

تحلیل زمانی غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون ($PM_{2.5}$) شهر مشهد

رضا اسماعیلی (دکتری تخصصی آب‌وهواشناسی، مسئول مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد، معاونت

خدمات شهری، شهرداری مشهد، مشهد، ایران)

esmaili-r@mashhad.ir

صص ۱۹۰ - ۱۷۱

چکیده

اهداف: در این تحقیق توزیع فضایی غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون به‌عنوان آلاینده اصلی هوای شهر مشهد، با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای پهنه‌بندی شده است.

روش: آمار غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون شهر مشهد به‌عنوان آلاینده اصلی برای دوره آماری ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ در مقیاس زمانی ساعتی برای ۱۰ ایستگاه سطح شهر جمع‌آوری شد و با توجه به هدف و مقیاس مدنظر، ماتریس داده‌ها به شکل S آرایش داده شد. ماتریس‌های تنظیم‌شده در محیط XLSTAT با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد (Ward) تحلیل شدند.

یافته‌ها/نتایج: نتایج نشان داد که ۳۶۵ روز سال را می‌توان به سه خوشه مجزا تفکیک کرد. نتایج تحلیل ماهانه نشان داد که ماه‌های شهریور، آبان و آذر در یک خوشه و دارای بیشترین غلظت ذرات معلق قرار می‌گیرند و ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و مهر در خوشه دوم با کمترین بار آلودگی هوا قرار می‌گیرند. نتایج تحلیل روزهای هفته نشان داد که هفت روز هفته در چهار گروه همگن تفکیک‌شدنی است. از لحاظ غلظت، ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون ساعات شبانه‌روز در چهار خوشه مجزا جای می‌گیرند.

نتیجه‌گیری: استفاده از تحلیل خوشه‌ای و بررسی تغییرات زمانی ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون به‌عنوان آلاینده اصلی مشهد در مقیاس ماهانه، سالانه،

روزهای هفته و ساعتی می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریت و کاهش آلودگی هوا مفید واقع شود.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوای مشهد، ذرات معلق کوچک‌تر از 2.5 میکرون، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، آلاینده اصلی.

مقدمه

براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۲، حدود هفت میلیون نفر در سراسر جهان در اثر آلودگی هوا جان خود را از دست داده‌اند که از این تعداد $3/7$ میلیون نفر در اثر مواجهه با آلودگی هوا در محیط باز فوت کرده‌اند و ۸۸ درصد از این مرگ‌ومیرها در کشورهای با درآمد متوسط و کم اتفاق افتاده است (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۱۴). به‌طور کلی، یک‌هشتم از مرگ‌ومیر جهانی، ناشی از قرار گرفتن در معرض آلودگی هواست. این یافته‌ها بیش از دو برابر تخمین‌های قبلی است و تأیید می‌کند که در حال حاضر آلودگی هوا بزرگ‌ترین خطر برای سلامت محیط‌زیست شهری در جهان است.

براساس این گزارش، بیشترین تلفات مرگ‌ومیر از آلودگی هوا در کشور چین ناشی می‌شود که هر ساله حدود ۶۵۶ هزار چینی جان خود را از دست می‌دهند. در هند نیز سالانه حدود ۵۲۷ هزار و ۷۰۰ نفر در اثر آلودگی هوا می‌میرند. در ایالات متحده استنشاق آلاینده‌های هوا ۷۰ هزار نفر شهروند آمریکایی را به کام مرگ می‌برد. همچنین، آلودگی هوا در انگلیس و فرانسه به ترتیب ۲۰ هزار و ۴۰ هزار نفر را دچار مرگ زودرس می‌کند (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۱۴). طبق برنامه محیط‌زیست ملل متحد، رتبه ایران از لحاظ آلودگی هوا در بین ۱۳۳ کشور جهان ۱۱۷ است. براساس گزارش بانک جهانی، خسارات مالیانه آلودگی هوا در ایران معادل ۷۶ درصد تولید ناخالص داخلی بوده است و در اجرای برنامه‌های کاهش آلودگی هوا حدود سی سال از کشورهای پیشرفته جهان عقب‌تر هستیم (ادب، ۱۳۹۴).

در میان آلاینده‌های اصلی هوا ذرات معلق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این ذرات دارای اندازه‌هایی متفاوت بین 0.000002 تا ۵۰۰ میکرون هستند (بویل، والرو، فاکس، تورنر و

استرن^۱، (۲۰۱۳) که در این میان ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون دارای اثرهای بهداشتی و سلامتی چشمگیری هستند؛ زیرا، این ذرات قابلیت راهیابی به سیستم تنفسی بدن انسان را دارند (میری و همکاران، ۱۳۹۴). در همین ارتباط، کولیمیجر، هومان و ماتیجسن^۲ در سال ۲۰۰۶ به بررسی فضایی و زمانی تغییرات ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون (PM) و قطر نوری ذرات (AOT)^۴ در سطح اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات AOT و PM در فصول متفاوت به طور مشخصی متفاوت است. در بیشتر مناطق اروپا، میزان AOT اندازه‌گیری شده در فصل زمستان کمترین میزان خود را دارد؛ در حالی که تغییرات فصلی PM در سراسر اروپا و همچنین در مناطق دارای تغییرات فصلی آشکار، بسیار کمتر از AOT بود. کئورول^۵ و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی تغییرات فضایی و زمانی ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ و ۱۰ میکرون (PM_{2.5} و PM₁₀) موجود در هوا در کشور اسپانیا پرداختند. میانگین غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و ترکیبات شیمیایی در اسپانیا تغییرات درخور توجهی را در سراسر کشور نشان می‌دهد؛ به طوری که سطح ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر در نواحی مهم ترافیکی و صنعتی، بیشتر از محدوده آلودگی گزارش شده است.

در زمینه استفاده از روش‌های آماری در بحث آلودگی هوا، ساکسنا، جوشی و پاتیل^۶ در سال ۲۰۰۲ به بررسی الگوهای مکانی تغییر آلودگی هوا در دهلی نو با روش تحلیل خوشه‌بندی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رابطه آماری معناداری بین غلظت آلاینده‌ها و نوع ایستگاه وجود ندارد و به همین دلیل توصیه کردند در دهلی از استاندارد یکنواخت در تمامی نقاط استفاده شود. اوجدا-ماگانا^۷ و همکاران (۲۰۱۰) با الگوی PFCM الگوریتم خوشه‌بندی کاربردی به بررسی آلودگی هوا در شهر سالامانکای مکزیک پرداختند. در تحقیق دیگری، اوجدا-ماگانا و همکاران (۲۰۱۱) با به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی فازی و احتمالاتی به بررسی آلودگی هوای مکزیک پرداختند. در پژوهشی دیگر، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای به

1. Boubel, Vallero, Fox, Turner, & Stern
2. Koelemeijer, Homan, & Matthijsen
3. Particulate Mater
4. Aerosol Optical Thickness
5. Querol
6. Saksena, Joshi, & Patil
7. Ojeda-Magana

بررسی آلودگی هوا در شهر بانگوک تایلند پرداخته شد. سپس، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ آلودگی هوا در این منطقه پهنه‌بندی شد (پراپاسورنپیتایا، جینسارت و سانگوانسینتوکول^۲، ۲۰۱۱). سایتان و مکپاریوپ^۳ در سال ۲۰۱۲ با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی آلودگی هوا و متغیرهای هواشناسی، آلودگی هوا را در منطقه‌ای صنعتی در شرق تایلند بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که متغیرهای هواشناسی به چهار گروه مجزا تفکیک‌شدنی هستند: خوشه اول، متغیرهای کیفی هوا، خوشه دوم، فشار هوا، خوشه سوم، درجه حرارت تابش آفتاب و سرعت باد و خوشه چهارم، باران، رطوبت نسبی، جهت باد و روزهایی با غلظت زیاد ازن. همچنین، سطح زمین می‌تواند از لحاظ بازه زمانی در سه گروه مجزا قرار گیرد: خوشه اول، ظهر و بعدازظهر، خوشه دوم، بازه زمانی غروب خورشید و خوشه‌بندی سوم، بازه زمانی شب.

برای کاهش هزینه‌ها و مدیریت بهتر ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در منطقه کانتوی ژاپن، لیزوکا^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۴ تحلیل خوشه‌ای را روی داده‌های آلودگی هوا انجام دادند. آن‌ها دریافتند که آلاینده‌های NO_x و O₃ را می‌توان در هشت خوشه قرار داد که هر یک از خوشه‌ها از لحاظ ویژگی‌های مکانی و رفتار زمانی دارای همگنی درون‌گروهی هستند. در همین ارتباط، توزیع فضایی و محلی داده‌های شاخص کیفیت هوا^۵ ثبت‌شده در ۱۶۱ شهر مهم چین با استفاده از شاخص موران بررسی و ارزیابی شد و تأثیرگذارترین پارامترهای شهری مؤثر در این شاخص تعیین شدند (پو، لو، وانگ، وانگ و کانگ^۶، ۲۰۱۷). در شهر مادرید اسپانیا از ابزارهای آماری تجزیه و تحلیل همبستگی، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۷ و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای^۸ برای ارزیابی آلودگی هوا در این شهر استفاده شد. نتایج در زمینه آلاینده‌های مورد بررسی شامل NO، NO₂، PM₁₀ و O₃ در ۲۲ ایستگاه

1. Geography Information System (GIS)
2. Prapassornpitaya, Jinsart, & Sanguansintukul
3. Saithan & Mekpariyup
4. Iizuka, Shintaro, Mizukoshi, Noguchi, Yamasaki, & Yanagisawa
5. Air Quality Index (AQI)
6. Pu, Luo, Wang, Wang, & Kang
7. Principal Component Analysis (PCA)
8. Cluster Analysis (CA)

در شبکه مطالعه شده طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، به وجود همبستگی میان این آلاینده‌ها با ساختارهای فضایی تأکید کردند. اقدامات پیشنهادی و برنامه‌های تدوین شده به‌خصوص در حوزه ترافیک، با هدف بهبود کیفیت هوا از طریق تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای صورت گرفت (نونز-آلونسو، ویسنت پرز-آریباس، منظور و کاسرز^۱ (۲۰۱۹)).

در همین ارتباط، حسین‌زاده، دوستان، حقیقت ضیا بری و حقیقت ضیا بری (۱۳۹۲) با هدف شناسایی الگوهای جوی مؤثر در آلودگی هوای شهر مشهد دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۸۹ را بررسی کردند. آن‌ها دو آلاینده مونو اکسید کربن (CO) و مواد معلق (PM₁₀) در نیمه سرد سال، داده‌های روزانه فشار سطح دریا^۲ (SLP) و ۵۰۰ هکتوپاسکال را ارزیابی کردند و در نهایت، با روش‌های چندمتغیره، تحلیل مؤلفه اصلی و خوشه‌بندی روزهای شناسایی شده را در پنج گروه جای دادند و برای هر گروه، نقشه‌های مرکب از داده‌های سطح متوسط دریا (SLP) و ۵۰۰ هکتوپاسکال تهیه و تفسیر هم‌دید شد.

در تحقیقی دیگر، حجازی، مباشری و احمدیان مرچ (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس به اندازه‌گیری ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون در هوای شهر تهران پرداختند تا نقشه توزیع مکانی ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون را در شهر تهران برآورد کنند. در این تحقیق، با استفاده از رگرسیون خطی، بین سهم بازتابندگی ناشی از پراکنش توسط هواویزها، مستخرج از داده‌های سنجنده مودیس و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر اندازه‌گیری شده توسط دوازده ایستگاه آلودگی سنج شهر تهران، ارتباط برقرار شد. نتایج نشان داد که آلودگی مناطق مرکزی بیش از سایر قسمت‌های شهر است.

اسماعیلی (۱۳۹۲) در تحقیقی با استفاده از روش خوشه‌بندی، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مشهد را از لحاظ دو آلاینده PM_{2.5} و CO بررسی کرد. محوی و همکاران (۱۳۹۳) تغییرات ذرات معلق در هوای شهر تبریز و ارزیابی اثرهای بهداشتی متناسب به این آلاینده را بررسی کردند. یونسیان و همکاران (۱۳۹۳) تغییرات غلظت ذرات معلق ۱۰، ۲/۵ و یک میکرون را در هوای شهر تهران در زمان وقوع پدیده ریزگردها بررسی کردند. حاتمی، بیگلو،

1. Nunez-Alonso, Vicente Perez-Arribas, Manzoor, & Caceres

2. Sea Level Pressure (SLP)

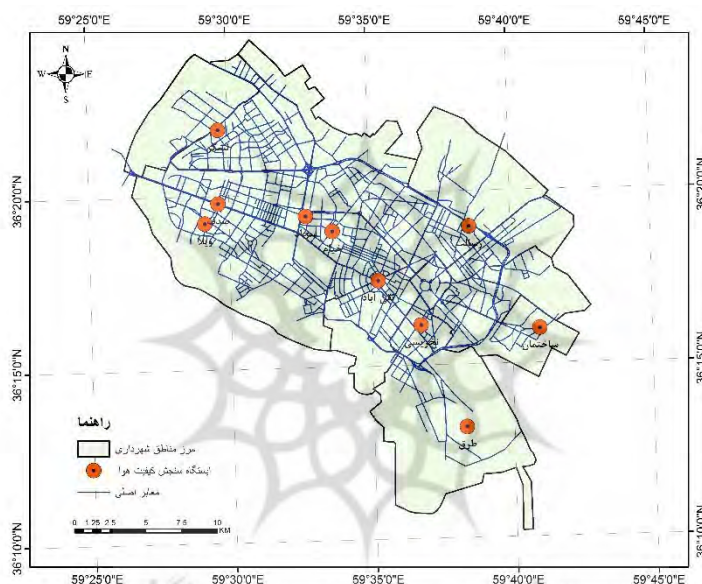
نارنگی فرد و امیدوار (۱۳۹۳) با استفاده از روش خوشه‌بندی الگوهای همدید، روزهای آلوده به ذرات معلق شهر شیراز را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که یک سامانه پرفشار در تراز دریا با ریزش هوای سرد به همراه یک سامانه و اچرخندی (پراارتفاع) در تراز ۸۵۰ با حاکمیت جو فشارورد^۱ در تراز پانصد در دوره سرد، عوامل اصلی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق هستند. به تازگی، نواحی همگن آلودگی هوای مشهد از لحاظ بار ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون در دوره‌ای دوساله با استفاده از GIS و روش تحلیل خوشه‌ای بررسی شدند. براساس نتایج این تحقیق، سه منطقه همگن و مجزا برای مشهد مشخص شد: منطقه کم‌غلظت در شمال غرب، منطقه آلوده با غلظت زیاد ذرات معلق در شرق و جنوب شرق و منطقه حائل که بار آلودگی متوسط دارد (اسماعیلی، ۱۳۹۷). بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در غالب مطالعات انجام شده یا توزیع مکانی آلاینده‌های هوا در نظر گرفته شده است یا به بررسی علل هواشناسی به خصوص الگوهای سینوپتیکی در بروز آلودگی هوا پرداخته شده است و کمتر تحلیل زمانی مدنظر قرار گرفته است؛ بنابراین، هدف از انجام این پژوهش استفاده از روش‌های آماری از جمله تحلیل خوشه‌بندی در تعیین بازه‌های همگن زمانی ذرات معلق به عنوان آلاینده اصلی هوای شهر مشهد است. برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران شهری می‌توانند از نتایج این پژوهش در بحث مدیریت آلودگی هوا، به خصوص برنامه‌ریزی برای مدیریت کنترل و کاهش آلودگی هوا استفاده کنند.

۲. روش‌شناسی تحقیق

شهر مشهد با جمعیتی بالغ بر سه میلیون نفر و مساحت ۳۲۸ کیلومتر مربع دومین کلان‌شهر ایران است که وجود بارگاه ثامن‌الحجج (ع) و آثار تاریخی و فرهنگی فراوان هر ساله باعث می‌شود که ۲۰ تا ۳۰ میلیون نفر زائر و گردشگر این شهر را برای سفر برگزینند. به دلیل تراکم زیاد جمعیتی و توسعه فیزیکی سریع شهر، آلودگی هوا به یکی از معضلات اصلی زیست‌محیطی این شهر تبدیل شده است. براساس گزارش‌های مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد در سال ۱۳۹۴، تنها ۴۲ روز هوای شهر مشهد در وضعیت پاک و مطلوب

1. barotropic

بوده است. در تحقیق حاضر برای تحلیل زمانی هوای شهر مشهد هوا از آمار ۱۰ ایستگاه سنجش کیفیت هوا استفاده شده است که در سطح شهر مستقرند. بدین منظور، داده‌های ساعتی ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون که آلاینده اصلی شهر مشهد است، در ایستگاه‌های مورد مطالعه که در شکل (۱) موقعیت و توزیع آن‌ها در سطح شهر نشان داده شده است، از تاریخ ۱۳۹۰/۱/۱ تا ۱۳۹۴/۱۲/۲۹ از مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد جمع‌آوری شدند.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در سطح شهر مشهد

مأخذ: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد، ۱۳۹۵

داده‌های جمع‌آوری شده در ماتریس‌هایی با مقیاس‌های زمانی و مکانی تنظیم و آرایش داده شدند. چگونگی آرایش داده‌ها در به‌دست آمدن ترکیب زمانی یا مکانی داده‌ها بسیار اهمیت دارد؛ به طوری که در اعمال تحلیل خوشه‌ای، ماتریس داده‌ها با آرایش T (مکان روی سطرها و زمان روی ستون‌ها) منجر به تفکیک مکانی می‌شوند، اما در آرایش S که زمان‌ها روی سطرها و مکان‌ها روی ستون‌هاست، تفکیک زمانی حاصل می‌شود (منتظری، ۱۳۹۰).

اعمال تحلیل خوشه‌ای در دو مرحله اساسی صورت می‌گیرد: مرحله اول، محاسبه درجه همانندی عضوها با یکدیگر است و مرحله دوم، چگونگی ادغام عضوها بر حسب درجه همانندی آن‌ها با یکدیگر است. بسته به روشی که برای محاسبه درجه همانندی و چگونگی ادغام انتخاب می‌کنیم، یک تحلیل خوشه‌ای را می‌توان به شیوه‌های گوناگونی اجرا کرد. برای محاسبه درجه همانندی روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها فاصله اقلیدسی است. اگر X_i بردار مشاهدات روی X_S و X_j بردار مشاهدات روی S باشد، در این صورت فواصل یادشده در بالا به صورت زیر محاسبه می‌شوند (مؤمنی، ۱۳۹۰):

$$d_{rs}^2 = (X_r - X_s)(X_r - X_s)'$$

در مطالعات محیطی غالباً برای محاسبه درجه همانندی از فاصله اقلیدسی استفاده می‌شود. پس از اندازه‌گیری درجه همانندی باید شیوه‌ای برای ادغام مقادیری به کار برد که بیشترین همانندی را نشان داده‌اند. در مطالعه حاضر از روش ادغام وارد استفاده شده است؛ زیرا، در این صورت میزان واریانس درون‌گروهی به حداقل می‌رسد در روش وارد گروه‌هایی ادغام می‌شوند که افزایش واریانس ناشی از ادغام آن‌ها نسبت به ادغام هریک از آن‌ها با دیگر گروه‌ها حداقل باشد؛ یعنی:

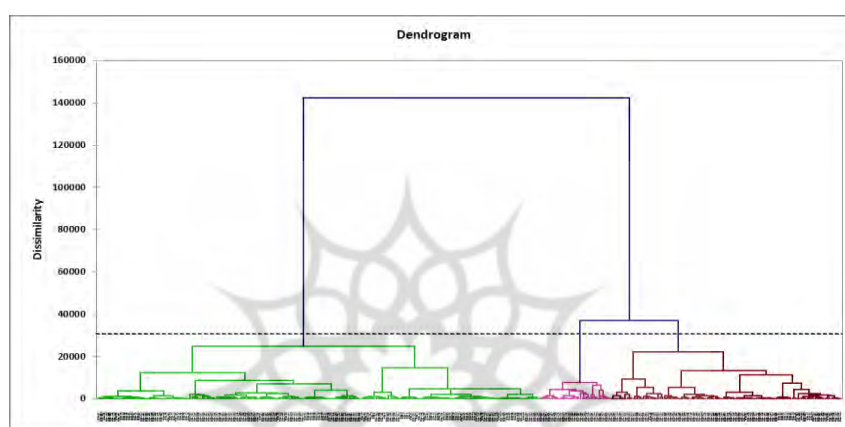
$$d(r,s) = \frac{n_r n_s d_{rs}^2}{(n_r + n_s)} \quad \text{فاصله بین گروه } r \text{ و } s \text{ است} \quad d_{rs}^2$$

در اینجا $d(r,s)$ فاصله بین گروه r و s است که به روش پیوند وارد به دست آمده است (مسعودیان، ۱۳۸۴). پس از اینکه داده‌ها بر حسب فاصله‌شان در هم ادغام شدند، گروه بندی می‌شوند. سپس، گروه‌های حاصل به شکل نمودار دندروگرام نمایش داده می‌شوند و در صورتی که هدف تحلیل مکانی باشد، داده‌های گروه‌بندی شده به نرم‌افزارهای ترسیمی منتقل می‌شوند و به شکل نقشه نمایش داده می‌شوند.

۳. یافته‌های تحقیق

برای شناسایی و تعیین روزه‌های همگن شهر مشهد، ماتریس داده‌های روزانه غلظت ذرات معلق $2/5$ میکرون با ابعاد $11 * 365$ به شکل S آرایش داده شد. سپس، تحلیل خوشه‌ای

سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد در محیط نرم افزار XLSTAT2015 صورت گرفت که نتیجه آن به ترسیم دندروگرام (شکل ۲) منجر شد. مطابق این شکل، غلظت ذرات معلق در شهر مشهد در دو بازه زمانی کلی جای می‌گیرد: دوره گرم و دوره سرد سال که دوره سرد سال خود به دو گروه تقسیم می‌شود. برای نمایش و درک بهتر توزیع روزها در طول سال با توجه به کد اختصاص داده شده شکل (۳) ترسیم و ارائه شده است.



شکل ۲ - دارنمای ترکیب روزهای سال براساس غلظت ذرات معلق کوچک تر از ۲/۵ میکرون در شهر

مشهد

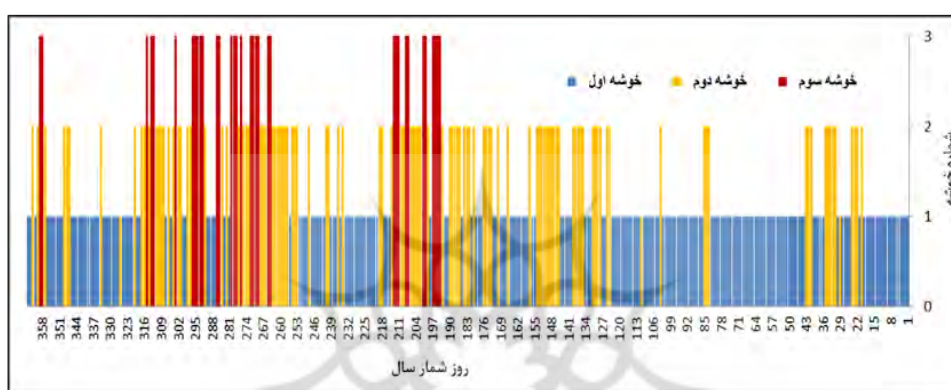
مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در شکل (۲) سه خوشه یا گروه همگن با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند: خوشه اول در کل طول سال توزیع شده است و مطابق آماره‌های جدول (۱) مقادیر متوسط آن با ۲۸/۲ میکروگرم در متر مکعب از سایر خوشه‌ها کمتر است. با توجه به تمرکز این خوشه در نیمه اول سال می‌توان گفت که در نیمه اول سال غلظت ذرات معلق در شهر مشهد کمتر است. فراوانی این خوشه ۲۱۷ روز در سال است و وجهه غالب شهر مشهد است؛ خوشه دوم با ۱۱۳ روز فراوانی و میانگین غلظت ۳۴/۸ میکروگرم در متر مکعب در رتبه بعدی قرار دارد که با توجه به شکل (۳) توزیع آن در اواسط سال بیشتر است؛ خوشه سوم که بیانگر بیشترین غلظت ذرات معلق است، غالباً در نیمه دوم سال رخ می‌دهد. متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۴۴/۳۷ میکروگرم در متر مکعب است و فراوانی آن در سال ۳۴ روز است.

جدول ۱- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی شده در مقیاس روزانه

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

گروه	تعداد روز	میانگین	حداکثر 2.5 pm	حداقل 2.5 pm	انحراف معیار	واریانس
خوشه یک	۲۱۷	۲۸/۲	۴۵	۱۶	۵/۷	۳۲/۶
خوشه دو	۱۱۴	۳۴/۸	۵۰	۲۴	۵/۹	۳۵/۸
خوشه سه	۳۴	۴۴/۳	۶۳	۳۴	۷	۴۹/۹

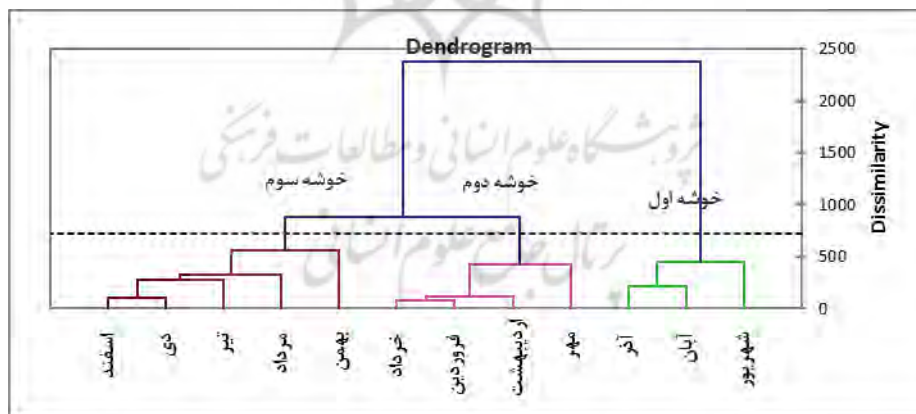


شکل ۳- توزیع خوشه‌های شناسایی شده در طول سال برای شهر مشهد

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در شکل (۴) ماه‌های همگن از لحاظ ذرات معلق کوچک‌تر از 2.5 میکرون مشخص شده‌اند. در ماتریس تنظیم شده برای این تحلیل ایستگاه‌های مورد مطالعه در ستون‌ها و ۱۲ ماه سال در ردیف‌ها قرار داده شده است. مطابق خروجی ترسیم شده، ماه‌های شهریور، آبان و آذر در خوشه اول جای می‌گیرند و با توجه به آماره‌های درج شده در جدول (۲) بالاترین متوسط ذرات معلق را در بین سه خوشه شناسایی شده به خود اختصاص می‌دهند. شاید بتوان دلیل این موضوع را در شدت وارونگی‌های دمایی دانست که در ابتدای شروع فصل سرد سال به‌خصوص در آبان و آذر در اثر سیطره پرفشار سیبری روی شهر مشهد اتفاق می‌افتد (حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲)؛ صادقی، مفیدی، جهانشیری و دوستان (۱۳۹۳)؛ محبی پردون، دوستان و زرین، (۱۳۹۶)، اما در خصوص شهریورماه دلیل آن متفاوت است. با توجه به انتهای فصل گرم و خشک سال بیشترین فراوانی وزش بادهای تند که همراه با گرد و غبار

نیز است، در این ماه روی می‌دهد (بروغنی، مرادی و زنگنه اسدی (۱۳۹۴)؛ محمدی مرادیان و حسین‌زاده، ۱۳۹۴) و احتمالاً دلیل هم‌گروهی با دو ماه آبان و آذر این موضوع می‌تواند باشد. در خوشه دوم ماه‌های فصل بهار به‌همراه مهرماه قرار گرفته‌اند. از لحاظ بار آلودگی هوا کمترین غلظت ذرات معلق در این خوشه ثبت شده است؛ البته بیشترین دامنه تغییرات نیز در این خوشه دیده می‌شود. فصل بهار به دلیل ناپایداری‌های جوئی و تضعیف وارونگی‌ها شرایطی را به وجود می‌آورد که مانع از انباشت غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر می‌شود. فصل بهار بیشترین روزهای همراه با بارندگی را در شهر مشهد دارد و با توجه به تأثیر مستقیم نزولات جوئی بر کاهش غلظت ذرات معلق باعث شده است که این خوشه کمترین غلظت ذرات معلق را داشته باشد. ماه‌های تیر و مرداد از فصل تابستان و ماه‌های دی، بهمن و اسفند از فصل زمستان در خوشه سوم جای می‌گیرند. غلظت ذرات معلق در ماه‌های تیر و مرداد را باید تحت تأثیر وزش تندباد و گرد و غبارهای ناشی از فصل گرم سال دانست که غالباً منشأ بیرونی (بیرون از شهر) دارند، اما غلظت ذرات معلق در فصل زمستان تحت تأثیر وارونگی دما و گاهی پایداری‌های جوئی قرار می‌گیرد که در فصل سرد سال اتفاق می‌افتد و منشأ آن غالباً داخلی است که از بخش حمل‌ونقل و صنایع نشئت می‌گیرد.



شکل ۴- دارنمای ترکیب خوشه‌های ماهیانه براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از 2.5 میکرون در شهر

مشهد

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

جدول ۲- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی شده در مقیاس ماهیانه

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

گروه	تعداد ماه‌ها	میانگین	حداکثر $pm_{2.5}$	حداقل $pm_{2.5}$	انحراف معیار	واریانس
خوشه یک	۳	۳۳/۵	۴۲/۴	۲۲/۵	۶/۶	۴۲/۹
خوشه دو	۴	۳۰/۴	۴۷/۷	۱۶/۷	۷/۹	۶۲/۹
خوشه سه	۵	۳۲/۷	۴۷/۱	۱۸/۳	۹/۱	۸۲/۵

در تحلیل بعدی روزهای هفته مدنظر قرار داده شده است. بدین منظور، ماتریس داده‌ای تشکیل شد که در آن ستون‌ها روزهای هفته (۷ روز) و ردیف‌ها روزها هستند. نتایج تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد روی داده‌ها نشان داد که به‌طور کلی، روزهای هفته در دو گروه اصلی جای می‌گیرند که در یک طبقه‌بندی کلی، جمعه به‌تنهایی در یک خوشه و سایر روزهای هفته در گروه دیگر قرار می‌گیرند (شکل ۵). در سطح پایین‌تر و با توجه به سطح برش دندروگرام، چهار خوشه همگن شناسایی شدند: جمعه و یکشنبه به‌ترتیب خوشه‌های اول و دوم، سه‌شنبه و پنجشنبه خوشه سوم و درنهایت، خوشه چهارم شامل شنبه، دوشنبه و چهارشنبه می‌شود.



شکل ۵- دارنمای ترکیب روزهای هفته براساس غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از $2/5$ میکرون در شهر

مشهد

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

با توجه به اینکه جمعه‌ها تعطیل است و حجم ترافیک کمتر است و علاوه بر آن، کارخانجات و صنایع نیز تعطیل است، کمترین غلظت ذرات معلق در این روز وجود دارد و به همین دلیل، در یک گروه جداگانه قرار می‌گیرد. میانگین غلظت ذرات معلق در این روز ۲۹ میکروگرم در متر مکعب است (جدول ۳). خوشه بعدی که از لحاظ کمترین میانگین غلظت ذرات در رتبه بعدی قرار دارد، روز یکشنبه است. شاید بتوان فروکش کردن تبوتاب شهروندان و بار ترافیکی بعد از روز شنبه را دلیل قرار گرفتن این روز در این خوشه دانست، اما آلوده‌ترین روزهای هفته در مشهد سه شنبه‌ها و پنجشنبه‌ها هستند که مطابق دندروگرام در خوشه سه قرار می‌گیرند. میانگین غلظت ذرات معلق در این خوشه با عدد ۳۳ میکروگرم در متر مکعب از سایر خوشه‌ها بیشتر است. در نهایت، در خوشه چهارم روزهای شنبه، دوشنبه و چهارشنبه قرار می‌گیرند.

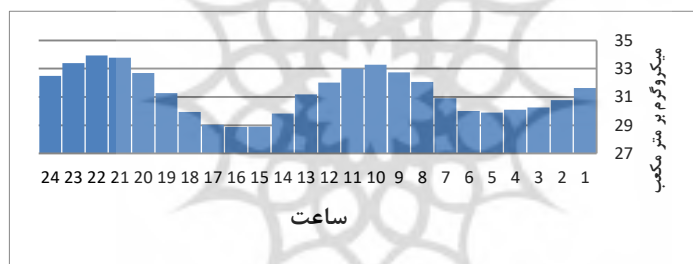
جدول ۳- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی شده در مقیاس روزهای هفته

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

گروه	روزهای هفته	تعداد روز	میانگین	حداکثر pm 2.5	حداقل pm 2.5	انحراف معیار	واریانس
خوشه اول	جمعه	۲۳۰	۲۹	۶۸	۸/۸	۱۲/۱	۱۴۷
خوشه دوم	یکشنبه	۲۳۰	۳۲	۱۸۴	۷/۷	۱۸	۳۲۵
خوشه سوم	سه‌شنبه و پنجشنبه	۲۲۹	۳۳	۷۲	۷/۱	۱۳/۷	۱۸۹
خوشه چهارم	شنبه، دوشنبه و چهارشنبه	۲۲۹	۳۲/۴	۸۳	۷/۹	۱۴/۲	۲۰۲

شاید بتوان تحلیل تغییرات ساعتی بار آلودگی هوا را یکی از مهم‌ترین اطلاعات در زمینه مدیریت و برنامه‌ریزی آلودگی هوا در شهرها دانست. بسیاری از برنامه‌ها از جمله تغییر ساعات کار ادارات، تنظیم برنامه فعالیت‌های ورزشی، ساعات خرید، فعالیت‌های عمرانی و غیره را می‌توان با توجه به بار آلودگی هوا تنظیم و برنامه‌ریزی کرد. در شکل (۶) روند

تغییرات ساعتی بار آلودگی هوا برای شهر مشهد نشان داده شده است. مطابق این نمودار، غلظت ذرات معلق در هوای شهر مشهد در ابتدای روز روندی کاهشی دارد، اما به دلیل تأثیر وارونگی دمایی بر تراکم آلاینده‌ها و همچنین، شروع جنب و جوش صبحگاهی که با افزایش ناگهانی بار ترافیک صبحگاهی همراه است، باعث افزایش بار آلودگی هوا می‌شود که در ساعت ۱۰ صبح به اوج صبحگاهی خود می‌رسد و دوباره روند کاهشی را در پیش می‌گیرد تا در ساعت ۱۶ به حداقل ممکن خود می‌رسد. به نظر می‌رسد از یک سو، کاهش بار ترافیکی و از سوی دیگر، افزایش سرعت باد در ساعات عصرگاهی باعث وقوع این موضوع می‌شود. دوباره با افزایش بار ترافیک شبانهگاهی روند افزایش بار آلودگی هوا شروع می‌شود و در ساعت ۲۲ به حداکثر ممکن خود می‌رسد؛ بنابراین، حداقل و حداکثر بار آلودگی هوای مشهد در طی دوره آماری بررسی شده، به ترتیب در ساعت ۱۶ و ساعت ۲۲ روی می‌دهد.



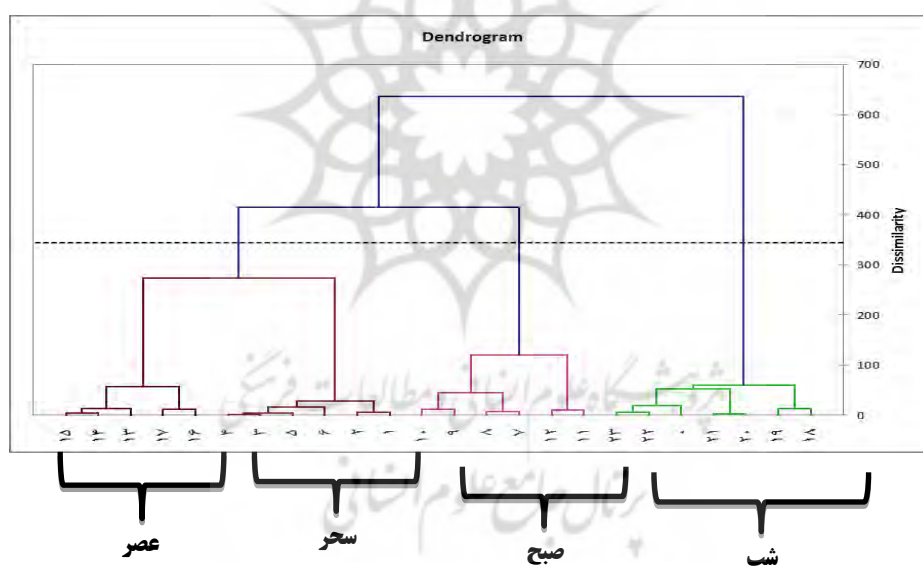
شکل ۶- روند تغییرات ساعتی ذرات معلق کوچک‌تر از 2.5 میکرون شهر مشهد در دوره آماری ۱۳۹۰ تا

۱۳۹۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

در ماتریس تشکیل یافته از داده‌های دوره آماری پنج‌ساله مورد بررسی که به شکل S آرایش یافته است، ایستگاه‌ها در ستون‌ها و ساعات در ردیف‌ها قرار داده شدند. نتایج حاصل از خوشه‌بندی در شکل (۷) نشان داده شده است. براساس این دندروگرام سه خوشه مجزا را می‌توان تفکیک کرد: در خوشه اول که خود به دو خوشه مجزا تقسیم شده است، دو بازه زمانی سحر و عصر تفکیک‌شدنی است؛ به عبارتی، در زیرمجموعه این خوشه می‌توان از ساعت ۱ تا ۶ صبح را در یک گروه قرار داد و از ساعت ۱۳ تا ۱۷ بعدازظهر را در یک خوشه

قرار داد. مطابق جدول (۴)، میانگین غلظت ذرات معلق در خوشه صبح ۳ میکروگرم در متر مکعب و در عصر ۲۹ است که کمترین مقدار در بین خوشه‌های شناسایی شده است؛ بنابراین، بهترین کیفیت هوای شهر مشهد در این خوشه اتفاق می‌افتد و در مجموع، کیفیت هوا در خوشه عصر و سحر دارای کمترین بار آلودگی هوا است؛ خوشه بعدی که با همان خوشه اول به هم می‌پیوندند، ۶ ساعت از ساعات میانی روز را در بر گرفته است. مطابق شکل ترسیم شده، این خوشه از ساعت ۷ صبح تا ۱۲ را در بر می‌گیرد. متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۲/۴ است که در رتبه دوم در بین خوشه‌های شناسایی شده است؛ اما خوشه چهارم شناسایی شده که با ۳۲/۷ میکروگرم در متر مکعب بیشترین غلظت ذرات معلق را داراست و با ۷ ساعت طولانی‌ترین خوشه از لحاظ زمانی نیز است، از ساعت ۱۶ شروع می‌شود و تا ساعت ۲۴ بامداد طول می‌کشد.



شکل ۷- دارنمای ترکیب خوشه‌ها در مقیاس ساعتی براساس غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

جدول ۴- مقادیر متوسط آماره‌های توصیفی برای هریک از خوشه‌های شناسایی شده در مقیاس ساعتی

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

گروه	خوشه	میانگین	حداکثر غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون	حداقل غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون	انحراف معیار	واریانس
خوشه اول	عصر	۲۹	۴۳	۱۹/۴	۷/۴	۵۵
خوشه دوم	سحر	۳۰	۴۳	۱۹/۵	۸	۶۴/۷
خوشه سوم	صبح	۳۲/۴	۴۷	۲۰/۵	۸/۸	۷۷/۴
خوشه چهارم	شب	۳۲/۷	۴۸/۵	۲۲/۹	۸	۶۴/۷

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ذرات معلق کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی در مقیاس روزهای سال، ماهانه، روزهای هفته و ساعات شبانه‌روز تجزیه و تحلیل شدند. نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد نشان داد که ۳۶۵ روز سال را می‌توان به سه خوشه مجزا تفکیک کرد: خوشه اول با ۲۱۵ روز فراوانی و ۲۸/۱ میکروگرم در متر مکعب دارای کمترین بار آلودگی هواست و روزهای پاک مشهد در این خوشه جای می‌گیرند. مطابق شکل (۳) توزیع این خوشه در کل سال است، اما خوشه دوم شامل ۱۱۴ روز از سال می‌شود. رخداد خوشه دوم در کل سال دیده می‌شود، اما تمرکز آن در اواسط سال بیشتر است. متوسط غلظت ذرات معلق این خوشه ۳۴/۸ است که در رتبه دوم قرار دارد؛ خوشه سوم با ۳۴ روز در سال دارای کمترین فراوانی و بیشترین غلظت ذرات معلق است. مطابق آماره‌های مندرج در جدول (۱)، غلظت ذرات معلق در این خوشه ۴۴/۳ است که بیشترین غلظت در بین خوشه‌هاست. رخداد آن در اواخر شهریور ماه و نیمه دوم سال به‌خصوص در ماه‌های آذر و دی است.

نتایج تحلیل خوشه‌ای ماه‌های سال نشان داد که ۱۲ ماه سال را می‌توان در سه خوشه جای داد: ماه‌های آذر، آبان و شهریور در یک خوشه با میانگین ۳۳/۵ میکروگرم در متر مکعب

بیشترین غلظت را دارند؛ خوشه دوم که کمترین بار آلودگی هوا را دارد، چهار ماه از سال را در بر می‌گیرد و به ترتیب ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و مهر در این خوشه جای می‌گیرند و خوشه سوم شامل پنج ماه از سال می‌شود و متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۳/۷ میکروگرم در متر مکعب است.

در تحلیل بعدی روزهای هفته ارزیابی شده است. برخی از سیاست‌ها و برنامه‌ کاهش و کنترل آلودگی هوا در مقیاس روزهای هفته مطرح می‌شود؛ از جمله تعطیلی پنج‌شنبه‌ها یا سه‌شنبه‌های بدون خودرو؛ از این رو، دسترسی به چنین اطلاعاتی دست‌اندرکاران و تصمیم‌گیران را یاری خواهد کرد. روزهای هفته را می‌توان در چهار دسته خوشه‌بندی کرد. روز جمعه به‌تنهایی در یک خوشه مجزا از دیگر روزهای هفته قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد تعطیلی ادارات، مدارس و صنایع و به تبع آن، کاهش حمل‌ونقل باعث کاهش بار آلودگی هوا در این روز شده است. خوشه بعدی شامل یکشنبه‌هاست که با میانگین غلظت ذرات ۳۲ میکروگرم در متر مکعب به‌تنهایی بعد از جمعه‌ها قرار دارد.

اما بیشترین بار آلودگی هوای شهر مشهد در خوشه سوم اتفاق می‌افتد؛ جایی که روزهای سه‌شنبه و پنج‌شنبه قرار دارند. متوسط غلظت ذرات معلق در این خوشه ۳۳ میکروگرم در متر مکعب است. و درنهایت، خوشه چهارم که روزهای شنبه، دوشنبه و چهارشنبه را در بر می‌گیرد.

از نتایج دیگر این تحقیق، تفکیک ساعات شبانه‌روز از لحاظ بار آلودگی هوا به چهار دسته است که با توجه به ساعات رخداد، هر خوشه به نام‌های خوشه سحر، صبح، عصر و شب نام‌گذاری شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، کمترین بار آلودگی هوا در شهر مشهد در خوشه عصر است. این خوشه از ساعت ۱۳ تا ۱۷ را در بر می‌گیرد که دلیل آن می‌تواند کاهش بار ترافیکی و افزایش سرعت باد در این دوره زمانی باشد، اما خوشه بعدی که زیرمجموعه همان خوشه اول محسوب می‌شود، سحر است که از ساعت ۱ تا ۶ بامداد را در بر می‌گیرد و از لحاظ بار آلودگی هوا بعد از خوشه عصر دارای کمترین غلظت ذرات معلق است. خوشه سوم شامل ساعت ۷ تا ۱۲ می‌شود، اما از ساعت ۱۸ تا ۲۴ بامداد که خوشه چهارم به نام شب نام‌گذاری شده است، دارای طولانی‌ترین ساعات و بیشترین بار آلودگی هواست. مطابق شکل

(۵)، بیشترین بار آلودگی هوای مشهد در ساعت ۲۱ تا ۲۲ در دوره مطالعه شده اتفاق افتاده است.

کتابنامه

۱. ادب، ح. (۱۳۹۴). مکان‌یابی و اولویت‌بندی محل استقرار ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مشهد. سبزوار: طرح پژوهشی دانشگاه علامه حکیم سبزواری.
۲. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۲). کاربرد تحلیل خوشه‌ای در گروه‌بندی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا (مطالعه موردی شهر مشهد). ارائه شده در دومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، ۴ تا ۵ دی ماه، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.
۳. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۷). نواحی همگن آلودگی هوای مشهد. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۷(۱۶)، ۲۲۷-۲۴۰.
۴. بروغنی، م.، مرادی، ح. ر.، و زنگنه اسدی، م. ع. (۱۳۹۴). تحلیل وقوع گرد و غبار و پهنه‌بندی آن در استان خراسان رضوی. *فصلنامه علمی-پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۵(۴)، ۴۵-۵۷.
۵. حاتمی، خ.، بیگلر، ب.، نارنگی فرد، م.، و امیدوار، ک. (۱۳۹۳). شناسایی الگوهای هم‌دید روزهای آلوده به ذرات معلق به روش واکاوی خوشه‌ای شهر شیراز. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۳(۴)، ۸۱-۹۴.
۶. حجازی، ع.، مباحثی، م.، و احمدیان مرج، ا. (۱۳۹۱). تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر در هوای شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، ۲۶، ۱۶۱-۱۷۸.
۷. حسین‌زاده، ر.، دوستان، ر.، حقیقت ضیا بری، م.، و حقیقت ضیا بری، م. (۱۳۹۲). بررسی الگوهای هم‌دید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد. *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۲۱، ۸۱-۱۰۱.
۸. صادقی، س.، مفیدی، ع.، جهانشیری، م.، و دوستان، ر. (۱۳۹۳). نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳(۱۰)، ۳۵-۱.
۹. محبی پردون، ف.، دوستان، ر.، و زرین، آ. (۱۳۹۶). تأثیر پرفشار سبیری بر بارش‌های شرق ایران در ماه نوامبر. مقاله ارائه شده در اولین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار در کشاورزی، محیط زیست، گردشگری و منابع طبیعی شیراز، ۷ دی، شیراز.

۱۰. محمدی مرادیان، ج.، و حسین زاده، س. ر. (۱۳۹۴). پایش ماهواره‌ای و تحلیل هم‌دید پدیده گرد و غبار در کلان‌شهر مشهد طی دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۰۹. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۴، ۳۵-۵۷.
۱۱. محوی، ا.، نبی‌زاده، ر.، حسنونند، م.، تقی‌پور، ح.، فریدی، س.، و غلامپور، ا. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات ذرات معلق هوای آزاد شهر تبریز طی سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۲ و ارزیابی اثرات بهداشتی متناسب به آن‌ها. مقاله ارائه‌شده در سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، ۲۴ تا ۲۵ دی، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.
۱۲. مسعودیان، ا. (۱۳۸۴). شناسایی رژیم‌های بارش ایران به روش تحلیل خوشه‌ای. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۵۲، ۴۷-۵۹.
۱۳. منتظری، م. (۱۳۹۰). شناسایی فصول دمایی ایران به روش تحلیل خوشه‌ای. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۶(۲)، ۱۷۳-۱۹۸.
۱۴. مؤمنی، م. (۱۳۹۰). *خوشه‌بندی داده‌ها (تحلیل خوشه‌ای)*. تهران: انتشارات مؤلف.
۱۵. میری، م.، قانعیان، م.، قلیزاده، ع.، یزدانی اول، م.، و نیکونهاد، ع. (۱۳۹۴). تحلیل و پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر مشهد با استفاده از مدل‌های مختلف تحلیل فضایی. *مجله مهندسی بهداشت محیط*، ۲، ۱۴۳-۱۵۴.
۱۶. یونسین، م.، پرمی، س.، رفیعی تبریزی، ع.، ندافی، ک.، ارحامی، م.، و حسنونند، م. (۱۳۹۳). بررسی غلظت ذرات معلق (pm_{10} , $pm_{2.5}$, pm_1) هوای آزاد و داخل در زمان وقوع پدیده ریزگردها در شهر تهران. مقاله ارائه‌شده در سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، ۲۴ تا ۲۵ دی، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، تهران.
17. Boubel, R. W., Vallerio, D., Fox, D. L., Turner, B., & Stern, A. C. (2013). *Fundamentals of air pollution*. Berlin, Germany: Elsevier.
18. Iizuka, A., Shirato, S., Mizukoshi, A., Noguchi, M., Yamasaki, A., & Yanagisawa, Y. (2014). A cluster analysis of constant ambient air monitoring data from the Kanto Region of Japan. *International journal of environmental research and public health*, 11(7), 6844-6855.
19. Koelemeijer, R. B. A., Homan, C. D., & Matthijsen, J. (2006). Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40(27), 5304-5315.
20. Núñez-Alonso, D., Pérez-Arribas, L. V., Manzoor, S., & Cáceres, J. O. (2019). Statistical tools for air pollution assessment: multivariate and spatial analysis

- studies in the Madrid region. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 6, 1-9.
21. Ojeda-Magaña, B., Cortina-Januchs, M. G., Barrón-Adame, J. M., Quintanilla-Domínguez J., Hernandez, W., Vega-Corona A., Ruelas, R., & Andina, D. (2010). Air pollution analysis with a PFCM clustering algorithm applied in a real database of Salamanca (Mexico). *International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1297– 1302). Vina del Mar, Santiago, Chile.
22. Prapassornpitaya, S., Jinsart, W., & Sanguansintukul, S. (2011). *Mapping of urban air quality by clustering analysis and geographic information system*. Retrieved from <https://www.casanz.org.au/>
23. Pu, H., Luo, K., Wang, P., Wang, S., & Kang, S. (2017). Spatial variation of air quality index and urban driving factors linkages: Evidence from Chinese cities. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4457-4468.
24. Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M. M., Castillo, S., Pey, J., ..., & Sanchez A. (2008). Spatial and tempo-ral variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999–2005. *Atmospheric Environment*, 42(17), 3964–3979.
25. Saithan, K., & Mekpariyup, J. (2012) Clustering of air quality and meteorological variables associated with high ground ozone concentration in the industrial areas, at the East of Thailand. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 81(3), 505-515
26. Saksena, S., Joshi, V., & Patil, R.S. (2002). Determining spatial patterns in Dehli ambient air quality data using cluster analysis. *Environmental Change, Vulnerability and Governance Series*, 53, 1-31.
27. World Health Organization (WHO). (2014). *Air quality and health*. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>