



Cities and Their Weather Feedbacks (Cloud- Precipitation) A case study of Tehran Metropolis

Ghasem Keikhosravi ¹✉^{id}, Nazanin Hosseini Nia ²^{id}

1. (Corresponding author) *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
Email: Gh_keikhosravi@sbu.ac.ir

2. *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
Email: nazaninhosseini086@gmail.com

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:
Received:
26 October 2025
Revised:
28 January 2026
Accepted:
12 March 2026
Available online:
6 April 2026

Keywords:
*Urban Physical
Expansion,
Convective
Precipitation,
Air Pollutants,
Cloud Base Height,
Snowfall.*

ABSTRACT

This research examines the process of physical development in Tehran city over the past three decades (1992-2022). For this purpose, the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) was calculated, and an analysis was conducted by applying Otsu's thresholding method to Landsat images. Precipitation characteristics, cloud base height interactions with aerosol fields, and air quality indicators were analyzed in parallel with the metropolitan expansion trend using synoptic codes and pollutant data provided by the Tehran Air Quality Control Company. The analyses were conducted with the Corrplot package in the R programming environment. Over the past three decades, Tehran has experienced a rapid upward growth trend ($R=0/97$), while natural areas of the metropolis have decreased proportionally ($R=-0/98$). The proportion of snowy days with excessive intensity has significantly declined ($R=-0/94$) corresponding to the urban expansion trend. A significant positive correlation ($R=0/75$, $P=0.007$) was found between convective precipitation and aerosol optical depth (AOD), suggesting that higher AOD levels are associated with increased intensity and frequency of convective rainfall. Furthermore, a strong negative correlation exists between air pollutants and cloud base height, indicating that clouds interact with the urban boundary layer, absorb polluted air, and alter droplet size distribution, resulting in a lowered cloud base.

Cite this article: Keikhosravi, G., Nazanin Hosseini Nia 2. (2026). Cities and Their Weather Feedbacks (Cloud-Precipitation) A case study of Tehran Metropolis. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (1), 39-63.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.396560.1007889>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Tehran is widely recognized as one of the most polluted metropolitan areas globally. The severity of this condition stems from multiple interrelated factors, including the city's complex topography, its dense population, incomplete combustion processes associated with vehicular emissions, the unregulated proliferation of high-rise buildings lacking adherence to scientific standards, and the inefficient reliance on fossil fuels for residential heating and cooling. Collectively, these drivers—exacerbated by the unprecedented pace of urban expansion over the past five decades—have exerted profound influences on local meteorological dynamics. Against this backdrop, the present study endeavors to analyze the city's climatic feedback mechanisms and their implications for cloud development and precipitation regimes, with particular emphasis on convective rainfall during the warm season, based on a comprehensive 30-year statistical record.

Methodology

The time series dataset employed in this study comprises hourly and daily observations from meteorological stations, daily records from air quality monitoring stations, Landsat 7 ETM and Landsat 8 OLI/TIR imagery, and aerosol optical depth (AOD) products derived from the MODIS sensor, covering the period 1993–2022. Meteorological variables include current weather codes (WW) associated with convective precipitation (Synop codes 80–90), storm events (codes 91–99), and showers or thunderstorms occurring outside the station (codes 17, 19, 25, 27, and 29, classified within the convective precipitation group), as well as snowfall (codes 70–79), precipitation amounts (R, mm), and the height of the lowest cloud layer (HL1). These data were obtained from the National Meteorological Organization.

Daily mean concentrations of key atmospheric pollutants—carbon monoxide (CO, mg/m³), nitrogen dioxide (NO₂, µg/m³), sulfur dioxide (SO₂, µg/m³), ozone (O₃, µg/m³), particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}, µg/m³)—and the air quality index (AQI) were retrieved from Tehran's air quality monitoring network. MODIS optical

depth data (MOD04_L2) with a spatial resolution of 1 km were extracted using the Google Earth Engine (GEE) platform for the same statistical period. To assess the physical expansion of Tehran over the past three decades, Landsat 7 imagery from 2002 (representing the first decade), Landsat 8 imagery from 2013 (second decade), and Landsat 8 imagery from 2022 (third decade) were acquired from the USGS Earth Explorer portal. Following radiometric and geometric corrections, the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) was calculated, and built-up areas were delineated from natural land cover using Otsu thresholding. Statistical analyses were conducted in R software (version 1.4.4). Normality testing and descriptive statistics were performed using functions from the MVN package. The relationships between meteorological parameters and pollutant concentrations were examined through correlation analyses selected according to data distribution (normal vs. non-normal). Visualization of correlation matrices, including coefficients and their statistical significance at the 99.9% and 99% confidence levels, was carried out using the `corrplot` package.

Results and discussion

Over the past three decades, Tehran has exhibited a pronounced urban growth trajectory ($R = 0/97$), accompanied by a substantial reduction in natural land cover within the metropolitan region ($R = -0/98$). The frequency of snow days with excessive intensity has markedly declined ($R = -0/94$) which is consistent with this expansion. This reduction is attributable to elevated atmospheric pollutant concentrations, increased greenhouse gas emissions, and the intensification of the urban heat island effect, which collectively favor rainfall over snowfall by altering the precipitation phase. A statistically significant positive correlation ($R = 0/75$, $p = 0/007$) was identified between convective precipitation and aerosol optical depth (AOD), indicating that both the amount and intensity of convective precipitation increase with higher aerosol loading. Conversely, a significant negative correlation was observed between air pollutants (PM_{2.5}, PM₁₀, AQI) and the height of the lowest

cloud layer. These findings suggest that clouds interact dynamically with the urban boundary layer, entraining polluted air masses and modifying droplet size distributions, thereby lowering cloud base height relative to the surface. Machine learning model outputs further highlight PM₁₀ concentrations and the AQI index as the most influential predictor variables governing variations in cloud base height across Tehran.

Conclusion

Investigating the influence of urbanization on precipitation phases and patterns is essential for long-term water resource management, the preservation of ecosystem services, and the assessment of infrastructure risks under climate change. Urbanization alters local climatic conditions primarily through modifications in land–atmosphere feedbacks. Solid precipitation in urban areas is consistently lower than in non-urban regions, a reduction driven by changes in the urban surface energy balance. Elevated greenhouse gas emissions and the intensification of the urban heat island effect shift precipitation phases toward rainfall rather than snowfall, thereby reducing the frequency of snow events. As urban expansion and construction accelerate, rising temperatures further contribute to the decline in snowy days.

In Tehran, convective precipitation has increased in association with higher aerosol optical depth (AOD). This enhancement can be attributed to the combined effects of the urban heat island, the aerodynamic roughness of extensive urban surfaces, and elevated concentrations of atmospheric aerosols. Collectively, these factors amplify both the occurrence and intensity of convective precipitation as urbanization progresses.

Analysis of pollutant–cloud interactions reveals a significant coupling between atmospheric clouds and the urban boundary layer. Polluted urban air is entrained into cloud systems, altering droplet size distributions and leading to a reduction in cloud base height relative to the ground surface. This finding underscores the role of air quality in shaping cloud microphysics and precipitation dynamics within heavily urbanized environments.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Ghasem Keykhosravi: Data collection, performing the required processing and analyses, writing the initial draft of the article, reviewing the article.

Zeinab Hosseininya: Data collection, writing and reviewing the article..

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors thank and appreciate all who assisted us in conducting this research, especially the Meteorological Organization and the Tehran Air Quality Control Company for providing meteorological and pollutant data, as well as those who conducted the article's evaluation process.

شهرها و بازخوردهای آب‌وهوایی آن (ابر-بارش)

مطالعه موردی: کلان شهر تهران

قاسم کیخسروی^۱ ، نازنین حسینی نیا^۲ 

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: Gh_keikhosravi@sbu.ac.ir
۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: nazaninhosseini086@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این مطالعه توسعه فیزیکی شهر تهران در سه دهه گذشته (۲۰۲۲-۱۹۹۲)، با کمک شاخص توسعه فیزیکی شهری (NDBI) و آستانه گذاری اوتسو بر روی تصاویر لندست اعمال گردید. متناسب با روند توسعه فیزیکی، ویژگی‌های بارش‌ها، ارتفاع پایه ابر در تقابل با میدان آئروسول‌ها و کیفیت هوا با استفاده از کدهای سینوپ و داده‌های آلاینده شرکت کنترل کیفیت هوای تهران با به کارگیری بسته Corrplot در محیط برنامه‌نویسی R محاسبه گردید. در طی سه دهه گذشته تهران از روند رو به رشد سریعی ($R=0/97$) برخوردار بوده است و به همان نسبت مناطق طبیعی سطح کلان‌شهر ($R=-0/98$) در حال کاهش می‌باشند. متناسب با روند گسترش شهری، نسبت روزهای برفی با شدت بیش از اندازه‌ای ($R=-0/94$) کاهش یافته است. در اتمسفر شهر تهران بین مقادیر بارش همرفتی رگباری رخ داده و عمق اپتیکی آئروسول‌ها، همبستگی مثبت ($R=0/75$) با مقدار آماری معنی‌داری ($P_value = 0/007$) مشاهده می‌شود. همچنین بین آلاینده‌های هوا و ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر همبستگی منفی معنادار قابل توجهی وجود دارد، نتایج همبستگی نشان می‌دهد که ابرها با لایه‌مرزی شهری جفت شده و هوای آلوده شهری را در خود جذب و اندازه توزیع قطرات را تغییر می‌دهند که این امر منجر به کاهش ارتفاع پایه ابر نسبت به سطح زمین می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷	
واژگان کلیدی: توسعه فیزیکی شهر، بارش‌های همرفتی، آلاینده‌های جوی، ارتفاع پایه ابر، برف.	

استناد: کیخسروی، قاسم و حسینی نیا، نازنین. (۱۴۰۵). شهرها و بازخوردهای آب‌وهوایی آن (ابر-بارش) مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۸ (۱)، ۶۵-۷۹.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.396560.1007889>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نویسندگان



مقدمه

شهرها به‌عنوان یک سیستم باز و جامع از عناصر زنده که با محیط فیزیکی خود در تعامل‌اند در نظر گرفته می‌شوند. یک سیستم باز که انرژی و جرم به آن وارد و از آن خارج می‌شود. شهرها بدون حمایت از خارج از مرزهای سیستم، قادر به ادامه حیات نیستند، متابولیسم شهری جریان، تبدیل مواد و انرژی در یک شهر را توصیف می‌کند (Oke et al, 2017). تغییر کاربری، پوشش سطح زمین از پیامدهای ملموس توسعه شهری و اثرگذار بر سیستم اقلیمی است. منظر شهری معمولاً با تغییر ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح زمین مانند آلدوی سطح، گسیل مندی، زبری، شاخص سطح برگ، مقاومت روزنه‌ای^۱ و عمق ریشه، به‌طور مستقیم تبادل انرژی، رطوبت و تکانه بین سطح زمین و جوی را که روی آن قرار دارد تعیین می‌شود و به‌این ترتیب تأثیر قوی بر دما، گردش هوا و بارش اعمال می‌کند (Cao et al, 2020). اکثر پدیده‌های اقلیم شهری، در مقیاس خرد، مقیاس محلی و میان‌مقیاس قرار دارند. ویژگی‌های اقلیمی در محیط پراکنده مانند جو مجزا نمی‌توانند باقی بمانند. آن‌ها بخشی از یک زنجیره هستند. هر یک از ویژگی‌های اقلیمی به علت تلاطم‌های جوی با همدیگر ترکیب می‌شوند تا ویژگی‌های بزرگ‌تری را در کل مقیاس لایه‌مرزی شهری تشکیل دهند. تأثیرات شهری در دوره‌هایی از آب هوایی، به‌ویژه فصل گرم که گرمایش سطح زمین باعث صعود و فرایند همرفت غالب است، بیشتر است. در عرض‌های میانی، بارش جبهه‌ای همراه با طوفان‌های با مقیاس سینوپتیک (با پهنا ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلومتر) به‌ویژه در فصل سرد رایج است. شواهد نشان می‌دهد که شهرها باید مکان‌هایی برای توسعه ابر و بارش باشند، چرا که اتمسفر شهرها سرشار از آلاینده‌های هوا از جمله ذرات معلق در هوا هستند که با ایجاد هسته‌های تراکم به تشکیل ابر کمک می‌کنند و از طرفی لایه‌مرزی شهری به دلیل اثرات ناهم‌واری شهری و جزیره گرمای شهری بر تبدلات انرژی با ایجاد همگرایی و صعود تأثیر می‌گذارد. ابرهایی که در بالای پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های فولاد و چوب، نیروگاه‌ها و برج‌های خنک‌کننده ایجاد می‌شوند، نمونه متمرکزی از انتشار گرما، رطوبت و آئروسول‌ها هستند (Oke et al, 2017). تحقیقاتی که در راستای موضوع تحقیق صورت گرفته است می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. هوانگ و همکاران در مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر شهرنشینی بر بارش شدید ساعتی در چین با بررسی بارش‌های ماه‌های آوریل تا اکتبر از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۲، به این نتیجه می‌رسند که شهرنشینی در جنوب چین بارندگی شدیدتری را به مناطق شهری نسبت به حومه می‌آورد و از شدت بارش می‌کاهد (Huang et al, 2022). در مطالعه‌ای که توسط استینسن و همکاران انجام گرفت شهرنشینی و گرم شدن کره زمین دو مورد از تأثیرات مهم انسان بر محیط‌زیست شناخته شدند. اثر جزیره گرمای شهری می‌تواند الگوهای بارش را تغییر دهد. گرم شدن کره زمین نیز منجر به تغییر در میزان بارش و به‌ویژه افزایش در شدت و فراوانی بارش‌های شدید می‌شود (Steensen et al, 2022). در تحقیقی که توسط هو و همکاران (۲۰۲۱) تحت عنوان تنوع بارش و پاسخ آن به شهرنشینی در تایپو حوضه دریاچه، چین انجام شد دریافتند که الگوی بارش در حوضه دریاچه تایپو در شرق چین در دهه‌های گذشته به‌طور قابل‌توجهی تغییر کرده است که شاید علت آن شهرنشینی فشرده باشد. در این تحقیق با توجه به روند شهرنشینی تغییرپذیری بارش در پهنه‌های مختلف شهری و مقیاس‌های مشخص بررسی شده است و تأثیر توسعه شهری بر میزان بارندگی در حوضه به سه ناحیه (منطقه شهری قدیمی، منطقه شهری جدید و حومه) با در نظر گرفتن درجات مختلف شهرنشینی تقسیم‌بندی شده است. نتایج نشان داد که شهرنشینی اثر افزایشی قابل‌توجهی بر بارندگی در مقیاس‌های سالانه، فصل تابستان، پاییز و زمستان داشته و کاهش بارش در فصل بهار را به نمایش می‌گذارد (Hu et al, 2021). در تحقیقی که توسط ساویچ و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت مشخص شد که بارندگی‌های شدیدی که در اروپای مرکزی در فصل

1. Stomatal Resistance.

بهار و تابستان اتفاق می‌افتد باعث ایجاد سیلاب‌های شدید در شهرها می‌شود که دلیل آن درصد بالای سطوح غیرقابل نفوذ و سیستم‌های زهکشی محدود است. این خطر شهرهای اروپای مرکزی و عملکرد آن‌ها و همین‌طور زیرساخت‌ها، املاک خصوصی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Savic et al,2020). لی و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان رابطه جزیره حرارتی شهری سطحی با دمای هوا و بارش در شهرهای بزرگ جهان، اذعان کردند که در زمینه تغییرات اقلیم، یک تحقیق سیستماتیک از رابطه بین جزیره گرمایی شهری و عوامل اقلیمی مورد نیاز است. در این مطالعه روابط بین شدت جزیره گرمایی شهری و اقلیم موردبررسی قرار گرفت و عوامل اقلیمی در ۱۴۵ شهر بزرگ جهانی برای دوره ۲۰۰۳-۲۰۱۳ موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین جزیره گرمایی شهری و دمای هوا در فضا ناپایدار است و همبستگی در شرایط کلان آب‌وهوایی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت می‌باشد. در شهرهایی با تفاوت‌های پوشش گیاهی شهری و روستایی بیشتر، دمای بالاتر میزان جزیره حرارتی را افزایش می‌دهد. روابط بین جزیره حرارتی و بارش با همبستگی مثبت در طول دوره نسبتاً پایدار بود به این صورت که همبستگی مثبت در روز و همبستگی منفی در شب اتفاق افتاده است (Li et al,2020). گو و لی در بررسی حساسیت جزایر گرمایی شهری به بارش، اثرات ویژگی‌های سطح شهری بر جزایر گرمایی شهری را به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که در سراسر قاره ایالات‌متحده در مقیاس آب‌وهوایی، شدت جزیره گرمایی شهری با مقدار بارش در تابستان ارتباط مثبت دارد، اما در زمستان این‌طور نیست و حساسیت شدت جزیره گرمایی شهری به بارش از نظر مکانی و فصلی متفاوت است. در تابستان، شدت جزیره گرمایی شهری در اواسط اوت به‌ویژه نسبت به تغییرات بارش حساسیت نشان می‌دهد و به‌طور کلی با مقدار بارندگی همبستگی منفی دارد. این مطالعه شرایط آب‌وهوایی را به‌عنوان عوامل مهم کنترل‌کننده شهری برجسته می‌کند. در نتیجه تغییر اقلیم پیامدهای قابل‌توجهی بر روی شدت جزیره گرمایی شهری دارد حتی اگر ویژگی‌های سطح شهری یکسان باقی بماند. (Gu and Li,2018) سونگ و همکاران (۲۰۱۶) برای ارزیابی تأثیر عدم ناهم‌واری و یکنواختی شهری بر بارش، مساحت یک شهر را به سه دسته (تجاری، مسکونی با تراکم بالا و مسکونی با تراکم کم) تقسیم‌بندی کردند و با توجه به داده‌های تراکم ساختمان از ماهواره‌های لندست شبیه‌سازی عددی سه سناریوی متناظر عدم یکنواختی شهری، یکنواختی شهری و غیرشهری در نانچینگ با استفاده از مدل WRF انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که وجود شهر منجر به بارش بیشتر می‌شود و ناهمگونی شهری این پدیده را برای مناطق غیریکنواخت شهری، مناطق یکنواخت و مناطق غیرشهری افزایش می‌دهد (Song et al,2016). وانگ و همکاران (۲۰۱۶) از مدل WRF برای شبیه‌سازی اثرات آئروسول‌های انسانی بر روی بارش تابستانی بر روی منطقه شهری پکن-تیانجین-هبی در چین استفاده کردند. با مقایسه نتایج آزمایش‌های حساسیت و بدون انتشار، مشخص شد که آئروسول‌های انسانی باعث افزایش بارش تابستانی در مناطق شهری می‌شوند (Wang et al,2016). گوگ و آهان (۲۰۱۳) در مطالعه خود تحت عنوان تأثیر شهرنشینی بر روندهای اخیر دما و بارندگی در شبه‌جزیره کره، اثرات شهرنشینی بر روند دما و بارش در شبه‌جزیره کره را با روش آماری بررسی کردند و رابطه بین این روندها و رشد جمعیت محلی نشان داد که بین افزایش دما و رشد جمعیت محلی همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد که نشان می‌دهد شهرنشینی سهم قابل‌توجهی در افزایش دما در اقلیم شهرها دارد (Kug & Ahn,2013). کلان‌شهر تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان بشمار می‌رود. این شرایط حاصل عوامل و عناصر متعددی می‌باشد. از جمله توپوگرافی محل استقرار شهر تهران، جمعیت زیاد، احتراق ناقص ناشی از خودروها، چشم‌انداز نامتقارن از بلندمرتبه‌سازی‌های بدون ضابطه علمی و مصرف نامتعارف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش و سرمایش مسکن. مجموعه عوامل یادشده همراه با گسترش شهرنشینی بی‌سابقه در طی نیم سده گذشته، مسلماً، بر رفتار عناصر هواشناسی نیز تأثیرگذار است، لذا در این تحقیق سعی می‌شود در یک دوره آماری ۳۰ ساله، به اهداف اصلی این تحقیق به شرح ذیل دست‌یابیم.

- بررسی روند توسعه فیزیکی کلان‌شهر تهران در سه دهه گذشته
- تفکیک بارش‌های همرفتی از غیر همرفتی متناسب با روند توسعه فیزیکی
- بررسی نزولات جوی برف و بارش‌های شدید همرفتی در سه دهه گذشته
- بررسی کیفیت هوا و اثرات آن بر ویژگی‌های ابرها و بارش‌های همرفتی

روش پژوهش

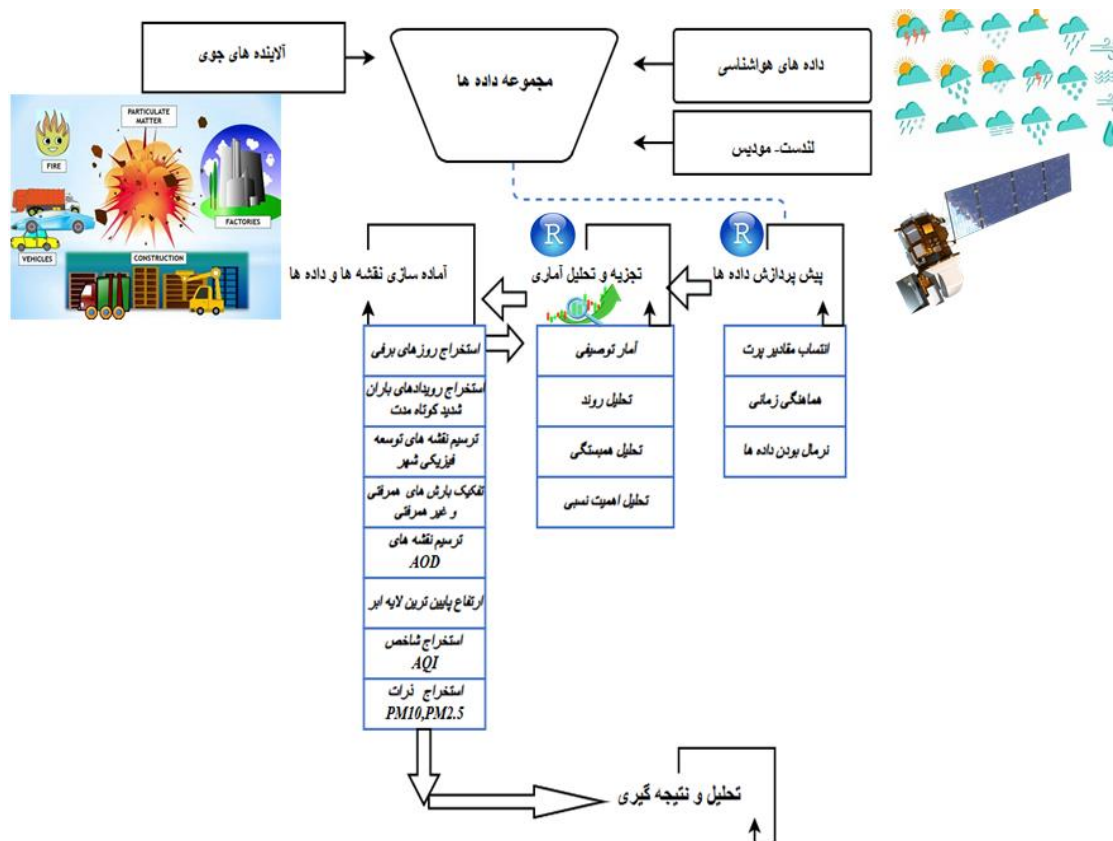
داده‌های سری زمانی مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های ساعتی و روزانه ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های روزانه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا، تصاویر سنجنده ETM و OLI/TIR لندست ۷ و ۸ و محصول عمق اپتیکی آئروسول‌ها^۱ سنجنده مودیس در بازه زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ است. داده‌های هواشناسی کدهای هوای حاضر (WW) مرتبط با بارش‌های همرفتی (کدهای سینوپ ۸۰ تا ۹۰ برای بارش‌های همرفتی رگباری، برای طوفان‌ها، کدهای ۹۱ تا ۹۹ و همچنین کدهایی که رگبار و رعدوبرق در خارج ایستگاه اتفاق می‌افتد شامل کدهای ۱۷-۱۹-۲۵-۲۷ و ۲۹ است که در گروه بارش‌های همرفتی قرار می‌گیرند)، بارش برف (کدهای سینوپ ۷۰ تا ۷۹)، باران (mm, R)، ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر (HL1) از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. به همین ترتیب، داده‌های مربوط به میانگین روزانه غلظت آلاینده‌های جوی معیار، یعنی کربن منوکسید (CO, mg/m³), نیتروژن دی‌اکسید (NO₂, μg/m³), گوگرد دی‌اکسید (SO₂, μg/m³), ازن (O₃, μg/m³) و ذرات معلق (PM₁₀ و PM_{2.5}, μg/m³) و شاخص کیفیت هوا^۲ از ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای تهران اخذ گردید. داده‌های عمق اپتیکی هواویزها (MOD04_L2) سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در سامانه گوگل ارث انجین^۳ برای دوره آماری مورد مطالعه استخراج گردید و در نهایت جهت بررسی توسعه فیزیکی شهر تهران در سه دهه گذشته تصویر لندست ۷ مربوط به سال ۲۰۰۲ (نماینده دهه اول)، تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۳ (نماینده دهه دوم) و تصویر لندست ۸ سال ۲۰۲۲ (نماینده دهه سوم) از سایت (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دریافت و شاخص توسعه فیزیکی شهری^۴ محاسبه گردید. این شاخص با استفاده از تفاوت بازتاب باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز کوتاه موج (SWIR) محاسبه می‌شود.

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (1)$$

جهت جداسازی مناطق ساخته شده از غیر ساخته شده می‌توان از آستانه گذاری استفاده کرد. به کمک آستانه گذاری می‌توان تصویر باینری را استخراج نمود و از آن برای تشخیص لبه و مرز اشیا استفاده نمود. روش اوتسو برای تمایز بین پس‌زمینه و پیش‌زمینه در یک تصویر با ایجاد دو کلاس با حداقل واریانس درون کلاسی طراحی شده است (Otsu, 1979). این روش از معیار حداکثر واریانس بین کلاسی برای آستانه بهینه برای قطعه‌بندی تصویر استفاده می‌کند (Le et al, 2014; Du et al, 2013). لذا در این تحقیق برای آستانه گذاری تصاویر لندست ۷ و لندست ۸ به ترتیب از آستانه (۰.۱۳۴) و (-۰.۰۹۷) استفاده گردید (Ronald et al, 2015). نرم‌افزار R نسخه ۴.۴.۱ برای انجام تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بررسی نرمال بودن توزیع متغیرها و محاسبه آمار توصیفی داده‌ها توسط توابع ارائه شده در بسته MVN^۵ انجام شد (Korkmaz et al, 2014). برای بررسی نرمال بودن توزیع متغیرهای مورد مطالعه از آزمون

1. Aerosol Optical Depth
 2. Air quality index.
 3. Google Earth Engine.
 4. Normalized Difference Built-up Index.
 5. Multivariate Normality.

کولموگروف- اسمیرنوف (از توابع موجود در بسته nortest) استفاده گردید (کههراری و همکاران، ۲۰۲۴). بر اساس این آزمون اگر مقدار P-value یا معناداری آماری بزرگ‌تر از ۰.۰۵ باشد، توزیع داده‌ها نرمال و در غیر این صورت داده‌ها نرمال نیستند (Mishra et al, 2019). ارتباط میان پارامترهای هواشناسی، غلظت آلاینده‌های هوا با انتخاب روش تحلیل همبستگی مناسب بر اساس توزیع داده‌ها (نرمال و غیر نرمال) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بصری سازی نتایج حاصل از ماتریس همبستگی شامل ضرایب همبستگی و معناداری آماری ضرایب در سطح اطمینان ۹۹/۹٪ و ۹۹٪ با به‌کارگیری بسته corrplot فراهم گردید (Wei & Simko, 2021). بسته corrplot یک ابزار اکتشافی بصری بر روی ماتریس همبستگی را ارائه می‌کند که از ترتیب مجدد خودکار متغیرها برای کمک به شناسایی الگوهای پنهان در بین متغیرها پشتیبانی می‌کند. یکی از مهم‌ترین اهداف تحقیقات علمی مدل‌سازی روابط بین متغیرها می‌باشد. جهت بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از مؤلفه‌های پیشگو (AQI, PM₁₀, PM_{2.5}) بر متغیر پاسخ (ارتفاع پایه ابر) از روش‌های رگرسیون چندگانه (MLR) و روش وزن دهی نسبی (RW)^۲ استفاده گردید. روش‌های یادشده، مبتنی بر روش یادگیری ماشین می‌باشند که جهت مطالعه آماری، روابط بین دو یا چند متغیر مستقل و یک متغیر وابسته را بررسی می‌کنند. شکل (۱) روند تصویری پژوهش را در سطح کلان‌شهر تهران نشان می‌دهد.

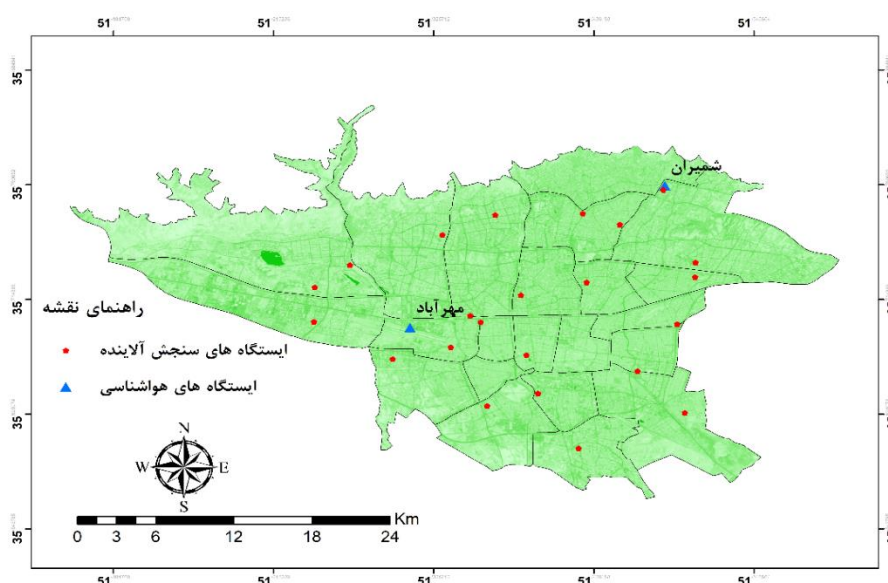


شکل ۱. فلوچارت مراحل تحلیل و نتیجه‌گیری

1. Multiple linear regression
2. Relative weight

محدوده مورد مطالعه

شهر تهران، پایتخت ایران، مرکز استان تهران، بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر کشور است. تهران حائز رتبه بالایی در میان شهرهای با رشد سریع جهان است و این رشد انفجاری پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشت عمومی مانند آلودگی هوا را به دنبال داشته است. کلان‌شهر تهران به دو ناحیه کوهپایه‌ای و دشتی تقسیم می‌شود و در پهنه‌ای میان کوه و کویر در دامنه‌های جنوبی البرز امتداد یافته است. ارتفاع تهران از سطح دریا بین ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر متغیر است و از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن^۱، تهران دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و نسبتاً بارانی و تابستان‌های گرم، آفتابی و خشک است (Beck et al, 2018). شکل (۲) موقعیت جغرافیایی عرصه تحقیق همراه با ایستگاه‌های هواشناسی و ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت کلان‌شهر تهران همراه با ایستگاه‌های هواشناسی و آلاینده‌های هوا

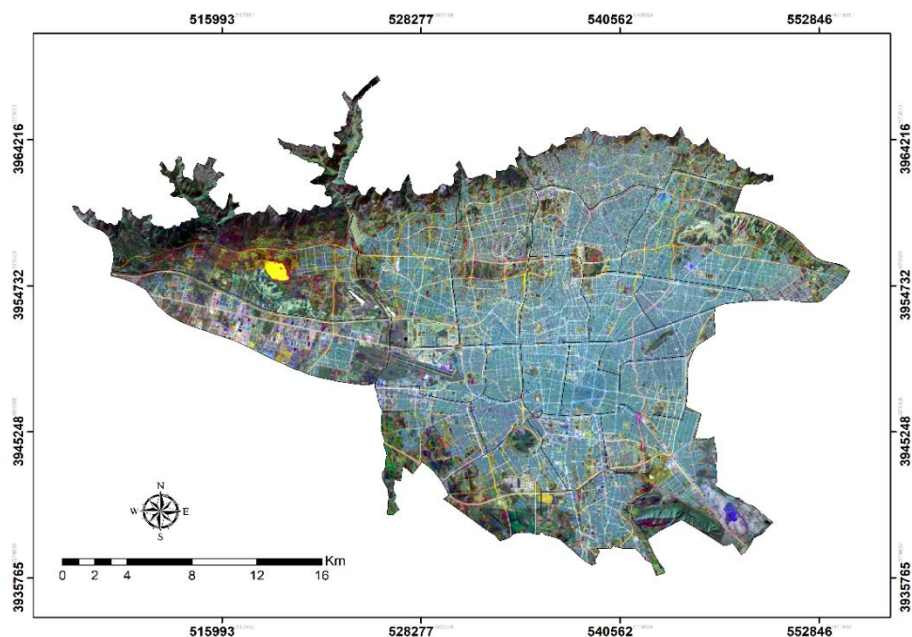
یافته‌ها

- توسعه فیزیکی کلان‌شهر تهران

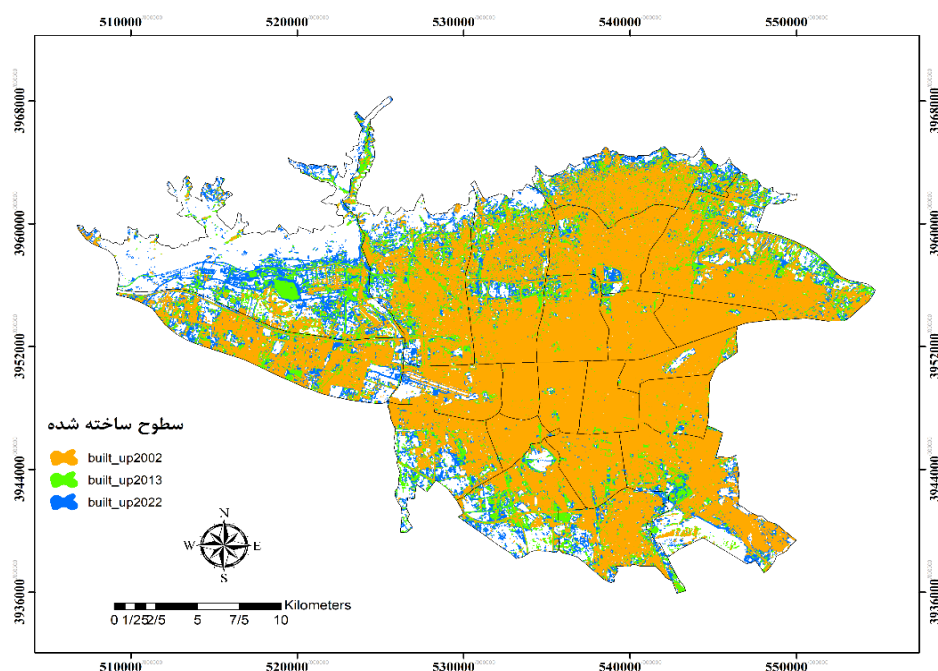
شاخص نرمال شده توسعه فیزیکی شاخص سنجش‌ازدوری است که برای شناسایی مناطق شهری و ساخته‌شده طراحی شده است. شکل (۳) ترکیب رنگی کاذب را بر اساس شاخص NDBI در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. رنگ‌های آبی و سفید روشن سطوح ساخته‌شده تا سال ۲۰۰۲، بخش‌های زرد رنگ مرتبط با سطوح ساخته‌شده تا سال ۲۰۱۳ و بخش‌های قرمز رنگ مرتبط با مناطقی است که در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ ساخته شده‌اند. بر اساس اطلاعات شکل (۴) بیشترین جهت توسعه فیزیکی مرتبط با بخش‌های شمال غربی و شمال پایتخت می‌باشد. توسعه فیزیکی شهر تهران از ضریب همبستگی مثبت ۰/۹۷، برخوردار است و به همان نسبت مناطق طبیعی سطح کلان‌شهر تهران با ضریب همبستگی منفی ۰/۹۸- در حال کاهش می‌باشد. متناسب با روند گسترش شهری، نسبت روزهای برفی با شدت بیش‌ازاندازه ای (با ضریب همبستگی ۰/۹۴-) کاهش یافته است به طوری که از ۱۳۷ روز برفی در دهه اول به ۴۲ روز در دهه سوم رسیده است. این کاهش را می‌توان متناسب با روند توسعه فیزیکی تا حد زیادی به افزایش آلاینده‌های جوی،

1. Koppen

گازهای گلخانه‌ای و شدت جزیره گرمایی شهری نسبت داد که فاز بارش را به نفع باران نسبت به برف تغییر می‌دهند. رویدادهای باران شدید کوتاه‌مدت بر اساس صدک ۹۵ ام، برای ایستگاه شمیران ۱۰ و ایستگاه مهرآباد ۷ میلی‌متر و بالاتر در نظر گرفته شد. بدین منظور در روزهای که در ایستگاه‌های نماینده بارش بر اساس مقدار آستانه و بالاتر از آن بود و از طرفی این مقدار بارش در فاصله زمانی کمتر از ۳ ساعت رخ داده بود به‌عنوان رخ دادهای بارش شدید کوتاه‌مدت در نظر گرفته شد. جدول شماره (۱) متوسط تعداد رخداد بارش‌های شدید در سطح شهر تهران نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از ۶۱ روز در دهه اول به ۶۶ روز در دهه دوم رسید است اما در دهه سوم با شیب کندی از تعداد رویدادهای بارش (۵۷ روز) کاسته شده است.



شکل ۳. ترکیبات رنگی کاذب سطوح ساخته‌شده در سه دهه گذشته (۱۹۹۲-۲۰۲۲)



شکل ۴. توسعه فیزیکی کلان‌شهر تهران در سه دهه گذشته (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

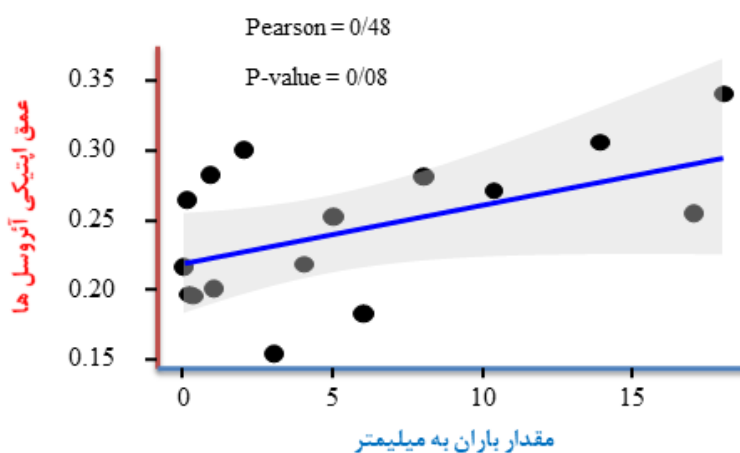
جدول ۱. وضعیت توسعه فیزیکی، تعداد روزهای برفی و رویدادهای بارش شدید سه دهه گذشته کلان‌شهر تهران

متغیر	دهه اول (۱۹۹۳-۲۰۰۲)	دهه دوم (۲۰۰۳-۲۰۱۲)	دهه سوم (۲۰۱۳-۲۰۲۲)	R ²
مناطق طبیعی بر حسب (Km ²)	۳۵۶/۴۲	۳۳۴/۹۶	۲۶۶/۷۱	-۰/۹۸
سطوح ساخته‌شده بر حسب (Km ²)	۳۴۱/۰۱	۳۷۲/۴۴	۴۳۰/۶۷	۰/۹۷
تعداد روزهای برفی	۱۳۷	۱۱۳	۴۲	-۰/۹۴
رویدادهای بارش شدید کوتاه‌مدت (روز)	۶۱	۶۶	۵۷	-۰/۳۹

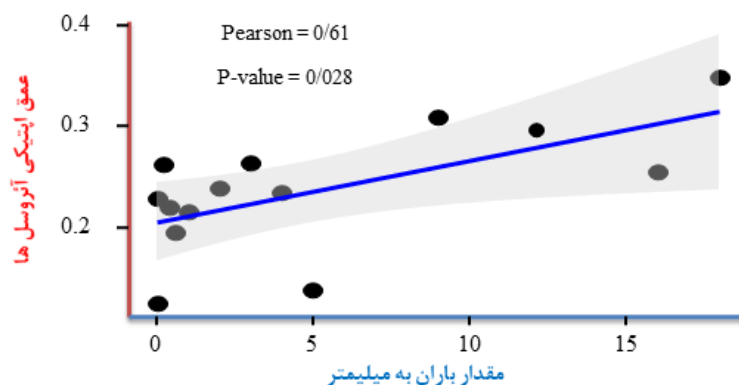
منبع: (کدهای حاضر ایستگاه‌های سازمان هواشناسی)

-اثر آئروسول‌ها بر بارش‌های همرفتی کلان‌شهر تهران

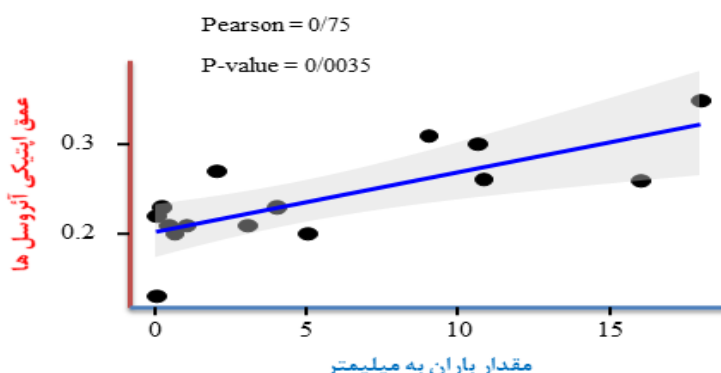
آئروسول‌ها می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر یا هسته‌های یخ و همچنین با جذب و پراکندگی تابش خورشیدی بر توسعه ابرها و بارش‌ها، مخصوصاً بارش‌های همرفتی تأثیر بگذارند. عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در واقع به توزیع آئروسول‌های گرد و غبار موجود در جو اشاره می‌کند. این کمیت وابسته به طول موج، به‌صورت کاهش نور در واحد طول بر روی یک مسیر مشخص تعریف می‌شود. بیشتر بودن مقادیر AOD نشان‌دهنده تراکم هواویزها در امتداد ستون عمودی هوا بوده و به عبارتی دید در امتداد آن ستون کم می‌باشد. شکل شماره (۵) و (۶)، همبستگی و سطح معناداری را با اساس نزدیک‌ترین پیکسل‌های همسایگی AOD با ایستگاه‌های هواشناسی مهرآباد و شمیران و شکل شماره (۷) مقدار ضریب همبستگی و سطح معناداری را بین مقدار بارش و شاخص AOD را در کل سطح شهر تهران نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۵) بین مقادیر بارش همرفتی رخ داده در ایستگاه شمیران و شاخص AOD رابطه معناداری مثبت (۰/۴۸) مشاهده می‌شود. بدین معنا که با افزایش عمق اپتیکی آئروسول‌ها بر میزان بارش‌های همرفتی نیز افزوده شده است. با این وجود با توجه به مقدار P_value آن، اما از نظر آماری معنادار نیست. اما در شکل شماره (۶) و (۷) بین مقادیر بارش همرفتی و شاخص AOD هم دارای رابطه ضریب همبستگی مثبت و هم با توجه به اینکه مقدار P_value آن‌ها از مقدار ۰.۰۵ کمتر می‌باشد، دارای رابطه آماری معناداری هستند. لذا در شهر تهران با افزایش غلظت هواویزها بر شدت میزان بارش‌های همرفتی که عموماً در فصول بهار و تابستان رخ می‌دهند، افزوده می‌شود.



شکل ۵. همبستگی و سطح معناداری بین مقادیر بارش همرفتی و عمق اپتیکی آئروسول‌ها در ایستگاه شمیران



شکل ۶. همبستگی و سطح معناداری بین مقادیر بارش همرفتی و عمق اینتیکی آتروسل‌ها در ایستگاه مهرآباد



شکل ۷. همبستگی و سطح معناداری بین مقادیر بارش همرفتی و عمق اینتیکی آتروسل‌ها در کلان‌شهر تهران

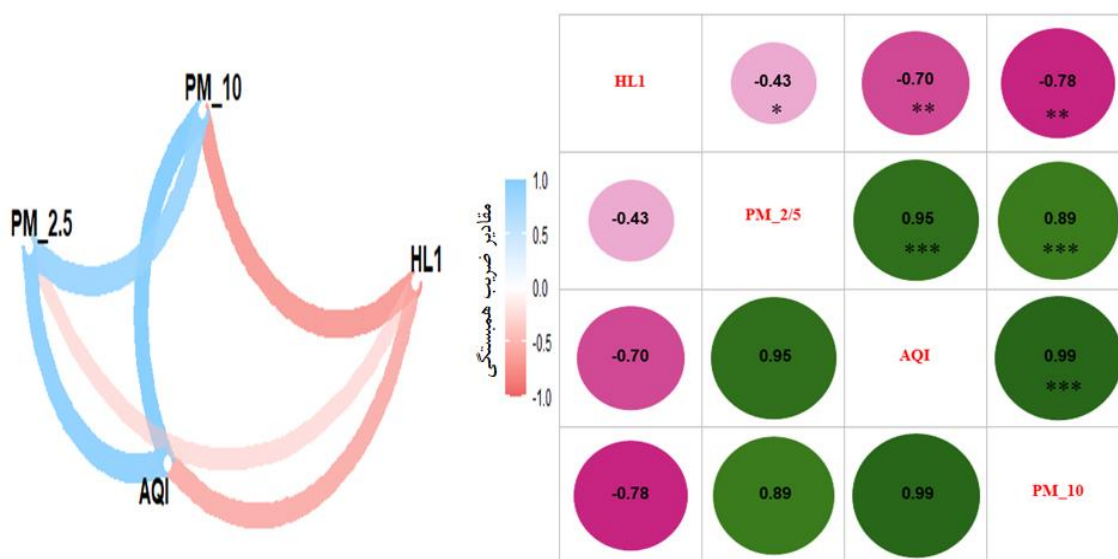
- بررسی ارتباط بین ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر با شاخص کیفیت هوا، ذرات PM_{10} و $PM_{2/5}$ ابرها با انعکاس تشعشعات خورشیدی، زمین را خنک می‌کنند و با جذب تابش مادون قرمز حرارتی و ارسال مجدد آن به سطح و فضا، زمین را گرم می‌کنند. ارتفاع پایه و بالای ابر بر اثر تشعشعی ابر تأثیر می‌گذارد و تأثیرات آن بر اقلیم بسیار مهم است. علاوه بر این، ارتفاع پایه ابر برای کنترل هوانوردی مهم است. ساختار عمودی ابر حساس است و ارتباط نزدیکی با ترمودینامیک اتمسفر و شرایط هواشناسی دارد. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که بارگذاری آتروسل‌ها می‌تواند بر ارتفاع ابر تأثیر بگذارد (Kourtidis et al,2015; Koren et al,2005).

جدول ۲. نتایج حاصل از بررسی نرمال بودن داده‌ها بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

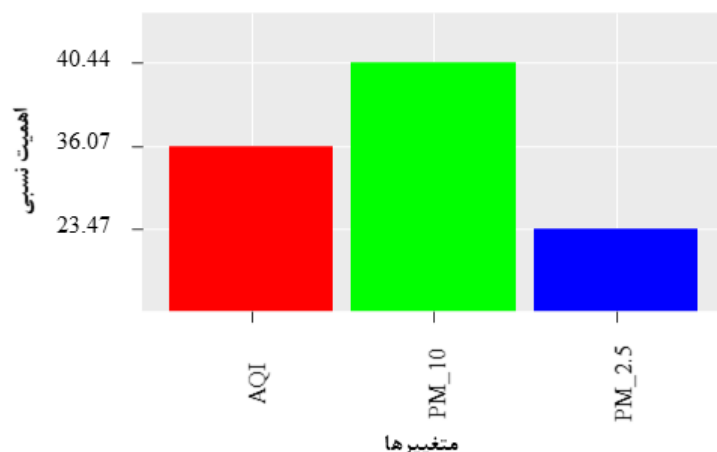
متغیر	P_value
AQI (شاخص کیفیت هوا)	۰/۹۴۱۳
HL1 (ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر)	۰/۹۴۵۳
PM10 (ذرات کمتر از ۱۰ میکرون)	۰/۸۰۸۶
PM2/5 (ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون)	۰/۶۱۰۶

شکل (۸) ضرایب همبستگی بین آلاینده‌های هوا و ارتفاع ابر را در مقیاس روزانه در طی دوره آماری ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ در شهر تهران را نشان می‌دهد. آلاینده PM_{10} دارای همبستگی مثبت با شاخص AQI و $PM_{2/5}$ ، و همبستگی منفی با ارتفاع پایه ابر است. در همبستگی مثبت در سطح اطمینان ۹۹/۹ درصد با افزایش آلاینده PM_{10} بر شدت شاخص کیفیت هوا و آلاینده $PM_{2/5}$ افزوده شده است و در همبستگی منفی (۰/۷۷-) با افزایش آلاینده PM_{10} ، با سطح اطمینان ۹۵ درصد،

ارتفاع پایه ابر در شهر تهران کاهش یافته است. اگر آلاینده‌ها نسبت به هم همبستگی بالایی از خود نشان دهند، می‌توان گفت که دارای منابع انتشار مشابهی هستند و احتمالاً از الگوهای انتقال و تبدیل یکسانی پیروی می‌کنند (Meng et al., 2017). در کلان‌شهر تهران، آلاینده‌های PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و شاخص AQI همبستگی مثبت معنادار قابل‌ملاحظه‌ای را به صورت جفتی نشان می‌دهند. بنابراین به نظر می‌رسد که منابع آلودگی مؤثر بر غلظت جرمی این آلاینده‌ها دارای همبستگی قوی هستند. ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ از ترکیبات شیمیایی متفاوتی برخوردار هستند و عمدتاً از احتراق سوخت، ماشین‌آلات، نیروگاه‌ها و فرایندهای صنعتی منتشر می‌شوند. از طرفی ذرات PM_{10} علاوه بر ذرات ریز، ذرات درشت‌تر که اغلب منشأ طبیعی دارند را شامل می‌شود. همبستگی بالای PM_{10} و $PM_{2.5}$ در تحقیقات محققین دیگری نیز اثبات شده است (Bamola et al., 2024). در شهر تهران بین ذرات PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و شاخص AQI با ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر همبستگی منفی معنادار قابل‌توجهی وجود دارد. نتایج همبستگی نشان می‌دهد که ابرها با لایه‌مرزی شهری جفت شده و هوای آلوده شهری را در خود جذب و اندازه توزیع قطرات را تغییر می‌دهند که این امر منجر به کاهش ارتفاع پایه ابر نسبت به سطح زمین می‌شود. آئروسول‌ها می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل کنند و تغییرات هسته‌های تراکم می‌توانند بر خواص میکروفیزیکی ابر تأثیر بگذارند و سپس با تغییر آلودگی و نرخ گرمایش اتمسفر با جذب تشعشع از طریق محدوده عمودی توزیعشان، انرژی خورشیدی ورودی را تحت تأثیر قرار دهند. شکل (۹) رتبه‌بندی متغیرهای پیشگو را در توضیح تغییرپذیری ارتفاع پایه ابر (HL1) را در شهر تهران نشان می‌دهد. بر اساس برون‌داد مدل رگرسیون خطی چندگانه و مدل اهمیت نسبی، ذرات معلق PM_{10} و شاخص AQI، مهم‌ترین متغیرهای پیشگوی تأثیرگذار در تغییرات ارتفاع پایه ابر محسوب می‌شوند. ذرات معلق $PM_{2.5}$ در رتبه سوم قرار دارند.



شکل ۸. ضرایب همبستگی پیرسون بین آلاینده‌های جوی و ارتفاع پایه ابر در مقیاس زمانی روزانه در کلان‌شهر تهران (۲۰۱۳-۲۰۲۲) PM_{10} ، ذرات معلق ۱۰ میکرون: AQI، شاخص کیفیت هوا: $PM_{2.5}$ ، ذرات کمتر از دو و نیم میکرون: HL1، ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر (***) و **** به ترتیب معناداری آماری در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۹/۹ درصد را نشان می‌دهد)



شکل ۹. اهمیت نسبی استانداردشده مبتنی بر جایگشت متغیرهای پیشگو در تبیین تغییرپذیری ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر در کلان‌شهر تهران (۲۰۲۲-۲۰۱۳)

بحث

مناطق شهری در حال بزرگ‌تر و پرجمعیت‌تر شدن هستند. از سال ۲۰۱۸، بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود که این رقم تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد افزایش یابد (UN-DESA, 2018). بررسی نقش شهرنشینی بر فاز و الگوهای بارش به‌منظور پشتیبانی از برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب، تضمین پایداری خدمات اکوسیستم، ارزیابی و طراحی ریسک زیرساخت‌ها در بحبوحه تغییرات آب‌وهوایی ضروری است. در مناطق شهری، تغییر در فاز و الگوهای بارشی، آسیب‌پذیری ناشی از رویدادهای شدید اقلیم‌شناسی را تشدید می‌کند. تغییرات در الگوهای بارشی، این پتانسیل را دارد که بر زمان‌بندی و بزرگی جریان اوج فصلی و روزانه، جریان‌های پایه تابستانی، تبخیر و تعرق، چرخه مواد مغذی، بازخورد زمین-اتمسفر، واکنش‌های پوشش گیاهی و مجموعه‌ای از دیگر فرآیندها و عملکردهای اکوسیستمی مرتبط را در حوضه‌های شهری را تأثیر بگذارد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد بیشترین فراوانی بارش‌های شدید کوتاه‌مدت در دهه دوم (۲۰۱۲-۲۰۰۳) رخ داده و سپس در دهه سوم کاهش یافته است. تعداد روزهای برفی همگام با توسعه فیزیکی شهری در طول دوره سی‌ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان متناسب با روند توسعه فیزیکی تا حد زیادی به افزایش آلاینده‌های جوی، گازهای گلخانه‌ای و شدت جزیره گرمایی شهری نسبت داد که فاز بارش را به نفع باران نسبت به برف تغییر می‌دهند. در شهر تهران، افزایش غلظت آئروسول‌ها با افزایش شدت بارش‌های همرفتی مرتبط است. عواملی که بر افزایش بارش‌های همرفتی تأثیرگذار هستند را می‌توان به وجود جزیره گرمایی شهری، ناهمواری سطوح وسیع شهری و غلظت زیادتر آئروسول‌های جوی نسبت داد که هم‌زمان با افزایش شهرنشینی بر رخداد و شدت بارش‌های همرفتی نیز افزوده می‌شود (Oke et al, 2017). نتایج این تحقیق با نتایج دیگری که محققین در کشورهای دیگری انجام داده‌اند همسو می‌باشد به‌طوری‌که برخی از مطالعات مشاهده‌ای که رابطه بین چرخه‌های هفتگی آلاینده‌های هوا و بارش تابستانی را تجزیه و تحلیل می‌کنند، شواهدی از افزایش بارندگی در روزهای با غلظت زیادتر آئروسول‌ها در جنوب شرقی ایالات متحده را نشان می‌دهند (Bell et al, 2008; Lacke et al, 2009). یک همبستگی مثبت بین غلظت آئروسول و فعالیت ردوبرق ابر به زمین در مناطق شهری پیدا می‌شود (Soriano & Pablo, 2002; Naccarato et al, 2003; Farias et al, 2009; Steiger et al, 2003; Kar et al, 2007; Kar et al, 2009). چوی و همکاران (۲۰۰۸) با تجزیه و تحلیل مشاهدات سطحی و ماهواره‌ای دریافته‌اند که غلظت زیادتر آئروسول‌ها به‌طور قابل‌توجهی با افزایش رخدادهای بارش در چین مرتبط است. آن‌ها بیان می‌کنند که در مقیاس چندروزه، افزایش غلظت آئروسول‌ها منجر به افزایش دفعات بارندگی تابستانی از طریق افزایش هسته‌زایی یخ در تروپوسفر میانی می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد توسعه ابرهای همرفتی قوی‌تر تحت غلظت بیشتر آئروسول‌ها که عمدتاً به دلیل آزاد شدن مقدار افزایش گرمای نهان ناشی از فرایند تراکم است، افزایش یافته است (Choi et al, 2008). افزایش آلودگی هوای تهران نیز با کاهش ارتفاع ابر در ارتباط است. در شهر تهران بین ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و شاخص AQI با ارتفاع پایین‌ترین لایه ابر همبستگی منفی معنادار قابل توجهی وجود دارد این همبستگی نشان‌دهنده رابطه نزدیک بین این آلاینده‌ها و شرایط جوی است. نتایج این بررسی با نتایج تحقیقی که توسط لی در شمالی شرقی امریکا انجام داد همسو می‌باشد. لی در بررسی اثر مستقیم آئروسول‌ها بر ارتفاع پایه ابر در دو اتمسفر تمیز و آلوده به این نتیجه رسید که در اتمسفر آلوده یک رابطه قوی منفی بین سطح تراکم و ارتفاع پایه ابر با غلظت ذرات $PM_{2.5}$ میکرون وجود دارد و ابرها در ارتفاع پایین‌تری از سطح زمین تشکیل می‌شوند (Li, 2017). همچنین لی و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که افزایش ذرات معلق هوای آلوده باعث کاهش شعاع مؤثر قطرات ابر اما افزایش عمق نوری ابر و غلظت تعداد قطرات ابر در تابستان می‌شود (Li et al, 2016). در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک همچون منطقه کلان‌شهر فینیکس ایالات متحده، تحقیقات متعددی در مورد اثرات شهری بر بارش و کیفیت هوا از مقیاس‌های محلی تا منطقه‌ای انجام گرفته است از جمله بایلینگ جونپور و برازل، طوفان‌های اواخر بعدازظهر بیشتری را در فینیکس مشاهده کردند و اظهار داشتند که علت آن رشد انفجاری جمعیت است (Bailling and Brazel, 1987). دیم و براون، اظهار داشتند که فعالیت‌های انسانی در منطقه فینیکس بر مجموع بارش‌های تابستانی تأثیر می‌گذارد (Diem and Brown, 2003). شپرد، تغییرات بارندگی در فینیکس را تجزیه و تحلیل کرده و دریافته است که مکان‌هایی در حومه شمال شرقی و حومه‌های منطقه شهری فینیکس، افزایش آماری معنی‌داری در میانگین بارش ۱۲ تا ۱۴ درصد از دوره قبل از شهری شدن (۱۹۴۹-۱۸۹۵) تا دوره شهری شدن (۲۰۰۳-۱۹۵۰) تجربه کرده‌اند (Shepherd, 2006).

نتیجه‌گیری

شهرنشینی می‌تواند از طریق تغییرات در بازخورد جو - زمین، آب‌وهوای محلی را تغییر دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شهرنشینی و توسعه فیزیکی شهر تهران طی سه دهه اخیر با تغییرات معنادار در الگوهای بارش و ویژگی‌های ابرناکی همراه بوده است. کاهش چشمگیر تعداد روزهای برفی در این دوره زمانی بیانگر آن است که افزایش دمای محیط شهری و تشدید اثر جزیره گرمایی شهری موجب تغییر فاز بارش از برف به باران شده است. این روند هم‌زمان با گسترش سطوح ساخته‌شده شهری رخ داده و رابطه‌ای بسیار قوی بین توسعه کالبدی شهر و کاهش روزهای برفی مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به نقش آئروسول‌ها نشان داد که افزایش غلظت ذرات معلق در جو شهری تهران با تغییر در نوع و شدت بارش‌های همرفتی همراه است، به‌گونه‌ای که بین عمق اپتیکی آئروسول (AOD) و مقدار بارش همرفتی رابطه مثبت و معناداری برقرار است. این یافته در چارچوب عدم قطعیت‌های موجود در برهم‌کنش آئروسول - ابر که به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع عدم قطعیت در مدل‌های اقلیمی جهانی شناخته می‌شود، قابل تفسیر است (IPCC, 2013) و با نقش آئروسول‌ها در تغییر ویژگی‌های تابشی و ریزفیزیک ابرها همخوانی دارد (Gebremariam et al., 2018). بررسی ارتفاع پایه ابر نشان داد که افزایش غلظت آلاینده‌های جوی، به‌ویژه ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ ، با کاهش معنادار ارتفاع پایه ابر در شهر تهران همراه است. همبستگی‌های منفی قابل توجه بین شاخص‌های آلودگی هوا و ارتفاع پایه ابر بیانگر آن است که ابرها در شرایط آلودگی بالا تمایل بیشتری به تشکیل در ارتفاعات پایین‌تر دارند و با لایه‌مرزی شهری پیوند نزدیک‌تری برقرار می‌کنند. این نتیجه با یافته‌های به‌دست‌آمده در شهر استانبول نیز همسو است که وجود رابطه قوی بین ارتفاع پایه ابر و آلاینده‌های جوی را نشان داده‌اند (Birinci et al., 2025). همچنین، نتایج این مطالعه با پژوهش‌هایی که نقش

آژوسل‌ها را در شرایط پایداری جوی بر توسعه ابرها برجسته کرده‌اند، همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش غلظت آژوسل‌ها می‌تواند به تشکیل ابرهای ضخیم‌تر با پایه پایین‌تر منجر شود (Li et al., 2011) این موضوع بیانگر آن است که آلودگی هوا علاوه بر اثرگذاری بر کیفیت هوا، می‌تواند ساختار عمودی ابرها و فرایندهای بارشی در محیط‌های شهری را نیز تعدیل کند. نتایج مدل رگرسیون خطی چندگانه و تحلیل اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که ذرات معلق PM10 و شاخص کیفیت هوا (AQI) مهم‌ترین متغیرهای پیشگو در تغییرات ارتفاع پایه ابر در شهر تهران محسوب می‌شوند. این یافته نشان می‌دهد که در میان عوامل مختلف جوی و انسانی، آلودگی هوا نقش غالبی در تغییر ساختار قائم ابرها در محیط شهری دارد. در مجموع، نتایج این پژوهش بر این نکته تأکید دارد که برهم‌کنش هم‌زمان شهرنشینی، افزایش دما و آلودگی هوا موجب تغییر ویژگی‌های بارش و ابرناکی در تهران شده است. این یافته‌ها ضرورت توجه به کنترل آلاینده‌های جوی و برنامه‌ریزی شهری سازگار با اقلیم را به‌عنوان بخشی از راهبردهای کاهش مخاطرات اقلیمی و سازگاری با تغییرات آب‌وهوایی در کلان‌شهرها را برجسته می‌سازد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است

سهم نویسندگان در پژوهش

قاسم کیخسروی: جمع‌آوری داده‌ها، انجام پردازش‌ها و تحلیل‌های مورد نیاز، نوشتن نسخه اولیه مقاله، بازبینی مقاله. زینب حسینی نیا: جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن و بازبینی مقاله.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه‌کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه سازمان هواشناسی و شرکت کنترل کیفیت هوای تهران جهت در اختیار قرار دادن داده‌های هواشناسی، آلاینده‌ها و همچنین کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

کهراری، پریسا؛ خالدی، شهریار؛ کیخسروی، قاسم و علوی، سید جلیل. (۱۴۰۴). بررسی اثرات آلاینده‌های جوی معیار و پارامترهای هواشناسی بر تغییر غلظت کربن سیاه در تهران و تبریز. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۴(۴۳)، ۳۵-۵۸. DOI: 10.22111/jneh.2024.47935.2028.

References

- Bell, T.L., Rosenfeld, K.M., Kim, J.M., Yoo, M., Lee, I., & Hahneberger, M. (2008) Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. *J. Geophys.* 113, D02209. doi:10.1029/2007JD008623.
- Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E.F. (2018). Present and future Koppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- Bailling, R.C., Jr. and Brazel, S.W. (1987) Diurnal variation in Ari zona monsoon precipitation frequencies. *Monthly Weather Review*. 115, 342-346.
- Bamola, S., Goswami, G., Dewan, S., Goyal, I., Agarwal, M., Dhir, A., & Anita Lakhani, A. (2024). Characterising temporal variability of PM2.5/PM10 ratio and its correlation with meteorological variables at a sub-urban site in the Taj City. *Urban Climate*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101763>.

- Birinci, E., Denizoglu, M., Ozdemir, H. et al. (2025). The role of meteorological variables and cloud base heights in urban air quality. *Air Qual Atmos Health* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11869-025-01822-4>.
- Choi, YS., Ho, CH., Kim, J., Gong, DY., & Park, R.J. (2008). The impacts of aerosols on the summer rainfall frequency in China. *J. Appl. Meteor, Climatol*, 47, 1802-1813, doi.org/10.1175/2007JAMC1745.1.
- Cao, Q., Yupeng, L., Matei, G., & Jianguo, W. (2020). Impacts of Landscape Changes on Local and Regional Climate: A Systematic Review. *Landscape Ecology* 35, 1269–90. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01015-7>.
- Du, Z., Li, W., Zhou, D., Tian, L., Ling, F., Wang, H., Gui, Y., & Sun, B. (2014). Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote Sens. Lett*, 5, 672–681.
- Diem, J. and Brown, D. (2003). Anthropocentric impacts on summer precipitation in central Arizona, U.S.A. *The Professional Geographer*, 55(3), 343–355.
- Farias, W., Pinto, O., Naccarato, K.P., & Pinto, I. (2009). Anomalous lightning activity over the metropolitan region of São Paulo due to urban effects. *Atmos. Res*, 91, 485-490.
- Gebremariam, S., Siwei, L., & Mengsteab, W. (2018). Observed Correlation between Aerosol and Cloud Base Height for Low Clouds at Baltimore and New York, United States, *Atmosphere* 9(4), 143. <https://doi.org/10.3390/atmos9040143>.
- Gu, Y., & Li, D. (2018). A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales. *Urban Climate*, 24, 982-993. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.001>.
- Huang, X., Wang, D., Ziegler, A. D., Liu, X., Zeng, H., Xu, Z., & Zeng, Z. (2022). Influence of urbanization on hourly extreme precipitation over China. *Environmental Research Letters*. 17(4)044010. doi: 10.1088/1748-9326/ac59a6.
- Hu, J., Liu, Y., Sang, Y. F., Liu, C., & Singh, V. P. (2021). Precipitation variability and its response to urbanization in the Taihu Lake Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 1205-1218. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03597-x>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kug, J. S., & Ahn, M. S. (2013). Impact of urbanization on recent temperature and precipitation trends in the Korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49, 151-159, <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0016-z>.
- Korkmaz, S., Goksuluk, D., & Zararsiz, GN. (2014). MVN: An R package for assessing multivariate normality. *R Journal*, 6(2).
- Kahrari, P., Khaledi, S., Keikhosravi, G., & Alavi, S. J. (2025). Investigating the effects of criteria air pollutants and meteorological parameters on the change of black carbon concentration in Tehran and Tabriz. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), 35-58. DOI: 10.22111/jneh.2024.47935.2028. [In Persian].
- Kar, SK., Liou, YA., & Ha, KJ. (2007). Characteristics of cloud-to-ground lightning activity over Seoul, South Korea in relation to an urban effect. *Ann. Geophys.*, 25, 2113-2118. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-2113-2007>.
- Kar, SK., Liou, YA., & Ha, KJ. (2009). Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea. *Atmos. Res.*, 92, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.004>.
- Koren, I., Kaufman, YJ., Rosenfeld, D., Remer, LA., & Rudich, Y. (2005). Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds. *Geophys. Res. Lett.* 32, 10–1029. doi.org/10.1029/2005GL023187.
- Kourtidis, K., Stathopoulos, S., Georgoulas, AK., Alexandri, G., & Rapsomanikis, SA. (2015). study of the impact of synoptic weather conditions and water vapor on aerosol–cloud relationships over major urban clusters of China. *Atmos. Chem. Phys*, 15, 10955–10964. [doi:10.5194/acp-15-10955-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-10955-2015).
- Lacke, MC., Mote, T.L., & Shepherd, JM. (2009). Aerosols and associated precipitation patterns in Atlanta. *Atmos*, 43, 4359- 4373. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.022>.
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., & Gui, Y. (2013). A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sens*, 5, 5530–5549. doi:10.3390/rs5115530.

- Li, L., Zha, Y., & Wang, R. (2020). Relationship of surface urban heat island with air temperature and precipitation in global large cities. *Ecological Indicators*, 117, 106683. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106683>.
- Li, S., Joseph, E., Min, Q., & Yin, B. (2016). Multi-year ground-based observations of aerosol-cloud interactions in the mid-atlantic of the united states. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 188, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.02.004>.
- Li, S. (2017). Aerosol Indirect Effect and Cloud-base Height Observations in the North East of the United States. *Int J Earth Environ Sci*, 2(2), 128. doi.org/10.15344/2456-351X/2017/128.
- Li, Z., Niu, F., & Fan, J. (2011). Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nature Geosci*, 4, 888–894. <https://doi.org/10.1038/ngco1313>.
- Meng, K., Cheng, X., Xu, X., Qu, X., Ma, C., Zhao, Y., ... & Ding, G. (2017). Spatial-temporal variations of pollutant emission sources inverted by adaptive nudging scheme over Beijing-Tianjin-Hebei region based on the CMAQ model. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(1), 52-60. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.021.
- Mishra, P., Pandey, CM., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of cardiac anaesthesia*, 22(1). https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18.
- Naccarato, KP., Pinto, O., & Pinto, IRCA. (2003). Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. *Geophys. Res*, <https://doi.org/10.1029/2003GL017496>.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, 9, 62–66.
- Oke, Timothy R., Gerald M., Andreas, Ch., & James A. V. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. [https://doi.org/10.1016/s0168-6321\(06\)80036-2](https://doi.org/10.1016/s0168-6321(06)80036-2).
- Ronald, C., & Estoque, YM. (2015). Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators*, 56, 1470, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.037>.
- Soriano, L. R., & Pablo, F. (2002). Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity. *Atmos. Environ.* 36, 2809-2816. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00204-2).
- Steiger, SM., & Orville, RE. (2003). Cloud-to-ground lightning enhancement over Southern Louisiana. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1975. [doi:10.1029/2003GL017923](https://doi.org/10.1029/2003GL017923).
- Stensen, B. M., Marelle, L., Hodnebrog, Ø., & Myhre, G. (2022). Future urban heat island influence on precipitation. *Climate Dynamics*, 58(11–12), 3393–3403. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06105-z>.
- Shepherd, J.M. (2006). Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regions. *Journal of Arid Environments*, 67 (2006), 607–628. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.022>.
- Savic, S., Kalfayan, M., & Dolinaj, D. (2020). Precipitation spatial patterns in cities with different urbanisation types: Case study of Novi Sad (Serbia) as a medium-sized city. *Geographica Pannonica*, 24(2). [doi:10.5937/gp24-25202](https://doi.org/10.5937/gp24-25202).
- Song, Y., Liu, H., Wang, X., Zhang, N., & Sun, J. (2016). Numerical simulation of the impact of urban non-uniformity on precipitation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33, 783-793, <https://doi.org/10.1007/s00376-016-5042-1>.
- UN-DESA. (2018). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. online edition (Tech. Rep.). United Nations. Department of Economic and Social Affairs.
- Wei, T. & Simko, VR. (2021). *Package "Corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92)*. Package Corrplot for R Software.
- Wang, J., Feng, J., Wu, Q., & Yan, Z. (2016). Impact of anthropogenic aerosols on summer precipitation in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration in China: Regional climate modeling using WRF-Chem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33, 753-766. <https://doi.org/10.1007/s00376-015-5103-x>.
- [https:// data.irimo.ir](https://data.irimo.ir).
- [https:// air.tehran.ir](https://air.tehran.ir).
- [https:// earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov).