**Urban Development Policy Making**

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

# Climate Change Adaptation Policy in Tehran: Reinterpreting Spatial Precipitation Patterns over the Next 20-Year

**Mohammad Reza Farzaneh[1*] | Mohammad Abdolhosseini[2]**

1. Corresponding Author, Assistant Prof. at Research Group of Environmental Engineering and Pollution Monitoring, Research Center for Environment and Sustainable Development, RCESD, Tehran, Iran. Email: mrf.farzaneh.env@gmail.com
2. Assistant Professor, Water Engineering Department the Director of Educational Affairs, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (www.gau.ac.ir), Gorgan, Golestan Province, Iran. Email: abd.phd@gmail.com

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article History:**
Received 28 November 2025
Revised 29 December 2025
Accepted 28 February 2026
Published Online 01 June 2026

**Keywords:**
Adaptation Policy,
Climate Change,
Climate resilience,
Tehran.

**ABSTRACT**

The development of the Tehran metropolis requires adherence to spatial planning and resource capacity, especially hydrological limits. This study analyzes the impacts of climate change on precipitation distribution in Sub-basin 4133, which affects Tehran's urban policymaking. Given limited high-altitude observational data, TerraClimate reanalysis data were validated (R^2 > 0.85). Precipitation patterns from the past 70 and 20 years were studied, and future changes under four Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) were projected using the median of five CMIP6 models with the Change Factor downscaling method. Results show a "spatial contraction of high-precipitation zones" in the last 20 years, decreasing the basin's hydrological inflow. Future projections indicate an inevitable precipitation decline even under the sustainable scenario (SSP1-2.6), with the pessimistic scenario (SSP5-8.5) predicting a severe water resource collapse in northern highlands (below 190 mm). This, potentially worsened by Tehran's Urban Heat Island (UHI), could lead to destructive flash floods, reduced soil permeability, compromised groundwater recharge, and increased land subsidence in southern districts. The findings underscore the critical need for urban regeneration to implement the "Sponge City" model and update spatial planning documents according to the basin's revised ecological capacity.

**Cite this article:** Farzaneh, M. R. & Abdolhosseini, M. (2026). Climate Change Adaptation Policy in Tehran: Reinterpreting Spatial Precipitation Patterns over the Next 20-Year. *Urban Development Policy Making*, 3 (2), 201-211. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2026.568604.1078

© Mohammad Reza Farzaneh, Mohammad abdolhosseini
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2026.568604.1078

## Introduction

Tehran is grappling with a crisis of unsustainable urban development and climate change, leading to severe water scarcity and increased vulnerability to extreme weather events. Neglecting land management principles and the exacerbation of the urban heat island effect, coupled with unpredictable precipitation patterns, threaten the city's infrastructure and water security. There's a significant gap in understanding the spatial dynamics of rainfall and their connection to urban adaptation policies. This research aims to forecast future precipitation changes using IPCC models to inform Tehran's urban policies for the next two decades, addressing issues like groundwater recharge and subsidence.

## Materials and Methods

This applied research uses climate modeling and spatial analysis to inform Tehran's urban adaptation policies. It focuses on sub-basin 4133, utilizing TerraClimate reanalysis data and an ensemble of five

CMIP6 General Circulation Models to project precipitation changes over the next two decades under four Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Statistical downscaling and Inverse Distance Weighting interpolation refine global data to local levels. The study's novelty lies in analyzing the spatial shifts of rainfall zones to guide revisions in land-use policies and regeneration standards due to precipitation contraction.

## Result

The study used validated TerraClimate reanalysis data for Tehran's dry and semi-arid climate ($R^2 > 0.85$). Historically, sub-basin 4133 received 154-262 mm of annual precipitation, concentrated in the north. However, the past 20 years show a decline, with maximum rainfall dropping to 251 mm, indicating reduced basin precipitation and smaller high-rainfall zones. Long-term spatial analysis shows more rain in the northern Alborz mountains and less in southern plains. Recent decades exhibit a pronounced decrease in the south and southeast, suggesting early climate change impacts. A structural shift is evident: the maximum rainfall area has shrunk, reducing watershed area for groundwater recharge and potentially worsening land subsidence.

Future projections vary by scenario:

- SSP1-2.6 (Optimistic): Moderate rainfall reduction, with less decline in the north, but increased water stress in southern plains.
- SSP2-4.5: More significant decrease across regions, especially the southeast, with notable reductions even in the north, potentially lowering river flows and groundwater levels.
- SSP3-7.0: Severe rainfall decrease throughout the area, including vital northern highlands, intensifying the water crisis and risking depleted resources.
- SSP5-8.5 (Pessimistic): Drastic and widespread precipitation decline, threatening Tehran's water security and regional ecological stability, requiring extreme adaptation.

## Discussion and Conclusion

The present foresight analysis serves as a serious warning for urban governance in Tehran, highlighting a gap between sustainable historical patterns and potential future scenarios, indicating that the city is surpassing its ecological thresholds. Even in optimistic scenarios, a relative reduction in rainfall is inevitable, while pessimistic projections threaten the structural integrity of water resources, compromising urban biological security. The study suggests that urban regeneration policies should embrace innovative approaches, such as mandating permeable paving in public spaces to enhance runoff absorption. It also advocates for stricter building regulations for rainwater harvesting systems, especially in northern areas, and prioritizing a halt to population and water-intensive activities in the southern regions to ensure the long-term sustainability of the city against climate threats

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https:// judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

# سیاستگذاری انطباق با تغییر اقلیم در تهران؛ بازخوانی الگوی تغییرات مکانی بارش در افق ۲۰ سال آینده

محمدرضا فرزانه[۱*] | محمد عبدالحسینی[۲]

۱. نویسندهٔ مسئول، عضو هیئت علمی گروه مهندسی محیط زیست و پایش آلاینده‌ها، پژوهشکدهٔ محیط زیست و توسعهٔ پایدار، تهران، ایران. رایانامه: mrf.farzaneh.env@gmail.com
۲. عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران. رایانامه: abd.phd@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخ‌های مقاله:**
**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۹/۰۷
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۰/۰۸
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۰۸
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

**کلیدواژه:**
سیاست اقلیمی،
تاب‌آوری اقلیمی،
تغییر اقلیم،
تهران.

## چکیده

توسعهٔ کلان‌شهر تهران نیازمند انطباق با سیاست‌های آمایشی و توجه به ظرفیت برد منابع، به‌ویژه محدودیت‌های هیدرولوژیکی است. پژوهش حاضر با هدف واکاوی اثرات تغییر اقلیم بر توزیع فضایی بارش در زیرحوضهٔ کد ۴۱۳۳ از محدوده‌های حوضهٔ آبریز دریاچهٔ نمک (شامل محدودهٔ شهر و پیرامون شهر تهران) و تبیین پیامدهای آن برای سیاستگذاری شهری تهران انجام شده است. با توجه به خلأ آماری در ارتفاعات، ابتدا داده‌های بازتحلیل پایگاه تراکلایمت اعتبارسنجی شد. سپس، وضعیت بارش در دوره‌های ۷۰ و ۲۰ سالهٔ اخیر تحلیل و تغییرات آتی تحت چهار سناریوی مسیر مشترک اجتماعی ـ اقتصادی (SSPs) با بهره‌گیری از شاخص میانه ۵ مدل از مدل‌های مورد تأیید ششمین گزارش هیئت بین الدولی تغییر اقلیم و با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی ضریب تغییرات تصویرسازی شد. یافته‌ها نشان‌دهندهٔ وقوع پدیدهٔ انقباض مکانی پهنه‌های پرباران در ۲۰ سال اخیر است که به کاهش ورودی هیدرولوژیک حوضه منجر شده است. نتایج آینده‌پژوهی بیانگر آن است که حتی در سناریوی پایدار (SSP1-2.6)، کاهش بارش اجتناب‌ناپذیر بوده و در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، زوال ساختاری منابع آب در ارتفاعات شمال (کاهش به زیر ۱۹۰ میلی‌متر) رخ خواهد داد. این روند، می‌تواند رژیم بارش‌ها را به سمت رگبارهای مخروب سوق داده که با کاهش نفوذپذیری، به قطع تغذیهٔ سفره‌های زیرزمینی و تشدید فرونشست زمین در مناطق جنوبی شهر تهران منجر شود. نتایج این تحقیق بر ضرورت برنامه‌های بازآفرینی شهری و بازنگری در اسناد آمایشی بر مبنای توان اکولوژیکی جدید حوضه تأکید دارد.

**استناد:** فرزانه، محمدرضا و عبدالحسینی، محمد (۱۴۰۵). سیاستگذاری انطباق با تغییر اقلیم در تهران؛ بازخوانی الگوی تغییرات مکانی بارش در افق ۲۰ سال آینده. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۲) ۲۰۱-۲۱۱.

DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2026.568604.1078

© محمدرضا فرزانه، محمد عبدالحسینی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2026.568604.1078

## مقدمه

کلان‌شهر تهران به عنوان قطب اصلی فعالیت‌های سیاسی ـ اقتصادی ایران، امروزه در کانون تلاقی بحران‌های ناشی از توسعهٔ ناپایدار شهری و اثرات سوء تغییر اقلیم قرار گرفته است. محدودیت منابع آب در این منطقه از یک چالش فنی ـ هیدرولوژیکی فراتر رفته و به یک اولویت راهبردی در لایه‌های حکمرانی و سیاست‌گذاری فضایی تبدیل شده است [۱]. چالش‌های کنونی تأمین آب تهران عمدتاً ریشه در نادیده انگاشتن اصول آمایش سرزمین دارد؛ جایی که بارگذاری جمعیت و فعالیت بدون توجه به ظرفیت برد و توان اکولوژیکی حوضه صورت گرفته است. بر اساس گزارش ششم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم[1]، کلان‌شهرهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک با ریسک‌های ترکیبی ناشی از تغییر رژیم‌های بارشی و تشدید جزایر حرارتی روبه‌رو هستند که تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری را به‌شدت تهدید می‌کند [۲].

پیشینهٔ پژوهشی نشان می‌دهد تغییرات معناداری در مؤلفه‌های دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر رخ داده است [۳ و ۴]. تحلیل روندها مؤید وقوع نقاط تغییر[2] در الگوهای بارش سالانه است که ضرورت بازنگری در مدل‌های سنتی مدیریت آب را دوچندان می‌کند [۵]. با این‌حال، تحلیل‌های نوین بر پایهٔ مدل‌های نسل ششم گردش عمومی جو[3]، بیانگر تشدید عدم‌قطعیت‌ها در الگوهای مکانی و زمانی بارش تحت سناریوهای مسیرهای مشترک اجتماعی ـ اقتصادی[4] در مقیاس خاورمیانه و ایران است [۶]. این تغییرات نه تنها امنیت آبی را با مخاطره روبه‌رو می‌کند، بلکه پتانسیل وقوع سیلاب‌های ناگهانی و طولانی شدن دوره‌های خشکسالی را افزایش داده که مدیریت سکونتگاه‌های بزرگی همچون تهران را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد [۷ ـ ۹]. علی‌رغم گستردگی مطالعات اقلیمی، یک خلأ علمی جدی در خصوص پویایی‌های مکانی بارش و پیوند آن با سیاستگذاری انطباق شهری در تهران مشاهده می‌شود. اغلب پژوهش‌های پیشین بر تحلیل روند کلی بارش تمرکز داشته‌اند، در حالی که نادیده گرفتن انقباض یا جابه‌جایی پهنه‌های پربارش در مناطق شمالی (ارتفاعات)، مستقیم بر نرخ تغذیه سفره‌های زیرزمینی اثرگذار است و می‌تواند بحران‌هایی نظیر فرونشست در مناطق جنوبی و مرکزی را تشدید کند [۱۰]. علاوه بر این، تداخل اثرات جزیرهٔ حرارتی تهران با الگوهای بارشی، ابعاد جدیدی از پیچیدگی را در مدیریت سیلاب‌های شهری و برنامه‌ریزی فضایی ایجاد کرده است. سیاستگذاری مؤثر برای تاب‌آوری شهری در برابر تغییر اقلیم نیازمند یک رویکرد چندبعدی است که از مدل‌سازی‌های دقیق اقلیمی و ارزیابی منابع آبی برای تصویرسازی خشکی و خشکسالی و کم‌آبی آغاز شده و به برنامه‌ریزی‌های کلان شهری و منطقه‌ای برای مدیریت بحران‌هایی نظیر فرونشست زمین ختم می‌شود. در این راستا، با استفاده از ابزارهای سنجش‌ازدور و چارچوب‌های کلان‌نگر، می‌توان چالش‌های کلان‌شهرها را شناسایی کرد و راهکارهایی مبتنی بر شواهد برای سازگاری پایدار و مدیریت یکپارچهٔ منابع آب و خاک تدوین کرد [۱۱ ـ ۲۰]. با توجه به اهمیت گام نخستین فرایند یادشده، نوآوری و هدف اصلی تحقیق حاضر بر این اساس در نظر گرفته شد تا با تصویرسازی آینده‌نگارانه تغییرات مکانی بارش با استفاده از ترکیب آخرین مدل‌های مورد تأیید هیئت بین الدولی تغییر اقلیم، پیامدهای آن برای سیاستگذاری شهری تهران در افق ۲۰ سال آینده تحلیل شود.

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمرهٔ تحقیقات کاربردی و از منظر ماهیت، مطالعاتی توصیفی ـ تحلیلی با رویکرد مدل‌سازی اقلیمی و تحلیل فضایی است. فرایند اجرای تحقیق با هدف ارائهٔ خروجی‌های ملموس برای سیاستگذاری انطباق شهری، در چهار گام اصلی تدوین شده است:

### منطقهٔ مطالعه‌شده و ضرورت هیدرولوژیکی

محدودهٔ مورد مطالعه، زیرحوضه کد ۴۱۳۳ (بخشی از حوضهٔ آبریز دریاچه نمک) است که پهنهٔ کلان‌شهری تهران و شریان‌های تغذیه‌کننده آن در ارتفاعات شمالی را شامل می‌شود. انتخاب این محدوده به دلیل نقش حیاتی ارتفاعات البرز در تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی تهران و حساسیت بالای اقتصاد شهری پایتخت به تغییرات بارشی در این پهنه است.

1. IPCC AR6
2. Change points
3. CMIP6
4. SSPs

## گردآوری و اعتبارسنجی داده‌های بازتحلیل

به منظور غلبه بر چالش عدم قطعیت داده‌های ایستگاهی و خلأ آماری در ارتفاعات، از داده‌های بازتحلیل پایگاه تراکلایمت[1] با قدرت تفکیک مکانی ۴ کیلومتر استفاده شد. جهت اطمینان از دقت مدل، این داده‌ها با آمارهای مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک مرجع تطبیق داده شدند. کارایی داده‌ها با استفاده از شاخص ضریب تبیین ارزیابی شد تا پایه‌ای معتبر برای روش ریزمقیاس‌نمایی آماری فراهم شود.

## انتخاب مدل‌های اقلیمی CMIP6 و سناریوهای SSP

به منظور کاهش عدم‌قطعیت‌های ناشی از ساختار مدل‌های منفرد، از رویکرد مجموعه‌ای[2] متشکل از ۵ مدل گردش عمومی جو از نسل ششم (CMIP6) شامل MRI-ESM2-0، EC-Earth3-Veg، CMCC-ESM2، MPI-ESM1-2-HR و UKESM1-0-LL استفاده شد. برای ارائهٔ تصویری پایدار از آینده، شاخص میانهٔ خروجی این مدل‌ها ملاک تحلیل قرار گرفت. تغییرات آتی برای افق ۲۰ سال آینده تحت چهار سناریوی مسیر مشترک اجتماعی ـ اقتصادی (SSP) مورد واکاوی قرار گرفت که طیفی از سیاست‌های پایدار (SSP1-2.6) تا سناریوهای با چالش‌های انطباقی بالا (SSP3-7.0) و بدبینانه (SSP5-8.5) را پوشش می‌دهد مشخصات مدل‌ها و سناریوهای انتشار یادشده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است [۳ و ۶].

**جدول ۱.** مشخصات مدل‌های استفاده‌شده برای تصویرسازی شرایط محتمل دورهٔ آتی

| نام مدل | مرکز توسعه‌دهنده | کشور | تفکیک مکانی (درجه) |
|---|---|---|---|
| MRI-ESM2-0 | مؤسسهٔ تحقیقات هواشناسی | ژاپن | 1.12 x 1.12 |
| EC-Earth3-Veg | کنسرسیوم EC-Earth | اروپا | 0.70 x 0.70 |
| CMCC-ESM2 | مرکز مدیترانه‌ای تغییر اقلیم | ایتالیا | 1.25 x 1.25 |
| MPI-ESM1-2-HR | مؤسسهٔ ماکس پلانک | آلمان | 0.94 x 0.94 |
| UKESM1-0-LL | مرکز هدلی | بریتانیا | 1.25 x 1.87 |
| MRI-ESM2-0 | مؤسسهٔ تحقیقات هواشناسی | ژاپن | 1.12 x 1.12 |
| EC-Earth3-Veg | کنسرسیوم EC-Earth | اروپا | 0.70 x 0.70 |

**جدول ۲.** مشخصات سناریوهای انتشار استفاده‌شده برای تصویرسازی شرایط محتمل دورهٔ آتی

| سناریو | سطح اجبار تابشی | توصیف وضعیت سیاستگذاری و توسعه |
|---|---|---|
| SSP1-2.6 | ۲.۶ | توسعهٔ پایدار: تمرکز بر رفاه، کاهش نابرابری و انرژی‌های پاک. |
| SSP2-4.5 | ۴.۵ | میانه‌رو: تداوم روند فعلی توسعه با کنترل نسبی انتشار کربن. |
| SSP3-7.0 | ۷.۰ | رقابت منطقه‌ای: چالش‌های بالا در انطباق، تمرکز بر امنیت ملی به جای محیط زیست. |
| SSP5-8.5 | ۸.۵ | توسعهٔ مبتنی بر سوخت فسیلی: رشد اقتصادی سریع بدون توجه به محدودیت‌های اقلیمی. |

## ریزمقیاس‌نمایی آماری و تحلیل فضایی

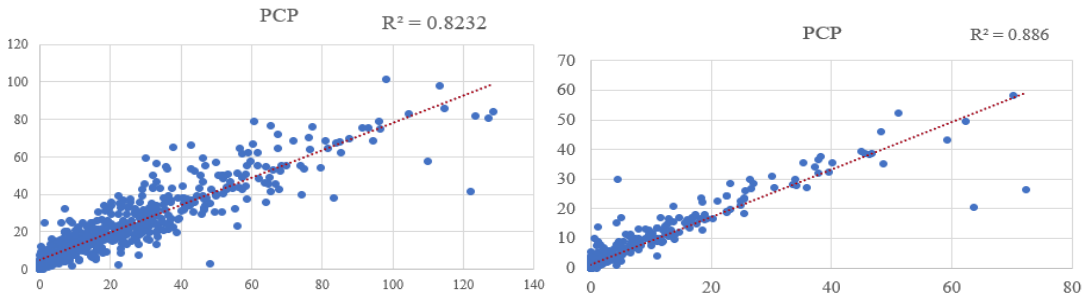
برای افزایش دقت داده‌ها از مقیاس جهانی به مقیاس محلی تهران، از روش ضریب تغییرات[3] استفاده شد. پس از استخراج مقادیر تغییرات بارش، پهنه‌بندی شاخص مجموع بارش سالانه در محیط سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی با بهره‌گیری از روش عکس وزندهی فاصله انجام شد. نوآوری این بخش در تحلیل جابه‌جایی مکانی پهنه‌های بارشی است تا مشخص شود انقباض بارشی در کدام مناطق توسعهٔ شهری تهران، ضرورت بازنگری در سیاست‌های کاربری زمین و ضوابط بازآفرینی را ایجاب می‌کند.

## یافته‌ها

در گام نخست این پژوهش با توجه به پراکنش ناکافی ایستگاه‌های هواشناسی موجود در محدودهٔ مطالعاتی و طول ناکافی داده‌ها تمرکز بر داده‌های پایگاه تراکلایمت قرار گرفت. با توجه به قرارگیری تهران در اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک، نتایج ارزیابی

1. TerraClimate
2. Ensemble
3. Change Factor Method

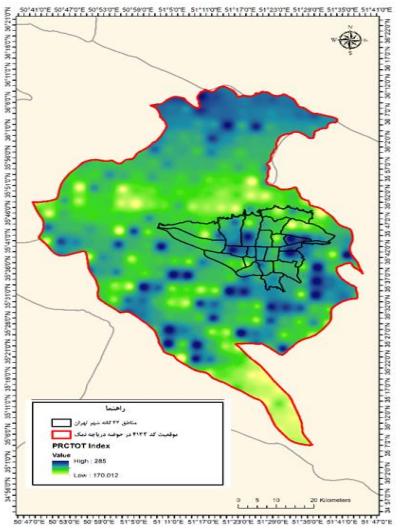
عملکرد آماری داده‌های بارش در این دو اقلیم (ایستگاه زابل به عنوان نمایندهٔ اقلیم خشک و ایستگاه تبریز به عنوان نمایندهٔ اقلیم نیمه‌خشک) صورت پذیرفت. نتایج اعتبارسنجی در شکل ۱ نشان می‌دهد داده‌های پایگاه تراکلایمت در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک (مشابه تهران) از همبستگی بالایی (R^2 > 0.85) با داده‌های مشاهداتی برخوردارند. این دقت بالا، امکان تحلیل‌های ریزمقیاس مکانی را فراهم کرده و عدم‌قطعیت‌های ناشی از خلأ آماری در ارتفاعات شمالی تهران را به حداقل رسانده است.



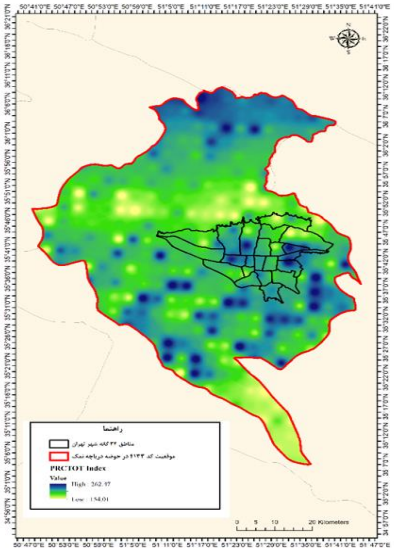

**شکل ۱.** ارزیابی عملکرد آماری پارامتر بارش در اقلیم‌های خشک (شکل سمت راست) و نیمه‌خشک (شکل سمت چپ)

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است، تحلیل شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت ۷۰ساله برای زیرحوضهٔ ۴۱۳۳، نشان‌دهندهٔ نوسانات مقداری بین ۱۵۴ تا ۲۶۲ میلی‌متر است که بیشینهٔ آن در ارتفاعات شمالی تمرکز یافته است. با مقایسهٔ این وضعیت در ۲۰ سال اخیر ملاحظه می‌شود که مقدار بیشینه به ۲۵۱ میلی‌متر کاهش یافته و مقدار کمینه نیز به ۱۷۰ میلی‌متر رسیده است که نشان‌دهندهٔ افت کل آوردهای بارشی در سطح حوضه و انقباض پهنه‌های پرباران نسبت به میانگین ۷۰ساله است.

شکل ۲ نشان‌دهندهٔ توزیع فضایی بارش‌های سالانه در روزهای مرطوب در منطقهٔ مطالعاتی (شامل تهران و پیرامون شهر تهران) طی هفت دههٔ گذشته است. الگوی مشاهده‌شده تغییرات قابل توجهی را در مقیاس‌های مکانی نشان می‌دهد، به طوری که مناطق مرتفع شمالی (شامل دامنه‌های البرز) از بارش بیشتر و پراکنش پیوسته‌تری برخوردار بوده‌اند، در حالی که بخش‌های جنوبی و شرقی حوزه (شامل دشت‌های پایین‌دست) با مقادیر کمتر بارش مواجه هستند. شکل ۳ تغییرات در بازهٔ زمانی دو دههٔ اخیر را نشان داده است و تغییراتی در الگوی پراکنش بارش نسبت به دوره ۷۰ساله مشاهده می‌شود. کاهش بارش به‌ویژه در مناطق کم‌بارش جنوب و جنوب شرقی تشدید شده، در حالی که مناطق شمالی تغییرات کمتری را تجربه کرده است. کاهش کلی بارش در این دوره می‌تواند نشان‌دهندهٔ تأثیر اولیه تغییرات اقلیمی در منطقه باشد که بر منابع آب سطحی و زیرزمینی حوزه اثر گذاشته و فشار بر تأمین آب در کلان‌شهر تهران و اطراف آن را افزایش داده است.



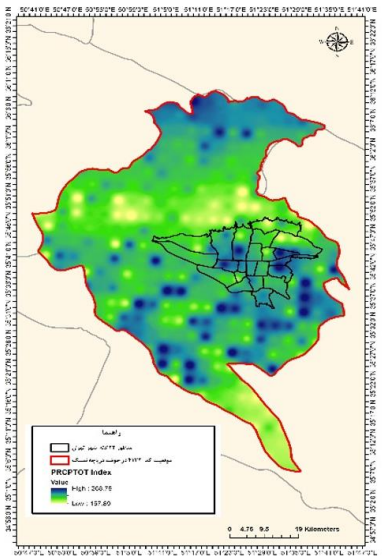

**شکل ۲.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۷۰ سال اخیر



**شکل ۳.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۲۰ سال اخیر

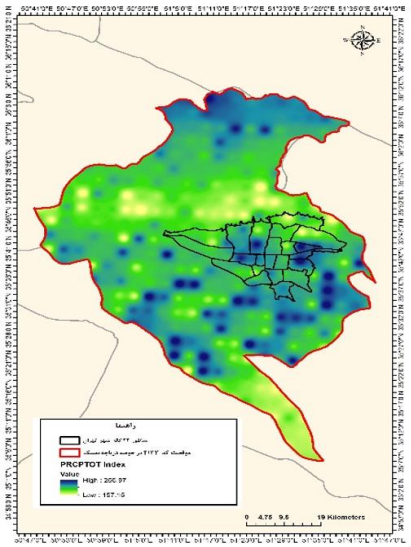
مقایسهٔ شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهندهٔ یک تغییر ساختاری در توزیع فضایی بارش تهران است. در حالی که میانگین ۷۰ساله، بیشینهٔ بارش ۲۶۲ میلی‌متر را در ارتفاعات نشان می‌دهد، این مقدار در ۲۰ سال اخیر به ۲۵۱ میلی‌متر کاهش یافته است. نکتهٔ کلیدی در اینجا، انقباض مکانی پهنه‌های پرباران است. این پدیده به معنای کاهش سطح حوضه‌های آبخیز مؤثر در تغذیه سفره‌های زیرزمینی دشت تهران است. از منظر سیاستگذاری شهری، این انقباض به معنای کاهش ورودی منابع آب زیرزمینی است که مستقیم با تشدید نرخ فرونشست پیوند دارد.

شکل ۴ تحت سناریو SSP1-2.6 (سناریوی کاهش سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش دمای محدود)، میانه پنج مدل محاسبه‌شده نشان‌دهندهٔ احتمال حفظ نسبی الگوی بارش تاریخی است، این احتمال با کاهش خفیف در مقدار کلی بارش به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی منطقهٔ مطالعاتی همراه خواهد شد. مناطق شمالی ممکن است کاهش کمتری را تجربه کنند. این سناریو نسبتاً خوش‌بینانه، نشان می‌دهد با اقدامات بین‌المللی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات بارش در منطقه تهران می‌تواند در حد قابل مدیریتی باقی بماند. با این‌حال، کاهش بارش در مناطق پایین‌دست ممکن است چالش‌های آبی را در دشت‌های اطراف تهران تشدید کند.

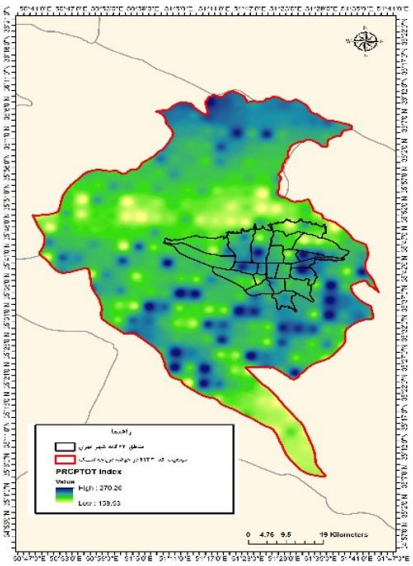


**شکل ٤.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۲۰ سال آتی تحت تأثیر سناریو انتشار SSP1-2.6

شکل ۵ در سناریو SSP2-6.5 (مسیر توسعه متوسط با انتشار متوسط)، میانهٔ مدل‌ها کاهش بارش محسوس‌تری را در بیشتر مناطق نشان می‌دهد. شدت کاهش در مناطق کم‌بارش جنوب شرقی منطقهٔ مطالعاتی بیشتر است و حتی مناطق پربارش شمالی نیز با کاهش معنادار بارش مواجه می‌شوند. این تغییرات می‌تواند به کاهش جریان رودخانه‌ها، افت سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش تنش آبی در تهران منجر شود. شکل ۶ تحت سناریو SSP3-7.0 (توسعهٔ مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و انتشار بالا)، میانه مدل‌ها کاهش شدید بارش در کل منطقه مطالعاتی را تصویرسازی کرده است. پراکنش مکانی بارش به‌شدت ناهمگن شده و حتی در مناطق مرتفع شمالی (که منابع اصلی تأمین آب تهران هستند) کاهش بارش چشمگیر است. این شرایط بحران آب را در کل منطقه تشدید می‌کند و می‌تواند به کاهش شدید ذخایر سدها، خشک شدن چاه‌ها و تعمیق بحران محیط زیستی در حوضهٔ دریاچه نمک منجر شود.



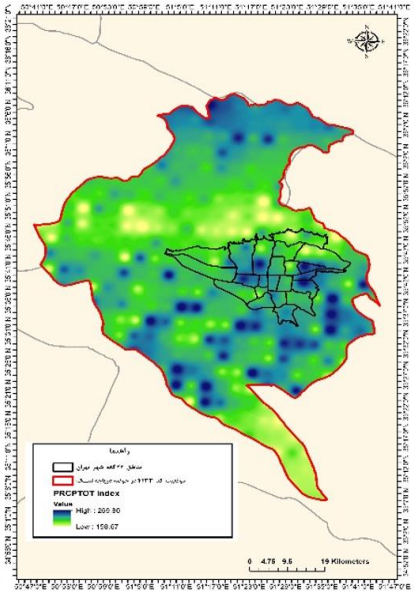

**شکل ۵.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۲۰ سال آتی تحت تأثیر سناریو انتشار SSP2-6.5




**شکل ٦.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۲۰ سال آتی تحت تأثیر سناریو انتشار SSP3-7.0

با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۷ در بدبینانه‌ترین سناریو (SSP5-8.5 با انتشار بسیار بالا و رشد سریع مصرف سوخت‌های فسیلی)، میانه مدل‌ها کاهش بسیار شدید و گستردهٔ بارش را در تمامی بخش‌های منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. این سناریو پیامدهای شدیدی را برای امنیت آبی تهران و پایداری اکولوژیکی منطقه به همراه دارد. مدیریت آب در چنین شرایطی نیازمند راهبردهای تطبیقی شدید خواهد بود.

تحلیل این شاخص نشان می‌دهد وضع موجود شهر با کاهش بارش در پهنه‌های مرکزی و جنوبی نسبت به بلندمدت شناخته می‌شود و تصویرسازی شرایط محتمل دورهٔ آتی بر تشدید کاهش بارش در دشت تهران، به‌ویژه تحت سناریوهای انتشار بالا تأکید دارد. با توجه به اینکه کاهش مجموع بارش سالانه می‌تواند به تشدید فرونشست زمین و تهدیدهای اجتماعی ـ اکولوژیکی مرتبط منجر شود، وضع مطلوب بر پایهٔ مدیریت هوشمند تقاضا و استفادهٔ حداکثری از منابع آب بازیافتی قابل تعریف است.




**شکل ۷.** پراکنش مکانی شاخص مجموع بارش سالانه در روزهای مرطوب در دورهٔ بلندمدت اقلیمی ۲۰ سال آتی تحت تأثیر سناریو انتشار SSP5-8.5

**جدول ۳.** مقایسهٔ شرایط گذشته و آتی تحت تأثیر سناریوهای مختلف

| شاخص / سناریو | ۲۰ سال اخیر (مبنا) | SSP2-4.5 & SPP1-2.6 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|---|---|---|---|---|
| بیشینهٔ بارش (mm) | ۲۵۱ | ۲۲۰–۲۳۵ | ۱۹۰–۲۱۰ | ۱۹۰ > |
| وضعیت پهنهٔ شمالی | تمرکز بارش در ارتفاعات | جابه‌جایی به ترازهای بالاتر | انقباض شدید پهنه | زوال ساختاری |
| تغذیهٔ آب زیرزمینی | متوسط (رو به کاهش) | کاهش نسبی | بحرانی | قطع تغذیهٔ طبیعی |
| تأثیر بر کاربری زمین | توسعه بی‌رویه کالبدی | ضرورت محدودیت بارگذاری | اجبار به بازآفرینی نفوذپذیر | مخاطرهٔ جدی فرونشست |
| اولویت سیاستگذاری | مدیریت مصرف | انطباق زیرساختی | تاب‌آوری سیلاب شهری | انتقال پایتخت/تخلیه زون‌های خطر |

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تحلیل آینده‌پژوهانهٔ الگوهای بارشی تهران تحت سناریوهای نسل ششم (CMIP6)، نشان‌دهندهٔ یک دگرگونی در ساختار هیدرولوژیک و پایداری زیستی این کلان‌شهر است که فراتر از نوسانات آماری، موجودیت اقتصاد شهری و امنیت سکونتی پایتخت را هدف قرار داده است. با دقت در نقشه‌های مستخرج از سناریوهای خوش‌بینانه SSP1-2.6 و SSP2-4.5، مشاهده می‌شود که حتی در صورت پایبندی به پروتکل‌های جهانی کاهش انتشار، تهران با پدیده بی‌ثباتی فضایی روبه‌رو است؛ به طوری که مقادیر بیشینهٔ بارش از ۲۵۱ میلی‌متر در ۲۰ سال اخیر به محدودهٔ ۲۲۰ میلی‌متر انقباض یافته و هسته‌های بارشی به سمت ترازهای ارتفاعی بالاتر جابه‌جا شده‌اند که این امر به معنای کاهش بازدهی زیرساخت‌های فعلی انتقال آب و افزایش هزینه‌های پمپاژ برای مدیریت شهری است. در سناریو میانه (SSP3-7.0)، این وضعیت با تداخل اثرات «جزیرهٔ حرارتی تهران» وارد فاز بحرانی می‌شود؛ به گونه‌ای که گرمایش القایی کالبد شهر، مانع از نشست رطوبت و بارش‌های آرام (تغذیه‌کنندهٔ سفره‌ها) شده و در عوض با ایجاد صعود اجباری، فراوانی رگبارهای حدی و سیلاب‌های ناگهانی را می‌تواند افزایش دهد که این تغییرات، مستقیم پایداری زیرساخت‌های دفع آب‌های سطحی را با مخاطره مواجه می‌کند. اما در بدبینانه‌ترین حالت (SSP5-8.5)، نقشه‌ها حکایت از یک تغییر ساختاری دارند که در آن مقادیر بارش در پهنه‌های

کوهستانی به زیر ۱۹۰ میلی‌متر و در دشت شهری به حدود ۱۵۰ میلی‌متر می‌تواند کاهش یابد؛ این وضعیت به معنای قطع تغذیه طبیعی سفره‌های زیرزمینی است که با توجه به نرخ بالای فرونشست در مناطق جنوبی شهر تهران، به تخریب بازگشت‌ناپذیر سازه‌ها و افت شدید ارزش دارایی‌های شهری در این مناطق منجر خواهد شد. در مجموع، انقباض پهنه‌های پربارش در شمال و جابه‌جایی الگوها در دشت، تهران را با یک فشار مضاعف روبه‌رو کرده است که در آن سیاست‌های فعلی بارگذاری جمعیتی و توسعهٔ کالبدی، مشابهتی با واقعیت‌های هیدرولوژیکی افق ۲۰۴۵ نداشته و ضرورت بازنگری در اسناد آمایش سرزمین را به یک الزام حیاتی تبدیل می‌کند.

## بحث و تحلیل

نتایج حاصل از واکاوی پراکنش مکانی بارش در زیرحوضهٔ ۴۱۳۳، بیانگر رخداد تغییر در رژیم هیدرولوژیک کلان‌شهر تهران تحت تأثیر تغییر اقلیم است. در حالی که الگوی بلندمدت ۷۰ساله، پایداری هسته‌های پربارش در ارتفاعات شمالی را به عنوان مخازن طبیعی تأمین آب نشان می‌داد، مقایسهٔ آن با دو دهه اخیر مؤید وقوع پدیدهٔ انقباض مکانی پهنه‌های پرباران است که در بخش‌های مرکزی و جنوبی شدت بیشتری یافته است. این انقباض نشان‌دهنده تداخل اثرات تغییر اقلیم با توسعهٔ فیزیکی شهر و تشدید جزیرهٔ حرارتی تهران است؛ در افق ۲۰سالهٔ آینده، خروجی میانهٔ مدل‌های اقلیمی نسل ششم تحت سناریوهای مسیر مشترک اجتماعی–اقتصادی، تصویری بحرانی از ناپایداری فضایی را ترسیم می‌کند که در آن، زوال بارش در ارتفاعات شمالی به معنای قطع شریان‌های حیاتی تغذیهٔ دشت تهران خواهد بود. این روند، فشار مضاعفی بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند و با کاهش تراز آب، نرخ فرونشست زمین در مناطق جنوبی و مرکزی را به صورت نمایی افزایش می‌دهد که پیامد مستقیم آن، تخریب زیرساخت‌های حیاتی و افت شدید ارزش دارایی‌ها در زون‌های تحت تنش است. لذا، به خلاف مطالعاتی که فقط بر روند میانگین تمرکز داشتند، یافته‌های این پژوهش تبیین می‌کند که جابه‌جایی مکانی پهنه‌های بارشی، عامل اصلی تهدیدکنندهٔ پایداری اقتصاد شهری و امنیت سکونتی در تهران است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستگذاری

تحلیل آینده‌پژوهانه حاضر هشداری جدی برای حکمرانی شهری تهران صادر می‌کند، چرا که شکاف ایجادشده میان الگوی پایدار تاریخی و سناریوهای محتمل آتی نشان‌دهندهٔ عبور کلان‌شهر تهران از آستانه‌های تحمل اکولوژیکی است. حتی در خوش‌بینانه‌ترین سناریو، کاهش نسبی بارش نسبت به گذشتهٔ دور اجتناب‌ناپذیر است، اما در سناریوی بدبینانه، زوال ساختاری منابع آب می‌تواند پایه‌های امنیت زیستی شهر را به‌شدت تضعیف کند. محدودیت اصلی این پژوهش، عدم قطعیت ذاتی مدل‌های گردش عمومی جو و دشواری تفکیک دقیق اثرات توسعهٔ کالبدی از تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی بود که تلاش شد با بهره‌گیری از رویکرد میانگین‌گیری از چندین مدل معتبر تعدیل شود. با توجه به این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود سیاست‌های بازآفرینی شهری تهران به سمت رویکردهای نوین تغییر جهت دهد و از طریق الزام به استفاده از کف‌سازی‌های نفوذپذیر در فضاهای عمومی، ظرفیت نفوذ روان‌آب‌های ناشی از رگبارهای حدی ارتقا یابد. همچنین، ضرورت دارد در مقررات ملی ساختمان، الزامات سخت‌گیرانه‌ای برای تعبیه سیستم‌های جمع‌آوری آب باران، به‌ویژه در پهنه‌های شمالی شهر، تدوین شود. از منظر آمایش سرزمین نیز، توقف بارگذاری جمعیتی و فعالیت‌های آب‌بر در پهنه‌های جنوب و جنوب غرب تهران که بیشترین پتانسیل خطر فرونشست ناشی از انقباض بارش را دارند، می‌تواند به عنوان یک اولویت راهبردی در اسناد بالادستی لحاظ شود تا پایداری بلندمدت این کلان‌شهر در برابر مخاطرات اقلیمی تضمین شود.

## سپاسگزاری

مقالهٔ حاضر مستخرج از نتایج فاز نخست پروژهٔ پژوهشی «تدوین برنامهٔ راهبردی مواجهه شهر تهران با پدیدهٔ تغییر اقلیم» است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های **نهاد راهبری و پایش طرح‌های توسعه شهری تهران** به عنوان کارفرمای پروژه، صمیمانه قدردانی کنند .

## منابع


1. Madani K. The water-energy-food nexus in Tehran: Challenges and policy solutions. 2021; 285: 112-124.
2. Hejazizadeh P. Investigation of temperature and precipitation changes in Tehran during the last half century. Journal of Urban Ecology Researches. 2009;1(1): 43-56. *[Persian]*
3. IPCC. Climate Change. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2022.
4. Binesh N, Niksokhan MH, Sarang A, Amin AS. Detecting the trend of annual and seasonal temperature and precipitation changes in Tehran during the period. 2017;1984-2014. Nivar, 41(96-97): 36-45. *[Persian]*
5. Shamsipour AA, Esmaeili A, Mohammadi A. Determining the temporal and spatial trend and change point of precipitation and maximum temperature in Tehran. Journal of Physical Geography Research. 2025. *[Persian]*
6. Khansalari M, Mohammadi A. Spatiotemporal analysis of precipitation extremes over Iran based on CMIP6 multi-model ensemble under SSP scenarios. Climatic Change. 2024; 177(3): 45.
7. Fakhri M, Farzaneh MR, Eslamian S, Khordadi MJ. Uncertainty assessment of downscaled rainfall: impact of climate change on the probability of flood. Journal of Flood Engineering. 2012; 3(1): 19-28.
8. Fakhri M, Farzaneh MR, Eslamian S, Khordadi MJ. Confidence interval assessment to estimate dry and wet spells under climate change in Shahrekord Station, Iran. Journal of Hydrology Engineering. 2011. 2013; 18(7): 911-918.
9. Fakhri M, Farzaneh MR, Eslamian S, Hosseinipour EZ. Uncertainty analysis of downscaled precipitation using LARS-WG statistical model in Shahrekord station, Iran. In World Environmental and Water Resources Congress. 2011. pp. 4572-4578.
10. Mahmoudi, M, et al. Integration of InSAR subsidence maps and climate change scenarios for urban resilience planning in Tehran. Ecological Questions. 2025; 36(1): 12-28.
11. Mahmoudi, M, et al. Integration of InSAR subsidence maps and climate change scenarios for urban resilience planning in Tehran. Ecological Questions. 2025; 36(1): 12-28.
12. Fazeli Farsani I, Farzaneh MR, Besalatpour AA, Salehi M H, Faramarzi M. Assessment of the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources under CMIP3 and CMIP5 models in a highly mountainous watershed. Theoretical and Applied Climatology. 2019; 136(1): 169-184.
13. Farzaneh MR, Eslamian S, Samadi SZ, Akbarpour A. An appropriate general circulation model (GCM) to investigate climate change impact. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2012; 2(1): 34-47.
14. Rostamian R, Eslamian S, Farzaneh MR. Application of standardised precipitation index for predicting meteorological drought intensity in Beheshtabad watershed, central Iran. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2013; 3(1): 63-76.
15. Zamani Nuri A, Farzaneh MR, Fakhri M, Dokoohaki H, Eslamian S, Khordadi MJ. Assessment of future climate classification on Urmia Lake basin under effect of climate change. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2013; 3(2): 128-140.
16. Abdolhosseini M, Farzaneh MR. Investigation of internal uncertainty sources of change factor method in downscaling of climatic parameters of future period. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 2014; 7(12): 941-949.
17. Hadizadeh M, Farzaneh MR, Shahidi A, Khordadi MJ. Quantitative assessment and prediction of drought under climate change impact in Birjand region, Iran. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2014; 4(3): 245-264.
18. Mahmoudi, M, et al. Integration of InSAR subsidence maps and climate change scenarios for urban resilience planning in Tehran. Ecological Questions. 2025; 36(1): 12-28.
19. Zamani A, et al. Policy-making for climate change adaptation in Middle Eastern megacities: A review of Tehran's challenges. Journal of Water and Climate Change. 2023; 14(5): 1420-1435.
20. National Adaptation Plan (NAP). Islamic Republic of Iran's climate resilience strategy for water resources (2025-2030). Department of Environment, Tehran. 2024.