostami, M. (1393). Submitting and Evaluating a Model for Locating Optimal Sites for Establishing Fire Stations through GIS (Case Study: Kermanshah City). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 9(29), 87-99. (In Persian)
8. Mohaghar, A., & Ariaee, S. (1396). Locating using Geographical Information System and Weighted Maximal Covering Model. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 7(2), 9-32. (In Persian)
9. Mohammadi, J., & Poorghayoomi, H. (1393). Spatial Analysis and Location of Firehouse of Noorabad City Using GIS. *Journal of Geography and Planning*, 18(48), 279-298. (In Persian)
10. Nazariyan, A., Yari, P., & Karami Nejad, T. (1394). Optimal Positioning of Fire Stations By Using Gis (Case Study: Kermanshah). *Scientific Journal of Rescue and Relief*, 7(2), 26-37. (In Persian)
11. Pourramzan, E., & Javan, F. (1395). Analysis Of Limits of Safety And Optimal Positioning Of Fire Stations By Using Gis (Case Study: Rasht). *Geographical Journal of Territory*, 13(50), 1-16. (In Persian)
12. Rahnama, M., & Aftab, A. (1393). Locating the Fire Stations of Urmia City Using GIS and AHP. *Geography and Development*, 12(35), 153-165. (In Persian)
13. Saberifar, R., & Mazraeh, M. (1393). Analysis of suitability of spatial distribution and location of fire stations using the integration of Analytical Hierarchy Process (AHP) model in the geographic information system (GIS) environment. *Geography and Environmental Studies*, 3(9), 77-90. (In Persian)
14. Salehi, E., Ale Mohammad, S., & Ramezani Mehrian, M. (1397). Assessing the Spatial Distribution of Firefighting Stations by Modeling of Network Analyzing

- (Case Study: Tehran Metropolis). *Journal of Urban Social Geography*, 5(1), 17-31. (In Persian)
15. Shahbazi, F., Sahebi, H., & Makui, A. (1399). Location Selection of Solar Power Plants, Wind and Distributed Generation and Design of Electrical Distribution Network. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 10(3), 143-170. (In Persian)
 16. Shaikhaleslami, A., & Escort, G. (1391). Spatial Scattering and Positioning Of Firefighting Stations in Sanandaj Using GIS Technic and AHP Model. *Geographical Journal of Chashmandaz-e-Zagros*, 4(13), 65-77. (In Persian)
 17. Tatari, A., Tashakori, E., & Aghavali, S. (1394). *Locating fire stations and organizing existing stations in districts 21 and 22 of Tehran using network analysis method and AHP model in GIS environment*. Paper presented at the National Geomatic Conference. (In Persian)
 18. Zangiabadi, A., Rezaei, M., & Shaer, F. (1396). Spatial Analysis and Site Selection of Fire Stations in Isfahan City Using Inversion Hierarchical Weight Process (Ihwp). *Scientific Journal of Rescue and Relief*, 9(1), 96-110. (in Persian)
 19. Ziari, Y. A., & Yazdanpanah, S. (1390). Study of Locating Fire Stations Using AHP Model in GIS Environment: Case Study of Amol City. *Journal of the Studies of Human Settlements Planning*, 6(14), 74-87. (In Persian)
 20. Chang, D.Y. (1992). Extent Analysis and Synthetic Decision. *Optimization Techniques and Applications*, 1, 352-355.
 21. 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.
 22. Chevalier, P., Thomas, I., Geraets, D., Goetghebeur, E., Janssens, O., Peeters, D., & Plastria, F. (2012). Locating fire stations: An integrated approach for Belgium. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(2), 173-182.
 23. D' brot, C., Bravo, W., & Arana, V. (2019). *Optimum location and amount of new Fire Stations based on Geographic Information System and Analytic Hierarchy Methods*. Paper presented at the 2019 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI).
 24. Erden, T., & Coşkun, Z. (2010). Multi-criteria site selection for fire services: the interaction with analytic hierarchy process and geographic information systems. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(10), 2127-2134.
 25. Gogus, O., & Boucher, T. O. (1998). Strong transitivity, rationality and weak monotonicity in fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems*, 94(1), 133-144.
 26. Hwang, C.L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. *Springer-Verlag*, New York.
 27. Kazemi, M., Kunt, M., Aghayan, I., & Jalali Larijani, R. (2013). Optimization Model for Fire Station Location Based on GIS and Python: A Case Study in North Cyprus. *Applied Mechanics and Materials*, 330, 1059-1064.
 28. Kharaghani, H., Etemadfar, H., & Salem Rafush, A. (2022). Allocation of Fire Stations by Hybrid Method (Case Study: Mashhad). *Urban Management Studies*, 13(48), 55-67.
 29. Linn, K. N. Z., Lupin, S., & Linn, H. H. (2019). *Analysis of the Effectiveness of Fire Station Locations Using GIS-model*. Paper presented at the 2019 IEEE

- Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus).
30. Liu, Q., & Gao, H. (2011, 8-10 Aug. 2011). *The site-selection and decision-making model for city fire stations*. Paper presented at the 2011 2nd IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences.
 31. Murray, A. T. (2013). Optimizing the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*, 62, 64-71.
 32. 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.
 33. Rodriguez, S. A., De la Fuente, R. A., & Aguayo, M. M. (2020). A facility location and equipment emplacement technique model with expected coverage for the location of fire stations in the Concepción province, Chile. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106522.
 34. Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176.
 35. Sakellariou, S., Parisien, M.-A., Flannigan, M., Wang, X., de Groot, B., Tampekis, S., Christopoulou, O. (2020). Spatial planning of fire-agency stations as a function of wildfire likelihood in Thasos, Greece. *Science of the Total Environment*, 729, 139004.
 36. nnn, .. , nn dnn, I., öö kgö,, T., & nnn, C. (2011). *A GIS Approach to Fire Station Location Selection*.
 37. Uddin, M. S., & Warnitchai, P. (2020). Decision support for infrastructure planning: a comprehensive location–allocation model for fire station in complex urban system. *Natural Hazards*, 102(3), 1475-1496.
 38. Wilmot, R. (2002). Information bulletin of the world fire statistics. *The Geneva association*, 12, 1-6.
 39. Zarrinpanjeh, N., Dadrass Javan, F., Naji, A., Azadi, H., De Maeyer, P., & Witlox, F. (2020). Optimum Path Determination to Facilitate Fire Station Rescue Missions Using Ant Colony Optimization Algorithms (Case Study: City of Karaj). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 1285-1291.
 40. Zhang, W., & Jiang, J. C. (2012). Research on the Location of Fire Station Based on GIS and GA. *Applied Mechanics and Materials*, 130-134, 377-380.