



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Noise Pollution Modeling in Regions 5 and 6 of Isfahan City

Mostafa Moradi¹, Mozhgan Ahmadi Nadoushan^{2*}

¹ Department of Environmental Sciences, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Department of environmental Science, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran, Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*Corresponding Author: m.ahmadi@khuisf.ac.ir

Original Paper

Received: 2023.07.23

Accepted: 2023.01.14

Keywords:

Noise pollution,
Traffic,
Inverse Distance Weighted,
Isfahan.

Abstract

Noise pollution, as a significant environmental challenge in metropolitan areas, adversely affects citizens' health and quality of life. This study aimed to investigate noise pollution in municipal districts 5 and 6 of Isfahan, located in the southern part of the city. Sound level data (in decibels A, or dBA) were collected from 23 sampling points (12 in District 5 and 11 in District 6) between 16:00 and 18:00 on weekdays. Sampling points were selected to ensure homogeneous geographical distribution and coverage of areas with varying traffic intensities (from low to high traffic). The Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method was employed to analyze the spatial distribution of noise pollution. Additionally, the Getis-Ord Gi* method was used to identify hotspots and coldspots of noise pollution. A one-way ANOVA test, assuming data normality and homogeneity of variances, was conducted to compare sound levels between Districts 5 and 6, assessing statistically significant differences. The results indicated that District 5, with an average sound level of 73.39 dBA, exhibited higher noise intensity than District 6, with an average of 69.31 dBA. The IDW interpolation analysis revealed that the southern and southwestern areas of District 5, particularly near high-traffic roads and commercial zones, were primary noise pollution hotspots, with levels exceeding 78 dBA. The Getis-Ord Gi* analysis confirmed four hotspots in District 5 and two coldspots in District 6, consistent with the interpolation patterns. These findings can inform urban planning, traffic management in hotspot areas, and efforts to enhance the acoustic environment in southern Isfahan.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

مدلسازی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان

مصطفی مرادی^۱، مژگان احمدی ندوشن^{۲*}

۱- گروه محیط زیست؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران

۲- گروه محیط زیست؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران، گروه محیط

زیست؛ مرکز تحقیقات پسماند و پساب؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.ahmadi@khuif.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
علمی-پژوهشی	آلودگی صوتی به عنوان یکی از چالش‌های محیط زیستی کلان‌شهرها، تأثیرات منفی بر سلامت و کیفیت زندگی شهروندان دارد. این مطالعه با هدف بررسی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان، واقع در جنوب این شهر، انجام شد. داده‌های سطح صدا (بر حسب دسی‌بل A یا dBA) از ۲۳ نقطه نمونه‌برداری (۱۲ نقطه در منطقه ۵ و ۱۱ نقطه در منطقه ۶) در بازه زمانی ۱۶:۰۰ تا ۱۸:۰۰ در روزهای هفته جمع‌آوری شدند. نقاط نمونه‌برداری با پراکنش جغرافیایی همگن و پوشش‌دهی نواحی با ترافیک متنوع (از کم‌ترافیک تا پرتراфик) انتخاب شدند. برای تحلیل توزیع مکانی آلودگی صوتی، از روش میانابایی فاصله معکوس وزنی استفاده شد. همچنین، روش Getis-Ord Gi* برای شناسایی نقاط داغ و سرد آلودگی صوتی به کار رفت. مقایسه سطح صدا بین مناطق ۵ و ۶ با آزمون آنووا یک‌طرفه انجام شد که با پیش‌فرض نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، تفاوت‌های معنی‌دار را بررسی کرد. نتایج نشان داد که منطقه ۵ با میانگین سطح صدای ۷۳.۳۹ دسی‌بل، شدت صوتی بیشتری نسبت به منطقه ۶ با میانگین ۶۹.۳۱ دسی‌بل دارد. تحلیل میانابایی IDW نشان داد که نواحی جنوبی و جنوب‌غربی منطقه ۵، به‌ویژه در مجاورت معابر پرتردد و کاربری‌های تجاری، کانون‌های اصلی آلودگی صوتی با سطوح بالای ۷۸ دسی‌بل هستند. تحلیل Getis-Ord Gi* نیز چهار نقطه داغ در منطقه ۵ و دو نقطه سرد در منطقه ۶ را تأیید کرد، که با الگوهای میانابایی همخوانی داشت. این یافته‌ها می‌توانند به برنامه‌ریزی شهری، کاهش ترافیک در نقاط داغ، و بهبود کیفیت صوتی محیط در جنوب اصفهان کمک کنند.
تاریخچه مقاله:	
ارسال: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲	
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵	
کلمات کلیدی:	
آلودگی صوتی، ترافیک، وزن‌دهی معکوس فاصله، اصفهان.	

مقدمه

آلودگی صوتی به عنوان یکی از برجسته ترین چالش های محیط زیستی و سلامت محور در کلان شهرهای معاصر، جایگاه ویژه ای در مطالعات شهری و محیط زیستی یافته است. برخلاف سایر اشکال آلودگی، نظیر آلودگی هوا یا آب، که اثرات آن ها اغلب به صورت تدریجی و در بازه های زمانی طولانی آشکار می شوند، آلودگی صوتی با تأثیرات آنی و بی واسطه بر کیفیت زندگی شهروندان، نمود عینی می یابد (Morillas et al., 2018). رشد شتابان شهرنشینی، توسعه زیرساخت های حمل و نقل، افزایش تراکم جمعیتی، و گسترش فعالیت های صنعتی و تجاری، همگی به ظهور منابع متنوع و پایدار صوتی در محیط های شهری دامن زده اند. این منابع، از تردد وسایل نقلیه موتوری گرفته تا فعالیت های ساخت و ساز و عملکرد تجهیزات صنعتی، محیطی را ایجاد کرده اند که در آن صوت، فراتر از نقش طبیعی خود به عنوان ابزاری برای ارتباط و ادراک، به عاملی مخل آسایش و سلامت تبدیل شده است.

شهرها، به عنوان کانون های تجمع جمعیت، فعالیت های اقتصادی، و زیرساخت های حمل و نقل، به طور فزاینده ای در معرض سطوح بالای صوت قرار دارند. این پدیده نه تنها کیفیت زندگی ساکنان را تحت تأثیر قرار می دهد، بلکه به دلیل اثرات گسترده اش بر سلامت عمومی، بهره وری اجتماعی، و حتی پایداری محیط زیست، به چالشی چندوجهی بدل شده است (Yang et al., 2020).

یکی از مشکلات اساسی در مواجهه با آلودگی صوتی، تصور نادرست عمومی مبنی بر موقتی و کم اهمیت بودن اثرات آن است. برخلاف این باور، پژوهش های علمی نشان داده اند که قرار گرفتن مداوم در معرض صوت های مزاحم، حتی در سطوحی که ممکن است آزاردهنده به نظر نرسند، می تواند آثار بلندمدتی بر سلامت جسمانی و روانی افراد داشته باشد. از منظر فیزیولوژیکی، صوت های با شدت بالا می توانند به افزایش فشار خون، اختلالات خواب، و حتی بیماری های قلبی عروقی منجر شوند (Wang et al., 2020). از منظر روانی، این صوت ها با ایجاد استرس، اضطراب، و کاهش توانایی تمرکز، کیفیت زندگی افراد را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می دهند. گروه های حساس، مانند کودکان که در حال رشد شناختی و عاطفی هستند، سالمندان با حساسیت های جسمانی بیشتر، و بیماران مبتلا به بیماری های مزمن، به ویژه در برابر این اثرات آسیب پذیرترند (Patella et al., 2019). این پیامدها نه تنها سلامت فردی را تهدید می کنند، بلکه با کاهش بهره وری، افزایش هزینه های درمانی، و تضعیف تعاملات اجتماعی، بار اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی بر جوامع شهری تحمیل می کنند (Munir et al., 2021). چالش دیگر در مدیریت آلودگی صوتی، ناهمگنی توزیع مکانی آن در سطح شهرهاست. صوت های مزاحم در مناطق مختلف یک شهر، از مراکز تجاری پرتردد گرفته تا نواحی مسکونی آرام، شدت و ویژگی های متفاوتی دارند. این ناهمگنی، که تحت تأثیر عواملی نظیر نوع کاربری زمین، چیدمان معابر، و تراکم ساختمانی است، تحلیل دقیق و مکان محور آلودگی صوتی را به امری ضروری تبدیل کرده است. بدون شناخت دقیق این الگوهای مکانی، طراحی راهکارهای مؤثر برای کاهش صوت های مزاحم دشوار خواهد بود. علاوه بر این، فقدان داده های جامع و قابل اعتماد در بسیاری از شهرها، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانع از درک کامل ابعاد این مشکل و اجرای سیاست های کنترلی مناسب می شود. این وضعیت در شهرهای ایران، که شاهد رشد سریع جمعیت و توسعه زیرساخت های شهری هستند، به ویژه برجسته است و نیاز به مطالعات علمی برای شناسایی منابع صوتی، ارزیابی اثرات آن ها، و ارائه راهکارهای عملی را دوچندان می کند.

در این راستا، بررسی آلودگی صوتی با استفاده از روش های علمی، از جمله پایش میدانی، تحلیل های آماری، و مدل سازی مکانی، می تواند نقش کلیدی در تدوین استراتژی های مدیریت شهری ایفا کند. چنین مطالعاتی نه تنها به شناسایی نقاط بحرانی و عوامل اصلی تولید صوت کمک می کنند، بلکه زمینه ساز توسعه سیاست هایی برای کاهش اثرات منفی آن بر سلامت عمومی و بهبود کیفیت زندگی شهروندان هستند. مسئله آلودگی صوتی، با توجه به تأثیرات گسترده اش بر ابعاد مختلف زندگی شهری، از سلامت و رفاه گرفته تا پایداری

محیط زیست، نیازمند توجه فوری و رویکردهای چندرشته‌ای است. این پژوهش با هدف پرداختن به این خلأ علمی و ارائه چارچوبی برای درک بهتر آلودگی صوتی در محیط‌های شهری شکل گرفته است (Tortorella et al., 2022).

مواد و روش‌ها

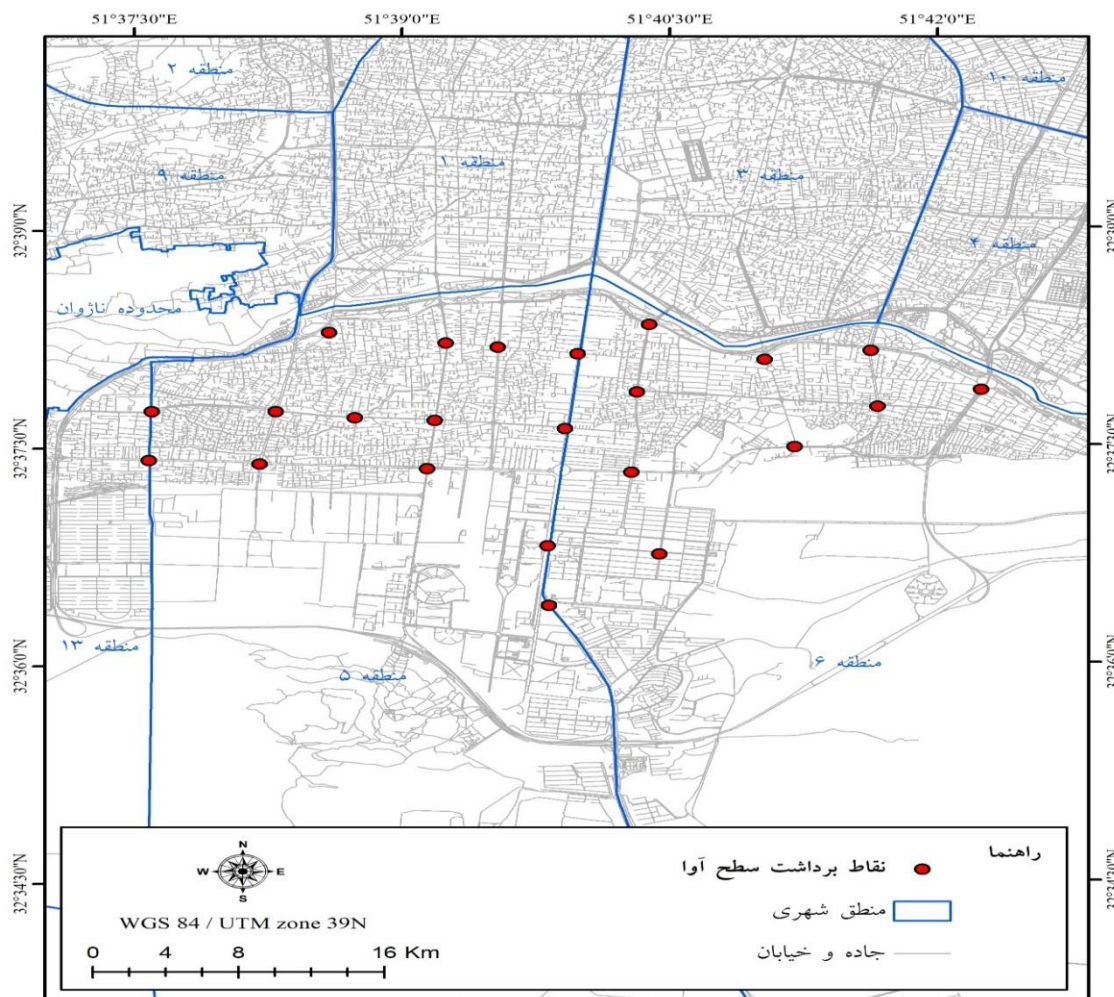
منطقه مورد مطالعه

شهر اصفهان، یکی از کلان‌شهرهای ایران، با مساحتی حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۵۸۰ متر است. اصفهان بر روی دشتی نسبتاً صاف بنا شده و به دلیل موقعیت استراتژیک خود در چهارراه ارتباطی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی کشور، نقش مهمی در شبکه حمل‌ونقل ایران دارد. از نظر جغرافیایی، این شهر از شمال و شرق به مناطق بیابانی و از غرب و جنوب به ارتفاعات زاگرس محدود می‌شود. جمعیت شهر اصفهان بر اساس تخمین سازمان آمار ایران در سال ۱۳۹۸ بیش از ۲ میلیون نفر بوده است.

این مطالعه به بررسی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان، واقع در بخش جنوبی این شهر، اختصاص دارد (شکل ۱). این مناطق به دلیل موقعیت جغرافیایی، تراکم جمعیتی و تردد وسایل نقلیه، از اهمیت ویژه‌ای در تحلیل آلودگی صوتی برخوردارند که به شرح زیر است:

- منطقه ۵: این منطقه با مساحت ۱۷۰۲ هکتار و جمعیتی بالغ بر ۱۷۱،۱۸۲ نفر، یکی از مناطق پرجمعیت جنوب اصفهان است. موقعیت جغرافیایی منطقه ۵ از شمال با میدان سهروردی در امتداد خیابان میرزا کوچک خان آغاز می‌شود و تا گوشه شرقی کارخانه سیمان اصفهان در جنوب امتداد می‌یابد. از شرق، این منطقه به محور خیابان چهارباغ بالا از سی‌وسه پل تا دروازه شیراز و از غرب به محور خیابان هزار جریب از دروازه شیراز تا پل دفاع مقدس و بزرگراه شهید دستجردی تا پل راه‌آهن محدود می‌شود. این منطقه به دلیل نزدیکی به محورهای اصلی و وجود زیرساخت‌های شهری، شاهد تردد قابل توجه وسایل نقلیه است که می‌تواند به افزایش سطح آلودگی صوتی منجر شود.
- منطقه ۶: این منطقه با مساحت ۶۶۰۰ هکتار و جمعیتی حدود ۱۰۴،۷۳۷ نفر، در جنوب شهر قرار دارد. این منطقه از شمال با پل سی‌وسه پل در مسیر زاینده‌رود تا پل بزرگمهر، از جنوب با پل اشکوند در مسیر ریل راه‌آهن تا پل راه‌آهن، از شرق با مسیر رودخانه از پل بزرگمهر تا پل اشکوند و از غرب با بزرگراه شهید دستجردی از پل راه‌آهن تا سی‌وسه پل تعریف می‌شود. منطقه ۶ به دلیل وسعت زیاد و قرارگیری در مجاورت رودخانه زاینده‌رود و محورهای حمل‌ونقل، از پتانسیل بالایی برای تجربه آلودگی صوتی برخوردار است.

رودخانه زاینده‌رود، به‌عنوان یکی از عناصر طبیعی کلیدی شهر، از مناطق ۵ و ۶ عبور کرده و به تالاب بین‌المللی گاوخونی منتهی می‌شود. این رودخانه نه‌تنها بر منظر شهری تأثیر می‌گذارد، بلکه در تعدیل شرایط محیطی نقش دارد. از نظر اقلیمی، میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه اصفهان به ترتیب ۳ درجه سانتی‌گراد در آذر و ۲۹ درجه سانتی‌گراد در مرداد است. بارندگی سالانه این شهر کمتر از ۱۲۳ میلی‌متر بوده و عمدتاً در فصول پاییز و اوایل بهار رخ می‌دهد.



شکل ۱ - منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- study area

روش‌شناسی بررسی آلودگی صوتی

برای بررسی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان، ۲۳ نقطه به‌عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند که شامل ۱۲ نقطه در منطقه ۵ و ۱۱ نقطه در منطقه ۶ است. این نقاط به‌گونه‌ای تعیین شدند که نواحی پرتردد با تغییرات بالای ترافیک، از نقاط کم‌ترافیک تا پرترافیک، در جنوب شهر اصفهان را پوشش دهند تا تأثیر تنوع ترافیکی بر شدت آلودگی صوتی به‌خوبی بررسی شود. همچنین، این نقاط از پراکنش جغرافیایی همگنی برخوردارند تا توزیع مکانی مناسبی از سطوح آلودگی صوتی در مناطق مورد مطالعه ارائه کنند.

اندازه‌گیری سطح صدا با استفاده از دستگاه صوت‌سنج پرتابل انجام شد و داده‌ها بر حسب واحد دسی‌بل A (dBA) ثبت شدند. واحد dBA، یا دسی‌بل وزن دار A، شاخصی است که شدت صدا را با توجه به حساسیت گوش انسان به فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کند و با تقویت فرکانس‌های میانی و بالا و تضعیف فرکانس‌های بسیار پایین یا بالا، با درک شنوایی انسان هماهنگ است (Latha et al., 2022). مزایای مهم این واحد صدا شامل انطباق آن با حساسیت شنوایی انسان برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات صوتی بر سلامت و راحتی، همچنین استاندارد بودن در مطالعات محیطی برای مقایسه با استانداردها، و توانایی ثبت تغییرات ظریف شدت صدا در محیط‌های شهری با منابع صوتی متنوع است. اندازه‌گیری‌های صوت در نقاط تعیین شده به‌صورت میانگین ۳۰ دقیقه‌ای در بازه زمانی ۱۶:۰۰ تا ۱۸:۰۰

عصر، در طول روزهای کاری هفته، انجام شد. این بازه زمانی به دلیل اوج ترافیک عصرگاهی و فعالیتهای شهری انتخاب شد تا داده‌ها شرایط واقعی آلودگی صوتی در ساعات پرتردد را منعکس کنند و امکان تحلیل دقیق تأثیر ترافیک بر کیفیت صوتی محیط را فراهم آورند.

تجزیه و تحلیل آماری

برای ارزیابی اولیه و آشنایی با وضعیت آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان، ابتدا آمار توصیفی سطح صدا شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر مقادیر برای داده‌های جمع‌آوری شده از هر منطقه محاسبه شد. این تحلیل توصیفی امکان مقایسه اولیه بین سطح صدا در مناطق ۵ و ۶ را فراهم می‌کند. همچنین، داده‌های صوتی جمع‌آوری شده از ۲۳ نقطه نمونه‌برداری با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه تحلیل شدند. آزمون آنووا یک روش آماری پرکاربرد است که برای مقایسه میانگین‌های چند گروه (در اینجا، میانگین سطح صدا در مناطق ۵ و ۶) به کار می‌رود و بررسی می‌کند که آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده بین گروه‌ها از نظر آماری معنی‌دار است یا خیر (Okoye et al., 2024). این آزمون با پیش‌فرض‌های نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس‌ها (ANOVA) انجام شد. برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، از آزمون آماری آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شد تا تأیید شود که داده‌های سطح صدا در هر منطقه از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همچنین، برای بررسی همگنی واریانس‌ها، آزمون لون^۱ اجرا شد تا اطمینان حاصل شود که واریانس سطح صدا در مناطق ۵ و ۶ تفاوت معنی‌داری ندارد. رعایت این پیش‌فرض‌ها برای معتبر بودن نتایج آزمون آنووا ضروری است، زیرا انحراف از نرمال بودن یا ناهمگنی واریانس‌ها می‌تواند بر دقت تحلیل تأثیر بگذارد. در این تحلیل، سطح معنی‌داری (α) برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. چنانچه مقدار p-value حاصل از آزمون کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر (یعنی عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین سطح صدا در دو منطقه) رد شده و نتیجه‌گیری می‌شود که تفاوت معنی‌داری بین سطح آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ وجود دارد. در غیر این صورت، اگر p-value بیشتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر پذیرفته شده و تفاوت معنی‌داری بین مناطق مشاهده نمی‌شود (Zhang et al., 2020).

نتایج این آزمون امکان شناسایی الگوهای متفاوتی در آلودگی صوتی بین مناطق ۵ و ۶ را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، در صورت وجود تفاوت معنی‌دار، می‌توان عواملی مانند تراکم ترافیک، نوع کاربری زمین، یا موقعیت جغرافیایی مناطق را به عنوان دلایل احتمالی بررسی کرد. این تحلیل به درک بهتر توزیع آلودگی صوتی در جنوب شهر اصفهان و ارائه راهکارهای مدیریت محیطی کمک می‌کند.

میانمایی داده‌های آلودگی صوتی

برای تحلیل توزیع مکانی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان و تهیه نقشه‌های پیوسته سطح صدا، از روش میانمایی فاصله معکوس وزنی (IDW) در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد. روش فاصله معکوس وزنی یک تکنیک میانمایی قطعی است که بر این اصل استوار است که نقاط نزدیک‌تر به یکدیگر از نظر مکانی، شباهت بیشتری در مقادیر خود دارند تا نقاط دورتر (Kim et al., 2022). در این مطالعه، داده‌های سطح صدا (بر حسب dBA)، که به صورت میانگین ۳۰ دقیقه‌ای در بازه ۱۶:۰۰ تا ۱۸:۰۰ در روزهای هفته جمع‌آوری شده بودند، به محیط آرک جی آی اس وارد شدند. در این نرم‌افزار، ابزار فاصله معکوس وزنی از جعبه‌ابزار Spatial Analyst استفاده شد. تنظیمات شامل تعداد نقاط همسایه (۸ تا ۱۲ نقطه برای تعادل بین دقت محلی و هموارسازی)، توان وزن‌دهی (p) (آزمایش مقادیر ۱، ۲ و ۳ و انتخاب مقدار بهینه بر اساس کمترین خطای تخمین با معیار میانگین مربعات خطا)، و رزولوشن خروجی مناسب برای نمایش جزئیات توزیع آلودگی صوتی بود. مزایای فاصله معکوس وزنی شامل سادگی، سرعت اجرا، و تأکید بر داده‌های محلی است، اما

¹ Levene

محدودیت‌هایی مانند حساسیت به توزیع ناهمگن نقاط و عدم در نظر گرفتن ساختار مکانی داده‌ها دارد (Lelièvre et al., 2018). با این حال، پراکنش همگن نقاط نمونه‌برداری در این مطالعه این محدودیت‌ها را کاهش داد. این روش نقشه‌ای پیوسته‌ای از توزیع سطح صدا تولید کرد که برای شناسایی الگوهای مکانی آلودگی صوتی و نقاط بحرانی در مناطق ۵ و ۶ مناسب است.

شناسایی نقاط بحرانی آلودگی صوتی

برای شناسایی نقاط بحرانی^۲ آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهرداری اصفهان، از روش آماری Getis-Ord Gi در نرم‌افزار آرک جی آی اس نسخه ۱۰/۸ استفاده شد. این روش، که به‌عنوان یکی از ابزارهای تحلیل مکانی در آمار فضایی شناخته می‌شود (Rossi et al., 2019)، برای شناسایی خوشه‌های مکانی با مقادیر بالا (نقاط داغ) یا پایین (نقاط سرد) در داده‌های سطح صدا به کار رفت. روش Getis-Ord Gi به‌طور خاص برای تحلیل الگوهای مکانی و تشخیص مناطقی که از نظر آماری دارای تمرکز غیرعادی مقادیر (در اینجا سطح صدا بر حسب dBA) هستند، طراحی شده است و در مطالعات محیطی مانند بررسی آلودگی صوتی کاربرد گسترده‌ای دارد. روش Getis-Ord Gi بر اساس تحلیل آماره عمل می‌کند که میزان خوشه‌بندی مقادیر بالا یا پایین را در اطراف یک نقطه خاص با در نظر گرفتن مقادیر نقاط همسایه ارزیابی می‌کند (Kumar et al., 2021). این روش نه تنها مقدار یک نقطه را بررسی می‌کند، بلکه تأثیر نقاط اطراف آن را نیز در نظر می‌گیرد، بنابراین قادر است خوشه‌های مکانی معنی‌دار را شناسایی کند. آماره برای هر نقطه نمونه‌برداری (شدت آلودگی صوتی محاسبه شده) به‌صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2 / n}{n-1}}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن:

مقدار سطح صدا در نقطه i بر حسب dBA

میانگین مقادیر سطح صدا در تمام نقاط

وزن مکانی بین نقاط i و j بر اساس فاصله یا معیار همسایگی

n : تعداد کل نقاط نمونه‌برداری

آماره استاندارد شده که مقادیر مثبت و بالا نشان‌دهنده نقاط داغ (خوشه‌های با سطح صدای بالا) و مقادیر منفی و پایین نشان‌دهنده نقاط سرد (خوشه‌های با سطح صدای پایین) است.

مقدار به‌صورت یک امتیاز Z (Z-Score) استاندارد شده گزارش می‌شود که همراه با مقدار p -value، سطح معنی‌داری آماری خوشه‌بندی را نشان می‌دهد. مقادیر Z -Score بالا و مثبت با p -value کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده وجود نقاط داغ با سطح اطمینان ۹۵٪ یا بالاتر هستند، در حالی که مقادیر Z -Score پایین و منفی با p -value معنی‌دار، نقاط سرد را مشخص می‌کنند (Joost et al., 2019). در این مطالعه، داده‌های سطح صدا به‌عنوان ورودی تحلیل Getis-Ord Gi استفاده شدند. در نرم‌افزار نرم‌افزار آرک جی آی اس، ابزار Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) از جعبه‌ابزار Spatial Statistics به کار گرفته شد. تنظیمات این تحلیل شامل موارد زیر بود:

² Hot spots

- معیار همسایگی: برای تعیین وزن‌های مکانی از روش فاصله ثابت (Fixed Distance Band) استفاده شد. این روش شعاعی را تعریف می‌کند که تمام نقاط درون آن شعاع به‌عنوان همسایه در نظر گرفته می‌شوند. شعاع بهینه با توجه به توزیع مکانی نقاط و وسعت مناطق ۵ و ۶ (۱۷۰۲ هکتار برای منطقه ۵ و ۶۶۰۰ هکتار برای منطقه ۶) از طریق آزمون و خطا و ارزیابی الگوهای خوشه‌بندی تعیین شد.
 - وزن‌دهی مکانی: وزن‌های مکانی بر اساس معکوس فاصله بین نقاط محاسبه شدند، به‌طوری‌که نقاط نزدیک‌تر تأثیر بیشتری در محاسبات داشتند.
 - سطح معنی‌داری: سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p\text{-value} < 0.05$) برای شناسایی نقاط داغ و سرد در نظر گرفته شد. همچنین، سطوح اطمینان ۹۰٪ و ۹۹٪ برای تحلیل‌های تکمیلی بررسی شدند تا درک جامع‌تری از شدت خوشه‌بندی به‌دست آید.
- پیش‌فرض‌های این روش شامل وجود داده‌های کافی و پراکندگی مناسب نقاط نمونه‌برداری است تا الگوهای مکانی به‌درستی شناسایی شوند. در این مطالعه، پراکنش همگن ۲۳ نقطه نمونه‌برداری و انتخاب نقاط در نواحی با کاربری‌ها و ترافیک متنوع، این پیش‌فرض را تأمین کرد. علاوه بر این، برای اطمینان از صحت نتایج، داده‌ها از نظر نرمال بودن توزیع بررسی شدند (با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک)، زیرا انحراف شدید از نرمال بودن می‌تواند بر دقت تحلیل تأثیر بگذارد. در صورت وجود انحراف، تبدیل داده‌ها (مانند تبدیل لگاریتمی) برای بهبود توزیع در نظر گرفته شد (Tapia et al., 2021).

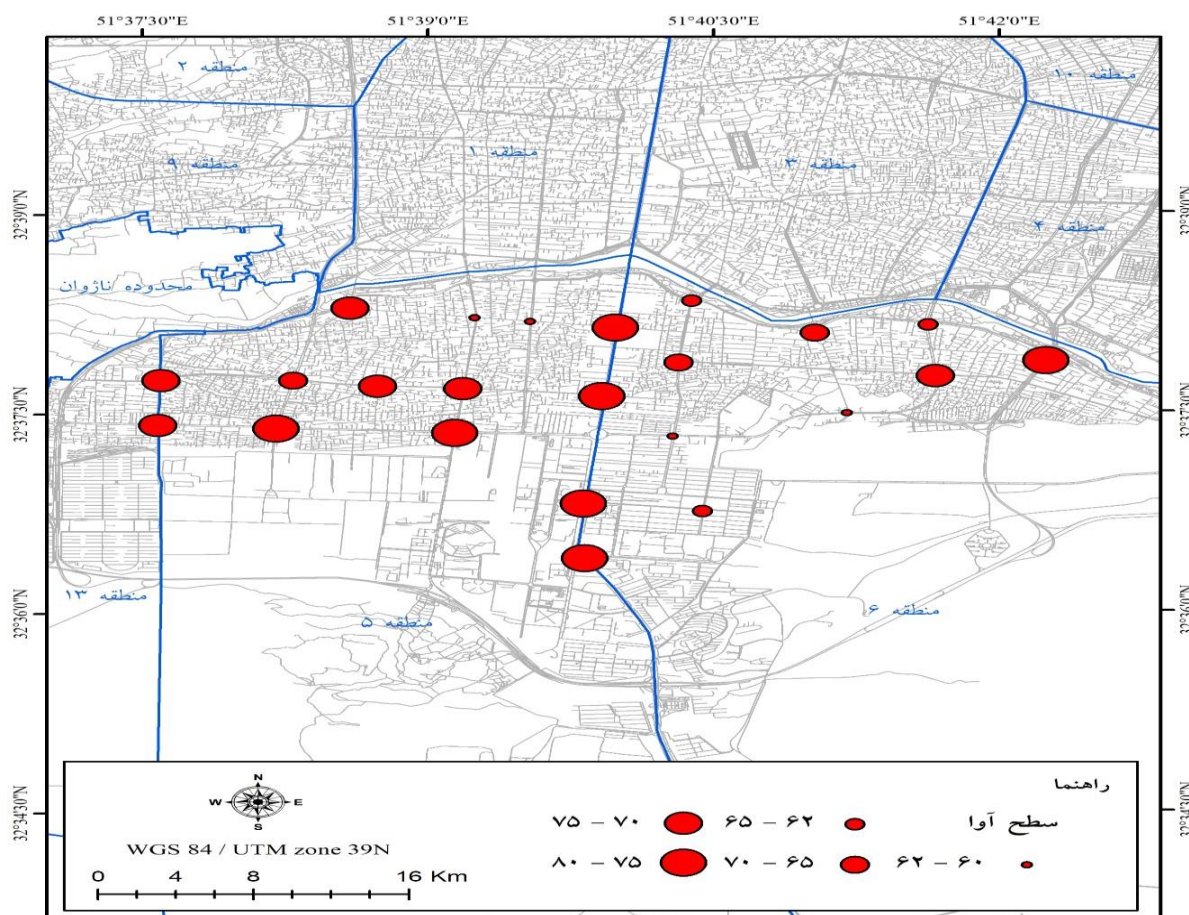
نتایج

سطح صدا در ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌های حاصل از برداشت سطح صدا در مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان، شامل ۱۲ نقطه در منطقه ۵ و ۱۱ نقطه در منطقه ۶، دامنه‌ای قابل توجهی از شدت صوتی بین ۶۰/۵ تا ۸۰/۵ دسی‌بل را نشان می‌دهد که بیانگر تنوع قابل‌توجه شرایط صوتی در این مناطق است. (**Error! Reference source not found.**) در منطقه ۵، بالاترین سطح صدا در نقاط صفا و ارتش با ۸۰/۵ دسی‌بل ثبت شد که به‌طور قابل‌توجهی فراتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی برای مناطق مسکونی (۵۵ دسی‌بل در روز) و تجاری (۶۵-۷۰ دسی‌بل) است. نقاطی نظیر کارگر (۷۷/۸ دسی‌بل)، مرداوچ (۷۷/۲ دسی‌بل)، مارنان (۵۷/۷ دسی‌بل)، باغ زیار (۷۵/۵ دسی‌بل)، و سیروس (۷۵/۵ دسی‌بل) نیز سطوح صوتی بالایی را نشان می‌دهند که تحت تأثیر تردد وسایل نقلیه، فعالیت‌های تجاری و تراکم جمعیت قرار دارند. در مقابل، نقاط توحید نظر (۶۰/۵ دسی‌بل) و نظامی-نظر (۶۰/۷ دسی‌بل) کمترین سطح صدا را در این منطقه ثبت کردند، هرچند این مقادیر همچنان بالاتر از استانداردهای مناطق مسکونی هستند. نقطه امامزاده محسن با ۷۰/۲۱ دسی‌بل در دسته شدت صوتی متوسط قرار گرفت.

در منطقه ۶، بالاترین سطح صدا در چهارباغ نظر (۷۸/۸ دسی‌بل) مشاهده شد که به دلیل موقعیت این نقطه در یکی از خیابان‌های تاریخی و پرتردد شهر با فعالیت‌های تجاری و گردشگری قابل‌انتظار است. نقاط بازارچه (۷۸/۲ دسی‌بل) و شریعتی-نیکبخت (۷۶/۷ دسی‌بل) نیز به دلیل نزدیکی به مراکز تجاری و بازارهای محلی، سطوح صوتی بالایی دارند. نقاط ارباب-سجاد (۷۴/۰۶ دسی‌بل)، شیخ صدوق-شیخ مفید (۷۰/۸ دسی‌بل) و فیض (۶۹ دسی‌بل) در دسته شدت صوتی متوسط قرار دارند که در این نواحی ترکیبی از کاربری‌های مسکونی و نیمه‌تجاری را شامل می‌شوند. پایین‌ترین سطوح صدا در این منطقه در نقاط شیخ صدوق (۶۱/۲ دسی‌بل)، آزادگان (۶۲/۱۱ دسی‌بل)، رسالت (۶۳/۵ دسی‌بل)، آینه‌خانه (۶۳/۲ دسی‌بل) و آبشار (۶۴/۹ دسی‌بل) ثبت شد که به دلیل موقعیت این نقاط در مناطق مسکونی آرام‌تر یا دورتر از مراکز پرتردد است، هرچند این مقادیر نیز از استانداردهای جهانی فاصله دارند.

مقایسه دو منطقه نشان می‌دهد که منطقه ۵ با میانگین تقریبی ۷۳/۳۹ دسی‌بل، سطوح صوتی بالاتری نسبت به منطقه ۶ با میانگین تقریبی ۶۹/۳۱ دسی‌بل دارد. این تفاوت احتمالاً به دلیل تراکم بالاتر ترافیک، وجود تأسیسات و تمرکز فعالیت‌های تجاری در منطقه ۵ است. بر این اساس، نقاط صفه، ارتش، چهارباغ، نظر و بازارچه به عنوان نقاط بحرانی شناسایی شدند که نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های کاهش آلودگی صوتی هستند، درحالی‌که نقاط توحید نظر، نظامی نظر، شیخ صدوق و آزادگان شرایط صوتی بهتری دارند، اما همچنان از استانداردهای مطلوب فاصله دارند. این یافته‌ها نشان‌دهنده نفوذ گسترده آلودگی صوتی به مناطق مسکونی و تجاری است که ضرورت بازنگری در سیاست‌های شهرسازی، مدیریت ترافیک و اجرای اقدامات کاهش صدا را برجسته می‌سازد. متوسط شدت صوت ثبت شده در نقاط مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ - متوسط سطح صدای ثبت شده در نقاط اندازه‌گیری صدا

Fig. 2 - The average sound levels recorded at the measurement points

مقایسه میانگین سطح صدا بین دو منطقه مورد مطالعه، یعنی مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان، با استفاده از مقایسه میانگین انجام شد. میانگین سطح صدا در منطقه ۵ و ۶، نشان‌دهنده تفاوت نسبی بین شرایط صوتی دو منطقه هستند، به‌طوری‌که منطقه ۵ به‌طور متوسط شدت صوتی بیشتری را نسبت به منطقه ۶ تجربه می‌کند. برای بررسی دقیق‌تر این تفاوت و ارزیابی معناداری آماری آن، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. نتایج این تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار مجموع مربعات بین‌گروهی ۲۵۷/۸۲ و مجموع مربعات درون‌گروهی ۲۶/۲۹۶ محاسبه شد که مجموع کل آن‌ها ۸۲/۳۷۸ است. مقدار آماره F، که از نسبت میانگین مربعات بین‌گروهی به میانگین مربعات درون‌گروهی محاسبه می‌شود، برابر با ۵/۸۳۲ بدست آمد. همچنین، مقدار Sig (سطح معناداری) برابر با

۰/۰۲۰ گزارش شد. با توجه به حصول این مقادیر، اینطور به نظر میرسد که تفاوت معنی‌داری بین سطح صدا در بخش‌های ۵ و ۶ وجود دارد. به عبارت دیگر، سطح صدای ثبت شده در منطقه ۶، به طور معنی‌داری از سطح صدای منطقه ۵ بیشتر بوده است.

جدول ۱- مقایسه میانگین متوسط سطح صدای ثبت شده بین بخش ۵ و ۶

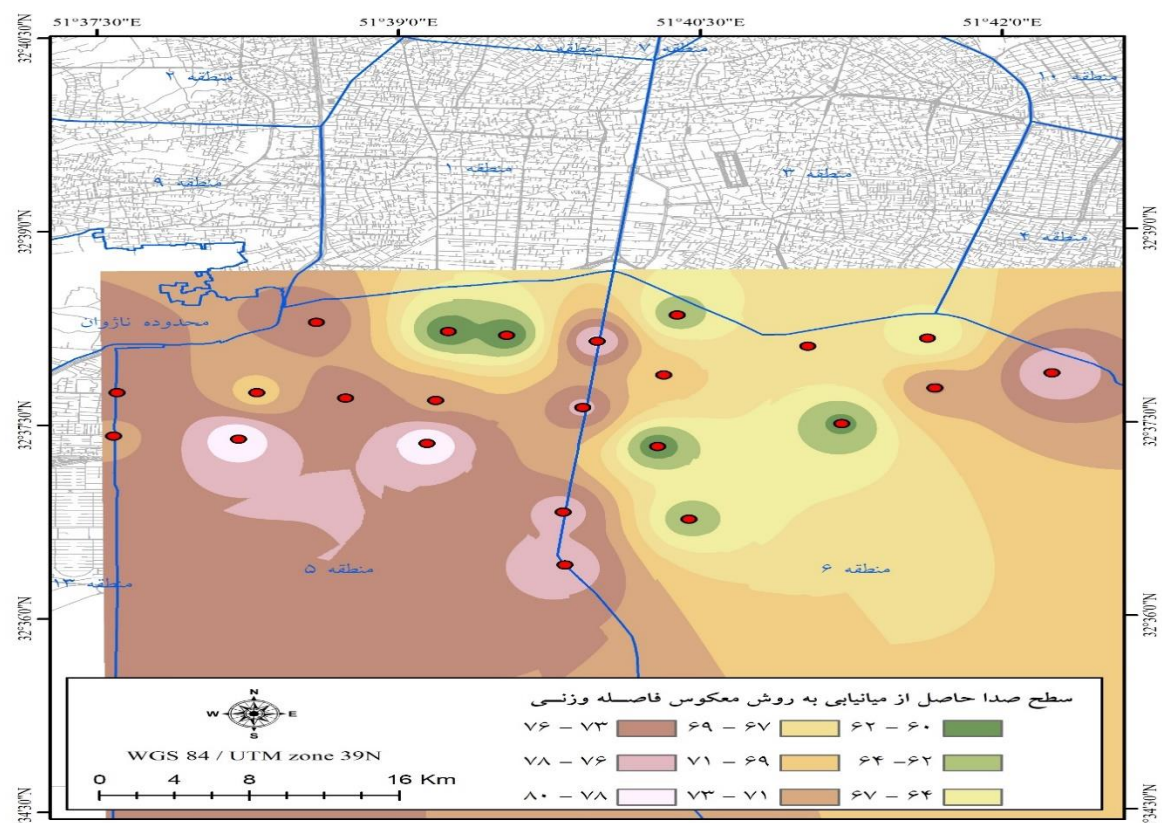
Table 1 - Comparison of the mean recorded sound levels between Section 5 and Section 6

p-value	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
0/020	5/832	82/257	1	82/257	بین گروه
		14/113	20	296/268	درون گروه
			21	378/825	مجموع

توزیع فضایی و نقاط بحرانی سطح صدا

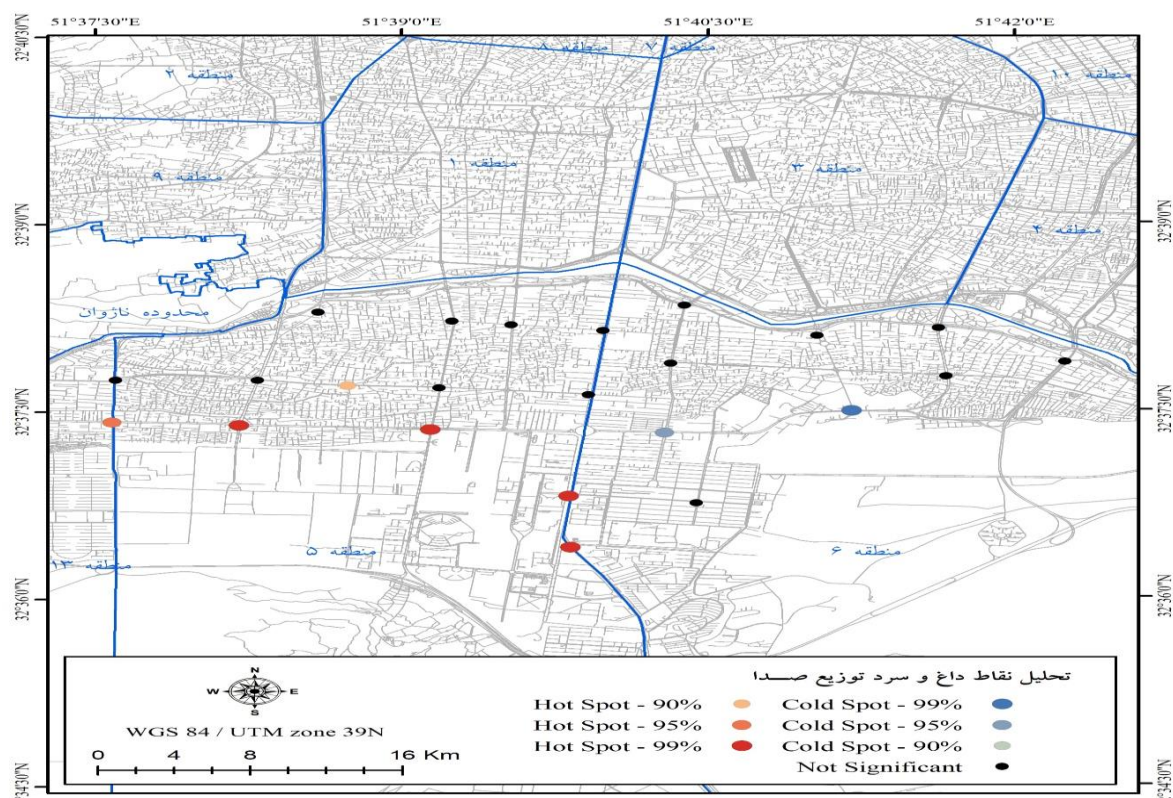
برای بررسی توزیع فضایی شدت صدا در بخش‌هایی از شهر اصفهان، از روش میان‌یابی فاصله معکوس وزنی استفاده شد (شکل ۳). بر اساس نقشه به‌دست‌آمده، منطقه ۵ بیشترین سطوح صدای ثبت‌شده را به خود اختصاص داده است. نواحی جنوبی و جنوب‌غربی این منطقه نیز دارای تمرکز بالایی از صدا با بازه‌ای بیش از ۷۸ دسی‌بل هستند. این بخش‌ها عمدتاً در مجاورت معابر پرتردد، کاربری‌های تجاری پرتردد، و نقاط فاقد موانع صوتی قرار دارند. همچنین بخشی از مرکز منطقه ۵ نیز با سطوح صدای بالا (۷۶ تا ۷۸ دسی‌بل) مشخص شده است که نشان‌دهنده تراکم آلودگی صوتی در این بخش می‌باشد. در مقابل، در منطقه ۶ توزیع شدت صدا متفاوت بوده و به‌طور محسوسی کاهش یافته است. محدوده‌های مرکزی و شرقی این منطقه عمدتاً دارای سطوح صدای بین ۶۰ تا ۶۴ دسی‌بل هستند که با رنگ سبز و زرد کم‌رنگ در نقشه نمایش داده شده‌اند. این محدوده‌ها دارای بافتی مسکونی‌تر، کمتر متراکم از نظر ترافیکی، و در مواردی مجاور فضاهای سبز یا زمین‌های باز می‌باشند که نقش مهمی در جذب یا کاهش سطح صدا ایفا می‌کنند.

برای تأیید الگوهای مشاهده‌شده در نقشه، از تحلیل آماری شاخص G (Getis-Ord Gi*) جهت شناسایی نقاط داغ و سرد آلودگی صوتی استفاده شد (شکل ۴). نتایج این تحلیل نیز انطباق معناداری با نتایج حاصل از درون‌یابی نشان داد. در منطقه ۵، چهار نقطه به‌عنوان نقاط داغ شناسایی شدند؛ این نقاط دقیقاً در نواحی با مقادیر بالای صدا در نقشه میان‌یابی واقع شده‌اند و از نظر آماری نیز دارای تفاوت معنادار با نقاط مجاور خود هستند. این هم‌پوشانی، نشان از پایداری فضایی پدیده آلودگی صوتی در این نواحی دارد. در مقابل، در منطقه ۶ دو نقطه به‌عنوان نقاط سرد شناسایی گردیدند که دارای سطح صدای پایین‌تری نسبت به نقاط پیرامون بوده و در نواحی سبز نقشه واقع شده‌اند. در مجموع، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که منطقه ۵ در وضعیت بحرانی‌تری از نظر آلودگی صوتی قرار دارد، در حالی که برخی نواحی منطقه ۶ دارای شرایط مطلوب‌تری هستند.



شکل ۳- میانجیابی متوسط سطح صدای ثبت شده با استفاده از روش معکوس فاصله وزنی

Fig. 3: Interpolation of recorded average sound levels using the Inverse Distance Weighting method



شکل ۴- تحلیل نقاط داغ و سرد متوسط سطح صدای ثبت شده

Fig. 4 – Hotspot and Coldspot Analysis of Recorded Average Sound Levels

بحث و نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان دهنده دامنه گسترده‌ای از سطوح صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان، از ۶۰/۵ دسی‌بل در توحید نظر تا ۸۰/۵ دسی‌بل در صفا و ارتش، است که همگی بالاتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای مناطق مسکونی (۵۵ دسی‌بل در روز) و حتی استانداردهای تجاری (۶۵-۷۰ دسی‌بل) قرار دارند (Fink, 2017). استانداردهای ملی ایران، بر اساس سازمان حفاظت محیط زیست، نیز حداکثر ۵۵ دسی‌بل را برای مناطق مسکونی توصیه می‌کنند، که نشان می‌دهد حتی نقاط با کمترین سطح صدا، مانند شیخ صدوق (۶۱/۲ دسی‌بل) و آزادگان (۶۲/۱۱ دسی‌بل) در منطقه ۶، در محدوده آلاینده‌ی صوتی قرار دارند. نقاط بحرانی مانند صفا، ارتش (۸۰/۵ دسی‌بل)، چهارباغ نظر (۷۸/۸ دسی‌بل)، و بازارچه (۷۸/۲ دسی‌بل) به‌طور قابل توجهی از آستانه‌های ایمن فراتر رفته و در دسته آلودگی صوتی شدید قرار می‌گیرند. این سطوح بالا می‌توانند اثرات فیزیولوژیک قابل توجهی بر ساکنان داشته باشند. سطوح صوتی بالای ۷۰ دسی‌بل، طبق نتایج Basner و همکاران (۲۰۱۸) می‌توانند باعث افزایش استرس، اختلالات خواب، و حتی کاهش شنوایی در طولانی‌مدت شوند. در نقاط بحرانی، مانند صفا، سطح صدای ۸۰/۵ دسی‌بل به آستانه‌ای نزدیک است که می‌تواند به آسیب مستقیم شنوایی به‌ویژه برای گروه‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان و سالمندان منجر شود. حتی در نقاط با شدت صوتی متوسط، مانند فیض (۶۹ دسی‌بل) در منطقه ۶ نیز اثرات فیزیولوژیک مانند افزایش فشار خون و اضطراب گزارش شده‌اند، که به دلیل قرار گرفتن مداوم در معرض صدا ایجاد می‌شوند (Münzel et al., 2018). میانگین سطح صدا در منطقه ۵ (۷۳/۳۹ دسی‌بل) و منطقه ۶ (۶۹/۳۱ دسی‌بل) نشان‌دهنده شرایط نامطلوب صوتی در هر دو منطقه است، که ضرورت مداخلات فوری برای کاهش آلودگی صوتی را برجسته می‌کند.

مطالعات دیگر در شهرهای جهان نیز سطوح صوتی مشابهی را گزارش کرده‌اند که اثرات فیزیولوژیک و انحراف از استانداردها را تأیید می‌کنند. به‌عنوان مثال، Halonen و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای در شهرهای اروپایی مانند لندن، سطوح صوتی را در مناطق شهری بررسی کردند. این تحقیق، که بر ارزیابی اثرات صوتی بر سلامت قلب متمرکز بود، نشان داد که در نواحی پرتردد، سطح صدا به‌طور میانگین بین ۷۰ تا ۸۰ دسی‌بل است، که با نقاط بحرانی این مطالعه (مانند چهارباغ نظر) قابل مقایسه است. آن‌ها دریافتند که قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض سطوح بالای ۷۵ دسی‌بل خطر بیماری‌های قلبی-عروقی را افزایش می‌دهد، که نشان‌دهنده تأثیرات فیزیولوژیک جدی در مناطق ۵ و ۶ است. زمینه این مطالعه بر شناسایی آستانه‌های صوتی مضر برای سیاست‌گذاری شهری بود، و نتایج آن تأکید داشتند که حتی سطوح نزدیک به ۶۰ دسی‌بل، مانند توحید نظر، می‌توانند اثرات منفی بر خواب و تمرکز داشته باشند.

در مطالعه دیگری، Kim و همکاران (۲۰۲۱) در سئول، کره جنوبی، آلودگی صوتی در مناطق تجاری و مسکونی را تحلیل کردند. آن‌ها گزارش دادند که سطح صدا در مراکز تجاری به ۷۵ دسی‌بل یا بیشتر می‌رسد، مشابه بازارچه و چهارباغ نظر، و در مناطق مسکونی بین ۶۰ تا ۶۵ دسی‌بل متغیر است، که با نقاط سرد این مطالعه (مانند شیخ صدوق) همخوانی دارد. این مطالعه بر اثرات صوتی بر سلامت روان متمرکز بود و نشان داد که سطوح بالای ۷۰ دسی‌بل باعث افزایش اضطراب و کاهش کیفیت زندگی می‌شوند، که برای نقاط بحرانی این مطالعه نگران‌کننده است. تفاوت‌های منطقه‌ای، مانند تراکم بالای ساختمانی در اصفهان در مقایسه با سئول، ممکن است شدت صوتی را در نقاطی مانند صفا تشدید کرده باشد، زیرا انعکاس صدا در محیط‌های فشرده افزایش می‌یابد.

علل احتمالی قرار گرفتن تمام نقاط در محدوده آلاینده صوتی، مواردی شامل ساختار شهری و فقدان زیرساخت‌های کاهش صدا است. تراکم ساختمانی بالا در منطقه ۵، به‌ویژه در نواحی مانند صفا و ارتش، باعث انعکاس بیشتر امواج صوتی می‌شود، که شدت صدا را از آستانه‌های ایمن فراتر می‌برد. در منطقه ۶، حتی در نقاط مسکونی مانند آزادگان، نفوذ صدا از نواحی مجاور به دلیل نبود موانع صوتی کافی، سطح صدا را بالاتر از استاندارد نگه داشته است. مصالح ساختمانی سخت، مانند بتن و آسفالت، که در هر دو منطقه رایج هستند، انعکاس صدا را تشدید کرده و به اثرات فیزیولوژیک مانند استرس کمک می‌کنند. همچنین، طراحی خیابان‌ها، که اغلب فاقد

فضاهای سبز یا دیوارهای صداگیر است، امکان کاهش طبیعی صدا را محدود کرده است. مقایسه با استانداردها نشان می‌دهد که هیچ‌یک از نقاط نمونه‌برداری شرایط صوتی ایمن را برآورده نمی‌کنند، و این انحراف در نقاط بحرانی شدیدتر است، که می‌تواند به افزایش بیماری‌های مرتبط با استرس و کاهش کیفیت زندگی منجر شود.

کاربرد این یافته‌ها در سیاست‌گذاری شهری قابل توجه است. شناسایی تمام نقاط به‌عنوان نواحی آلاینده، حتی در مناطق مسکونی، نیاز به اقدامات فوری مانند نصب موانع صوتی، افزایش فضاهای سبز، و بازطراحی معابر را برجسته می‌کند. نقاط بحرانی مانند صفا و چهارباغ نظر باید در اولویت مداخلات قرار گیرند تا اثرات فیزیولوژیک مانند کاهش شنوایی و بیماری‌های قلبی کاهش یابد. مقایسه با شهرهای دیگر نشان می‌دهد که استراتژی‌های موفق مانند استفاده از دیوارهای صوتی در لندن یا فضاهای سبز گسترده در سئول می‌توانند در اصفهان اجرا شوند. این داده‌ها همچنین می‌توانند به اطلاع‌رسانی عمومی درباره خطرات فیزیولوژیک آلودگی صوتی و تشویق ساکنان به استفاده از محافظ‌های شنوایی در نقاط پرصدا کمک کنند. از منظر تحقیقاتی، این یافته‌ها مبنایی برای مطالعات آینده در مورد اثرات بلندمدت آلودگی صوتی در کلان‌شهرهای ایران به‌ویژه با توجه به تفاوت‌های ساختاری و فرهنگی در مقایسه با شهرهای جهانی فراهم می‌کنند.

این مطالعه به بررسی الگوهای مکانی آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان را با استفاده از روش میانبایی فاصله معکوس وزنی و تحلیل نقاط داغ و سرد پرداخت. نقشه‌ی میانبایی بدست آمده، توزیع ناهمگن شدت صوتی را آشکار ساخت، به‌طوری‌که منطقه ۵ با میانگین سطح صدای ۷۳/۳۹ دسی‌بل، شدت صوتی بیشتری نسبت به منطقه ۶ با میانگین ۶۹/۳۱ دسی‌بل دارد. نواحی جنوبی و جنوب‌غربی منطقه ۵، به‌ویژه در نقاطی مانند صفا و ارتش با سطح صدای ۸۰/۵ دسی‌بل، بالاترین شدت صوتی را نشان می‌دهند. تحلیل نقاط بحرانی نیز چهار نقطه داغ در منطقه ۵ (از جمله صفا و ارتش) و دو نقطه سرد در منطقه ۶ (شامل شیخ صدوق و آزادگان) را شناسایی کرد، که وجود الگوهای مکانی پایدار در این دو ناحیه را تأیید می‌کند. در این راستا، Xu و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای در شانگهای، چین، از روش‌های میانبایی مانند کریجینگ و فاصله معکوس وزنی برای نقشه‌برداری آلودگی صوتی در مناطق شهری استفاده کردند. این تحقیق، که بر ارزیابی توزیع صوتی در نزدیکی معابر اصلی متمرکز بود، نشان داد که فاصله معکوس وزنی در محیط‌های شهری با داده‌های پراکنده، دقت بالایی در شناسایی نواحی پرصدا دارد، به‌ویژه هنگامی که مدل‌های کریجینگ به دلیل ناهمگنی داده‌ها ناکارآمد هستند. Eid و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود در راستای تعیین الگوی مکانی آلودگی صوتی شهری در المنصوره مصر عنوان کردند که مناطق با تراکم جمعیت بالا و ترافیک بالا دارای آلودگی صوتی بالاتری هستند. زمینه این مطالعه بر ارائه ابزارهایی برای برنامه‌ریزی شهری بود، و نتایج آن نشان داد که نواحی با تراکم ساختمانی بالا، شدت صوتی بیشتری دارند، که با الگوهای منطقه ۵ این مطالعه همخوانی دارد.

در مطالعه دیگری، Ismail و همکاران (۲۰۲۰) در استکهلم، سوئد، از تحلیل Getis-Ord Gi برای شناسایی نقاط داغ آلودگی صوتی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که نقاط داغ اغلب در تقاطع‌های شلوغ و نواحی تجاری متمرکز هستند، در حالی که نقاط سرد در مناطق مسکونی با بافت بازتر قرار دارند. این مطالعه بر اهمیت تحلیل مکانی برای اولویت‌بندی مداخلات کاهش صدا تأکید داشت و پیشنهاد داد که طراحی شهری، مانند افزایش فضاهای باز، می‌تواند شدت صوتی را کاهش دهد، که توضیحی برای وجود سطوح صوتی پایین‌تر در نقاط سرد منطقه ۶ است. تفاوت‌های جغرافیایی، مانند چیدمان خیابان‌ها در اصفهان نسبت به پکن، ممکن است باعث شدت صوتی بالاتر در نقاط داغ این مطالعه شده باشد، زیرا خیابان‌های باریک‌تر انعکاس صدا را تشدید می‌کنند.

علل احتمالی دیگر برای الگوهای مکانی مشاهده‌شده شامل تفاوت‌های توپوگرافی و کاربری زمین است. منطقه ۵، که در نزدیکی ارتفاعات قرار دارد، ممکن است به دلیل شیب ملایم و انعکاس صدا از سطوح سخت، شدت صوتی بالاتری در نقاطی مانند صفا داشته باشد. در مقابل، منطقه ۶، که در مجاورت رودخانه زاینده‌رود و زمین‌های بازتر قرار دارد، از پراکندگی بهتر امواج صوتی بهره می‌برد، به‌ویژه در نقاطی مانند آینه‌خانه. فقدان موانع صوتی، مانند دیوارهای صداگیر یا پوشش گیاهی گسترده، در نواحی پرصدا مانند ارتش و

چهارباغ نظر، به تشدید شدت صوتی کمک کرده است. همچنین، پراکندگی همگن ۲۳ نقطه نمونه برداری (۱۲ نقطه در منطقه ۵ و ۱۱ نقطه در منطقه ۶) امکان ثبت دقیق تغییرات مکانی را فراهم کرد، اما محدودیت تعداد نقاط ممکن است برخی جزئیات محلی را پنهان کرده باشد. برای مثال، نواحی مرزی بین مناطق ممکن است الگوهای متفاوتی داشته باشند که در این تحلیل ثبت نشده‌اند. به طور کلی اینطور می‌توان نتیجه گرفت که علل احتمالی بروز این الگوهای مکانی ساختار شهری و ویژگی‌های جغرافیایی است. در منطقه ۵، چیدمان فشرده خیابان‌ها و تراکم ساختمانی بالا در نواحی جنوبی، مانند صفه، انعکاس امواج صوتی را تشدید کرده و به سطوح صوتی بالا منجر شده است. در مقابل، بافت بازتر و وجود فضاهای غیرمسکونی در بخش‌های مرکزی و شرقی منطقه ۶، مانند نزدیکی شیخ صدوق، به پراکندگی صدا کمک کرده و شدت صوتی را کاهش داده است.

این مطالعه نشان داد که آلودگی صوتی در مناطق ۵ و ۶ شهر اصفهان در سطح بالایی قرار دارد، به‌طوری‌که منطقه ۵ با میانگین سطح صدای ۷۳.۳۹ دسی‌بل، شدت صوتی بیشتری نسبت به منطقه ۶ با میانگین ۶۹.۳۱ دسی‌بل تجربه می‌کند. این تفاوت عمدتاً به دلیل تراکم بالاتر ترافیک و فعالیت‌های تجاری در منطقه ۵ است. تمامی نقاط نمونه برداری شده از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و استانداردهای ملی ایران (۵۵ دسی‌بل برای مناطق مسکونی و ۶۵-۷۰ دسی‌بل برای مناطق تجاری) فراتر رفته‌اند، که نشان‌دهنده ضرورت مداخلات فوری است. نقاط داغ آلودگی صوتی، مانند صفه و ارتش در منطقه ۵ با سطح صدای ۸۰.۵ دسی‌بل، به دلیل خطرات سلامتی نظیر استرس، اختلالات خواب و مشکلات شنوایی، نیازمند توجه ویژه هستند. سیاست‌های کاهش آلودگی صوتی باید به‌صورت منطقه‌ای طراحی شوند، با تمرکز بر نقاط پرصدا در منطقه ۵ و اجرای اقداماتی نظیر نصب موانع صوتی، گسترش فضاهای سبز، و مدیریت ترافیک. این یافته‌ها بر اهمیت تحلیل مکانی در شناسایی الگوهای آلودگی صوتی تأکید کرده و چارچوبی برای برنامه‌ریزی شهری به‌منظور بهبود کیفیت صوتی محیط و سلامت عمومی در شهر اصفهان ارائه می‌دهند.

Extended Abstract

Noise pollution, a critical environmental issue in urban settings, significantly impacts the health and quality of life of city residents. This study focuses on assessing noise pollution and its correlation with vehicular traffic in municipal regions 5 and 6 of Isfahan, Iran, located in the southern part of the city. Isfahan, a major metropolitan area with a population exceeding 2 million and a strategic position in Iran's transportation network, faces increasing noise pollution due to rapid urbanization, dense traffic, and commercial activities. The research aims to map the spatial distribution of noise pollution, identify critical hotspots and coldspots, and provide insights for urban planning to mitigate its adverse effects. The study collected sound level data, measured in decibels A (dBA), from 23 sampling points—12 in region 5 and 11 in region 6—during the peak traffic hours of 16:00 to 18:00 on weekdays. These points were strategically selected to ensure homogeneous geographical coverage and to represent areas with varying traffic intensities, from low to high. Region 5, with an area of 1,702 hectares and a population of 171,182, is characterized by high traffic density due to its proximity to major roads and commercial zones. Region 6, spanning 6,600 hectares with a population of 104,737, includes residential areas and is adjacent to the Zayandehroud River, influencing its acoustic environment. Sound measurements were conducted using a portable sound level meter, with data averaged over 30-minute intervals to capture real-time noise levels during peak activity. The Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method, implemented in ArcGIS 10.8, was used to analyze the spatial distribution of noise pollution, generating continuous noise maps. The IDW method, based on the principle that closer points have greater influence, effectively highlighted areas with elevated noise levels, particularly in southern and southwestern parts of region 5, where levels exceeded 78 dBA. Additionally, the Getis-Ord G_i^* statistical method was employed to identify noise pollution hotspots and coldspots, confirming four hotspots in region 5 (e.g., Sofeh and Artesh at 80.5 dBA) and two coldspots in region 6 (e.g., Sheikh Sadough at 61.2 dBA and Azadegan at 62.11 dBA). A one-way ANOVA test, assuming data normality (verified by Shapiro-Wilk) and

homogeneity of variances (confirmed by Levene's test), was conducted to compare sound levels between regions. The results, with a p-value of 0.020, indicated a statistically significant difference, with region 5 (mean: 73.39 dBA) experiencing higher noise levels than region 6 (mean: 69.31 dBA), attributed to denser traffic and commercial activities. All measured points exceeded the World Health Organization's thresholds (55 dBA for residential areas and 65–70 dBA for commercial zones) and Iran's national standards, highlighting a pervasive noise pollution issue. Hotspots like Sofeh, Artesh, and Chahar Bagh Nazar (78.8 dBA) pose significant health risks, including stress, sleep disturbances, and potential hearing loss, particularly for vulnerable groups. The spatial analysis revealed that urban structure, high building density, and lack of sound barriers exacerbate noise in region 5, while open spaces and proximity to the Zayandehroud River mitigate it in region 6. Comparative studies in cities like London and Seoul corroborate these findings, emphasizing the role of traffic and urban design in noise pollution. The results underscore the need for targeted interventions, such as installing sound barriers, expanding green spaces, and optimizing traffic management, particularly in region 5's hotspots. These findings provide a robust framework for urban planners to enhance the acoustic environment and public health in Isfahan, contributing to sustainable urban development.

Keywords: Noise pollution, Traffic, Inverse Distance Weighted, Getis-Ord Gi*, Isfahan.

References

- Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 519.
- Eid, M. M., Ben Ghorbal, A., ALmetwally, E. M., & Elbatal, I. (2024). Urban Noise Pollution: A Dataset for Spatiotemporal and Environmental Analysis. *Journal of Artificial Intelligence in Engineering Practice*, 1(2), 72-81.
- Fink, D. J. (2017). What is a safe noise level for the public?. *American Journal of Public Health*, 107(1), 44-45.
- Halonen, J. I., Hansell, A. L., Gulliver, J., Morley, D., Blangiardo, M., Fecht, D., ... & Tonne, C. (2015). Road traffic noise is associated with increased cardiovascular morbidity and mortality and all-cause mortality in London. *European heart journal*, 36(39), 2653-2661.
- Ismail M, Warsame A, Wilhelmsson M. (2020). Measuring Gentrification with Getis-Ord Statistics and Its Effect on Housing Prices in Neighboring Areas: The Case of Stockholm.
- Joost, S., De Ridder, D., Marques-Vidal, P., Bacchilega, B., Theler, J. M., Gaspoz, J. M., & Guessous, I. (2019). Overlapping spatial clusters of sugar-sweetened beverage intake and body mass index in Geneva state, Switzerland. *Nutrition & diabetes*, 9(1), 35.
- Kim, J., Han, J., Park, K., & Seok, S. (2022). Improved IDW interpolation application using 3D search neighborhoods: Borehole data-based seismic liquefaction hazard assessment and mapping. *Applied Sciences*, 12(22), 11652.
- Kumar, S., & Parida, B.R. (2021). Hydroponic farming hotspot analysis using the Getis–Ord Gi* statistic and high-resolution satellite data of Majuli Island, India. *Remote Sensing Letters*. 12:408-18.
- Latha, A., & Ganesan, R. (2022). Analysis of Noise Pollution for an Educational Institution. *ECS Transactions*, 107(1), 12609.
- Lelièvre, N., Beaurepaire, P., Mattrand, C., & Gayton, N. (2018). AK-MCsi: A Kriging-based method to deal with small failure probabilities and time-consuming models. *Structural Safety*. 73:1-11.
- Morillas, J.M.B., Gozalo, G.R., González, D.M., Moraga, P.A., & Vilchez-Gómez, R. (2018). Noise pollution and urban planning. *Current Pollution Reports*. 4: 208-19.

- Munir, S., Khan, S., Nazneen, S., & Ahmad, S. S. (2021). Temporal and seasonal variations of noise pollution in urban zones: a case study in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 29581-29589..
- Münzel, T., Sørensen, M., Schmidt, F., Schmidt, E., Steven, S., Kröller-Schön, S., & Daiber, A. (2018). The adverse effects of environmental noise exposure on oxidative stress and cardiovascular risk. *Antioxidants & redox signaling*, 28(9), 873-908.
- Okoye, K., & Hosseini, S. (2024). Analysis of variance (ANOVA) in R: one-way and two-way ANOVA. R Programming: Statistical Data Analysis in Research: *Springer*. 187-209.
- Patella, S., Aletta, F., & Mannini, L. (2019). Assessing the impact of Autonomous Vehicles on urban noise pollution. *Noise Mapping*. 6:72-82.
- Rossi, F., & Becker, G. (2019). Creating forest management units with Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) over a forest affected by mixed-severity fires. *Australian Forestry*. 82:166-75.
- Tapia, C.E.F., & Cevallos, K.L.F. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-darling, ryan-joiner, shapiro-wilk y kolmogórov-smirnov. *Societas*. 23:83-106.
- Tortorella, A., Menculini, G., Moretti, P., Attademo, L., Balducci, P.M., Bernardini, F., & et al. (2022). New determinants of mental health: the role of noise pollution. A narrative review. *International Review of Psychiatry*. 34:783-96.
- Wang, D., Ying, L., Jia, Y., Zhang, L., Zhang, F., & Wang, W. (2020). Noise pollution mitigation method for substations in urban communities based on a smart silencing unit. *Journal of Cleaner Production*. 245:118911.
- Xu, X., Ge, Y., Wang, W., Lei, X., Kan, H., & Cai, J. (2022). Application of land use regression to map environmental noise in Shanghai, China. *Environment international*, 161, 107111.
- Yang, W., He, J., He, C., & Cai, M. (2020). Evaluation of urban traffic noise pollution based on noise maps. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 87:102516.
- Zhang, Q., Meng, X., Shi, S., Kan, L., Chen, R., Kan, H. (2022). Overview of particulate air pollution and human health in China: Evidence, challenges, and opportunities. *The Innovation*. 3.