فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

۱۷۱-۱۸۴

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل روند و عامل‌های مؤثر بر کیفیت هوای منطقه‌های شهری: مطالعه موردی کلان شهر اصفهان

سونا کبریایی زاده[۱]، جمال قدوسی[۲]*، علی اصغر آل شیخ[۳]، رضا ارجمندی[۱] و سید علیرضا حاجی سید میرزاحسینی[۴]

[۱] گروه مدیریت، برنامه‌ریزی و آموزش محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] پژوهشکده حفاظت خاک و آب، سازمان آموزش و تحقیقات جهاد کشاورزی، تهران، ایران

[۳] گروه GIS، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[۴] گروه مهندسی محیط زیست-آلودگی هوا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۳

کبریایی‌زاده، س.، ج. قدوسی، ع.ا. آل شیخ، ر. ارجمندی و س.ع. حاجی سید میرزاحسینی. ۱۴۰۱. تجزیه و تحلیل روند و عامل‌های مؤثر بر کیفیت هوای منطقه‌های شهری: مطالعه موردی کلان شهر اصفهان. فصلنامه علوم محیطی. ۲۰(۲): ۱۷۱-۱۸۴.

سابقه و هدف: گسترش سریع و بدون کنترل سطح شهرها، افزایش ترافیک، بنگاه‌های صنعتی و سوخت‌های کم کیفیت و همچنین پارامترهای مورفولوژی شهری و شرایط اقلیمی از جمله عامل‌های مؤثر بر آلودگی هوا در منطقه‌های شهری محسوب می‌شوند. در ایران، کلان شهر اصفهان که سومین منطقه بزرگ شهری در سطح کشور است، با توسعه گسترده بنگاه‌های صنعتی، افزایش جمعیت و رشد سطح شهرها، آلودگی هوا افزایش یافته است. بنابراین به‌منظور یافتن عامل‌های تأثیرگذار بر روند تغییرات کیفیت هوا، تحلیل روند و ارزیابی رابطه بین پارامترهای کاربری زمین‌ها، توسعه صنعتی و وضعیت ترافیک با سنجه‌های آلودگی هوا مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: به‌منظور ارزیابی روند با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دوره‌ای و روش‌های همبستگی و رگرسیون ساده غلظت هفت آلاینده هوا شامل $PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، CO، SO_2، NO، NO_2 و NO_x به‌عنوان متغیرهای وابسته و پارامترهای هواشناسی، نوع کاربری زمین‌ها، توسعه صنایع و وسایل نقلیه به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین در روش محاسباتی از نرم‌افزار SPSS برای آزمایش توزیع نرمال مجموعه داده‌ها شامل غلظت آلاینده‌های هوا و هواشناسی از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴، در ۱۰ ایستگاه سنجش آلودگی هوا و ۳ ایستگاه هواشناسی در کلان شهر اصفهان استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج مطالعه نشان می‌دهد که میانگین سالانه غلظت PM (PM_{10} / $PM_{2.5}$)، NO و CO کاهش و میانگین سالانه غلظت SO_2، NO_2 و NO_X افزایش می‌یابد. افزون بر این، میانگین سالانه بارش، دما و سرعت باد افزایش یافته در حالیکه روند رطوبت نسبی در منطقه مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. همچنین مشخص شد که روند وسعت مرکزهای اقامتی، آموزشی، تجاری، خدمات

* Corresponding Author: *Email Address*. jamal_go@yahoo.com
http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.36064
http://dorl.net/dor/ 20.1001.1.17351324.1401.20.2.8.9

عمومی، کاربری حمل و نقلی و تعداد واحدهای صنعتی و وسایل نقلیه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. اما میزان زمین‌های کشاورزی، فضای سبز و منطقه‌های صنعتی به‌طور قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است.

نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام نشان می‌دهد که تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به منطقه‌های مسکونی و افزایش سرعت باد می‌تواند به‌عنوان دلایل روند کاهشی NO، CO و ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه باشد. افزون بر این، روند افزایش میزان حمل‌ونقل، می‌تواند مهمترین دلیل افزایش غلظت NO_2 باشد. از طرف دیگر، با توجه به روند افزایشی انتشار گازهای NO_X و همبستگی منفی معنی‌دار با وسعت فضای سبز و همبستگی مثبت با وسعت حمل و نقل و مناطق صنعتی و نتیجه مدل رگرسیون گام به گام می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش سطح فضای سبز و افزایش وسعت ۹۹.۵ درصدی مناطق با کاربری حمل و نقل سبب افزایش غلظت NO_X در منطقه مورد مطالعه می‌شود. افزون بر این، وسعت مرکزهای خدمات شهری موجب افزایش غلظت SO_2 می‌شود و بین غلظت $PM_{2.5}$ و SO_2 نیز رابطه منفی وجود دارد (با افزایش غلظت SO_2، غلظت $PM_{2.5}$ افزایش می‌یابد).

نتیجه‌گیری: نکته قابل توجه این است که ارتباط بین سنجه‌های کیفیت هوا به‌عنوان متغیرهای وابسته با متغیرهای مستقل مورد بررسی در منطقه‌های شهری پیچیده است و مشخص نیست که کدام عامل یا پارامتر خاص مهمترین سناریوی آلودگی هوا در یک بافت شهری است. بنابراین هنور نیاز به انجام پژوهش‌های دقیق‌تری وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، پارامترهای هواشناسی، اصفهان.

مقدمه

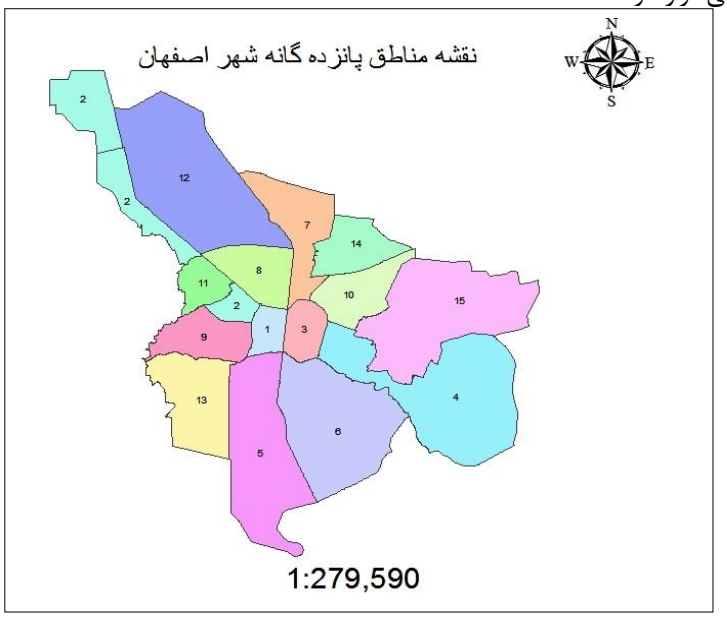
منطقه شهری به‌عنوان یک اکوسیستم دارای عملکردهای پیچیده و پویایی است. بنابراین امروزه با توجه به اختلال در اکوسیستم شهری، برای غلبه بر بسیاری از مشکل‌های خطرناک وارده بر سلامت شهروندان، مدیریت‌های خاصی لازم است. همچنین گسترش سریع و کنترل نشده سطح شهرها، افزایش ترافیک، بنگاه‌های صنعتی و سوخت‌های با کیفیت پایین و همچنین پارامترهای مورفولوژیکی شهری و شرایط اقلیمی از جمله عامل‌های مؤثر بر آلودگی هوا در منطقه‌های شهری به حساب می‌آیند. اما در میان آن‌ها شهرنشینی و تحولات صنعتی، دو عامل اصلی و مؤثر بر افزایش انتشار آلاینده‌های مختلف در منطق‌های شهری شناسایی شده‌اند که به تخریب جو و مشکل‌های شدید محیط زیستی منتهی می‌گردد. در حقیقت، غلظت مواد خاص موجود در هوا از جمله (PM، CO، SO_2، NO_x و O_3) منجر به کیفیت پایین هوا و کاهش دید جو بویژه در کلان شهرها می‌شود (Watson, 2002). Brian (2008) اظهار داشت که ساختار فضایی شهری ممکن است تأثیراتی در ایجاد ازن داشته باشد که مستقل از تأثیرات آن بر انتشار ناشی از حمل و نقل، صنعت و تأسیسات تولید برق باشد. همچنین مشخص شده است که ارتباط بین کیفیت هوا و دید پیچیده است. Lin *et al*. (2012) گزارش دادند که غلظت محیطی سه آلاینده اصلی هوا (SO_2، NO_2 و PM_{10}) از موضوع‌های اصلی برای آلودگی هوا در شهرها است. Singh *et al*. (2017) به این نتیجه رسیدند که اثرهای هواشناسی و آلاینده‌های جوی بر کاهش دید می‌تواند به‌عنوان سنجه‌ای برای کیفیت پایین هوا استفاده شود. افزون بر این، در مورد تأثیرگذاری عامل‌ها یا پارامترهای موجود در آلودگی هوا و تعیین اثرها و وسعت آن‌ها، محققان مختلف این مسئله را از زوایای مختلف در نظر گرفته‌اند. Edussuriya *et al*. (2014) اظهار داشتند که مشخص نیست که کدام عامل‌ها یا پارامترهای خاص در سناریوی آلودگی هوا در یک بافت شهری از اهمیت بیشتری برخوردار است. Roorda-Knape *et al*. (1998) گزارش دادند که در برخی از مطالعات به‌طور خاص ویژگی‌های غلظت کربن سیاه در محیط‌های نزدیک جاده مانند منطقه‌های شهر مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده توسط Kondo *et al*. (2014)نشان داد که کربن سیاه یک

آلاینده هوای به‌نسبت پایدار در مقایسه با سایر آلاینده-های واکنش‌پذیر هوا مانند NO_x است و بیشتر آلودگی هوا را ناشی از فعالیت‌های ترافیکی می‌داند چرا که با تولید گازهای گلخانه‌ای از وسایل نقلیه، بویژه وسایل نقلیه دیزل سنگین به ازدیاد کربن سیاه کمک می‌کند. Noorpour *et al*. (2014) و Mohammadi *et al*. (2017) در مطالعه تجزیه و تحلیل ارتباط ازن سطحی و اکسیدهای نیتروژن در هوای شهر تبریز نشان دادند که غلظت NO_x با افزایش فعالیت‌های انسانی و میزان ترافیک افزایش می‌یابد. Liu *et al*. (2018) دریافتند که بین غلظت کربن سیاه در منطقه‌های مورد مطالعه با تراکم ترافیک سنگین رتباطی وجود دارد که نشان می‌دهد تراکم ترافیک سنگین ممکن است به‌عنوان سنجه‌ای برای آلودگی هوای شهری ناشی از جریان ترافیک باشد. Lyu *et al*. (2016) گزارش نموده‌اند که تغییرات انتشار کل ذرات معلق در هوا تابعی از تغییرات انتشار ذرات اولیه دی اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. همچنین تأثیرات رشد اقتصادی و شدت انرژی همیشه به‌عنوان دو عامل اصلی مؤثر در تغییرات انتشار آلاینده‌های هوا در طول دوره بوده و اثرهای کارایی انتشار، ساختار تولید و رشد جمعیت نیز به‌طور کلی کمتر به تغییرات کلی انتشار منجر گردیده و تأثیر عوامل مختلف در بین آلاینده‌های مختلف متفاوت است. Ramezanian *et al*. (2019)، با استناد به تحقیق خود در زمینه آلودگی هوا در تهران به این نتیجه رسیده‌اند که فصل‌های سال بر مقدار آلودگی در هوا مؤثرند. به‌طوریکه طی یک ماه در ۳ فصل مختلف در تهران، مقادیر CO و NO2 در هوا به‌ترتیب بین ۵۵-۳۰ و ۴/۱-۰/۰ ppm تغییر می‌کند. (Kassomenos *et al*. 2014)، با "مطالعه مقادیر PM_{10} و $PM_{2.5}$,CO_x , NO_X ,SO_x در سه منطقه شهری به این نتیجه رسیدند که گازهای خروجی از اگزوز خودروها ناشی از مواجهه ذرات خطرات زیادی بر سلامت انسان دارد و اقدام‌های لازم برای کاهش آلاینده‌های مورد بررسی از طریق کاهش قابل ملاحظه ترافیک شهری و اقدام‌های مربوط به آن می‌تواند راهکار عملی مناسبی در زمینه کاهش آلاینده‌های مورد بررسی باشد. Vafa-Arani *et al*. (2014)، با مدل‌سازی سیستم دینامیک برای آلودگی هوای شهری در قالب مطالعه موردی در شهر تهران جهت تخمین رفتار پارامترهای مؤثر بر آلودگی هوا، بهبود تکنولوژی در صنایع خودروسازی، بهبود کیفیت تولید سوخت خودروها، برنامه‌های کنترل ترافیک، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی را به‌عنوان راهکارهای کاهش و کنترل کیفیت ارائه نموده‌اند. Lotfi *et al*. (2017)، با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین سهم زیرسیستم‌های تشدید کننده آلودگی هوا در شهر اصفهان، حمل و نقل و ترافیک شهری، و واحدهای صنعتی درون وبرون شهری هستند. (Aghaei 2019)، با استناد به نتیجه استفاده از رویکرد تحلیل سیستمی چند مشخصه‌ای برای مدیریت کنترل هوا به این نتیجه رسیده است که خودروهای شخصی بیشترین سهم را در میان شیوه‌های مختلف حمل و نقل در تولید انواع آلاینده‌های دارند و حدود ۶۰ درصد از آلاینده‌های تولیدی ناشی از حمل و نقل مربوط به آلاینده منوکسیدکربن است و کمترین میزان انتشار مربوط به آلاینده اکسیدهای گوگرد می‌باشد. با توجه به موارد بالا، شکی نیست که به‌دلیل‌های زیادی که ناشی از پیچیدگی آلودگی هوا است، مشکل‌های مربوط به آن هنوز نیاز به بررسی داشته باشد. زیرا باوجود تلاش چندین دهه‌ای برای بهبود شرایط هوا در منطقه‌های شهری، هنوز بسیاری از شهرها در سراسر جهان با مشکل آلودگی شدید هوا روبرو هستند. کلان شهر اصفهان در ایران که سومین منطقه بزرگ شهری در سطح کشور است، با توسعه گسترده بنگاه‌های صنعتی، افزایش جمعیت و رشد سطح شهرها، آلودگی هوا افزایش یافته است. براساس گزارش آمارنامه شهر اصفهان، در سال ۱۳۹۱ بیش از ۸۵٪ آلودگی هوا ناشی از ذرات معلق هوا بوده است. تغییرات موقتی و

مکانی کیفیت هوا در بزرگترین منطقه‌های ایران نشان می‌دهد که باوجود تلاش‌های قابل توجهی مانند ساخت بزرگراه‌ها، مترو، پل‌های چند سطحی، تعویض و از رده خارج کردن وسایل نقلیه فرسوده، توسعه و گسترش فضای سبز شهری و غیره برای بهبود کیفیت هوا از جمله شهر اصفهان در ایران، کیفیت هوای همچنان نامناسب است. بنابراین، به نظر می‌رسد برخی از عامل‌ها وجود دارد که منجر به عدم موفقیت و یا ایجاد موانعی در جهت دست‌یابی به هدف‌های اصلی برنامه جامع کنترل کیفیت هوا در شهرهای بزرگ کشور شده است. بنابراین به‌منظور یافتن عامل‌های تأثیرگذار بر روند تغییرات کیفیت هوا، داده‌های ثبت شده پارامترهای هواشناسی، تغییر کاربری زمین‌ها و تراکم شهری ارزیابی و رابطه بین آن‌ها و غلظت مواد خاص موجود در هوا (PM، CO، SO_2 و NOx) به‌عنوان سنجه‌های اصلی آلاینده مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت یک مطالعه موردی در شهر اصفهان که با مشکل آلودگی هوا روبرو است انجام شده است. این شهر در ۴۲۴ کیلومتری جنوب تهران واقع شده است. مساحت جغرافیایی این شهر در حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع (شکل ۱) و وضعیت آب و هوایی اقلیم آن مدیترانه‌ای نیمه خشک است. بنابر آخرین سرشماری رسمی در سال ۱۳۹۵، جمعیت شهر اصفهان ۱۹۶۱۲۶۰ نفر است (Aminpoor, 2017). بنابراین کاهش و کنترل آلودگی هوا در اصفهان به‌عنوان یک کلان شهر امری اجتناب ناپذیر است نه تنها به این دلیل که این شهر یک کلانشهر گردشگری، تاریخی، فرهنگی و صنعتی است، بلکه به‌دلیل مواجهه با مشکل جدی شهروندان با آلودگی هوا نیز امری لازم و ضروری است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

Fig. 1- Location of the study area

شهر اصفهان (جدول ۱ و شکل ۲) از اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان اصفهان، اطلاعات دمای هوا، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد از اداره کل هواشناسی اصفهان (جدول ۲) و اطلاعات کاربری زمین‌ها، توسعه صنایع و داده‌های وضعیت ترافیکی از معاونت برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری اصفهان اخذ و مورد بررسی قرار گرفت. از میانگین غلظت سالانه داده‌های آلاینده هوا شامل NO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}، SO_2 و CO به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای هواشناسی(دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد)، نوع کاربری زمین‌ها (مسکونی، آموزشی،

کشاورزی و تجاری) به‌عنوان متغیرهای مستقل برای تحلیل رابطه بین متغیر وابسته و مستقل برای دست‌یابی به هدف مطالعه استفاده شد. لازم به بیان است که در روش محاسباتی از نرم‌افزار SPSS برای آزمایش توزیع نرمال مجموعه داده‌ها شامل غلظت آلاینده‌های هوا (CO، NO، NO_2، NOx، PM_{10} و $PM_{2.5}$) و هواشناسی (دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد) از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴، در ۱۰ ایستگاه سنجش آلودگی هوا و ۳ ایستگاه هواشناسی در کلان شهر اصفهان استفاده شد (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل ۲ و ۳).

جدول ۱- نام و مشخصات ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در کلان شهر اصفهان

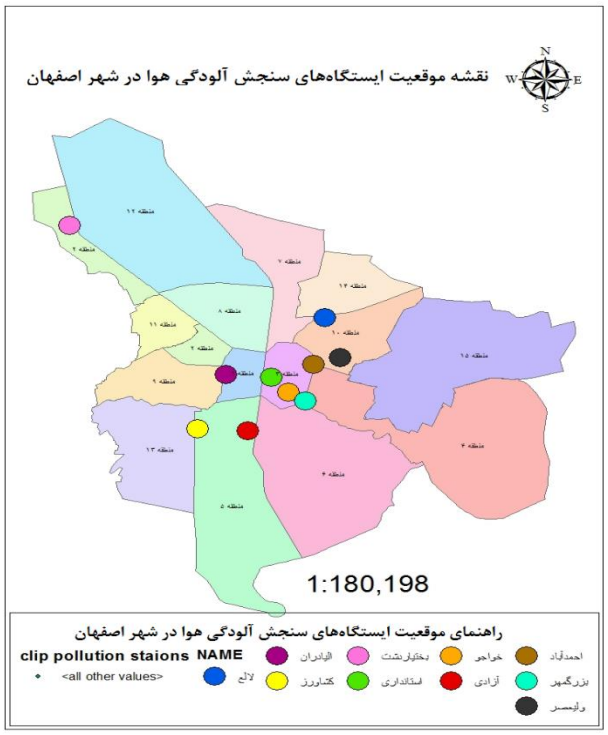
Table 1. Names and Specifications of air pollution stations in Isfahan

Height above sea level (meters)	Longitude	Latitude	Station name
1595	05139.630E	3237.327N	Azadi
1536	05142.082E	3239.857N	Ahmad abad
1580	05133.0320E	3244.863N	Bakhteyardasht
1565	05141.734E	3238.434N	Bozorghmehr
1556	05142.491E	3241.633N	Laleh
1593	5138.149	3227.426N	Keshavarz
1550	05141.134E	3238.802N	khajoo
1547	05140.962E	3228.484N	Ostandari
1528	05143.048E	3240.084N	Valiasr
1584	05138.800E	3239.462N	Kharazi

جدول ۲- نام و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی کلان شهر اصفهان

Table 2. Names and specifications of the meteorological stations in Isfahan

Height above sea level (meters)	Latitude	Longitude	Station name
1551	N.32° 44'	E.51° 51'	Shargh isfahan
1545	N.32° 31'	E.51° 51'	Kabootar abad
1550	N.32° 31'	E.51° 51'	Markazi



شکل ۲- محل ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2- Location of air pollution stations in the study area

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل و بررسی پارامترهای هواشناسی شامل بارش، دما و سرعت باد و رطوبت نسبی هوا

ارزیابی غلظت هفت آلاینده هوا از جمله PM_{10} , $PM_{2.5}$، CO، SO_2، NO، NO_2 و NOx به‌عنوان سنجه‌های آلودگی هوا با استفاده از همبستگی و تحلیل رگرسیون ساده نشان می‌دهد که روند غلظت $PM_{2.5}$، PM_{10}، NO و CO کاهش یافته در حالیکه روند غلظت NO_2، NO_Xو SO_2در دوره مورد مطالعه در حال افزایش است (جدول۳).

جدول ۳- روند غلظت آلاینده‌های هوا

Table 3. Trends of the concentration of air pollutants

سال Year	$PM_{2.5}$	PM_{10}	CO	NO	NO_2	NO_X	SO_2
	ppm	ppm	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb
1387	105	143	6. 21	79.22	37.69	108.15	23.93
1390	80	117	6. 17	70.60	48.30	119.1	34.46
1394	20	85	5.70	13.25	49.50	120.00	61.00
trend	-12.30	-8.27	-0.07	-9.24	+1.61	+1.61	+5.37
	R^2= 0.9773	R^2= 0.999	R^2= 0.868	R^2= 0.778	R^2= 0.758	R^2= 0.735	R^2= 0.778

* **ضریب تعیین :R^2**

تجزیه و تحلیل روند دوره‌ای پارامترهای هواشناسی نشان می‌دهد که میانگین سالانه بارش، دما و سرعت باد افزایش یافته در حالیکه روند رطوبت نسبی در منطقه مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند (جدول ۴). همچنین مشخص شد که روند وسعت مرکزهای اقامتی، آموزشی، تجاری، خدمات عمومی، کاربری حمل و نقلی و تعداد واحدهای صنعتی و وسایل نقلیه به‌دلیل گسترش شبکه شهری و افزایش رشد جمعیت به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. اما میزان زمین‌های کشاورزی، فضای سبز (به‌طور عمده باغ‌ها) و منطقه‌های صنعتی به‌طور قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است (جدول ۵)، که از جمله دلیل‌های آن می‌تواند کمبود زمین و کمبود آب آبیاری در شهر اصفهان و تصمیم‌های مدیریتی باشد.

جدول ۴- روند پارامترهای هواشناسی

Table 4. Trend of meteorological parameters

سال Year	دما Temperature (°C)	بارش Precipitation (mm)	رطوبت نسبی Relative humidity (%)	سرعت باد Wind speed(m/s)
1387	17.20	144.47	32	1.39
1390	17.31	149.82	34	1.63
1394	17.37	150.83	32	2.96
Trend	0.02	0.97	0.19	0.03
	R^2= 0.9386	R^2= 0.8048	R^2= 0.6917	R^2= 0.0068

جدول ۵- روند کاربری زمین‌ها و واحدهای صنعتی و تعداد خودرو در هر روز

Table 5. Trend of land use type and industrial units and number of vehicles per day

Year land use	2008	2011	2015	Trend
Residential (hectares)	3071.2710	8300.9909	13463.2894	+1474.4500 R^2= 0.9386
Educational (hectare)	113.3142	143.7881	176.7344	+113.3142 R^2= 0.9964
Commercial (hectares)	102.2484	103.9661	579.8290	+9.0155 R^2= 0.8200
Service centers (hectares)	329.482	1238.7589	4437.9564	+611.98 R^2= 0.9567
Green space (hectares)	1609.5800	264.3735	273.5901	-180.41 R^2= 0.6701
Agricultural land (hectares)	291.5786	237.4535	181.8765	-155.76 R^2= 0.9944
Industrial (hectares)	405.0808	300.7986	329.9241	-9.76.27 R^2= 0.4060

ادامه جدول ۵- روند کاربری زمین‌ها و واحدهای صنعتی و تعداد خودرو در هر روز
Table 5. Cont. Trend of land use type and industrial units and number of vehicles per day

Year land use	2008	2011	2015	Trend
Transportation (hectares)	33.7592	95.5721	106.0064	+19842 R^2= 0.7934
Industrial unit (number)	1851	3000	3196	+184.41 R^2= 0.7944
Vehicle (number per day)	12575	13566	14877	+328.8 R^2= 1.0000

نتایج حاصل از همبستگی بین آلاینده‌های هوای بیان شده در جدول ۳ به‌عنوان سنجه‌های آلودگی هوا نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و رابطه خطی بین میانگین غلظت سالانه NO_X (که به‌عنوان $NO + NO_2$ و NO_2 تعریف شده است) و همبستگی منفی و رابطه خطی بین میانگین غلظت سالانه SO_2 و $PM_{2.5}$ وجود دارد (جدول‌های ۶ و ۷). لازم به بیان است که حداکثر ضریب همبستگی پیرسون بین NOx و NO_2 (r = +1) و بین $PM_{2.5}$ و SO_2 (r = -1) است. اما باید به این واقعیت توجه داشت که میزان انتشار NOx به شرایط احتراق و عملکرد فرآیند بستگی دارد، بنابراین تخمین میزان انتشار از منابع و منطقه‌های مختلف همیشه نامشخص خواهد بود و در برخی موارد درجه عدم اطمینان نیز ممکن است زیاد باشد.

جدول ۶- ارتباط بین غلظت آلاینده‌های هوا (همبستگی پیرسون ۲ طرفه)
Table 6. Correlation between concentration of air pollutants (2-tailed Pearson correlation)

Pollutant	NO	NO_2	NO_X	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
NO	1						
NO_2	-0.927	1					
NO_X	-0.916	1.000*	1				
SO_2	-0.957	0.780	.764	1			
CO	0.878	0.634-	-.613	-.978	1		
PM_{10}	0.994	0.882-	-0.869	-0.983	0.924	1	
$PM_{2.5}$	0.961	-0.787	-0.771	-1.000**	0.976	0.985	1

*** همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است.**
****. همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.**

جدول ۷- خلاصه مدل‌های رگرسیون خطی ساده
Table 7. Summary of simple linear regression models

Dependent variable	Predictor variable	*p* value	Confidence level	The coefficient of determination(R^2)	Model
NO_2	NO_X	0.01	99%	0.999	$[NO_2] = -6.966+[NO_X]$
SO_2	$PM_{2.5}$	0.01	99%	1-	$[S\,O_2] = 69.7 + [PM_{2.5}]$

نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی بین سنجه‌های آلاینده‌های هوای مورد بررسی و پارامترهای هواشناسی، نوع کاربری زمین‌ها، تعداد واحدهای صنعتی و تعداد وسیله نقلیه در روز نشان می‌دهد که ضریب همبستگی پیرسون بین r = -1 و r = -997 متغیر است. به این ترتیب، بالاترین همبستگی منفی (r = -1، P-value = 0.013) بین PM_{10} و حجم ترافیک (تعداد خودرو در روز) وجود دارد. بر این اساس، نتایج مدل‌های رگرسیون خطی ساده در جدول ۸ نشان داده شده است. به‌منظور تعیین متغیرهای مهم و مستقل (به‌عنوان نمونه پارامترهای هواشناسی، نوع کاربری زمین‌ها، واحدهای صنعتی و تعداد وسیله نقلیه در روز) و تأثیرگذاری آن بر هر یک از سنجه‌های آلودگی هوا در سطح اطمینان ۹۵٪ (P-value = 0.05)، از روش رگرسیون خطی گام به گام استفاده شد که نتایج آن در

جدول ۹ نشان داده شده است.

از آنجا که، NO_x ($NO + NO_2$) از واکنش گازهای نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا در هنگام احتراق، بویژه در دماهای بالا تولید می‌شود. گازهای NO_x هر زمان که در حضور نیتروژن احتراق رخ دهد، شکل می‌گیرند، به‌عنوان نمونه در موتورهای اتومبیل وقتی نیتروژن هنگام احتراق سوخت رها می‌شود با اتم‌های اکسیژن ترکیب و NO ایجاد و اگر با اکسیژن بیشتری ترکیب شود NO_2 ایجاد می‌شود (Han *et al.*, 2011). این دلیل اصلی این است که چرا مقدار NO_x در منطقه‌هایی که دارای تردد وسایل نقلیه بالا هستند اغلب زیاد است. همچنین کاهش روند NO با افزایش روند مساحت کاربری مسکونی ممکن است ناشی از تأثیر مثبت کاربری زمین‌های کشاورزی در اصفهان باشد. افزون بر این، روند افزایش میزان حمل‌ونقل، می‌تواند مهمترین دلیل افزایش غلظت NO_2 باشد. از طرف دیگر، با توجه به روند افزایشی انتشار گازهای NOx (جدول ۳) و همبستگی منفی معنی‌دار با وسعت فضای سبز و همبستگی مثبت با وسعت حمل و نقل و منطقه‌های صنعتی و نتیجه مدل رگرسیون گام به گام (جدول ۸) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاهش سطح فضای سبز و افزایش وسعت ۹۹.۵ درصدی منطقه‌ها با کاربری حمل و نقل سبب افزایش غلظت NO_x در منطقه مورد مطالعه می‌شود (جدول‌های ۸ و ۹). افزون بر این، وسعت مرکزهای خدمات شهری موجب افزایش غلظت SO_2می‌شود و بین غلظت $PM_{2.5}$ و SO_2 نیز رابطه منفی وجود دارد. بنابراین با افزایش غلظت SO_2، غلظت $PM_{2.5}$ افزایش می‌یابد (جدول ۹).

جدول ۸- خلاصه مدل‌های رگرسیون خطی ساده

Table 8. Summary of Simple linear regression models

Air pollution meter	Predictor	*p* value	Confidence level	Coefficient of determination(R^2)	Simple linear regression models
NO	Size of the agricultural area [Agri]	0.05	95%	0.997	[NO] = 36.540+ 0.146[Agri]
NO	Size of the residential area [Resi]	0.05	95%	0.978	[NO] = 83.747- 0.020[Resi]
NO_2	Number of industries [Ind.count]	0.05	95%	0.998	[NO_2] = 21.190+0.009 [Ind.count]
NO_2	Size of the transport area [Transp]	0.05	95%	0.998	[NO_2] = 32.117+0.166 [Transp]
NO_2	Average annual precipitation [Percip]	0.05	95%	0.997	[NO_2] = – 236.560+1.8990 [Percip]
NO_X	Extent of the industrial area [Ind.cuont]	0.05	95%	0.995	[NO_X] = 91.436+0.009 [Ind.cuont]
NO_X	Size of the transport area [Transp]	0.05	95%	0.995	[NO_X] = 102.523+0.169[Transp]
NO_X	Expansion of green space [Gre.Spa]	0.05	95%	0.990	[NO_X] =-121.853- 0.009[Gre.Spa]
SO_2	Extent of urban service centers [U.ser.center]	0.05	95%	0.999	[SO_2] = 21.148+0.080 [U.ser.center]
CO	Average annual wind speed [wid.sd]	0.05	95%	0.995	[CO] = 6.693 – 0.334[wid.sd]
PM_{10}	Size of the agricultural area [Agri]	0.05	95%	0.997	[PM_{10}] = - 10.337+ 0.529[Agri]
PM_{10}	Size of the residential area [Resi]	0.05	95%	0.996	[PM_{10}] =167.193- 0.006 [Resi]
PM_{10}	Number of cars per day [Vel. count]	0.05	95%	1.000	[PM_{10}] = 458.925 - 0.025 [Vel. count]
$PM_{2.5}$	Extent of urban service centers [U.ser.center]	0.05	95%	0.999	[$PM_{2.5}$] = 110.952- 0.019 [U.ser.center]

جدول ۹- خلاصه مدل‌های رگرسیون خطی گام به گام
Table 9. Summary of stepwise regression models

Air pollution meter	Model	R^2	Significance level	*P* value
NO	[NO] = 83.747 – 0.002 [Resi]	1.0000	0.027	0.05
NO_2	[NO_2] = 32.117 + 0.166 [Transp]	0.9990	0.026	0.05
NO_X	[NO_X] =102.52 + 0.169 [Transp]	0.9950	0.043	0.05
SO_2	[SO_2] = 69.676 – 0.437 $PM_{2.5}$	1.0000	0.007	0.01
CO	[CO] = 6.693 – 0.334 [wid.sd]	0.9950	0.046	0.05
PM_{10}	[PM_{10}] = 458.925 – 0.025 [Vel. count]	1.0000	0.013	0.05
$PM_{2.5}$	[PM2.5] 159.33 – 2.287 SO_2	1.0000	0.007	0.01

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه در مورد تغییر روند غلظت سنجه‌های آلاینده هوا در کلان شهر اصفهان نشان می‌دهد که غلظت مونوکسید نیتروژن (NO)، مونوکسید کربن (CO) و ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) کاهش، در حالیکه غلظت NO_2، NO_X و SO_2 افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل رگرسیون گام به گام نشان می‌دهد که تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به منطقه‌های مسکونی و افزایش سرعت باد می‌تواند به‌عنوان دلیل‌های روند کاهشی NO، CO و ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه باشد. افزون بر این، روند افزایشی غلظت NO_2، NO_X و SO_2 ممکن است ناشی از افزایش وسعت منطقه حمل و نقلی باشد. اما مجموعه داده‌های بیشتر به شناسایی واضح تر روند کمک می‌کند. از طرف دیگر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد وسیله نقلیه می‌تواند دلیل اصلی افزایش زیاد غلظت NO_X در منطقه مورد مطالعه باشد که به‌طور عمده منبع آن آنتروپوژنیکی است. با توجه به آنچه گفته شد، هدف این بررسی که تحلیل روند و ارزیابی رابطه بین پارامترهای کاربری زمین‌ها، توسعه صنعتی و وضعیت ترافیک با سنجه‌های آلودگی هوا بود، محقق گردید. با این وجود، باید توجه داشت که همبستگی بین سنجه‌های کیفیت هوا به‌عنوان متغیرهای وابسته و تغییر کاربری زمین‌ها و پارامترهای هواشناسی به‌عنوان متغیرهای مستقل در منطقه-های شهری پیچیده است. بنابراین هنوز مطالعات پژوهشی دقیق‌تری باید انجام شود. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست آمده پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱- با توجه به اینکه در این تحقیق دست‌یابی داده بلند مدت یکی از محدودیت‌های انجام تجزیه و تحلیل با دقت زیاد است که بتوان با استفاده از آن‌ها اقدام به برنامه‌ریزی بلند مدت با اعتبار کافی نمود، پیشنهاد می‌شود در تحقیق‌های آتی موضوع تجزیه و تحلیل آلودگی هوا با اولویت در اختیار بودن داده بلند مدت مورد توجه قرار گیرد. بدیهی است این مفهوم به معنای کاربردی نبودن نتایج حاضر نیست.

۲- به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی لازم است جهت برنامه‌ریزی مدیریت آلودگی هوا در کلان شهرها نسبت به جمع‌آوری داده‌های تعداد خودروهای مشخص شهروندان (افراد ساکن در شهر) داده‌های مربوط به تردد موقت خودروها از جمله خودروها در بزرگراه‌ها و خودروهای خدماتی و بررسی در زمینه تأثیر کیفیت سوخت در آلودگی هوا مؤثر خودروهای درون شهری با تأکید بر خودروهای مشخص در برنامه آتی قرار گیرد.

منابع

Aghaei. S., 2019. Systematic analysis of air pollution emission in Isfahan due to urban transportation. Ms.C. Thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Aminpour. S., 2017. Evaluation of the axes of optimal development of green space in Isfahan using spatial models of thermal climate. Ms.C. Thesis. Islamic Azad University, Tehran Research Sciences Branch, Tehran, Iran.

Beckerman, B., Jerrett, M., Brook, J.R., Verma, D.K., Arain, M.A. and Finkelstein, M.M., 2008. Correlation of nitrogen dioxide with other traffic

pollutants near a major expressway. Atmospheric Environment. 42(2), 275-290.

Brian Stone, J.R., 2008. Urban sprawl and air quality in large US cities. Journal of Environmental Management. 86, 688–698.

Edussuriya, P., Chan, A. and Malvin, A., 2014. Urban morphology and air quality in dense residential environment: correlation between morphological parameters and air pollution at street level. Journal of Engineering and Technology. 9(1), 64-80.

Han. S, Bian. H, Feng. Y, Liu. A, Li. X, Zeng. F and Zhang. X, 2011, Analysis of the Relationship between O_3, NO and NO_2 in Tianjin, China, Aerosol and Air Quality Research, 11, pp. 128–139.

Hoek. G, Beelen. R, de Hoogh. K, Vienneau. D, Gulliver. J, Fischer. P and Briggs. D, 2008, Review of land-use regression models to assess spatial vatiation of outdoor air pollution, Atmospheric Environment, 42, pp. 7561–7578.

Kassomenos. P.A, Vardoulakis. S, Chaloulakou. A, Paschalidou. A.K, Grivas. G, Borge. R, Lumbreras.J, 2014, Study of PM_{10} and $PM_{2.5}$ levels in three European cities: Analysis of intra and inter urban variations, Atmospheric Environment, Volume 87, pp. 153-163.

KebreyaeeZade. S, GheyratiArani. L, 2014, Study on Concentration of Suspended Particles in Different Parts of Tehran City during 2009- 2010, International Journal of Engineering Innovation & Research, 3(3), pp. 365-369.

Kondo. M.C, Mizes. C, Lee J and Burstyn. I, 2014, Black carbon concentrations in a goods-movement neighborhood of Philadelphia, PA. Environmental Monitoring and Assessment, 186(7), pp. 4605–4618.

Liu. B, Ma. Y, Gong. W, Zhang. M and Yang. J, 2018, Study of continuous air pollution in winter over Wuhan based on ground-based and satellite observations, Atmospheric Pollution Research, 9 (1), pp. 156–165.

Lin. M, Tao. J, Chan. C-Y, Cao. J, Zhang. Z – S, Zhu. L – H and Zhang.R- J, 2012, Regression Analyses between Recent Air Quality and Visibility Changes in Megacities at Four Haze Regions in China, Aerosol and Air Quality Research, 12(6), pp. 1049–1061.

Liu. S.V, Chen.F.-L and Xue. J, 2017, Evaluation of Traffic Density Parameters as an Indicator of Vehicle Emission-Related Near-Road Air Pollution: A Case Study with NEXUS Measurement Data on Black Carbon. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14, p.1581.

Lotfi. S, Mousavian Hejazi. S,Hosseini pooya. A, Salehzaheh. S. J, 2017, Systematic analysis of factors causing urban environmental pollutants in Isfahan and its effects, research project of Isfahan Municipality and Isfahan University of Technology.

Lyu. W, Li. Y, Guan. D, Zhao. H, Zhang. Q, Liu. Z, 2016, Driving forces of Chinese primary air pollution emissions: an index decomposition analysis, Journal of Cleaner Production, 133, pp. 136-144.

Mohammadi. N, Khaled Zarrofchi. B, Shakeri. M, Shaker khatibi,. M, Fatehifar. A and Mahmudian. A, 2017, Analysis of the Relationship between Surface Ozone and Nitrogen oxides in the City of Tabriz Air, Civil Engineering and Environment Journal, 47(86), pp. 107-114.

Noorpour. A, Feyz. S.M.A, 2014, Determination of Spatial and Temporal Variations of Sulfur dioxide, Nitrogen dioxide Pollutants and Various

Suspended Particles using GIS Techniques in the City of Tehran, Journal of Environmental Studies, 40(3), pp. 738-723.

Ramezanian Bozorg. R, Abadi. G, Mohammad. A, Moattar. F, 2019, Development of a strategic plan through SWOT analysis to control traffic-borne air pollutants using CALINE4 model, International Journal of Human Capital in Urban Management, 4(2), pp. 133-144.

Roorda-Knape. M.C, Janssen. N.A.H, de Hartog. J, van Vliet. P.H.N, Harssema. H and Brunekreef. B, 1998. Air pollution from traffic in city districts near major motorways, Atmospheric Environment, 32(11), pp. 1921–1930.

Singh. A, Bloss. W. J. and D. Pope. F, 2017, 60 years of UK visibility measurements: impact of meteorology andatmospheric pollutants on visibility, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, pp. 2085–2101.

Vafa-Arani. H, Jahani. S, Dashti. H, Heydari. J, Moazen. S, 2014, A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31, 21-36.

Vanderstraeten. P, Forton. M, Brasseur. O and Offer. Z.Y, 2011, Black carbon instead of particle mass concentration as an indicator for the traffic related particles in the Brussels capital region, Journal of Environmental Protection, 2, pp. 525–532.

Watson. J.G, 2002, Visibility: Science and Regulation. Journal of the Air & Waste Management Association, 52, pp. 628–713.

Zhang. K and Batterman. S, 2010, Near-road air pollutant concentrations of CO and $PM_{2.5}$: A comparison of MOBILE6.2/CALINE4 and generalized additive models.Elsevier, Atmospheric Environment, 44, pp. 1740-1748

Environmental Sciences Vol.20 / No.2 / Summer 2022

171-184
Original Article

Analyzing trends and factors affecting air quality in urban areas: a case study in Isfahan metropolis, Iran

Sona Kebriaeezadeh,[1] Jamal Ghodduosi,[2*] Ali Asghar Ale Sheikh,[3] Reza Arjmandi[1] and Seyed Alireza Mirzahosseini[4]

[1] Department of Management, Planning and Environmental Education, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Institute of Soil Conservation and Watershed Management, Agriculture Education and Extention of Institute of Jihad Agriculture, Tehran, Iran
[3] Department of GIS Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[4] Department of Environmental Engineering -Air Pollution, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2020.09.26 Accepted: 2021.11.14

Kebriaeezadeh, S., Ghodduosi, J., Ale Sheikh, A.A., Arjmandi, R. and Mirzahosseini, S.A., 2022. Analyzing trends and factors affecting air quality in urban areas: a case study in Isfahan metropolis, Iran. Environmental Sciences. 20(2): 171-184.

Introduction: Rapid and uncontrolled expansion of cities, increased traffic, industrial enterprises and low-quality fuels, as well as urban morphology parameters and climatic conditions are among the factors affecting air pollution in urban areas. In Iran, the metropolis of Isfahan, which is the third largest urban area in the country, has an increased air pollution due to the extensive development of industrial enterprises, and population and urban growth. Therefore, in order to find the factors affecting the trend of air quality changes, trend analysis and evaluation of the relationship between land use parameters, industrial development and traffic situation with air pollution indicators were studied.

Material and methods: In order to evaluate the trend using measured periodic data and simple correlation and regression methods of seven air pollutants including $PM_{2.5}$, PM_{10}, CO, SO_2, NO, NO_2 and NO_X as dependent variables and meteorological parameters, type of land use, industry development and vehicles were analyzed as independent variables. Also, SPSS software was used to test the normal distribution of data sets including

* Corresponding Author: *Email Address*. jamal_go@yahoo.com
http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.36064
http://dorl.net/dor/ 20.1001.1.17351324.1401.20.2.8.9

the concentration of air pollutants and meteorology from 1387 to 1394, in 10 air pollution measuring stations and three meteorological stations in Isfahan metropolis.

Results and discussion: The results of the study show that the average annual concentration of PM (PM_{10} / $PM_{2.5}$), NO and CO decreased and the average annual concentration of SO_2, NO_2 and NO_X increased. In addition, the average annual rainfall, temperature and wind speed increased while the trend of relative humidity in the study area did not change significantly. It was also found that the trend of residential, educational, commercial, public services, transportation and the number of industrial units and vehicles have increased significantly. However, the amount of agricultural land, green space and industrial areas has significantly decreased in the study area. The results of stepwise regression analysis showed that changing the use of agricultural land to residential areas and increasing wind speed may have caused the decreasing trend of NO, CO, and suspended particles in the study area. In addition, the increasing trend of transportation can be the most important reason for the increase in NO_2 concentration. On the other hand, due to the increasing trend of NO_X emissions and significant negative correlation with green space and positive correlation with transportation and industrial areas and the result of stepwise regression model, it can be concluded that reducing green space and an increase of 99.5% in the area of transportation use increases the NO_X concentration in the study area. In addition, the size of utility centers increases the concentration of SO_2 and there is a negative relationship between the concentration of $PM_{2.5}$ and SO_2 (as the concentration of SO_2 increases, the concentration of $PM_{2.5}$ increases).

Conclusion: It is noteworthy that the relationship between air quality indicators as dependent variables with independent variables in urban areas is complex and it is not clear which specific factor or parameter is the most important scenario of air pollution in an urban context. Therefore, more detailed research is needed.

Keywords: Air pollutant, Meteorological parameters, Isfahan.