

کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلایندهی $PM_{2.5}$ (مطالعه موردی: شهر تهران)

مرضیه نادیان^۱، روح‌اله میرزایی^{۱*}، سعید سلطانی محمدی^۲

^۱ گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

^۲ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۹/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۶

چکیده

زمینه و هدف: ذرات معلق یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوای شهرهای ایران به‌ویژه تهران است که به دلیل خطرات بهداشتی متعدد سلامت ایرانی‌ها را تهدید می‌کند. میزان خطرات این ذرات به تغییرات زمانی-مکانی غلظت آن‌ها در هوا بستگی دارد. از این رو، هدف این پژوهش، تحلیل مکانی و زمانی $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی است.

مواد و روش‌ها: داده‌های ساعتی غلظت $PM_{2.5}$ طی سال ۱۳۹۵ از ۳۸ ایستگاه سنجش آلودگی هوا جمع‌آوری شد و به صورت ماهانه، فصلی و سالانه آنالیز شد. به منظور پهنه‌بندی غلظت $PM_{2.5}$ ، از درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده شد. وجود خودهمبستگی مکانی در داده‌ها توسط شاخص موران بررسی شد و خوشه‌بندی داده‌ها توسط شاخص‌های موران جهانی و محلی صورت پذیرفت و نهایتاً جهت تعیین لکه‌های داغ این آلاینده در شهر تهران از شاخص Getis-Ord-Gi استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پهنه‌بندی و خودهمبستگی مکانی محلی و جهانی به همراه تحلیل لکه‌های داغ غلظت آلایندهی $PM_{2.5}$ نشان داد که غلظت این آلاینده از سمت شمال به جنوب تهران روند افزایشی دارد به طوری که مناطق واقع در جنوب تهران به ویژه ایستگاه‌های شهر ری، از آلوده‌ترین مناطق شهر تهران بودند. همچنین نتایج نشان داد که غلظت این آلاینده در دو فصل سرد بیشتر بود به طوری که بیشترین لکه‌های داغ در این دو فصل شناسایی شدند. نتیجه‌گیری: استفاده هم‌زمان از چند تحلیل مکانی نشان داد که شهر تهران به دو بخش شمال غیرآلوده و جنوب آلوده قابل تفکیک است که این موضوع باید توسط برنامه‌ریزان شهری جهت بهبود کیفیت هوای تهران در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: آلایندهی $PM_{2.5}$ ، آماره موران جهانی، آماره موران محلی، لکه‌های داغ

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مشکلات عمده زیست‌محیطی است که با توسعه شهرها، ازدیاد رشد جمعیت، فعالیت‌های کشاورزی، پیشرفت صنایع و افزایش وسایل نقلیه موتوری، در اکثر نقاط جهان از جمله کشورهای در حال توسعه افزایش یافته است.^{۱،۲} در ایران نیز شهرهای بزرگ به ویژه کلان‌شهرهای آن مانند تهران به علت افزایش ترافیک ناشی از وسایل نقلیه‌ی موتوری با بحران آلودگی هوا مواجه می‌باشند. از این‌رو، نرخ رشد بیماری‌های قلبی، عروقی و مرگ و میر-های زودرس در این شهر با کاهش کیفیت بهداشتی هوای تهران افزایش یافته است.^۱

موقعیت جغرافیایی این شهر که از سمت شمال و شمال-شرق به ترتیب توسط ارتفاعات البرز و کوه‌های شرق تهران احاطه شده است باعث شده تا آلاینده‌های هوا از سطح شهر خارج نشده و با پدیده‌ی آلودگی هوا مواجه باشد.^{۳،۴} و به عنوان یکی از چهار شهر آلوده در ایران شناخته شود.^۵ براساس گزارشات اخیر، آلودگی هوای تهران ناشی از منابع متحرک (وسایل نقلیه موتوری) و منابع ساکن (ایستگاه‌های گاز، مبدل‌های انرژی، انرژی‌های خانگی و تجاری، صنایع و پایانه‌ها) است که اغلب ناشی از منابع متحرک می‌باشد.^۳

طبق گزارشات تهیه شده از سوی سازمان ملل متحد، ذرات معلق به عنوان مهم‌ترین آلاینده‌ی هوا بوده و بیش‌ترین تهدید را برای کلان‌شهرهایی همچون تهران به همراه داشته است.^{۶،۷} اندازه و سطح ذرات معلق، تعداد و ترکیب آن‌ها نقش مهمی را در سلامت انسان ایفا می‌کنند. اندازه ذرات معلق بر حسب میکرومتر بیان می‌شود که به صورت PM₁₀ و PM_{2.5} نمایش داده می‌شوند.^{۸،۹} ذرات معلق با قطر کمتر نسبت به ذرات معلق با قطر بیشتر از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشند.^{۸،۱۰} از اثرات ذرات معلق می‌توان به اختلال در مجاری تنفسی، اثر تشدیدکنندگی و افزایش سمیت آلوده‌کننده‌ها، افزایش آلودگی در اتمسفر و کاهش دید و تغییر اقلیم با

اثرگذاری بر بالانس تابش اشاره نمود.^{۱۰،۱۱} تحقیقات و گزارشات پیشین نشان داده است که در بین ذرات معلق، سهم ذرات معلق با قطر کم‌تر از ۲/۵ میکرومتر در آلودگی هوای تهران بیش‌تر می‌باشد.^۷ ترکیبات شیمیایی این آلاینده بسته به منبع انتشار، شیمی اتمسفر و شرایط آب و هوایی متفاوت است.^{۱۲} افزایش غلظت PM_{2.5} ممکن است سبب ایجاد بیماری‌های مزمنی همچون انسداد ریه، سرطان ریه و آترواسکلروز شود، از این‌رو، این آلاینده می‌تواند به عنوان تهدید جدی برای سلامت انسان به شمار آید.^{۱۳}

ذرات معلق تحت تأثیر تغییرات فضایی و زمانی می‌باشند که توزیع مکانی و زمانی غلظت این آلاینده تحت تأثیر شدت تغییرات آب و هوایی، شدت ترافیک، فاصله از جاده و منابع انتشار می‌تواند بسیار متغیر باشد.^{۱۴} از این‌رو، با اطلاع از توزیع مکانی و زمانی این آلاینده، می‌توان ویژگی و موقعیت هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده را فراهم نمود.^{۱۵} تاکنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی تحلیل مکانی-زمانی آلودگی هوا در نقاط مختلف تهران با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام گرفته است. تمام این تحقیقات، اهمیت تغییرات زمانی و مکانی در روند آلودگی هوا را تأکید کرده‌اند. از این‌رو، با استفاده از GIS می‌توان نمایش فضایی اطلاعات آلاینده‌ها، تحلیل‌های فضایی و درک بهتر از آن‌ها را فراهم نمود.^{۱۶،۱۷}

فنون و مدل‌های تحلیل مکانی اغلب در علوم محیط‌زیست برای شناسایی آنومالی‌های مکانی (لکه‌های داغ) آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شوند.^{۱۷} هر پدیده مکانی می‌تواند توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری کارا و مفید در تصمیم‌سازی‌ها در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای، ملی و جهانی مورد تحلیل قرار گیرد. در این زمینه، خودهمبستگی مکانی در محیط GIS می‌تواند برای شناسایی شباهت‌های پدیده‌های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع

می‌باشد. همبستگی فضایی جهانی با فرض همگن بودن منطقه‌ی مورد مطالعه قادر است داده‌های همگن را خوشه‌بندی نماید تا ارزش‌های مشابه و فضایی نزدیک به یکدیگر شناسایی گردد. باید در نظر داشت که همبستگی فضایی جهانی قادر به شناسایی خوشه‌های فردی نمی‌باشد. از این رو، لازم است جهت خوشه‌بندی هر یک از خوشه‌ها از روش همبستگی فضایی محلی نیز استفاده شود تا بتوان لکه‌های داغ (مقادیر با ارزش بالا) و لکه‌های سرد (مقادیر با ارزش بالا) را با توجه به ویژگی مکان و عارضه‌ها مشخص نمود.^{۱۹}

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مطالعه به منظور تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌ی PM_{2.5} در شهر تهران، تحلیل خودهمبستگی فضایی موران استفاده می‌شود تا علاوه بر شناخت تغییرات غلظت PM_{2.5} در مقیاس شهر تهران و ارزیابی آثار آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست، اقدام‌های هدفمند کنترلی مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر تهران به عنوان پایتخت ایران با مساحت کل بالغ بر ۷۰۰ کیلومتر مربع در بین عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶-۳۵/۸۳ و طول جغرافیایی ۵۱/۲۰-۵۱/۶۱ واقع شده است. ارتفاع این شهر به طور متوسط ۱۲۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. شهر تهران شامل ۲۲ منطقه شهری است که تحت عنوان مناطق بیست‌ودوگانه نامگذاری شده‌اند.^{۳۵}

این شهر در حال حاضر دارای ۳۸ ایستگاه پایش آلودگی هوا به صورت فعال می‌باشد که ۲۲ ایستگاه (اتوبان محلاتی، اقدسیه، پارک رز، پونک، پیروزی، تربیت مدرس، درس، ستاد بحران، شاد آباد، شریف، شهر ری - منطقه ۲۰، شهرداری منطقه ۲، شهرداری منطقه ۴، شهرداری منطقه ۱۰، شهرداری منطقه ۱۱، شهرداری منطقه ۱۶، شهرداری منطقه ۱۹، شهرداری منطقه ۲۱، صدر، گلبرگ، مسعودیه، میدان فتح) تحت نظر

جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی‌ها به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی طبق مشخصه‌های مرتبط استفاده شود^{۱۸،۲۰}. از این رو، جهت تحلیل مکانی-زمانی غلظت PM_{2.5} می‌توان از روش خوشه‌بندی فضایی در نرم افزار GIS استفاده نمود.^{۲۰} در روش خوشه‌بندی فضایی، میزان همبستگی فضایی بین نقاط همسایه اندازگیری 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.^{۲۰} روش‌های خوشه‌بندی متعددی جهت گروه‌بندی داده‌های همگن وجود دارد که از بین این روش‌ها، می‌توان به روش‌های مدل همبستگی مکانی موران، K-means، رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار (GWR) و تحلیل مؤلفه‌ی اصلی (PCA) اشاره کرد^{۱۴،۱۸،۲۱}. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه خوشه‌بندی فضایی آلاینده‌های هوا انجام گرفته است؛ به عنوان نمونه فنگ و همکاران (۲۰۱۶) جهت بررسی ویژگی مکانی-زمانی آلاینده‌ی PM_{2.5} در چین، از مدل‌های همبستگی فضایی موران استفاده کردند؛ و چو و همکاران (۲۰۱۷) نیز با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی به تحلیل فضایی-زمانی ذرات معلق در تایوان پرداختند.

در میان روش‌های مختلف تحلیل خوشه‌ای، همبستگی فضایی موران روش موفق‌تری در مطالعات زیست‌محیطی بوده، به گونه‌ای که این روش قادر است موقعیت‌های منحصر را بر اساس مقایسه با نمونه‌های مجاورشان مورد بررسی قرار دهد.^{۲۱} از این رو، همبستگی فضایی موران به عنوان روشی متداول و دقیق حتی جهت شناسایی داده‌های پرت مکانی شناخته شده است^{۲۲}. مدل همبستگی فضایی موران بر اساس قانون اول جغرافیا مطرح می‌شود که هر پدیده وابسته به پدیده‌های دیگر می‌باشد. از این رو، هر چه قدر پدیده‌ها به یکدیگر نزدیکتر باشند، میزان همبستگی بین آن‌ها قوی‌تر می‌باشد^{۱۸،۱۹}. این روش دارای دو دیدگاه جهانی و محلی

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، غلظت آلاینده‌ی PM_{2.5} در سال ۱۳۹۵ است که توسط ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و همچنین اداره‌ی کل حفاظت محیط‌زیست استان تهران به‌طور ۲۴ ساعته اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. از آنجا که داده‌های گرفته شده به‌صورت ساعتی گزارش شده بودند، جهت تحلیل فضایی-زمانی PM_{2.5}، به داده‌های ماهانه، فصلی و سالانه تبدیل شدند. برای این منظور، داده‌های ساعتی با غلظت‌های صفر و بالاتر از ۴۰۰ μg/m³ به‌علت احتمال خطا در اندازه‌گیری ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، از داده‌های خام حذف شدند.

شرکت کنترل کیفیت هوا و ۱۶ ایستگاه (پاسداران، فرمانداری شهر ری، شهید بهشتی، دانشگاه علم و صنعت، رازی، سلامت، دانشگاه تهران، پارک سرخه حصار، پارک پردیسان، ژئوفیزیک، چشمه، آتی‌ساز، شکوفه، شهرداری منطقه ۱۵، میدان امام خمینی(ره))، قائم) متعلق به اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان تهران می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های آلودگی هوای ۳۸ ایستگاه پایش آلودگی هوا در شهر تهران استفاده شده است که اسامی و مختصات جغرافیایی هر یک از ایستگاه‌ها مطابق با مطالعات انجام گرفته^{۱۶} در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای تهران

ایستگاه پایش	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ایستگاه پایش	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
اتوبان محلاتی - منطقه ۱۴	۳۵/۶۶۱۰۸۳	۵۱/۴۶۶۳۶۰	پاسداران - منطقه ۳	۳۵/۷۸۹۶۶۴	۵۱/۴۷۳۳۶۱
اقدسیه - منطقه ۱	۳۵/۷۹۵۸۷۰	۵۱/۴۸۴۱۴۰	فرمانداری شهر ری - منطقه ۲۰	۳۵/۵۹۳۰۰۶	۵۱/۴۲۷۶۹۷
پارک رز - منطقه ۲۲	۳۵/۷۳۹۸۹۰	۵۱/۲۶۷۸۹۰	شهید بهشتی - منطقه ۱	۳۵/۸۰۳۳۷۵	۵۱/۳۹۵۱۳۶
پونک - منطقه ۵	۳۵/۷۶۲۳۰۰۰	۵۱/۳۳۱۶۸۰	دانشگاه علم و صنعت - منطقه ۴	۳۵/۷۳۹۸۱۱	۵۱/۵۱۱۴۳۱
پیروزی - منطقه ۱۳	۳۵/۶۹۵۹۹۰۰	۵۱/۴۹۳۷۶۰	رازی - منطقه ۱۱	۳۵/۶۷۰۱۵۸	۵۱/۳۸۹۳۸۶
تربیت مدرس - منطقه ۶	۳۵/۷۱۷۵۱۰	۵۱/۳۸۱۵۷۰	سلامت - منطقه ۱۷	۳۵/۶۴۸۹۰۰	۵۱/۳۵۶۰۷۸
دروس - منطقه ۳	۳۵/۷۷۰۰۰۰	۵۱/۴۵۴۱۶۰	دانشگاه تهران - منطقه ۶	۳۵/۷۰۳۳۵۶	۵۱/۳۹۷۷۶۴
ستاد بحران - منطقه ۷	۳۵/۷۲۷۰۸۰	۵۱/۴۳۱۲۰۰	پارک سرخه حصار	۳۵/۷۱۸۴۶۹	۵۱/۹۷۸۶۷۲
شاد آباد - منطقه ۱۸	۳۵/۶۷۰۰۵۰	۵۱/۲۹۷۳۵۰	پارک پردیسان	۳۵/۷۳۹۹۱۴	۵۱/۶۰۷۳۹۲
شریف - منطقه ۲	۳۵/۷۰۲۲۷۰	۵۱/۳۵۰۹۴۰	ژئوفیزیک	۳۵/۷۴۶۷۶۴	۵۱/۳۸۶۶۸۳
شهر ری - منطقه ۲۰	۳۵/۶۰۳۶۳۰	۵۱/۴۲۵۷۱۰	چشمه - منطقه ۲۲	۳۵/۷۵۰۷۹۴	۵۱/۲۶۰۷۴۷
شهرداری منطقه ۲	۳۵/۷۷۷۰۸۹	۵۱/۳۶۸۱۷۵	آتی‌ساز - منطقه ۴	۳۵/۷۹۴۸۹۴	۵۱/۵۲۴۸۸۳
شهرداری منطقه ۴	۳۵/۷۴۱۸۲۰	۵۱/۵۰۶۴۳۰	شکوفه - منطقه ۱۴	۳۵/۶۸۵۷۳۶	۵۱/۴۵۰۷۶۱
شهرداری منطقه ۱۰	۳۵/۶۹۷۴۸۰	۵۱/۳۵۸۰۳۰	شهرداری منطقه ۱۵	۳۵/۶۴۱۰۷۵	۵۱/۴۷۹۹۶۴
شهرداری منطقه ۱۱	۳۵/۶۷۲۹۸۰	۵۱/۳۸۹۷۳۰	میدان امام خمینی(ره)	۳۵/۶۸۶۷۱۹	۵۱/۴۲۲۴۱۹
شهرداری منطقه ۱۶	۳۵/۶۴۴۵۸۴	۵۱/۳۹۷۶۵۷	قائم - منطقه ۱۸	۳۵/۶۵۸۲۱۷	۵۱/۳۲۸۲۲۸
شهرداری منطقه ۱۹	۳۵/۶۳۵۲۱۰	۵۱/۳۶۲۵۲۰	پاسداران - منطقه ۳	۳۵/۷۸۹۶۶۴	۵۱/۴۷۳۳۶۱
شهرداری منطقه ۲۱	۳۵/۶۹۷۷۷۳	۵۱/۲۴۳۱۱۰	فرمانداری شهر ری - منطقه ۲۰	۳۵/۵۹۳۰۰۶	۵۱/۴۲۷۶۹۷
صدر - منطقه ۳	۳۵/۷۷۸۲۳۲	۵۱/۴۲۸۶۲۳	شهید بهشتی - منطقه ۱	۳۵/۸۰۳۳۷۵	۵۱/۳۹۵۱۳۶

متغیرها می‌باشد. از این رو، GMI به منظور توصیف ویژگی یک متغیر در کل یک منطقه به کار می‌رود؛ در حالی که شاخص موران محلی (LMI) (Local Moran's I) برای کشف توزیع فضایی لکه‌های داغ و لکه‌های سرد (Cold spot) و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌های مجاورشان استفاده می‌شود^{۱۷،۲۰،۲۳}.

تحلیل خودهمبستگی فضایی عمومی (آماره موران جهانی)

آماره موران جهانی (GMI) جهت توصیف خودهمبستگی فضایی و الگوی فضایی آلاینده‌ی PM_{2.5} هوای شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت. مقدار آماره موران جهانی به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود^۱:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

به طوریکه X_i و X_j مقادیر متغیر را در مکان‌های i و j نشان می‌دهد. همچنین \bar{X} میانگین ویژگی هر ایستگاه را نشان می‌دهد. W_{ij} مقدار وزن فضایی عارضه‌های i و j می‌باشد. اگر i و j در همسایگی یکدیگر قرار گرفته باشند، مقدار W_{ij} برابر با یک می‌باشد. در صورتیکه i و j در همسایگی یکدیگر نباشند، مقدار W_{ij} صفر به دست می‌آید. S_0 نیز مجموع تمام عناصر را نشان می‌دهد.

دامنه‌ی تغییرات شاخص موران جهانی بین -۱ تا +۱ است. در صورتی که مقادیر موران معنی دار و بزرگتر از صفر باشد، همبستگی فضایی مثبت و خوشه‌ای است؛ در غیر این صورت همبستگی فضایی منفی و به صورت پراکنده می‌باشد. زمانی که $Z(I)$ صفر است، مبین الگوی تصادفی در ارزش مشاهدات می‌باشد. به طور عمده، همبستگی فضایی به مقادیر نمره‌ی Z بستگی دارد. در صورتی که مقادیر نمره‌ی Z مثبت و بالا به دست آید، خوشه‌بندی فضایی دارای ارزش بالا هستند. اما اگر نمره‌ی Z منفی و پایین به دست آید، خوشه‌بندی

همچنین جهت محاسبه‌ی میانگین ماهانه‌ی آلاینده‌ی PM_{2.5} داده‌های کمتر از ۳۶۰ ساعت به علت کمبود اطلاعات کافی، نامعتبر در نظر گرفته شد تا خطای محاسباتی کاهش یابد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، جهت تحلیل فضایی-زمانی و پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران به ترتیب از خودهمبستگی فضایی موران و روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) کمک گرفته شد. سپس جهت تحلیل لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5}، از آماره‌ی گتیس-ارد جی (Getis-Ord-Gi) استفاده شد.

تحلیل خودهمبستگی فضایی موران

به منظور تحلیل فضایی لکه‌های داغ (Hot spot) غلظت PM_{2.5}، از تحلیل خودهمبستگی فضایی موران استفاده شد. تحلیل خودهمبستگی فضایی موران قادر است اختلاف فضایی بین تمام نمونه‌ها را اندازه‌گیری کند^{۲۰}. جهت محاسبه‌ی تحلیل خودهمبستگی فضایی موران ابتدا لازم است نمره استاندارد Z (Z-score) و P-value به دست آید تا در مرحله‌ی بعد به ارزیابی و معنادار بودن تحلیل خودهمبستگی فضایی موران پرداخته شود. ارزش تحلیل خودهمبستگی فضایی موران بین ۱ و -۱ متغیر می‌باشد. زمانی که مشاهدات دارای ارزش‌های مشابه و الگوی خوشه‌ای باشند، مقدار P-value با ارزش نزدیک به عدد +۱ می‌باشد. در غیر این صورت مقدار P-value نزدیک به عدد -۱ بوده و مشاهدات به صورت پراکنده می‌باشند. همچنین در صورتی که الگوی پراکنش مشاهدات به طور تصادفی باشد، همبستگی موران صفر در نظر گرفته می‌شود^{۲۰}.

دو نوع شاخص موران جهت مشخص نمودن همبستگی فضایی بین متغیرها وجود دارد که کارایی آن‌ها از یکدیگر متفاوت می‌باشد. شاخص موران جهانی (Global Moran's I) (GMI) پارامتر جهانی جهت اندازه‌گیری همبستگی فضایی

در ادامه جهت کشف دقیق‌تر از توزیع فضایی لکه‌های داغ (Hot spot) (خوشه مکانی با مقادیر زیاد) و لکه‌های سرد (Cold spot) (خوشه مکانی با مقادیر کم) از آماره‌ی گتیس‌ارد جی (Getis-Ord-Gi) استفاده شد. زمانی یک عارضه به‌عنوان لکه داغ تلقی می‌شود که هم خودش و هم عارضه‌هایی که در مجاور آن قرار دارند، مقادیر زیادی داشته باشند.^{۲۶} زمانی که مقدار آماره‌ی گتیس-ارد جی، ± 3 ، ± 2 و ± 1 به‌دست آید، درصد سطح اطمینان به ترتیب ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته می‌شود. آماره‌ی گتیس-ارد جی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:^{۲۶}

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2}{n-1}}} \quad (5)$$

در این فرمول X_j مقدار خصیصه برای عارضه‌ی j ، W_{ij} وزن فضایی بین عارضه‌ی i و j و n تعداد کل عارضه‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که مقادیر $Z(I)$ کمتر از $1/96$ به‌دست آمد، تحلیل لکه‌های داغ فقط برای فصول سال انجام گرفت. از این‌رو، نتایج به‌دست آمده از $Gi-ZScore$ با استفاده از روش IDW پهنه‌بندی شد تا تحلیل لکه‌های داغ (Hot spot) برای فصول مختلف سال انجام شود.

وزن دهی معکوس فاصله (Inverse Distance (IDW) weighted)

در این مطالعه با توجه به اینکه در بین روش‌های درون‌یابی فضایی، درون‌یابی کریجینگ برای مقیاس ملی و درون‌یابی IDW برای مقیاس منطقه‌ای مناسب می‌باشد^{۲۷} و درون‌یابی IDW روش مناسبی جهت نمایش الگوی سرتاسری غلظت آلاینده‌ها به‌شمار می‌آید^{۲۸}، جهت پهنه‌بندی غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ از روش درون‌یابی IDW استفاده شد.

فضایی دارای ارزش پایین می‌باشند. همچنین زمانی نمره‌ی Z از نظر آماری معنی‌دار است که مقادیر آن بزرگتر مقادیر مورد انتظار $1/96$ و یا بیش از $2/58$ باشد^{۲۰}.

تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی (آماره موران محلی)

آماره موران محلی (LMI) جهت جستجوی تفاوت در غلظت‌های محلی آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ استفاده شد. سپس نتایج به‌دست آمده از LMI بر روی نقشه‌های پهنه‌بندی شده‌ی غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ نمایش داده شد تا به این طریق تفاوت در غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ در واحد مکان و زمان مشخص گردد.

مقدار موران محلی به‌وسیله‌ی رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:^{۲۰}

$$I_i = n(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (2)$$

N تعداد کل متغیرها، X_i و X_j مقادیر $PM_{2.5}$ در مکان‌های i و j و W_{ij} مقدار وزن فضایی عارضه‌های i و j را نشان می‌دهد. مقدار ضریب خودهمبستگی فضایی محلی باید بزرگتر از ضریب مورد انتظار باشد تا الگوی پراکنش فضایی مورد قبول باشد^{۲۴}. ضریب مورد انتظار موران توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:^{۲۰}

$$E(I_i) = -W / (N - 1) \quad (3)$$

آزمون اهمیت موران توسط نمره‌ی Z اندازه‌گیری می‌شود تا از آن برای آزمون معنی‌داری آماری نتایج استفاده شود. نمره‌ی Z به‌عنوان مقدار استاندارد شده‌ی I در نظر گرفته می‌شود که توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید^{۲۰،۲۵}:

$$Z_i = \frac{I - E(I)}{SD(I)} \quad (4)$$

$SD(I)$ و $E(I)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی انحراف معیار و میانگینی از I می‌باشند^{۲۵}.

نقاط همجوار می‌باشد. با توجه به اینکه مقادیر نمره‌ی Z کمتر از مقادیر مورد انتظار $1/96$ و یا بیش از $2/58$ بود، می‌توان نتیجه گرفت خوشه‌ای بودن مقادیر بدست آمده معنی‌دار نمی‌باشد.

تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی

نتایج حاصل از نقشه‌های معناداری موران محلی، خوشه‌بندی آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ و نوع آن‌ها را نمایش داد. مقدار ارزشی حاصل از این آماره با استفاده از مقدار P -value قابل تفسیر و تحلیل می‌باشد. چنانچه I_i و Z_i هر دو با مقدار P -value کمتر از $0/05$ مثبت باشند، به این معنا است که مقدار غلظت $PM_{2.5}$ در مکان i و واحدهای مجاور بالا می‌باشد. از این رو غلظت $PM_{2.5}$ در مکان i با $(High-High)$ HH نمایش داده می‌شود. اما در صورتی که I_i و Z_i هر دو منفی باشند، غلظت $PM_{2.5}$ در مکان i و واحدهای مجاور پایین بوده و غلظت $PM_{2.5}$ در مکان i با $(Low-Low)$ LL مشخص می‌شود. چنانچه I_i مثبت و Z_i منفی باشد، یعنی غلظت‌های $PM_{2.5}$ در مکان i بالاتر از واحدهای مجاور است. از این رو، مکان i با $(High-Low)$ HL نمایش داده می‌شود. در صورتیکه I_i منفی و Z_i مثبت باشد، غلظت‌های $PM_{2.5}$ در مکان i کمتر از واحدهای مجاور بوده، در نتیجه مکان i با $(Low-)$ LH نشان داده می‌شود.^{۲۰}

یکی از روش‌های درون‌یابی است که به صورت رستری می‌باشد. ارزش این سلول‌های رستری به وسیله‌ی میانگین-گیری مقادیر همسایه، محاسبه می‌شود^{۲۶} و نقاطی که با فاصله-ی یکسانی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، وزن یکسان می‌گیرند؛ از این رو به نقاط نزدیکتر وزن بیشتر و نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می‌شود^{۲۶}. از این رو، در این روش، تأثیر محلی وارد بر داده‌های نقطه‌ای با استفاده از فاصله از بین می‌رود^{۲۸}.

نتایج

خلاصه‌ای از آمار توصیفی غلظت $PM_{2.5}$ به صورت فصلی و سالانه در جدول (۲) نمایش داده شده است. طبق نتایج این جدول، بیش‌ترین غلظت $PM_{2.5}$ در شهر تهران مربوط به فصل زمستان با غلظت $36 \text{ } 39/84 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ می‌باشد و بعد از آن فصل‌های پاییز، تابستان و بهار قرار می‌گیرند.

خودهمبستگی فضایی عمومی

جدول ۳ مقادیر خودهمبستگی فضایی عمومی را برای کلیه‌ی ماه‌های سال، فصول و سال نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۳ مقادیر شاخص موران در ماه‌های فروردین، خرداد و تیر مثبت به دست آمد که نشانگر خوشه‌ای بودن نقاط همجوار می‌باشد. همچنین شاخص موران برای ماه‌های دیگر، فصول مختلف و سال منفی به دست آمد که نمایانگر پراکنده بودن

جدول ۲: توصیف آماری غلظت $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) در هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۵

فصل / سالانه	میانگین	حداقل	حداکثر
بهار	۲۶/۶۹	۱۴	۴۶/۳۳
تابستان	۳۳/۲۵	۲۰/۶۶	۴۹/۶۶
پاییز	۳۶/۸۹	۲۱/۳۳	۵۷/۵
زمستان	۳۹/۸۴	۲۴/۶۵	۵۷/۰۲
سالانه	۳۴/۱۵	۲۲/۱۶	۴۷/۱۸

شهریور (ایستگاه‌های پیروزی و گلبرگ) و آذر (ایستگاه رازی) و بهمن (پارک رز)، غلظت آلایندهی PM_{2.5} با علامت LH نمایش داده شده‌اند که نشان دهندهی مقادیر کم غلظت این آلاینده در این ایستگاه‌ها و مقادیر زیاد غلظت این آلاینده در مناطق همجوار آن‌ها می‌باشد. در ماه‌های تیر (ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۱۰ و شریف)، آذر و دی (ایستگاه‌های شهر ری) غلظت آلایندهی PM_{2.5} با علامت HH نمایش داده شده‌اند که نشان دهندهی مقادیر زیاد غلظت این آلاینده در این ایستگاه‌ها و مناطق همجوار با آن‌ها می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران در ماه‌های مختلف سال نیز نشان داد غلظت PM_{2.5} از سمت شمال به جنوب تهران افزایش یافته است، به نحوی که بیش‌ترین لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5} متعلق به مناطق جنوب تهران می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد غلظت این آلاینده در ماه‌های سرد سال بیشتر بوده است، به‌طوری که بیش‌ترین لکه‌های داغ این آلاینده متعلق به ایستگاه‌های واقع در جنوب تهران از جمله ایستگاه شهر ری، منطقه ۱۵ و سلامت می‌باشد (شکل ۱).

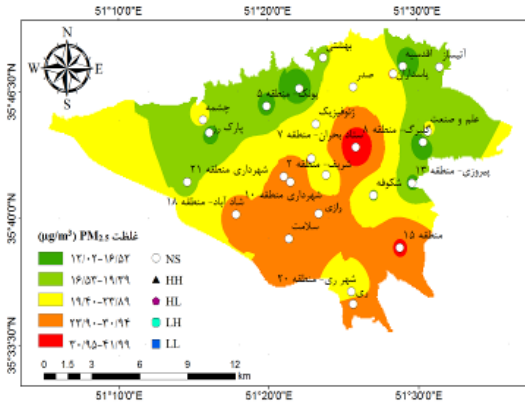
نتایج حاصل از LMI نشان داد که غلظت PM_{2.5} در دو فصل پاییز و زمستان، غلظت PM_{2.5}، در ایستگاه‌های شهر ری و مناطق همجوار با آن بالا می‌باشد. از این‌رو، غلظت PM_{2.5} در این مناطق با (HH) نمایش داده شد. غلظت PM_{2.5} در ایستگاه پونک و ایستگاه منطقه ۵ و مناطق مجاور با آن‌ها در فصل بهار پایین بوده، از این‌رو، این مناطق با (LL) نمایش داده شدند. همچنین نتایج نشان داد غلظت PM_{2.5} در ایستگاه‌های پیروزی و اقدسیه به ترتیب در دو فصل تابستان و زمستان پایین و در مناطق مجاور آن‌ها زیاد می‌باشد که غلظت PM_{2.5} در این مناطق با (LH) نمایش داده شد. با توجه به نتایج حاصل از شاخص موران محلی برای فصول مختلف سال می‌توان نتیجه گرفت بیشترین غلظت غلظت PM_{2.5} متعلق به دو فصل سرد سال (پاییز و زمستان) و مناطق جنوبی تهران می‌باشد.

جدول ۳: نتایج حاصل از آماره موران جهانی

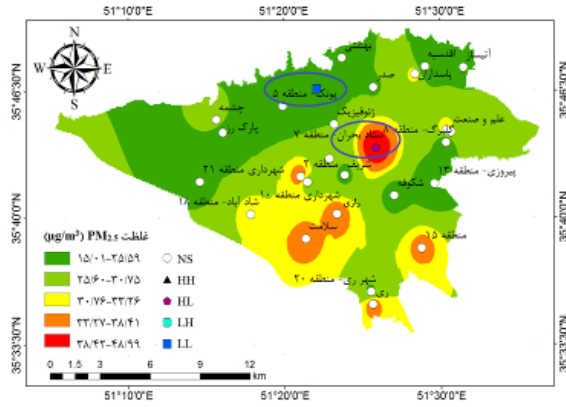
ماه/فصل	Moran I	Z(I)
فروردین	۰/۰۶	۰/۵۸
اردیبهشت	-۰/۰۸	-۰/۰۳
خرداد	۰/۰۳	۰/۰۳
تیر	۰/۰۴	۰/۴۷
مرداد	-۰/۲۱	-۱/۰۷
شهریور	-۰/۰۸	-۰/۲۳
مهر	-۰/۱۴	۰/۱۲
آبان	-۰/۰۲	-۰/۵۱
آذر	-۰/۳۸	-۱/۶۳
دی	-۰/۰۸	-۰/۲۲
بهمن	-۰/۱۰	-۰/۴۳
اسفند	-۰/۱۰	-۰/۳۲
بهار	-۰/۰۴	-۰/۰۲
تابستان	-۰/۱۵	-۰/۰۴
پاییز	-۰/۰۶	-۰/۱۲
زمستان	-۰/۱۲	-۰/۴۱
سالانه	-۰/۰۶	-۰/۱۳

نتایج حاصل از تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی (LMI) برای غلظت ماهانهی آلایندهی PM_{2.5} نشان داد که در ماه‌های اردیبهشت (ایستگاه پونک) و خرداد (ایستگاه‌های پونک، بهشتی و منطقه ۵)، آبان (ایستگاه پونک) و اسفند (ایستگاه اقدسیه)، غلظت آلایندهی PM_{2.5} با علامت LL نمایش داده شده‌اند که نشان دهندهی مقادیر کم غلظت این آلاینده در این ایستگاه‌ها و مناطق همجوار با آن‌ها می‌باشد. در ماه‌های اردیبهشت (ایستگاه ستاد بحران)، تیر (بهشتی)، آبان (ایستگاه علم و صنعت)، آذر (ایستگاه شهرداری منطقه ۱۱)، دی (ایستگاه پونک) و بهمن (ایستگاه چشمه) غلظت آلایندهی PM_{2.5} با علامت HL نمایش داده شده‌اند که نشان دهندهی مقادیر زیاد غلظت این آلاینده در این ایستگاه‌ها و مقادیر کم آن در مناطق همجوار با این ایستگاه‌ها می‌باشد. در ماه‌های

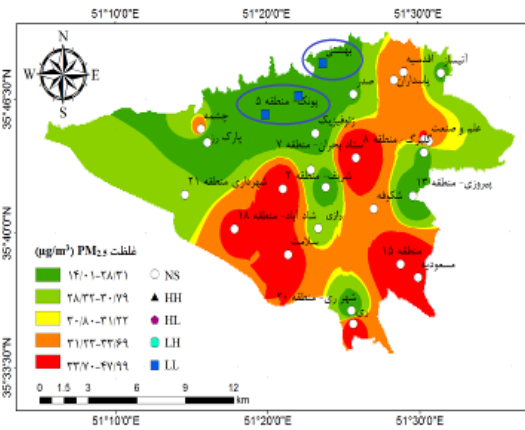
مرضیه نادیان و همکاران



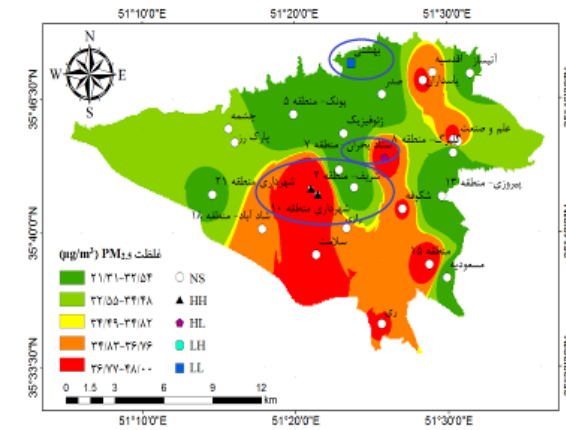
ب) اردیبهشت



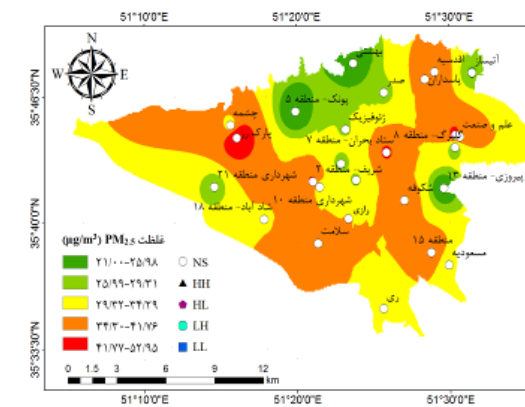
الف) فروردین



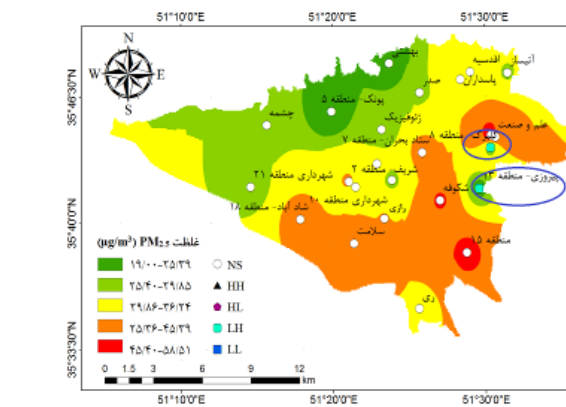
ج) تیر



پ) خرداد

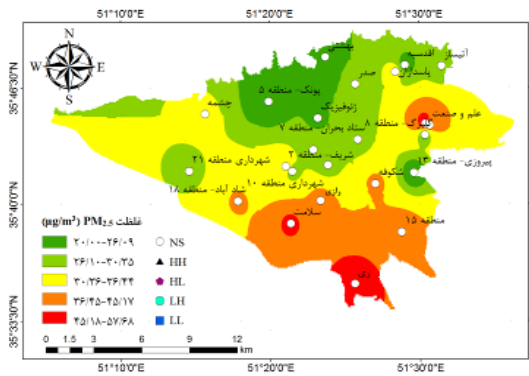


ح) شهریور

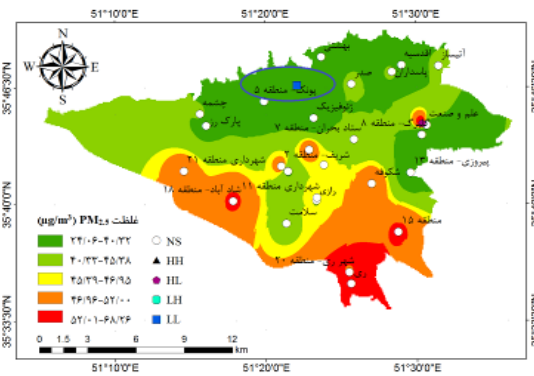


چ) مرداد

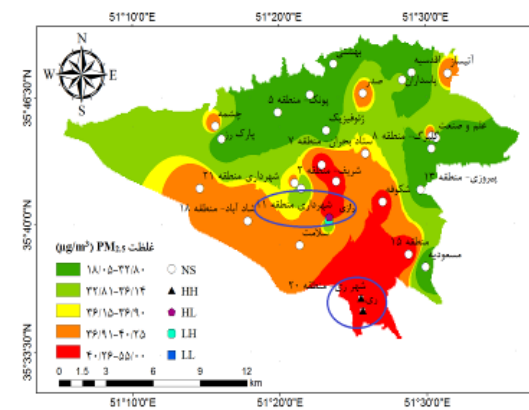
کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلایندهی $PM_{2.5}$ (مطالعه موردی: شهر تهران)



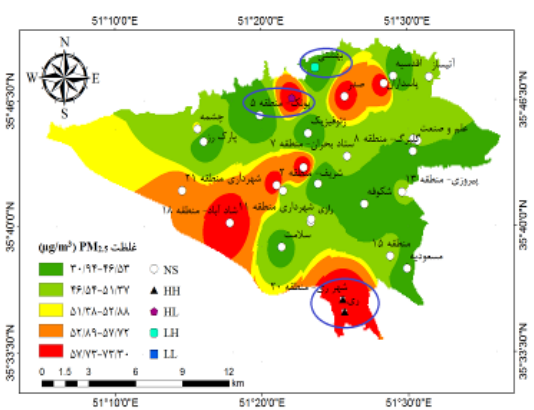
د) آبان



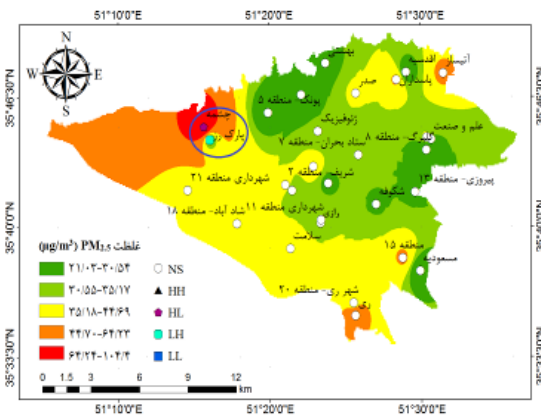
خ) مهر



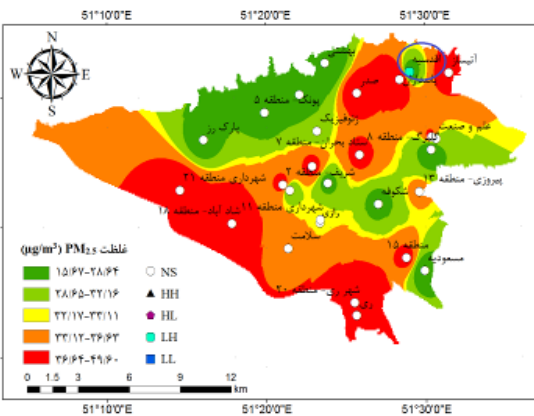
ر) رازی



ز) آذر



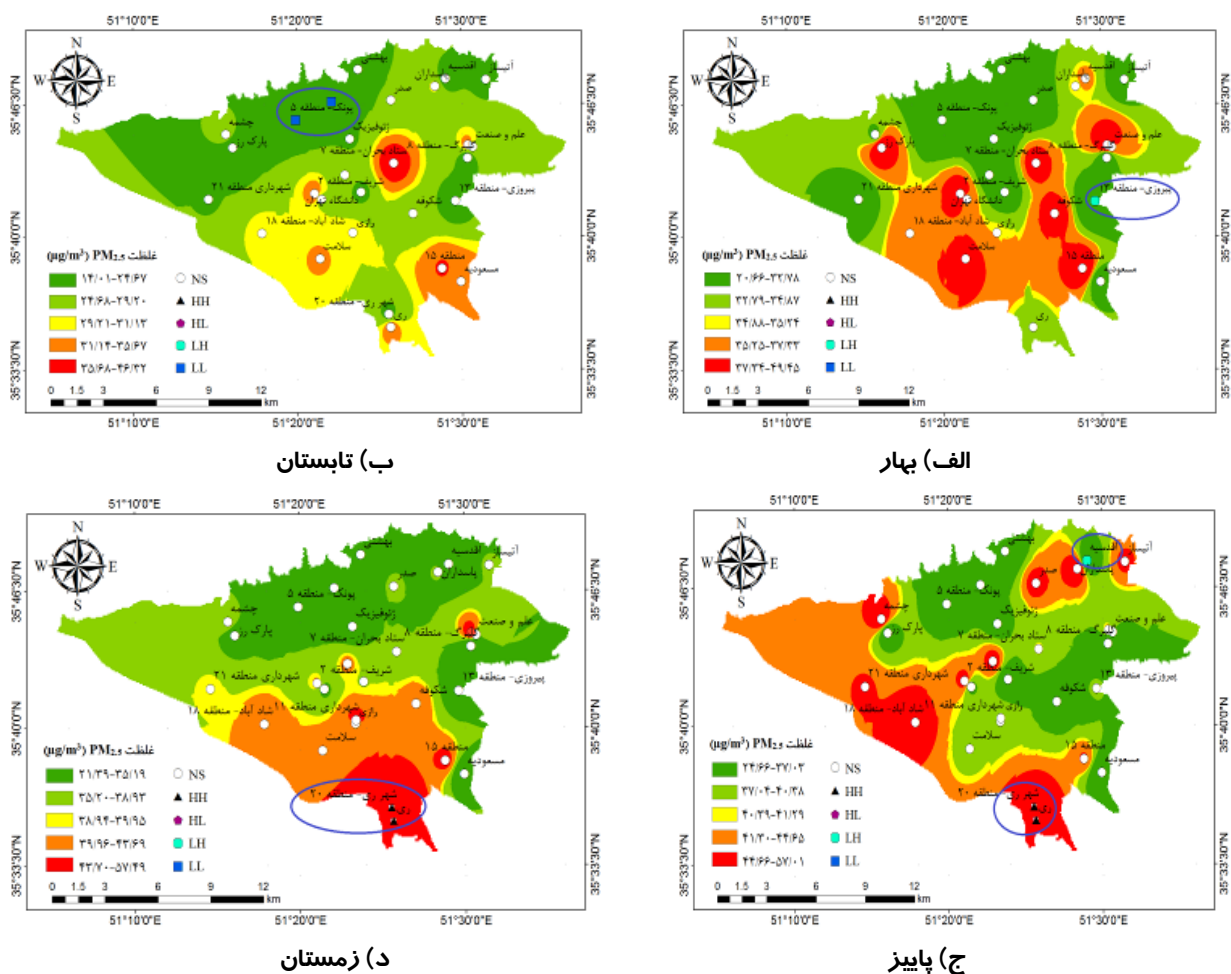
ی) اسفند



ه) بهمن

شکل ۱: پهنه‌بندی غلظت $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران در ماه‌های مختلف سال و تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی

توضیحات شکل: (High-High) HH ، (High-Low) HL ، (Low-High) LH ، (Low-Low) LL ، و (Not Significant) NS

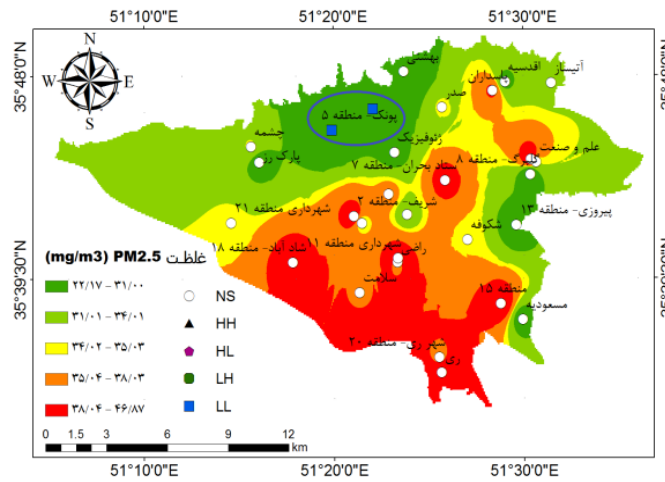


شکل ۲: پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران در فصول مختلف سال و تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی
توضیحات شکل: NS (Not Significant) و LL (Low-Low) ، LH (Low-High) ، HI (High-Low) ، HH (High-High)

نتایج حاصل از LMI نشان داد که غلظت PM_{2.5} در سال ۱۳۹۵ در ایستگاه پونک، شهرداری منطقه ۲ و مناطق مجاور با آن‌ها در پایین بوده، از این رو این مناطق با (LL) نمایش داده شدند. نتایج پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۵ نیز نشان داد غلظت PM_{2.5} از سمت شمال به جنوب تهران روند افزایشی دارد به نحوی که بیشترین لکه‌های داغ این آلاینده متعلق به ایستگاه‌های مناطق جنوبی تهران از جمله ایستگاه شهر ری و منطقه ۱۵ می‌باشد (شکل ۳).

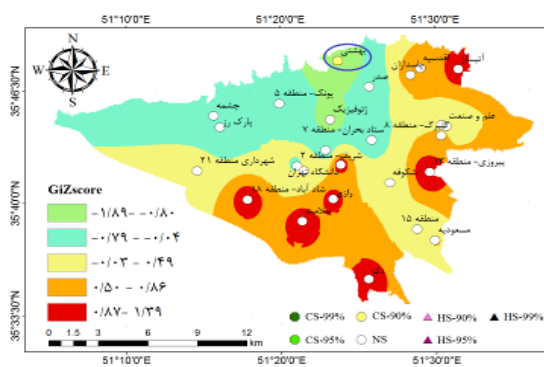
نتایج پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران در فصول مختلف سال نیز نشان داد بیشترین لکه‌های داغ غلظت PM_{2.5} متعلق به قسمت‌های جنوب و جنوب غرب تهران می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد غلظت این آلاینده در دو فصل سرد سال افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین لکه‌های داغ این آلاینده متعلق به ایستگاه‌های واقع در جنوب و جنوب غرب تهران از جمله ایستگاه شهر ری، منطقه ۱۵، سلامت و شادآباد می‌باشد (شکل ۲).

کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلایندهی PM_{2.5} (مطالعه موردی: شهر تهران)

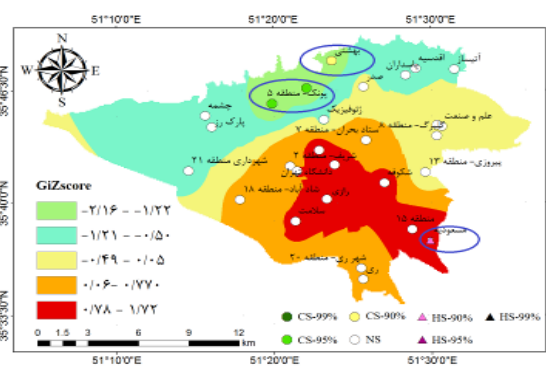


شکل ۳: پهنه‌بندی غلظت PM_{2.5} در هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۵ و تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی

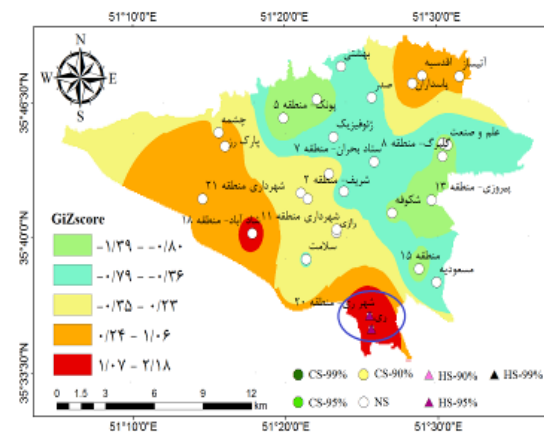
توضیحات شکل: (High-High) HH، (High-Low) HL، (Low-High) LH، (Low-Low) LL و (Not Significant) NS



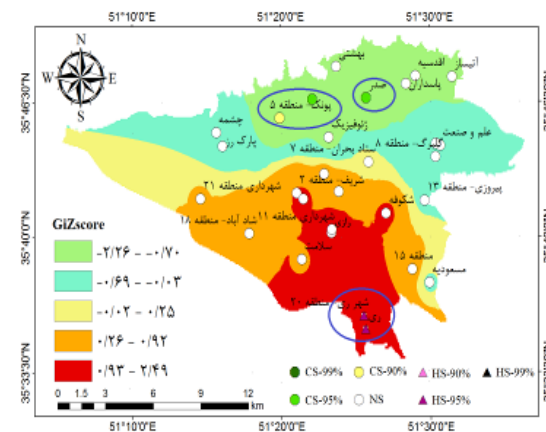
ب) فصل تابستان



الف) فصل بهار



د) فصل زمستان



ج) فصل پاییز

شکل ۴: لکه‌های داغ آلاینده PM_{2.5} هوای شهر تهران در فصول مختلف سال

توضیحات شکل: (Hot Spot) HS، (Cold Spot) CS و (Not Significant) NS

آنالیز لکه‌های داغ (Hot spot)

شکل ۵ نتایج به دست آمده از آماره‌ی گتیس-ارد جی (Getis-Ord-Gi) در شناسایی لکه‌های داغ غلظت $PM_{2.5}$ در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در فصل بهار، لکه‌های داغ با سطح اطمینان ۹۰٪ متعلق به ایستگاه مسعودیه است و در فصل زمستان و پاییز، لکه‌های داغ با سطح اطمینان ۹۵٪ متعلق به ایستگاه‌های شهر ری می‌باشند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت بیشترین لکه‌های داغ غلظت $PM_{2.5}$ متعلق به دو فصل سرد سال (پاییز و زمستان) و در مناطق جنوبی تهران از جمله شهر ری می‌باشد؛ به طوری که لکه‌های سرد غلظت $PM_{2.5}$ با سطح اطمینان ۹۰٪، ۹۵ درصد متعلق به مناطق شمالی تهران می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی مقادیر به دست آمده از Z-Score نیز نشان داد لکه‌های داغ غلظت $PM_{2.5}$ از سمت شمال به جنوب تهران روند افزایشی دارد (شکل ۴).

بحث

در مطالعه‌ی حاضر، جهت تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران از روش خوشه‌بندی فضایی استفاده شد تا لکه‌های داغ غلظت $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران مشخص گردد. باید در نظر داشت تحلیل خودهمبستگی فضایی موران ابزار کارآمدی برای ارتقای تصمیم‌گیری و ارزیابی مدیریت تصمیم‌گیری می‌باشد. از این رو، شناخت مناطقی که معرفی از غلظت $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران می‌باشند، می‌تواند مورد توجه برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد تا به این طریق اقدامات مؤثری را جهت کاهش لکه‌های داغ $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران انجام دهند.

در این مطالعه به منظور شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران از آماره‌ی موران جهانی، آماره‌ی موران محلی و آماره‌ی گتیس-ارد جی استفاده شد. با توجه به

اینکه شدت خوشه‌بندی فضایی در سه آماره مذکور با استفاده از نمره‌ی Z قابل تعریف است؛ آماره‌ی موران جهانی روش کارآمدی جهت شناسایی لکه‌های داغ در سطح شهر تهران شناخته نشد. با توجه به اینکه روش آماره‌ی موران جهانی اطلاعاتی در مورد مکان خوشه‌بندی فضایی ارائه نمی‌دهد، لازم بود از آماره‌ی موران محلی و آماره‌ی گتیس-ارد جی استفاده شود تا لکه‌های داغ غلظت $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران در زمان‌های مختلف مشخص شود. نتایج حاصل از آماره‌ی موران محلی غلظت ماهانه‌ی آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ نشان داد در ماه‌های تیر (ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۱۰ و شریف)، آذر و دی (ایستگاه‌های شهر ری) غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ با علامت HH نمایش داده شده‌اند که نشان دهنده‌ی مقادیر زیاد غلظت این آلاینده در این ایستگاه‌ها و مناطق همجوار با آن‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از خوشه‌بندی فضایی غلظت آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ و پهنه‌بندی غلظت $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران نشان داد که غلظت این آلاینده در دو فصل پاییز و زمستان، در ایستگاه‌های شهر ری و مناطق همجوار با آن بالا می‌باشد. نتایج حاصل از آمار توصیفی نیز نشان داد بیشترین غلظت $PM_{2.5}$ در شهر تهران به ترتیب مربوط به دو فصل زمستان و پاییز با غلظت‌های $39/84 \mu g/m^3$ و $36/8 \mu g/m^3$ می‌باشد که با توجه نتایج حاصل از آمار توصیفی و پهنه‌بندی غلظت $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران می‌توان نتیجه گرفت غلظت این آلاینده در سطح شهر تهران بالاتر از حد استاندارد تعیین شده توسط WHO^{۲۹} ($10 \mu g/m^3$) قرار دارد. از این رو، با توجه به نتایج آماره موران محلی، آمار توصیفی و پهنه‌بندی غلظت $PM_{2.5}$ در هوای شهر تهران می‌توان نتیجه گرفت بیشترین لکه‌های داغ آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ متعلق به دو فصل سرد سال و در مناطق جنوبی تهران از جمله ایستگاه‌های شهر ری، سلامت و منطقه ۱۵ می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آماره‌ی گتیس-ارد جی نیز نشان داد بیشترین لکه‌ی داغ آلاینده‌ی $PM_{2.5}$ با سطح اطمینان ۹۵٪ درصد در مناطق جنوبی تهران

مشخص کنند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که بیشترین لکه‌ی داغ PM_{2.5} متعلق به فصل بهار و کمترین آن متعلق به فصل تابستان بود. از این‌رو، با توجه به مطالعات پیشین و نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت آماره‌ی موران محلی و گنیس-ارد جی روش‌های کارآمدی در شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌ی PM_{2.5} در سطح شهر تهران می‌باشند. همچنین نتایج مطالعات پیشین نشان داد در مدیریت کاهش لکه‌های داغ آلاینده‌ی PM_{2.5} در سطح شهر تهران عوامل متعددی از جمله کاهش حجم ترافیک توسط برنامه‌ریزان شهری باید در نظر گرفته شود زیرا غلظت این آلاینده متأثر از شدت تابش و تغییرات آب و هوایی می‌باشد. به‌طوری‌که سهم مکان بر روی تغییرات غلظت این آلاینده ناچیز است و عوامل متعددی از جمله حجم ترافیک شهری، صنایع و اثرات واضح هواشناسی در تغییرات غلظت این آلاینده دخیل می‌باشد^۱. از این‌رو، لازم است اقدامات مؤثری از جمله افزایش وسایل نقلیه عمومی، افزایش فضای سبز و کاهش خودروهای فرسوده توسط برنامه‌ریزان شهری انجام گیرد تا به این طریق کیفیت بهداشتی هوای تهران افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

کسب آمار و اطلاعات دقیق و تحلیل صحیح آلاینده‌های مختلف هوای شهر تهران به عنوان مهم‌ترین کلان‌شهر کشور می‌تواند اولین گام برای برطرف کردن مشکل آلودگی هوای شهر تهران باشد که سال‌هاست به عنوان معضلی مهم، مدیران اجرایی را با چالشی مهم روبرو کرده است. در این پژوهش تلاش شد تا با استفاده از روش‌های مختلف، الگوی مکانی آلاینده PM_{2.5} در هوای شهر تهران به عنوان مهم‌ترین و پرخطرترین آلاینده فعلی هوای شهر مشخص شود. نتایج روش‌های مختلف استفاده شده در این پژوهش همه نشان داد که مناطق جنوبی شهر به‌ویژه مناطق محدوده شهر ری دارای بار آلودگی بیشتری است. از این‌رو، این نتایج با قطعیت قابل

(ایستگاه‌های شهر ری) قرار گرفته‌اند و این مناطق به‌عنوان آلوده‌ترین مناطق شناخته شدند.

نتایج به دست آمده در این پژوهش توسط نتایج مطالعات متعدد دیگری نیز تایید می‌شود به عنوان نمونه مطالعات شرعی‌پور و بیدختی (۱۳۹۳) نشان داد که غلظت ذرات معلق از سمت شمال به جنوب و همچنین از سمت شرق به غرب تهران افزایش می‌یابد به‌طوری‌که ایستگاه‌های غرب و جنوب غرب تهران به‌خصوص ایستگاه شادآباد دارای بیشترین لکه‌ی داغ غلظت PM_{2.5} می‌باشند. ایشان طی مطالعات خود، وزش بادهای غالب با جهت جنوب غربی از نواحی بیابانی اطراف تهران را عامل مؤثر در افزایش لکه‌های داغ ذرات معلق در جنوب تهران معرفی نمودند^۶. علیزاده و همکاران (۲۰۱۶)، طی مطالعات خود در رابطه با تغییرات مکانی-زمانی آلاینده‌ی PM_{2.5}، مناطق جنوبی و غربی تهران را به‌ترتیب آلوده‌تر از مناطق شمالی و شرقی شناسایی کردند^{۱۲}. شهبازی و همکاران (۲۰۱۶) نیز طی مطالعات خود، پالایشگاه نفت تهران را به‌عنوان منبع انتشار این آلاینده در جنوب تهران عنوان کردند^۳. نتایج این مطالعات پیشین با مطالعه‌ی حاضر مطابقت دارد. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت بیشترین لکه‌های داغ ذرات معلق PM_{2.5} متعلق به مناطق جنوبی تهران می‌باشد. طبق مطالعات انجام شده توسط بهاری و همکاران (۱۳۹۴) نیز بیشترین لکه‌ی داغ آلاینده‌ی PM_{2.5} در فصل پاییز شناسایی شد. ایشان در مطالعات خود علت بالا بودن ذرات معلق PM_{2.5} در فصل پاییز را اثر پدیده‌ی وارونگی و روند کاهشی دما اعلام نمودند^۷. علیزاده و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعات خود، وارونگی دما در فصل زمستان را به‌عنوان پارامتر اثرگذار در افزایش لکه‌های داغ این آلاینده معرفی نمودند. ونگ و فنگ (۲۰۱۶) نیز جهت بررسی ویژگی مکانی-زمانی و عوامل مؤثر بر غلظت آلاینده‌ی PM_{2.5} در بوهای ریم (Bohai Rim) از مدل همبستگی مکانی موران استفاده نمودند تا به این طریق توزیع فضایی لکه‌های داغ و لکه‌های سرد آلاینده‌ی PM_{2.5}

پیوست

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران با همکاری اداره حفاظت محیط‌زیست استان تهران، غلظت آلاینده‌های هوای تهران را به‌صورت روزانه از طریق سایت شرکت کنترل کیفیت هوا به اطلاع عموم مردم می‌رساند.

<http://airnow.tehran.ir/home/DataArchive.aspx>

قبولی می‌تواند مورد استفاده برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد. به هر حال، این پژوهش تنها برای یک آلاینده انجام شده است و نیاز است وضعیت سایر آلاینده‌ها نیز مشخص شود تا شناخت بهتری از وضعیت آلودگی هوای شهر تهران به دست آید.

References

1. Amini H, Hosseini V, Schindler C, Hassankhany H, Yunesian M, Henderson SB, Künzli N. Spatiotemporal description of BTEX volatile organic compounds in a Middle Eastern megacity: Tehran Study of Exposure Prediction for Environmental Health Research (Tehran SEPEHR). *Environ Pollut.* 2017; 226:219-29.
2. Khaniabadi YO, Polosa R, Chuturkova RZ, Daryanoosh M, Goudarzi G, Borgini A, Tittarelli A, Basiri H, Armin H, Nourmoradi H, Babaei AA. Human health risk assessment due to ambient PM10 and SO₂ by an air quality modeling technique. *Process Saf Environ Prot.* 2017; 111:346-54.
3. Shahbazi H, Taghvaei S, Hosseini V, Afshin H. A GIS based emission inventory development for Tehran. *Urban Climate.* 2016; 17:216-29.
4. Pahlavani P, Sheikhan H, Bigdeli B. Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran. *Atmos Environ.* 2017; 167:254-69.
5. Halimi M, Farajzadeh M, Zarei Z. Modeling spatial distribution of Tehran air pollutants using geostatistical methods incorporate uncertainty maps. *Pollution.* 2016; 2(4):375-86.
6. Arhami M, Hosseini V, Shahne MZ, Bigdeli M, Lai A, Schauer JJ. Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran. *Atmos Environ.* 2017; 153:70-82.
7. Bahari RA, Abaspour RA, Pahlavani P. Zoning of Particulate Matters (PM) Pollution Using Local Statistical Models in GIS (Case Study: Tehran Metropolises). *J. Geomat. Sci. Technol.* 2016; 5(3):165-74. [in Persian].
8. Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environ Pollut.* 2008; 151(2):362-7.
9. Sharma M, Maloo S. Assessment of ambient air PM 10 and PM 2.5 and characterization of PM 10 in the city of Kanpur, India. *Atmos Environ.* 2005; 39(33):6015-26.
10. Fang C, Wang Z, Xu G. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China: A city-level perspective analysis. *J Geogr Sci.* 2016; 26(11):1519-32.
11. Juneng L, Latif MT, Tangang FT, Mansor H. Spatio-temporal characteristics of PM₁₀ concentration across Malaysia. *Atmos Environ.* 2009; 43(30):4584-94.
12. Alizadeh-Choobari O, Bidokhti AA, Ghafarian P, Najafi MS. Temporal and spatial variations of particulate matter and gaseous pollutants in the urban area of Tehran. *Atmos Environ.* 2016; 141:443-53.
13. MohseniBandpi A, Eslami A, Shahsavani A, Khodaghohi F, Alinejad A. Physicochemical characterization of ambient PM 2.5 in Tehran air and its potential cytotoxicity in human lung epithelial cells (A549). *Sci Total Environ.* 2017; 593:182-90.
14. Chu HJ, Huang B, Lin CY. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM₁₀-PM_{2.5} relationship. *Atmos Environ.* 2015; 102:176-82.
15. O'Leary B, Reiners JJ, Xu X, Lemke LD. Identification and influence of spatiotemporal outliers in urban air quality measurements. *Sci Total Environ.* 2016; 573:55-65.
16. Sharipour Z, AkbariBidokhti AA. Investigation of spatial and temporal distributions of air pollutants over Tehran in cold months of 2011-2013. *J Environ Sci Technol.* 2014; 16(1):149-166. [in Persian].
17. Zhang C, Luo L, Xu W, Ledwith V. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *Sci Total Environ.* 2008; 398(1):212-21.
18. Peeters A, Zude M, Käthner J, Ünlü M, Kanber R, 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. *Comput Electron Agric.* 2015; 111:140-50.
19. Dogru AO, David RM, Ulugtekin N, Goksel C, Seker DZ, Sözen S. GIS based spatial pattern analysis: Children with Hepatitis A in Turkey. *Environ Res.* 2017; 156:349-57.

20. Wang ZB, Fang CL. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM 2.5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration. *Chemosphere*. 2016; 148:148-62.
21. Yuan Y, Cave M, Zhang C. Using Local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London. *Appl Geochem*. 2017.
22. Li W, Xu B, Song Q, Liu X, Xu J, Brookes PC. The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China. *Sci Total Environ*. 2014; 472:407-20.
23. Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geogr Anal*. 1995; 27(2):93-115.
24. Hakimdost Y, Rastegar M, Pourzeidi A, Hatami H. Analysis of the Climate Drought and Its Effects on Spatial Patterns of Location in Rural Settlement (Case Study Villages in Mazandaran Province). *J Geogr Environ Hazards*. 2014; 3(3), 61-76. [in Persian].
25. Dai X, Guo Z, Zhang L, Li D. Spatio-temporal exploratory analysis of urban surface temperature field in Shanghai, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2010; 24(2):247-57.
26. Gemmer M, Becker S, Jiang T. Observed monthly precipitation trends in China 1951–2002. *Theor Appl Climatol*. 2004; 77(1):39-45.
27. Zhang H, Tripathi NK. Geospatial hot spot analysis of lung cancer patients correlated to fine particulate matter (PM_{2.5}) and industrial wind in Eastern Thailand. *J Clean Prod*. 2018; 170:407-24.
28. Meng Y, Cave M, Zhang C. Spatial distribution patterns of phosphorus in top-soils of Greater London Authority area and their natural and anthropogenic factors. *Appl Geochem*. 2017.
29. Gholampour A, Nabizadeh R, Hassanvand MS, Taghipour H, Faridi S, Mahvi AH. Investigation of the ambient particulate matter concentration changes and assessing its health impacts in Tabriz. *Ir.J. Health. Environ*. 2015; 7(4):541-56. [In Persian].

Application of Moran's / Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City)

Marzieh Nadian¹, Rouhollah Mirzaei^{1*}, Saeed Soltani Mohammadi²

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Iran

2. Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran

* E-mail: rmirzaei@kashanu.ac.ir

Received: 29 Nov. 2017 ; Accepted: 15 Apr. 2018

ABSTRACT

Background and Objectives: PM_{2.5} particulate matter is one of the major air pollutants in cities of Iran especially Tehran, which threaten health of Iranian people due to numerous health hazards. Risk levels of these particulate depend on spatial-temporal changes in the air. Hence, this study aimed spatial-temporal analysis of PM_{2.5} concentration in Tehran's air using the Geographic Information System.

Material and methods: Hourly data of PM_{2.5} concentration was collected in 2016-2017 from 38 air pollution monitoring stations and was analyzed monthly, seasonally and annually. Inverse Distance Weighting interpolation method was used in order to present concentration maps of the PM_{2.5}. Existence of spatial autocorrelation in data was analyzed by Moran's I and data clustering was accomplished by Global and Local Moran's I and finally Getis-Ord-Gi index was used to determine hot spots of this pollutant in Tehran.

Results: Results of concentration maps of PM_{2.5} and global and local spatial autocorrelation with PM_{2.5} concentration hot spot analysis showed that the concentration of this pollutant has an incremental mode from the north to the south of Tehran so that areas in south of Tehran especially Ray stations were the most polluted areas in Tehran. In addition, results showed that the concentration of this pollutant was more in the two colder seasons so that most hot spots were identified in these seasons.

Conclusion: Using several spatial analyses simultaneously showed that Tehran can be separated into two parts of non-polluted north and polluted south, which this issue should be considered by urban planners to improve Tehran's air quality.

Keywords: PM_{2.5} pollutant, Global Moran's I, Local Moran's I, Hotspots