



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

doi: <https://dx.doi.org/10.22067/jgrd.2022.71862.1059>

مقاله پژوهشی - مطالعه موردی

مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، سال نوزدهم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، شماره پیاپی ۳۷

## شناسایی و پهنه‌بندی نقاط داغ آلاینده دی اکسید نیتروژن هوای مشهد

رضا اسماعیلی (دکتری آب و هواشناسی، معاونت محیط‌زیست و خدمات شهری شهرداری مشهد، ایران، نویسنده مسئول)

[r.esmaili.n@gmail.com](mailto:r.esmaili.n@gmail.com)

محمد پذیرا (کارشناس ارشد بهداشت محیط، معاونت محیط‌زیست و خدمات شهری شهرداری مشهد، ایران)

[m\\_pazira@yahoo.com](mailto:m_pazira@yahoo.com)

صص ۳۸۱ - ۳۵۹

### چکیده

دی اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ ) یکی از آلاینده‌های معیار هوا محسوب می‌شود که علاوه بر اثرات سوء بهداشتی، پیش‌نیاز تشکیل ترکیبات خطرناک جوی نیز است. در پژوهش حاضر براساس ۸۴ نقشه ماهانه که از حداکثر تعداد ایستگاه‌های کیفیت هوا با طولانی‌ترین دوره آماری ممکن ترسیم شده است، چهار نقشه فصلی پراکنش این آلاینده برای مشهد تهیه شد. سپس با استفاده از شاخص آماری گتیس-ارد-جی ( $\text{Getis-Ord-Gi}$ ) نقاط داغ روی نقشه‌های فصلی شناسایی شد. در ادامه با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی، پهنه‌بندی نواحی همگن  $\text{NO}_2$  شهر مشهد به دست آورده شد. طبق نتایج به دست آمده، الگوی مکانی تشکیل هسته نقاط داغ در تمامی فصول مشابه با هم است و اکثر مناطق شرق و شمال شرق مشهد کانون غلظت‌های زیاد این آلاینده است. از لحاظ غلظت  $\text{NO}_2$  سطح شهر مشهد را می‌توان به سه پهنه یا منطقه همگن تفکیک کرد. منطقه ۱ با غلظت متوسط، ۲۴ درصد از مساحت شهر را در نواحی جنوب و جنوب غربی مشهد در بر گرفته است. منطقه ۲ دارای کمترین غلظت بوده و نیمی از مساحت شهر (۵۰ درصد) که عمدتاً منطبق بر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

نیمه غربی است، در این پهنه قرار دارد و پهنه ۳ یا منطقه دارای غلظت زیاد، مناطقی از شرق و شمال شرق مشهد را در بر می‌گیرد. در واکاوای دلایل غلظت زیاد در پهنه ۳، می‌توان به مواردی همچون تراکم بیشتر جمعیت نسبت به مناطق دیگر، ضعف زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل شهری، بافت فرسوده شهری، وسایل نقلیه موتوری غالباً مستهلک و دودزا، مجاورت با واحدهای تولیدی و صنعتی حاشیه شهر اشاره کرد.

کلیدواژه‌ها: دی اکسید نیتروژن، مشهد، نقاط داغ، پهنه‌بندی، شاخص گتیس-ارد-جی.

#### ۱. مقدمه

رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، گسترش شهرها، پیشرفت صنعت و افزایش حمل و نقل موتوری در اکثر نقاط جهان به‌ویژه کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه آلودگی هوا را به معضل بزرگ زیست‌محیطی تبدیل کرده است. از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های هوای شهرها می‌توان به ذرات معلق، مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ازن اشاره کرد. براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO)، آلودگی هوا به‌عنوان یکی از ده عامل مهم افزایش مرگ و میر در دنیا مطرح است؛ به‌طوری‌که میزان مرگ و میر ناشی از آن سالانه حدود هفت میلیون نفر گزارش شده است. امروزه زندگی بیش از یک میلیارد نفر از مردم دنیا به‌دلیل آلودگی هوای شهری در معرض تهدید است (جولایی، پیروی، اسماعیلی، کتابی و متعلمی، ۱۳۹۶، ص. ۳۴؛ خرسندی، امینی، کارگر و موسوی مغانجوقی، ۱۳۹۱، ص. ۷۶۷؛ کیم، کبیر و کبیر، ۲۰۱۵، ص. ۴۴). در سراسر جهان آلودگی هوا عامل ۲۵ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از سرطان ریه، ۱۷ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از عفونت حاد تنفسی تحتانی، ۱۶ درصد از کل مرگ‌ها به علت سکته مغزی، ۱۵ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از بیماری ایسکمیک قلب، ۸ درصد از کل مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از انسدادی مزمن ریوی برآورد شده است (ناندا، کانت، گاپتا و میترا، ۲۰۱۸، ص. ۳۳۹).

1. Kim, Kabir & Kabir
2. Nanda, Kant, Gupta & Mitra

در میان آلاینده‌های اصلی هوا، اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) ارتباط نزدیکی با مصرف سوخت‌های فسیلی توسط انسان دارد؛ به نحوی که در ۲۰ سال گذشته نرخ انتشار  $\text{NO}_x$  در مقایسه با سایر آلاینده‌های هوا بیشتر بوده است. در کشور چین هم‌زمان با توسعه اقتصادی و مصرف مداوم از منابع طبیعی مختلف، سطح تولید آلاینده‌های ثانویه از جمله ذرات معلق ( $\text{PM}_{10}$ )، ازن ( $\text{O}_3$ ) و دی‌اکسید نیتروژن به‌طور درخور توجهی در مناطق شهری افزایش یافته است. مطالعات نشان داده است که آلاینده  $\text{NO}_x$  به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم آلودگی منطقه‌ای جو و کاهش کیفیت محیط‌زیست مطرح است؛ به نحوی که نقش مهمی در تشکیل ازن ( $\text{O}_3$ )، تروپوسفر، نترات پراکسی استیل (PAN) و آئروسول‌ها دارد.  $\text{NO}_x$  شامل ترکیبات متنوعی از جمله نیتروز اکساید ( $\text{N}_2\text{O}$ )، نیتریک اکساید ( $\text{NO}$ ،  $\text{NO}_2$ )، دی‌نیتروژن تری اکساید ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ) و دی‌نیتروژن تتراکساید ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ) است که در این میان،  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  به‌عنوان مهم‌ترین ترکیبات  $\text{NO}_x$  در جو مطرح است که از طریق تولید اسید نیتریک و نترات به وسیله اکسیداسیون  $\text{NO}_2$  (از طریق فتو اکسیداسیون  $\text{NO}$  هیدروکربن‌ها (HC) و ازن ( $\text{O}_3$ ))، بر سلامت انسان و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد.  $\text{NO}$  می‌تواند سبب تحریک سیستم تنفسی شود. همچنین از طریق اتصال به هم<sup>۱</sup> خون، ماده سمی نیتروزه‌موگلوبین تولید کند.  $\text{NO}_2$  می‌تواند سیستم تنفسی را به شدت تحریک کند و منجر به نیتراتاسیون هم خون شود و از نظر زیست‌محیطی از  $\text{NO}$  مضرتر است؛ زیرا موجب باران اسیدی می‌شود (وانگ، وانگ، تان و فانگ<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰، ص. ۱؛ ژانگ، گنگ و وانگ<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲، ص. ۲۸۵۸؛ ژانگ، استریس و هی<sup>۴</sup>، ۲۰۰۷، ص. ۲؛ وارشنی و سینگ<sup>۵</sup>، ۲۰۰۳، ص. ۱۲۸).

بررسی‌های متعدد انجام‌شده روی ساکنان مناطق نزدیک به معابر اصلی در زمینه تأثیر آلاینده‌های متداول هوای شهر از جمله  $\text{CO}_2$ ،  $\text{CO}$ ،  $\text{NO}_x$ ،  $\text{SO}_2$ ، ذرات معلق و... نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض طولانی این آلاینده‌ها خطر مرگ و میر و ابتلا به بیمارهای قلبی و

1. heme
2. Wang, Wang, Tan & Fang
3. Zhang, Geng & Wang
4. Zhang, Streets & He
5. Varshney & Singh

ریوی را افزایش می‌دهد. در همین ارتباط نتایج مطالعه‌ای، افزایش غلظت آلاینده‌های  $\text{NO}_2$  و  $\text{NO}_x$  در مناطق نزدیک به جاده‌ها و معابر اصلی شهرها را گزارش داد (کو، ۲۰۲۰، ص. ۳). مطالعات نشان می‌دهد غلظت زیاد  $\text{NO}_2$  در مناطق شهری باعث سرطان برونش و سرطان ریه و ایجاد اثرات شدید روی بیماران مبتلا به آسم می‌شود. در ۱۵ کشور اتحادیه اروپا متوسط هزینه‌های پزشکی-اجتماعی ناشی از آلودگی  $\text{NO}_2$  در هوا تقریباً ۴/۸۵ میلیارد دلار در هر تن برآورد شده است؛ به همین دلیل و به منظور کاهش هزینه‌های اجتماعی این آلاینده، بسیاری از کشورها از جمله کشورهای اتحادیه اروپا اقدام به برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در این زمینه از طریق توافق نامه سیاست یکپارچه زیست‌محیطی در بخش‌های حمل و نقل، صنایع و انرژی در سطوح منطقه‌ای و محلی کرده‌اند. علاوه بر این، از سال ۲۰۱۳ کشور چین از طریق نصب کاتالیست‌های تجهیزات کاهش دهنده ( $\text{SCR}^2$ ) در نیروگاه‌ها به منظور کاهش سطح  $\text{NO}_2$  به‌عنوان یکی از برنامه‌های کنترل آلودگی هوا اقدام کرده است (ریا، پارک و جون<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹، ص. ۲؛ سی‌ای‌سی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳، ص. ۲؛ تکنولوژی محیط‌زیست ای‌ای‌آ<sup>۵</sup>، ۲۰۰۵، ص. ۱۴).

## ۲. پیشینه تحقیق

در حال حاضر، پایش و بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی کیفیت هوا از سه طریق امکان‌پذیر است: مطالعات بر مبنای سنجش از راه دور و با استفاده از عمق نوری آئروسول ( $\text{AOD}^6$ )، مطالعات با استفاده از ایستگاه‌های پایش زمینی و در نهایت مطالعات بر پایه مدل-سازی که تکمیل‌کننده بررسی‌های ماهواره‌ای و زمینی است. مطالعات با استفاده از داده‌های سنجش از دور معمولاً در مناطق با مقیاس بزرگ و به منظور دستیابی به مطالعه جامع از منطقه قابل کاربرد است. به دلیل کنترل شده بودن (به لحاظ زمانی) داده‌های به‌دست‌آمده از پایش‌های

1. Ku
2. Selective Catalytic Reduction
3. Ryu, Park & Jeon
4. CAAC (Clean Air Alliance of China)
5. AEA Technology Environment
6. Aerosol optical depth

زمینی، عموماً از این داده‌ها برای بررسی الگوهای فصلی و روزانه در مناطق با مقیاس متوسط و کوچک مانند منطقه شهری کاربرد دارد (لی، دای، یانگ و ما، ۲۰۱۹، ص. ۳). اخیراً استفاده از فناوری و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید سبب گسترش دانش و یافته‌های محققان در زمینه مطالعات آلودگی هوا شده است؛ به‌ویژه به‌کارگیری تکنیک‌های آماری-فضایی به‌منظور شناسایی الگوهای زمانی و مکانی آلاینده‌ها کاربرد گسترده یافته است. در تحلیل فضایی داده‌ها، پراکندگی داده‌های جغرافیایی به لحاظ قوانین، نظام و الگوهای فضایی بررسی می‌شود؛ به عبارت دیگر تحلیل فضایی از مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی استفاده می‌کند؛ به عبارتی ساده‌تر تحلیل فضایی با استفاده از مهارت‌ها و روش‌های گوناگون تلاش می‌کند الگوهای فضایی پراکندگی‌ها را شرح دهد. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌هاست (علی‌جانی، ۱۳۹۴، ص. ۲).

در همین ارتباط، توزیع فضایی و محلی داده‌های شاخص کیفیت هوا<sup>۲</sup> (AQI) ثبت‌شده در ۱۶۱ شهر مهم چین با استفاده از شاخص موران بررسی و ارزیابی شد و تأثیرگذارترین پارامترهای شهری مؤثر بر این شاخص تعیین گشت (پو، لو، وانگ، وانگ و کانگ، ۲۰۱۷، ص. ۴۴۵۷). در مطالعه انجام‌شده در شهر مادرید اسپانیا از ابزارهای آماری تجزیه و تحلیل همبستگی، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA<sup>۴</sup>) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA<sup>۵</sup>) به‌منظور ارزیابی آلاینده‌های هوا (NO<sub>2</sub>، NO، PM<sub>10</sub> و O<sub>3</sub>) در ۲۲ ایستگاه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد، همبستگی قوی بین آلاینده‌های هوا با ساختارهای فضایی سطح شهر وجود دارد که در این زمینه با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای، برنامه‌ها و اقدامات پیشنهادی به‌خصوص در حوزه ترافیک

1. Li, Dai, Yang & Ma
2. Air Quality Index
3. Pu, Luo, Wang, Wang & Kang
4. Principal Component Analysis
5. Cluster Analysis

به منظور بهبود کیفیت هوا تدوین شد (نانز-آلونسو، ویسنت، منزور و کاسرس<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹، ص. ۳).

در همین ارتباط الگوی پراکنش غلظت آلاینده PM<sub>2.5</sub> و ارتباط آن با عواملی همچون کاربری‌های جمعیتی، پارامترهای هواشناسی، فاصله از معابر اصلی و آزادراه‌ها و ارتفاع در شهر تهران با استفاده از رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) مطالعه شد. در نهایت نقشه‌هایی از وضعیت PM<sub>2.5</sub> تهران با هدف شناخت مناطق پرریسک و پیش‌بینی و به‌کارگیری اقدامات مؤثر برای کاهش آلودگی در آن نقاط تهیه شد (بهاری، عباسپور، و پهلوانی، ۱۳۹۴، ص. ۱۶۵).

توزیع زمانی و مکانی شاخص آلاینده‌های هوای مشهد و عوامل مؤثر بر آن در سال ۱۳۹۱ بررسی شد (تقوی، ۱۳۹۱). نواحی همگن آلودگی هوای مشهد از لحاظ بار ذرات معلق با استفاده از GIS و روش تحلیل خوشه‌ای شناسایی شد که نتایج این تحقیق سه منطقه همگن و مجزا را (منطقه کم‌غلظت در شمال غرب، منطقه آلوده با غلظت زیاد ذرات معلق در شرق و منطقه جنوب شرق و منطقه حائل با بار آلودگی متوسط) برای مشهد مشخص کرد (اسماعیلی، ۱۳۹۷، ص. ۲۲۷). به‌رغم تعدد مطالعات در زمینه آلودگی هوای مشهد، بررسی سوابق مطالعاتی در زمینه NO<sub>2</sub> نشان می‌دهد، علاوه بر فقدان مطالعات فضایی روی این آلاینده در شهر مشهد، موارد موجود بیشتر به صورت موردی یا دوره‌های آماری کوتاه‌مدت صورت گرفته است؛ از این‌رو در این پژوهش سعی شده است با استفاده از حداکثر تعداد ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا و طولان‌ترین دوره آماری ممکن، ضمن ترسیم نقشه‌های فصلی، برای اولین بار پهنه‌بندی و نواحی همگن NO<sub>2</sub> برای این کلان‌شهر کشور صورت گیرد.

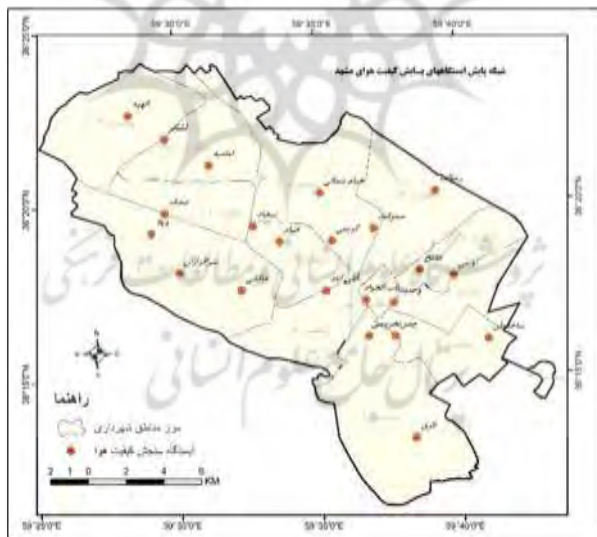
### ۳. روش‌شناسی تحقیق

مشهد با جمعیت ۳,۰۰۱,۱۸۴ نفر (سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵) دومین کلان‌شهر کشور محسوب می‌شود که از لحاظ موقعیت در ۳۵° ۵۹' طول جغرافیایی و ۱۴° ۳۶' عرض

1. Nunez-Alonso, Vicente, Manzoor & Caceres

جغرافیایی، دارای ۳۲۸ کیلومترمربع مساحت و در ارتفاع ۹۹۰ متری از سطح دریا قرار دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷).

شهر مشهد دارای ۲۳ ایستگاه سنجش کیفیت هواست که ۱۲ ایستگاه (صدف، تقی‌آباد، طرق، ماشین ابزار، ویلا، پارک وحدت، شهرک لشگر، رسالت، شهرک شهید رجایی (ساختمان)، نخریسی، سجاد، خیام) متعلق به اداره کل حفاظت محیط‌زیست خراسان رضوی و ۱۰ ایستگاه (شهید آوینی، خیام شمالی، چمن، مفتح، سمزقند، سرافرازان، خاقانی، امامیه، شهید کریمی، الهیه) متعلق به شهرداری مشهد است و ایستگاه واقع در حرم مطهر امام رضا (ع) نیز متعلق به اداره کل هواشناسی خراسان رضوی است. شبکه موجود زیر نظارت و مدیریت یکپارچه مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد، پایش، تجمیع، پردازش و اطلاع‌رسانی را به صورت متمرکز انجام می‌دهد. در شکل ۱ شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد نشان داده شده است (مرکز پایش آلاینده‌های زیست محیطی شهر مشهد، ۱۳۹۶، ص. ۴۲).



شکل ۱- شبکه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر مشهد

مأخذ: مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهر مشهد، ۱۳۹۶

دی اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ ) به‌عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی در ۲۰ ایستگاه سطح شهر سنجش می‌شود. داده‌های غلظت روزانه آلاینده مدنظر برای ایستگاه‌های فعال در دوره آماری هفت‌ساله (از ۱۳۹۳/۱/۱ تا ۱۳۹۹/۱۲/۲۹) از مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد گردآوری شد. در گام نخست، داده‌های پرت<sup>۱</sup> شناسایی شد و درستی یا نادرستی داده‌ها بررسی و تأیید شد. سپس میانگین غلظت این آلاینده برای هر ماه در هر ایستگاه محاسبه شد. برای ترسیم نقشه‌ها، داده‌ها به محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی منتقل شد و با استفاده از تابع درون‌یابی، مقادیر ماهانه غلظت  $\text{NO}_2$  ایستگاه‌ها روی توری با یاخته‌های ۵۰۰ در ۵۰۰ مترگسترانیده و تعمیم داده شد؛ بنابراین سطح شهر مشهد با ۱۲۴۷ یاخته یکسان دارای مقادیر عددی اختصاصی پوشش داده شد که مبنای محاسبات آماری و فضایی بعدی قرار گرفت. در ادامه ۸۴ نقشه ماهانه ترسیم شد که با ترکیب با همدیگر به مقیاس فصلی و سالانه تبدیل شد. در مرحله بعد با استفاده از ابزار تجزیه و تحلیل مکانی (GIS) و بکارگیری آماره گتیس-ارد-جی<sup>۲</sup> تحلیل نقاط داغ پرداخته شد. درنهایت با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به روش ادغام وارد (Ward) مناطق دارای تشابه حداکثری گروه‌بندی شد؛ به‌عبارتی نواحی همگن یا یکسان از لحاظ غلظت آلاینده  $\text{NO}_2$  شناسایی و مشخص شد. در ادامه به واکاوی دلایل شکل‌گیری نقاط داغ و نقشه پهنه‌بندی نهایی پرداخته شد. برای این منظور از بانک اطلاعات جغرافیایی پایگاه داده‌های زیر ساخت مکانی (SDI) سازمان فاوای شهرداری و لایه‌های اطلاعاتی شامل خطوط ارتباطی و حمل و نقل، ارتفاع سطح شهر، حجم تردد، تراکم جمعیت، متوسط سرعت حرکت وسایل نقلیه استفاده شد که در ادامه روش تحلیل فضایی و مدل مفهومی انجام پژوهش به‌اختصار بیان شده است (شکل ۲).

ظهور و توسعه فناوری‌ها و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید باعث توسعه توانمندی پژوهشگران در واکاوی‌های علمی از جمله آلودگی هوا شده است؛ از این رو به‌کارگیری روش‌های تحلیلی توأمان آماری-فضایی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. درحقیقت، تحلیل فضایی داده‌ها می‌کوشد دانش نهفته در پراکندگی داده‌های جغرافیایی یعنی قوانین، نظام و

---

1. Outlier

2. Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi)

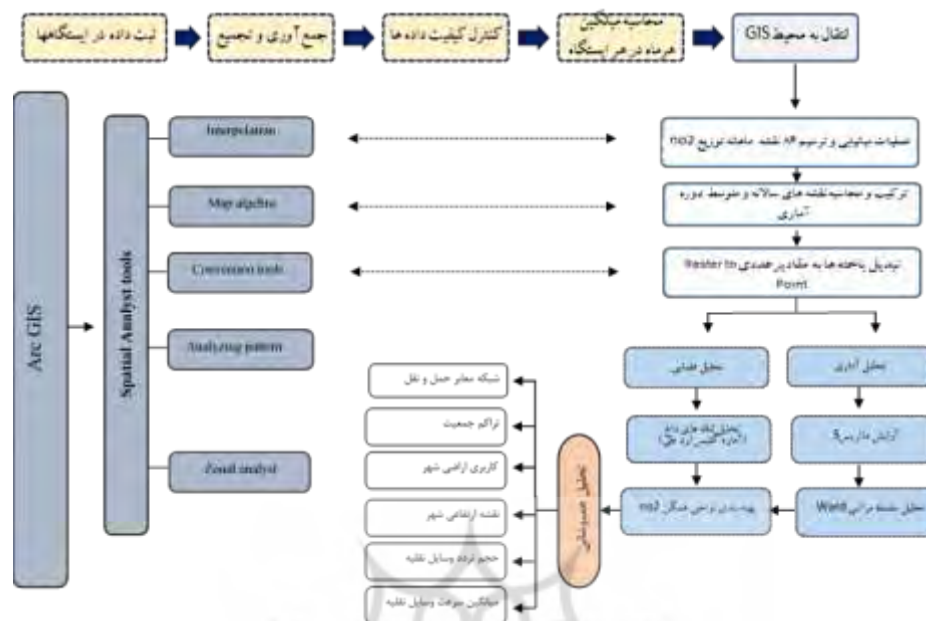


الگوهای فضایی را کشف کند؛ به عبارت دیگر تحلیل فضایی مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری را معرفی می‌کند که برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی به کار می‌رود. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌هاست (علیچانی، ۱۳۹۴، ص. ۳).

خودهمبستگی فضایی برای شناسایی شباهت پدیده‌های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی‌ها به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی طبق مشخصه‌های مرتبط استفاده می‌کند. از خودهمبستگی فضایی به‌عنوان یک ابزار مهم تحلیلی در علم GIS و علوم محیط‌زیست برای شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شود (نادیان، میرزایی و سلطانی محمدی، ۱۳۹۷، ص. ۱۹۸؛ چو، هانگ و لین<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵، ص. ۱۷۸؛ وانگ و فنگ<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶، ص. ۱۵۳). در همین ارتباط، تحلیل نقاط داغ یا آماره گتیس-ارد-جی برای بررسی دقیق‌تر توزیع فضایی لکه‌های داغ<sup>۳</sup> یا خوشه مکانی با مقادیر زیاد و لکه‌های سرد<sup>۴</sup> 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 به کار گرفته می‌شود. مقادیر زیاد G نشان‌دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر زیاد (نقاط داغ) و مقادیر کم G نشان‌دهنده خوشه‌های مکانی با مقادیر کم (نقاط سرد) است (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷، ص. ۲۰۲؛ خسروی و بحری، ۱۳۹۷، ص. ۳۷).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

1. Chu, Huang & Lin
2. Wang & Fang
3. Hot Spot
4. Cold Spot



شکل ۲- مدل مفهومی انجام پژوهش

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

#### ۴. یافته‌های تحقیق

##### ۴.۱. ویژگی‌های آماری آلاینده NO<sub>2</sub>

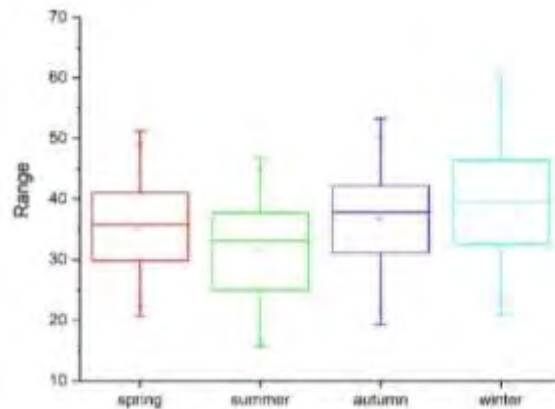
از بین شبکه ایستگاه‌های مشهد (شکل ۱) تعدادی از ایستگاه‌ها به دلیل از کار افتادگی مقطعی یا نقص فنی که ثبت داده‌های غیرموثق یا داده‌های پرت شده است، از محاسبات کنار گذاشته شده‌اند و در نهایت با در نظر گرفتن کمیت و کیفیت داده‌ها ۱۷ ایستگاه در ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های فضایی استفاده شده است. مطابق جدول ۱، بیشترین غلظت NO<sub>2</sub> مربوط به ایستگاه‌های آوینی و چمن و کمترین آن‌ها از ایستگاه‌های حرم مطهر، صدف و لشکر در غرب مشهد گزارش شده است؛ باین حال بیشترین انحراف معیار در ایستگاه امامیه ثبت شده است. بیشترین اختلاف بیشینه و کمینه را ایستگاه‌های چمن و آوینی که میانگین بیشتری داشتند، تجربه کرده‌اند. نکته درخور توجه این است که ایستگاه‌های اشاره‌شده (به‌جز حرم مطهر و لشکر) جزو ایستگاه‌های ترافیکی محسوب می‌شوند.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه

دامنه (بیشینه - کمینه)	واریانس	انحراف معیار	میانگین	
۳۴/۴	۵۱/۶	۷/۲	۲۸/۴	نخریسی
۲۶/۳	۴۱/۴	۶/۴	۲۱/۸	ساختمان
۵۳/۱	۸۷/۴	۹/۳	۳۲/۳	سجاد
۲۵/۹	۹۳/۶	۹/۷	۱۶/۷	صدف
۳۹/۷	۸۰/۶	۹	۱۹/۷	تقی‌آباد
۷۷	۲۶۹	۱۶/۴	۱۹/۲	خیام
۲۳/۳	۴۳/۵	۶/۶	۱۸	لشگر
۴۴/۸	۸۸/۵	۹/۴	۲۱/۷	ویلا
۶۹/۴	۲۲۵	۱۵	۳۸/۱	الهیة
۱۰۰/۶	۴۲۲	۲۰/۵	۶۳/۴	آوینی
۱۰۵/۷	۵۴۹	۲۳/۴	۶۳/۱	چمن
۸۸/۴	۷۳۵	۲۷/۵	۳۳/۹	امامیه
۸۱/۴	۳۶۳/۷	۱۹/۱	۶۲/۲	خیام شمالی
۴۲/۴	۱۹۱	۱۳/۸	۳۹/۹	خاقانی
۴۲/۵	۱۷۵	۱۳/۲	۵۳/۷	مفتح
۷۷/۶	۴۱۱	۲۰/۳	۶۰	کریمی
۱۸/۲	۱۵/۲	۳/۹	۱۲	حرم مطهر

ترسیم نمودار جعبه‌ای روشی مفید برای مصورسازی داده‌ها و درک سریع نحوه توزیع پراکندگی آن‌هاست. در شکل ۳ نمودار جعبه‌ای فصلی در دوره آماری نشان داده شده است. براساس این نمودار، دامنه تغییرات و همچنین فراوانی داده‌های پرت در فصل تابستان و پس از آن بهار کمتر و در فصول سرد سال زمستان و پاییز بیشتر است؛ به عبارتی با شروع نیمه دوم سال روند افزایشی غلظت شروع می‌شود؛ به نحوی که متوسط غلظت در فصل زمستان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. متوسط غلظت در شش ماهه اول  $33/4$  ppb و در شش ماهه دوم سال  $37/9$  ppb محاسبه شده است.

#### 1. Box Plot



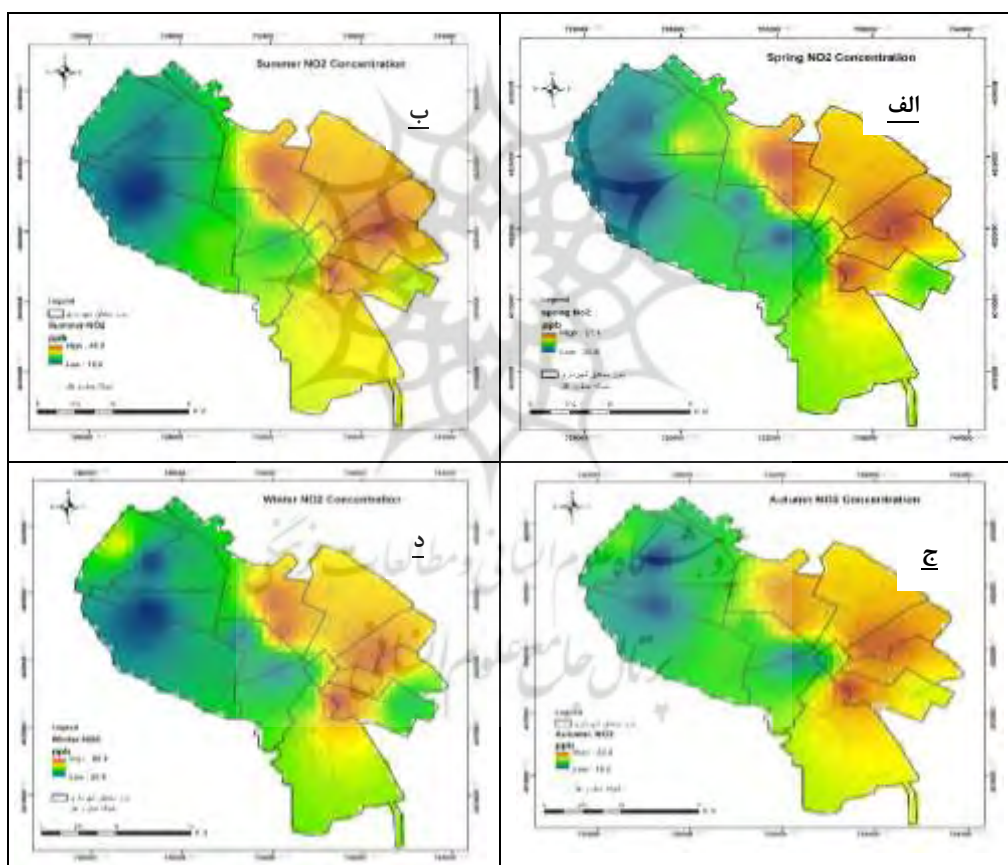
شکل ۳- توزیع فصلی غلظت  $\text{NO}_2$  شهر مشهد در طی دروه آماری ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

#### ۲.۴. توزیع فصلی $\text{NO}_2$

عملیات جبری روی نقشه‌های ماهانه که توسط تابع مپ الجبرا (نقشه جبری)<sup>۱</sup> صورت گرفت، به تولید نقشه‌های فصلی منجر شد (شکل ۴) و مقادیر آماری این نقشه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۴ الف، در فصل بهار دامنه تغییرات از بیشترین غلظت با  $51/1 \text{ ppb}$  در مناطق شرق و شمالی شهر و کمترین آن ( $20/6 \text{ ppb}$ ) در بخش‌هایی از مناطق مرکزی و همچنین مناطق غرب و شمال غرب شهر ثبت شده است که مقدار انحراف معیار کم محاسبه شده در مقایسه با سایر فصول نشان از یکدست‌تر بودن توزیع این آلاینده در سطح شهر دارد. همانند فصل بهار، در فصل تابستان نیز مناطق غرب و شمال غرب مشهد کمترین غلظت  $\text{NO}_2$  ( $15/6 \text{ ppb}$ ) را دارد (شکل ۴ ب). میانگین غلظت در این فصل  $7/3 \text{ ppb} \pm$  است که در مقایسه با فصل بهار کاهش داشته است و بیشترین غلظت ( $46/9 \text{ ppb}$ ) در مناطق شرق و شمال شرق و کمترین آن ( $15/6 \text{ ppb}$ ) در مناطق غرب شهر است. الگوی پراکنش فصل پاییز نیز با فصول بهار و تابستان مشابه است (شکل ۴ ج). هسته تمرکز این آلاینده در مناطق شرق و شمالی شهر واقع شده است و کمترین غلظت‌ها مطابق فصول گذشته در شمال غرب و غرب مشهد دیده می‌شود. دامنه غلظت این آلاینده از کمینه غلظت

در غرب و شمال غربی تا بیشینه غلظت  $53/2$  ppb در شرق و شمال شرق شهر متغیر است (میانگین غلظت  $36/6 \pm 9/9$  ppb). آخرین فصل بیشترین غلظت  $NO_2$  را دارد؛ به گونه‌ای که میانگین غلظت در این فصل  $39/9 \pm 8/4$  ppb محاسبه شده است (جدول ۲). در مجموع، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مستقر در مناطق رسالت، سمزقند، خیام شمالی، خیام جنوبی، سجاد، تقی‌آباد، ساختمان و آوینی بیشترین غلظت و ایستگاه‌های مستقر در مناطق غرب و شمال غرب (ایستگاه‌های صدف، ویلا، سرافرازان و خاقانی) کمترین غلظت را داشتند.



شکل ۴- نقشه پراکنش  $NO_2$ : الف- فصل بهار، ب- فصل تابستان، ج- فصل پاییز، د- فصل زمستان

مشهد میانگین دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

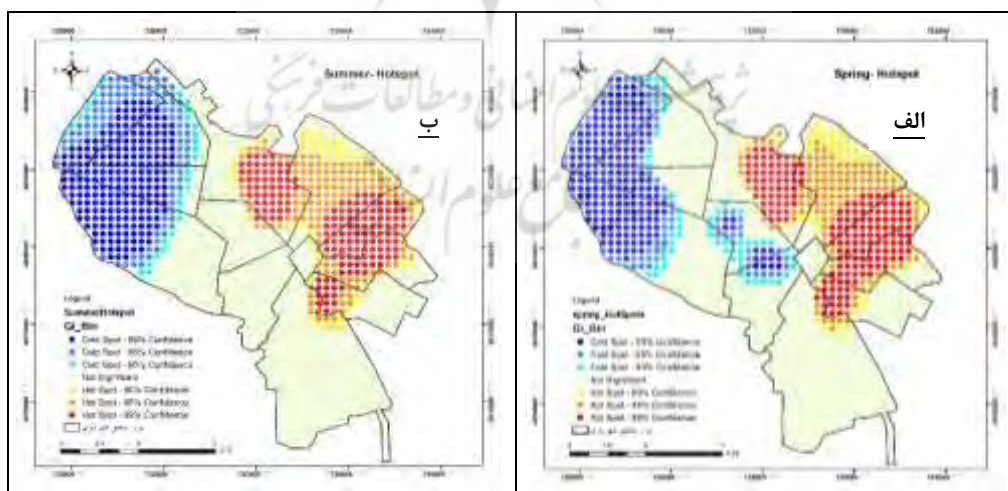
جدول ۲- مقادیر آماری نقشه‌های فصلی آلاینده  $\text{NO}_2$  مشهد میانگین دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

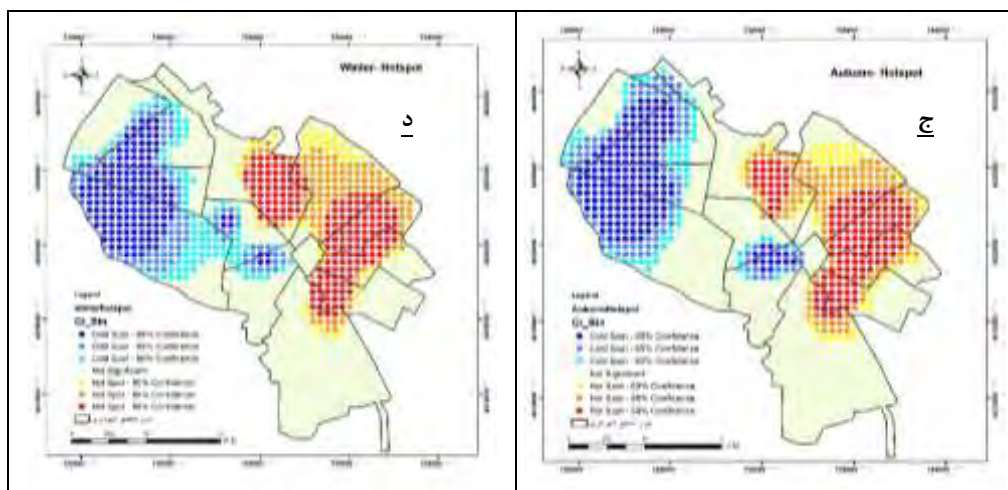
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

انحراف معیار	میانگین غلظت (ppb)	بیشترین غلظت (ppb)	کمترین غلظت (ppb)	
۶/۸	۳۵/۲	۵۱/۱	۲۰/۶	فصل بهار
۷/۳	۳۱/۵	۴۶/۹	۱۵/۶	فصل تابستان
۶/۹	۳۶/۶	۵۳/۲	۱۹/۲	فصل پاییز
۸/۴	۳۹/۲	۶۰/۴	۲۰/۸	فصل زمستان
۷/۴	۳۵/۶	۵۲/۹	۱۹/۱	میانگین سالانه

#### ۴.۳. شناسایی نقاط داغ $\text{NO}_2$

بر اساس نقشه‌های تحلیل فضایی، گستره نقاط داغ در فصول مختلف سال (با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد) در مناطق شرقی و پس از آن با غلظتی کمتر در مناطق شمال شرقی مشهد واقع شده است؛ این در حالی است که شکل‌گیری نقاط سرد عموماً در تمام فصول سال در مناطق غرب و شمال غرب مشهد است؛ البته براساس نقشه‌های به‌دست‌آمده در فصول بهار، پاییز و زمستان، نقاط سرد محدودی به مناطق مرکزی شهر نیز گسترش یافته است.





شکل ۵- نقشه موقعیت نقاط داغ و سرد آلاینده  $\text{NO}_2$ : الف- فصل بهار، ب- فصل تابستان، ج- فصل

پاییز، د- فصل زمستان شهر مشهد دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

ایستگاه‌های خیام شمالی، رسالت، سمزقند، ساختمان، آوینی، سجاد و تقی‌آباد در محدوده نقاط داغ و ایستگاه‌های صدف، ویلا، سرافرازان و خاقانی در پهنه نقاط سرد واقع شده‌اند. براساس نقشه‌های فصلی، آرایش توزیع مکانی نقاط داغ و سرد مشابه است؛ با این تفاوت که تنها در فصل تابستان لکه نقاط سرد فقط در نیمه غرب و شمال غرب گسترده‌گی دارد و مناطق مرکزی شهر را در بر نگرفته است (شکل ۵- ب).

#### ۴.۴. پهنه‌بندی یا تعیین نواحی همگن $\text{NO}_2$

برای تحلیل خوشه‌ای نقشه‌ها ابتدا مقادیر عددی هر یک از یاخته‌ها برای هر فصل به محیط نرم‌افزار تخصصی Minitab منتقل شد. بعد از تجمیع داده‌ها در ماتریسی به شکل S آرایش داده شد. در ادامه، تحلیل سلسه‌مراتبی به روش ادغام وارد روی داده‌ها صورت گرفت که در نهایت به ترسیم نقشه پهنه‌بندی یا همان نواحی همگن غلظت  $\text{NO}_2$  برای شهر مشهد منجر شد (شکل ۶). در این نقشه هر یک از پهنه‌های شناسایی شده خصوصیات آماری خاص خود را دارد که در آن شباهت درون‌گروهی، حداکثر و شباهت بین‌گروهی، حداقل است. براساس نتایج این تحلیل (شکل ۶)، سطح شهر مشهد در سه پهنه یا منطقه همگن تفکیک‌شدنی است.

پهنه یا منطقه ۱ که در شکل ۶ با رنگ زرد مشخص شده است، با غلظت (ppb)  $37/8$  غلظت متوسط دارد که با  $7,650$  هکتار،  $24$  درصد از مساحت شهر را به خود اختصاص داده است. نواحی از جنوب و جنوب شرق شهر در این پهنه قرار دارد. پهنه دوم با میانگین سالانه ppb  $29/3$  کمترین غلظت را دارد که در نقشه خروجی با رنگ آبی نشان داده شده است. در صورتی که خطی از شمال به جنوب شهر در نظر گرفته شود، تقریباً نیمه غربی در محدوده آبی یا دارای غلظت کم قرار می‌گیرد که با مساحت  $16,375$  هکتار،  $50$  درصد از مساحت کل شهر را به خود اختصاص داده است. در نهایت، پهنه ۳ یا منطقه دارای غلظت زیاد (رنگ قرمز) است که میانگین غلظت در این منطقه (ppb)  $43/5$  محاسبه شده است و  $8,425$  هکتار (حدود  $26$  درصد از کل مساحت شهر) که عمدتاً در مناطق شرق، شمال شرق واقع شده است، در این پهنه قرار دارد.



شکل ۶- پهنه‌بندی (نواحی همگن)  $NO_2$  شهر مشهد در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰



مسلم است، چنین نقشه‌ای شناخت بهتر و کامل‌تری از چگونگی توزیع آلاینده مطالعه‌شده را ارائه می‌کند. براساس این پهنه‌بندی، نیمه شرقی و شمال شرقی مشهد دارای بیشترین غلظت و نیمه غرب به‌خصوص شمال غرب شهر دارای بار آلودگی کمتری (میانگین غلظت دوره آماری هفت‌ساله) است. در جدول ۳ به تفصیل خصوصیات آماری هر پهنه در فصول مختلف محاسبه و درج شده است.

جدول ۳- خصوصیات آمار فصلی و سالانه  $\text{NO}_2$  برای هریک از پهنه‌های (مناطق) شناسایی شده در دوره

آماری ۱۳۹۳-۱۴۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰

انحراف معیار	میانگین غلظت (ppb)	بیشترین غلظت (ppb)	کمترین غلظت (ppb)	فصل	خصوصیات آماری پهنه
۲	۳۷/۴	۴۴/۵	۳۳/۸	بهار	پهنه غلظت متوسط یا زرد (منطقه ۱)
۱/۷	۳۴/۷	۴۱	۳۲/۳	تابستان	
۲/۱	۴۰/۱	۴۹/۲	۳۶/۳	پاییز	
۳/۲	۴۱/۹	۵۳/۷	۳۳/۹	زمستان	
۱/۸	۳۷/۸	۴۳/۳	۳۴/۳	سالانه	
۴/۲	۲۹/۷	۴۲/۱	۲۰/۶	بهار	پهنه غلظت کم یا آبی (منطقه ۲)
۴/۸	۲۵/۶	۳۹/۴	۱۵/۶	تابستان	
۴/۲	۳۰/۸	۴۲/۶	۱۹/۳	پاییز	
۴/۸	۳۲/۴	۴۷/۴	۲۰/۹	زمستان	
۴/۵	۲۹/۳	۳۹/۷	۲۰/۳	سالانه	
۲/۷	۴۳/۶	۵۱/۲	۳۵/۸	بهار	پهنه غلظت زیاد یا قرمز (منطقه ۳)
۲/۳	۴۰/۲	۴۶/۹	۳۵/۸	تابستان	
۳/۳	۴۹/۸	۶۰/۴	۴۱/۸	پاییز	
۲/۷	۴۴/۶	۵۳/۲	۳۶/۶	زمستان	
۲/۸	۴۳/۵	۵۰/۶	۳۵/۹	سالانه	

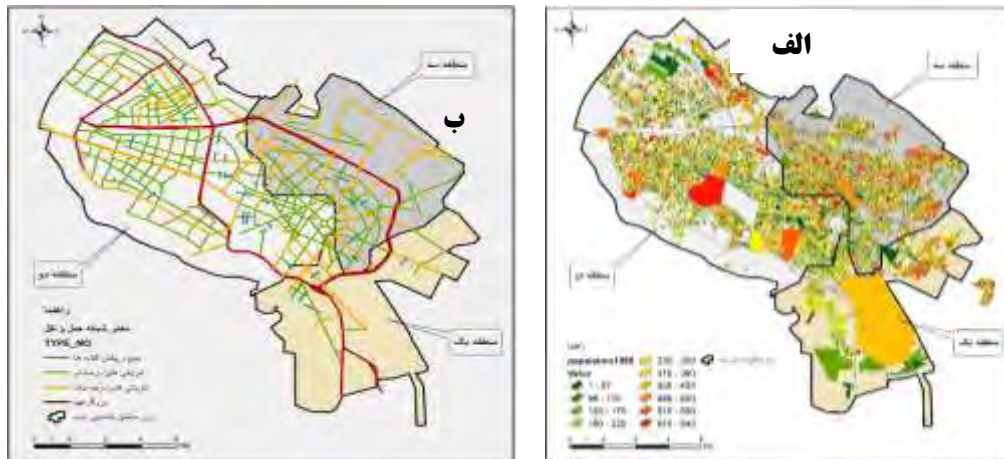
در واکاوی چرایی شکل‌گیری مناطق تفکیک‌شده (شکل ۶)، می‌باید به منابع انتشار این آلاینده توجه شود؛ از این‌رو در ادامه توزیع فضایی جمعیت به‌عنوان موتور متحرک مصرف

انرژی و تعدادی از مؤلفه‌های حمل و نقل سطح شهر بررسی شده است. در ابتدا لایه‌های جمعیت و حمل و نقل با لایه خروجی پهنه‌بندی مطابقت<sup>۱</sup> داده شد. سپس با استفاده از تابع تحلیل مکانی<sup>۲</sup> مشخصات آماری مورد نیاز برای هریک از سه پهنه به صورت مجزا احصاء شد و با یکدیگر مقایسه تطبیقی شد.

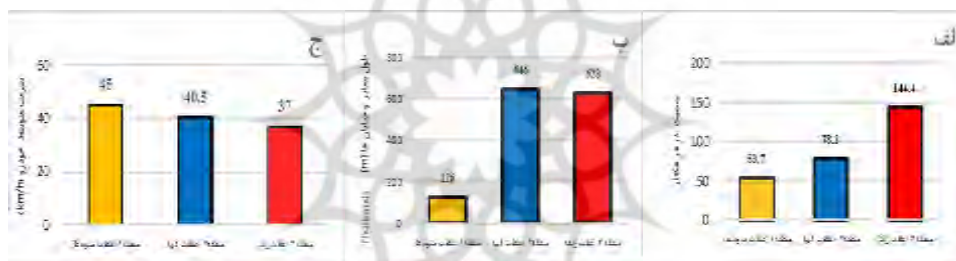
مطابق نقشه تراکم جمعیتی (شکل ۷ الف)، مناطق شرق و شمال شرقی شهر که در پهنه غلظت زیاد یا قرمز قرار دارند، دارای بیشترین تراکم جمعیتی‌اند. مسلم است که افزایش جمعیت باعث افزایش مصرف انرژی و طبعاً انتشار بیشتر آلاینده‌های هوا از جمله  $NO_2$  می‌شود. علاوه بر این، طول شبکه معابر و شریان‌های اصلی در پهنه ۳ (غلظت زیاد) کمتر از پهنه‌های ۲ و ۱ است. بنابراین سرعت حرکت خودروها در این منطقه کمتر (شکل ۸ ج) و بار ترافیکی بیشتر است که این عامل خود باعث انتشار بیشتر  $NO_2$  از خودروها می‌شود. مطابق شکل ۷ ب، مجموع طول شبکه حمل و نقل شهری در مناطق با غلظت زیاد  $NO_x$  (منطقه قرمز)،  $646,434/3$  متر و متوسط سرعت وسایل نقلیه در این بخش  $37$  کیلومتر بر ساعت است؛ در حالی که مجموع طول این شبکه در مناطق با غلظت کم (مناطق غرب و شمال غربی شهر یا منطقه آبی یا ۲)،  $628,720/4$  متر و متوسط سرعت خودروها  $40/5$  کیلومتر بر ساعت محاسبه شده است (شکل ۸).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

1. Overlay
2. Spatial Analyst Tools



شکل ۷- الف- نقشه تراکم جمعیت در هر کیلومتر مربع، ب- نقشه معابر شبکه حمل و نقل مشهد  
 مأخذ: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری مشهد (۱۳۹۷)



شکل ۸- نمودارهای الف- تراکم جمعیت در هر هکتار، ب- طول معابر و شریان ها (km)، ج- سرعت متوسط خودرو (km/h)

مأخذ: محاسبات نگارندگان، ۱۴۰۰

بنابراین در مناطق با غلظت کم (رنگ آبی) به دلیل خطوط ارتباطی کامل تر، ترافیک روان تر و سرعت خودروها بیشتر است که باعث انتشار کمتر آلاینده‌ها در مقایسه با مناطق پرتراфик می‌شود. از طرفی تمرکز و تراکم زیاد جمعیت در مناطق شرقی شهر و شبکه کمتر توسعه یافته از شریان‌های حمل و نقل، باعث انتشار بیشتر و در نهایت شکل‌گیری هسته‌هایی با تراکم زیاد از آلاینده  $\text{NO}_2$  می‌شود. همچنین مجاورت این محدوده با اراضی کشاورزی، واحدهای کارگاهی و صنعتی واقع در مناطق شرق و شمال شرق را می‌توان جزو دلایل غلظت زیاد  $\text{NO}_2$  عنوان

کرد. در مقابل، مناطق غرب و شمال غرب مشهد دارای تراکم کمتر جمعیت، سرانه فضای سبز بسیار بیشتر، ارتفاع نسبی بیشتر، فاصله بیشتر از صنایع و منابع ثابت انتشار آلاینده هوا، مجاورت به مناطق بیلاقی طرقله و شانديز و... برخوردار است که می‌تواند در انتشار کمتر آلاینده‌ها نقش داشته باشد.

##### ۵. نتیجه‌گیری

نخستین آورده این پژوهش را می‌توان تهیه و ترسیم نقشه‌های توزیع فصلی  $\text{NO}_2$  مشهد با به‌کارگیری ۸۴ نقشه ماهانه (دوره آماری هفت‌ساله) دانست که بررسی مطالعات نشان داد، کامل‌ترین مطالعه فضایی این آلاینده برای مشهد است. براساس نقشه‌های ترسیمی پراکنش  $\text{NO}_2$  تقریباً در همه فصول از الگویی مشابه تبعیت می‌کند (نیمه شرقی شهر بیشترین و نیمه غربی کمترین غلظت را دارد). بیشترین غلظت این آلاینده در فصل زمستان ( $39/2 \text{ ppb}$ ) است و کمترین آن مربوط به فصل تابستان ( $31/5 \text{ ppb}$ ) است که این نتایج با نقشه‌های سالانه پراکنش  $\text{Pm}_{2.5}$  و  $\text{NO}_2$  شهر مشهد که توسط مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی مشهد (۱۳۹۷، ۱۳۹۸، ۱۳۹۹) هر ساله تهیه و منتشر می‌شود، مطابقت دارد؛ با این حال، اسماعیلی (۱۳۹۸) بیشترین غلظت  $\text{Pm}_{2.5}$  مشهد را فصل پاییز و کمترین آن را فصل بهار گزارش داد که از لحاظ زمانی با نتایج این پژوهش متفاوت است. کانون نقاط داغ  $\text{NO}_2$  در مناطق شرق، شمال شرق و قسمت‌هایی از نواحی شمالی مشهد است و در مقابل هسته نقاط سرد در مناطق غرب و شمال غربی مشهد واقع شده است. در همین ارتباط، اسماعیلی و امینی (۱۳۹۹) نتایج مشابهی را درباره نقاط داغ آلاینده  $\text{Pm}_{2.5}$  مشهد گزارش دادند که حاکی از الگوی مشابه در توزیع مکانی آلاینده  $\text{NO}_2$  و  $\text{Pm}_{2.5}$  است.

نتایج تحلیل خوشه‌بندی سه پهنه یا منطقه همگن  $\text{NO}_2$  را برای مشهد مشخص کرد: پهنه اول یا منطقه با غلظت متوسط شامل نواحی از جنوب و جنوب غرب مشهد می‌شود؛ پهنه دوم که کمترین غلظت آلاینده مدنظر را دارد، تقریباً نیمه غربی شهر را در بر می‌گیرد؛ پهنه سوم با بیشترین غلظت، عمدتاً مناطق شرق و شمال شرق مشهد را فراگرفته است. این نتایج با نقشه پهنه‌بندی نواحی همگن  $\text{Pm}_{2.5}$  مشهد همخوانی دارد، با این تفاوت که محدوده و مساحت

نواحی شناسایی شده کمی متفاوت است (اسماعیلی، ۱۳۹۷)؛ با این حال، نتایج هر دوی این پژوهش‌ها، در شرق و جنوب شرق مشهد، بیشترین و در شمال غرب و غرب، کمترین غلظت آلاینده‌ها را نشان می‌دهد و کمربندی حائل بین این دو پهنه از شرایطی حد وسط برخوردار است.

واکاوی آماری و مقایسه تطبیقی بین پهنه‌های شناسایی شده نشان داد، تراکم جمعیت در پهنه دارای غلظت زیاد، به‌طور معناداری در مقایسه با سایر پهنه‌ها بیشتر است. همچنین میانگین سرعت خودروها در این پهنه کمتر است که بیانگر ترافیک بیشتر و انتشار بیشتر آلاینده‌هاست. از طرفی این پهنه (نقاط داغ) جزو مناطق نسبتاً محروم و کمتر توسعه‌یافته محسوب می‌شود که فرسوده‌ترین خودروها با بیشترین آلایندگی و بیشترین تعداد موتورسیکلت‌های مستهلک و دودزا در این پهنه وجود دارد. در تکمیل استنتاج یافته‌های پژوهش، مجاورت این پهنه با زمین‌های کشاورزی و کارگاه‌های تولیدی و صنعتی را نباید نادیده گرفت که به دلیل مجاورت، به صورت مستقیم مناطق شرقی و جنوب شرقی مشهد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مجموع دلایل ذکر شده به غلظت زیاد  $\text{NO}_2$  و شکل‌گیری نقاط داغ در این محدوده از شهر منجر شده است. در مقابل، حمل و نقل روان‌تر با آلایندگی کمتر، تراکم کمتر جمعیت، برخورداری از ارتفاع بیشتر و نزدیکی به مناطق کوهستانی و ییلاقی طبقه و شاندیز نیز می‌توان از دلایل غلظت کمتر این آلاینده در غرب و شمال غرب مشهد دانست. از آنجاکه تدوین برنامه‌ها و اثربخشی اقدامات کنترلی و کاهش مستلزم تعیین موقعیت مکانی آلاینده‌هاست، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان منبع اطلاعات تخصصی قابل استناد، برای تدوین برنامه‌های رصد، کاهش و کنترل آلاینده  $\text{NO}_2$  مشهد به کار رود.

#### کتابنامه

۱. اسماعیلی، ر. (۱۳۹۷). نواحی همگن آلودگی هوای شهر مشهد. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۶(۱)، ۲۴۰-۲۲۷.
۲. اسماعیلی، ر.، و امینی، ف. (۱۳۹۹). شناسایی نقاط داغ غلظت ذرات معلق ( $\text{PM}_{2.5}$ ) هوای شهر مشهد. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۱(۴۴)، ۷۸-۶۳.

۳. بهاری، ر.، عباسپور، ر.، و پهلوانی، پ. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی آلودگی ذرات معلق با استفاده از مدل‌های آماری محلی در GIS (مطالعه موردی، شهر تهران). *نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری*، (۳)، ۱۷۳-۱۶۵.
۴. تقوی، ه. (۱۳۹۱). *توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های شاخص آلودگی هوای شهر مشهد و عوامل موثر بر آن* (پایان‌نامه منتشر نشده کارشناسی ارشد)، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۵. جولایی، ف.، پیروی، ر.، اسماعیلی، ح.، کتابی، د.، و متعلمی، آ. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات غلظت مونوکسید کربن و PM<sub>2.5</sub> در شهر مشهد در سال ۱۳۹۵. *نشریه تحقیقات سلامت در جامعه*، (۳)۳، ۴۵-۳۴.
۶. خرسندی، ح.، امینی تپوک، ف.، کارگر، ح.، و موسوی مغانجوقی، س. (۱۳۹۱). بررسی کیفیت بهداشتی هوای شهر ارومیه براساس شاخص AQI. *مجله پزشکی ارومیه*، ۲۳ (۷)، ۷۷۵-۷۶۷.
۷. خسروی، ی.، و بحری، ع. (۱۳۹۷). استفاده از تکنیک‌های آمار فضایی جهت بررسی تغییرات زمانی-مکانی غلظت کلروفیل a در خلیج فارس. *مجله علمی- پژوهشی زیست دریا*، ۱۰ (۳۷)، ۴۶-۳۳.
۸. علیجانی، ب. (۱۳۹۴). تحلیل فضایی. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲ (۳)، ۱۴-۱.
۹. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۷). *سالنامه آماری کشور ۱۳۹۵*. دفتر ریاست روابط عمومی و همکاری‌های بین الملل مرکز آمار، تهران.
۱۰. مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهر مشهد. گزارش‌های سالانه ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸. بازیابی از <https://epmc.mashhad.ir>
۱۱. نادیان، م.، میرزایی، ر.، و سلطانی محمدی، س. (۱۳۹۷). کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلاینده PM<sub>2.5</sub> (مطالعه موردی: شهر تهران). *مجله مهندسی بهداشت محیط*، ۵ (۳)، ۲۱۳-۱۹۷.
12. AEA Technology Environment. (2005). Damages per tone emission of PM<sub>2.5</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and VOCs from each EU25 member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. In *Service contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) programme* (pp. 4-20). Oxon, UK: AEA Technology Environment.
13. Chu, H. J., Huang, B., & Lin, CY. (2015). Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> relationships. *Atmospheric Environment*, (102), 176-182.

14. Clean Air Alliance of China (CAAC). (2013). *State council air pollution prevention and control action plan, issue II* (English translation). Retrieved October 8, 2015, from <http://en.cleanairechina.org/product/6346.html>
15. Kim, KH, Kabir, E, & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ International*, (74), 136-43.
16. Ku, C. (2020). Exploring the spatial and temporal relationship between air quality and urban land-use patterns based on an integrated method. *Sustainability*, 12(2964), 1-16.
17. Li, Ch., Dai, Zh., Yang, L., & Ma, Zh. (2019). Spatiotemporal characteristics of air quality across Weifang from 2014–2018. *International Journal of Environment Research Public Health*, 16(3122), 2-15.
18. Nanda, Ch., Kant, Y., Gupta, A. & Mitra, D. (2018). Spatio-temporal distribution of pollutant trace gases during Diwali over India. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (5), 339-350.
19. Nunez-Alonso, D., Vicente, L., Manzoor, S. & Caceres, J. (2019). Statistical tools for air pollution assessment: multivariate and spatial analysis studies in the Madrid region. *Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 1-9.
20. 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. *Environmental Science Pollution Research*, (24), 4457-4468.
21. Ryu, J., Park, C., & Jeon, S. W. (2019). Mapping and statistical analysis of NO<sub>2</sub> concentration for local government air quality regulation. *Sustainability*, (11), 1-18.
22. US EPA. (2014). national ambient air quality standards (NAAQS). Retrieved from <http://epa.gov/air/criteria.html>.
23. Varshney, C. K., & Singh, A.P. (2003). Passive samplers for NO<sub>x</sub> monitoring: A critical review. *Environmentalist*, (23), 127–136.
24. Wang L., Wang J., Tan X., & Fang, C. (2020). Analysis of NO<sub>x</sub> pollution characteristics in the atmospheric environment in Changchun City. *Atmosphere*, (11), 30. 1-12.
25. Wang, Z., & Fang, C. (2016). Spatial-temporal characteristics and determinants of PM<sub>2.5</sub> in the Bohai Rim Urban Agglomeration. *Chemosphere*, (148), 148-162.
26. Zhang, Q., Geng, G. N., & Wang, S. W. (2012). Satellite remote sensing of changes in NO<sub>x</sub> emissions over China during 1996–2010. *China Science Bulletin*, (57), 2857–2864.
27. Zhang, Q., Streets, D. G., & He, K. (2007). No<sub>x</sub> emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(18), 1-18