

## Research Paper



## Structural Traps: Assessing the Dual Impact of Morphology and the Quantity of Construction Development on the Frequency of Local and Regional Dust Events Case Study: Kerman Province



Saeedeh Zaboli\* <sup>1</sup>, Saeed Jahanbakhsh Asl <sup>2</sup>, Ali Mohammad Khorshiddoust <sup>3</sup>, and Mahmood Khosravi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Graduate, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran.

[saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir](mailto:saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir)

2. Professor, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran.

[s\\_jahan@tabrizu.ac.ir](mailto:s_jahan@tabrizu.ac.ir)

3. Professor, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran

[khoshid@tabrizu.ac.ir](mailto:khoshid@tabrizu.ac.ir)

4. Professor, Department of Climatology, Faculty of Geography and Environmental Planning University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. [Khosravi@Gep.usb.ac.ir](mailto:Khosravi@Gep.usb.ac.ir)

## Keywords

**Urban morphology, Local/regional dust (WMO 07/06), Fixed effects regression, Ventilation obstruction, Kerman Province, Iran.**

Receive: 2025/11/02

Accepted: 2026/06/13

Published: 2026/06/22

## ABSTRACT

## Introduction

Dust events represent one of the most critical environmental challenges in arid and semi-arid regions, particularly in Iran, where they pose extensive consequences for public health, urban sustainability, and environmental management. Kerman Province, like many arid regions of Iran, is repeatedly affected by dust storms. While numerous studies have investigated dust phenomena, most research has failed to distinguish between locally-generated dust and regionally-transported dust, nor has it simultaneously considered both the quantity and morphology of new construction developments. This research gap has limited our understanding of how urban development actually contributes to either exacerbating or controlling dust events. The present study aims to empirically investigate the simultaneous influence of the quantity and quality (morphology and orientation) of construction development on the frequency of local dust events (WMO code 07) and regional dust events (WMO code 06) in Kerman Province. The innovation of this study lies in its empirical verification of theoretical "pollutant trap" mechanisms using fixed-effects regression models, while distinguishing between effects on local versus regional dust occurrences. The research addresses a fundamental question: Do new constructions act as "structural traps" that exacerbate dust pollution, and if so, through which mechanisms?

\*Correspondin Author: Saeedeh Zaboli : [saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir](mailto:saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir)

How to cite this article: Zaboli, Saeedeh., Jahanbakhsh Asl, Saeed., Mohammad Khorshiddoust, Ali., & Khosravi, Mahmood. (2026). Structural Traps: Assessing the Dual Impact of Morphology and the Quantity of Construction Development on the Frequency of Local and Regional Dust Events Case Study: Kerman Province. *Hydrogeomorphology*, Vol(No): 119 – 139.

DOI: [10.22034/hyd.2026.70008.1824](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.70008.1824)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

## Methodology

**Study Area and Data Sources:** The research was conducted in Kerman Province, Iran, using dust event data from 11 synoptic stations over the period 2005-2020. Dust events were classified according to World Meteorological Organization (WMO) codes: code 07 (local dust—dust raised at or near the station by wind, attributed to local anthropogenic sources including construction activities) and code 06 (regional dust widespread suspended dust not raised at the station, indicating long-range transport from deserts or external sources). Construction data were extracted from the Global Human Settlement Layer (GHSL), capturing new construction pixels within 5-kilometer buffers surrounding each synoptic station for the years 2005, 2010, 2015, and 2020.

**Variable Definition:** The dependent variables were the frequency of dust occurrences for WMO codes 06 and 07. Independent variables included: (1) morphological obstruction (*count\_oblique*) measuring events where building orientation relative to prevailing wind was perpendicular or opposite, leading to ventilation obstruction and pollutant entrapment; (2) total construction quantity (*built\_total*)—the number of new construction pixels within the buffer; (3) surface disturbance in low-density areas (*built\_ll\_control*) measuring new construction in spatial "cold" clusters (Low-Low clusters) identified by LISA analysis; (4) construction intensity in high-density areas (*built\_hh\_intensity*) new construction in "hot" clusters (High-High clusters); and (5) a control variable for non-significant construction.

The angular difference between dust-carrying wind direction and new construction orientation was calculated using rotational distance formula:  $d(\alpha, \beta) = \min(|\alpha - \beta|, 360^\circ - |\alpha - \beta|)$ , with values then classified as aligned ( $d \leq 45^\circ$ ), approximately perpendicular ( $45^\circ < d \leq 135^\circ$ ), or opposite ( $d > 135^\circ$ ). Spatial autocorrelation was assessed using Moran's I cluster and outlier analysis, as well as Getis-Ord hot spots analysis.

**Analytical Approach:** The study employed a fixed-effects negative binomial regression model, which is particularly appropriate for count data exhibiting overdispersion (variance exceeding the mean). The Hausman test ( $\chi^2=11.19$ ,  $p=0.0477$ ) confirmed that fixed effects were preferred over random effects, indicating that time-invariant station characteristics (topography, proximity to natural dust sources) correlated with explanatory variables. The model was specified as:  $\ln(\text{expected event rate}) = \text{fixed effect for station } i + \sum(\beta \times \text{independent variables})$ . Coefficients were reported as Incidence Rate Ratios (IRR), where an IRR of 1.025 indicates a 2.5% increase in the expected event rate per unit increase in the independent variable.

## Results and Discussion

**Key Findings:** The results revealed that morphological obstruction (*count\_oblique*) was the strongest factor increasing the frequency of both local and regional dust events. For local dust (WMO 07), *count\_oblique* showed IRR = 1.0246 ( $p < 0.001$ ), while for regional dust (WMO 06), it showed IRR = 1.0269 ( $p < 0.001$ ). These findings empirically demonstrate that inappropriate building orientation relative to prevailing winds creates ventilation obstruction and pollutant entrapment, with buildings acting as aerodynamic barriers that generate "pollutant traps."

**Surface Disturbance Effects:** Surface disturbance in low-density areas (*built\_ll\_control*) significantly increased local dust events, with IRR = 1.0257 ( $p = 0.029$ ). This finding indicates that construction activity in sensitive, low-density peripheral areas disturbs the soil surface and enhances local dust generation. Notably, this variable was not significant for regional dust (code 06), confirming that surface disturbance is primarily a local mechanism.

**The Dual Nature of Construction Quantity:** The total quantity of construction (*built\_total*) exhibited a paradoxical dual effect. For local dust (WMO 07), *built\_total* showed a negative coefficient (IRR = 0.970,  $p = 0.074$ ), suggesting a tendency toward surface stabilization and modest dust reduction. However, for regional dust (WMO 06), *built\_total* was non-significant ( $p = 0.501$ ). This paradox reveals that while construction can locally stabilize surfaces and reduce dust emissions, the same buildings—through unfavorable morphological configurations—create entrapment effects that ultimately exacerbate dust problems. The net effect is increasing because the morphological entrapment mechanism (IRR = 1.025) is substantially stronger than the stabilization effect (IRR = 0.970).

**Distinguishing Local from Regional Dust:** A critical contribution of this study is the systematic differentiation between local and regional dust sources. The comparative analysis revealed that for regional dust (WMO 06), none of the construction-related

quantity or spatial pattern variables were significant (all  $p > 0.15$ ). This fundamental difference confirms the source differentiation hypothesis: urban development is primarily a local source, not a major driver of regional transport. Morphological obstruction, however, affected both types—demonstrating that urban structure systematically traps both locally-generated and regionally-transported particles in stagnation zones.

**Comparison with Previous Research:** While previous studies in Iran have focused primarily on the quantity of urban development and its general pollution consequences, this research demonstrates that unfavorable morphology and building orientation are even more important than construction volume per se in controlling dust events. The findings align with broader international research on urbanization and dust generation, while extending that research by empirically verifying CFD-simulated mechanisms using real-world observational data. Unlike most previous Iranian dust studies that used descriptive methods or simpler spatial analysis, this study employed rigorous fixed-effects panel regression with spatial clustering analysis.

## Conclusions

This research provides empirical evidence that urban structures in Kerman Province act as "pollutant traps," exacerbating both local and regional dust events primarily through unfavorable morphological configurations rather than simply through construction volume. The findings demonstrate that morphological obstruction (count\_oblique) is the strongest predictor of increased dust frequency for both WMO 07 and WMO 06, confirming that inappropriate building orientation creates ventilation obstruction and particle entrapment.

The study reveals several key insights. First, surface disturbance in low-density, sensitive peripheral areas significantly increases local dust generation, highlighting the vulnerability of these zones. Second, construction quantity has a paradoxical dual effect: while potentially stabilizing surfaces locally, the same structures create entrapment effects that dominate the net outcome. Third, the clear distinction between factors affecting local versus regional dust confirms that urban development is primarily a local source mechanism, though morphological obstruction affects both pathways.

Based on these findings, the research recommends a paradigm shift from focusing solely on urban development quantity to prioritizing aerodynamic design quality. Environmental policies should mandate building codes that optimize building orientation relative to prevailing wind flows and require surface stabilization in sensitive low-density marginal areas. This integrated approach would reduce the negative interactions between development morphology and atmospheric dynamics in arid and semi-arid environments. Future research should focus on scenario modeling using geographic and computational fluid dynamics tools to evaluate the efficacy of proposed interventions at broader scales.



## تله‌های ساختاری: ارزیابی تأثیر دوگانه مورفولوژی و کمیت توسعه ساختوسازها بر فراوانی رخدادهای گرد و غبار محلی و منطقه‌ای مطالعه موردی: استان کرمان



سعیده زابلی\*<sup>۱</sup>، سعید جهانبخش اصل<sup>۲</sup>، علی محمدخورشیددوست<sup>۳</sup>، محمود خسروی<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. [saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir](mailto:saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir)

۲. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. [s\\_jahan@tabrizu.ac.ir](mailto:s_jahan@tabrizu.ac.ir)

۳. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. [khoshid@tabrizu.ac.ir](mailto:khoshid@tabrizu.ac.ir)

۴. استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. [Khosravi@Gep.usb.ac.ir](mailto:Khosravi@Gep.usb.ac.ir)

### چکیده

گرد و غبار یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت عمومی، پایداری شهری و مدیریت محیط‌زیست به همراه دارد. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی گرد و غبار پرداخته‌اند، اغلب این پژوهش‌ها بدون تمایز میان گرد و غبار با منشأ محلی و منطقه‌ای و بدون توجه همزمان به کمیت و مورفولوژی ساختوسازهای جدید انجام شده‌اند. این خلأ پژوهشی، درک نقش واقعی توسعه ساخت و ساز در تشدید یا کنترل رخداد‌های گرد و غبار را با محدودیت مواجه کرده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تجربی تأثیر همزمان کمیت و کیفیت (مورفولوژی و جهت‌گیری) توسعه ساختوسازها بر فراوانی رخداد‌های گرد و غبار محلی و منطقه‌ای در استان کرمان انجام شد. داده‌های گرد و غبار از ۱۱ ایستگاه سینوپتیک و داده‌های ساختوساز از لایه GHSL در دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۵ استخراج شدند. برای مدل‌سازی رابطه میان شاخص‌های ساختوساز جدید و فراوانی گرد و غبار، از رگرسیون دوجمله‌ای منفی داده‌های پنلی با اثرات ثابت استفاده شد؛ نتایج نشان داد که انسداد مورفولوژیک ساخت و سازهای جدید قوی‌ترین عامل افزایش فراوانی هر دو نوع گرد و غبار است، به‌گونه‌ای که جهت‌گیری نامناسب ساختمان‌ها موجب حبس آلاینده‌ها و تشدید رخداد‌های گرد و غبار می‌شود. همچنین، آشفستگی سطح در مناطق کم‌تراکم به طور معناداری گرد و غبار محلی را افزایش داد. در مقابل، کمیت کل ساختوساز اثری دوگانه از خود نشان داد؛ به طوری که از یک سو از طریق تثبیت سطح تمایل به کاهش گرد و غبار محلی داشت و از سوی دیگر با افزایش زبری و انسداد تهویه، زمینه تشدید برخی رخداد‌ها را فراهم کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ساخت و سازهای جدید در استان کرمان می‌توانند به‌عنوان «تله‌های آلاینده» عمل کنند و تأکید می‌کند که مدیریت گرد و غبار صرفاً با کنترل حجم ساختوساز امکان‌پذیر نیست. بر این اساس، سیاست‌های شهری باید از تمرکز بر کمیت توسعه به سمت بهبود کیفیت طراحی آیرودینامیکی، جهت‌گیری ساختمان‌ها نسبت به باد غالب و تثبیت سطح در نواحی حساس تغییر جهت دهند.

### کلیدواژه‌ها

مورفولوژی شهری، گرد و غبار محلی/منطقه‌ای (WMO) (07/06)، رگرسیون اثرات ثابت، انسداد تهویه، استان کرمان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

\*نویسنده مسئول: سعیده زابلی

رایانامه: [saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir](mailto:saeedeh.zaboli@tabrizu.ac.ir)

**ارجاع به این مقاله:** زابلی، سعیده؛ جهانبخش اصل، سعید؛ محمدخورشیددوست، علی و خسروی، محمود (۱۴۰۵). تله‌های ساختاری: ارزیابی تأثیر دوگانه مورفولوژی و کمیت توسعه ساختوسازها بر فراوانی رخداد گرد و غبار محلی و منطقه‌ای مطالعه موردی: استان کرمان. هیدروژنومورفولوژی، دوره (شماره): 139-119.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.70008.1824



مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله خاورمیانه که شامل نواحی وسیعی از کشور ایران نیز می‌شود، با تهدید فزاینده طوفان‌های ماسه و گرد و غبار (SDS)<sup>۱</sup> مواجه هستند که اثرات سوء بر سلامت و زیرساخت‌ها دارند. این پدیده‌ها، که به عنوان رویدادهای شدید آب و هوایی شناخته می‌شوند می‌توانند منجر به مشکلات تنفسی، قلبی، عروقی و سایر بیماری‌ها شوند (Goudie, 2014). چنین تهدیدهایی نه تنها سلامت عمومی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه بر اقتصاد و محیط زیست نیز تأثیرات منفی می‌گذارند و نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری هستند. استان کرمان، مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به طور مکرر تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غبار قرار می‌گیرد (Javadian et al., 2019; Modarres, 2021). نتایج مطالعات نشان می‌دهند که عوامل اصلی مؤثر بر تولید گرد و غبار در این مناطق شامل خشکسالی، سرعت باد، و خشک شدن تالاب‌ها و تغییرات کاربری اراضی هستند (Al Ameri et al., 2019; Dolatkordestani et al., 2022; Miri et al., 2010). این عوامل طبیعی اغلب با فعالیت‌های انسانی تشدید می‌شوند، که منجر به افزایش فراوانی و شدت رخدادهای گرد و غبار گردیده و به ویژه در مناطقی مانند کرمان که رشد شهری سریع داشته است بر اهمیت بررسی نقش توسعه شهری تأکید دارند. همچنین نتایج مطالعات نشان داده‌اند که گرد و غبار ناشی از ساخت و ساز می‌تواند سهم قابل توجهی در آلودگی ذرات معلق شهری داشته باشد (Chen et al., 2019; Xue et al., 2017). این ذرات، به ویژه  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$ ، از طریق فعالیت‌هایی مانند خاکبرداری، جابجایی مصالح، و تردد وسایل نقلیه در سایت‌های ساختمانی منتشر می‌شوند (He et al., 2024; T. Li et al., 2022; Muleski et al., 2005; Zhang, 2009). K. هواي شهری تأثیر بگذارند، که نیاز به بررسی عوامل مورفولوژیکی را برجسته می‌کنند.

نتایج مطالعه‌ای در شهر روستوف-نا-دُن<sup>۳</sup> واقع در جنوب روسیه که در حال توسعه سریع از طریق ساخت مجتمع‌های مسکونی جدید است نشان داده که در منطقه توسعه مسکن با الگوی نقطه‌ای، افزایش قابل توجهی از حد مجاز آلودگی هوای گرد و غبار ثبت شده است (Manzhilevskaya, 2025).

پژوهشی که در یک مجتمع مسکونی انجام شده نشان داده آلودگی گرد و غبار ساختمانی در طرح‌های مسکن الگوی نقطه‌ای (شامل ذرات  $PM_{0.5}$ – $PM_{10}$ ) عمدتاً در اطراف مناطق کاری (کانون فعالیت در محل ساخت و ساز) متمرکز است، اما ذرات ریزتر آن تا ارتفاعات بالای ساختمان‌های مسکونی نیز منتشر می‌شوند و سلامت ساکنان را به طور قابل توجهی تهدید می‌کنند (Manzhilevskaya, 2024). گسترش شهری در شهرهای بیابانی می‌تواند به طور قابل توجهی تولید گردوغبار محلی را تغییر دهد و بر کیفیت هوا و سلامت عمومی تأثیر بگذارد. مدل‌های عددی نشان می‌دهند که تغییرات کاربری اراضی شهری بر شارهای گردوغبار سطحی تأثیر می‌گذارند و عواملی مانند شدت تلاطم و رطوبت خاک در آن‌ها نقش‌های حیاتی ایفا می‌کنند (Tahir, 2019) در استان کرمانشاه، تغییرات کاربری اراضی، به ویژه تبدیل مرتع به زمین کشاورزی، با افزایش تولید گردوغبار مرتبط بوده است که بر نیاز به راهبردهای مؤثر مدیریت اراضی تأکید می‌کند (Ahmadi-Molaverdi et al., 2021). این تغییرات کاربری اراضی اغلب با گسترش شهری همراه بوده و می‌تواند منابع گرد و غبار را افزایش دهد.

ساخت‌وساز شهری در مقیاس بزرگ به انتشار گردوغبار کمک می‌کند، نمونه‌ای از این رخداد در ناحیه شیامن کشور چین، که گردوغبار ساختمانی تأثیر قابل توجهی بر محیط جوی داشته، مشاهده شده است. ادغام عوامل انتشار با مدل‌هایی مانند WRF<sup>۴</sup> و CALPUFF<sup>۵</sup> به شبیه‌سازی توزیع گردوغبار کمک می‌کند و بینش‌هایی برای کنترل ساخت‌وساز ارائه می‌دهد (Zhou et al., 2023). این مدل‌ها امکان پیش‌بینی و مدیریت بهتر انتشار گردوغبار را فراهم می‌کنند و می‌توانند برای مطالعات موردی مانند استان کرمان نیز اعمال شوند تا انجام کنترل‌های بهینه امکان پذیر گردند.

1-Sand and Dust Storms

2-Particulate Matter

3-Rostov-on-Don

4-Weather Research and Forecasting Model

5-California Puff Model

حوزه دیگری از پژوهش‌ها به تأثیر شکل و هندسه شهر (مورفولوژی شهری) بر الگوهای جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که مورفولوژی شهری، از جمله چیدمان ساختمان‌ها، ارتفاع، و نسبت ابعاد خیابان‌ها، تأثیر بسزایی بر الگوهای جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها دارد (Akhter et al., ۲۰۲۱; Li et al., ۲۰۲۱; Minella et al., ۲۰۱۱; Ruda Sarria et al., ۲۰۲۵).

بسیاری از مطالعات در ایران و سایر نقاط جهان عمدتاً بر کمیّت توسعه شهری و تأثیر آن بر آلودگی هوا متمرکز بوده‌اند (Wang et al., ۲۰۲۴). با این حال، ایجاد چارچوب جامعی برای پیوند دادن هندسه فضایی (مورفولوژی) جهت توسعه ساختارها به دینامیک باد و انباشت آلاینده‌ها، به ویژه گرد و غبار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۱</sup> به طور گسترده‌ای ثابت کرده‌اند که جهت‌گیری ساختمان‌ها نسبت به باد غالب، جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها را کنترل می‌کند (Liang et al., ۲۰۲۳; Pantusheva et al., ۲۰۲۲). انسداد تهویه در حالت‌های عمود یا مخالف با جهت باد می‌تواند منجر به حبس ذرات و ایجاد "تله‌های آلاینده"<sup>۲</sup> شود (Huang et al., ۲۰۱۹; Viathirana et al., ۲۰۱۹). این مکانیسم‌های فیزیکی، که در مطالعات CFD به تفصیل بررسی شده‌اند (Shui et al., ۲۰۱۹; Nguyen et al., ۲۰۰۰; Chan et al., ۲۰۲۲; Wen et al., ۲۰۲۲; et al., ۲۰۲۵) نشان می‌دهند که کیفیت (جهت‌گیری) ساخت‌وساز به اندازه کمیّت آن در تعیین سرنوشت آلاینده‌ها اهمیت دارد. علاوه بر این، مفهوم "زبری شهری"<sup>۳</sup> ناشی از تراکم و مورفولوژی ساختمان‌ها، نه تنها بر دینامیک محلی هوا تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند بر حمل و نقل و رسوب‌گذاری گرد و غبار منطقه‌ای نیز اثرگذار باشد (Mo & Liu, ۲۰۱۸; Tyree et al., ۲۰۲۴). افزایش زبری سطح می‌تواند آشفتگی جوی را تشدید کرده و ذرات منطقه‌ای را به سمت سطح زمین هدایت کند (Pohjola, 2006). این فرآیندها نشان‌دهنده تعامل پیچیده بین ساختارهای شهری و پدیده‌های جوی هستند و نیاز به انجام بررسی‌های تجربی، به ویژه در زمینه تأثیرات محلی و منطقه‌ای گرد و غبار، را نشان می‌دهند.

اگرچه مطالعات متعددی به بررسی گرد و غبار در ایران پرداخته‌اند، (Hamidi et al., ۲۰۲۵; Hosseini & Shahbazi, ۲۰۱۶)، اغلب این پژوهش‌ها بدون تمایز میان گرد و غبار با منشأ محلی و منطقه‌ای و بدون توجه همزمان به مورفولوژی و کمیّت ساخت‌وساز شهری انجام شده‌اند. این خلأ، درک مکانیسم‌های واقعی تشدید گرد و غبار در شهرهای خشک ایران، به ویژه استان کرمان، را با محدودیت مواجه کرده است.

بر اساس جستجوهای انجام شده، پژوهش مستقیمی که به طور ویژه برای استان کرمان و با تمرکز بر تأثیر مورفولوژی و کمیّت ساخت و ساز جدید بر فراوانی رویدادهای گرد و غبار محلی و منطقه‌ای با استفاده از روش‌شناسی رگرسیونی مشابه باشد، یافت نشد.

پژوهش حاضر به بررسی تجربی و آماری تأثیر همزمان کمیّت (تراکم) و کیفیت (مورفولوژی و جهت‌گیری) ساخت و ساز شهری بر فراوانی رخداد‌های گرد و غبار محلی (کد WMO ۰۷) و منطقه‌ای (کد WMO ۰۶) در استان کرمان می‌پردازد. نوآوری این مطالعه در تأیید تجربی مکانیسم‌های نظری "تله آلاینده" با استفاده از مدل‌های رگرسیون با اثرات ثابت و تمایز گذاشتن بین اثرات بر گرد و غبار محلی و منطقه‌ای است.

## داده‌ها و روش کار

در این پژوهش از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای ارزیابی چگونگی تأثیر عواملی مانند تراکم ساخت‌وساز، تمرکز فضایی و مانع‌شناسی ریخت‌شناسی بر رخداد گردوغبار استفاده شد.

1- Computational Fluid Dynamics

2- Pollutant Traps

3- Urban Roughness

استفاده از رگرسیون دوجمله‌ای منفی با اثرات ثابت<sup>۱</sup> برای کنترل سوگیری‌های جغرافیایی ثابت، و ترکیب آن با تحلیل GHSL و LISA برای کمی‌سازی توسعه شهری و خوشه‌بندی فضایی (HH/LL)، یک رویکرد روش‌شناختی قوی و کمتر رایج در این حوزه است. این رگرسیون یک رویکرد آماری شناخته شده برای تحلیل داده‌های شمارشی است، به ویژه هنگامی که با پراکندگی بیش از حد وجود داشته باشد، جایی که واریانس متغیر وابسته از میانگین آن بیشتر است (Allison & Waterman, ۲۰۰۲; Chen et al., ۲۰۲۲; Türk et al., ۲۰۲۵). این مدل در چنین مواردی به رگرسیون پواسون<sup>۲</sup> ترجیح داده می‌شود، زیرا در مدل‌های پواسون فرض بر برابری بین میانگین و واریانس است (Allison & Waterman, ۲۰۰۲).

کاربرد اثرات ثابت در مدل‌های داده پنبلی به کنترل ناهمگونی‌های مشاهده‌نشده و ثابت در طول زمان در واحدهای مختلف (مانند ایستگاه‌ها یا شهرها) کمک می‌کند و در نتیجه برآوردهای بی‌طرفانه‌تری از اثرات متغیرهای مستقل ارائه می‌دهد (Allison & Waterman, ۲۰۰۲; Colin Cameron & Miller, 2015). زیست‌محیطی و دینامیک شهری استفاده می‌کنند (Alshubiri, ۲۰۲۵; Godawska, ۲۰۲۴; Yuan & Zhang, ۲۰۲۰; Latief et al., ۲۰۲۲; Yang et al., ۲۰۲۳; Yang et al., ۲۰۲۵). به عنوان مثال، مدل‌های اثرات ثابت برای بررسی رابطه بین نگرانی عمومی زیست‌محیطی و آلودگی هوای شهری (Yang et al., ۲۰۲۳) تأثیر تجمع زمین شهری بر نتایج اقتصادی و زیست‌محیطی (Yang et al., ۲۰۲۵) و تأثیر محیط‌های زندگی شهری بر سلامت (Yuan & Zhang, ۲۰۲۰) به کار رفته‌اند. عوامل شهری مانند تراکم جمعیت و سهم جمعیت شهری نیز به عنوان عوامل تعیین‌کننده مهم در مطالعات زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شوند (Godawska, ۲۰۲۴; Xue et al., ۲۰۲۴). برای تحلیل داده‌های شمارشی مربوط به فراوانی رویدادهای گرد و غبار، که اغلب با مشکل پراکندگی بیش از حد مواجه هستند (یعنی واریانس بیشتر از میانگین)، رگرسیون دوجمله‌ای منفی انتخاب شد (Hilbe, 2011). این مدل نسبت به رگرسیون پواسون که فرض برابری میانگین و واریانس را دارد، برای داده‌های شمارشی با پراکندگی بیش از حد مناسب‌تر است (Fernandez & Vatcheva, ۲۰۲۲; Kim & Kriebel, ۲۰۰۹). علاوه بر این، با توجه به ماهیت داده‌های پنبلی و برای کنترل ناهمگونی‌های مشاهده نشده و ثابت در طول زمان (مانند ویژگی‌های جغرافیایی ثابت هر ایستگاه که ممکن است با متغیرهای مستقل همبستگی داشته باشند)، از رویکرد اثرات ثابت استفاده شد (Allison, 2009; Wooldridge, 2009) مدل اثرات ثابت، با حذف تأثیر این ویژگی‌های ثابت، تخمین‌های بی‌طرفانه‌تری از اثرات متغیرهای مستقل ارائه می‌دهد.

آزمون هاسمن (Hausman, 1978) برای مقایسه مدل اثرات ثابت و مدل اثرات تصادفی انجام شد. این آزمون تفاوت معناداری بین مدل‌های Fixed Effects و Random Effects نشان می‌دهد. این روش‌ها جهت اعتبار مدل‌سازی می‌باشند، که امکان تحلیل دقیق داده‌های پنبلی را فراهم می‌کنند و قابلیت تکرارپذیری پژوهش را افزایش می‌دهند.

برآوردگرهای دوجمله‌ای منفی معمولاً در برآورد مدل‌هایی با متغیرهای وابسته از نوع داده شمارشی استفاده می‌شوند. نتایج، ترجیح واضحی برای برآوردگرهای دوجمله‌ای منفی در موقعیت‌هایی که متغیرهای وابسته پایه، بیش پراکندگی دارند نشان نمی‌دهد، مگر این که مفروضات درباره شکل دقیق بیش پراکندگی برای پژوهشگر مورد تایید باشد (Blackburn, 2015).

#### تعریف و اندازه‌گیری متغیرها:

متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه به شرح زیر تعریف و اندازه‌گیری شده‌اند:

#### متغیرهای وابسته

فراوانی رویدادهای گرد و غبار به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده و بر اساس کدهای سازمان جهانی هواشناسی<sup>۳</sup> تفکیک گردیده‌اند. در زمینه رویدادهای گرد و غبار، کدهای ۰۶ و ۰۷ سازمان جهانی هواشناسی به انواع ویژه‌ای از گرد و غبار اشاره دارند. این

<sup>۱</sup>-Fixed Effects Negative Binomial Regression

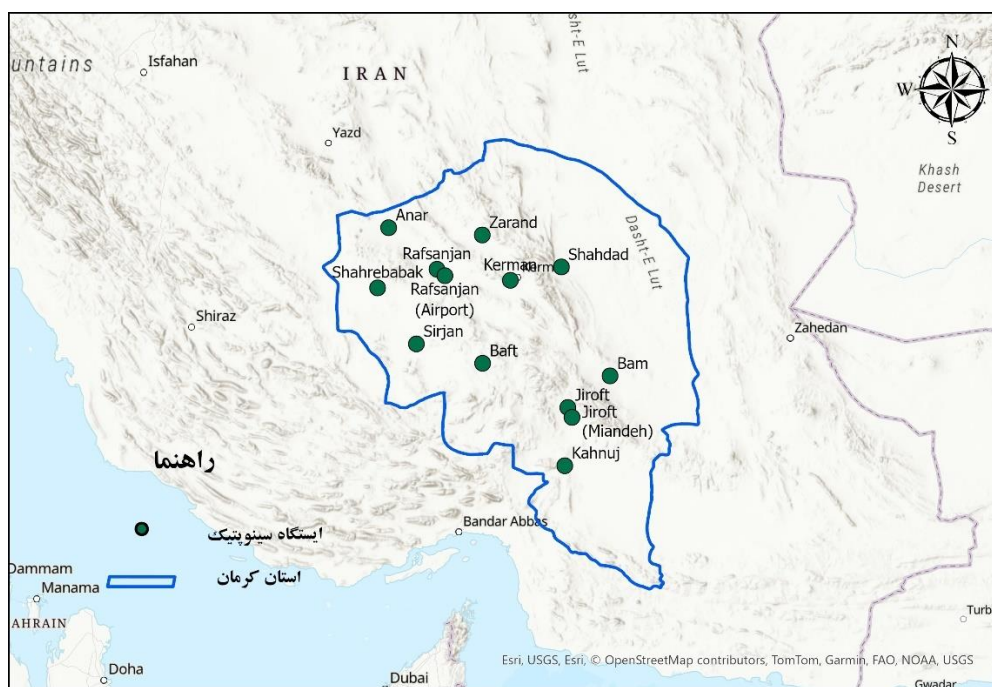
<sup>۲</sup>-Poisson Regression

<sup>۳</sup>-WMO

کدها در مشاهدات هواشناسی برای تحلیل توزیع مکانی-زمانی رویدادهای گرد و غبار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hamzeh et al., ۲۰۲۱)

کد ۰۷ (گرد و غبار محلی): رویدادی که در آن گرد و غبار در ایستگاه یا نزدیکی آن توسط باد برخاسته باشد. این کد به منابع محلی انسان‌ساز، از جمله فعالیت‌های ساختمانی و آشفستگی سطح، منتسب است (Hamzeh et al., 2024; Krasnov et al., 2014).

کد ۰۶ (گرد و غبار منطقه‌ای): گرد و غبار گسترده معلق که از ایستگاه برخاسته نشده باشد. این کد به انتقال دوربرد از بیابان‌ها یا منابع خارج از شهر اشاره دارد (Bucci et al., ۲۰۱۸; Hamzeh et al., ۲۰۲۱). تفکیک بین این دو نوع گرد و غبار برای درک منشأ و مکانیسم‌های حمل و نقل ضروری است (Bullard & Mockford, ۲۰۱۸; Sarafian et al., ۲۰۲۳). این تفکیک امکان بررسی جداگانه اثرات محلی و منطقه‌ای را فراهم ساخته و با افزایش دقت تحلیل‌ها بینش‌های عمیق‌تری در مورد دینامیک گرد و غبار ارائه می‌دهد. برای انجام این پژوهش از داده‌های گرد و غبار ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان با کدهای ۰۶ و ۰۷ که دارای داده‌های کاملی بودند استفاده شد (شکل ۱).



شکل (۱): توزیع فضایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Figure(1): Spatial distribution of the synoptic stations used in this study

فراوانی رخداد گرد و غبار در کدهای ۰۶ (شکل ۲) و ۰۷ (شکل ۳) برای ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰-۲۰۱۵-۲۰۲۰ و شناسایی شد.

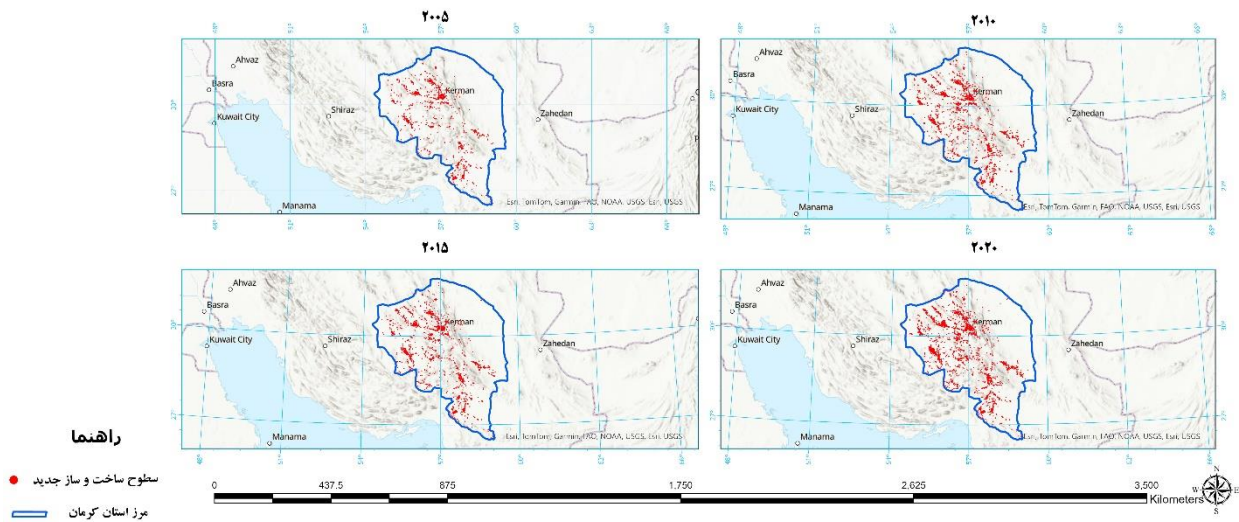
متغیرهای مستقل

متغیرهای مستقل برای ارزیابی تأثیر مورفولوژی و کمیت ساخت و ساز بر فراوانی گرد و غبار به شرح زیر تعریف شده اند: انسداد مورفولوژیک<sup>۱</sup>: این متغیر، که بر اساس مطالعات علمی و روش‌های تحلیلی معتبر عداد ارائه شده است رخدادهایی را اندازه‌گیری می‌کند که در آن جهت‌گیری ساختمان‌ها نسبت به باد غالب، عمود یا مخالف بوده و منجر به انسداد تهویه و حبس آلاینده‌ها می‌شود (Q. Li et al., 2022; Vidanapathirana et al., 2025; Zheng et al., 2010)

تأثیر جهت‌گیری ساخت و سازه‌های جدید: جهت‌گیری ساختمان‌ها نسبت به باد غالب به طور قابل توجهی بر تهویه طبیعی و پراکندگی آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد (Duan et al., ۲۰۲۰; Waibel et al., ۲۰۱۷). مطالعات CFD تأثیر جهت‌های مختلف باد (مانند موازی و غیرموازی) را بر جریان هوا و غلظت آلاینده‌ها بررسی کرده‌اند (Q. Li et al., 2022) بنابراین، رویکرد توصیف شده برای محاسبه متغیر count\_oblique، که شامل تحلیل‌های GIS و داده‌های جهت باد غالب برای ارزیابی انسداد تهویه و حبس آلاینده‌ها بر اساس جهت‌گیری ساختمان‌هاست، با روش‌ها و یافته‌های موجود در ادبیات علمی سازگار است (Q. Li et al., 2022; Vidanapathirana et al., 2025; Zheng et al., 2010) این متغیر، کلیدی برای اندازه‌گیری انسداد مورفولوژیک محسوب می‌شود و با ادغام CFD و GIS و ارزیابی بیشتری را امکان پذیر می‌سازند.

کمیت کل ساخت و ساز: این متغیر، تعداد پیکسل‌های کل ساخت و ساز جدید در بافر ۵ کیلومتری اطراف هر ایستگاه سینوپتیک را اندازه‌گیری می‌کند. این داده‌ها از لایه جهانی سکونتگاه‌های انسانی<sup>۲</sup> استخراج شدند (Pesaresi et al., ۲۰۲۴; Corbane et al., ۲۰۲۰) این متغیر به عنوان شاخصی از قدرت منبع انتشار گرد و غبار فرار و همچنین زبری شهری عمل می‌کند (Schiavina et al., ۲۰۱۹). برای انجام این پژوهش از محصولات GHSL<sup>۳</sup> سطوح ساخت و ساز انسانی برای سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰ استفاده شد. در محیط نرم افزار ArcGisPro ساخت و سازه‌های جدید با استفاده از مقایسه دو سال استخراج گردید (شکل ۲).

سطوح ساخت و ساز جدید در استان کرمان با فواصل زمانی ۵ ساله



شکل (۲): پراکندگی فضایی سطوح ساخت‌وساز جدید در استان کرمان ( سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، و ۲۰۲۰)

Figure(2): Spatial distribution of newly developed built-up areas in Kerman Province (2005, 2010, 2015, and 2020)

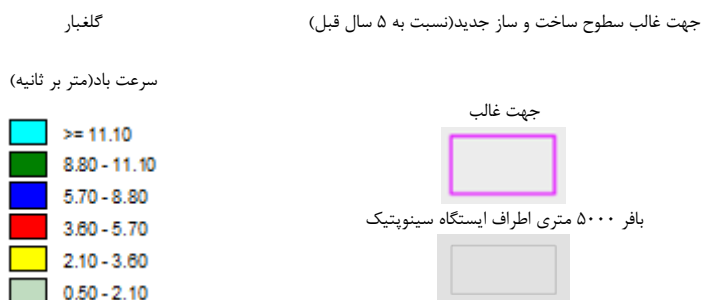
مشخصات باد از جمله جهت و سرعت آن در زمان هر رخداد استخراج و گل‌غبار (گل‌بادهای گرد و غباری) هر کدام ترسیم گردید؛ سپس در سال‌های منتخب، جهت غالب ساخت و ساز جدید در درون هر بافر (۵ هزار متری اطراف ایستگاه سینوپتیک) ترسیم و جهت نمایش

<sup>۱</sup>-count\_oblique

<sup>۲</sup>-Global Human Settlement Layer - GHSL

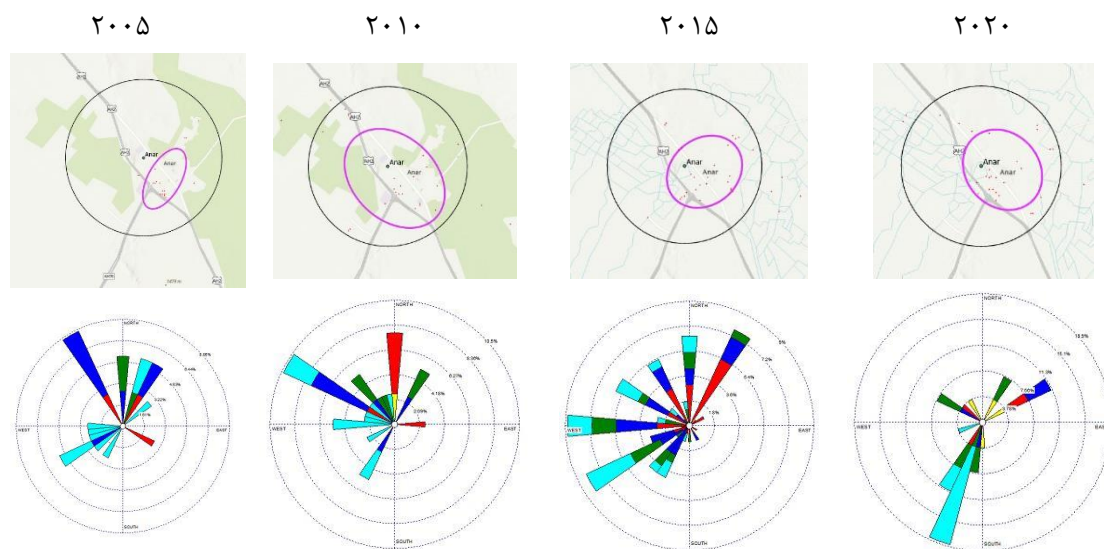
<sup>۳</sup>-Global Human Settlement Layer

بصری با گلبارها (کدهای ۰۶ و ۰۷)، مقایسه شد به دلیل محدودیت تعداد صفحات، تنها یکی از این شکل‌ها به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۴ و راهنمای تفسیر کلی در شکل ۳ آمده است).



شکل (۳): راهنمای تفسیر اشکال مقایسه زمانی توزیع جهت‌دار ساخت‌وسازهای جدید با گلبارهای گرد و غباری

Figure(3): Schematic guide for interpreting the temporal comparison between the directional distribution of newly developed built-up areas and dust wind rose patterns



شکل (۴): مقایسه زمانی توزیع جهت‌دار ساخت‌وسازهای جدید در بافر ۵ هزار متری اطراف ایستگاه سینوپتیک انار (ردیف بالا) و گلبارهای گرد و غباری (ردیف پایین) در همان ایستگاه (سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰-۲۰۱۵-۲۰۲۰)

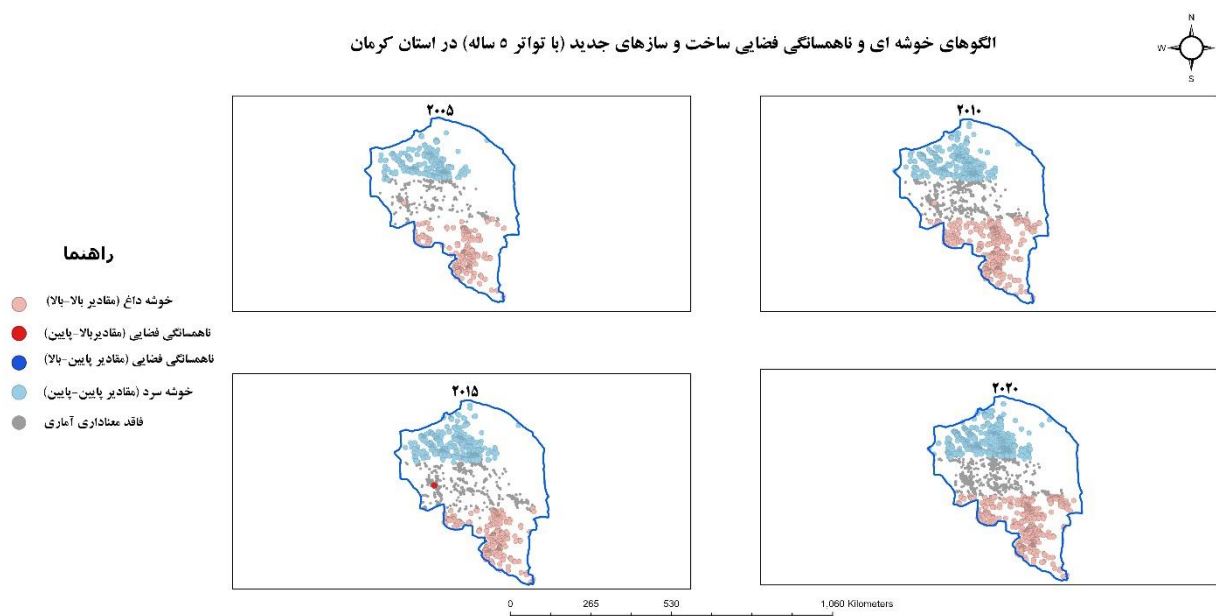
Figure(4): Temporal comparison of the directional distribution of new construction within a 5 km buffer around the Anar synoptic station (top row) and the corresponding dust wind roses at the same station (bottom row) for 2005, 2010, 2015, and 2020.

برای بررسی دقیق‌تر اختلاف زاویه جهت باد حامل گرد و غبار در کدهای ۰۶ و ۰۷ با جهت سطوح ساخت و ساز جدید در درون هر بافر، اختلاف زاویه بین دو جهت  $\alpha$  و  $\beta$  به صورت دورانی با رابطه ۱ محاسبه شد؛

$$d(\alpha, \beta) = \min(|\alpha - \beta|, 360^\circ - |\alpha - \beta|) \quad (1)$$

بنابراین  $d \in [0^\circ, 180^\circ]$ . مقادیر  $d$  سپس به سه گروه: هم‌راستا ( $d \leq 45^\circ$ )، تقریباً عمود ( $45^\circ < d \leq 135^\circ$ ) و مخالف ( $d > 135^\circ$ ). تقسیم شدند.

آزمون آماری موران<sup>۱</sup> (شکل ۵) و آزمون تحلیل نقاط گرم<sup>۲</sup> (شکل ۶) برای سطوح ساخت و ساز جدید انجام شد.



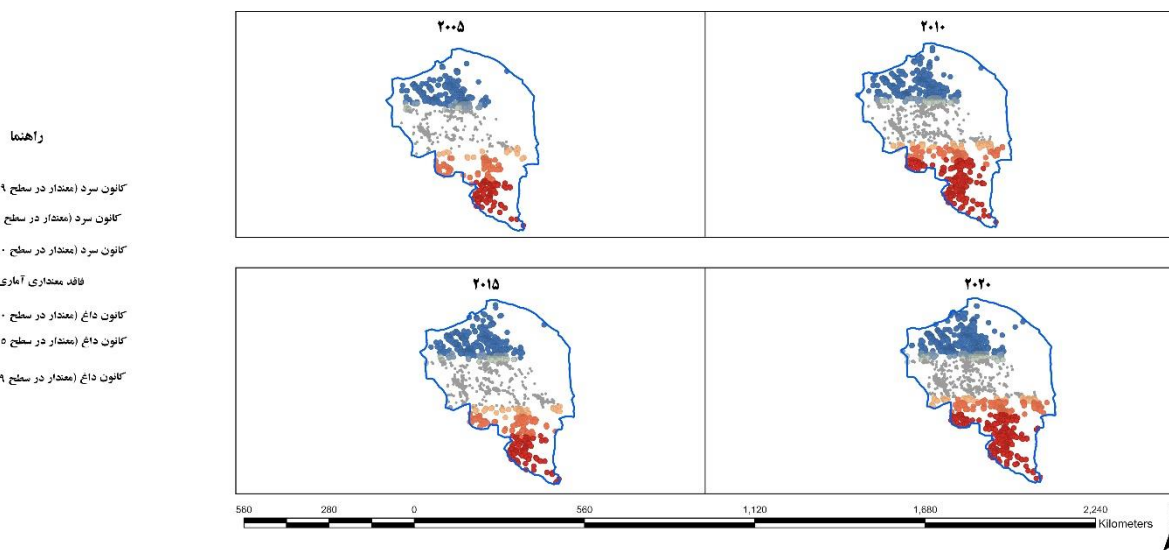
شکل(۵): توزیع فضایی نتایج آزمون تحلیل خوشه و ناخوشه (Anselin Local Moran's I) برای سطوح ساخت‌وساز جدید (سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰-۲۰۱۵-۲۰۲۰)

Figure(5): Spatial distribution of the results of the Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I) for new construction areas (2005, 2010, 2015, and 2020)

<sup>1</sup> Moran's I Cluster and Outlier Analysis(Anselin Local)

<sup>2</sup> Getis-Ord Hot Spots Analysis

کانون های تمرکز فضایی ساخت و ساز جدید (با تواتر ۵ ساله) در استان کرمان



شکل (۶): توزیع فضایی نتایج آزمون تحلیل نقاط گرم (Getis-Ord Hot Spots Analysis) برای سطوح ساخت و ساز جدید (سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰-۲۰۱۵-۲۰۲۰)  
 Figure (6): Spatial distribution of the results of the Getis-Ord Hot Spot Analysis for new construction areas (2005, 2010, 2015, 2020)

آشفستگی سطح در مناطق کم تراکم؛ این متغیر، تعداد پیکسل های ساخت و ساز جدید را در خوشه های فضایی "سرد" شناسایی شده توسط تحلیل LISA<sup>۲</sup> اندازه گیری می کند (Anselin, 1995) خوشه های LL نشان دهنده مناطقی با مقادیر پایین متغیر مورد بررسی (در اینجا، تراکم ساخت و ساز) هستند که توسط مقادیر پایین مشابه احاطه شده اند. این متغیر برای سنجش اثر آشفستگی سطحی ناشی از ساخت و ساز در مناطقی با ریسک فضایی پایین تر و پتانسیل بالای برافراشتگی گرد و غبار محلی استفاده شد (Shi & Zhang, ۲۰۰۳).

شدت ساخت و ساز در مناطق پر تراکم؛ این متغیر، تعداد پیکسل های ساخت و ساز جدید را در خوشه های فضایی "گرم"<sup>۳</sup> شناسایی شده توسط تحلیل LISA اندازه گیری می کند. خوشه های HH نشان دهنده مناطقی با مقادیر بالای متغیر مورد بررسی هستند که توسط مقادیر بالا مشابه احاطه شده اند. این متغیر برای بررسی تأثیر تراکم بالای ساخت و ساز بر رویدادهای گرد و غبار به کار رفت.

متغیر کنترلی ساخت و ساز غیرمعنادار؛ این متغیر به عنوان یک متغیر کنترلی برای ساخت و سازهایی که در خوشه های HH یا LL قرار نمی گیرند، استفاده شد. (جدول ۱، این جدول مبنای محاسبات در نرم افزار ArcGIS Pro و روش استخراج متغیرهای فضایی را مشخص می کند).

این متغیرها امکان کنترل دقیق تر اثرات را فراهم می کنند و دقت مدل را بهبود می بخشند، که به یافته های معتبر کمک می کند. فرم کلی مدل رگرسیون دوجمله ای منفی با اثرات ثابت به صورت زیر است: لگاریتم طبیعی نرخ مورد انتظار رویداد برابر است با اثر ثابت هر ایستگاه به اضافه مجموع حاصل ضرب ضرایب رگرسیون در متغیرهای مستقل.

در این مدل، نرخ مورد انتظار رویداد گرد و غبار برای ایستگاه I در زمان T تعریف می شود؛ اثر ثابت (FE) برای هر ایستگاه I که ناهمگونی های مشاهده نشده و ثابت در طول زمان را برای هر ایستگاه در بر می گیرد؛ متغیرهای مستقل (مانند انسداد مورفولوژیک، کمیت کل ساخت و ساز، آشفستگی سطح در مناطق کم تراکم) برای ایستگاه I در زمان T و ضرایب رگرسیون که تأثیر هر متغیر مستقل را بر لگاریتم نرخ مورد انتظار رویداد گرد و غبار نشان می دهند.

<sup>۱</sup>-Low-Low clusters - LL

<sup>۲</sup>-Local Indicators of Spatial Association

<sup>۳</sup>-High-High clusters - HH

ضرایب مدل به صورت نسبت نرخ رخداد ( $IRR^1$ ) گزارش می‌شوند. IRR نشان می‌دهد که به ازای یک واحد افزایش در متغیر مستقل، نرخ مورد انتظار رویداد وابسته چند برابر می‌شود. برای مثال، IRR برابر با  $1/025$  به معنای افزایش  $2/5$  درصدی نرخ رخداد وابسته به ازای هر واحد افزایش در متغیر مستقل است. این فرم مدل امکان تفسیر آسان نتایج را فراهم کرده و داده‌های شمارشی را به طور مؤثر مدیریت می‌کند، که برای تحلیل فراوانی زیست‌محیطی مناسب تشخیص داده شد.

جدول (۱): توصیف متغیرهای تحقیق و توجیه نقش

Table(1): Description of the study variables and justification of their roles.

نام متغیرهای وارد شده در نرم افزار Stata	توصیف کامل متغیر	نوع داده	منبع داده و توجیه نقش در مدل (FE)
ایستگاه	شناسه ایستگاه سینوپتیک (کد متنی)	String	WMO Station Data
سال	سال مشاهده (۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰)	Numeric	WMO / GHSL
dust_۰۷	تعداد کل رخدادهای WMO ۰۷ (برخاسته محلی)	Count/Integer	متغیر وابسته (گرد و غبار محلی): نماینده برخاستگی محلی گرد و غبار
dust_۰۶	تعداد کل رخدادهای WMO ۰۶ (انتقالی)	Count/Integer	متغیر وابسته (گرد و غبار منطقه‌ای): نماینده گرد و غبار انتقالی؛ برای اثبات تفکیک منشأ
built_total	تعداد پیکسل‌های کل ساخت و ساز جدید در بافر ۵ km	Numeric	متغیر مستقل (کمیت/تولید): سنجش کل فعالیت انسان‌ساز و Urban Roughness
count_oblique_۰۷/۰۶	Count(عمود) + Count(مخالف) برای WMO ۰۶/۰۷	Count/Numeric	متغیر مستقل (مورفولوژی نامطلوب): اثبات مکانیسم حبس آلاینده و اختلال تهویه شهری
built_hh_intensity	Count(HH) + Count(Hotspot-Z $\geq 2/3$ )	Count/Numeric	متغیر مستقل (تمرکز فضایی داغ): غلظت ریسک توسعه متمرکز و بحرانی
built_ll_control	Count(LL) + Count(Hotspot-Z $\leq -2/3$ )	Count/Numeric	متغیر مستقل (کنترل سرد/آشفتگی): سنجش اثر آشفتگی سطحی در مناطق با ریسک فضایی پایین
not_significant_built	مجموع پیکسل‌های فاقد معنی در Hot Spot و LISA	Count/Numeric	متغیر مستقل (کنترل توسعه تصادفی): Baseline توسعه فاقد الگوی معنادار

جدول (۲): فرمول‌های محاسباتی و تبدیل داده‌ها به متغیر

Table(2): Computational formulas and data transformation into variables.

متغیر محاسبه شده	فرمول محاسباتی در Excel	توجیه علمی
dust_۰۷	SUM(Count عمود ۰۷, Count مخالف ۰۷, Count هم‌راستا ۰۷)	تجمع کل: تعریف Count Data؛ مجموع تمام رخدادهای WMO ۰۷ در هر بافر/سال
count_oblique_۰۷	SUM(Count عمود ۰۷, Count مخالف ۰۷)	مدل‌سازی مکانیسم: تفکیک رخدادهای ناشی از حبس/انسداد از انتقال ساده (هم‌راستا)
built_hh_intensity	SUM(Count HH, Count Hotspot Z+2, Count Hotspot Z+3)	مدل‌سازی تمرکز ریسک: این متغیر شمارشی، شدت ساخت‌وساز را در مناطق بحرانی نشان می‌دهد
built_ll_control	SUM(Count LL, Count Hotspot Z-2, Count Hotspot Z-3)	کنترل سرد/آشفتگی: این متغیر شمارشی، فعالیت توسعه در مناطق کم‌ریسک را مدل می‌کند
built_total	built_hh_intensity + built_ll_control + not_significant_built	کمیت کل: مجموع تمامی پیکسل‌های توسعه یافته در هر بافر

در محیط نرم افزار ARCGISPRO سهم هر بافر (۵ کیلومتری اطراف ایستگاه سینوپتیک) از تعداد ساخت و سازهای جدید و نتایج آزمون‌های خوشه و ناخوشه و نقاط داغ استخراج و نتایج اختلاف زاویه جهت سطوح ساخت و ساز جدید با جهت وزش باد حامل گرد و غبار داخلی و انتقالی استخراج و برای ارزیابی تأثیر مورفولوژی و کمیت ساخت و ساز بر فراوانی رخداد گرد و غبار، متغیرهای محاسبه

<sup>1</sup>-Incidence Rate Ratio

شده (جدول 2) در قالب فایل اکسل برای کدهای ۰۶ و ۰۷ به صورت جداگانه وارد نرم افزار Stata شد؛ تحلیل های آماری مربوط به رگرسیون دوجمله ای منفی<sup>۱</sup> به تفکیک برای گرد و غبار محلی (کد ۰۷) و گرد و غبار منطقه ای (کد ۰۶) با استفاده از دستور Xtnbreg با گزینه اثرات ثابت (FE) انجام و خروجی های مدل ذخیره گردید.

**نتایج و یافته های تحقیق**

**نتایج:**

نتایج آزمون در جدول های ذیل (شماره 3-4-5-6) ارائه شده است:

جدول (۳): نتایج آزمون هاسمن (Hausman) برای کد ۰۷ و توجیه انتخاب مدل اثرات ثابت (FE) در مدل سازی داده های پنلی

**Table (3): Hausman test results for code 07 and justification for selecting the fixed-effects (FE) model in panel data analysis.**

11/19=(5)Chi2

Prob > chi2 = ۰/۰۴۷۷

تفسیر	مقدار	جنبه
آماره مثبت و معتبر	11/19	Chi2
$P < ۰/۰۵$ (در آستانه ۰/۵)	0/0477	P-value
تفاوت بین FE و RE معنادار است	FE برتر است	نتیجه
$Cov(\gamma_i, X_{it}) \neq ۰$	ویژگی های ثابت ایستگاه ها با متغیرهای مستقل همبسته اند.	توجیه علمی

آزمون Hausman تفاوت معناداری را بین مدل های Fixed Effects و Random Effects نشان داد ( $\chi^2=۱۱/۱۹$ ,  $P=۰/۰۴۸$ )، که اعتبار استفاده از مدل FE را تأیید می کند. این نتیجه نشان می دهد که ویژگی های ثابت جغرافیایی ایستگاه ها (مانند توپوگرافی، نزدیکی به منابع طبیعی گرد و غبار) با متغیرهای توضیحی همبستگی دارند و نادیده گرفتن این همبستگی منجر به سوگیری در برآوردها می شود. نتیجه آزمون (سطح معناداری کای دو برابر با 0/0477) نشان داد که مدل اثرات ثابت ترجیح داده می شود، زیرا فرضیه صفر (عدم همبستگی بین اثرات فردی و رگرورها) رد شد. این نتایج ضرورت استفاده از مدل FE را برای تخمین بدون سوگیری تأیید می کند و اعتبار پژوهش را افزایش می دهد.

جدول (۴): نتایج متغیرهای مرتبط با ساخت و ساز مربوط به گرد و غبار منطقه ای (کد ۰۶)

**Table(4): Results of construction-related variables associated with regional dust (code 06)**

تفسیر	P-value	IRR	متغیر
کمیت بی تأثیر	0/501	1/019	Built_Total
مناطق کم تراکم بی تأثیر	0/803	0/996	Built_LL_Control
تمرکز فضایی بی تأثیر	0/269	0/985	Built_HH_Intensity
توسعه تصادفی بی تأثیر	0/154	0/981	Not_Significant_Built

جدول (۵): نتایج متغیرهای مرتبط با ساخت و ساز مربوط به گرد و غبار منطقه ای (کد ۰۷)

**Table(5): Results of construction-related variables associated with regional dust (code 07)**

P-value	IRR	متغیر
0.074	0.9699306	Built_Total
0.029	1.025657	Built_LL_Control
0.480	1.007	Built_HH_Intensity
0.364	1.008	Not_Significant_Built

<sup>۱</sup>-Negative Binomial Regression

جدول(۶): نتایج متغیر Count\_Oblique (تفکیک رخدادهای ناشی از حبس/انسداد از انتقال ساده یا هم‌راستا) مربوط به کد ۰۷ و ۰۶  
 Table(6): Results for the count\_oblique variable (distinguishing events caused by trapping/blocking from simple or aligned transport) for codes 07 and 06

P-value	IRR	متغیر
0.000	1/026901	گرد و غبار محلی(کد۰۶)
0.000	1/024612	گرد و غبار محلی(کد۰۷)

### یافته‌های تحقیق

مورفولوژی نامطلوب: متغیر Count\_Oblique\_07 با قوی‌ترین معنی‌داری ( $IRR = 1/024612$ ) نشان می‌دهد که هر واحد افزایش در رخدادهای عمود/مخالف، نرخ گرد و غبار محلی را ۲.۴۶٪ افزایش می‌دهد. این یافته اثبات می‌کند که انسداد تهویه، آلودگی محلی را تشدید می‌کند. آشفته‌گی سطح: متغیر Built\_LL\_Control (خوشه سرد) به صورت معنی‌دار و مثبت است ( $IRR = 1/02057, P < 0/05$ ). این یافته نشان می‌دهد که آشفته‌گی سطح در مناطق حساس کم‌تراکم، نرخ برخاستن محلی گرد و غبار را افزایش می‌دهد.

تحلیل مدل WMO ۰۶ (گرد و غبار منطقه‌ای) مدل WMO ۰۶ نشان می‌دهد که ساخت‌وساز بر گرد و غبار انتقالی نیز اثر می‌گذارد: تأثیر مورفولوژی: Count\_Oblique\_06 به شدت معنی‌دار و مثبت است ( $IRR = 1/0281, P < 0/001$ ). این یافته نشان می‌دهد که ساختار شهری به طور سیستماتیک، ذرات انتقالی (WMO ۰۶) را نیز در مناطق رکود به دام می‌اندازد.

قوی‌ترین عامل افزایش نرخ گرد و غبار، انسداد مورفولوژیک ( $IRR = 1/0205, P < 0/001$ ) است که نشان می‌دهد ساختار شهری به دلیل جهت‌گیری نامناسب، آلودگی را حبس می‌کند. این یافته اثبات تجربی، فراتر از شبیه‌سازی‌های CFD است که اغلب بر آلاینده‌های ترافیکی تمرکز دارند (Zhou et al., ۲۰۲۲).

انسداد مورفولوژیک هر دو نوع گرد و غبار را افزایش می‌دهد، اما آشفته‌گی سطح در مناطق کم‌تراکم (LL) به طور ویژه گرد و غبار محلی (کد ۰۷) را افزایش می‌دهد، در حالی که کمیت کل ساخت و ساز (Built\_Total) به طور معنی‌داری گرد و غبار منطقه‌ای (کد ۰۶) را افزایش می‌دهد. این تفکیک دقیق، به درک عمیق‌تری از منابع و مکانیسم‌های مختلف کمک می‌کند که در مطالعات دیگر کمتر دیده می‌شود. این یافته‌ها تفاوت‌های کلیدی بین منابع محلی و منطقه‌ای را برجسته می‌کنند و بر نیاز به مداخلات هدفمند تأکید دارند، که به مدیریت زیست‌محیطی پیشرفته کمک می‌کند.

قوی‌ترین عامل افزایش نرخ گرد و غبار، انسداد مورفولوژیک است، این مورد نشان می‌دهد که ساختمان‌های عمود/مخالف به عنوان موانع آیرودینامیکی عمل کرده و باعث ایجاد تله آلاینده می‌شوند. این نتیجه‌گیری، رویکردی کیفی و طراحی‌محور را در کانون توجه قرار می‌دهد.

یافته‌های این پژوهش مبنی بر اینکه کمیت ساخت و ساز تأثیر متضادی دارد (کاهش WMO ۰۷ و افزایش WMO ۰۶)، یک بینش پیچیده و جدید ارائه می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که ساخت و ساز می‌تواند در مقیاس محلی (با تثبیت سطح) مفید بوده اما در مقیاس منطقه‌ای (با افزایش زبری شهری) مضر باشد. این تفکیک نقش‌ها، فراتر از دیدگاه‌های ساده‌انگارانه است که صرفاً ساخت و ساز را عامل آلودگی می‌دانند.

نتایج مدل Fixed Effects Negative Binomial نشان داد مورفولوژی شهری (Count\_Oblique) قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده هر دو نوع گرد و غبار است:

۱. گرد و غبار محلی (WMO 07):  $\beta=0/024$ ,  $IRR=1/025$ ,  $z=7.66$ ,  $P<0/001$

۲. گرد و غبار انتقالی (WMO 06):  $\beta=0/027$ ,  $IRR=1/027$ ,  $z=6.37$ ,  $P<0/001$

این یافته‌ها نشان می‌دهد که حبس آلاینده ناشی از ساختمان‌ها در شرایط باد عمود/مخالف، فارغ از منشأ آن، یک مکانیسم بنیادین و مشترک در تشدید پدیده گرد و غبار است.

تحلیل مقایسه‌ای دو مدل، تفاوت اساسی بین عوامل مؤثر بر گرد و غبار محلی و انتقالی را آشکار کرد: متغیرهای معنادار در WMO ۰۷ (محلی):

۱. Built\_Total:  $\beta=-0/031$ ,  $P=0/074$  (اثر تثبیت سطح)

۲. Built\_LL\_Control:  $\beta=0/025$ ,  $P=0/029$  (ریسک حاشیه شهری)

متغیرهای غیرمعنادار در WMO ۰۶ (انتقالی):

۱. همه متغیرهای مرتبط با ساخت‌وساز ( $P>0/15$ )

برخلاف گرد و غبار محلی (کد ۰۷)، هیچ‌یک از متغیرهای مرتبط با کمیت یا الگوی فضایی ساخت‌وساز تأثیر معناداری بر گرد و غبار انتقالی (کد ۰۶) نداشتند (همه  $P>0/15$ ). این تفاوت بنیادین فرضیه تفکیک منشأ را تأیید می‌کند: توسعه شهری منبع محلی است، نه عامل اصلی انتقال منطقه‌ای.

یافته پارادوکسیکال این پژوهش، اثر دوگانه ساخت‌وساز بر گرد و غبار محلی است:

۱. اثر مستقیم (تثبیت): کمیت کل ساخت‌وساز تمایل به کاهش نرخ رخداد دارد ( $IRR=0/970$ ,  $P=0/074$ ).

۲. اثر غیرمستقیم (حبس): همان ساختمان‌ها از طریق مکانیسم مورفولوژیکی موجب افزایش قابل توجه می‌شوند ( $IRR=1/025$ ,  $P<0/001$ ).

۳. اثر خالص نهایی افزایشی است، زیرا مکانیسم حبس بسیار قوی‌تر از اثر تثبیت عمل می‌کند. این پارادوکس نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای متعادل در برنامه‌ریزی شهری برای کاهش اثرات منفی است در حالی که از مزایای مثبت آن بهره‌برداری می‌شود، همچنین سیاستی را برای توسعه پایدار اطلاع‌رسانی می‌کند که می‌تواند در تدوین استراتژی‌های مؤثرتر مفید باشد.

## بحث

مطالعه درباره ساخت‌وساز جدید شهری در استان کرمان، یک رابطه علت و معلولی معناداری را بین گسترش شهری و افزایش رخدادهای گردوغبار، هم در سطح محلی و هم منطقه‌ای، آشکار ساخته است. در این پژوهش از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای ارزیابی چگونگی تأثیر عواملی مانند تراکم ساخت‌وساز، تمرکز فضایی و مانع‌شناسی ریخت‌شناسی بر رخداد گردوغبار استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که انسداد ریخت‌شناسی، که به دلیل جهت‌گیری نامناسب ساختار شهری، آلودگی را به دام می‌اندازد، قوی‌ترین عامل در افزایش نرخ گردوغبار است. این یافته نشان می‌دهد که ساختارهای شهری در استان کرمان به عنوان «تله‌های آلاینده» عمل می‌کنند که مستلزم مداخلاتی با سیاستی متمرکز بر مقررات ساختمانی آیرودینامیکی و تثبیت در مناطق حساس است.

مطالعات پیشین در ایران عمدتاً بر کمیت توسعه شهری و پیامدهای آن (مانند رشد ناپایدار، آلودگی عمومی) متمرکز بوده‌اند، پژوهش حاضر با تأکید بر مورفولوژی نامطلوب و جهت‌گیری ساختمان‌ها به عنوان عامل اصلی، نشان می‌دهد که کیفیت طراحی و چیدمان شهری، حتی بیش از صرفاً حجم ساخت و ساز، در کنترل گرد و غبار اهمیت دارد.

بسیاری از مطالعات گرد و غبار در ایران و جهان، به صورت کلی به ذرات معلق یا طوفان‌های گرد و غبار می‌پردازند (Hamidi et al., ۲۰۲۵; Hosseini & Shahbazi, ۲۰۱۶). اما این پژوهش به طور سیستماتیک و با استفاده از کدهای WMO ۰۷ (گرد و غبار محلی) و WMO ۰۶ (گرد و غبار منطقه‌ای)، تأثیرات متمایز مورفولوژی و کمیت ساخت و ساز را بر هر یک از این دو نوع گرد و غبار بررسی می‌کند.

در مطالعات موجود در ایران اغلب از روش‌های توصیفی، تحلیل فضایی ساده‌تر، یا مدل‌سازی‌های عمومی‌تر استفاده شده است (Esfandiari & Hakimzadeh, ۲۰۲۲; Madadi et al., ۲۰۲۲).

این یافته با پژوهش گسترده‌تر درباره شهرنشینی و تولید گردوغبار همسو است که بر رابطه پیچیده بین توسعه شهری و تأثیرات زیست‌محیطی تأکید دارد. این همخوانی نشان‌دهنده اهمیت ادغام عوامل مورفولوژیکی در مطالعات زیست‌محیطی است و بر نیاز به بررسی‌های بیشتر برای پیشبرد برنامه‌ریزی شهری پایدار تأکید دارد، که می‌تواند به کاهش اثرات منفی ساخت و ساز شهری کمک کند.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، شواهدی ارائه داد که ساختارهای شهری در استان کرمان به عنوان تله‌های آلاینده عمل کردند و عمدتاً از طریق پیکربندی‌های مورفولوژیکی نامطلوب، نه صرفاً حجم ساخت‌وساز، به تشدید رخدادهای گرد و غبار محلی و منطقه‌ای منجر شدند. بر اساس این یافته‌ها بر لزوم تغییر پارادایم از تمرکز بر کمیت توسعه شهری به اولویت‌دهی کیفیت طراحی آیرودینامیکی تأکید می‌شود و پیشنهاد می‌گردد سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی در این زمینه، کدهای ساختمانی را الزامی و جهت‌گیری ساختمان‌ها را نسبت به جریان‌های باد غالب بهینه‌سازی کنند همچنین تثبیت سطحی را در نواحی حاشیه‌ای کم‌چگالی حساس اجباری نمایند، تا بدین ترتیب تعامل پیچیده میان مورفولوژی توسعه و دینامیک اتمسفری در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک کاهش یابد. این رویکرد پایه‌ای برای تحقیقات آتی فراهم آورد که بر مدل‌سازی سناریوهای مختلف با ابزارهای جغرافیایی و سیالاتی تمرکز گردد و کارایی مداخلات پیشنهادی در مقیاس‌های گسترده‌تر ارزیابی شود.

### References

- Ahmadi-Molaverdi, M., Jabbari, I., & Fathnia, A. (2021). Relationship between land use changes and the production of dust sources in Kermanshah Province, Iran. *Chinese Geographical Science*, 31(6), 1057–1069. <https://doi.org/10.1007/s11769-021-1235-3>.
- Akhter, M., Ali, M. E., Rahman, M. M., Hossain, M. N., & Molla, M. M. (2021). Simulation of air pollution dispersion in Dhaka city street canyon. *AIP Advances*, 11(6). <https://doi.org/10.1063/5.0033948>.
- Al Ameri, I. D., Briant, R. M., & Engels, S. (2019). Drought severity and increased dust storm frequency in the Middle East: A case study from the Tigris-Euphrates alluvial plain, central Iraq. *Weather*, 74(12), 416–426. <https://doi.org/10.1002/wea.3445>.
- Allison, P. D. (2009). *Fixed effects regression models*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781412993869>.
- Allison, P. D., & Waterman, R. P. (2002). Fixed-effects negative binomial regression models. *Sociological Methodology*, 32(1), 247–265. <https://doi.org/10.1111/1467-9531.00117>.
- Alshubiri, F. (2025). Does information and communication technology matter for the environmental sustainability paradigm? Evidence from MENA countries. *Digital Transformation and Society*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/DTS-03-2025-0044>.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>.
- Blackburn, M. L. (2015). The relative performance of Poisson and negative binomial regression estimators. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 77(4), 605–616. <https://doi.org/10.1111/obes.12074>.
- Bucci, S., Cristofanelli, P., Decesari, S., Marinoni, A., Sandrini, S., Größ, J., Wiedensohler, A., Di Marco, C. F., Nemitz, E., & Cairo, F. (2018). Vertical distribution of aerosol optical properties in the Po Valley

- during the 2012 summer campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8), 5371–5389. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5371-2018>.
- Bullard, J. E., & Mockford, T. (2018). Seasonal and decadal variability of dust observations in the Kangerlussuaq area, west Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 50(1), S100011. <https://doi.org/10.1080/15230430.2017.1415854>.
- Colin Cameron, A., & Miller, D. L. (2015). A practitioner's guide to cluster-robust inference. *Journal of human resources*, 50(2), 317-372. <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>.
- Chan, S., Stevens, D., & Lee, R. (2000). A model for flow and dispersion around buildings and its validation using laboratory measurements.
- Chen, S., Zhang, X., Lin, J., Huang, J., Zhao, D., Yuan, T., Huang, K., Luo, Y., Jia, Z., & Zang, Z. (2019). Fugitive road dust PM<sub>2.5</sub> emissions and their potential health impacts. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 8455–8465.
- Chen, X., Su, D., Chen, X., & Chen, Y. (2022). Effect of informal care on health care utilisation for the elderly in urban and rural China: Evidence from China Health and Retirement Longitudinal Study (CHARLS). *BMC Health Services Research*, 22(1), Article 271. <https://doi.org/10.1186/s12913-022-07675-2>.
- Corbane, C., Pesaresi, M., Politis, P., Florczyk, A. J., Melchiorri, M., Freire, S., Schiavina, M., Ehrlich, D., Naumann, G., & Kemper, T. (2020). The grey-green divide: Multi-temporal analysis of greenness across 10,000 urban centres derived from the Global Human Settlement Layer (GHSL). *International Journal of Digital Earth*, 13(1), 101–118. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1530311>.
- Dolatkordestani, M., Nosrati, K., Maddah, S., & Tiefenbacher, J. P. (2022). Identification of dust sources in a dust hot-spot area in Iran using multi-spectral Sentinel-2 data and deep learning artificial intelligence machine. *Geocarto International*, 37(25), 10950–10969. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2043452>.
- Duan, Z., Zi, Y., Wang, L., & Dong, S. (2025). Research on the optimization design of natural ventilation in university dormitories based on the healthy building concept: A case study of Xuzhou region. *Buildings*, 15(19), Article 3630. <https://doi.org/10.3390/buildings15193630>.
- Esfandiari, M., & Hakimzadeh, M. A. (2022). Assessment of environmental pollution of heavy metals deposited on the leaves of trees at Yazd bus terminals. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32867–32881. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18274-9>.
- Fernandez, G. A., & Vatcheva, K. P. (2022). A comparison of statistical methods for modeling count data with an application to hospital length of stay. *BMC Medical Research Methodology*, 22(1), Article 211. <https://doi.org/10.1186/s12874-022-01683-5>.
- Godawska, J. (2024). The impact of environmental taxes on the level of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions. *Economics and Environment*, 89(2), 744. <https://doi.org/10.1186/s12874-022-01685-8>.
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*, 63, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.
- Hamidi, M., Ghobadi, T., Shao, Y., Fallah, B., Rostami, M., & Mao, R. (2025). Investigation of the role of southwestern Asia dust events on urban air pollution: A case study of Ahvaz, a highly polluted city. *Scientific Reports*, 15(1), Article 21981. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07634-x>.
- Hamzeh, N. H., Abadi, A. R. S., Alam, K., Shukurov, K. A., & Opp, C. (2024). Long-term wind and air temperature patterns in the southeastern region of Iran through model simulation and ground observations. *Atmosphere*, 15(8), Article 993. <https://doi.org/10.3390/atmos15080993>.
- Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., & Mohammadpour, K. (2021). Long-term variability of dust events in southwestern Iran and its relationship with the drought. *Atmosphere*, 12(10), Article 1350. <https://doi.org/10.3390/atmos12101350>.
- Hausman, J. A. (1978). Specification tests in econometrics. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 6(4), 1251–1271. <https://doi.org/10.2307/1913827>.

- He, Y., Jang, J., Zhu, Y., Chiang, P.-C., Xing, J., Wang, S., Zhao, B., Long, S., & Yuan, Y. (2024). Improving fugitive dust emission inventory from construction sector using UAV images recognition. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(8), Article 240112. <https://doi.org/10.4209/aaqr.240112>.
- Hilbe, J. M. (2011). *Negative binomial regression*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511973420>.
- Hosseini, V., & Shahbazi, H. (2016). Urban air pollution in Iran. *Iranian Studies*, 49(6), 1029–1046. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1241587>.
- Huang, Y.-D., Hou, R.-W., Liu, Z.-Y., Song, Y., Cui, P.-Y., & Kim, C.-N. (2019). Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1152–1171. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0344>.
- Javadian, M., Behrangi, A., & Sorooshian, A. (2019). Impact of drought on dust storms: Case study over Southwest Iran. *Environmental Research Letters*, 14(12), Article 124029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab574e>
- Kim, H., & Kriebel, D. (2009). Regression models for public health surveillance data: A simulation study. *Occupational and Environmental Medicine*, 66(11), 733–739. <https://doi.org/10.1136/oem.2008.042887>
- Krasnov, H., Katra, I., Koutrakis, P., & Friger, M. D. (2014). Contribution of dust storms to PM10 levels in an urban arid environment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(1), 89–94. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.841599>.
- Latief, R., Sattar, U., Javeed, S. A., Gull, A. A., & Pei, Y. (2022). The environmental effects of urbanization, education, and green innovation in the Union for Mediterranean Countries: Evidence from quantile regression model. *Energies*, 15(15), Article 5456. <https://doi.org/10.3390/en15155456>.
- Li, Q., Liang, J., Wang, Q., Chen, Y., Yang, H., Ling, H., Luo, Z., & Hang, J. (2022). Numerical investigations of urban pollutant dispersion and building intake fraction with various 3D building configurations and tree plantings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), Article 3524. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063524>.
- Li, T.-K., Feng, Y.-C., Bi, X.-H., Zhang, Y.-F., & Wu, J.-H. (2022). Main problems and refined solutions of urban fugitive dust pollution in China. *Huanjing Kexue*, 43(3), 1323–1331. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202107092>.
- Li, Z., Ming, T., Liu, S., Peng, C., De Richter, R., Li, W., Zhang, H., & Wen, C.-Y. (2021). Review on pollutant dispersion in urban areas—Part A: Effects of mechanical factors and urban morphology. *Building and Environment*, 190, Article 107534. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107534>.
- Liang, Q., Miao, Y., Zhang, G., & Liu, S. (2023). Simulating microscale urban airflow and pollutant distributions based on computational fluid dynamics model: A review. *Toxics*, 11(11), Article 927. <https://doi.org/10.3390/toxics11110927>.
- Madadi, R., Mohamadi, S., Rastegari, M., Karbassi, A., Rakib, M. R. J., Khandaker, M. U., Faruque, M. R. I., & Idris, A. M. (2022). Health risk assessment and source apportionment of potentially toxic metal(loid)s in windowsill dust of a rapidly growing urban settlement, Iran. *Scientific Reports*, 12(1), 19736. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21242-z>.
- Manzhilevskaya, S. (2024). Dust pollution in construction sites in point-pattern housing development. *Buildings*, 14(9), 2991. <https://doi.org/10.3390/buildings14092991>.
- Manzhilevskaya, S. (2025). Environmental assessment of dust pollution in point-pattern housing development. *Buildings*, 15(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/buildings15091466>.
- Minella, F., Rasia, F., & Krüger, E. L. (2011). Impactos microclimáticos do desenho urbano: estudos realizados em Curitiba. *Ra'e ga (UFPR)*, 21, 298–338. <https://doi.org/10.5380/raega.v21i0.17760>.
- Miri, A., Moghaddamnia, A., Pahlavanravi, A., & Panjehkeh, N. (2010). Dust storm frequency after the 1999 drought in the Sistan region, Iran. *Climate Research*, 41(1), 83–90. <https://doi.org/10.3354/cr00840>.
- Mo, Z., & Liu, C.-H. (2018). Effect of surface roughness on turbulence, ventilation and pollutant dispersion over hypothetical urban area. *International Journal of Environment and Pollution*, 64(1-3), 192–208. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2018.10020563>.

- Modarres, R. (2021). Dust storm frequency change in relation to climate drivers. *International Journal of Climatology*, 41, E187–E199. <https://doi.org/10.1002/joc.6675>.
- Muleski, G. E., Cowherd, C., Jr., & Kinsey, J. S. (2005). Particulate emissions from construction activities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(6), 772–783. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464669>.
- Nguyen, V. T., Nguyen, T. C., & Nguyen, J. (2019). Numerical simulation of turbulent flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Atmosphere*, 10(11), 683. <https://doi.org/10.3390/atmos10110683>.
- Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P. O., & Petrova-Antonova, D. (2022). Air pollution dispersion modelling in urban environment using CFD: a systematic review. *Atmosphere*, 13(10), 1640. <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>.
- Pesaresi, M., Schiavina, M., Politis, P., Freire, S., Krasnodębska, K., Uhl, J. H., Carioli, A., Corbane, C., Dijkstra, L., & Florio, P. (2024). Advances on the global human settlement layer by joint assessment of Earth observation and population survey data. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2390454. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2390454>.
- Pohjola, M. (2006). Evaluation and modelling of the spatial and temporal variability of particulate matter in urban areas [Master's thesis, University of Helsinki]. Helsinki yliopiston verkkojulkaisut.
- Ruda Sarria, F., Guerrero Delgado, M., Monge Palma, R., Palomo Amores, T., Sanchez Ramos, J., & Alvarez Domínguez, S. (2025). Modelling pollutant dispersion in urban canyons to enhance air quality and urban planning. *Applied Sciences*, 15(4), 1752. <https://doi.org/10.3390/app15041752>.
- Sarafian, R., Nissenbaum, D., Raveh-Rubin, S., Agrawal, V., & Rudich, Y. (2023). Deep multi-task learning for early warnings of dust events implemented for the Middle East. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 23. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00348-9>.
- Schiavina, M., Melchiorri, M., Corbane, C., Florczyk, A. J., Freire, S., Pesaresi, M., & Kemper, T. (2019). Multi-scale estimation of land use efficiency (SDG 11.3.1) across 25 years using global open and free data. *Sustainability*, 11(20), 5674. <https://doi.org/10.3390/su11205674>.
- Shi, H., & Zhang, L. (2003). Local analysis of tree competition and growth. *Forest Science*, 49(6), 938. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.6.938>.
- Shui, T., Cao, L., Xiao, T., & Zhang, S. (2025). Influence of building-height variability on urban ventilation and pollutant dispersion characteristics. *Atmosphere*, 16(5), 614. <https://doi.org/10.3390/atmos16050614>.
- Tahir, S. T. (2019). Modeling the effect of urbanization on climate and dust generation over desert cities [Doctoral dissertation, Arizona State University].
- Turk, U., Toger, M., Östh, J., Kourtit, K., & Nijkamp, P. (2025). Rural feet voting of leisure explorers. *International Journal of Tourism Research*, 27(1), e70003. <https://doi.org/10.1002/jtr.70003>.
- Tyree, G. L., Chappell, A., Villarreal, M. L., Dhital, S., Duniway, M. C., Edwards, B. L., Faist, A. M., Nauman, T. W., & Webb, N. P. (2024). Oil and gas development influences potential for dust emission from the Upper Colorado River Basin, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(11), 3292–3307. <https://doi.org/10.1002/esp.5887>.
- Vidanapathirana, M., Perera, N., Emmanuel, R., & Coorey, S. (2023). Can Colombo Port City high-rise tower and podium morphology improve pollutant dispersion and urban ventilation? In *Proceedings of the 11th World Construction Symposium* (pp. xx–xx). <https://doi.org/10.31705/WCS.2023.26>.
- Vidanapathirana, M., Perera, N., Emmanuel, R., & Coorey, S. (2025). High-rise building density optimization for air quality improvement and investment potential. *Built Environment Project and Asset Management*, 15(3), 467–482. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-12-2023-0231>.
- Waibel, C., Bystricky, L., Kubilay, A., Evins, R., & Carmeliet, J. (2017). Validation of grasshopper-based fast fluid dynamics for air flow around buildings in early design stage. *Building Simulation 2017*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.582>.
- Wang, K., Yao, Y., & Mao, K. (2024). Seasonal variations of PM 2.5 pollution in the Chengdu–Chongqing urban agglomeration, China. *Sustainability*, 16(21), 9242. <https://doi.org/10.3390/su16219242>.

- Wen, Y.-B., Huang, Z.-R., Tang, Y.-F., Li, D.-R., Zhang, Y.-J., & Zhao, F.-Y. (2022). Air exchange rate and pollutant dispersion inside compact urban street canyons with combined wind and thermal driven natural ventilations: Effects of non-uniform building heights and unstable thermal stratifications. *Science of the Total Environment*, 851, 158053. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158053>.
- Wooldridge, J. M. (2009). *Econometrics: Panel data methods*. In *Complex systems in finance and econometrics* (pp. 215–237). Springer.
- Xue, L., Qu, A., Guo, X., & Hao, C. (2024). Research on environmental performance measurement and influencing factors of key cities in China based on super-efficiency SBM-Tobit model. *Sustainability*, 16(11), 4792. <https://doi.org/10.3390/su16114792>.
- Xue, Y.-F., Zhou, Z., Huang, Y.-H., Wang, K., Nie, T., Nie, L., & Qin, J.-P. (2017). Fugitive dust emission characteristics from building construction sites of Beijing. *Huanjing Kexue*, 38(6), 2231–2237. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201612071>.
- Yang, J., Yin, W., & Jin, Y. (2023). Analyzing public environmental concerns at the threshold to reduce urban air pollution. *Sustainability*, 15(21), 15420. <https://doi.org/10.3390/su152115420>.
- Yang, Q., Pu, L., Jiang, C., Gong, G., Tan, H., Wang, X., & He, G. (2023). Unveiling the spatial-temporal variation of urban land use efficiency of Yangtze River Economic Belt in China under carbon emission constraints. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1096087. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1096087>
- Yang, T., Zeng, J., Chen, W., Yang, L., Yao, X., & Zheng, B. (2025). Synergizing economic growth and environmental sustainability: The impact of urban land agglomeration in the Yangtze River Delta. *Land Degradation & Development*, 46(1), e70151. <https://doi.org/10.1002/ldr.70151>.
- Yuan, K., & Zhang, X. (2020). Analysis on the influence of urban living environment on healthy human capital based on health production function. 2020 Management Science Informatization and Economic Innovation Development Conference (MSIEID). <https://doi.org/10.1109/MSIEID52046.2020.00033>.
- Zhang, W. T., Wang, X. S., Liu, Z. R., Zhang, Y., Shao, M., Cheng, Q., ... & Tian, W. (2009). Construction Fugitive PM10 emission and its influences on air quality in Guiyang. *Acta Sci. Nat. Univ. Pekin*, 46, 258-264. <https://xbna.pku.edu.cn/EN/Y2010/V46/I2/258>.
- Zheng, M., Jiang, S., Ai, X., & Guo, Y. (2010). Modeling toxic gas dispersion over urban area using GIS and CFD. In *Sixth International Symposium on Digital Earth: Data Processing and Applications* (pp. 625–630). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.873268>.
- Zhou, H., Gao, B., & Deng, F. (2023). Dust diffusion in large-scale urban construction combining WRF and CALPUFF model—take Xiamen as an example. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4), 288-306. DOI: <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.20044>.
- Zhou, J., Liu, J., Xiang, S., Zhang, Y., Wang, Y., Ge, W., Hu, J., Wan, Y., Wang, X., & Liu, Y. (2022). Evaluation of the street canyon level air pollution distribution pattern in a typical city block in Baoding, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10432. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610432>.