

Evaluating the impact of city form indicators on the pollution of Arak Metropolis

Layla Mohamadi Kazemabadi¹, Sedigheh Lotfi^{2✉}, Amer Nikpour³

1. Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. E-mail: mohammadi.leyla70@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. E-mail: s.lotfi@umz.ac.ir
3. Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran E-mail: a.nikpour@umz.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The United Nations statistics indicated damage caused by air pollution in Iran was 8 billion dollars in 2008 and reached 11 and 15 billion dollars by 2014 and 2019 respectively. Few studies have focused on the relationship between urban form and pollutions. However, it is especially unclear whether the relationship varies across cities with different socioeconomic characteristics. The accurate estimation of the impact of urban form on spreading pollutants is essential for suggesting effective spatial planning strategies. Arak metropolis is currently one of the 8 most polluted cities in the country, and its air is continuously unhealthy for more than half of a year, especially for vulnerable groups. The present study aimed to measure and evaluate the impact of city form on the pollution of the city. The data obtained from Environmental Organization and Municipality of the city. GIS, GWR regression and Moran models were used for data analysis. The research results showed; There is a significant relationship between the city form index and the dependent variable (air pollution index) at the 95% level. So that the R2 value obtained from the spatial analysis of the city form index on SO2 showed 72% and the influence of the city form on the production of this pollutant. The intensity of the effect is greater in zones 2 and 3 of Arak city. Also, the R2 obtained for the NO2 variable is equal to 79%, which indicated that there is a spatial relationship at a high level between the independent variable (city form) and the dependent variable, and in zone 1 of Arak. The analysis of the spatial relationship of the city form on the production of O3 has shown R2 of 85%, which, like other variables, showed a high level of spatial relationship between the independent variable and O3. In zones 1, 2, 3, pollutants have the highest concentration and relationship with the city form due to the presence of industrial machinery, aluminum factories, Shazand thermal and petrochemical plants in these areas.
Article history: Received: 28 January 2024 Revised: 19 May 2024 Accepted: 3 June 2024 Published: 22 August 2025	
Keywords: City form, air pollution, spatial analysis, Arak city.	

Cite this article: Mohammadi Kazemabadi, L., Lotfi, S., & Nikpour, A. (2025) Evaluating the effect of city form indicators on the pollution of Arak Metropolis. *Journal of Geography and Planning*, 30 (92), 299-313. <https://doi.org/10.22034/gp.2024.60218.3229>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/gp.2024.60218.3229>

Publisher: University of Tabriz.

Extended Abstract

Introduction

The population of cities is growing and it is predicted that more than 60% of the world's population will live in cities by 2030. The increase in urban population leads to drastic changes in cities in different socioeconomic and environmental dimensions. The sharp increase in energy consumption has led to environmental problems, including air pollution. Many cities around the world are facing the challenge of severe pollution of particles, and this has a negative impact on all aspects of urban life. In recent years, despite the fact that various plans have been made to reduce the emission of pollutants but still the concentration of pollutants are increasing to a great extent and exceeded the legal limit so that these pollutants are still a challenge for modern societies. Therefore, according to the issues raised, the present research has focused on the following purposes: a) Status of city form indicators (use mix and population density in Arak city), b) Status of air pollution indicators in Arak city (NO₂, SO₂, O₃) and c) Spatial relationship between city form indicators and air pollution indicators in Arak city. This study may provide a reference for decision-makers and essential guidance for urban planners and managers regarding sustainable urban planning

Materials and Methods

Arak is one of the metropolises of Iran with 520,944 people in 2016, which makes it the demographic center of Central Province and the 18th most populated city in Iran. Arak is known as the industrial capital of Iran with 1065 industrial units within 30 km of the city (South west, North West and West zones) which is one of the most polluted cities of the country in terms of air pollutants. Different contributors like growth in population, increase in number of vehicles, speedy industrialization, and presence of the different companies cause this city to be placed among eighth most polluted cities of Iran. Air in Arak is more polluted than Tehran, capital of Iran, in terms of pollution contributors. The methodology of the research is based descriptive-analytical approaches. Data and information have been collected from related organizations (Municipality, environmental organization). The city has divided into five zones based on city's master plan. Four pollution measurement stations of Arak city were accessed for NO₂, SO₂, O₃ reports. The spatial analysis section of gas station stations uses the IDW pollution model and the IDW spatial coverage method is used to cover unknown points (points that do not have measuring stations). In this method, a weighted average is generally taken from the known points and record the result for the unknown point. In the IDW interpolation method, it is assumed that the effect of each phenomenon is proportional to the power of the inverse of its distance, so the effect of the phenomenon in question decreases with increasing distance. . For spatial analysis, there are different models for measuring spatial autocorrelation statistics, and in this research, the Moran model was used in GIS software. And finally, the GWR regression tool has been used to determine the spatial changes between the independent and dependent variables.

Results

The results show distribution of NO₂ had highest distribution in the western areas of the city (petrochemical and thermal power plants) and the central areas tending to areas 4 and 5. The accumulation of O₃ in the central zones 4 and 5. Also, zone 3 towards Shazand has a high concentration of this O₃. In the northeastern and northern zones, the accumulation of O₃ decreased due to the distance from the center. SO₂, the highest amount of accumulation concentrated in the zone 3 of Arak city, as there are several factories like Shazand petrochemical industries and thermal power plant. From population density of view based on the results, zones 4 and 5 with a high score and close to one have the highest mixed uses. The analysis of the stdResid shows that 100% of the data are within the determined range of ± 2.5 . This shows the high desirability of the model. The adjusted R² revealed the influence of the city form NO₂ in all zones of Arak which is above 85%; however, as the map illustrates the intensity of this spatial effect is greater in the zone 1 of the city due to the industrial machinery and aluminum factories in this zone. By examining the pattern of the residual values of the difference between the observed and the estimated values show that in all zones of the city, the standardized residual values do not exceed ± 2.5 . The analysis of the stdResid shows that 100% of the data are within the determined range of ± 2.5 which reflects the high desirability of the model.

Conclusion

Air pollution and the adverse effects in urban settlements are among the important environmental issues of metropolises, and it is necessary to pay attention to the solutions to reduce the amount of air pollution in cities. Global experiences have shown that urban form indicators are one of the most important factors influencing the ambient air pollution and energy consumption in the city. Therefore, paying attention to the form of the city plays an important role in the long-term perspective of cities for better air quality. The study found that the relation of the city form to the air pollutants of Arak city is more in zones 1 and 3 than in other areas which is evident due to the expansion of the unbalanced and scattered urban form of the city in these regions. As the work of Lijie He et al. (2019), showed a less fragmented and more compact urban form which is encouraged by

increasing urban connectivity, reducing dependence on vehicles and facilitating the use of bicycles and walking can reduce the concentration of local air pollution. Also, Wang et al, 2022 concluded that by the expansion of the city pollutants increase due to the use of more vehicles, The city form of zones of 1 and 3 developed in dispersed pattern. Based on the results of the both researches, the compact form of cities can help to reduce pollutants. Many researches have investigated the relationship between the form of cities and the release of pollutants since 2000 and most studies show the relationship between the indicators of the city form and the production and release of pollutants.

The results showed that there is a significant spatial relationship between the city form and the emission of NO₂, SO₂, and O₃. According to Moran's model, the spatial distribution of pollutant data in Arak has a random distribution. Also, there is a significant spatial relationship at the 95% level regarding to spatial relationship between the independent variable (city form) and the dependent variable (air pollutants). The findings from analyzing the city form proved that the urban zones of Arak 1, 2 and 3 developed in sprawl and due to the presence of industrial factories in these areas, the level of pollution is high as shown in the figures 9, 10, 11. the R² obtained from the spatial analysis of the city form index on NO₂, O₃, SO₂ has been more than 70%, which show the high spatial impact of the city form on the production of pollutants (Table 2). Many researches that compact urban areas had lower pollution compared to more dispersed zones.

سنجش و ارزیابی تأثیر شاخص‌های فرم شهر بر آلودگی کلان‌شهر اراک*

لیلا محمدی کاظم آبادی^۱، صدیقه لطفی^۲✉، عامر نیک پور^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. Mohammadi.leyla70@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. S.lotfi@umz.ac.ir

۳. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. a.nikpour@umz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱ کلیدواژه‌ها: فرم شهر، آلودگی هوا، تحلیل فضایی، شهر اراک	بر اساس آمار سازمان ملل خسارت ناشی از آلودگی هوا در ایران تا سال ۲۰۰۸ برابر ۸ میلیارد دلار بوده، که این خسارت‌ها تا سال ۲۰۱۴ به ۱۱ میلیارد دلار رسیده و تا سال ۲۰۱۹ به ۱۵ میلیارد دلار رسید. همچنین کلان‌شهر اراک به دلیل وجود منابع زیاد انتشار آلودگی هوا در بیشتر سال‌ها بیش از ۵۰ درصد روزها ناسالم می‌باشد و هم‌اکنون جزء ۸ شهر آلوده کشور است. لذا هدف تحقیق حاضر سنجش و ارزیابی تأثیر شاخص‌های فرم شهر بر آلودگی کلان‌شهر اراک است. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز تحقیق به دو روش کتابخانه‌ای (مطالعه اسناد، طرح‌ها، مقالات و ...) و مراجعه به سازمان‌های مرتبط (شهرداری، سازمان محیط‌زیست و...) جمع‌آوری شده است. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار GIS، مدل رگرسیون GWR و مدل Moran استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد: بین شاخص فرم شهر و متغیر وابسته (شاخص آلودگی هوا) ارتباط معناداری در سطح ۹۵٪ برقرار است. به طوری‌که مقدار R² به دست آمده از تحلیل فضایی شاخص فرم شهر بر گاز SO₂ عدد ۷۲٪ را نشان می‌دهد و این مقدار نشان دهنده اثرگذاری فرم شهر بر تولید این آلاینده است. البته شدت اثرگذاری در مناطق ۳ و ۲ شهر اراک بیشتر است. همچنین R² به دست آمده برای متغیر NO برابر است با ۷۹٪ که این آمار نشان دهنده رابطه فضایی در سطحی بالا بین متغیر مستقل (فرم شهر) و متغیر وابسته برقرار است و در منطقه ۱ شهر اراک تأثیرگذاری بالای این رابطه بیش از سایر مناطق شهر اراک است. تحلیل رابطه فضایی تأثیر فرم شهر بر تولید گاز O₃ آماره R² عدد ۸۵٪ را نشان داده است که این مقدار به مانند سایر متغیرها نشان از سطح بالای رابطه فضایی متغیر مستقل و O₃ است. در منطقه ۱، ۲، ۳ آلاینده‌ها دارای بیشترین میزان تجمع و رابطه با فرم شهر هستند که از دلایل این موضوع؛ وجود کارخانه‌های صنعتی ماشین‌سازی، کارخانه آلومینیوم و وجود نیروگاه پتروشیمی شازند است. در نهایت با توجه به نتایج پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد؛ جلوگیری از ساخت وساز مسکونی و تجاری در مناطق جنوب غربی به دلیل وجود شرکت‌های تولید کننده آلاینده‌ها، توزیع مناسب کاربری‌ها و در نتیجه تخلیه فشار ترافیکی.

استناد: محمدی کاظم آبادی، لیلا؛ لطفی، صدیقه و نیک پور، عامر (۱۴۰۳). سنجش و ارزیابی تأثیر شاخص‌های فرم شهر بر آلودگی کلان‌شهر اراک. *جغرافیا و*

برنامه‌ریزی، ۳۰ (۹۲)، ۲۹۹-۳۱۳.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.60218.3229>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

امروزه شهرها، مکان اصلی کار و زندگی بخش عمده نسل بشر شده‌اند. و متعاقباً در سطح جهان، جمعیت شهرها در حال رشد است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ بیش از ۶۰٪ از جمعیت جهان در شهرها زندگی کنند (Akande, 2019:476). افزایش جمعیت شهری منجر به تغییر شدید شهرها در ابعاد مختلف؛ اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شده است، در واقع، سطح اشغال فضای کالبدی شهرها و افزایش شدید مصرف انرژی، منجر به انواع مشکلات زیست محیطی از جمله آلودگی هوا شده است. (Singh et al., 2017; Wu et al., 2018) یکی از این ابعاد مسئله آلودگی شهرها و موضوعات زیست محیطی است، به طوری که بسیاری از شهرها در سراسر جهان با چالش آلودگی شدید ذرات ریز مواجه هستند، و این مسئله بر تمام ابعاد زندگی شهری اثرگذاری منفی دارد. (Zhao et al, 2022:1) اما عوامل زیادی بر شدت و میزان اثرگذاری آلودگی این ذرات اثرگذار هستند؛ فرم و شکل شهرها، درواقع در نیمه دوم قرن بیستم فرم شهرها تغییرات چشمگیری به خود دیده است و اکثر برنامه ریزان شهری، برنامه‌های رشد شهرها را در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و زیست محیطی مدنظر قرار دادند (Ogel, 2017:2)؛ در دنیای کنونی کیفیت هوا در شهرهای بزرگ یکی از دغدغه‌ها و چالش‌های اصلی مدیریت شهری محسوب می‌گردد. وجود آلاینده‌هایی مثل مونوکسید کربن (CO₂)، ازن (O₃) (دی‌اکسید سولفور (SO₂) در هوای شهرها خطرات جانی و مالی زیادی را به همراه دارد (محمدی و رحیمی، ۱۳۹۲: ۱۲۴). به طوری که کشورهای توسعه‌یافته یک فرم شهری فشرده یا سیاست متراکم سازی را برای توسعه پایدار و کم کردن محدوده آلودگی شهرها اتخاذ می‌کنند. با این حال، شرایط در کشورهای در حال توسعه متفاوت است (Kamble & Bahadure, 2021:1) لذا شناسایی ابعاد مختلف فرم شهری و تبیین روابط آن‌ها یکی از راه‌های اصلی مقابله با آلودگی شهرها است (Song et al, 2022:2) در نتایج بسیاری از تحقیقاتی که در زمینه فرم شهرها انجام گرفته نتایج به‌طور گسترده‌ای نشان می‌دهد که فرم شهر با توسعه پایدار شهر دارای ارتباطی مستقیم و دوسویه است (shakarami et al, 2022:122). به طوری که هر کدام از اشکال فرم شهری مانند؛ فرم فشرده یا اسپرال دارای اثرگذاری خاص خود بر تولید آلاینده‌ها در سطح شهرها هستند. (Li et al, 2022:1) از این رو تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی ارتباط بین فرم شهرها و انتشار آلاینده‌ها از سال ۲۰۰۰ تا به حال انجام گرفته است و اکثر این تحقیقات نشان‌دهنده ارتباط بین شاخص‌های فرم شهر و تولید و انتشار آلاینده‌های مختلف؛ NO₂, SO₂, CO₂, PM₁₀, O₃ هستند (Sarrat et al, 2006; Sierra, 2012; Song et al, 2020). در سال‌های اخیر علی‌رغم اینکه برنامه‌ریزی‌های مختلفی در سطح جهان جهت کاهش انتشار آلاینده‌ها انجام شده است و سعی شده، که میزان انتشار آلاینده‌ها در سطح جهان کاهش یابد اما با این حال میزان غلظت آلاینده‌ها به میزان زیادی افزایش یافته است و از حد قانونی فراتر رفته است، به طوری که این آلاینده‌ها هنوز به عنوان یک چالش برای جوامع مدرن است (Marco et al, 2022: 2).

یافته‌های حاصل از مطالعات تجربی نشان می‌دهد که آلاینده‌های هوا ممکن است از طریق روش‌های مختلف بر سیستم عصبی مرکزی تأثیر بگذارند مکانیسم‌ها (التهاب عصبی، استرس اکسیداتیو و عروق مغز) (Block and Calder, 2009; Block et al, 2012; Genc et al, 2012). به طوری که بر اساس آمار رسمی سالنامه چیزی در حدود ۴.۲ میلیون نفر در سطح جهان در اثر آلودگی آلاینده‌ها در فضای باز فوت می‌کنند (WHO, 2016). آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) شش آلاینده اصلی را به عنوان شاخص انتخاب نموده و آن‌ها را به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم کرده است. آلاینده‌های اولیه موادی هستند که مستقیماً از منابع به هوای محیط وارد شده و شامل مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، ذرات معلق (PM_{2.5})، و سرب (Pb) می‌باشند

جدول ۱: میزان استاندارد (EPA) برخی از آلاینده‌های هوا

کیفیت هوا	مونواکسید کربن (ppm)	ذرات معلق ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		دی‌اکسید نیتروژن (ppb)	دی‌اکسید گوگرد (ppb)
		PM10	PM2.5		
خوب	۴/۴-۰	۱۲-۰	۵۴-۰	۵۳-۰	۳۵-۰
متوسط	۹/۴-۴/۵	۳۵/۴-۱۲/۱	۱۵۴-۵۵	۱۰۰-۵۴	۷۵-۳۶
ناسالم برای افراد حساس	۱۲/۴-۹/۵	۵۵/۴-۳۵/۵	۲۵۴-۱۵۵	۳۶۰-۱۰۱	۱۸۵-۷۶
ناسالم	۱۵/۴-۱۲/۵	۱۵۰/۴-۵۵/۴	۳۵۴-۲۵۵	۶۴۹-۳۶۱	۳۰۴-۱۸۶
خیلی ناسالم	۳۰/۴-۱۵/۵	۲۵۰/۴-۱۵۰/۵	۴۲۴-۳۵۵	۱۲۴۹-۶۵۰	۴۰۶-۳۰۵
خطرناک	۵۰/۴-۳۰/۵	۵۰۰/۴-۲۵۰/۵	۶۰۴-۴۲۵	۲۰۴۹-۱۲۵۰	۱۰۰۴-۶۰۵

(US.EPA, 2009)

آلاینده‌های ثانویه به موادی اطلاق می‌شوند که بر اثر فعل و انفعالات موجود در اتمسفر زمین به وجود می‌آیند مانند اوزون (O_3) (زنگویی و اسداله فر، ۱۳۹۶: ۴۰). مجموع این آلاینده‌ها تأثیرگذاری بالایی بر تمام ابعاد زندگی انسان در زمینه سوخت‌های فسیلی، کشاورزی، صنعت و بیمارهای قلبی، عروقی و تنفسی دارند. (Duchesne et al, 2022: 3) در این زمینه تاکنون تحقیقات بسیاری صورت گرفته است مانند؛ آگروال و همکاران (۲۰۲۱) تحقیقی در ارتباط با روند آلودگی ذرات معلق در برخی شهرهای هند انجام دادند که نتایج نشان داد؛ سطح ذرات آلودگی در بیشتر شهرهای موردبررسی از حد استاندارد فراتر رفته است و غلظت ذرات معلق در هوای محیط، الگوی روزانه متمایزی از دمای هوای محیط را نشان می‌دهد. در مطالعات گذشته پارامترهای آلاینده مختلف از (Bordignon et al, 2002; Barrero et al, 2006; Sousa et al, 2007; Kaltsatos, 2007; Chattopadhyay & Chattopadhyay, 2012;). بررسی قرار گرفتند (Kukkonen et al, 2003; Avouris & Kalapanidas, 2001; Moustris et al, 2010). نتایج تحقیق (هو و همکاران، ۲۰۲۲) در ارتباط با تأثیر آلاینده‌های شهری بر بیمارهای قلبی و عروقی در ۱۵ شهر چین نشان داد؛ قرارگیری به مدت کوتاه در معرض $\text{PM}_{2.5}$ اثرات اولیه قلبی عروقی را در جمعیت عمومی ایجاد می‌کند و این اثرگذاری در مراکز دارای تراکم جمعیتی بالاتر بیشتر صورت می‌گیرد. (Hu et al, 2022) جی و همکاران (۲۰۲۲) تحقیقی در ارتباط با سازگاری فضایی با آلودگی هوا در شهرهای چین انجام دادند که نتایج تحقیق نشان داد؛ ناهمگونی فضایی حساسیت‌ها به آلودگی هوا در شهرهای چین مشهود بود. به طوری که شهرهایی با کیفیت هوای خوب در جنوب چین و شرق چین نسبت به آلودگی هوا حساس‌تر بود، در حالی که شهرهای با کیفیت هوای بدتر در شمال غربی چین و شمال چین حساسیت کمتری داشت (جی و همکاران، ۲۰۲۲).

از این رو امروزه مطالعات بسیاری در راستای کاهش آلودگی شهرها انجام شده و حوزه‌های بسیاری همچون شهرسازی، اقتصاد، حمل‌ونقل و انرژی را دخیل نموده است و راهکارهای عملی به منظور کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ارائه شده است (سروینه باغی و رنجبر، ۲۰۲۰: ۱۴۵). وضعیت نامطلوب هوا و فرا رفتن غلظت آلاینده‌ها از حد مجاز تعیین‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی در کلان‌شهرها، تهدیدی جدی برای سلامتی شهروندان به شمار می‌رود. در ایران، این داده‌ها ۴۶.۲ نفر به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت است و تعداد کل ۱۳۰۰۰ نفر است (www.who.int:2019). بر اساس آمار سازمان ملل خسارت ناشی از آلودگی هوا در ایران تا سال ۲۰۰۸ برابر ۸ میلیارد دلار بوده، که این خسارت‌ها تا سال ۲۰۱۴ به ۱۱ میلیارد دلار رسیده و تا سال ۲۰۱۹ به ۱۵ میلیارد دلار رسید. در این بین اراک یکی از هشت کلان‌شهر آلوده ایران به حساب می‌آید. فعالیت صنایع مختلف در اراک می‌تواند بر محیط‌زیست اطراف خود اثرگذار باشد. کلان‌شهر اراک به دلیل وجود

منابع زیاد انتشار آلودگی هوا در بیشتر سال‌ها بیش از ۵۰ درصد روزها ناسالم می‌باشد و هم‌اکنون جزء ۸ شهر آلوده کشور است (بادام فیروز و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۲). لذا با توجه به موضوعات مطرح‌شده اهداف زیر در تحقیق حاضر دنبال می‌شوند. ۱- وضعیت شاخص‌های فرم شهر (اختلاط کاربری و تراکم جمعیت در شهر اراک) ۲- وضعیت شاخص‌های آلودگی هوا در شهر اراک 3. (NO_2, SO_2, O_3) - ارتباط فضایی بین شاخص‌های فرم شهر و شاخص‌های آلودگی هوای شهر اراک.

روش تحقیق

روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و هدف کاربردی است. داده‌ها و اطلاعات موردنیاز تحقیق به دو روش کتابخانه‌ای (مطالعه اسناد، طرح‌ها، مقالات و ...) و مراجعه به سازمان‌های مرتبط (شهرداری، سازمان محیط‌زیست و ...) جمع‌آوری شده است. نمونه آماری تحقیق ۵ منطقه شهر اراک و ۴ ایستگاه سنجش آلودگی شهر اراک هستند که جهت تحلیل فضایی مورد استفاده قرار گرفته شده است. بخش تحلیل فضایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا از مدل IDW آلودگی و برای پوشش دهی نقاط مجهول (نقاطی که دارای ایستگاه‌های سنجش نمی‌باشند) از روش پوشش دهی فضایی IDW استفاده شده است. در این روش عموماً از نقاط معلوم یک میانگین وزن‌دار می‌گیریم و نتیجه را برای نقطه مجهول ثبت می‌کنیم. در روش درون‌یابی IDW فرض ما بر این است که تأثیر هر پدیده متناسب با توانی از معکوس فاصله آن است، بنابراین تأثیر پدیده‌ی موردنظر با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. برای محاسبه این شاخص از مدل آنترپی شانون در قالب ۵ کاربری اصلی (آموزشی، تجاری، اشتغال، اداری و خدمات) استفاده شده است. به طوری که مساحت هر کدام از این کاربری‌ها نسبت به سایر کاربری‌ها سنجیده شده و عدد نهایی به‌دست‌آمده نشان‌دهنده میزان اختلاط کاربری هر منطقه است. مقدار صفر نشان‌دهنده همگونی و تک کاربری بودن محلات و مقدار ۱ نشان‌دهنده تنوع و اختلاط کاربری‌ها است. جهت تحلیل فضایی، مدل‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری آماره‌های خود همبستگی فضایی وجود دارد که در تحقیق حاضر از مدل $Moran$ در نرم‌افزار GIS استفاده شده است؛ و درنهایت از ابزار رگرسیون GWR برای تعیین تغییرات فضایی بین متغیر مستقل و وابسته استفاده شده است.

رگرسیون وزنی GWR

درواقع روش رگرسیون وزنی جغرافیایی همان روش حداقل مربعات معمولی است با این تفاوت که به مشاهدات بر اساس مکان یا مختصات مکانی آن‌ها نسبت به نقاط مرجع وزن داده می‌شود. هر پارامتر یا ضریب مدل GWR دارای یک علامت و مقدار می‌باشد. اگر علامت یک ضریب، مثبت باشد پس افزایش مقدار متغیر مستقل باعث افزایش متغیر وابسته خواهد شد. اگر علامت آن منفی باشد، آن متغیر دارای اثر کاهشی روی متغیر وابسته می‌باشد. (Woli et al, 2004: 65). درواقع، رگرسیون وزنی جغرافیایی GWR تکنیک آماری فضایی محلی است. هنگامی که واحد سنجش متغیر مورد بررسی از مکانی به مکان دیگر متفاوت می‌شود، این رگرسیون برای تحلیل ناهمسانی فضایی به کار می‌رود فرمول رگرسیون وزنی به شرح زیر است:

$$\hat{y} = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad \beta_0(\mu_i, v_i) \beta_k(\mu_i, v_i) N(0, \sigma^2)$$

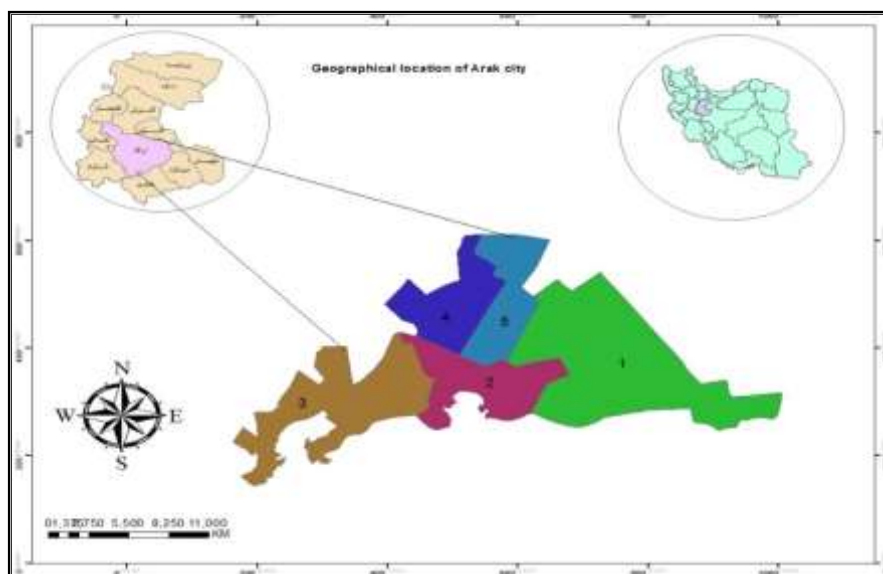
در این رابطه (μ_i, v_i) مختلف هر موقعیتی از i است. $\beta_0(\mu_i, v_i)$ محل تقاطع برای موقعیت i ، $\beta_k(\mu_i, v_i)$ پارامتری محلی است که متغیر مستقل x_k را در موقعیت i تخمین می‌زند و ε_i خطای تصادفی با فرض $N(0, \sigma^2)$ (فرض نرمال بودن) است. برای مجموعه داده‌های پارامتری محلی، $\beta_k(\mu_i, v_i)$ با استفاده از مراحل حداقل مربعات وزنی تخمین زده می‌شود. وزن‌های w_{it} برای $n, \dots, 2, I=1$ در هر موقعیت (μ_i, v_i) به عنوان تابع پیوسته‌ای از فواصل میان موقعیت i و موقعیت دیگر به دست می‌آید. (شاکرمی، ۱۴۰۱). درواقع تحلیل رگرسیون وزنی جغرافیایی خروجی‌های مختلفی را ارائه می‌دهد که در بین خروجی‌های ارائه‌شده، مقادیر R و R^2 تعدیل‌شده ($Adjusted R^2$) مهم‌ترین مقادیر هستند که نشان‌دهنده خوبی و

دقت مدل مورد استفاده هستند و هرچه این اعداد به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که متغیر مستقل مورد استفاده به خوبی تغییرات متغیر وابسته را شرح می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه

اراک یکی از کلان‌شهرهای ایران و از بزرگ‌ترین شهرهای مرکز ایران و مرکز استان مرکزی و شهرستان اراک است. جمعیت اراک در سال ۱۳۹۵ خورشیدی برابر با ۵۲۰۹۴۴ نفر بوده که از این نظر قطب جمعیتی استان مرکزی و هجدهمین شهر پرجمعیت ایران به حساب می‌آید. شهر اراک با مختصات جغرافیایی $30^{\circ} 41' 49''$ طول شرقی و $34^{\circ} 05' 30''$ عرض شمالی و ارتفاع ۱۷۵۵ متر، و آب و هوایی معتدل مایل به سرد تا سرد، نیمه‌خشک، در فاصله ۲۸۱ کیلومتری جنوب غربی تهران واقع است.

شرایط اقلیمی اراک به گونه‌ای است که از سه سمت به ارتفاعات و از یک سو به کویر می‌فان محدود شده است. این شرایط جغرافیایی در فصل پاییز و زمستان که همراه با وقوع شرایط آب و هوایی پایدار و شرایط وارونگی است، سبب ایجاد مکرر شرایط ناسالم آب و هوایی می‌شود. اراک به عنوان پایتخت صنعتی ایران شناخته می‌شود که به لحاظ آلاینده‌های هوایی یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران است. این شهر از پنج منطقه شهری تشکیل شده است و در حال حاضر بیش از ۱۰۶۵ واحد صنعتی در محدوده ۳۰ کیلومتری شهر اراک وجود دارد. بخش عمده این صنایع در ناحیه جنوب شرقی شهر قرار دارد و مجموعه پالایشگاهی شازند نیز به عنوان یکی از منابع آلاینده اصلی در جنوب غرب شهر واقع شده است.

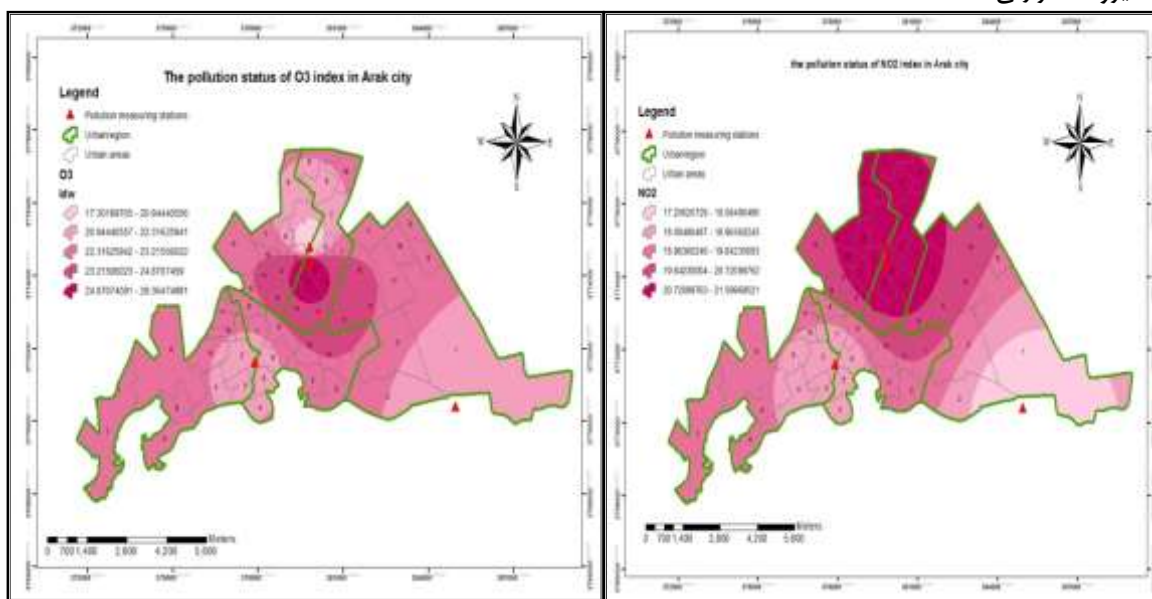


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر اراک

یافته‌های تحقیق

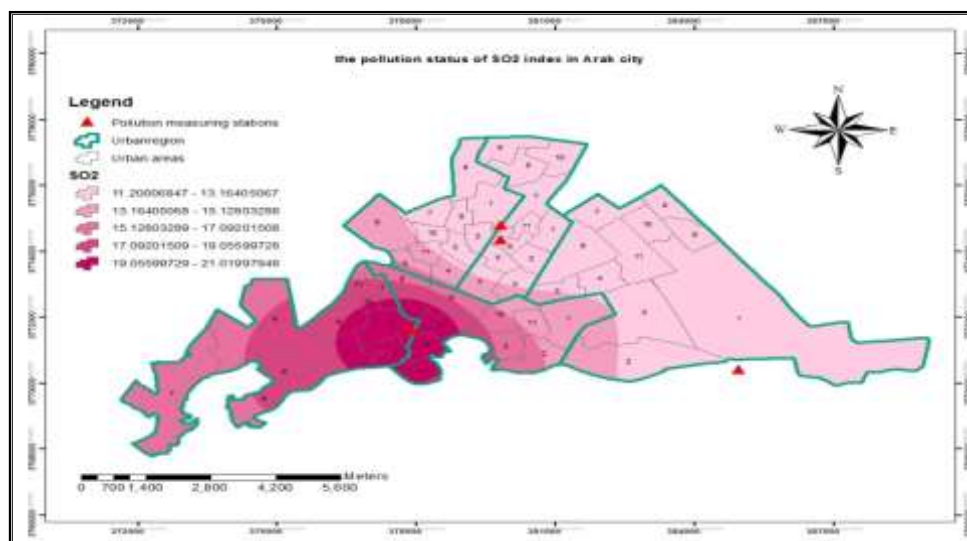
در ابتدا با توجه به تعداد پایین ایستگاه‌های سنجش آلودگی (۴ ایستگاه) و مساحت بالای شهر، برای پوشش دهی نقاط مجهول (نقاطی که دارای ایستگاه‌های سنجش آلودگی نمی‌باشند) از روش پوشش دهی فضایی IDW استفاده شده است. در این روش عموماً از نقاط معلوم یک میانگین وزن دار می‌گیریم و نتیجه را برای نقطه مجهول ثبت می‌کنیم. در روش درون‌یابی IDW فرض ما بر این است که تأثیر هر پدیده متناسب با توانی از معکوس فاصله آن است، بنابراین تأثیر پدیده‌ی موردنظر با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. لذا در اینجا برای شاخص NO_2, O_3, SO_2 از روش پوشش دهی فضایی IDW برای پوشش دهی همه نقاط مجهول استفاده شده است (شکل ۲ و ۳). همچنین با ترکیب عدد نهایی همه شاخص‌ها نقشه نهایی آلودگی هر سه شاخص ارائه شده است (شکل ۴).

در شکل ۲ که نشان‌دهنده پراکنش NO_2 است، مشخص است که بیش‌ترین پراکنش و توزیع این گاز در مناطق غربی شهر (نیروگاه پتروشیمی و حرارتی) و مناطق مرکز متمایل به سمت مناطق ۴ و ۵ است. در (شکل ۳) همان‌طور که مشخص است تجمع گاز O_3 در منطقه مرکزی ۴ و ۵ قرار دارد. همچنین منطقه ۳ به سمت شازند دارای تجمع بالایی از این گاز است. در منطقه شمال شرقی و شمالی تجمع این گاز به دلیل فاصله‌گیری از مرکز کاهش یافته است. در (شکل ۴) SO همان‌طور که مشخص است، بیش‌ترین میزان تجمع این گاز در منطقه ۳ شهر اراک قرار دارد که به دلیل تجمع کارخانجات، صنایع پتروشیمی شازند، نیروگاه حرارتی است.



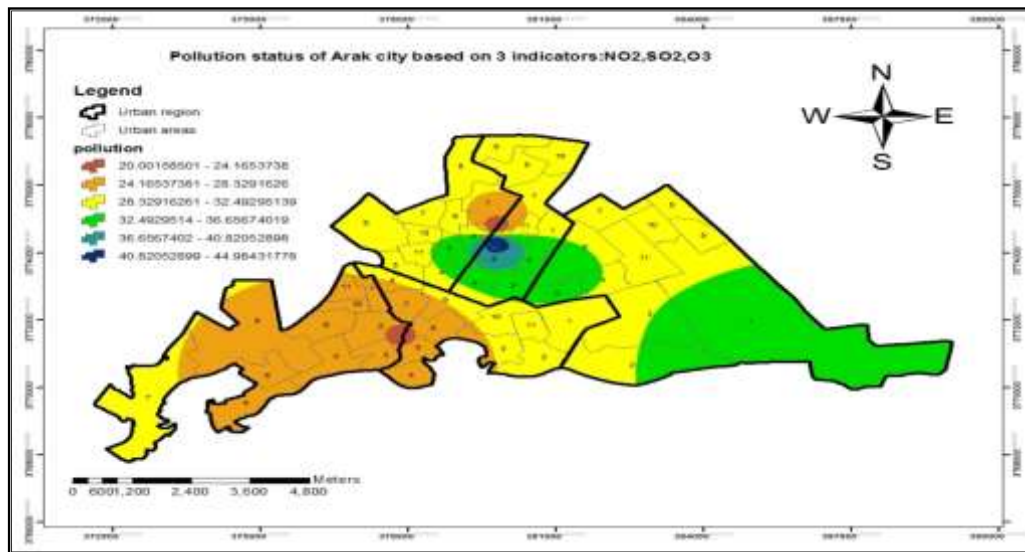
شکل ۲: پراکنش فضایی NO_2 در شهر اراک

شکل ۳: پراکنش فضایی O_3 در شهر اراک



شکل ۴: پراکنش فضایی SO در شهر اراک

در نقشه نهایی ترکیبی که حاصل تجمع داده‌های ۳ شاخص؛ NO , O_3 , SO_2 است. مشخص است که بیش‌ترین میزان آلودگی شهر اراک در مناطق ترافیکی (۳ و ۴)، منطقه ۳ و منطقه ۱ که کانون تجمع صنایع (ماشین‌سازی، هپکو، ایرالکو و...) است قرار دارد. در واقع محدوده جنوب شرقی و غرب اراک کانون آلودگی بیشتر صنایع شهر اراک است و شهر اراک را نیز تحت تأثیر قرار داده است.



شکل ۵: پراکنش فضایی NO, O_3, SO_2 در شهر اراک

شاخص‌های فرم شهر

تراکم جمعیتی

برای محاسبه عدد این شاخص تعداد جمعیت مناطق شهر اراک (۵ منطقه) تقسیم بر مساحت کلی هر منطقه شده است؛ در نهایت نتایج در شکل ۶ ارائه شده است.

$$\text{تراکم جمعیت} = \frac{\text{جمعیت}}{\text{مساحت}}$$

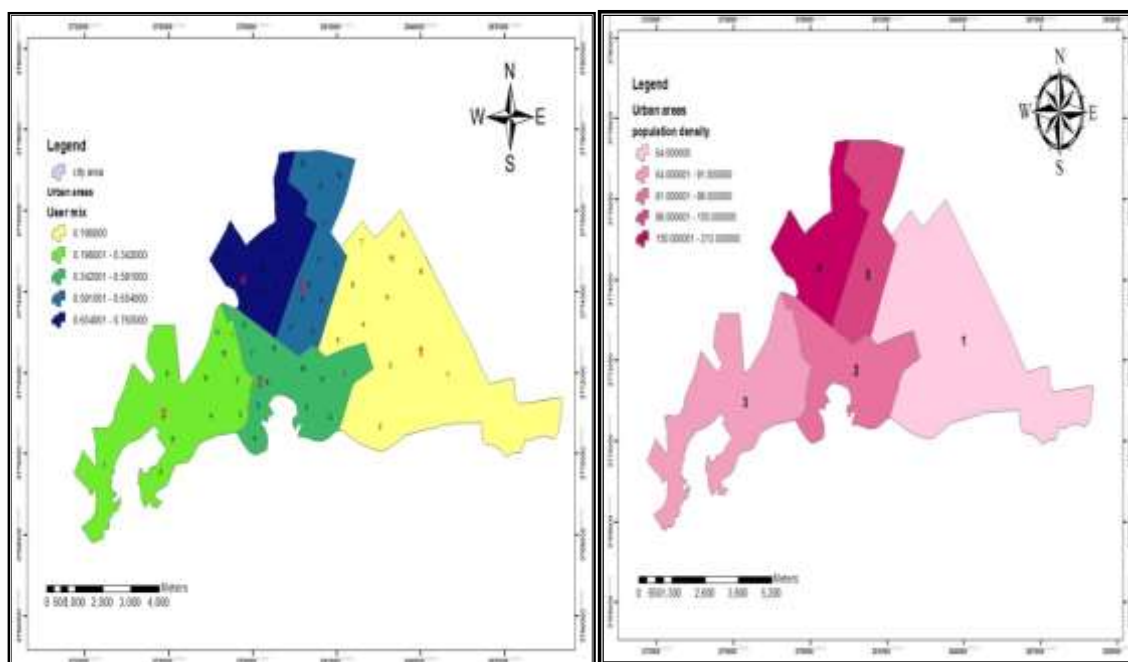
در واقع همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است بیش‌ترین میزان تراکم جمعیتی در مناطق ۴، ۵ و ۲ قرار دارد. و مناطق ۱ و ۳ علی‌رغم مساحت بالا تراکم جمعیتی پایینی دارند.

همچنین برای محاسبه شاخص اختلاط کاربری از ۵ کاربری اصلی (آموزشی، تجاری، اشتغال، اداری و خدمات) با استفاده از مدل آنتروپی شانون استفاده شده است.

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

$$G = \frac{H}{\ln K}$$

به‌طوری‌که مساحت هر کدام از این کاربری‌ها نسبت به سایر کاربری‌ها سنجیده شده و عدد نهایی به‌دست‌آمده نشان‌دهنده میزان اختلاط کاربری هر محله است. مقدار صفر نشان‌دهنده همگونی و تک کاربری بودن محلات و مقدار ۱ نشان‌دهنده تنوع و اختلاط کاربری‌ها است. با توجه به نتایج به دست آمده مناطق ۴ و ۵ با امتیاز بالا و نزدیک به یک دارای بالاترین میزان اختلاط کاربری هستند.



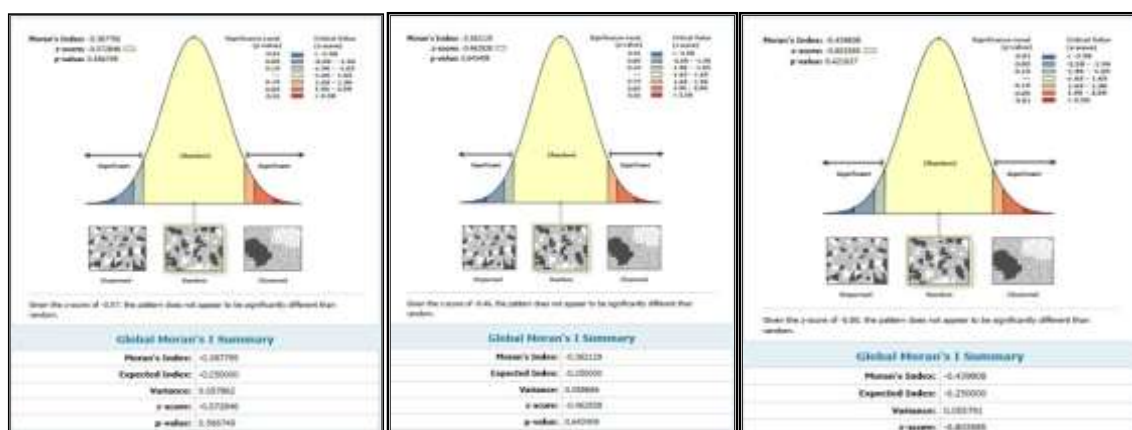
شکل ۶: تراکم جمعیتی مناطق شهر اراک

شکل ۷: اختلاط کاربری مناطق شهر اراک

تحلیل فضایی

از آنجایی که خود همبستگی‌های فضایی تأثیر بسیاری بر روی کارایی الگوهای فضایی دارد لذا به منظور درک دقیق‌تر خود همبستگی‌های فضایی بین واحدهای نقشه پایه مطالعات - به عنوان داده‌های نمونه‌ای در تحلیل‌ها - نیاز به شاخصی است تا میزان همبستگی فضایی و در نتیجه تشابه مقداری یا مکانی را ملموس‌تر نشان دهد. در این رابطه شاخص موران یکی از معتبرترین سنج‌ها در مورد خود همبستگی فضایی است. این ابزار خود همبستگی فضایی را بر پایه موقعیت عوارض و ارزش عوارض به صورت هم‌زمان اندازه می‌گیرد و الگوی جمع‌شدگی، پراکندگی و یا تصادفی بودن عوارض را ارزیابی می‌کند (Man, 2006:63-71).

وقتی که ارزش مشاهده‌شده از متغیرها با یک فاصله معینی به صورت همسانی میل می‌کند، شاخص موران مثبت خواهد شد. همچنین وقتی که گرایش ناهمسانی روی می‌دهد، ارزش این شاخص منفی خواهد شد و وقتی ارزش مشاهده‌شده به صفر میل می‌شود، الگو به صورت تصادفی است (شمشیری و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۷). از این رو رو شاخص موران با نزدیک شدن به ارزش $+1$ ، نشان از جمع‌شدگی یا دسته‌ای بودن و با نزدیک شدن به ارزش -1 ، نشان از پراکندگی عوارض دارد و با فرض صفر، عدم همبستگی فضایی بین عوارض وجود دارد، موقعی که ارزش عددی p^2 کوچک باشد و ارزش مقدار Z بزرگ شود، نشان از پایین بودن این شاخص و خارج از درج اطمینان مطلوب می‌باشد. درواقع ابزار خوشه‌بندی زیاد/کم نوعی آمار استدلالی و استنتاجی است و به معنای آن است که نتایج آن با توجه به فرضیه صفر تعبیر و تفسیر می‌شوند. درواقع این تحلیل نشان می‌دهد که مکان جغرافیایی چه تأثیری بر توزیع داده‌ها دارد. بنابراین زمانی که مقدار امتیاز استاندارد Z بسیار بزرگ و مقدار P -Value بسیار کوچک و نزدیک به صفر باشد، آنگاه نتیجه می‌گیریم که فرضیه صفر رد می‌شود. بنابراین با توجه به شکل ۸ نتایج نشان‌دهنده این مطلب است؛ Z -Score در سطح $0/01$ معنادار است؛ و P -Value مقدار عددی پایینی را نشان می‌دهد. بنابراین فرضیه صفر تأیید می‌شود و این مقدار از این دو پارامتر نشان‌دهنده توزیع تصادفی داده‌های NO, SO_2, O_3 در سطح مناطق شهر اراک هستند (شکل ۸).



شکل ۸: الگوی توزیع فضایی NO_2 , O_3 , SO_2 بر اساس مدل موران

تحلیل فضایی تأثیر فرم شهر (اختلاط کاربری، تراکم جمعیت) بر آلاینده‌های شهر اراک

با توجه به خروجی تحلیل (جدول ۲)، یعنی تأثیرگذاری متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته (NO_2 , O_3 , SO_2) شهر اراک نتایج نشان داد که، آماره R^2 تعدیل شده برای متغیر SO_2 ۷۲٪ است که این مقدار نشان دهنده تأثیرگذاری بالای متغیر مستقل بر متغیر وابسته آلودگی هوای شهر اراک است. همچنین مقدار ایک $431/03$ ، و سیگما $0/000$ است که مقدار مطلوبی را نشان می‌دهند. همچنین آماره $predicted$ مقدار ۸۴٪ را نشان می‌دهد. درواقع این آماره با توجه به دیتاهای متغیر مستقل به پیش‌بینی متغیر وابسته پرداخته است.

مقدار آماره R^2 برای متغیر NO عدد $0/79$ را نشان می‌دهد که این عدد نشان دهنده‌ی اثرگذاری بالا و مطلوب فرم شهر بر متغیر وابسته (NO) است. مقدار سیگما نشان دهنده رابطه معنادار بالا بین متغیر مستقل و وابسته است. مقدار پایین $AICc2$ 711/33 نشان از مطلوبیت مدل دارد.

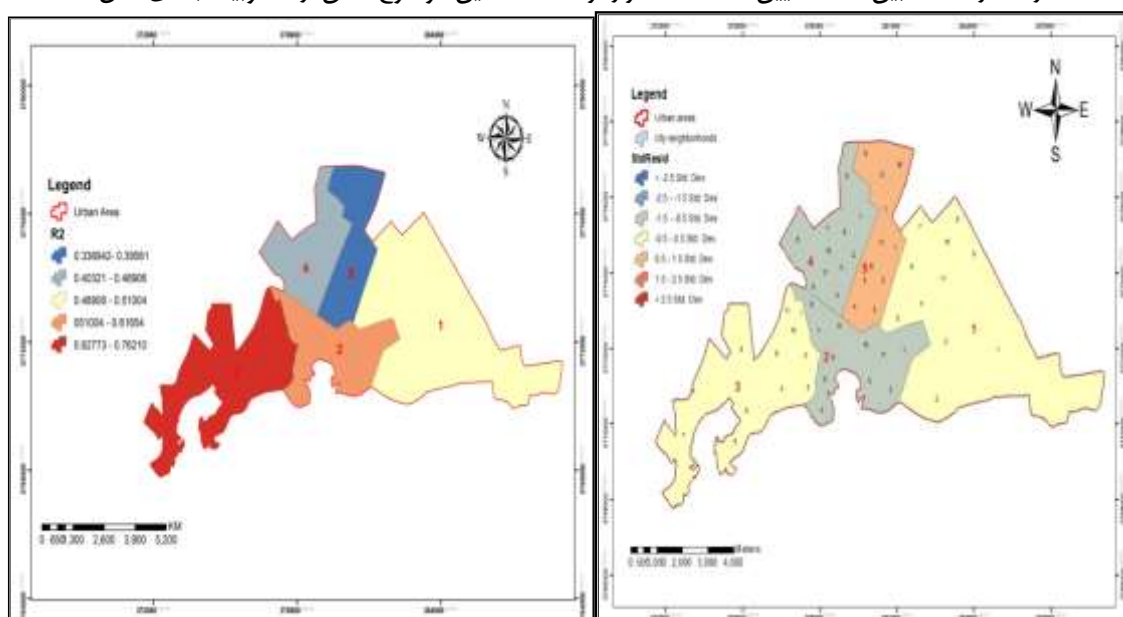
همچنین مقدار R^2 تعدیل شده و به دست آمده برای تأثیرگذاری متغیر مستقل بر متغیر وابسته (O_3) عدد $0/85$ را نشان می‌دهد که این مقدار نشان دهنده تأثیرگذاری بالای متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته O_3 است. همچنین مقدار $Sigma$ $0/1$ نشان دهنده معناداری رابطه در سطح ۹۵٪ است. مقدار پایین $AICc^2$ مطلوبیت بالای مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۲: آماره‌های ضرایب مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) متغیر فرم شهر بر NO_2 , O_3 , SO_2

متغیر (مسئله)	R^2	$AICc^2$	$Sigma$	$AdjustedR^2$	$predicted$
SO_2	$0/76$	$431/03$	$0/00$	$0/72$	84%
NO_2	$0/82$	711/33	$0/03$	$0/79$	86%
O_3	$0/89$	591/04	$0/01$	$0/85$	79%

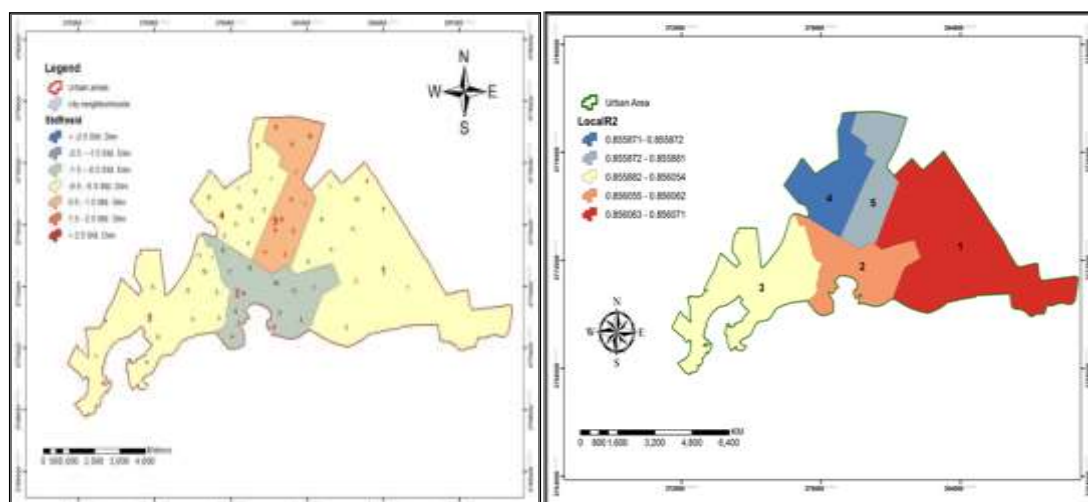
با توجه به نقشه خروجی (شکل ۹) مقدار R^2 تعدیل شده مشخص است؛ شدت اثرگذاری متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته (SO_2) در مناطق ۲ و ۳ بیشتر و عدد 76% را نشان می‌دهد. که از دلایل اصلی این مسئله وجود شرکت پتروشیمی در جنوب غربی شهر یعنی منطقه ۳ و تراکم فشرده‌ی شهری در منطقه ۲ شهر اراک است. همچنین این آماره (R^2) در منطقه ۴ و ۵ کمتر از 50% است. همچنین نتایج بررسی الگوی مقادیر باقی‌مانده تفاضل بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر برآورد شده نشان

می‌دهد که در همه مناطق شهر مقادیر باقی‌مانده استاندارد شده فراتر از $\pm 2/5$ نیست. تحلیل مقدار آماره $stdResid$ نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد از داده‌ها بین دامنه تعیین $\pm 2/5$ شده قرار گرفته‌اند. که این موضوع نشان از مطلوبیت بالای مدل است.



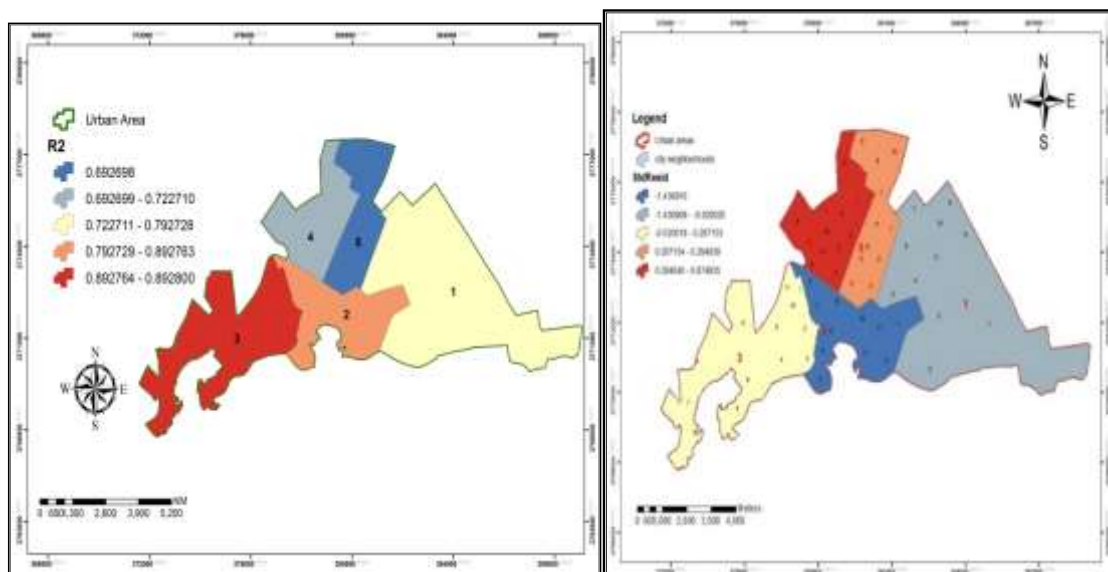
شکل ۹: نتایج تحلیل فضایی تاثیر فرم شهر بر آلاینده SO_2

با توجه به نقشه خروجی (شکل ۱۰) مقدار R^2 تعدیل شده مشخص است؛ شدت اثرگذاری متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته (NO) در همه مناطق شهر اراک عدد بالای ۸۵٪ را نشان می‌دهد. البته با توجه رنگ بندی نقشه (رنگ قرمز) شدت این اثرگذاری فضایی در منطقه ۱ شهر اراک بیشتر است. نکته قابل توجه وجود کارخانه‌های صنعتی ماشین‌سازی و آلومینیوم‌سازی در منطقه ۱ است که می‌تواند توجیه کننده عدد به دست آمده باشد. نتایج بررسی الگوی مقادیر باقی‌مانده تفاضل بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده نشان می‌دهد که در همه مناطق شهر مقادیر باقی‌مانده استاندارد شده فراتر از $\pm 2/5$ نیست. تحلیل مقدار آماره $stdResid$ نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد از داده‌ها بین دامنه تعیین $\pm 2/5$ شده قرار گرفته‌اند. که این موضوع نشان از مطلوبیت بالای مدل است.



شکل ۱۰: نتایج تحلیل فضایی تاثیر فرم شهر بر آلاینده NO

با توجه به نقشه خروجی (شکل ۱۱) مقدار R^2 تعدیل شده مشخص است؛ شدت اثرگذاری متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته (O_3) در مناطق ۳ و ۲ بیش از ۷۰٪ است. در واقع این شاخص از آلودگی هوا به مانند NO بیشترین اثرگذاری را بر مناطق ذکر شده دارد. البته با توجه به دامنه اثرگذاری این رابطه می‌توان گفت در همه مناطق شهر اراک رابطه فرم شهر و O_3 بالای ۶۰٪ است. نتایج بررسی الگوی مقادیر باقی‌مانده تفاضل بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر برآورد شده نشان می‌دهد که در همه مناطق شهر مقادیر باقی‌مانده استاندارد شده فراتر از $\pm 2/5$ نیست. تحلیل مقدار آماره $stdResid$ نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد از داده‌ها بین دامنه تعیین $\pm 2/5$ شده قرار گرفته‌اند. که این موضوع نشان از مطلوبیت بالای مدل است.



شکل ۱۱: نتایج تحلیل فضایی تأثیر فرم شهر بر آلاینده O_3

بحث

آلودگی هوا و تأثیرات نامطلوب آلودگی‌های ناشی از آن در سکونتگاه‌های شهری از جمله مسائل مهم زیست محیطی کلانشهرهاست که توجه به راهکارهای کاهش میزان آلودگی هوا در شهرها لازم است. تجربیات جهانی نشان داده است که شاخص‌های فرم شهری یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار بر میزان آلودگی هوا و مصرف انرژی در شهر هستند. از این روی توجه به فرم شهر، نقشی مهم در چشم انداز بلند مدت شهرها در جهت کیفیت هوای مطلوب‌تر، ایفا می‌کند.

با توجه به نتایج تحقیق حاضر مشخص شد که ارتباط فرم شهر بر آلاینده‌های هوای شهر اراک در مناطق ۱ و ۳ بیشتر از سایر مناطق دیگر است که این موضوع با توجه به گسترش فرم شهری نامتوازن و پراکنده شهر در این مناطق مشهود است لذا در قیاس با گزارش نتایج تحقیق *Lijie He* و همکاران (۲۰۱۹) که نشان داد: یک شکل شهری کمتر تکه تکه و فشرده تر را تشویق کرد که با افزایش اتصال شهری، کاهش وابستگی به وسیله نقلیه و تسهیل استفاده از دوچرخه و پیاده روی به کاهش غلظت آلودگی هوای محلی کمک کرد همخوانی دارد. براساس گزارشات *Wang* و همکاران (۲۰۲۲) با گسترش فرم شهری زمینه برای تولید و افزایش آلاینده‌ها مساعد می‌شود که این نتیجه گیری با نتایج تحقیق حاضر همسویی دارد به طوریکه در مناطق ۳ و ۱ شهر اراک که بیشترین آلاینده‌ها وجود دارند فرم شهر از حالت اسپرال برخوردار است. بنابراین با توجه به گزارشات هر دو تحقیق فشرده سازی فرم شهر می‌تواند گامی موثر در کاهش آلاینده‌ها باشد.

Clark و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی به بررسی رابطه شاخص فرم شهری (تراکم جمعیت) بر تولید آلاینده‌های هوا در شهرهای آمریکا پرداختند که نتایج تحقیق نشان داد؛ فرم شهر به طور بالقوه می‌تواند نقش متوسط اما مهمی در دستیابی (یا عدم دستیابی به) اهداف بلندمدت کیفیت هوا داشته باشد. لذا با توجه به اینکه نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد فشرده‌گی یا پراکندگی جمعیت دارای ارتباط فضایی با توسعه و گسترش آلاینده‌ها در شهر اراک است بنابراین یک رویه همسو در یافته هر دو تحقیق

مشهود است. همچنین نتایج تحقیق نمکی و همکاران (۱۳۹۹) در زمینه بررسی تاثیر فرم شهری و الگوی کاربری زمین بر آلودگی هوا نشان داد که فرم شهری و کاربری زمین بر آلودگی هوا تاثیرگذار است. در واقع تا کنون تحقیقات مختلفی در زمینه سنجش و ارزیابی رابطه فرم شهرها و آلودگی هوای شهر در سراسر دنیا انجام گرفته که نتایج بسیاری از این تحقیقات موید این رابطه بوده است و نشان داده‌اند که فرم شهر یک پارامتر اساسی و مهم در شکل‌گیری وضعیت آلودگی یا سلامت شهری است (Oshrieh & Vallipour, 2019; Zhang et al, 2022. Hankey and Marshall, 2017)

تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی ارتباط بین فرم شهرها و انتشار آلاینده‌ها از سال ۲۰۰۰ تا به حال انجام گرفته است و اکثر این تحقیقات نشان‌دهنده ارتباط بین شاخص‌های فرم شهر و تولید و انتشار آلاینده‌ها هستند. لذا هدف تحقیق حاضر سنجش و ارزیابی تاثیر شاخص‌های فرم شهر بر آلودگی کلان‌شهر اراک است. نتایج تحقیق نشان داد بین فرم شهر و انتشار آلاینده‌ها NO_2, SO_2, O_3 ارتباط فضایی معناداری برقرار است. در نتیجه گیری نهایی از این تحقیق می‌توان گفت؛ بر اساس مدل موران توزیع فضایی داده‌های آلاینده‌های شهر اراک از یک توزیع تصادفی برخوردار است. همچنین در بعد ارتباط فضایی بین متغیر مستقل (فرم شهر) و متغیر وابسته (آلاینده‌های هوا) ارتباط فضایی معناداری در سطح ۹۵٪ برقرار است. در نتیجه گیری از تحلیل فرم شهر یافته‌های تحقیق اثبات نمود که مناطق شهری اراک (۲،۱،۳) که دارای وضعیت فرم شهری اسپرال هستند به دلیل قرارگیری کارخانجات و صنایع تولید کننده آلاینده‌ها در این مناطق دارای میزان آلودگی بیشتری هستند و این موضوع در نتایج تحلیل فضایی نشان داده شد. (اشکال ۹، ۱۰، ۱۱). به طوری که مقدار R^2 به دست آمده از تحلیل فضایی شاخص فرم شهر بر گاز NO, O_3, SO_2 عدد بالای ۷۰٪ را نشان می‌دهند و این آمارها نشان دهنده اثرگذاری بالای فضایی فرم شهر بر تولید این آلاینده است. (جدول ۲). میزان اثرگذاری متغیر مستقل (فرم شهر) بر متغیر وابسته (آلودگی هوا) در مناطق ۱، ۲ و ۳ شهر اراک بیشتر است. (شکل ۹، ۱۰، ۱۱) نتایج تحقیقات بسیاری هم در این زمینه انجام شده است تایید کننده این موضوع بوده است. به طوری که مناطق شهری فشرده نسبت به مناطق اسپرال شاخص آلودگی پایین‌تری نشان می‌دهند. هرچند توسعه صنایع در مناطق اسپرال شهری باعث گسترش بیشتر این مسئله شده است. که از جمله این صنایع در شهر اراک، وجود شرکت پتروشیمی در جنوب غربی شهر یعنی منطقه ۳ و وجود کارخانه‌های صنعتی ماشین‌سازی و آلومینیوم‌سازی در منطقه ۱ است. در نهایت نتیجه گیری از تحقیق نشان دهنده این موضوع است که در شهر اراک مناطق دارای وضعیت اسپرال شهری به دلیل وجود کارخانه‌ها و صنایع وضعیت آلودگی بالاتری نسبت به مناطق مرکزی و فشرده شهر دارا هستند. در نهایت با توجه به نتایج تحقیق پیشنهاد زیر ارائه می‌گردد؛

- ۱- برنامه‌ریزی در جهت طراحی مناسب کاربریهای اراضی شهر
- ۲- انتقال منابع و شرکت‌های ایجاد کننده آلودگی هوای مناطق شهر اراک به مکانی به دور از فضای زندگی شهروندان
- ۳- توزیع مناسب کاربریها در سطح مناطق پنج گانه شهر اراک و تخلیه فشار ترافیکی و آلودگی مناطق ۴ و ۵
- ۴- جلوگیری از ساخت وساز مسکونی و تجاری در مناطق جنوب غربی به دلیل وجود شرکت های پتروشیمی و سایر شرکت ها

منابع

- احمدی، علی؛ شماعی، علی؛ علی اکبری، اسماعیل؛ موحد، علی. (۱۳۹۷)، تحلیل فضایی بازتاب‌های گردشگری تجاری در شهرهای شمال غرب کشور، (مطالعه موردی شهر بانه)، ۵ (۳)، ۱۶۰-۱۴۳.
- بادام فیروز، جلیل؛ رحمتی، علیرضا؛ دانش‌پژوه، نوشین؛ موسی زاده، رویا؛ رضا میرزایی (۱۴۰۱) بررسی تأثیر صنایع موجود و در دست احداث شهر اراک بر کیفیت هوای شهر با استفاده از مدل ADMS، مجله مطالعات محیطی، ۲۰ (۱)، ۴۰-۲۱.
- شاکرمی، کیان (۱۴۰۱). تحلیل فضایی تأثیر فرم شهری بر مصرف انرژی شهر کرج. رساله دکترا رشته جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد ایران، ۱۴۰۱.
- شاکرمی، کیان؛ رهنما، محمدرحیم و اجزاء شکوهی محمد (۱۴۰۲) تحلیل فضایی تأثیر فرم شهر بر مصرف انرژی کلان‌شهر کرج، مجله جغرافیا و توسعه فضای شهری، ۱۰ (۱)، ۴۴-۲۱.
- رفعیان، مجتبی و زاهد نفیسه (۱۳۹۷) تحلیل فضایی فرسودگی محله‌های شهر قم با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی، پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۶ (۲)، ۳۸۲-۳۶۱.
- مصطفوی، سیدعلیرضا؛ صفی‌خانی، حامد؛ کریمی، علی؛ صالح فرد، سیاوش (۱۳۹۹)، بررسی عددی و تجربی تأثیر احداث بزرگراه امیرکبیر (۵۵ متری) در شهر اراک بر میزان کاهش آلودگی هوا، مجله مهندسی مکانیک مدرس، ۲۱ (۳)، ۲۰۸-۱۹۵.
- متصدی زرنندی، سعید؛ نصیری، رسول؛ مطلق، محمداسماعیل (۱۴۰۰)، مدل سازی روابط بین تغییرات مکانی-زمانی حجم ترافیک و غلظت آلاینده ی $PM_{2.5}$ بر پایه مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) و معکوس فاصله وزنی (IDW)، مطالعه موردی: کلانشهر تهران، مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، ۹ (۱)، ۳۴-۲۱.
- موسوی سروینه باغی، الهه سادات؛ رنجبر احسان (۱۳۹۹) به سوی طراحی شهری کم کربن مبتنی بر روش تحلیل یکپارچه منابع تولید کربن (مورد مطالعه: شهر سمنان)، مجله پژوهش‌های محیط زیست، ۱۱ (۲۱)، ۱۵۶-۱۴۳.
- نمکی، روح‌الله؛ عبدالله زاده طرف، اکبر؛ ستاری ساربانقلی، حسن. (۱۴۰۲)، بررسی تأثیر مولفه‌های فرم شهری بر آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تبریز). نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، مقاله در حال انتشار.
- نیک پور، عامر؛ رضازاده، مرتضی؛ الهقلی تبار نشلی فاطمه (۱۳۹۸) تحلیل نقش عوامل مؤثر بر قیمت زمین با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مورد شناسی: شهر بابلسر)، مجله جغرافیا آمایش شهری و منطقه ای ۹ (۳۱)، ۱۱۲-۹۳.
- Agrawal, G., Mohanb, D., and Rahmanb H., (2021). Ambient air pollution in selected small cities in India: Observed trends and future challenges. *IATSS Research*. 45(1), 19-30.
- Akande, A., Cabral, P., Gomes, P., & Casteleyn, S. (2019). The Lisbon ranking for smart sustainable cities in Europe. *Sustainable Cities and Society*, 44, 475-487.
- Block, M.L., Elder, A., Auten, R.L., et al., (2012). The outdoor air pollution and brain health workshop. *Neurotoxicology*. 33 (5), 972-984. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2012.08.014>.
- Chattopadhyay, S. and Chattopadhyay, G. (2012). Modeling and Prediction of Monthly Total Ozone Concentrations by Use of an Artificial Neural Network Based on Principal Component Analysis, *Pure Appl. Geophys.* 169, 1891-1908.
- Clark, L. P., Millet, D. B., & Marshall, J. D. (2011). Air quality and urban form in US urban areas: Evidence from regulatory monitors. *Environmental Science & Technology*, 45(16), 7028-7035.
- Duchesne, J., Gutierrez, L. A., Carrière, I., Mura, T., Chen, J., Vienneau, D., & Mortamais, M. (2022). Exposure to ambient air pollution and cognitive decline: Results of the prospective Three-City cohort study. *Environment International*, 161, 107118.
- Han, J., & Lee, J. (2023). A comparative study of air pollution levels in different urban street configurations in Pangyo New Town, South Korea. *Building and Environment*, 243, 110695.

- Hankey, S., & Marshall, J. D. (2017). Urban form, air pollution, and health. *Current environmental health reports*, 4, 491-503.
- Hu, J., Li, W., Gao, Y., Zhao, G., Jiang, Y., Wang, W., & Chen, R. (2022). Fine particulate matter air pollution and subclinical cardiovascular outcomes: A longitudinal study in 15 Chinese cities. *Environment International*, 163, 107218.
- Ji, H., Wang, J., Meng, B., Cao, Z., Yang, T., Zhi, G., & Zhang, J. (2022). Research on adaption to air pollution in Chinese cities: Evidence from social media-based health sensing. *Environmental Research*, 210, 112762.
- Kamble, T., & Bahadure, S. (2021). Investigating application of compact urban form in central Indian cities. *Land Use Policy*, 109, 105694.
- Karatzas, K., Kaltsatos, S. (2007). Air pollution modelling with the aid of computational intelligence methods in Thessaloniki, Greece. *Simul Model Pract Theory*, 15(10), 1-9.
- Li, Z., Wang, F., Kang, T., Wang, C., Chen, X., Miao, Z., & Zhang, H. (2022). Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO₂ emissions in China: Spatial heterogeneity and varying importance levels. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104028.
- Lijie, H., Ying, L., Peipei, H., Hao, Zh., (2019). Relationship between Air Pollution and Urban Forms: Evidence from Prefecture-Level Cities of the Yangtze River Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, doi: 10.3390/ijerph16183459.
- Liu, X., Wang, M., Qiang, W., Wu, K., & Wang, X. (2020). Urban form, shrinking cities, and residential carbon emissions: Evidence from Chinese city-regions. *Applied Energy*, 261, 114409.
- Miao, C., He, X., Xu, S., & Chen, W. (2023). Vertical distribution of air pollutants in an urban street canyon during winter air pollution episodes in Shenyang, China. *Building and Environment*, 110853.
- Mohammadi, A. & Rahimi, S. (2013). The effects of land use patterns on the spatial distribution of air pollutants in Tehran. *Journal of Urban Research and Planning*, 4(14), 123-142.
- Moustris, K.P., Ziomas I.C. and Paliatsos A.G. (2010). 3-Day-Ahead Forecasting of Regional Pollution Index for the Pollutants NO₂, CO, SO₂, and O₃ using a neural Networks in Athens, Greece, *Water Air Soil Pollut*, 209, (pp. 29-43).
- Ogle, J., Delparte, D., & Sanger, H. (2017). Quantifying the sustainability of urban growth and form through time: An algorithmic analysis of a city's development. *Applied Geography*, 88, 1-14.
- Oshrieh, R., & Valipour, E. (2019). The role of urban density and morphology in the air pollution of Tehran metropolitan. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 3(1), 38-43.
- Richmond-Bryant, J., & Reff, A. (2012). Air pollution retention within a complex of urban street canyons: A two-city comparison. *Atmospheric Environment*, 49, 24-32.
- Sanchis-Marco, L., Montero, J. M., & Fernández-Avilés, G. (2022). An extended CAViaR model for early-warning of exceedances of the air pollution standards. The case of PM₁₀ in the city of Madrid. *Atmospheric Pollution Research*, 13(4), 101355.
- Singh, P., Kikon, N., Verma, P., (2017). Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing-based estimate. *Sustain. Cities Soc.* 32, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018>.
- Song, M., Zhao, X., & Shang, Y. (2020). The impact of low-carbon city construction on ecological efficiency: Empirical evidence from quasi-natural experiments. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104777.
- Song, Y., Zhang, Y., & Han, D. (2022). Deciphering built form complexity of Chinese cities through plot recognition: A case study of Nanjing, China. *Frontiers of Architectural Research*. 11(5), 795-805.
- Sousa, S.I.V., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M. and Pereira, M.C. (2007). Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations, *Environmental Modelling and Software*, 22, (pp. 97-103)
- Tian, L., Liang, Y., & Zhang, B. (2017). Measuring residential and industrial land use mix in the peri-urban areas of China. *Land Use Policy*, 69, 427-438. doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.09.036
- U.S. EPA (2009). Technical Assistance Document for Reporting of Daily Air Quality-air Quality Index. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.
- Wang, Z., Chen, J., Zhou, C., Wang, S., & Li, M. (2022). The impacts of urban form on PM_{2.5} concentrations: a regional analysis of cities in China from 2000 to 2015. *Atmosphere*, 13(6), 963.
- WHO, (2018). Accessed March 16, 2021. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2.
- Wu, J., Zheng, H., Zhe, F., Xie, W., Song, J., (2018). Study on the relationship between urbanization and fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration and its implication in China. *J. Clean. Prod.* 182, 872-882. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.060>

- www.who.int:// World health statistics 2020: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. Air pollution. (2020) Retrieved 16 March 2020, from https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Yan, L., et al., (2019). Exploring the effect of air pollution on social activity in China using geotagged social media check-in data. *Cities*, 2019. 91: p. 116-125.
- Yuan, M., Song, Y., Hong, S., & Huang, Y. (2017). Evaluating the effects of compact growth on air quality in already-high-density cities with an integrated land use-transport-emission model: A case study of Xiamen, China. *Habitat International*, 69, 37-47.
- Zangoui, H. and Asadollahfardi, G. (2018). Prediction of PM10 air pollution in Mashhad using MLP artificial neural networks and Markov chain model. *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 17(47), 39-59.
- Zhang, L., You, S., Zhang, S., Yi, S., & Zhou, B. (2022). The effects of urbanization on air Pollution based on a spatial perspective: Evidence from China. *Frontiers in Environmental Science*, 2280.
- Zhao, X., Zhou, W., Wu, T., & Han, L. (2022). The impacts of urban structure on PM2. 5 pollutions depend on city size and location. *Environmental Pollution*, 292, 118302.
- Zhuo, Y., Zheng, H., Wu, C., Xu, Z., Li, G., & Yu, Z. (2019). Compatibility mix degree index: A novel measure to characterize urban land use mix pattern. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 49-60.
- Harris, N. (2023). The spatial, material and temporal dimensions of planning regulations: A legal geography perspective. *Planning Theory & Practice*, 24(1), 80-96. <https://doi.org/10.1080/14649357.2022.2154824>
- Lauermann, J., & Mallak, K. (2023). Elite capture and urban geography: Analyzing geographies of privilege. *Progress in Human Geography*, 47(5), 645-663. <https://doi.org/10.1177/03091325231186810>
- Liu, P., & Biljecki, F. (2022). A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102936>
- Price, N. & Hawkins, K. (2002). Researching sexual and reproductive behaviour: A peer ethnographic approach. *Social Science & Medicine*, 55(8), 1325–1336. [https://doi.org/10.1016/S0277-9536\(01\)00277-5](https://doi.org/10.1016/S0277-9536(01)00277-5)
- Pulido, L. (2018). Geographies of race and ethnicity III: Settler colonialism and non-native people of colour. *Progress in Human Geography*, 42(2), 309–318. <https://doi.org/10.1177/0309132516686011>
- Pyke, K. D. (2010). What is internalised racial oppression and why don't we study it? Acknowledging racism's hidden injuries. *Sociological Perspectives*, 53(4), 551–572. <https://doi.org/10.1525/sop.2010.53.4.551>
- Scheyvens, R., Wild, K. & Overton, J. (2003). International students pursuing postgraduate study in geography: Impediments to their learning experiences. *Journal of Geography in Higher Education*, 27(3), 309–323. <https://doi.org/10.1080/0309826032000145070>
- Singh, S., Pykett, J., Kraftl, P., Guisse, A., Hodgson, E., Humelnicu, U. E., ... & Weightman, W. (2023). Understanding the 'degree awarding gap' in geography, planning, geology and environmental sciences in UK higher education through peer research. *Journal of Geography in Higher Education*, 47(2), 227-247. <https://doi.org/10.1080/03098265.2021.2007363>
- Usher, J. (2023). Conceptual framework for the participation of children in local area planning decision-making processes through primary geography education. *Irish Educational Studies*, 42(4), 583-597. <https://doi.org/10.1080/03323315.2023.2260998>
- Xie, Y., Wang, Z., Fan, Y., Huang, J., & Xie, B. (2023). Application of GIS image system and remote sensing technology in physical geography land planning. *Soft Computing*, 27(12), 8403-8414. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08128-6>