



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

حامد ادب\*<sup>۱</sup>، آزاده عتباتی<sup>۲</sup>، رضا اسماعیلی<sup>۳</sup>، قاسم ذوالفقاری<sup>۲</sup>، مجید ابراهیمی<sup>۱</sup>  
۱- گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
۲- گروه محیط زیست، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
۳- مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد، معاونت خدمات و محیط زیست شهری، شهرداری مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: از مباحث ضروری در حوزه زیست محیطی شهری مشهد، افزایش بهینه تعداد ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد است. اما پایش واقعی و اطلاع درست از وضعیت کیفیت هوا، نیازمند توزیع مناسب فضایی ایستگاه‌ها در محدوده شهر مشهد است. مطالعه حاضر با هدف جانمایی و سپس اولویت‌بندی مکان احداث ایستگاه‌های تماس غابرین، ایستگاه‌های تماس عمومی، و ایستگاه‌های تماس ساکنین مناطق مسکونی در شهر مشهد با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی انجام شد. روش بررسی: در این مطالعه، جانمایی ایستگاه‌های مورد نظر در شهر مشهد بر مبنای استانداردهای ارائه شده در کشور آمریکا انجام شد. بر همین اساس، معیارهای مکانی موثر در جانمایی ایستگاه‌ها نظیر، تراکم جمعیت، فاصله از ایستگاه‌های موجود، فاصله از فضای سبز، تراکم خودرو و سایر عوامل در سه روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، فازی و روش جدید تابع چگالی احتمال مورد استفاده قرار گرفت و تعدادی محل جدید پیشنهاد گردید.

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۹  
تاریخ ویرایش: ۹۶/۰۱/۲۱  
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۸  
تاریخ انتشار: ۹۶/۰۳/۳۱

واژگان کلیدی: مکان‌یابی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، ایستگاه پایش کیفیت هوا، مشهد

میزان تطابق نقشه‌های جانمایی ایستگاه‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری جهت بررسی اعتبار آن مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های پیشنهادی توسط روش‌های تصمیم‌گیری به کمک شاخص‌های آمار فضایی میانگین نزدیکترین همسایه و دواير فاصله استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. براساس شاخص میانگین نزدیکترین همسایه، روش فازی بهترین الگوی جانمایی (پراکنده) را با ۹۹ درصد اطمینان نشان می‌دهد. همچنین تابع چگالی احتمال نیز ارائه دهنده الگوی پراکنده‌ای از ایستگاه‌های پیشنهادی است. دایره فاصله استاندارد نیز موید این نکته است که الگوی فضایی نقاط پیشنهادی در روش فازی و تابع چگالی احتمال به صورت پراکنده‌تری نسبت به روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی قرار دارد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده بهینه بودن جواب‌های مکانی حاصل از روش‌های فازی و تابع چگالی احتمال نسبت به روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی است. نتیجه‌گیری: نتایج کلی روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در این مطالعه نشان‌دهنده نیاز شدید به احداث ایستگاه‌های جدید در مناطقی از شهر مشهد که عمده آن در مناطق شمال غربی است. همچنین نتایج این تحقیق نشان‌دهنده امکان استفاده از روش تابع چگالی احتمال بعنوان روش تصمیم‌گیری در سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت جانمایی و اولویت‌بندی مکان‌های احداث ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا است.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

[h.adab@hsu.ac.ir](mailto:h.adab@hsu.ac.ir)

## مقدمه

و آمریکا وجود دارد. در کشور آمریکا ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا به چند طبقه تقسیم‌بندی می‌شود که در جدول ۱ نشان داده شده است. در مطالعه‌ای Movafagh و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی استانداردهای ارائه شده در کشورها جهت جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا پرداخته‌اند (۳). ایشان به مناسب بودن و استفاده از استانداردهای ارائه شده در کشور آمریکا برای مکان‌یابی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا برای کشور ایران اشاره کرده‌اند (جدول ۱). در برخی از منابع دیگر اذعان شده است که برای جانمایی این ایستگاه‌ها بهتر است معیارهای دیگری نظیر تراکم جمعیت، ترافیک، توزیع متوازن ایستگاه‌ها در منطقه، کاربری مناطق و غیره نیز لحاظ شود (۴). از این رو طبقه‌بندی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا براساس مکان نمونه‌برداری مهم است. همچنین در استاندارد ارائه شده جدول ۱، معیارهای دیگری مانند عدم وجود محدودیت جریان هوا در اطراف ایستگاه، دور بودن از هر منبع آلودگی نظیر دودکش، امنیت و ایمنی تجهیزات و دسترسی به تاسیسات برق و سایر تجهیزات در نظر گرفته شده است (۶). اما این معیارها بیشتر جنبه عملیاتی پیدا می‌کند که در هنگام احداث ایستگاه و بازدیدهای میدانی به آن توجه می‌شود.

امروزه، یکی از اهداف کلان در بخش محیط زیست شهری، نظارت و اطلاع از کیفیت و شرایط بهداشتی هوای شهرها است. نظارت بر مسئله آلودگی هوای شهری نیازمند کسب آگاهی و اطلاعات به روز از کمیت، کیفیت، نوع و نحوه پراکنش شاخص‌های بیانگر کیفیت هوا است. روش‌های پایش کیفیت هوا با در نظر گرفتن اهداف، هزینه‌ها و منابع در دسترس قابل انجام است. به طور معمول سیستم‌های پایش کیفیت هوا متشکل از چند ایستگاه به ارائه داده‌های لحظه‌ای و انتقال داده‌ها بصورت مستقیم و بطور خودکار به مراکز پایش کیفیت هوا است (۱). اما طراحی شبکه پایش کیفیت هوا مستلزم تعیین تعداد بهینه ایستگاه و محل قرارگیری آن است. داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا یک عامل کلیدی در جهت اتخاذ اقدامات کاهش و کنترلی آلودگی هوای شهرها محسوب می‌شوند (۲). در این راستا، ایجاد و افزایش شبکه پایش کیفیت هوای کلان شهرها ضروری بوده و جانمایی مناسب آنها با توجه به هزینه بالای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. اشتباه و یا عدم دقت در تصمیم‌گیری منجر به پرداخت هزینه خطا می‌گردد. استانداردهایی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در کشورهایی مانند فرانسه

جدول ۱- انواع ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مورد مطالعه در این تحقیق و شرایط احداث آن براساس استاندارد کشور آمریکا (۷)

| نوع ایستگاه                                  | شرایط و ضوابط جهت جانمایی  |
|--|--|
| ایستگاه تماس عابرین در مرکز شهر (ترافیکی)    | این نوع ایستگاه در مرکز تجاری منطقه شهری و در یکی از پر رفت و آمدترین خیابان‌ها و در محلی که توسط ساختمان‌ها احاطه شده و محل تردد عابرین نیز باشد نصب می‌شود. میانگین تعداد خودروها عبور در این خیابان باید بیش از ۱۰ هزار مورد در روز و با متوسط سرعت کمتر از ۱۵ mi/h باشد. سنسورهای نمونه‌برداری در این نوع ایستگاه باید در ارتفاع ۰/۵ + ۳ متری باشد و فاصله از هر نوع مانع احتمالی نیز ۰/۵ m باشد. داده‌های مورد نیاز فاصله از خیابان، تراکم واحدهای تجاری، تراکم خودرو، فاصله از پوشش گیاهی، فاصله از دیوار و کاربری‌های تجاری، تراکم جمعیت و فاصله از ایستگاه‌ها                  |
| ایستگاه تماس عمومی در مرکز شهر (شهری نوع یک) | این نوع ایستگاه در مرکز تجاری و شلوغ شهر قرار می‌گیرد ولی نباید نزدیک به هیچ منبع خاصی انتشار آلودگی هوا مانند خیابان‌های با بیش از ۵۰۰ عدد عبور خودرو در روز باشد. همچنین حداقل فاصله این نوع ایستگاه از چنین منابعی انتشار باید ۱۰۰ m باشد. مناطقی مانند پارک‌ها، خیابان‌های خلوت و بدون ترافیک برای احداث این ایستگاه مناسب است. ارتفاع سنسورهای نمونه‌برداری در این ایستگاه نیز ۰/۵ + ۳ m از سطح زمین است. داده‌های مورد نیاز تراکم خودرو، فاصله از پوشش گیاهی، تراکم فضای سبز، تراکم جمعیت، تراکم واحدهای تجاری، تراکم واحدهای صنعتی، فاصله از واحدهای صنعتی، فاصله از ایستگاه‌ها |

ادامه جدول ۱- انواع ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مورد مطالعه در این تحقیق و شرایط احداث آن براساس استاندارد کشور آمریکا (۷)

| نوع ایستگاه                                 | شرایط و ضوابط جهت جانمایی   |
|---|---|
| تماس ساکنین مناطق مسکونی (حومه شهری نوع دو) | محل احداث این نوع ایستگاه در میانه یک محله مسکونی و دور از مراکز تجاری و پر رفت و آمد شهر است. همچنین می‌توان این نوع ایستگاه را در محله‌های مسکونی حومه شهر نیز نصب نمود. حداقل فاصله این نوع ایستگاه از خیابان‌های با ترافیک بیش از ۵۰۰ مورد خودرو در روز نباید کمتر از ۱۰۰ m باشد. همچنین سنسورهای نمونه‌برداری در این نوع ایستگاه نیز باید حداقل ۰/۵ + ۳ m از زمین بالاتر باشد. داده‌های مورد نیاز تراکم واحدهای مسکونی، فاصله از واحدهای مسکونی، تراکم خودرو، تراکم واحدهای تجاری، فاصله از کاربری‌های تجاری، فاصله از خیابان، لایه فاصله از دیوار سایر کاربری‌های شهری، فاصله از ایستگاه‌ها |

گزینه‌ها و اولویت‌بندی آنها براساس نظرات خبرگان در حوزه پایش کیفیت هوا صورت گرفته است. در مطالعه حاضر علاوه بر روش‌های متداول، از روش تابع چگالی احتمال استفاده شده است. بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد، که تابع چگالی احتمال برای مکان‌یابی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا مورد استفاده قرار نگرفته است.

روش تحلیل سلسله مراتبی در سال ۱۹۸۰ بوسیله Saaty در زمینه فرایند سلسله مراتبی ابداع گردید. فرایند تحلیل سلسله مراتبی روشی منعطف، قوی و ساده برای تصمیم‌گیران است. این روش موجب فرایند محور شدن تصمیمات می‌گردد و در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اهداف متعدد و معیارهای تصمیم‌گیری در رقابت با یکدیگر باشند. زیرا این امر موجب می‌شود تا انتخاب بین گزینه‌ها با مشکل مواجه شود (۱۲، ۱۳). اساس تعیین وزن در این روش را مقایسه دو به دو عوامل تشکیل می‌دهد. به منظور تعیین مکان بهینه، چند گزینه با چند معیار و زیر معیار ارزیابی می‌شود و سپس مناسب‌ترین گزینه یا مکان، با توجه به معیارهای انتخابی، امتیازی کسب می‌کنند که برای استقرار در مکان مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۴). روش مقایسه زوجی شامل سه مرحله ایجاد ماتریس مقایسه زوجی، محاسبه وزن عوامل و تخمین شاخص سازگاری است. در این مطالعه، مراحل سه‌گانه اجرای مقایسه زوجی براساس جزئیات ذکر شده توسط Malczewski (۱۹۹۹) استفاده شده است (۱۵). فرایند تحلیل سلسله مراتبی به دلیل استفاده از نوع مقیاس مورد استفاده از قضاوت و ناتوانی کافی در به کار

سیستم اطلاعات جغرافیایی به تصمیم‌گیرنده، این امکان را می‌دهد که اطلاعات جغرافیایی را در ارتباط با طیف وسیعی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری پیوند زده و بتواند مسائل مرتبط با مکان را تحلیل و سپس گزینه‌ها را اولویت‌بندی کند. Kaffash Charandabi و همکاران (۲۰۱۱) به جانمایی ایستگاه‌های جدید پایش آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از روش پرومته (Promethee) پرداخته‌اند. در این مطالعه، اولویت‌بندی گزینه‌های جدید براساس داده‌های تراکم جمعیت، فاصله از ایستگاه‌های موجود، فاصله از درختان، فاصله از دیوار ساختمان و فاصله از خیابان‌ها هستند (۸). در مطالعه Ashrafi و همکاران از تحلیل همبستگی داده‌های آلودگی هوا در سال‌های گذشته ایستگاه‌های موجود تهران برای جانمایی ایستگاه‌های جدید براساس خطوط هم‌مقدار (ضریب همبستگی) استفاده شده است (۹). در مطالعه ای Junior و همکاران (۲۰۱۵) از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Process Hierarchy Analytical) به منظور طراحی شبکه پایش آلودگی هوا در پایتخت کشور برزیل استفاده کرده‌اند. در مطالعه ایشان از متغیرهایی مانند اقلیم، توپوگرافی، کاربری اراضی، خطوط ارتباطی، نوع ساختمان‌ها، منابع آلودگی و متغیرهای انسانی مانند سن افراد استفاده شده است (۱۰)، که متغیرهای مذکور بعلاوه شیب و تراکم جمعیت نیز توسط Zheng و همکاران (۲۰۱۱) در کشور چین استفاده شده است (۱۱). در مطالعات ذکر شده، از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چند شاخصه استفاده شده است. در روش‌های مذکور، انتخاب

در زمان و یا مکان، توسط الگوریتم‌های توزیع احتمال می‌پردازد. در صورتی که اطلاعات کافی وجود داشته باشد (۲۳)، می‌توان این مفهوم را برای جانمایی نیز مورد استفاده قرار داد و بوسیله الگوریتم‌های توزیع احتمال، قوانین مکانی موجود را استخراج و سپس براساس آن اقدام به شناسایی سایر نواحی نمود (۲۴). در این مطالعه، از روش آماری تابع چگالی احتمال جهت استخراج دانش بهینه به منظور تلفیق لایه‌های مکانی مؤثر در جانمایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد استفاده شده است.

موقعیت استانی، ملی و فرمانطقه‌ای شهر مشهد در گسترش تعداد وسائط نقلیه شهری مؤثر واقع می‌شود و افزایش وسائط نقلیه نیز در فزونی آلودگی هوای شهر مؤثر است. از اینرو افزایش تعداد ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد ضروری است. میزان آلاینده‌های موجود در هوا توسط دستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و در برنامه پایش کیفیت هوا مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. به همین منظور ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها باید در مکان‌هایی قرار گیرند که نمایش درستی از وضعیت آلودگی را نشان دهند لذا موقعیت مکانی ایستگاه‌ها از حساسیت بالایی برخوردار است. این مطالعه با هدف جانمایی ایستگاه‌های تماس عابرین در مرکز شهر، ایستگاه‌های تماس عمومی در مرکز شهر و ایستگاه‌های تماس ساکنین مناطق مسکونی در شهر مشهد استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های مورد استفاده

متغیرهای متعددی در جانمایی ایستگاه‌های تماس عابرین، تماس عمومی و تماس مناطق مسکونی با توجه شرایط و ضوابط مورد نیاز است که در جدول ۱ شرح داده شد. با توجه به جدول ۱ و متغیرهای در دسترس، ۱۳ متغیر جهت جانمایی ایستگاه‌های مورد نظر تهیه شد، که به تناسب شرایط و ضوابط برای جانمایی استفاده گردید. جدول ۲ نشان‌دهنده داده‌های مورد استفاده جهت جانمایی ایستگاه‌های تماس عابرین، تماس عمومی و تماس مناطق مسکونی است.

بردن عدم قطعیت ذاتی و همچنین عدم دقت از روند مقایسه دو به دوی مربوط به ادراک‌های تصمیم‌گیرندگان اغلب مورد انتقاد قرار می‌گیرد (۱۶). یک راه طبیعی برای حل مسائلی با قضاوت نامشخص، مبهم و غیردقیق، بیان نسبت مقایسه بعنوان مجموعه‌های فازی یا اعداد فازی در بازه صفر و یک، که ابهام موجود در تفکر انسان را به کار می‌بندد (۱۷). در عملیات تلفیق معیارها، کلاس‌ها و واحدهای مکانی منفرد موجود در هر یک از معیارها بعنوان عناصر زیر مجموعه هستند و معیار عضویت آنها در مجموعه مکان‌های مناسب یا نامناسب بودن آنهاست که با درجه عضویت بین صفر تا یک مشخص می‌شود. میزان عضویت مقادیر موجود در یک عامل در مجموعه‌های فازی، درجه عضویت نامیده می‌شود و تابعی که این اعداد را تعیین می‌نماید، تابع عضویت نام دارد. مقدار درجه عضویت هر کلاس و واحد مکانی، مانند وزن‌های موجود در روش همپوشانی شاخص، براساس نظرات کارشناسی و استفاده از دانش داده‌ای تعیین می‌گردد (۱۸). روشی قطعی برای تعیین تابع عضویت وجود ندارد و این مورد بیش از همه یک مقوله تجربی و براساس شروط است. پارامتر گستره نیز عامل مهمی در تعیین مقادیر توابع عضویت به یک متغیر است. به طور کلی، مقدار عامل گستره اعداد کمتر از ۱ اختصاص داده می‌شود، و برای هر دو توابع کوچک و بزرگ مقادیر ۱ تا ۱۰ انتخاب می‌شود (۱۹، ۲۰). براساس مسئله مورد مطالعه، از روش‌های مختلف ترکیب اعداد فازی مانند اشتراک فازی (حداقل سازی ریسک)، عملگر اجتماع فازی (حداکثر سازی ریسک)، عملگر ضرب فازی، عملگر جمع فازی و فازی گاما برای تلفیق مجموعه فاکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش فازی گاما به ارائه روش‌های انعطاف‌پذیر از ترکیب لایه‌های موضوعی متعدد بین عملگر ضرب فازی و عملگر جمع فازی می‌پردازد و موجب تعادل بین روندهای کاهش و افزایشی در عملیات جمع و ضرب فازی است (۲۱). در این مطالعه با توجه به سوابق پژوهشی انجام گرفته شده، مقدار  $\lambda = 0/9$  بعنوان فازی گاما برای تلفیق مجموعه فاکتورها مورد استفاده قرار گرفت (۲۲). نظریه احتمال به مطالعه تعداد (فراوانی) رخداد مورد نظر

جدول ۲- داده‌های مورد استفاده جهت جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد

| شماره | متغیرهای مورد استفاده                    | روش تهیه         | منبع تهیه                                     | نوع داده اولیه |
|-------|--|------------------|---|----------------|
| ۱     | تراکم خودرو (A), (B), (C)                | تخمین تراکم کرنل | طبقه‌بندی به روش حداکثر درست نمایی، QuickBird | شبکه‌ای        |
| ۲     | فاصله از فضای سبز (A), (B)               | فاصله اقلیدوسی   | شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی - LANSAT ۸    | شبکه‌ای        |
| ۳     | تراکم جمعیت (A), (B)                     | تخمین تراکم کرنل | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | شبکه‌ای        |
| ۴     | تراکم فضای سبز (B)                       | تخمین تراکم کرنل | شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی - LANSAT ۸    | شبکه‌ای        |
| ۵     | تراکم واحدهای تجاری (A), (B), (C)        | تخمین تراکم کرنل | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۶     | تراکم واحدهای صنعتی (B)                  | تخمین تراکم کرنل | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۷     | فاصله از کاربری‌های تجاری (A), (C)       | فاصله اقلیدوسی   | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۸     | فاصله از خیابان (A), (C)                 | فاصله اقلیدوسی   | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۹     | تراکم واحدهای مسکونی (C)                 | تخمین تراکم کرنل | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۱۰    | فاصله از واحدهای صنعتی (B)               | فاصله اقلیدوسی   | نقشه کاربری شهری - شهرداری مشهد               | برداری         |
| ۱۱    | فاصله از سایر کاربری‌های شهری (C)        | فاصله اقلیدوسی   | نقشه موقعیت - شهرداری مشهد                    | برداری         |
| ۱۲    | فاصله از واحدهای مسکونی (C)              | فاصله اقلیدوسی   | نقشه موقعیت - شهرداری مشهد                    | برداری         |
| ۱۳    | فاصله از ایستگاه‌های موجود (A), (B), (C) | فاصله اقلیدوسی   | نقشه موقعیت - شهرداری مشهد                    | برداری         |

(A) ایستگاه‌های تماس عابری در مرکز شهر، (B) ایستگاه‌های تماس عمومی در مرکز شهر و (C) ایستگاه‌های تماس ساکنین مناطق مسکونی

از آنجایی که یکی از مهم‌ترین عوامل ایجادکننده آلودگی هوا تعداد خودروها است، مطالعاتی در زمینه استفاده موفق از داده‌های اپتیکی سنجش از دور، در برآورد تعداد و همچنین سرعت خودروها انجام شده است (۲۷-۲۵). با توجه به وضوح بالای تصویر QuickBird در مقایسه با سایر ماهواره‌های تجاری کنونی، از داده‌های این ماهواره جهت تهیه نقشه تراکم خودروها، بطور نسبی، برای شهر مشهد استفاده شده است. به منظور استخراج لکه‌های فضای سبز شهر مشهد از داده‌های سنجنده تصویرساز عملیاتی زمینی ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. طبق نتایج سایر محققین (۲۸، ۲۹)، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)) جهت استخراج فضای سبز شهر مشهد انتخاب شد. در این مطالعه از تصحیحات

اتمسفری مدل ATCOR<sub>2</sub> (۳۰) و روش تصحیحی هندسی ارائه شده توسط Redzwan و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد (۳۱)، سپس باندهای انعکاسی (سطح زمین) مورد نیاز در محاسبه NDVI به کار گرفته شده است. جهت بهبود قدرت تفکیک تصاویر چند طیفی از تکنیک فیوژن ارائه شده توسط Zhang (۲۰۰۲) با استفاده از باند پانکروماتیک استفاده شد (۳۲) و قدرت تفکیک ۳۰ متری باندهای مورد نیاز به سطح ۱۵ m (قدرت تفکیک باند پانکروماتیک) رسید، سپس با حفظ نسبی اطلاعات طیفی باندها، با قدرت تفکیک مکانی بالا، NDVI بر روی باندهای فیوژن شده اعمال گردید. در مورد داده‌های فاصله و تراکم از عملگر فاصله اقلیدوسی و تخمین تراکم کرنل استفاده شد.

## روش‌های تصمیم‌گیری

در این مطالعه، براساس استاندارد ارائه شده جانمایی انواع ایستگاه‌ها در کشور آمریکا (جدول ۲) وزن معیارها و توابع مورد نظر جهت توضیح درجه اهمیت معیارها با دو روش فازی در نرم افزار Arc Map و فرایند تحلیل سلسله مراتبی در نرم افزار Expert Choice جهت شناسایی مناطق جدید احداث سه نوع ایستگاه سنجش کیفیت هوا شامل تماس عابرین، عمومی و مسکونی بدست آمد. شکل ۲ نشان‌دهنده وزن‌های استفاده شده معیارها جهت جانمایی در روش تحلیل سلسله مراتبی است. بیشترین وزن، نشان‌دهنده بالاترین تاثیر در جانمایی است (۳۳). بعنوان مثال، فاصله از خیابان یک عامل مهم برای ایستگاه‌های تماس عابرین به دلیل ماهیت آن است که در مطالعات به آن اشاره شده است (۳۴). لازم به ذکر است که وزن معیار فاصله از ایستگاه‌های موجود در ایستگاه تماس عابرین در مرکز شهر (A) به دلیل ماهیت ترافیکی بودن ایستگاه‌های موجود و انطباق با شرایط ایستگاه‌های (A)، بیشتر

دیده شده است. احتمال درجات متناظر تصادفی (وزن عوامل) بین متغیرهای مورد استفاده با شاخص نسبت سازگاری ارزیابی شد. ارزش‌های کمتر از ۰/۱ سازگاری خوب را نشان می‌دهند. ولی اگر این ارزش مساوی و یا بیشتر از ۰/۱ باشد، قضاوت‌ها ناسازگار بوده و بایستی مقادیر ماتریس مقایسه‌های زوجی مورد بازبینی دوباره قرار بگیرد (۳۵). نسبت سازگاری بین عوامل مورد استفاده جهت جانمایی ایستگاه‌های تماس عابرین در مرکز شهر برابر با ۰/۰۳، در ایستگاه‌های تماس عمومی در مرکز شهر برابر با ۰/۰۴ و در ایستگاه تماس مناطق مسکونی برابر با ۰/۰۷ است، که این مقادیر کمتر از ۰/۱ و سازگاری خوب را نشان می‌دهند (شکل ۱) سپس با روش ترکیب خطی وزندار، وزن کلیه معیارها ترکیب گردید. مهم‌ترین مساله در منطق فازی تعریف تعداد، نوع و پارامترهای توابع عضویت است. تابع عضویت تابعی است که توسط آن داده‌های ورودی، فازی می‌شوند. یعنی هر ورودی به سیستم فازی به عددی در فاصله صفر تا یک تبدیل می‌شود و برای



شکل ۱- اهمیت معیارها و نسبت سازگاری جهت جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا



است. بعنوان مثال با توجه به اهمیت فاصله از فضای سبز بر تماس عمومی شهر (۳۶)، از تابع فازی Small به دلیل اهمیت مقادیر ورودی کوچکتر، استفاده شد، و وزن کلیه معیارها با روش فازی گاما ترکیب گردید.

روابط استخراج شده برای هر پارامتر در روش چگالی احتمال همراه با ضرایب آن با استفاده از نرم افزار Statistica جهت جانمایی ایستگاه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. در این مطالعه فرض بر آن است که ۱۲ ایستگاه (در زمان مورد مطالعه ۱۳۹۴) براساس اصول و قواعد صحیح جانمایی شده‌اند و می‌توان با تکیه بر استخراج قوانین مکانی ۱۲ ایستگاه موجود، اقدام به جانمایی ایستگاه‌های جدید براساس روش تابع چگالی احتمال کرد.

انتخاب بهترین توزیع آماری برای هر معیار براساس آزمون آماری Chi-Square انجام گرفت. با اعمال روابط بدست

توابع عضویت انتخاب‌های متفاوتی وجود دارد که بسته به کاربرد مد نظر می‌توان یکی از آنها را انتخاب کرد. انواع مجموعه‌های فازی مانند Large، Gaussian، Linear، Small و غیره در تبدیل مقادیر عددی به مقادیر عضویت فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مجموعه‌های فازی Linear یک خط افزایشی یا کاهششی بین دو نقطه است. حداقل و حداکثر داده‌های ورودی توسط کاربر تعیین می‌شود که در این مطالعه براساس جدول ۳ تعیین شد. هر مقداری کمتر از حداقل برابر با صفر است (که نشان‌دهنده نبودن عضویت است) و بالاتر از حداکثر برابر با ۱ است (که نشان‌دهنده عضویت است). تابع عضویت یک منحنی است که نشان می‌دهد، هر نقطه از فضای ورودی چگونه به یک مقدار عضویت (درجه عضویت) بین ۰ و ۱ نگاشته می‌شود. جدول ۳ نشان‌دهنده نوع تابع عضویت مورد استفاده در روش فازی و نیز نحوه تاثیرپذیری متغیرهای مختلف بر جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا

جدول ۳- ویژگی‌های توابع فازی لایه‌های اطلاعاتی به کار رفته برای جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا

| لایه | متغیرهای مورد استفاده              | نوع تابع عضویت متغیرها برای جانمایی ایستگاه‌ها |            |                   |
|------|------------------------------------|--|------------|-------------------|
|      |                                    | تماس عابری                                     | تماس عمومی | تماس مناطق مسکونی |
| ۱    | تراکم خودرو                        | Large  | Small      | Small             |
| ۲    | فاصله از خیابان                    | Large  | **         | Large             |
| ۳    | تراکم جمعیت                        | Large  | Large      | **                |
| ۴    | تراکم فضای سبز                     | **   | Large      | **                |
| ۵    | فاصله از پوشش گیاهی                | Large  | Small      | **                |
| ۶    | تراکم واحدهای صنعتی                | **   | Small      | **                |
| ۷    | فاصله از واحدهای صنعتی             | **   | Large      | **                |
| ۸    | تراکم واحدهای تجاری                | Large  | linear     | Small             |
| ۹    | فاصله از کاربری‌های تجاری          | Linear   | **         | Large             |
| ۱۰   | تراکم واحدهای مسکونی               | **   | **         | Large             |
| ۱۱   | فاصله از واحدهای مسکونی            | **   | **         | Small             |
| ۱۲   | لایه فاصله از سایر کاربری‌های شهری | **   | **         | Large             |
| ۱۳   | فاصله از ایستگاه‌های موجود         | Large  | Large      | Large             |

\*\* به معنی عدم استفاده آن متغیر در جانمایی ایستگاه است

جدول ۴- توابع احتمالاتی و ضرایب آن جهت جانمایی ایستگاه‌ها با روش چگالی احتمال

| تابع PDF   | پارامتر                              |
|--|--------------------------------------|
| $f(x) = \frac{c}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right]$<br>$\alpha=22.32, C=0.794$   | فاصله از خیابان A,C                  |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$<br>$\sigma=204.4, \mu=183.6$                              | تراکم واحدهای تجاری A,B,C            |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$u=351, \alpha=238$                 | تراکم خودرو A                        |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$<br>$\sigma=43.43, \mu=37.2$                               | فاصله از پوشش گیاهی A,B              |
| $f(x) = \frac{c}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right]$<br>$\alpha=156.15, c=0.77$   | فاصله از کاربری‌های تجاری A,C        |
| $f(x) = \frac{c}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right]$<br>$\alpha=10196.8, c=1.156$ | تراکم جمعیت A                        |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$\alpha=1131.7, u=827.6$            | فاصله از ایستگاه‌ها A,B,C            |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$\alpha=729.2, u=989.6$             | تراکم واحدهای مسکونی C               |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$\alpha=237.64, u=218.18$           | فاصله از واحدهای صنعتی B             |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$<br>$\mu=397750, \sigma=30575$                             | تراکم واحدهای صنعتی B                |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$<br>$\mu=670193, \sigma=10513$                             | تراکم جمعیت B                        |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$\alpha=1131.7, u=827.61$           | تراکم فضای سبز B                     |
| $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]$<br>$\alpha=237.63, u=15.36$            | لایه فاصله از سایر کاربری‌های شهری C |
| $f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x-m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$<br>$\lambda=0.61, m=0, \alpha=0.02$                       | فاصله از واحدهای مسکونی C            |
| $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$<br>$\mu=670193, \sigma=10513$                             | تراکم خودرو B,C                      |

(A) ایستگاه‌های تماس عابرین در مرکز شهر، (B) ایستگاه‌های تماس عمومی در مرکز شهر، (C) ایستگاه‌های تماس ساکنین مناطق مسکونی

آمده که در جدول ۴ آورده شده است، از هر پارامتر نقشه احتمال مکان‌های مناسب جهت جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در طی مناطق مختلف شهر مشاهد بدست آمد و وزن کلیه معیارها با روش ترکیب خطی وزندار، ترکیب گردید.

### مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری

جهت مقایسه نتایج جانمایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد با روش‌های تصمیم‌گیری از روش شناخت الگوی فضایی توزیع نقاط مانند روش میانگین نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. در روش میانگین نزدیک‌ترین همسایه، حالت‌های سه‌گانه توزیع فضایی خوشه‌ای، تصادفی و پراکنده نقاط براساس امتیاز استاندارد (score-Z) تشخیص داده شد. امتیاز استاندارد روشی برای بیان اختلاف بین فاصله مشاهداتی نقاط پیشنهادی نسبت به فاصله مورد انتظار است. علامت منفی امتیاز استاندارد نشان‌دهنده حالت خوشه‌ای نقاط و علامت مثبت امتیاز استاندارد نشان‌دهنده حالت پراکنده نقاط است (۳۷، ۳۸). می‌توان گفت هرچه نقاط پیشنهادی استقرار ایستگاه در فواصل نزدیک به هم و متمرکز باشد، از کمترین اعتبار برخوردار است. به بیان دیگر بهترین روش در مکان‌یابی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد روشی است که بطور پراکنده در کل سطح شهر با توجه به معیارهای مکان‌یابی قرار بگیرند. بنابراین موضوع اصلی در انتخاب مناسب‌ترین روش، شناسایی درجه پراکنده‌گی نقاط است.

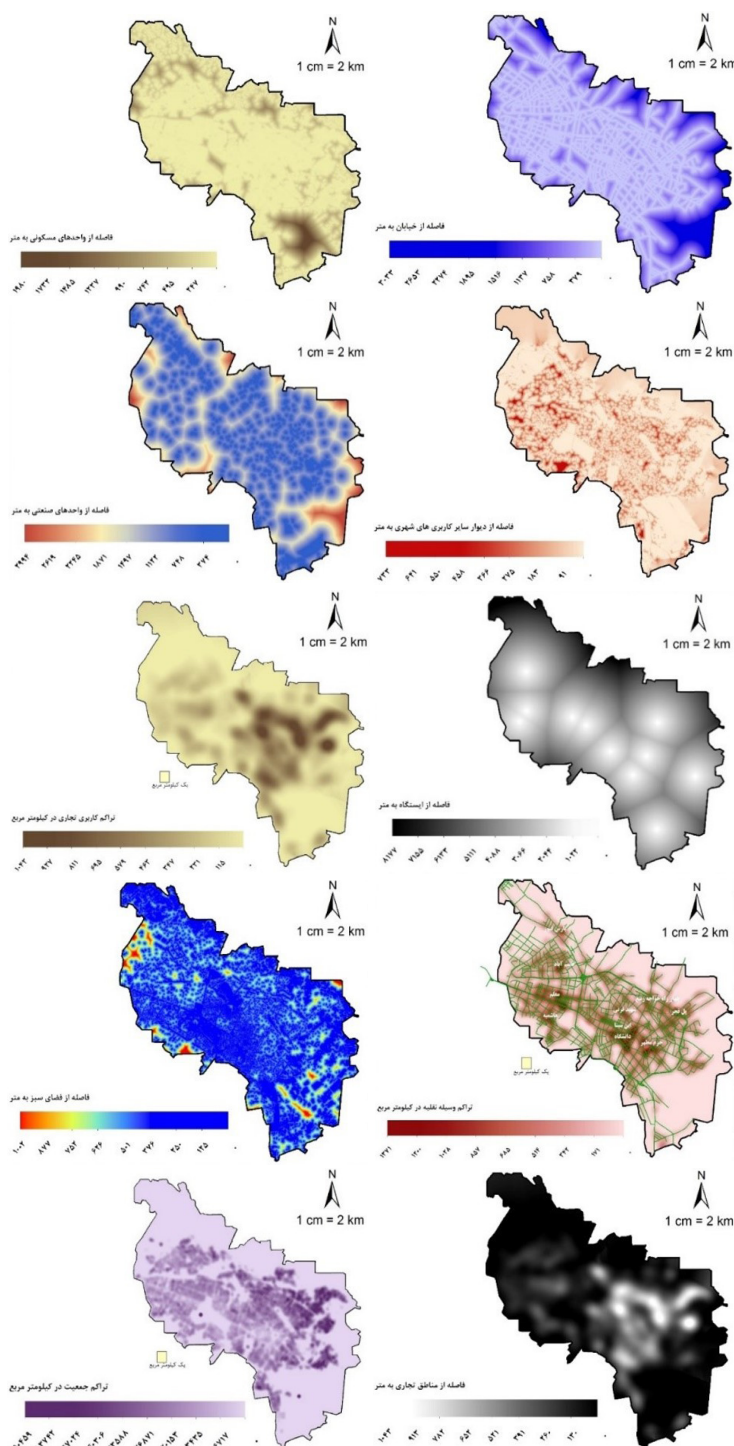
همچنین از فاصله فضایی استاندارد جهت مقایسه میزان فشردگی ایستگاه‌های پیشنهادی توسط روش‌های تصمیم‌گیری استفاده شد. فاصله استاندارد را می‌توان بعنوان شعاع برای ایجاد یک دایره (یک دایره فاصله استاندارد) حول میانگین فضایی مورد استفاده قرار داد (۳۹)، و از این طریق، فاصله استانداردهای مختلف را برای مقایسه نحوه پراکنش نقاط در یک محدوده معین استفاده کرد. اگر دایره فاصله استاندارد در گروه‌های مورد بررسی به طور قابل توجهی با هم هم‌پوشانی داشته باشند، بیانگر مقدار فضای نسبی نزدیک روش‌ها با همدیگر است. بزرگی میزان دایره در فاصله استاندارد در



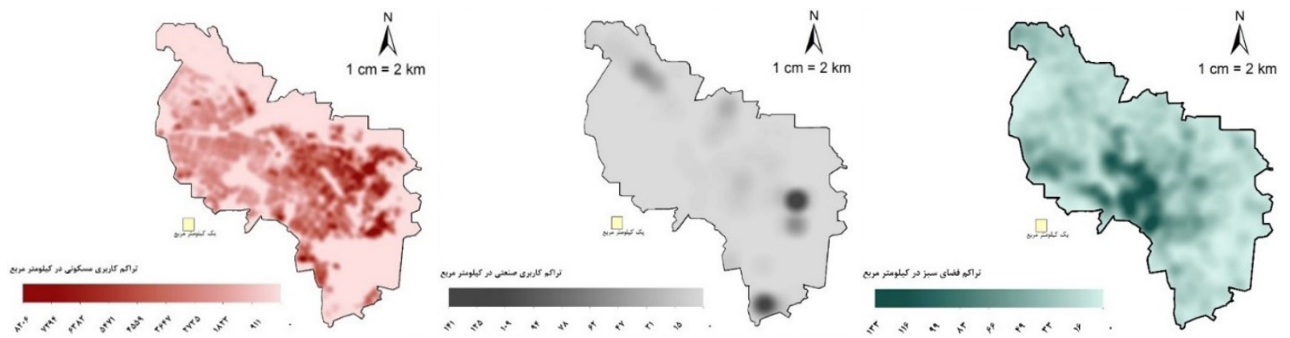
### یافته‌ها

در این مطالعه، از روش‌های متعددی جهت تهیه داده‌های موثر بر جانمایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا استفاده شد (جدول

ارتباط با نقاط مختلف می‌تواند بعنوان یک اندازه‌گیری از شدت پراکنش و تراکم نقاط استفاده شود (۳۹).



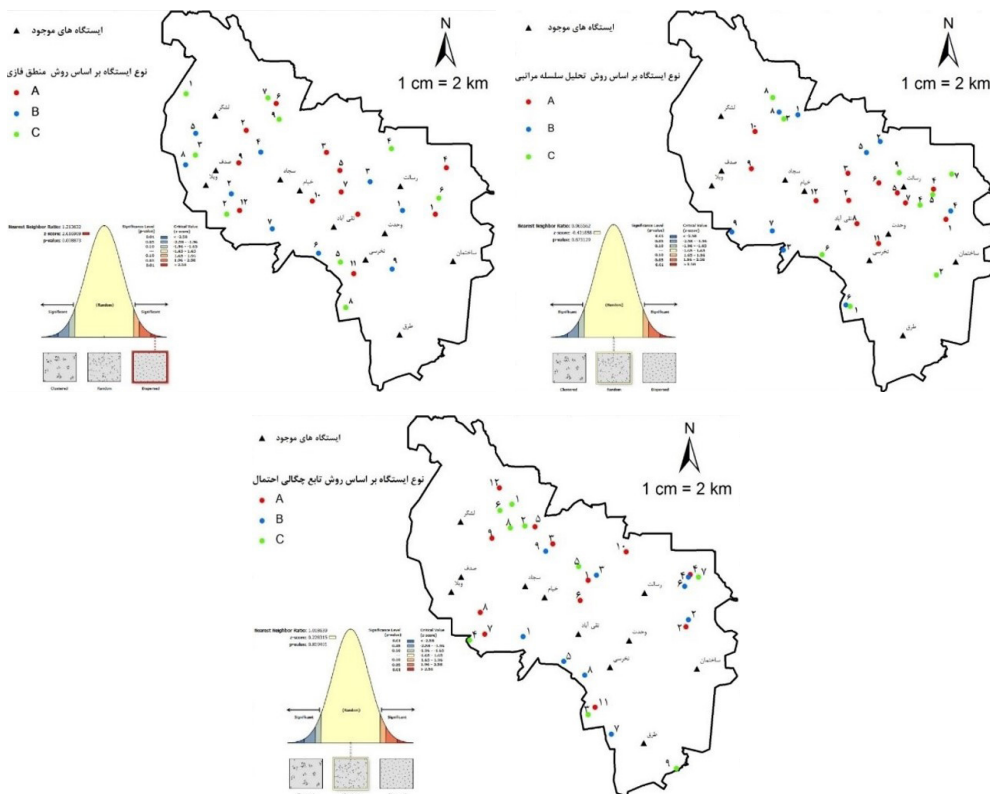
شکل ۲- داده‌های استفاده شده جهت جانمایی ایستگاه‌ها سنجش کیفیت هوای شهر مشهد



شکل ۲- داده های استفاده شده جهت جانمایی ایستگاه‌ها سنجش کیفیت هوای شهر مشهد

ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، وزن‌های مربوطه با توجه به نوع روش در نقشه معیارها اعمال گردید و نقشه نهایی جهت تصمیم‌گیری احداث ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد مشخص گردید. مکان‌گزینی ایستگاه‌های جدید و اولویت‌بندی نقاط به تفکیک نوع ایستگاه براساس بیشترین وزن به کمترین وزن ارائه شده در لکه‌ها انجام شد (شکل ۳). لازم به توضیح است که روش‌های تصمیم‌گیری وضعیت کلی

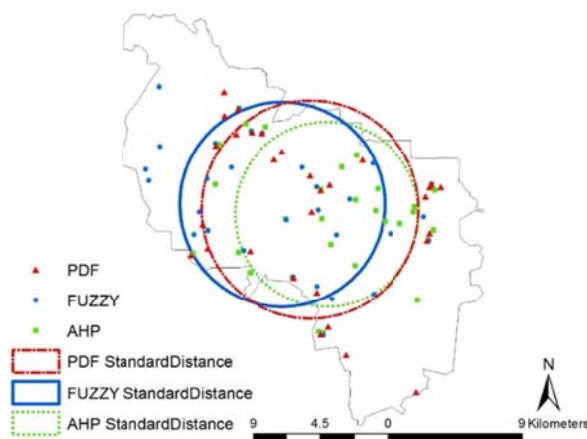
شکل ۲ نشان‌دهنده نقشه‌های مورد استفاده در سه روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، فازی و روش جدید تابع چگالی احتمال است. براساس جدول ۲، به تناسب نوع ایستگاه، داده‌های موثر بر جانمایی انتخاب شد و سپس داده‌ها جهت جانمایی ایستگاه وارد سه روش تصمیم‌گیری گردید. پس از مشخص شدن تناسب اهمیت معیارها با روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در این تحقیق، جهت جانمایی



شکل ۳- جانمایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد با روش‌های فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش فازی، روش تابع چگالی احتمال

### بحث

نکات بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که روش تحلیل سلسله مراتبی منجر به جانمایی متمرکز ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا (ایستگاه‌های تماس عابری، ایستگاه‌های تماس عمومی، و ایستگاه‌های تماس ساکنین مناطق مسکونی) در حوالی مرکز شهر مشهد شد. بطوری‌که دواير فاصله استاندارد نشان دهنده فشردگی زیاد مکان‌های پیشنهادی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در مناطق ۱، ۲، ۳ و ۴ شهر مشهد است. اما روش‌های تابع چگالی احتمال و منطق فازی موجب مدل شدن جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا به طور پراکنده در سطح شهر مشهد شد. دلیل تفاوت نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی با روش‌های تابع چگالی احتمال و منطق فازی در نحوه برخورد با عوامل موثر بر جانمایی ایستگاه‌های



شکل ۴- دواير فاصله استاندارد نقاط پیشنهادی روش‌های تابع چگالی احتمال، منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی

از مکان‌های مناسب را از نظر عوامل موثر بر ایجاد ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا را ترسیم کرده است و جهت جانمایی دقیق ایستگاه‌ها باز دیده‌های میدانی توسط کارشناسان در لکه‌های پیشنهادی انجام گردید (۴۰).

جدول ۵ نشان‌دهنده نتایج روش نزدیک‌ترین همسایه جهت بررسی میزان پراکندگی ایستگاه‌های پیشنهادی با روش‌های تصمیم‌گیری فازی، تحلیل سلسله مراتبی و تابع چگالی احتمال است. نتایج نزدیک‌ترین همسایه نشان می‌دهد که روش فازی بهترین الگو (پراکنده) را با ۹۹ درصد اطمینان از توزیع نقاط پیشنهادی را نشان می‌دهد. در حالت پراکنده، نقاط حداکثر فاصله ممکن را از هم دارند و حالت تصادفی مانند روش تحلیل سلسله مراتبی و تابع چگالی احتمال نیز بین دو حالت خوشه‌ای و پراکنده قرار می‌گیرد. همچنین متوسط فاصله اقلیدوسی بین مکان تمام ایستگاه‌های پیشنهادی نشان می‌دهد که حالت شبه خوشه‌ای ایستگاه‌های پیشنهادی در تابع چگالی احتمال با ۱۲۷۴ m بیشتر از سایر روش‌ها است.

شکل ۴ نشان‌دهنده دواير فاصله استاندارد نقاط پیشنهادی جهت احداث ایستگاه‌های جدید پایش کیفیت هوای شهر مشهد استفاده از روش‌های تابع چگالی احتمال، منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی است. دایره فاصله استاندارد در تحلیل سلسله مراتبی، نسبت به دو روش دیگر کوچکتر است و به معنای آن است که نقاط پیشنهادی در روش تحلیل سلسله مراتبی از تراکم نسبی برخوردار است. اما الگوی فضایی نقاط پیشنهادی در روش فازی و تابع چگالی احتمال بصورت پراکنده‌تری نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی قرار دارد.

جدول ۵- الگوی فضایی ارائه شده روش‌های تابع چگالی احتمال، منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی در جانمایی ایستگاه‌های تماس عابری، تماس عمومی و مسکونی

| مدل جانمایی        | امتیاز استاندارد | P-value | الگو    | فاصله متوسط اقلیدوسی (m) |
|--------------------|------------------|---------|---------|--------------------------|
| تحلیل سلسله مراتبی | -۰/۴۲            | ۰/۶۷    | تصادفی  | ۱۴۸۴                     |
| تابع چگالی احتمال  | ۰/۲۲             | ۰/۸۱    | تصادفی  | ۱۲۷۴                     |
| منطق فازی          | ۲/۶۱             | ۰/۰۰۸   | پراکنده | ۱۷۹۰                     |

نسبی برای متغیر تصادفی تشریح می‌شود و می‌توان میزان خطای برآورد را نیز بدست آورد (۴۵). براساس نتایج روش تابع چگالی، معیار فاصله از ایستگاه‌های موجود بیشترین تاثیر را بر جانمایی ایستگاه‌های پیشنهادی دارد و این امر موجب توزیع یکنواخت ایستگاه‌های پیشنهادی در کل شهر می‌شود، همانطور که Kaffash Charandabi و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرده‌اند برای سنجش واقعی کیفیت هوای شهری لازم است فاصله ایستگاه‌های پیشنهادی بیشتر از ایستگاه‌های موجود باشد (۸). روش‌های مورد استفاده در این تحقیق به منظور جانمایی انواع ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد براساس عوامل موثر بر جانمایی آن بود، هر چند که استفاده از سایر روش‌ها مانند تهیه نقشه‌های گازهای آلاینده با روش‌های میان‌یابی جهت کمک به جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا استفاده می‌شود (۴۶، ۴۷)، اما در این مطالعه به دلیل در نظر گرفتن راهنمای استاندارد جانمایی ایستگاه‌ها ارائه شده در کشور آمریکا، از نقشه‌های گازهای آلاینده استفاده نشد. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از روش تابع چگالی احتمال در فرایند جانمایی، و بررسی اثر احتمالاتی متغیرها و ارزیابی خطای آن، بعنوان روش مناسب پیشنهاد می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه از دو روش متداول با استفاده از نظر کارشناسی، منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی و همچنین روش تابع چگالی احتمال بعنوان روش استخراج خودکار اهمیت معیارها، جهت جانمایی سه نوع ایستگاه پایش کیفیت هوای شهر مشهد شامل ایستگاه تماس عابرین در مرکز شهر، ایستگاه تماس عمومی در مرکز شهر، و ایستگاه تماس مناطق مسکونی استفاده شد. در این مطالعه نتایج شاخص‌های پراکندگی فضایی (روش‌های میانگین نزدیکترین همسایه و دوایر فاصله استاندارد) جانمایی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در شهر مشهد نشان‌دهنده مناسب بودن موقعیت‌های پیشنهادی توسط روش تابع چگالی احتمال و روش فازی است. روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل استفاده از ترجیحات کارشناسان

مورد نظر است. روش تحلیل سلسله مراتبی براساس ترجیحاتی که فرد یا افراد تصمیم‌گیرنده جهت انتخاب بهترین جایگزین (Alternative) از میان مجموعه‌ای از جایگزین‌ها با معیارهای متفاوت است، عمل می‌کند به ویژه اگر تعداد متغیرها و سطوح تصمیم‌گیری زیاد باشد، تعیین ارجحیت، زمان بر و گاهی گیج‌کننده خواهد بود (۴۱). وزن‌دهی با روش تحلیل سلسله مراتبی بر پایه یک مدل ریاضی نیست و هدف این روش کارآمد شدن تمایلات خبرگان بعنوان تصمیم‌گیرنده بین معیارها و جایگزین‌ها جهت جانمایی است (۴۲). این امر ممکن است منجر به عدم شناخت دقیق شاخص‌های ارزیابی و معیارهای رتبه‌بندی آنها، در برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهری گردد. همچنان‌که نتایج Hacıoğlu و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل ضعف در بیان عددی ترجیحات انسانی قادر به ارائه تصمیم مناسب نیست (۳۳). اگرچه روش فازی بعنوان یک روش تصمیم‌گیری مطرح نیست و بوسیله آن می‌توان نظر تصمیم‌گیرندگان در تعیین توابع فازی دخالت داد، اما آنچه که این روش را نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی متمایز می‌سازد، رفع ابهام موجود در قضاوت‌ها و فرموله شدن آن است (۴۳). نتایج بدست آمده از جانمایی ایستگاه‌ها با روش فازی نشان داد که روش فازی و نقاط پیشنهادی از قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به مناطق پیشنهادی بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی است. همچنانکه نتایج Kengpol و همکاران (۲۰۱۲) نیز موید این است که ترکیب روش فازی با روش تحلیل سلسله مراتبی منجر به افزایش قدرت و دقت تصمیم‌گیری می‌شود (۴۴). با توجه به مشابهت، پراکندگی و میزان فشردگی موقعیت‌های پیشنهادی دو روش فازی و روش تابع چگالی احتمال جهت جانمایی ایستگاه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که روش تابع چگالی احتمال بعنوان روشی جهت بهبود و کمک به فرایند تصمیم‌گیری قابل استفاده است. این روش در زمانی که امکان تعمیم شروط مکانی نمونه‌های موجود به سایر مناطق فراهم باشد (مانند مطالعه حاضر) کاربرد دارد. زیرا با استفاده از توابع توزیع، احتمال

مکانی آن را استخراج کنند و سپس نواحی مشابه را مشخص نمایند. استفاده از تابع چگالی احتمال، برای اولین بار جهت اولویت‌بندی مکان‌های احداث ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا (در این مطالعه) پیشنهاد می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی-کاربردی ارتباط با صنعت با عنوان "مکان‌یابی و اولویت‌بندی محل استقرار ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای شهر مشهد" مصوب دانشگاه حکیم سبزواری و مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد در سال ۱۳۹۴، به شماره ۴۵۳۹۹/۹۴ است.

### منابع

1. Sivertsen B. Monitoring air quality, objectives and design. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2008;14(3):167-71.
2. Ahmadi Moghadam M, Mahmoudi P. Analysis of Tehran air pollution data in recent decade (2000-2009). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2013;6(1):33-4 (in Persian).
3. Movafagh A, Dousti MR, Delbari AS. Standards and protocols for site selection of air pollution monitoring stations. *Proceedings of the Third Conference on Environmental Engineering*; 2009 Oct 7-8; Tehran, Iran (in Persian).
4. Goswami E, Larson T, Lumley T, Liu L-JS. Spatial characteristics of fine particulate matter: identifying representative monitoring locations in Seattle, Washington. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2002;52(3):324-33.
5. Kukkonen J, Härkönen J, Karppinen A, Pohjola M, Pietarila H, Koskentalo T. A semi-empirical model for urban PM 10 concentrations, and its evaluation against data from an urban measurement network. *Atmospheric Environment*. 2001;35(26):4433-42.
6. USA. Improving air quality through land use activities. Washington DC: Transportation and Regional Programs Division, Office of Transportation and Air Quality, US Environmental Protection Agency; 2001.
7. Ott WR. Development of criteria for siting air monitoring stations. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1977;27(6):543-47.
8. Kaffash Charandabi N, Alesheikh AA. Using of Pro-methee method for locating air pollution monitoring stations. *Proceedings of the Geomatic 90*; 2011 May 15-19; Tehran, Iran (in Persian).
9. Ashrafi K, Ghader S, Motesadi S, Esfahanian V. Site locating of air quality monitoring stations over great Tehran. *Journal of Environmental Studies*. 2008;33:1-10 (in Persian).
10. Réquia Júnior WJ, Roig HL, Koutrakis P. A spatial multicriteria model for determining air pollution at sample locations. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2015;65(2):232-43.
11. Zheng J, Feng X, Liu P, Zhong L, Lai S. Site location optimization of regional air quality monitoring network in china: Methodology and case study. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011;13(11):3185-95.
12. Bertolini M, Braglia M, Carmignani G. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. *International Journal of Project Management*. 2006;24(5):422-30.
13. Wang G, Qin L, Li G, Chen L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *Journal of Environ-*



- mental Management. 2009;90(8):2414-21.
14. Marfa J, Jimenez M, Joven JA, Pirla AR, Lanuza AT. A spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making. *Group Decision and Negotiation*. 2005;14(2):89-108.
  15. Malczewski J. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley & Sons; 1999.
  16. Deng H. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*. 1999;21(3):215-31.
  17. Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003;134(3):365-85.
  18. Zimmermann H. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 2nd ed. New York: Springer; 1992.
  19. Bahrani S, Ebadi T, Ehsani H, Yousefi H, Maknoon R. Modeling landfill site selection by multi-criteria decision making and fuzzy functions in GIS, case study: Shabestar, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(4):1-14.
  20. Weerasiri T, Wirojanagud W, Srisatit T. Assessment of potential location of high arsenic contamination using fuzzy overlay and spatial anisotropy approach in iron mine surrounding area. *The Scientific World Journal*. 2014;doi:10.1155/2014/905362.
  21. Bonham-Carter GF. *Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS*. New York: Elsevier; 1994.
  22. Raines GL, Sawatzky DL, Bonham-Carter GF. Incorporating expert knowledge: New fuzzy logic tools in ArcGIS 10. *ArcUser*. 2010;49:8-13.
  23. Yahiaoui A, Touaibia B, Bouvier C. Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Nature & Technology*. 2009;1:3-15
  24. Adab H, Kanniah KD, Solaimani K, Sallehuddin R. Modelling static fire hazard in a semi-arid region using frequency analysis. *International Journal of Wildland Fire*. 2015;24(6):763-77.
  25. Zeller K, Hinz S, Rosenbaum D, Leitloff J, Reinartz P. Traffic monitoring without single car detection from optical airborne images. *Deutschland: Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Leibniz Universität Hannover*; 2009.
  26. Azevedo CL, Cardoso JL, Ben-Akiva M, Costeira JP, Marques M. Automatic vehicle trajectory extraction by aerial remote sensing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2014;111:849-58.
  27. Liu W, Yamazaki F. Speed detection of moving vehicles from one scene of QuickBird images. *Proceedings of the Urban Remote Sensing Event*; 2009 May 20-22; Shanghai, China.
  28. Bao T, Li X, Zhang J, Zhang Y, Tian S. Assessing the distribution of urban green spaces and its anisotropic cooling distance on urban heat island pattern in Baotou, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2016;5(2):12-25.
  29. Fung T. Environmental quality and changes: a view from NDVI in Hong Kong. *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing*; 1997 Aug 3-8; Singapore.
  30. Richter R, Schläpfer D. *User Guid: Atmospheric/topographic correction for satellite imagery*. *Lange-gweg: ReSe Applications Schl äpfer*; 2005.
  31. Redzwan G, Ramli MF. Geo-referencing the satellite image from Google Earth by relative and absolute positioning. *Malaysian Journal of Science*. 2007;26(2):135-41.
  32. Zhang Y. Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite as well as Landsat 7 images and initial solutions. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002;34(4):587-92.
  33. Hacıoğlu Hİ, Ari A, Özkan A, Elbir T, Tuncel G, Yay OD, et al. A new approach for site selection of air quality monitoring stations: Multi-criteria decision-making. *Aerosol and Air Quality Research*. 2016;16(6):1390-402.
  34. Chowdhury AK, Debsarkar A, Chakrabarty S. Novel methods for assessing urban air quality: Combined air and noise pollution approach. *Journal of Atmospheric Pollution*. 2015;3(1):1-8.
  35. Sibooeye A, Ahmadjoo S, Mortazavi MM. A combined AHP-topsis group approach for suitable ranking EPDM rubber synthesized catalyst by BisIndZrCl<sub>2</sub>. *Basparesh*. 2012;2(3):33-46 (in Persian).
  36. Amorim JH, Valente J, Cascão P, Rodrigues V, Pimentel C, Miranda AI, et al. Pedestrian exposure to air pollution in cities: Modeling the effect of roadside trees. *Advances in Meteorology*.



- 2013;doi:10.1155/2013/964904.
37. Asmahani A, MR MN, Harsuzilawati M. Spatial mapping of dengue incidence: A case study in hulu langat district, Selangor, Malaysia. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2010;4(7):251-55.
38. Getis A. Temporal land-use pattern analysis with the use of nearest neighbor and Quadrat Methods1. *Annals of the Association of American Geographers*. 1964;54(3):391-99.
39. Wong DW. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: Using centographic measures as examples. *Geographic Information Sciences*. 1999;5(2):163-74.
40. Ouma YO, Opudo J, Nyambenya S. Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for road pavement maintenance prioritization: Methodological exposition and case study. *Advances in Civil Engineering*. 2015;doi:10.1155/2015/140189.
41. De Steiguer J, Duberstein J, Lopes V. An analysis of Koza's computational effort statistic for genetic programming. In: Renard KG, McElroy SA, Gburek WJ., Canfield H, Russell L, editors. *Proceedings of the First Interagency Conference on Research in the Watersheds*; 2003 Oct 27-30; Benson, Arizona.
42. Alirezayee MR, Rafiee Sani MR. A development on AHP/DEA methodology for ranking decision making units. *Industrial Management*. 2011;2(5):83-102 (in Persian).
43. Ahmadee M, Shahidi A, Ghorbani Z. Locating of suitable areas to provide drinking water using multi criteria decision making and Fuzzy Logic Process (Case study: Tabas Aquifer). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;9(3):331-46 (in Persian).
44. Kengpol A, Rontlaong P, Tuominen M. Speed detection of moving vehicles from one scene of Quick-Bird images. *Proceedings of PICMET '12: the Technology Management for Emerging Technologies*; 2012 29 July-2 Aug; Vancouver, BC, Canada.
45. Tong X-h, Liu D-j. Probability density function and estimation for error of digitized map coordinates in GIS. *Journal of Central South University of Technology*. 2004;11(1):69-74.
46. Shareef MM, Husain T, Alharbi B. Optimization of air quality monitoring network using GIS based interpolation techniques. *Journal of Environmental Protection*. 2016;7:895-911.
47. Wu J, Peng D, Ma J, Zhao L, Sun C, Ling H. Selection of atmospheric environmental monitoring sites based on geographic parameters extraction of GIS and fuzzy matter-element analysis. *PloS One*. 2015;10(4):e0123766.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Site selection of air quality monitoring stations over city of Mashhad by multiple-criteria decision-making techniques

H Adab<sup>\*1</sup>, A Atabati<sup>2</sup>, R Esmaili<sup>3</sup>, Gh Zolfaghari<sup>2</sup>, M Ebrahimi<sup>1</sup>

1- Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- Department of Environment, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

3- Environmental Pollutant Monitoring Center of Mashhad, Vice Chancellor of Services and Urban Environment, Mashhad, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 18 January 2017

**Revised:** 10 April 2017

**Accepted:** 17 April 2017

**Published:** 21 June 2017

**Key words:** Site selection, Geographic information system, Air quality monitoring stations, Mashhad

### \*Corresponding Author:

[h.adab@hsu.ac.ir](mailto:h.adab@hsu.ac.ir)

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Optimum number of air quality monitoring stations in Mashhad is an essential task for management of the urban environment. However, real monitoring and accurate information on the status of air quality require proper spatial distribution of air quality monitoring stations in the city of Mashhad. The aim of the present study was to determine optimum site locations for air quality monitoring, including Downtown Pedestrian Exposure Station, Downtown Background Exposure Station, and Residential Population Exposure Station by three Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques.

**Materials and Methods:** In the present study, sites for new air quality monitoring stations in Mashhad were determined based on a proposed protocol in the United States. Accordingly, the criteria effective for site selection such as population density, distance from existing stations, vicinity to vegetation, vehicle density and other factors were used by applying Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy set, and Probability Density Function (PDF).

**Results:** Location similarity of the sites proposed by decision making methods was evaluated to know its reliability. The compactness of distribution of the proposed sites were compared by applying spatial statistic methods such as Average Nearest Neighbor (ANN) and Standard. The results from ANN indicated that fuzzy set mapped the suggested sites was fully scattered within the entire city of Mashhad and was statistically significant at 99% confidence level. The PDF method also offered the same spatial pattern as fuzzy set. Overall results of this study indicated spatial optimization of suggested sites location for fuzzy set and PDF.

**Conclusion:** The overall results of the decision-making methods used in this study indicated that it is necessary to increase number of air quality monitoring stations at Northwest of Mashhad due to the urban growth in the city. The results also showd the possibility of using Probability Density Function (PDF) as a method of decision-making in GIS for locating and ranking of new air quality monitoring stations.