

## شناسایی نقاط داغ غلظت ذرات معلق ( $PM_{2.5}$ ) هوای مشهد

رضا اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، فرخ لقا امینی<sup>۲</sup>

۱- دکتری اقلیم‌شناسی، مدیر اجرایی مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد، معاونت خدمات شهری شهرداری مشهد

۲- کارشناس مسئول بخش هوا، اداره کل محیط زیست خراسان رضوی

### چکیده

امروزه آلودگی هوا به بزرگترین معضل زیست محیطی در کلانشهرها تبدیل شده است. بر اساس برآورد سازمان بهداشت جهانی (WHO) از هر ۱۰ نفر ۹ نفر هوای ناسالم تنفس می‌کنند. بر اساس این گزارش سالانه بالغ بر ۷ میلیون نفر قربانی آلودگی هوا می‌گردند که هزینه این مرگ و میر ۲۲۵ میلیارد دلار برآورد شده است. در این تحقیق الگوی پراکنش  $pm_{2.5}$  به عنوان آلاینده اصلی کلانشهر مشهد با استفاده از تحلیل خود همبستگی فضایی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برای یک دوره ۵ ساله ۶۰ نقشه ماهانه پراکنش  $pm_{2.5}$  ترسیم گردید سپس نقشه‌های فصلی و سالانه از ترکیب نقشه‌ها ماهانه بدست آورده شد. با استفاده از آماره محلی موران (LMI) و شاخص گتیس ارد جی (Getis-Ord-Gi) نقاط داغ غلظت ذرات معلق شهر مشهد شناسایی شد. بر اساس یافته‌های تحقیق نقاط داغ (Hot Spot) با ۲۲,۳ درصد از مساحت کل شهر در شرق و جنوب شرق و نقاط سرد (Cold Spot) با ۲۵,۵ درصد در شمال غرب مشهد شکل گرفته‌اند. یک چنین الگویی در مقیاس فصلی نیز وجود دارد. نتایج محاسبات انجام شده بین دو لکه متمایز داغ و سرد نشان داد، تعداد روزهای ناسالم در نقاط داغ چهار برابر نقاط سرد است. این نسبت در غلظت  $NO_2$  حدوداً چهار برابر،  $SO_2$  سه برابر و  $PM_{2.5}$  و  $CO$  دو برابر بیشتر است. همچنین ۲۱ درصد جمعیت بیشتر، ۳۰ درصد مساحت و تعداد کاربری‌های صنعتی و خدماتی بیشتر در نقاط داغ نسبت به نقاط سرد بیشتر است. از طرفی برخورداری کمتر از (۷۰ درصد کمتر) پارک‌ها و فضاهای سبز (۶۲ درصد کمتر) و همچنین ارتفاع ۱۱۴ متری کمتر بین دو منطقه را می‌توان در تراکم بالای  $PM_{2.5}$  و شکل‌گیری نقاط داغ در شرق و جنوب شرق مشهد موثر دانست.

**کلید واژه‌ها:** آلودگی هوا، مشهد، خود همبستگی فضایی، ذرات معلق کوچکتر از ۲,۵ میکرون، نقاط داغ.

## مقدمه

آلودگی هوا یک پدیده چند وجهی است که با رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، گسترش شهرها، پیشرفت صنعت و افزایش حمل و نقل موتوری در اکثر نقاط جهان به ویژه کلانشهرهای کشورهای در حال توسعه به یک معضل بزرگ زیست محیطی تبدیل شده است. در بین آلاینده‌های هوا PM<sub>2.5</sub> جزء خطرناکترین آلاینده‌ها است. نتایج تحقیقات متعدد در این خصوص حاکی از آنست که PM<sub>2.5</sub> می‌تواند به بافت ریه انسان آسیب وارد کرده و خطر بیماری‌های مزمن تنفسی و قلبی-عروقی را تشدید نماید به نحوی که به ازای افزایش هر ۱۰ میکروگرم بر متر مکعب، تعداد مراجعات بخش قلبی-عروقی و تنفسی به میزان ۱/۲۹ درصد افزایش می‌یابد. تحقیقات آژانس بین‌المللی سرطان، PM<sub>2.5</sub> را به عنوان یک ترکیب سرطان‌زا معرفی نموده است (Wang and etal, 2019; Vinikoor-Imler and etal, 2011).

براساس برآورد سازمان بهداشت جهانی (WHO) سالانه ۵ میلیون نفر بر اثر مواجهه با ذرات معلق موجود در هوا دچار مرگ زودرس می‌شوند. براساس این گزارش، آلودگی هوا پس از سیگار، رژیم غذایی و چاقی چهارمین علت مرگ و میر زودرس در جهان است (WHO, 2016).

علاوه بر این PM<sub>2.5</sub> می‌تواند مدت طولانی در جو باقی بماند، مسافت طولانی را طی کند، دید جوی را کاهش دهد و اثرات منفی بر حمل و نقل، تاخیر در پروازها و یا حتی لغو آنها، بسته شدن بزرگراه‌ها و حتی در غلظت‌های شدید تعطیلی مدارس و سازمان‌های دولتی، آسیب جدی به سلامت عمومی و اقتصادی جوامع را منجر شود. (Wang and etal, 2019; Lin and etal, 2014; and etal, 2019). همکاران، (۲۰۱۷). انتشار و پراکنش غلظت PM<sub>2.5</sub> در محیط‌های شهری به عوامل اقلیمی و هواشناسی نظیر دما، بارش، سرعت باد، فشار اتمسفر، رطوبت و جریانات جوی و عوامل اجتماعی و اقتصادی از جمله ساختارهای زندگی شهر نشینی و جمعیتی، رشد اقتصادی و ساختارهای صنعتی، کاربری اراضی، مقدار و کیفیت مصرف سوخت فسیلی و

شرایط ترافیکی بستگی دارد (Lin and etal, 2014; Chel Jung and etal, 2019).

ظهور و توسعه فناوری‌ها و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید باعث توسعه مرز دانش و یافته‌های پژوهشگران در زمینه مطالعات آلودگی هوا شده است. در همین ارتباط بکارگیری روش‌های آماری و تحلیل فضایی جهت شناخت الگوهای زمانی و مکانی آلاینده‌ها کاربرد وسیعی پیدا کرده است. تحلیل فضایی داده‌ها می‌کوشد دانش نهفته در پراکنندگی داده‌های جغرافیایی یعنی قوانین، نظام و الگوهای فضایی را کشف کند به عبارت دیگر تحلیل فضایی مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری را معرفی می‌کند که برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی به کار می‌رود و به عبارتی ساده تر تحلیل فضایی با استفاده از مهارت‌ها و روش‌های گوناگون می‌کوشد الگوهای فضایی پراکنندگی‌ها را شرح دهد و استدلال کند. مهمترین ویژگی تحلیل فضایی تاکید بر بعد فضایی داده‌هاست (علیچانی، ۱۳۹۴).

در همین ارتباط خود همبستگی فضایی شاخص کیفیت هوا برای ۲۸۹ شهر در کشور چین با استفاده از شاخص موران جهانی و محلی، رگرسیون جغرافیایی وزن دار و ... مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد وابستگی مکانی و ناهمگونی قابل ملاحظه در مقادیر AQI وجود دارد. علاوه بر این مدل‌های رگرسونی حاکی از نقش مهم شهر نشینی، جمعیت، تراکم خودرو و صنایع بر کیفیت هوا بوده است (Fang and etal, 2015).

در تحقیقی دیگر توزیع زمانی-مکانی آلاینده PM<sub>2.5</sub> در ۲۴۱ سایت نمونه برداری از شهر بوهای ریم (بروآ) چین پرداخته شد، نتایج نشان داد این شهر در سال ۲۰۱۴ به عنوان منطقه اصلی آلوده به PM<sub>2.5</sub> با میانگین غلظت ۷۴  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (۱۳  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  فراتراز میانگین کشور چین به این آلاینده یعنی ۶۱  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) بوده است. همچنین غلظت PM<sub>2.5</sub> در فصول زمستان و پاییز بالاترین مقدار و در فصول بهار و تابستان پایین ترین مقدار بوده است. علاوه بر این مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) نشان داد که سرانه تولید ناخالص داخلی، نرخ شهر نشینی و ساخت و ساز شهری ارتباط

SSH نشان داد، طول جاده‌ها و معابر در مجاورت مناطق آلوده سهم زیادی در آلودگی هوای آن مناطق بخصوص در مورد آلاینده ازن دارد (Tian and Chen, 2019).

شروع تحقیقات علمی در زمینه آلودگی هوا در ایران را شاید بتوان به اوایل دهه ۱۳۵۰ هـ. ش نسبت داد. ابتکار (۱۳۵۳) وسایل نقلیه موتوری را مهمترین منبع آلودگی هوا در شهر تهران معرفی کرد. وی در سال ۱۳۵۴ در تحقیقی مرتبط تشدید خطر آلودگی هوا در شهرها بخصوص تهران را یادآور شد (ابتکار، ۱۳۵۴). در همین ارتباط و در تحقیقات اخیر، مدلسازی مکانی - زمانی آلاینده‌های هوا با بهره‌گیری از روش‌های آماری و GIS. بسیار مورد توجه و اقبال پژوهشگران قرار گرفته است، بهاری و همکاران (۱۳۹۴) با بکارگیری رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) پراکنش غلظت آلاینده  $PM_{2.5}$  و ارتباط آن با عواملی همچون کاربری‌های جمعیتی، پارامترهای هواشناسی، فاصله از معابر اصلی و آزاد راه‌ها و ارتفاع در شهر تهران را بررسی کردند و در نهایت نقشه‌هایی از وضعیت آلاینده  $PM_{2.5}$  در شهر تهران به منظور شناخت مناطق پر ریسک و پیش‌بینی و بکارگیری اقدامات موثر جهت کاهش آلودگی در آن نقاط تهیه نمودند (بهاری و همکاران، ۱۳۹۴).

با استفاده از شاخص‌های همبستگی مکانی موران و گتیس - اورد الگوی توزیع مکانی، غلظت  $CO$  و  $PM_{2.5}$  تهران مورد شناسایی قرار گرفت و مشخص گردید نقاط داغ آلاینده  $PM_{2.5}$  در بخش‌های جنوبی و لکه‌های سرد آن در نیمه شمالی تهران واقع شده است. این در حالی است که لکه‌های داغ  $CO$  بخش‌های از شمال شرق با جنوب غرب تهران را در بر می‌گیرد (حبیبی و همکاران، ۲۰۱۷).

با این حال بررسی پیشینه تحقیقات صورت گرفته شده حاکی از آنست، بدلیل اهمیت موضوع و همچنین ابعاد مختلف آلودگی هوا (منابع انتشار، اثرات، روش‌های تحلیل، روش‌های کاهش و کنترل، مدل‌سازی و پیش‌بینی، هواشناسی آلودگی هوا و ...) فراوانی پژوهش‌های موضوعی و موردی در این زمینه بسیار زیاد است. از این رو با تاکید بر شهر مورد مطالعه و با در نظر گرفتن مقوله توزیع فضایی آلودگی هوا و تحلیل‌های مرتبط مروری اجمالی در این خصوص صورت می‌گیرد. تحقیقی در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد توزیع زمانی و مکانی شاخص آلاینده هوای مشهد و عوامل

نزدیکی با غلظت  $PM_{2.5}$  در برداشته است (Wang and Fang, 2016).

پو و همکاران (Pu and etal, 2017) توزیع فضایی و محلی داده‌های شاخص کیفیت هوا (AQI) ثبت شده در ۱۶۱ شهر مهم چین را با استفاده از شاخص موران مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند و تاثیر گذارترین پارامترهای شهری موثر بر این شاخص کیفیت هوا را مشخص کردند. در تحقیقی که در کشور کره صورت گرفت نقش ساختارها و فضاهاى زندگى شهرى در آلودگى هوا بررسى گردید و براساس نتایج به دست آمده از میان ۱۸۰ کشور مورد بررسی در سال ۲۰۱۸، کشور کره در رتبه ۱۱۹ به لحاظ کیفیت هوا (از نظر  $PM_{2.5}$ ) قرار گرفت با این وجود در مناطق مختلف به دلیل ساختارهای متفاوت صنعتی و تراکم جمعیتی تفاوت‌هایی از کیفیت هوا قابل مشاهده است (Chel Jung and etal, 2019).

در شهر مادرید اسپانیا از ابزارهای آماری تجزیه و تحلیل همبستگی، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) به منظور ارزیابی آلودگی هوا در این شهر استفاده گردید. نتایج در زمینه آلاینده‌های مورد بررسی شامل  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  و  $O_3$  در ۲۲ ایستگاه در شبکه مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، به وجود همبستگی میان این آلاینده‌ها با ساختاری‌های فضایی تاکید نمودند. اقدامات پیشنهادی و برنامه‌های تدوین شده بخصوص در حوزه ترافیک با هدف بهبود کیفیت هوا از طریق تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی و خوشه ایصورت گرفت (Nunez-Alonso and etal, 2019).

ارتباط شاخص کیفیت هوا و شش آلاینده اصلی ( $PM_{10}$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$ ) با ویژگی‌های مورفولوژیکی (شاخص مورفولوژیکی ساختمان)، متغیرهای هواشناسی (سطح زمین، دما)، کاربری اراضی (پوشش گیاهی، طول جاده و موقعیت جغرافیایی پمپ بنزین و صنایع) و جمعیت با استفاده از مدل رگرسیون مکانی- مکانی و مدل ناهمگون طبقه بندی شده فضایی (SSH) برای ۳۵ ایستگاه سنجش کیفیت هوا در پکن (سال ۲۰۱۶) صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد مدل رگرسیون مکانی- مکانی، BMI دارای همبستگی قوی با پراکنندگی  $PM_{2.5}$  و شاخص کیفیت هوا دارد. علاوه بر این تجزیه و تحلیلی

سنجش آلاینده‌های هوا، مدل اردینری کریگینگ نسبت به سایر مدل‌ها از توانایی بالاتری در پهنه بندی آلاینده‌های هوا برخوردار است.

ارزیابی بررسی کلی سوابق حاکی از آنست که اغلب تحقیقات در بازه زمانی کوتاه و بعضاً یک سال انجام شده است که نمی‌تواند بیانگر وجه غالب الگوهای توزیع مکانی و زمانی آلاینده ذرات معلق باشد و مرجعی در تصمیم‌گیری و تدوین برنامه‌ها شهری کنترل یا کاهش آلودگی هوا در سطح شهر باشد. استفاده از دوره آماری ۵ ساله، بکارگیری حداکثر نقاط ایستگاهی جهت تهیه نقشه پراکنش ذرات معلق، استفاده از تکنیک تحلیل زمانی و فضایی و در نهایت تشریح نتایج بدست آمده با استفاده از احصاء و مقایسه تطبیقی اطلاعات توزیع جغرافیایی عوامل موثر در انتشار PM<sub>2.5</sub> سطح شهر مشهد را می‌توان از مزیت‌های این تحقیق دانست.

### مواد و روش‌ها

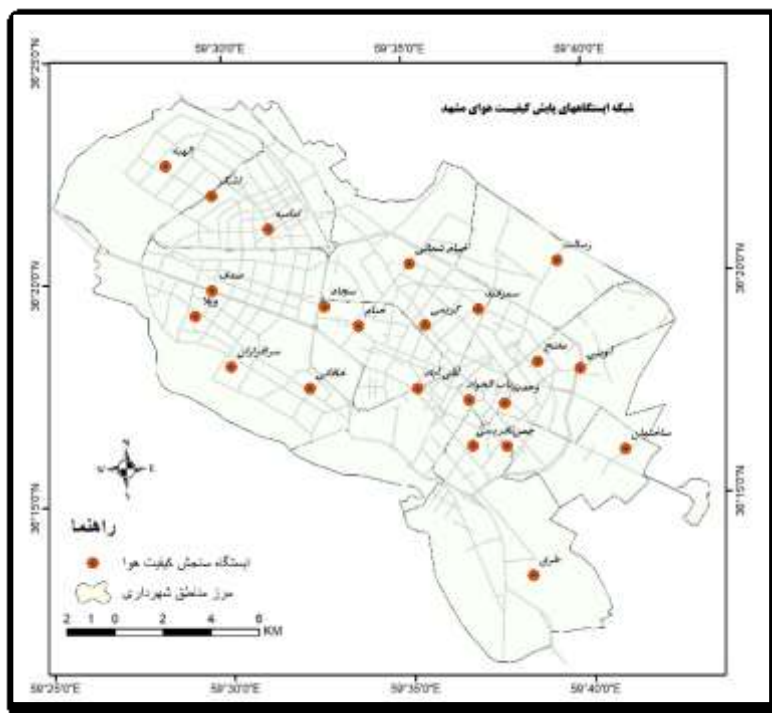
شهر مشهد در شمال شرق ایران با جمعیتی بالغ بر ۳۰۵۷۶۷۹ میلیون نفر و مساحت ۳۵۱۸۷ هکتار (سالنامه آماری شهرداری مشهد، ۱۳۹۵) دومین کلانشهر کشور محسوب می‌گردد. از نظر موقعیت جغرافیایی در ۱۶° و ۳۶° درجه عرض شمالی و ۳۷° و ۵۹° درجه طول شرقی و ارتفاع متوسط ۹۷۰ متر از سطح دریا واقع شده است. به دلیل موقعیت نسبی و شرایط توپوگرافی الگوهای وزش باد که نقش اصلی در تخلیه آلاینده‌های هوا را بر عهده دارد دارای محدودیت‌هایی است. علاوه بر آن وجود بارگاه ملکوتی امام علی بن موسی الرضا (ع) و آثار تاریخی و فرهنگی فراوان باعث شده است تا هر ساله مقصد سفر ۲۰ الی ۳۰ میلیون نفر زائر و گردشگر قرار گیرد. عوامل ذکر شده به همراه تراکم بالای جمعیتی، توسعه فیزیکی سریع شهر، حاشیه نشینی گسترده، آلودگی هوا را به یکی از معضلات اصلی زیست محیطی در این شهر تبدیل کرده است (اسماعیلی، ۱۳۹۷؛ حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۲).

شهر مشهد دارای ۲۳ ایستگاه سنجش کیفیت هوا است که ۱۲ ایستگاه (صدف، تقی آباد، طرق، ماشین ابزار، ویلا، پارک وحدت، شهرک لشگر، رسالت، شهرک شهید رجایی (ساختمان)، نخریسی، سجاده، خیام) متعلق به اداره کل

موثر بر آن مورد بررسی قرار داد (تقوی ۱۳۹۱). اسماعیلی (۱۳۹۲) با استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مشهد را گروه‌بندی نمود. در همین ارتباط غلظت و منبع انتشار فلزات سمی در هوای نواحی شهری مشهد مورد بررسی قرار گرفت نتایج این تحقیق نشان داد میانگین غلظت فلز سرب در هوای شهر مشهد  $98.2 \pm 32$ ، کروم  $4.3 \pm 0.6$ ، روی و کادمیم به ترتیب  $1.4 \pm 0.8$  و  $1.5 \pm 0.3$  نانو گرم بر متر مکعب بود، که غلظت سرب ۱۳، کروم ۵ و روی و کادمیم حدود ۲ برابر بیشتر از غلظت آنها در منطقه طبقه با حجم ترافیکی بسیار پایین بود. با این وجود این تحقیق نشان داد هوای مشهد در مقایسه با شهرهای مختلف جهان از آلودگی کمتری به فلزات برخوردار می‌باشد (پورخباز، ۱۳۹۳). میری و همکاران (۱۳۹۵) روش‌های مختلف میانمایی را جهت ترسیم نقشه آلودگی هوای مشهد بررسی کردند و با استفاده از روش منتخب، نقشه ذرات معلق سال ۱۳۹۵ مشهد را ترسیم نمودند. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده آلاینده اصلی شهر مشهد در سال ۱۳۹۴، PM<sub>2.5</sub> بوده است. در تحقیقی دیگر کیفیت هوای مشهد در سال ۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفت مطابق نتایج این تحقیق شهر مشهد در ول سال ۱۲/۸ درصد هوای پاک، ۷۴ درصد هوای سالم و ۱۲/۶ درصد هوای ناسالم برای گروه‌های حساس برخوردار است (جولایی و همکاران، ۱۳۹۶). از محدود تحقیقات که در آن توامان از روش‌های آماری و GIS جهت پهنه بندی شهر مشهد صورت گرفته است می‌توان به کار اسماعیلی (۱۳۹۷) اشاره نمود در این تحقیق نواحی همگن آلودگی هوای مشهد از لحاظ بار ذرات معلق در یک دوره دو ساله با استفاده از GIS و روش تحلیل خوشه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق ۳ منطقه همگن و مجزا را برای مشهد مشخص کرد. منطقه کم غلظت در شمال غرب، منطقه آلوده با غلظت بالای ذرات معلق در شرق و جنوب شرق و منطقه حائل که بار آلودگی متوسط دارد. چرم زن و همکاران (۱۳۹۷) بهترین الگوریتم درون یابی در توزیع مکانی آلاینده‌های هوای مشهد را بررسی کردند و نتیجه گرفتند از میان مدل‌های متعدد مورد بررسی به منظور کنترل کیفی زمان حال و آتی هوا و ارزیابی و تصمیم‌گیری آگاهانه درخصوص غلظت آلاینده‌ها در شعاع‌های دور از محل ایستگاه‌های

خراسان رضوی است. شبکه موجود تحت نظارت و مدیریت یکپارچه توسط مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد فرایند پایش، تجمع، پردازش و اطلاع‌رسانی را به صورت متمرکز صورت می‌دهد. در شکل ۱ شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد نشان داده شده است.

حفاظت محیط زیست خراسان رضوی و ۱۰ ایستگاه (شهید آوینی، خیام شمالی، چمن، مفتح، سمزقند، سرفرازان، خاقانی، امامیه، شهید کریمی، الهیه) متعلق به معاونت خدمات شهری شهرداری مشهد می‌باشد و ایستگاه واقع در حرم مطهر امام رضا (ع) نیز متعلق به اداره کل هواشناسی



شکل ۱- شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد

درون یابی، و به روش فاصله وزنی معکوس (IDW) مقادیر عددی ایستگاه‌ها بر روی توری با یاخته‌های ۵۰۰ در ۵۰۰ متر گسترانیده و تعمیم داده شد (بدلیل برخورداری از کمترین میزان انحراف معیار در این ابعاد از یاخته‌ها). براین اساس در سطح شهر مشهد ۱۲۴۷ یاخته دارای مقادیر عددی ایجاد گردید که مبنای محاسبات آماری و فضایی قرار گرفت. بنابراین ۶۰ نقشه در مقیاس ماهانه (دوره آماری ۵ ساله) ترسیم گردید که با ترکیب به مقیاس فصلی و سالانه تبدیل شد. در مرحله بعد با استفاده از قابلیت‌های ابزار تجزیه و تحلیل مکانی به تحلیل فضایی پراکنش  $PM_{2.5}$  توسط تحلیل خود همبستگی فضایی محلی یا آماره موران محلی (LMI) و تحلیل نقاط داغ توسط آماره گنیس ارد جی پرداخته شد. در ادامه خصوصیات هر یک از نقاط داغ و سرد، از دیدگاه عوامل موثر بر انتشار  $PM_{2.5}$  مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا بانکی از لایه‌های اطلاعات جغرافیایی از

در تحقیق حاضر سعی شده است از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در شناخت الگوهای توزیع فضایی و زمانی آلاینده اصلی هوای مشهد استفاده گردد. بدین منظور تابع‌های زمین آماری، تجزیه و تحلیل مکانی، پردازش‌های جغرافیایی و ابزارهای زیر مجموعه هر یک به کار گرفته شده است. ذرات معلق کوچکتر از ۲٫۵ میکرون ( $PM_{2.5}$ ) به عنوان آلاینده اصلی و مهم شهر مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا داده‌های غلظت روزانه آلاینده مد نظر برای ایستگاه‌های فعال در دوره آماری ۵ ساله (از ۱۳۹۳/۱/۱ الی ۱۳۹۷/۱۲/۲۹) از مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی مشهد تهیه گردید. در گام نخست داده‌های پرت شناسایی و صحت و صقم داده‌ها تایید شد. سپس غلظت  $PM_{2.5}$  برای هر ایستگاه در مقیاس روزانه و ماهانه محاسبه گردید. جهت ترسیم نقشه‌ها، داده‌ها به محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) منتقل گردید و با استفاده از تابع

هرچه پدیده‌ها به یکدیگر نزدیکتر باشند، میزان همبستگی بین آن‌ها قوی‌تر می‌باشد. این روش دارای دو دیدگاه جهانی و محلی است (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ Chu and etal, 2015; Peeters and etal, 2015). که در ادامه بدلیل بکارگیری خود همبستگی فضایی محلی این روش تشریح شده است.

ب: تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی (آماره موران محلی) شاخص موران جهانی، جهت اندازه‌گیری همبستگی فضایی متغیرها استفاده می‌شود. در حالی که شاخص موران محلی برای کشف توزیع فضایی نقاط داغ و سرد و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های مجاورشان استفاده می‌شود (Wang and Fang, 2016؛ نادیان و همکاران ۱۳۹۷). این آماره در سال ۱۹۹۵ توسط انلسین با هدف تشخیص مکان‌های محلی و پیشنهاد مکان‌های انفرادی موثر در پیوندهای فضایی ابداع شد (Yamada and Thill, 2007؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۷). آماره مد نظر از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$I_i = n(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1, \neq i}^n W_{ij}(X_j - \bar{X}) \quad (1)$$

N تعداد کل متغیرها،  $X_i$  و  $X_j$  مقادیر PM2.5 در مکان‌های i و j و  $W_{ij}$  مقدار وزن فضایی عارضه‌های i و j را نشان می‌دهد. مقدار ضریب خود همبستگی فضایی محلی باید بزرگتر از ضریب مورد انتظار باشد تا الگوی پراکنش فضایی مورد قبول گردد. ضریب مورد انتظار موران توسط رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$E(I_t) = -W / (N-1) \quad (2)$$

آزمون اهمیت موران توسط نمره Z اندازه‌گیری می‌شود تا از آن برای آزمون معنی داری آماری نتایج استفاده شود. نمره Z به عنوان مقدار استاندارد شده I در نظر گرفته می‌شود که توسط رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$Z_t = \frac{I - E(I)}{SD(I)} \quad (3)$$

SD (I) و E (I) به ترتیب نشان دهنده انحراف معیار و میانگینی از I می‌باشند (Wang and Fang, 2016؛ نادیان و همکاران ۱۳۹۷؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۷).

پایگاه داده‌های زیر ساخت مکانی (SDI) سازمان فوای شهرداری شامل: کاربری اراضی، خطوط ارتباطی و حمل و نقل، ارتفاع، حجم تردد، جمعیت، متوسط سرعت حرکت وسایل نقلیه فراهم گردید. علاوه بر آن نقشه پراکنش آلاینده‌های اصلی هوا شامل CO, O2, SO2, PM10, PM2.5 و در نهایت شاخص AQI نیز ترسیم گردید و مقادیر هریک از این عوامل در هریک از پهنه‌ها، محاسبه و مقادیر عددی بدست آمده مورد مقایسه تطبیقی قرار گرفت. در ادامه به اختصار مروری بر تکنیک‌های مورد استفاده صورت می‌گیرد.

#### الف: خود همبستگی فضایی

خود همبستگی فضایی در محیط GIS برای شناسایی شباهت‌های پدیده‌های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی‌ها به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی طبق مشخصه‌های مرتبط استفاده می‌نماید. از خود همبستگی فضایی به عنوان یک ابزار مهم تحلیلی در علم GIS و علوم محیط زیست برای شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شود. در روش خوشه بندی فضایی، میزان همبستگی فضایی بین نقاط همسایه اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که ویژگی‌های نقاط همسایه مشابه یکدیگر باشند، این نقاط به صورت فضایی به یکدیگر وابسته بوده و در یک خوشه قرار می‌گیرند. روش‌های خوشه بندی متعددی جهت گروه بندی داده‌های همگن وجود دارد که از بین این روش‌ها، می‌توان به روش‌های مدل همبستگی مکانی موران، k-means، رگرسیون جغرافیایی وزن دار (GWR) و تحلیل مولفه اصلی (PCA) اشاره کرد (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ Chu and etal, 2015; Wang and Fang, 2016).

در میان روش‌های مختلف تحلیل خوشه‌ای، همبستگی فضایی موران روش موفقی در مطالعات زیست محیطی می‌باشد، به گونه‌ای که این روش قادر است موقعیت‌های منحصر را براساس مقایسه با نمونه‌های مجاورشان مورد بررسی قرار دهد. از اینرو، همبستگی فضایی موران به عنوان روشی متداول و دقیق حتی جهت شناسایی داده‌های پرت مکانی شناخته شده است. مدل همبستگی فضایی موران بر اساس قانون اول جغرافیا مطرح می‌شود که هر پدیده وابسته به پدیده‌های دیگری است (Tobler, 1970). از اینرو،

به طور مشخص دامنه تغییرات و همچنین فراوانی داده‌های پرت در سال‌های ابتدایی بخصوص سال ۱۳۹۴ کمتر و در سال‌های ۱۳۹۵ الی ۱۳۹۷ بیشتر بوده است. اگر چه دامنه چارک اول (کمینه موثر) با عدد تقریبی ۱۲ نزدیک به هم می‌باشد اما این تغییرات در چارک سوم و به خصوص حداکثرها (ماکزیمم واقعی) بیشتر به چشم می‌خورد.

در شکل ۳ روند تغییرات متوسط روزانه و ماهانه آلاینده مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به موقعیت مکانی و اقلیم مشهد، اواخر فصل بهار و اوایل تابستان وقوع ناپایداری‌های جوی که بعضاً با وزش بادهای شدید همراه با گرد و غبار رخ می‌دهد باعث جهش غلظت  $PM_{2.5}$  در این بازه زمانی می‌گردد. با این حال تیر و مردادماه دوره مقادیر کمینه است اما از شهریور ماه روند افزایشی شروع شده و با شدت و ضعف تا اواخر فصل سرد سال ادامه دارد. در شش ماهه اول سال متوسط غلظت  $PM_{2.5}$  پایین‌تر از نیمه دوم سال است، متوسط غلظت طی فروردین تا شهریور ماه در بازه زمانی ۵ ساله مورد بررسی  $28 \mu g/m^3$  و در شش ماهه دوم  $31/4 \mu g/m^3$  محاسبه شده است.

ج: تحلیل نقاط داغ (آماره گنیس ارد جی)

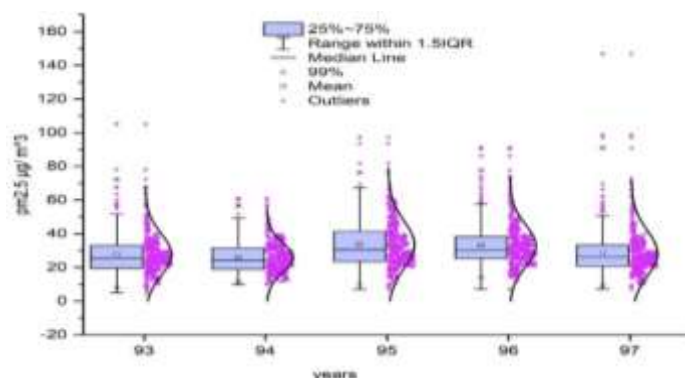
از آماره گنیس ارد جی، جهت بررسی دقیق‌تر توزیع فضایی نقاط داغ یا خوشه مکانی با مقادیر زیاد و لکه‌های سرد یا خوشه مکانی با مقادیر کم استفاده می‌شود. این آماره در سه کلاس  $\pm 3$ ،  $\pm 2$  و  $\pm 1$  و در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد و با استفاده از رابطه ۴ زیر محاسبه می‌گردد:

$$G_i^* = \frac{\sum_j W_{ij} X_j \bar{X}^* \sum_j W_{ij}}{\sqrt{\frac{\{n \sum_j W_{ij}^2 (\sum_j W_{ij})^2\}}{(n-1)}}} \quad (4)$$

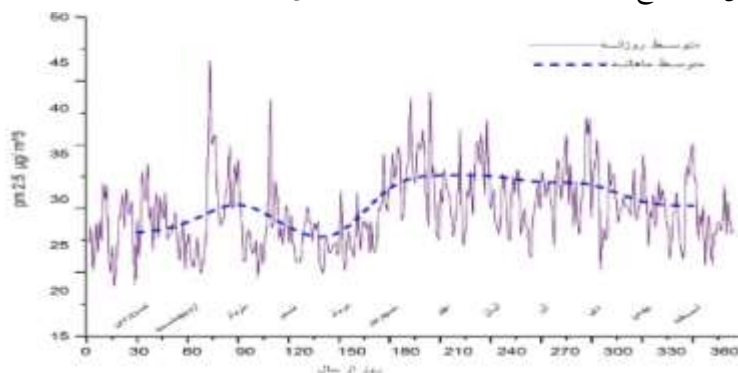
مقادیر بالای  $G$  نشان دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر زیاد (نقاط داغ) و مقادیر پایین  $G$  نشان دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر کم (نقاط سرد) می‌باشد (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۷).

## نتایج و بحث

یکی از ابزارهای مفید جهت مصور سازی داده‌ها و درک سریع نحوه توزیع پراکندگی، استفاده از نمودار جعبه‌ای است. در شکل ۲ ترکیبی از نمودار جعبه‌ای و توزیع نرمال داده‌های بکار گرفته شده طی دوره آماری نشان داده شده است که نقاط بیانگر غلظت  $PM_{2.5}$  در مقیاس روزانه است.



شکل ۲- توزیع غلظت روزانه  $PM_{2.5}$  شهر مشهد در طی دوره آماری ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷



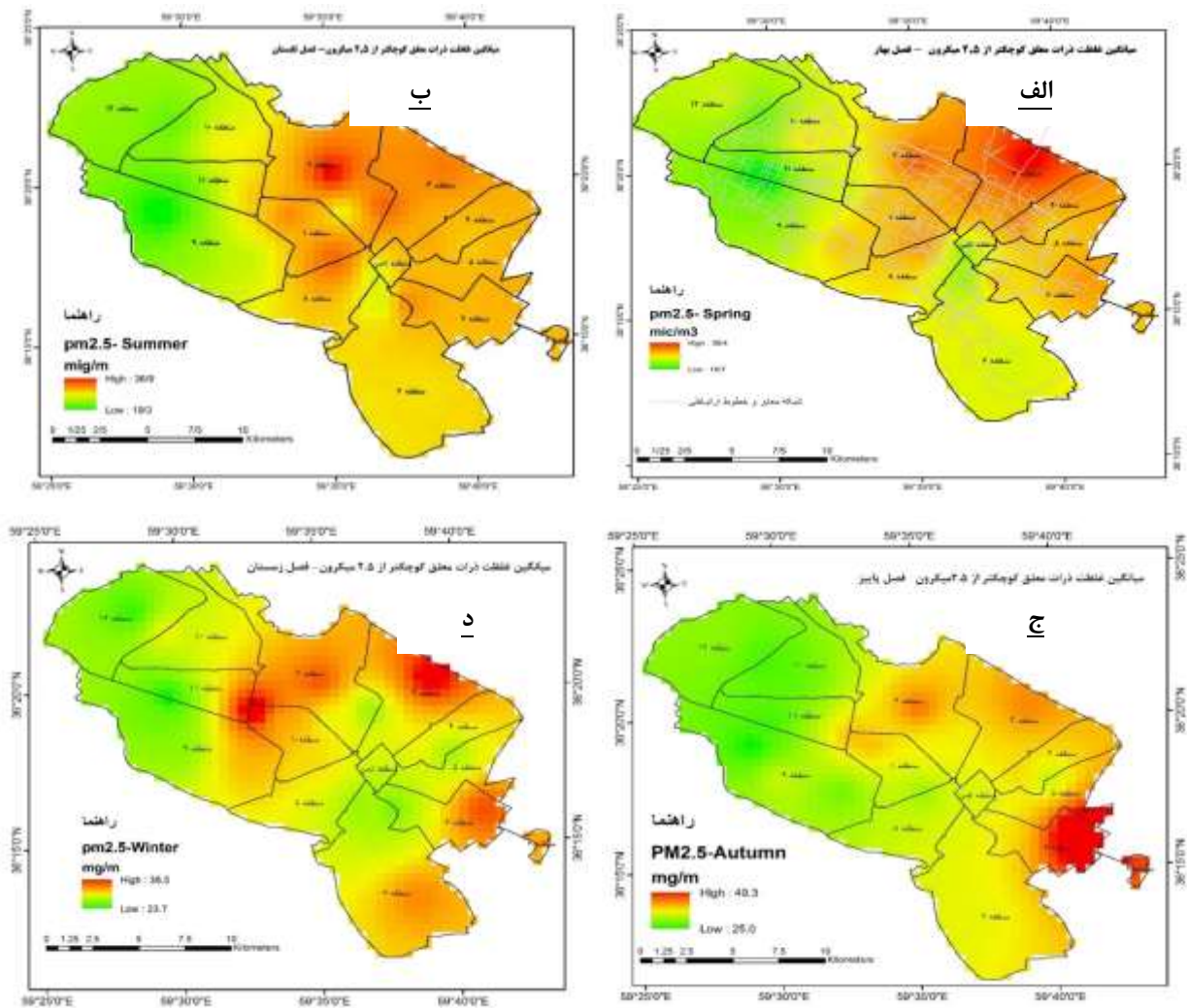
شکل ۳- متوسط غلظت روزانه و ماهانه  $PM_{2.5}$  شهر مشهد در طی دوره آماری ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷

کمترین آن در مناطق غرب و شمال غرب شهر (مناطق ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) ثبت شده است. در جدول ۱ مقادیر آماری نقشه‌های فصلی پراکنش PM<sub>2.5</sub> در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۹۷ ارائه شده است.

با استفاده توابع ریاضی (محاسبه جبری) در محیط GIS، جمع جبری و میانگین‌گیری نقشه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد (۱۵ نقشه ماهانه) نقشه فصل بهار ترسیم گردید. مطابق شکل ۴ (الف) بیشترین غلظت ذرات معلق (حداکثر ۳۴ μg/m<sup>3</sup>) در مناطق ۲ و ۴ و ۳ شهرداری و

جدول ۱- مقادیر آماری نقشه‌های فصلی پراکنش PM<sub>2.5</sub> (μg/m<sup>3</sup>) مشهد متوسط دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۹۳

فصل	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف از میانگین
فصل بهار	۱۶,۷	۳۶,۵	۲۷,۷	۳,۴
فصل تابستان	۱۹,۳	۳۶,۹	۲۸,۸	۳,۴
فصل پاییز	۲۵	۴۹,۳	۳۲,۵	۹,
فصل زمستان	۲۳	۳۸,۵	۳۰	۲,۶
سالانه	۲۱,۹	۳۶,۸	۲۹,۸	۳,۰۳



شکل ۴- نقشه پراکنش غلظت PM<sub>2.5</sub> فصل بهار (الف)، فصل تابستان (ب)، فصل پاییز (ج) و فصل زمستان (د)، متوسط دوره آماری



همانند فصل بهار، در تابستان نیز مناطق غرب و شمال غرب مشهد کم‌ترین تراکم ذرات معلق ( $19/3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) را دارا هستند. براساس محاسبات صورت گرفته شده، متوسط غلظت در این فصل  $28/8 \pm 3/4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  می‌باشد که نسبت به فصل بهار اندکی افزایش دارد. الگوی پراکنش  $\text{PM}_{2.5}$  در فصل پاییز با سایر فصل‌ها کمی متفاوت است (شکل ۴-ج) هسته تمرکز آلاینده‌ها در این فصل در جنوب شرق و با شدت کمتری در شرق مشهد قرار دارد. با این حال کمترین غلظت‌ها مطابق فصل‌های گذشته در شمال غرب و غرب مشهد واقع شده است. مقایسه میانگین غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در فصول مختلف سال نشان می‌دهد فصل پاییز بالاترین غلظت را با  $32/5 \pm 3/9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  دارا است. در آخرین فصل سال اگر چه از شدت غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  کاسته شده است با این حال فصل زمستان با متوسط  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در رتبه دوم بار آلودگی هوا بعد از پاییز قرار دارد. مقدار انحراف معیار پایین محاسبه شده در این فصل حاکی از یکدست‌تر بودن توزیع ذرات معلق در سطح شهر است. مطابق شکل شماره ۴ د تمرکز ذرات معلق به صورت هسته‌هایی جدا در شمال شرق، نواحی مرکزی، شرق و جنوب، شرق مشهد پراکنده است. منطقه ۳ شامل ایستگاه‌های رسالت و سمرقند بخشی‌هایی از مناطق ۱، ۲ و ۱۱ شامل ایستگاه‌های خیام شمالی، خیام جنوبی، سجاد و تقی آباد و بخش‌هایی از مناطق ۶ و ۷ بیشترین غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  را در این فصل دارا هستند.

نقشه خروجی تحلیل خود همبستگی فضایی محلی فصل بهار در شکل ۵ الف نشان داده شده است. بر این اساس غلظت ذرات معلق در بخش‌هایی از مناطق ۲، ۳، ۴ شهری یعنی مناطق شرقی شهر به طور معناداری (در سطح ۰/۰۵) از مناطق همجوار خود بالاتر است که در نقشه با HH یا خوشه بالا مشخص شده است و خوشه‌های کم LL در شمال غرب شهر مشهد دیده می‌شود. گستره لکه‌های داغ فصل بهار (با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد) با مساحت ۷۵۷۵ هکتار و متوسط غلظت  $3/4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm$  در مناطق شمال و شمال شرقی مشهد (مناطق ۲، ۳ و ۴) شناسایی شده است. با این حال براساس تحلیل خود همبستگی فضایی محلی فصل تابستان، مناطق ۲، ۳، ۱۰ و قسمتی منفک در مرز بین منطقه ۸ و ۱ شهری در گروه

خوشه بالا قرار گرفته است (شکل ۵ الف). اساساً توزیع نقاط داغ از نحوه توزیع ذرات معلق تبعیت می‌کند برای اساس تمرکز نقاط داغ در مناطق شمال و شمال شرق مشهد ثبت شده است. مساحت این پهنا ۶۸۰۰ هکتار محاسبه شده است که ۲۱/۸ درصد از مساحت شهر را شامل می‌شود. با این حال الگوی شکل‌گیری لکه‌های سرد همانند فصل بهار در غرب و شمال غرب است، مساحت این پهنا ۸۰۰۰ هکتار و شامل کل منطقه ۱۲ و قسمتی‌هایی از منطقه ۹-۱۰ و ۱۱ شهرداری می‌باشد (شکل ۵ د).

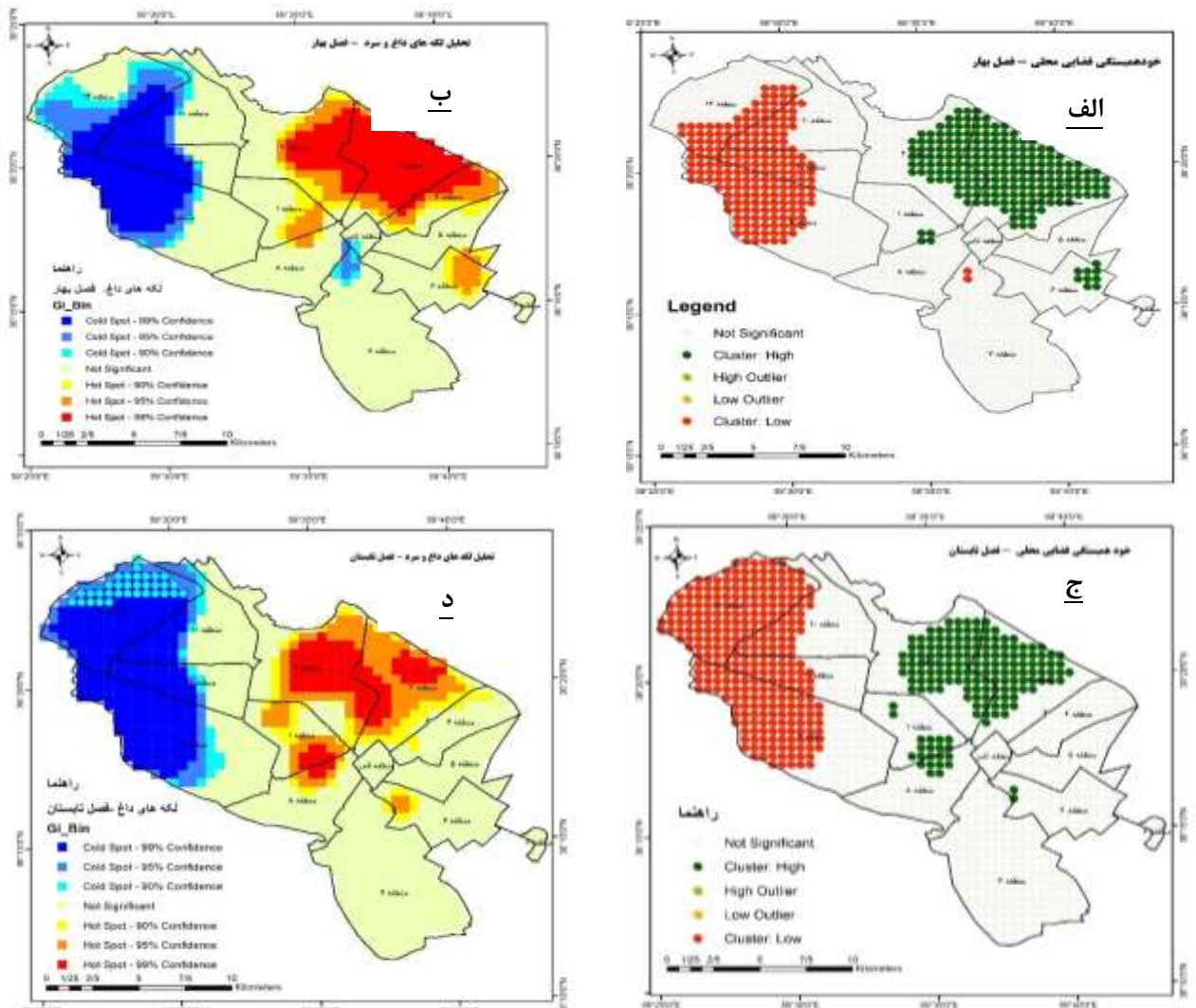
در قسمت الف و ب شکل ۶ که بترتیب خود همبستگی فضایی محلی و تحلیل نقاط داغ در فصل پاییز را نشان می‌دهد الگویی مشابه با فصل‌های قبل دارد با این تفاوت که هسته نقاط داغ به صورت مجزا در قسمت شرق و جنوب شرق مشهد قرار گرفته است و از لحاظ وسعت نیز (۱۷/۲ درصد از کل مساحت) نسبت به فصول گذشته کاهش یافته است (جدول ۲). ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت، سمرقند، ساختمان و آوینی (مناطق ۲، ۳، ۵، ۶ شهرداری) در نقاط داغ و ایستگاه‌های صدف، ویلا، سرافرازان و خاقانی در پهنا نقاط سرد واقع شده‌اند. آرایش توزیع مکانی لکه‌های داغ و سرد با فصول دیگر بخصوص بهار و تابستان متفاوت است لکه‌های داغ مشخص شده به صورت منفک و مجزا از یکدیگر، در شرق، جنوب شرق و مناطق مرکزی شهر قرار گرفته است (شکل ۵ د). با توجه به اینکه ۲۳/۹ درصد (مساحت ۷۴۷۵ هکتار) از مساحت شهر در این پهنا قرار دارد از این حیث فصل زمستان در رتبه دوم قرار دارد. صرف نظر از لکه منفک و جدا افتاده شده، کماکان نواحی شمال غربی شهر در پهنا نقاط سرد جای دارد. با این حال نسبت به فصل تابستان و پاییز از مساحت این هسته‌ها کاسته شده است.

از ترکیب نقشه‌های فصلی، نقشه سالانه غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در دوره ۵ ساله ترسیم گردید (شکل ۷ الف). یک چنین نقشه ای شناخت بهتر و کاملتری از چگونگی توزیع آلاینده مورد مطالعه در سطح شهر مشهد ارائه می‌کند. بر اساس این نقشه نیمه شرقی و جنوب شرقی مشهد با متوسط غلظت  $36/8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  دارای بالاترین غلظت و نواحی غرب و شمال غرب دارای بار آلودگی کمتری است. براساس مقادیر جدول شماره ۱، متوسط سالانه غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  مشهد  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

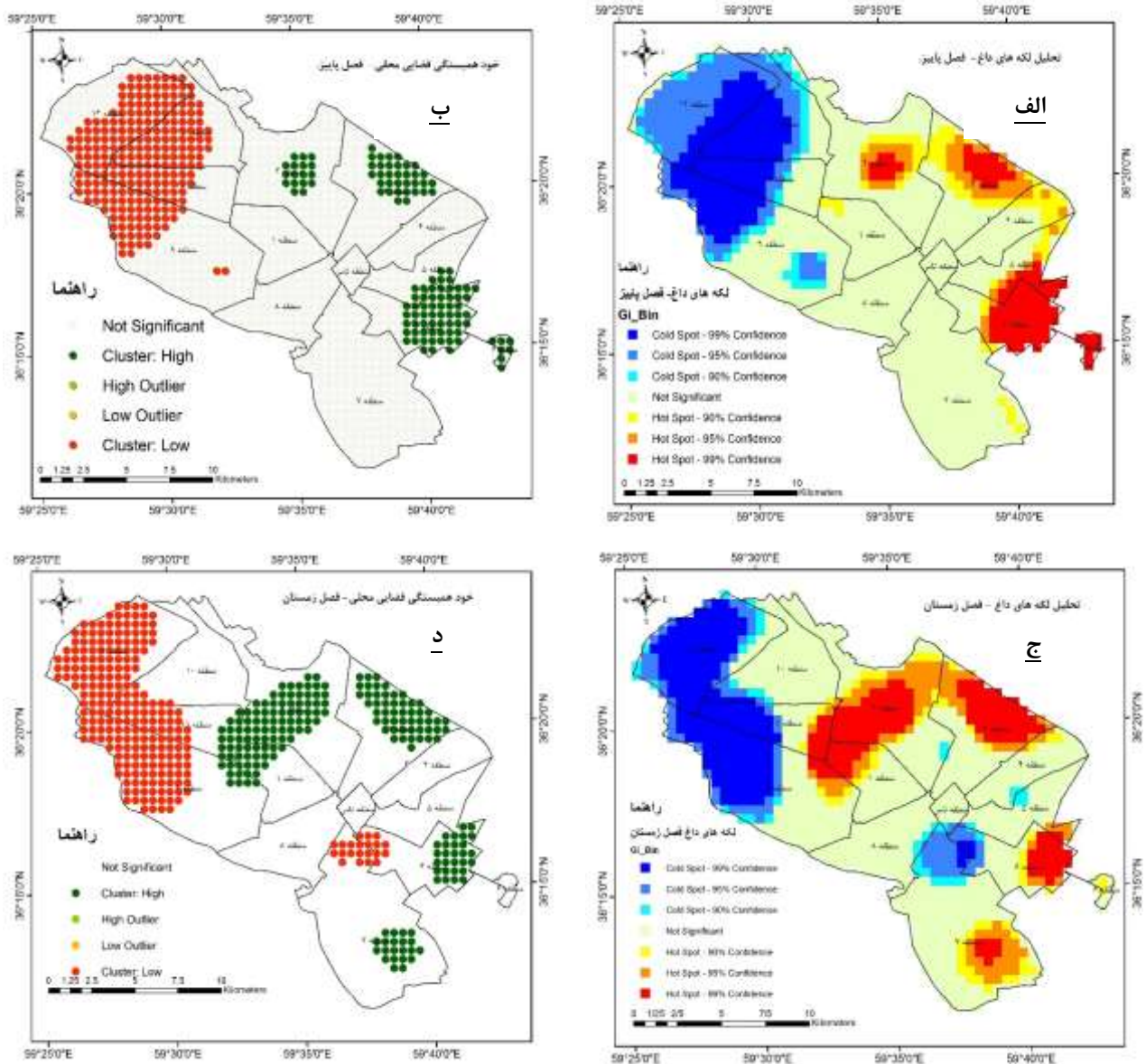
خیام شمالی، سمرقند، کریمی و ایستگاه ساختمان در پهنه نقاط داغ و ایستگاه‌های الهیه، صدف، سرافرازان، لشکر، خاقانی و ویلا در محدوده نقاط سرد قرار دارند.

در ادامه شاخص AQI و آلاینده‌های اصلی هوا شامل  $NO_2, SO_2, CO, PM_{10}$  در لکه‌های شناسایی شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد بدین منظور شاخص کیفیت در ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت و ساختمان از لکه‌های داغ و ایستگاه‌های ویلا، صدف و الهیه از لکه سرد در طول دوره آماری محاسبه و نتایج بدست آمده در جدول ۳ درج شده است. برای این اساس روزهایی که شاخص کیفیت هوا کمتر از ۱۰۰ ( $AQI < 100$ ) بوده است به عنوان روز سالم و روزهایی که شاخص بالای ۱۰۰ ( $AQI > 100$ ) ثبت شده است به عنوان روز ناسالم در نظر گرفته شده است.

۲۹/۸ و حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۲۱،۹ و  $36,8 \mu g/m^3$  محاسبه شده است. استاندارد سالانه ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (US.EPA,2014) ۱۲ میکروگرم بر متر مکعب اعلام شده است که غلظت‌های محاسبه شده نقشه‌های فصلی و سالانه بسیار فراتر از این سطح می‌باشد. به طور کلی مناطق ۲، ۳، ۶ و بعد از آن مناطق ۴ و ۵ شهرداری بیشترین غلظت  $PM_{2.5}$  و مناطق ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ دارای کمترین می‌باشد. موقعیت مکانی شاخص سالانه خود همبستگی فضایی و شاخص نقاط داغ و سرد سالانه (شکل ۸ ب و ج) موید این موضوع است. با این حال وسعت نقاط داغ سالانه ۲۲/۳ درصد و هسته‌های نقاط سرد ۲۵/۵ درصد از کل مساحت شهر را شامل می‌شود. از شبکه ایستگاه‌های مورد استفاده، ایستگاه‌های



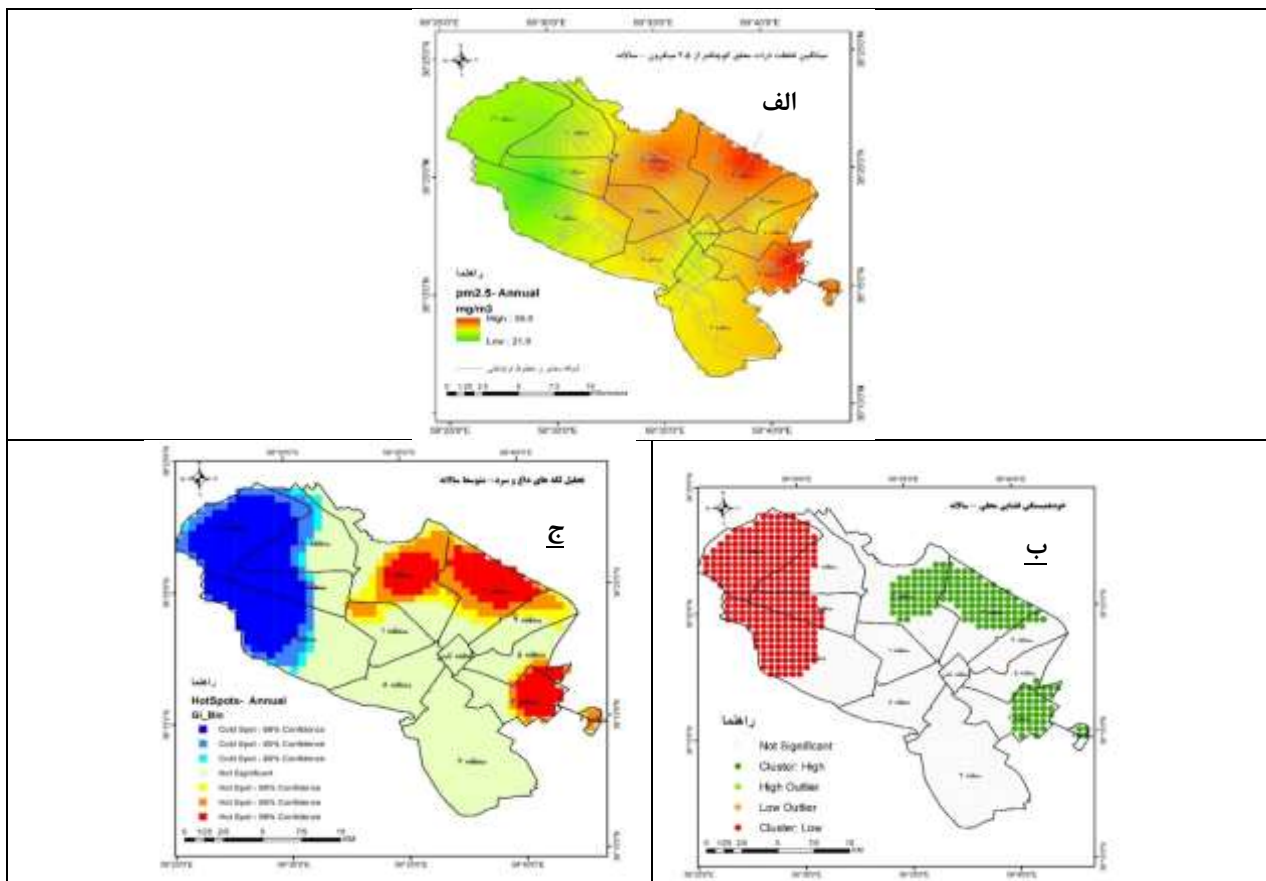
شکل ۵- نقشه شاخص خود همبستگی فضایی محلی فصل بهار الف، فصل تابستان ج و موقعیت نقاط داغ و سرد فصل بهار ب و فصل تابستان ج متوسط دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۹۷



شکل ۶- نقشه شاخص خود همبستگی فضایی محلی فصل پاییز الف، فصل زمستان ج و موقعیت نقاط داغ و سرد فصل پاییز ب و فصل زمستان ج متوسط دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۹۷

جدول ۳- تعداد روزهای سالم و ناسالم کیفیت هوا در نقاط داغ (hot spot) و نقاط سرد (cold spot) در دوره آماری ۱۳۹۳ - ۱۳۹۷

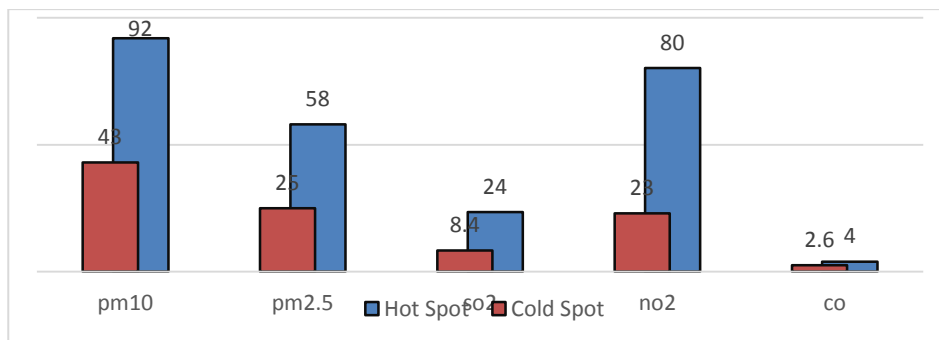
میانگین دوره	تعداد روز در هر سال					وضعیت کیفیت هوا	
	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴	۱۳۹۳		
۲۳۴	۳۰۰	۱۲۰	۲۶۳	۲۴۱	۲۴۷	سالم (AQI<100)	نقاط سرد
۱۱۳	۸۶	۱۵۹	۲۱۷	۴۹	۵۲	ناسالم (AQI>100)	
۵۱	۱۰۴	۱۵	۶۰	۱۰	۶۶	سالم (AQI<100)	نقاط داغ
۲۳۹	۲۰۸	۲۴۵	۳۲۰	۲۶۸	۱۵۴	ناسالم (AQI>100)	



شکل ۷- نقشه پراکنش غلظت PM2.5 سالانه (الف)، نقشه شاخص خود همبستگی فضایی محلی سالانه ب و موقعیت نقاط داغ و سرد سالانه ج متوسط دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۹۷

مشهد افزوده شده است. جهت تکمیل اطلاعات و شناخت بهتر تفاوت‌ها بین دو منطقه، مقادیر سایر آلاینده‌های هوا در سال ۱۳۹۷ محاسبه و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. در سایر آلاینده‌ها نیز مقادیر در لکه‌های داغ به طور فاحشی نسبت به لکه‌های سرد بیشتر است به طوری که طبق محاسبات صورت گرفته شده غلظت  $NO_2$  حدوداً چهار برابر،  $SO_2$  سه برابر و  $PM_{2.5,10}$  و  $CO$  دو برابر بیشتر از لکه‌های سرد می‌باشد.

مقایسه آمار محاسبه شده در لکه‌های سرد و داغ خودگویی تفاوت فاحش کیفیت هوا بین دو منطقه است. به گونه‌ای که تعداد روزهای سالم در لکه‌های سرد، ۴ برابر بیشتر از لکه‌های داغ است با این حال تعداد روزهای ناسالم در لکه‌های داغ بالغ بر ۲ برابر این روزها در لکه‌های سرد است. فراوانی رخداد روزهای ناسالم در لکه‌های داغ چشمگیرتر بوده و ۱۵۴ روز در سال ۹۳ به ۲۰۸ روز در سال ۱۳۹۷ رسیده است بنابراین بر شدت آلودگی هوا در مناطق آلوده



شکل ۸- نمودار مقایسه آلاینده‌های اصلی هوا (O<sub>3</sub> بر حسب NO<sub>2</sub>-ppb و SO<sub>2</sub> بر حسب PPM و PM<sub>10</sub> , PM<sub>2.5</sub> بر حسب  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در نقاط داغ و سرد شناسایی شده

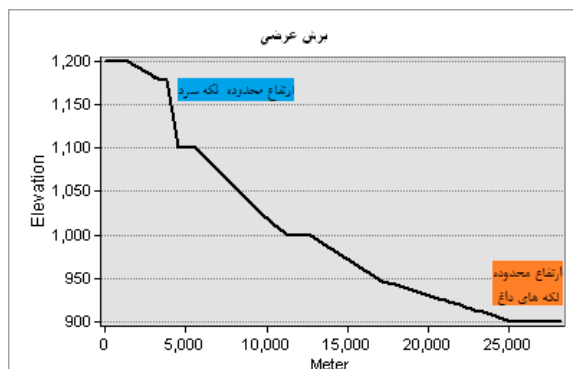
ساله) باد غالب مشهد جنوب شرقی است. تمرکز و تراکم بالایی جمعیت حاشیه نشین به همراه قرارگیری بیشتر اراضی کشاورزی حومه شهر، وجود جاده‌های غالباً شوسه و خاکی روستاها و مزارع، قرارگیری معادن شن و ماسه، کوره‌های آجرپزی و کارخانه سیمان در مناطق شرق و جنوب شرقی شهر را می‌توان جزء دلایل غلظت بالای PM<sub>2.5</sub> و شکل‌گیری هسته داغ در این منطقه از شهر دانست. اما در مقایسه تطبیقی هسته نقاط سرد در مناطق شمال غرب مشهد، دارای تراکم کمتر جمعیت، سرانه فضای سبز بسیار بیشتر، ارتفاع بیشتر این منطقه، فاصله بیشتر از صنایع و منابع ثابت انتشار آلاینده هوا، مجاورت با مناطق بیلاقی طرقيه و شانديز و... می‌باشد. در شکل ۹ نمودار برش عرضی ارتفاع از شمال غرب (هسته سرد) به سمت جنوب شرق (هسته داغ) مشهد نشان داده شده است. طبق محاسبات انجام شده متوسط ارتفاع هسته نقاط سرد ۱۱۳۷ متر از سطح دریا و در هسته نقاط داغ ۹۹۷ متر می‌باشد. اختلاف ارتفاع و شیب موجود مسلماً بر جابجایی و انباشت ذرات معلق در مناطق پست شرق و جنوب شرق شهر تاثیرگذار است.

در شکل ۱۰ نتایج مقایسه تعدادی از عوامل موثر بر شکل‌گیری نقاط داغ و سرد نشان داده شده است که جهت همسان‌سازی آمارها و گویایی بهتر نتایج محاسبات به درصد بر روی یک نمودار ترسیم شده است. به جزء آماره‌های جمعیت و مساحت کاربری صنایع، به طور مشخص برتری از آن هسته نقاط سرد است.

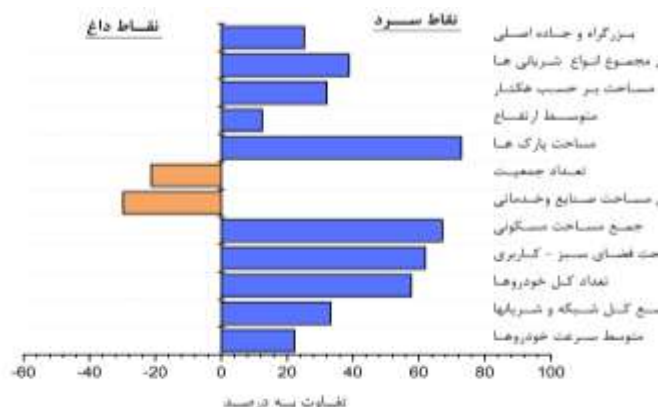
واکاوی برخی از عوامل موثر (در انتشار یا کنترل‌کننده PM) که داده‌های کمی و مکان‌مبنا برای آنها در سطح شهر مشهد وجود داشت تکمیل‌کننده بحث خواهد بود. یکی از مهمترین عوامل انتشار آلاینده‌های هوا در محیط‌های شهری (به خصوص در ایران) منابع متحرک می‌باشد. مطابق گزارش فهرست انتشار سالانه شهر تهران، ۸۵ درصد از آلاینده‌های هوای تهران را بخش حمل و نقل و منابع سیار به خود اختصاص داده است (سیاهه انتشار آلاینده‌های هوای تهران، ۱۳۹۴).

از همپوشانی و مطابقت لایه نقاط داغ و سرد شناسایی شده با لایه‌های خطوط حمل و نقل شهری مقادیر آماری هر محدوده استخراج گردید. طبق نتایج محاسبات انجام شده، مجموع طول شبکه حمل و نقل شهری در نقاط داغ ۲۸۳۲۸۷ متر و متوسط سرعت وسائط نقلیه در این بخش ۳۶ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. این در حالیست که مجموع طول شبکه در نقاط سرد ۴۲۴۳۴۲ متر و متوسط سرعت خودروها ۴۶ کیلومتر بر ساعت بدست آورده شده است. بنابراین میتوان گفت در لکه‌های نقاط سرد بدلیل خطوط ارتباطی گسترده‌تر، سرعت خودروها بیشتر و ترافیک روان‌تر است بنابراین انتشار آلاینده‌ها نیز به نسبت مناطق پر ترافیک کمتر خواهد بود.

از دیدگاه جغرافیایی دشت مشهد بین دو رشته کوه بینالود در جنوب و رشته کوه‌های هزار مسجد در شمال قرار گرفته است که باعث شکل‌گیری الگویی خاص جریانات هوا و کانالیزه شدن وزش باد از جنوب شرق به شمال غرب مشهد می‌گردد. بر اساس گلباد دوره آماری بلند مدت (۵۰



شکل ۹- برش ارتفاعی از شمال غرب به سمت جنوب شرق مشهد



شکل ۱۰- نمودار درصد تفاوت بین برخی از عوامل موثر بر انتشار PM<sub>2.5</sub> بین نقاط داغ و سرد شناسایی شده

### نتیجه گیری

نتایج تحلیل خود همبستگی فضایی که بر مبنای ۶۰ نقشه ماهانه پراکنش ذرات معلق صورت گرفته است نشان دادف بیشترین بار آلاینده PM<sub>2.5</sub> که تحت عنوان نقاط داغ معرفی شده است در نواحی شرق و جنوب شرقی مشهد قرار دارد این محدوده ۲۲/۳ درصد از کل مساحت شهر را در بر می گیرد. چنین الگویی تقریباً در فصول دیگر سال نیز دیده می شود. در مقیاس فصلی، گستره نقاط داغ فصل بهار با ۲۵ درصد از کل مساحت شهر بیشترین وسعت را داراست، بعد از آن فصل زمستان با ۲۴ درصد، تابستان ۲۱/۸ درصد و در نهایت پاییز با ۱۷/۲ درصد در رتبه های بعدی قرار دارند. در مقابل مناطقی با تراکم کم PM<sub>2.5</sub> که نقاط سرد شناخته می شود در شمال غرب مشهد شکل گرفته است اگرچه گستره این مناطق در فصول سال اندکی تغییرات را تجربه می کند با این حال الگوی مکانی آن تقریباً یکسان است. در مقیاس سالانه (جدول ۲) ۲۵/۵ درصد مساحت شهر در محدوده گستره نقاط سرد و ۲۲/۳ درصد در محدوده نقاط داغ قرار دارد. بررسی آمار کیفیت هوا بین این دو منطقه گویای تفاوت فاحش بین آنهاست به گونه ای که تعداد روزهای ناسالم (شاخص بالای ۱۰۰) در نقاط داغ دو برابر نقاط سرد است. این نسبت در مورد روزهای سالم (شاخص زیر ۱۰۰) یک چهارم، غلظت NO<sub>2</sub> حدوداً چهار برابر، SO<sub>2</sub> سه برابر و PM<sub>2.5,10</sub> و CO دو برابر بیشتر می باشد (شکل ۸).

مقایسه تطبیقی عوامل موثر در انتشار آلاینده مورد مطالعه و شکل گیری نقاط داغ نشان می دهد، تعداد جمعیت ۲۱

درصد و مساحت کاربری های صنعتی و خدماتی ۳۰ درصد در نقاط داغ نسبت به نقاط سرد بیشتر است که این دو عامل به طور مستقیم باعث افزایش انتشار آلاینده های هوا در نقاط داغ می گردد. این در حالیست که برتری نقش عوامل مثبت (تاثیر کاهنده در آلودگی هوا) از آن نقاط سرد است. به طور مثال مساحت پارک ها ۷۰ درصد بیشتر، مساحت های کاربری مسکونی ۶۷ درصد، جمع کل فضاهای سبز ۶۲ درصد. در محدوده نقاط سرد بیشتر از نقاط داغ است. از طرفی عوامل دیگر همچون وجود بزرگراه و جاده های اصلی بیشتر برخوردار از شریان های اصلی شبکه حمل و نقل باعث افزایش سرعت خودروها و روانی ترافیک در این منطقه می گردد که در مقایسه تطبیقی بین دو منطقه می تواند دلیل تراکم و غلظت کمتر آلاینده مورد مطالعه باشد. نکته دیگر اختلاف ارتفاع و شیب قابل توجه بین دو منطقه است، طبق نتایج بدست آمده ارتفاع متوسط نقاط سرد ۱۱۳۷ متر و نقاط داغ در شرق و جنوب شرق ۹۹۷ متر می باشد که ۱۱۴ متر اختلاف ارتفاع و نیروی ثقل ایجاد شده خود می تواند باعث انتقال و انباشت ذرات معلق در نواحی پست و کم ارتفاع مشهد گردد. نتایج بدست آمده با تحقیقات اسماعیلی (۱۳۹۷) همخوانی دارد، وی سه منطقه همگن آلودگی هوای مشهد (PM<sub>2.5</sub>) را شناسایی کرد و مناطق شرق و جنوب شرق مشهد را جزء پهنه دارای بالاترین غلظت ذرات معلق معرفی کرد. این تحقیق در یک دوره آماری ۲ ساله و ایستگاه های کمتر نسبت به تحقیق حاضر انجام شده است. همچنین این نتایج با تحقیقات الهیاری و همکاران (۱۳۹۳) کتابی و همکاران (۱۳۹۵)، میری و همکاران (۱۳۹۵) نیز منطبق می باشد. بررسی نقشه های

9. Esmaili R., 2018, Determination of air pollution's homogenous areas in Mashhad, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7 (16), pp. 227-240.
10. Esmaili R., 2013, Application of Cluster Analysis in Grouping of Air Pollution Measuring Stations Case Study: Mashhad City, Second National Conference on Air and Sound Pollution Management, Sharif University of Technology, Tehran.
11. Fang Ch., Lin H., Li G., Sun D., Miao Zh., 2015, estimating the Impact of Urbanization on Air Quality in China Using Spatial Regression Models, *sustainability*, 7, pp. 15570-15591.
12. Habibi R., Alesheikh A.A., Mohammadian A., Sharif M., 2017, "An Assessment of Spatial Pattern Characterization of Air Pollution: A Case Study of CO and PM2.5 in Tehran, Iran, *International Journal of Geo-Information*, 7, 270, pp. 2-14.
13. Hosseinzadeh S. R., Doostan R., Haghghat Ziaberi S. M., Haghghat Ziaberi S. M., 2013, Investigation of synoptic patterns affecting air pollution in Mashhad metropolis, *Journal of Geography and Regional Development*, 21, pp. 81-101.
14. Joulaei F., Peiravi R., Esmaily H., Ketabi D., Motealemi A., 2017, Variations of Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentration in Mashhad, Iran, during 2016, *Journal of Health Research in Community*, 3(3), pp. 34-45.
15. Ketabi D., Esmaili R., Alidadi H., Peirovi R., Joulaei F., 2016, Evaluation of Mashhad City Air Quality Based on Air Quality Index (AQI), 2015, *Journal of Research in Environmental Health*, 2(1), pp. 228-236.
16. Khosravi Y., Bahri A., 2018, Use of Spatial Statistics Techniques to Investigate Spatio-temporal Changes in Chlorophyll a Concentration in the Persian Gulf, *Journal of Marine Biology*, 10, 37, pp. 33-37.
17. Lin, G., Fu, J., Jiang, D., Hu, W., Dong, D., Huang, Y., Zhao, M., 2014 Spatio-temporal variation of PM2.5 Concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 11, pp. 173-168.
18. Liu W., Xu Z., Yang T., 2018, Health effects of air pollution in China, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 1471, pp. 1-15.
19. Mashhad Environmental Pollution Monitoring Center, Extensive Report on Environmental Pollutants of Mashhad in 2014- 2018, [WWW.epmc.mashhad.ir](http://WWW.epmc.mashhad.ir).
20. Miri M., Mohammadi A., Nemati S., Abdolahnejad A., Nikoonahad A., 2016, The Trend of Air Quality Index (AQI) Variations
- پراکنش ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub>) در گزارشات متعدد فصلی و سالانه مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی (۱۳۹۷) نیز بیشترین بار آلودگی هوای مشهد را در نیمه شرقی مشهد نشان می‌دهد، با این تفاوت که این نقشه‌ها بر اساس آمار صرفاً یک فصل یا یک سال ترسیم شده است در حالیکه در تحقیق حاضر دوره ۵ ساله استفاده شده است. نتایج بدست آمده به خصوص پهنه‌های شناسایی شده به عنوان نقاط داغ می‌تواند ابزاری کاربردی جهت تصمیم‌سازان و برنامه‌ریزان حوزه محیط زیست شهری مورد استفاده قرار گیرد. تمرکز اقدامات و طرح‌های کاهش و کنترل آلودگی هوا بر این منطقه علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه مدیریت شهری، حصول نتیجه و اثر بخشی اقدامات را نیز تضمین می‌نماید.

## منابع

1. Alijani B., 2015, Spatial Analysis, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2,3, pp.1-14.
2. Allahyari S., Assadi SN., Esmaily H., 2014, Assessment of air pollution condition and compare in different areas of Mashhad in winter 2011, *Journal of North Khorasan University of Medical Sciences*, 6(1): 17, pp.7-16.
3. Bahari R., Abbaspour R. A., Pahlavani P., 2015, Zoning of particle contamination by local statistical models in GIS (Case Study, Tehran City), *Journal of Geomatics Science and Techniques*, 3, pp. 165-173.
4. Charmzan M., Esmaili R., Mohammadi M., 2018, Evaluation of the best interpolation algorithm in spatial distribution of air pollutants, First National Conference on Modern Studies and Research in Environmental and Management Sciences, Motahar Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.
5. Chel Jung M., Park J., Kim S., 2019, Spatial Relationships between Urban Structures and Air Pollution in Korea, *Sustainability*, 11, 476, pp. 1-17.
6. Chu HJ., Huang B., Lin CY., 2015, modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10-PM2.5 relationship, *Atmospheric Environment*, 102, pp. 176-182.
7. Ebtekar T., 1974, Motor vehicles and air pollution, *Journal of Environmental Studies*, 1 (1), 123-143.
8. Ebtekar T., 1975, Large cities air pollution, *Journal of Environmental Studies*, 3 (3), 82-77.

- Tehran City Base Year of 2013, vol.1, Tehran Air Quality Control Company, QM/94/04/03/(U)/01, pp. 1-65.
28. Taghavi H., 2012, Temporal and Spatial Distribution of Mashhad Air Pollution Index Pollutants and its Affecting Factors, Master Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
  29. Tian Y., Yao X., Chen L., 2019, Analysis of spatial and seasonal distributions of air pollutants by Incorporating urban morphological characteristics, *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, pp 35-48.
  30. Tobler, W. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*. 46 (2). pp. 234-240
  31. US EPA, 2014, National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), pp.1-2. <http://epa.gov/air/criteria.html>
  32. Vinikoor-Imler, L.C., Davis, J.A., Luben, T.J., 2011, an ecologic analysis of county-level PM2.5 concentrations and lung cancer incidence and mortality. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 8, pp. 1865-1871.
  33. Wang Y., Duan X., Wang L., 2019, Spatial-Temporal Evolution of PM2.5 Concentration and its Socioeconomic Influence Factors in Chinese Cities in 2014–2017, *Int. J. Environ. Res. and Public Health*, 16, 985, pp. 1-18.
  34. Wang Z. and Fang C., 2016, Spatial-temporal characteristics and determinants of PM2.5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration, *Chemosphere*, 148, pp. 148-162.
  35. World Health Organization (WHO), 2016, Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease, pp. 1-130.
  36. Yamada, I., and Thill, J. C., 2007. Local indicators of network- constrained clusters in spatial point patterns. *Geographical Analysis*, 39 (3): 268-292.
  - in Mashhad Metropolis Using GIS *Journal of Health research in Community*, 2(1), pp. 12-20.
  21. Nadian M., Mirzaei R., Soltani Mohammadi S., 2018, Application of Moran's / Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM2.5 Pollutant (A case Study: Tehran City), *Journal of Environmental Health Engineering*; 5(3), pp. 197-213.
  22. Nunez-Alonso D., Vicente Perez-Arribas L., Manzoor S., O.Caceres J., 2019, Statistical Tools for Air Pollution Assessment: Multivariate and Spatial Analysis Studies in the Madrid Dejon, *Journal of Analytical in Chemistry*, 1-9.
  23. Peeters A., Zude M., Käthner J., Ünlu M., Kanber R., 2015, Hetzroni A, Gebbers R, Ben-Gal A. Getis-Ord's hot-and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111, pp.140-50.
  24. Pourkhabaz H. R., Javanmardi S., 2014, Determination of concentration and source of toxic metals in urban areas (Case study: Mashhad), *Journal of Geography and Environmental Planning*, 25, 3 (55), pp. 207-216.
  25. Pu, H.; Luo, K.; Wang, P.; Wang, S.; Kang, S., 2017 spatial variation of air quality index and urban driving factors Linkage: Evidence from Chinese cities, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 24, 4457-4468.
  26. Roshani M., Abbasian M., Naderi M., Shahbazi H., Torbatian S., Karimi E., Nakata Sh., 2018, Tehran Annual Air Quality Report period of March 2017- March 2018, Tehran Air Quality Control Company, QM97/02/01(U)/1, pp. 1-307.
  27. Shahbazi H., Mostatazadeh A., Ahmadi M., Taghvaei S., Babaei M., Salamat Y., Afshin H., Hoseini V., 2015, emission inventory of