

Projection of Climate Change Impacts on Seasonal and Annual Precipitation and Temperature of Arak City during Future Decades

Zaniar Fatehi ¹ , Hasti Saeedi ² , Kamran Chapi ^{3*}

1. Department of Water Resources Engineering and Management, Tose Danesh Institute of Higher Education, Sanandaj, Iran.
Email: Zaniar.f35@gmail.com
2. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
Email: Hst.saeedi@gmail.com
3. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
(Corresponding author).
Email: K.Chapi@uok.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Article Article History: Received: 05 November 2025 Revised: 18 January 2026 Accepted: 07 February 2026 Published: 30 June 2026 Use Your Device to Scan and Read the Article Online  Keywords: Projection, Climate Change, SSPs Scenarios, Arak, Future Decades.	Climate change is the most significant challenge facing humanity in the 21st century, as it exerts numerous negative impacts on all dimensions of human life, both in urban and rural environments; however, its consequences are more pronounced in urban settings. It is essential to study the impacts of climate change on all aspects of urban life, including the city's climatic aspects such as precipitation and temperature, so that by understanding these impacts and projecting them into the future, better managerial planning for the city can be provided. In this research, the effects of climate change on seasonal and annual precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in the city of Arak were projected under the new IPCC climate scenarios, including SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, for future decades up to the year 2100. To utilize the outputs of the CanESM5 general circulation model at regional and local scales, the SDSM model was employed for downscaling. The results indicate a decrease in precipitation across all seasons and on an annual scale; such that an average annual precipitation reduction of -13.3% per decade is projected, with the greatest reduction occurring in summer (-29.2%) and the least in spring (-12.0%). Maximum temperature shows a decrease in winter (-16.4%) and an increase in other seasons, with an annual average of +0.4%. Minimum temperature exhibits a gradual increase in all seasons, with an annual average of +0.14% and the greatest increase in spring (+19.9%). The findings of this study suggest that the city of Arak will become drier over the next seven decades and warmer in all seasons except winter. Urban managers in Arak should, from now on, consider long-term managerial planning for appropriate urban designs and the adoption of modern and green technologies to cope with severe drought and heat in the city.

Cite this article: Fatehi, Z., Saeedi, H., & Chapi, K. (2026). Projection of Climate Change Impacts on Seasonal and Annual Precipitation and Temperature of Arak City during Future Decades. *Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(2), 39-66. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.144873.1037>



© The Author(s) retain the copyright

Publisher: University of Kurdistan

Extended Abstract

Introduction

Climate change is one of the most critical global challenges of the 21st century, with significant social, economic, environmental, and health impacts. Urban areas are particularly vulnerable because of high population density, concentrated infrastructure and industries, complex transportation systems, and socioeconomic pressures. In Iran, these impacts are intensified by predominantly arid and semi-arid conditions, with rising temperatures and declining precipitation expected to increase water scarcity, heat stress, air pollution, and environmental degradation. Since more than 75% of the population lives in urban areas, understanding future climate conditions is essential for effective urban planning, climate adaptation, and sustainable development. This issue is particularly important in Arak, the capital of Markazi Province and an important industrial, historical, sporting, and tourism center in Iran. Located at approximately 1,718 m above sea level, Arak has a cold semi-arid continental climate, with cold winters, hot and dry summers, and average annual precipitation of about 346 mm. Its location among mountains and near the Meighan Wetland increases its sensitivity to changing climatic conditions. Therefore, this study projects seasonal and annual changes in precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in Arak up to 2100 under the IPCC Sixth Assessment Report Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), including SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. These scenarios represent different levels of socioeconomic development, mitigation efforts, and future greenhouse gas emissions, providing a range of plausible climate futures for Arak.

Methodology

Daily observational data for precipitation and temperature were sourced from the Arak synoptic station, covering the baseline period 1979–2014. To bridge the scale mismatch between global climate models and local applications, outputs from the CanESM5 global circulation model were statistically downscaled using the Statistical Downscaling Model (SDSM). This hybrid approach combines regression-based methods with weather generators, calibrated against large-scale NCEP

reanalysis predictors for the same period. SDSM is widely applied in regional climate studies, including in Iran, due to its efficiency in handling station-level data and capturing local variability. Model performance was rigorously evaluated using multiple metrics: mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), mean bias error (MBE), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and Willmott's index of agreement (WAI). These indicators confirmed the model's robust simulation capabilities for precipitation and temperatures at seasonal and annual scales.

Results and Discussion

The downscaling model's evaluation across six metrics demonstrated high fidelity in reproducing historical patterns, affirming its reliability for multi-decadal projections. This accuracy is crucial given precipitation's inherent variability, which often poses greater modelling challenges than temperature. Projections reveal a consistent decline in precipitation across all seasons and scenarios, with winter decreases averaging -12.4% per decade, spring -12.0%, summer -29.2%, and autumn -21.1%. Annually, the reduction averages -13.3% per decade, aligning with broader Iranian trends of diminishing rainfall under CMIP6 ensembles, potentially intensifying aridity in central regions like Markazi Province. Temperature projections exhibit nuanced seasonal patterns. Winter maximum temperatures decline markedly at -16.4% per decade across scenarios, suggesting cooler daytime highs possibly linked to altered atmospheric circulation or aerosol effects. In contrast, maximum temperatures rise in spring (+2.6% per decade), summer (+6.4%), and autumn (+7.0%), with an annual increase of +0.4% per decade. Minimum temperatures warm uniformly: +3.5% (winter), +19.9% (spring), +6.2% (summer), and +15.8% (autumn) per decade, yielding +14.0% annually. This asymmetric warming stronger in minima indicates reduced diurnal ranges in most seasons, a common climate change signal that heightens nighttime heat stress. Seasonal interactions highlight vulnerabilities: summer experiences the sharpest precipitation drop alongside modest minimum temperature rises, potentially straining water resources during peak demand. Spring shows milder

precipitation declines but the largest minimum temperature increases, risking earlier heat onset. The widest maximum-minimum divergence occurs in winter (~20 percentage points), while summer shows near-convergence (~0.2 points). Precipitation's greater stochasticity complicates precise decadal pinpointing of extremes, unlike temperature trends. These findings resonate with national projections: Iran may face 10–35% precipitation reductions and 2–5°C warming by century's end, with central urban areas like Arak particularly affected due to existing semi-aridity.

Conclusion

Over the next seven decades to 2100, Arak is projected to become progressively drier across all seasons, with cooler winter maxima but warmer conditions overall, especially in non-winter periods and nighttime minima. These

Ethical Considerations

Funding

This work is financially supported by the research grant number of S/2/9/39229 under the authority of the corresponding author.

Author Contributions

The first author was responsible for the initial research design, data collection and analysis, and preparation of part of the initial manuscript. The second author conducted the data analysis and statistical tests. The third author (corresponding author) was responsible for redesigning the research, supervising the data analysis, and revising and completing the initial manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

shifts portend increased risks of water shortages, heatwaves, reduced agricultural viability, and heightened urban heat island effects in this industrial center. Proactive adaptation is essential. Urban authorities should prioritize resilient infrastructure, such as enhanced water management systems, heat-resistant building designs, and expanded green spaces incorporating modern technologies like efficient irrigation and renewable energy. Sustainable development must balance physical expansion with demographic pressures, urban fabric preservation, and climatic variability, adhering to technical and environmental standards. By integrating these measures, Arak can mitigate extreme dryness and heat, fostering a more resilient future amid global climate challenges. Continued research, including multi-model ensembles, will refine these projections and inform policy.

The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the writing of this article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Data Availability Statement

The data are available from the authors upon reasonable request.

Acknowledgments

The authors sincerely thank everyone who assisted with the conduct of this research, particularly those who contributed to the quality assessment of the articles.



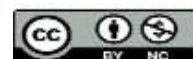
پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و دمای فصلی و سالانه شهر اراک در دهه‌های آتی

زانبار فاتحی^۱، هستی سعیدی^۲، کامران چپی^{۳*}

۱. گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، مؤسسه آموزش عالی توسعه دانش، سنجند، ایران. رایانامه: Zaniar.f35@gmail.com
۲. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنجند، ایران. رایانامه: Hst.saeedi@gmail.com
۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنجند، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: K.Chapi@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخچه مقاله:	
دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴	
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸	
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸	
انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	
از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید	
	
واژه‌های کلیدی: پیش‌نمایی، تغییر اقلیم، سناریوهای SSPs، اراک، دهه‌های آتی.	

استناد: فاتحی، زانبار؛ سعیدی، هستی و چپی، کامران. (۱۴۰۵). پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و دمای فصلی و سالانه شهر اراک در دهه‌های آتی. پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۲ (۲)، ۳۹-۶۶. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.144873.1037>



مقدمه

کره زمین در طول تاریخ همیشه تغییرات اقلیمی داشته است. رابرت هوک^۱ (۱۶۳۵-۱۷۰۳) برای اولین بار در قرن هفدهم میلادی با مشاهده فسیل لاک‌پشت‌ها و آمونیت‌های بسیار بزرگ مربوط به دوره ژوراسیک بالایی در منطقه دورست^۲ انگلستان، اظهار کرد که این جانوران زمانی در آب و هوای گرم‌تر می‌زیسته‌اند (شوارتزباخ^۳، ۱۹۶۳؛ لین^۴ و کیان^۵، ۲۰۲۲). این مطالعه، اولین سند علمی معتبر برای تغییرات اقلیمی بوده و بعد از آن مطالعات اقلیم‌شناسی دیرینه، انقلاب بزرگی در شناسایی سیستم‌های اقلیمی کره زمین ایجاد نمود (زاگوس^۶ و همکاران، ۲۰۰۱). در گذشته، تغییرات اقلیمی عمدتاً به صورت ظهور تناوبی عصرهای یخبندان و بین یخبندان (بارانی و بین بارانی در بعضی مناطق) بوده (سالینگر^۷، ۲۰۰۵؛ کوک^۸ و همکاران، ۲۰۱۸) ولی از نیمه دوم قرن بیستم تا حال حاضر بیشتر به صورت گرمایش جهانی ظاهر شده است (کِر^۹، ۲۰۰۷؛ لنتون^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳؛ روی‌چودوری^{۱۱} و میشرای^{۱۲}، ۲۰۲۴).

تغییر اقلیم به عنوان بزرگ‌ترین چالش جهانی در قرن بیست و یکم، یکی از خطرناک‌ترین تهدیدها برای زندگی انسان و سلامت محیط زیست کره زمین است (روساتی^{۱۳}، ۲۰۱۶؛ المختار^{۱۴}، ۲۰۱۸). بعد از انقلاب صنعتی در نیمه قرن بیستم، فعالیت‌های انسان تأثیرات جدی بر روی اقلیم زمین گذاشته است، به طوری که این فعالیت‌ها باعث شده که میانگین دمای زمین تقریباً ۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا کند. هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^{۱۵} در سال ۲۰۰۱ پیش‌نمایی نموده است که میانگین افزایش درجه حرارت کره زمین تا سال ۲۰۵۰ به ۱/۵ درجه سلسیوس خواهد رسید (IPCC، ۲۰۰۱) و ممکن است تا سال ۲۱۰۰ به ۵/۸ درجه سانتیگراد برسد (IPCC، ۲۰۱۸).

افزایش دمای میانگین کره زمین موجب کاهش برف و پوشش‌های یخی، طولانی‌تر شدن فصول رشد، افزایش بارندگی‌هایی با شدت زیادتر و همچنین زودرسی فصل بهار در نیمکره شمالی خواهد شد (روزنویگ^{۱۶}، ۲۰۱۸). در نتیجه، انسان با طیف گسترده‌ای از مخاطرات زیست‌محیطی مانند خشکسالی، سیل و آتش‌سوزی مواجه خواهد شد. اگر میانگین دمای کره زمین ۱/۵ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا کند، دوره بازگشت خشکسالی‌های سخت و تأثیرگذار بر بخش کشاورزی و سیلاب‌هایی با دوره بازگشت ۵۰ ساله به ترتیب ۲۴ تا ۶۱ و ۲/۴ تا ۵/۴ درصد افزایش پیدا می‌کند (آرنل^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۹).

تبعات همه‌جانبه تغییر اقلیم بر زندگی انسان هم در محیط‌های شهری و هم در محیط‌های روستایی مشاهده شده است اما به دلیل ساختار متمرکز شهری از لحاظ جمعیتی، مصالح به کار رفته در خانه‌سازی در محیط‌های شهری، تمرکز بیشتر صنایع، سیستم حمل و نقل متفاوت در مناطق شهری، پوشش گیاهی کمتر در شهرها و خیلی دلایل دیگر، این تبعات در مناطق شهری بیشتر نمایان شده و اثرات منفی بیشتری برجا گذاشته است (زلناکوا^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۵). بنابر عقیده میلز^{۱۹} (۲۰۰۶)، مفهوم جدید آرمان‌شهر، شهری پایدار است که اثرات آن بر محیط زیست بدون کاهش کیفیت زندگی، کمینه بوده و هیچ پدیده طبیعی و غیرطبیعی نتواند جریان زندگی را در آن مختل نماید. در حال حاضر حدود ۴/۵ میلیارد نفر یعنی تقریباً ۵۴ درصد از جمعیت کره زمین در شهرها زندگی می‌کنند که تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۶ میلیارد نفر (۶۶ درصد) خواهد رسید (دیلمن^{۲۰}، ۲۰۱۳؛ IPCC، ۲۰۱۴). شهرها اگرچه مساحتی تقریباً ۲ درصدی از سطح کره زمین را اشغال می‌کنند (گِرم^{۲۱} و همکاران، ۲۰۰۰)، اما به عنوان بارزترین چشم‌اندازهای انسانی، تأثیرات غیر قابل انکاری بر کارکرد اکوسیستم‌های طبیعی جهان دارند (ماسک^{۲۲} و همکاران، ۲۰۰۰).

1. Robert Hooke
2. Dorset
3. Schwarzbach
4. Lin
5. Qian
6. Zachos
7. Salinger
8. Cook
9. Kerr
10. Lenton
11. Roychoudhury
12. Mishra
13. Rossati
14. Al-Mukhtar
15. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
16. Rosenzweig
17. Arnell
18. Zelenáková
19. Mills
20. Dieleman
21. Grimm
22. Masek

شهرهای کره زمین مخصوصاً کلان‌شهرها در آینده نزدیک با چند چالش اساسی از جمله رشد ناموزون جمعیت، زاغه‌نشینی و تغییر اقلیم مواجه خواهند بود (ویلهم^۱، ۲۰۱۱). این چالش‌ها به‌خصوص تغییر اقلیم موجب تشدید فشارهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی بر روی شهرها خواهد شد (شافریل^۲ و همکاران، ۲۰۲۲) چون شهرها مهم‌ترین منبع تولید گازهای گلخانه‌ای هستند، به‌طوری که حدود ۸۵ درصد این گازها در داخل شهرها و یا در نزدیکی آنها تولید می‌شود (اوکه^۳، ۱۹۹۷). تأثیر تغییر اقلیم در افزایش دمای محیط در مناطق شهری بیشتر از مناطق روستایی است که این پدیده به "جزیره حرارتی شهری"^۴ مشهور شده است (چاپمن^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). این تأثیر طوری خواهد بود که جزیره حرارتی شهری در بعضی مناطق تا حدود ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت (مک‌کارتی^۶ و همکاران، ۲۰۱۰) که میزان آن بستگی به مورفولوژی شهر، خصوصیات فیزیکی شهر، گستره شهر، آزادشدن گرما از پسماندها و فاکتورهای محلی اقلیمی دارد (آرنفیلد^۷، ۲۰۰۳). اگرچه تأثیر تغییر اقلیم بر کیفیت زندگی و فعالیت‌های انسان فقط محدود به مناطق شهری نیست، اما این تأثیر بدلیل اولاً ویژگی‌های جمعیتی و اقتصادی-اجتماعی شهرها، دوماً تمرکز زیرساخت‌ها در مناطق شهری و سوماً اثرات تجمعی بیشتر در مناطق شهری، در این مناطق بیشتر احساس می‌شود (پاتز^۸ و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیندلی^۹ و همکاران، ۲۰۰۶).

تغییر اقلیم در محیط‌های شهری موجب اختلال در آسایش اقلیمی و راحتی فیزیولوژیک انسان خواهد شد (لتون و همکاران، ۲۰۲۳؛ خوش اخلاق و همکاران، ۱۳۸۹؛ سوره و محمدی، ۱۴۰۳)؛ امنیت غذایی و زیست محیطی را در شهرها به خطر خواهند انداخت (کاوایانی‌راد و همکاران، ۱۴۰۱)؛ باعث گسترش شدید بیابان در حاشیه شهرها خواهد شد (برنا، ۱۴۰۰)؛ کاهش فرآورده‌های شیلاتی را به دنبال خواهد داشت که بر اقتصاد شهری تأثیرگذار خواهد بود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ربانی‌ها، ۱۳۹۹)؛ آسایش حرارتی داخل ساختمان‌های مناطق شهری را با مشکل مواجه خواهد کرد (غفاری گیلانده و همکاران، ۱۳۹۸)؛ صنعت توریسم را در مناطق شهری با خطر جدی روبرو می‌سازد (عابدی و صداقت، ۲۰۲۰؛ اشتایگر^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۴)؛ کاهش پوشش برف را در مناطق شهری به دنبال خواهد داشت (مربانجی و همکاران، ۱۴۰۲)؛ و استرس و اضطراب را در جوامع شهری افزایش می‌دهد (اوانز^{۱۱}، ۲۰۱۹).

یکی دیگر از تبعات اصلی تغییر اقلیم، افزایش دما در مناطق شهری است که بر سلامت انسان، سلامت اکوسیستم شهری و مصرف آب و انرژی تأثیرگذار است (آلکوفورادو^{۱۲} و آندراده^{۱۳}، ۲۰۰۸). افزایش مرگ و میر افراد کهنسال، گسترش بیماری‌های تنفسی و عفونی، افزایش آلودگی هوا و افزایش فراوانی و غلظت ریزگردها از شایع‌ترین اثرات افزایش دما در مناطق شهری با تأثیر بر سلامت انسان می‌باشد (کالکشتاین^{۱۴} و گرین^{۱۵}، ۱۹۹۷؛ دیویس^{۱۶} و همکاران، ۲۰۰۴؛ مارتین^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۲؛ میسلین^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۶؛ پوتیر^{۱۹} و همکاران، ۲۰۲۱؛ کرل^{۲۰} و فوگل^{۲۱}، ۲۰۲۳؛ یانگ^{۲۲} و همکاران، ۲۰۲۴). از نظر سلامت اکوسیستم شهری، می‌توان به تغییر فضاهای سبز شهری اشاره نمود که ترکیب گونه‌ای آنها تغییر پیدا خواهد کرد؛ فراوانی گونه‌های مهاجم بیشتر می‌شود و همچنین نظم فنولوژیک گونه‌های گیاهی شهری بهم خواهد خورد (دوکس^{۲۳} و مونی^{۲۴}، ۱۹۹۹؛ هالکی^{۲۵} و همکاران، ۲۰۲۳؛ وارگاس هرناندز^{۲۶} و همکاران، ۲۰۲۴؛ پیلی^{۲۷} و همکاران، ۲۰۲۴).

1. Wilhelm
2. Shaffril
3. Oke
4. Urban heat island
5. Chapman
6. McCarthy
7. Arnfield
8. Patz
9. Lindley
10. Steiger
11. Evans
12. Alcoforado
13. Andrade
14. Kalkstein
15. Greene
16. Davis
17. Martin
18. Misslin
19. Pottier
20. Kearl
21. Vogel
22. Yang
23. Dukes
24. Mooney
25. Halecki
26. Vargas-Hernández
27. Pili

مصرف بیش از اندازه آب و انرژی در بعضی فصول و کاهش دسترسی به منابع انرژی در فصول دیگر از دیگر تبعات افزایش دما در اثر تغییر اقلیم در مناطق شهری است (سولکی^۱ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پومونی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳؛ چن^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). به همین دلیل در این تحقیق، سعی شده است که یکی از مهمترین مراکز جمعیتی، صنعتی، توریسم ورزشی و تاریخی کشور یعنی شهر اراک، مرکز استان مرکزی، از لحاظ تغییرات بارش و دما تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با جدیدترین سناریوهای پیشنهادی گزارش ششم IPCC (۲۰۲۱) یعنی سناریوهای "مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs^۴)" شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 توسط مدل گردش عمومی CanESM5^۵ که جزو سری مدل‌های CIMP6^۶ است و همچنین مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM^۷ بررسی شود و تغییرات این عناصر اقلیمی برای ۷ دهه آینده تا سال ۲۱۰۰ پیش‌نمایی گردد. این تحقیق، به دنبال پاسخ به این سؤال بوده است که با توجه به قرارگیری شهر اراک در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و حساسیت بالای این اقلیم به تغییر اقلیم، آیا شهر اراک در آینده می‌تواند همچنان به عنوان یکی از مراکز جمعیتی، صنعتی و به خصوص توریسم ورزشی و تاریخی کشور محسوب شود و یا تغییر اقلیم چهره این شهر را تغییر خواهد داد. این پیش‌نمایی زود هنگام به مدیران شهری فرصت کافی خواهد داد تا با در نظر گرفتن تمامی امکانات، راه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش تبعات منفی آن را پیدا کنند. این بررسی‌ها کمک می‌کنند تا برنامه‌ریزی شهری، مدیریت منابع و سیاست‌های انطباقی برای کاهش آسیب‌ها تدوین شود، به‌طوری‌که نیاز به توسعه زیرساخت‌های سبز برای کاهش گرما و جذب کربن و استفاده از مصالح خنک‌کننده در توسعه فیزیکی شهر برای کنترل دمای شهری مد نظر قرار گیرد.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

در سطح جهانی، مناطق شهری کانون‌های اصلی تأثیرات تغییرات اقلیمی هستند و پیش‌نمایی‌ها نشان‌دهنده تشدید گرمایش و تغییر رژیم‌های بارش تا سال ۲۱۰۰ می‌باشند (ملسه^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل CanESM5 و روش ریزمقیاس‌نمایی SDSM، افزایش مداوم دما را در تمامی سناریوها نشان می‌دهند، اما تغییرات بارش بسته به منطقه و عرض جغرافیایی متفاوت است. آرگوتسو^۹ و همکاران (۲۰۱۳) اثر تغییر اقلیم را بر دمای شهر سیدنی در استرالیا برای دهه‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که دماهای بیشینه و کمینه شهر سیدنی در اثر تغییرات اقلیمی افزایش پیدا خواهند نمود که این افزایش بیشتر متوجه دمای کمینه می‌باشد، به‌طوری‌که تفاوت دماهای بیشینه و کمینه در فصول زمستان و بهار زیادتر از سایر فصول بوده است. چاپمن و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر تغییر اقلیم بر افزایش دما را در تعداد زیادی از کلان‌شهرهای بزرگ دنیا بررسی نمودند و مشاهد کردند که در بیش از ۸۶ درصد آنها، تغییر اقلیم باعث افزایش دمای شهر و جزیره حرارتی مربوطه شده است. فنتا مکونن^{۱۰} و دیسه^{۱۱} (۲۰۱۸) با استفاده از دو مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و LARSWG اقدام به بررسی تغییرات دما در حوضه رودخانه نیل نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دمای بیشینه ۰/۴ تا ۳/۴ و دمای بیشینه ۰/۳ تا ۱/۴ درجه سلسیوس تا سال ۲۱۰۰ افزایش پیدا خواهد کرد. پیش‌نمایی بارش و دماهای بیشینه و کمینه در ۱۲ ایستگاه کشور عراق نشان داد که بارش تحت هر سه سناریوی انتشار RCP2.6^{۱۲}، RCP4.5 و RCP8.5 از سال ۲۰۲۰ به سوی سال ۲۱۰۰ کاهش و دماهای بیشینه و کمینه افزایش پیدا خواهند کرد (المختار و قاسم^{۱۳}، ۲۰۱۹). فونگ و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۰) با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM اقدام به پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر فاکتورهای اقلیمی حوضه رودخانه وو جیا تو بون^{۱۵} در کشور ویتنام نمودند. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که در دهه ۲۰۸۰ دمای کمینه حدوداً ۱/۲۴ تا ۱/۹۶ درجه سلسیوس و دمای بیشینه حدوداً ۲/۶۷ تا ۳/۹ درجه سلسیوس افزایش پیدا می‌کند. در آسیا، الگوهای مشابهی مشاهده می‌شود. برای پکن به عنوان یک ابرشهر، پیش‌نمایی‌های مدل CanESM5 و SDSM، افزایش دما به میزان ۱/۵ تا ۵ درجه سلسیوس تا سال ۲۱۰۰ را نشان می‌دهند که بیش‌ترین مقدار در سناریوی SSP5-8.5 (۴ تا ۵ درجه برای دماهای بیشینه) است. پیش‌نمایی‌های بارش روندهای مختلفی نشان می‌دهند که شامل احتمال افزایش

1. Solecki
2. Pomoni
3. Chen
4. Shared Socioeconomic Pathways
5. Canadian Earth System Model version 5
6. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
7. Statistical DownScaling Model
8. Melesse
9. Argüeso
10. Fenta Mekonnen
11. Disse
12. Representative Concentration Pathway
13. Qasim
14. Phuong et al.
15. Vu Gia Thu Bon

رویدادهای اقلیمی شدید ولی با کاهش کلی سالانه در شرایط انتشار بالا می‌باشد که این امر جزایر گرمایی شهری و خطر سیل را تشدید می‌کند (لو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). در غرب آفریقا، پیش‌نمایی‌های شهری منطقه بزرگ آکرا^۲ تحت سناریوهای SSP با استفاده از مدل CanESM5 و مدل SDSM، افزایش دماهای بیشینه به میزان ۰/۹۸ تا ۱/۷۳ درجه و دماهای کمینه ۱/۷۵ تا ۴/۸۳ درجه تا سال ۲۱۰۰ در سناریوی SSP5-8.5 و کاهش بارش و گرایش به رویدادهای شدید را نشان می‌دهد. این امر تنش گرمایی و سیل را در مناطق پرجمعیت افزایش می‌دهد (سیابی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). در مناطق مرتفع یمن مانند صنعا، استفاده از SDSM و مدل CanESM5 نشان‌دهنده گرمایش ۲ تا ۴ درجه و کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی بارش در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است که شهرهای دچار تنش آبی را تهدید می‌کند (الفلاحی^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات در آمریکای لاتین، مانند مناطق شهری مرکز شیلی (مثل سانتیاگو)، با استفاده از مدل CanESM5 و مدل SDSM برای پیش‌نمایی اقلیمی، نشان از افزایش ۲ تا ۵/۸۵ درجه در دماهای بیشینه و ۱/۵ تا ۴/۵۸ درجه در دماهای کمینه تا دهه ۲۰۷۰ در سناریوی SSP5-8.5 همراه با کاهش ۵ تا ۱۷ درصدی بارش دارد. این امر می‌تواند منجر به خشکسالی‌های فراوان‌تر شود و تأمین آب شهری و کشاورزی در مناطق حاشیه شهری را تحت تأثیر قرار دهد (سالازار^۵ و همکاران، ۲۰۲۴). در مناطق حاشیه صحرای آفریقا، حوضه رودخانه بالایی وابه-شبله^۶ در اتیوپی که شامل مراکز شهری مانند هاواسا^۷ می‌شود، تغییرات قابل‌توجهی در آینده فاکتورهای اقلیمی دما و بارش دیده می‌شود. بر اساس خروجی‌های مدل CanESM5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، پیش‌نمایی‌ها افزایش میانگین دما به میزان ۰/۸۹ تا ۳/۶ درجه سلسیوس را تا دهه ۲۰۷۰ (۲۰۸۶-۲۰۵۴) نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۲۲ نشان می‌دهند که بیش‌ترین افزایش در سناریوی SSP5-8.5 (تا ۳/۶ درجه) رخ می‌دهد. انتظار می‌رود بارش ۲۱ تا ۵۰ درصد کاهش یابد که شدیدترین کاهش در سناریوی SSP5-8.5 (۵۰/۳۳ درصد کاهش در دهه ۲۰۷۰) است و منجر به کوتاه‌تر شدن فصل بارانی و افزایش خطر خشکسالی می‌شود (بشیر^۸ و همکاران، ۲۰۲۵). به طور کلی، پیش‌نمایی‌های اقلیمی در شهرهای جهان با استفاده از CanESM5-SDSM نشان‌دهنده افزایش گرمایش ۱ تا ۵ درجه تا سال ۲۱۰۰ است که سناریوی SSP1-2.6 آن را به کمتر از ۲ درجه محدود می‌کند، در حالی که روندهای بارش متفاوت بوده و حاکی از کاهش در مناطق نیمه‌خشک شهری (۵۰-۲۰ درصد) و افزایش احتمالی در شهرهای تحت تأثیر مانسون دارد.

مناطق شهری ایران که ۷۵ درصد جمعیت کشور را در خود جای داده‌اند، به دلیل خشکی و شهرنشینی سریع، با ریسک‌های شدید اقلیمی روبرو هستند. مطالعات با استفاده از CanESM5 و SDSM بر گرمایش و تغییرات متغیر بارش تأکید دارند و پیامدهایی برای شهرهایی ایران به همراه دارند. علیجانی و همکاران (۱۳۸۹) تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر دمای شهر یزد را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که با وجود آنکه تا سال ۱۹۹۷، دمای شهر یزد تغییر معنی‌داری نداشته است ولی از این سال به بعد مقدار متوسط سالانه آن به صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرده است که این مسأله می‌تواند در درازمدت توسعه شهری را مختل نماید و باید در برنامه‌ریزی شهری مورد توجه قرار گیرد. فاتحی و شاهویی (۱۳۹۹) اقدام به شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر میانگین دمای فصلی و سالانه شهر همدان نمودند. بر اساس تحقیق آن‌ها میانگین دمای بیشینه در دوره‌های آتی (۲۰۲۵ تا ۲۰۵۰) و (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۵) و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز افزایش و در فصل زمستان کاهش پیدا می‌کند. نصیری و همکاران (۱۴۰۰) دریافتند که کلان‌شهر تهران در طی ۳ دهه گذشته با افزایش دمای هوا به میزان ۱/۵ درجه سانتیگراد مواجه بوده است که منجر به کاهش ۱۵ درصدی رطوبت هوا شده و این تغییرات باید در برنامه‌ریزی شهری در آینده مد نظر قرار گیرد. به طور کلی در سطح کشور ایران، مناطق شهری ممکن است افزایش گرمایش ۱/۵ تا ۵ درجه و بارش متغیر (۳۶- ±۱۰٪) را تجربه کنند که منجر به پیامدهای شدیدی مانند مخاطرات سلامتی، افزایش تقاضای انرژی و فشارهای مهاجرتی خواهد شد (هونگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). قاضی و جیحونی (۲۰۲۲) با استفاده از CMIP6 تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 اقدام به پیش‌نمایی بارش و دمای شهر تبریز تا سال ۲۱۰۰ نمود و نتیجه گرفت که بارش در هر سه سناریو کاهش و دما افزایش پیدا خواهد نمود. در سواحل جنوبی ایران (بنادر شهری مانند بندرعباس)، پیش‌نمایی اقلیمی با استفاده از مدل CanESM5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، افزایش میانگین دما به میزان ۱/۰۵ تا ۱/۴۳ درجه سلسیوس را در دوره ۲۰۹۵-۲۰۷۱ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نسبت به ۱۹۸۰-۲۰۰۹ پیش‌نمایی می‌کند. بارش دارای نوساناتی است، به‌طوری‌که افزایش تا ۱۵۰-۸۵ میلی‌متر در برخی دوره‌ها تحت سناریوی SSP5-8.5، اما کاهش در دوره‌های دیگر (۹- تا ۲۵- میلی‌متر) را نشان می‌دهد که منجر به چرخه‌های

1. Lu
2. ACCRA
3. Siabi
4. Al-Falahi
5. Salazar
6. Wabe-Shebele
7. Hawassa
8. Beshir
9. Hong

سیل-خشکسالی می‌شود. زیرساخت‌های شهری ممکن است از افزایش سطح دریا و جهش تقاضای آب آسیب ببیند (اسفنده و همکاران، ۲۰۲۴). در حوضه طالقان که یکی از تأمین‌کننده‌های آب تهران است، پیش‌نمایی با استفاده از مدل CanESM5 و SDSM، افزایش دما به میزان ۲/۷ تا ۵/۱ درجه و افزایش ۵۲ تا ۶۰ درصدی بارش تا سال ۲۰۷۰ را نشان می‌دهد که حاکی از پاییزهای مرطوب‌تر اما زمستان‌های خشک‌تر است. این مسأله باعث تغییر در چرخه هیدرولوژی منطقه شده، به‌طوری‌که منجر به افزایش ۵۳-۴۸ درصدی دبی با خطر سیل بیشتر برای مناطق پایین‌دست شهری خواهد شد (حاجی‌محمدی و همکاران، ۲۰۲۴). برای حوضه جازموریان (تأثیرگذار بر شهرهای جنوب‌شرقی ایران)، نتایج مدل CanESM5 نشان از افزایش کلی بارش (۱۲۰-۰ درصد) تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای SSP را می‌دهد که مراکز شهری ممکن است از آب بیشتر بهره‌برند اما با رویدادهای شدید جوی مانند سیل روبرو خواهند شد (واعظی و همکاران، ۲۰۲۵).

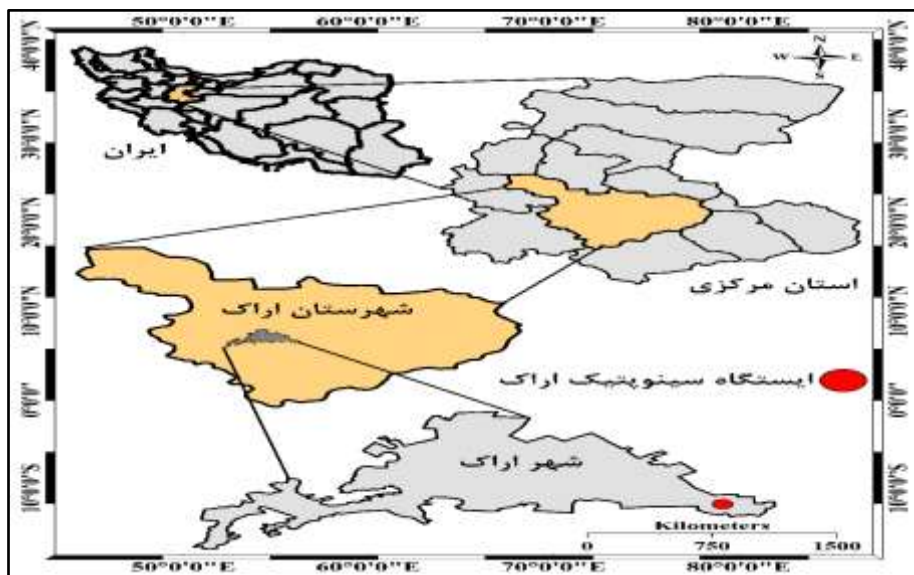
تحلیل منابع بررسی شده نشان می‌دهد که شهرهای واقع در عرض‌های جغرافیایی پایین و متوسط مانند اراک که در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، به مصرف انرژی سرمایشی بیشتری در فصول گرم نسبت به نیاز به انرژی گرمایشی در فصول سرد تحت تأثیر تغییر اقلیم نیاز خواهند داشت و این مسأله‌ای است که باید به جد مورد توجه برنامه‌ریزان شهری در مقیاس ملی، استانی و شهری قرار بگیرد. این موضوع در مقیاس جهانی سالهاست که در برنامه‌ریزی‌های شهری مورد توجه است (اوکه، ۱۹۹۷) و باید برای شهرهای کشور هم مد نظر باشد. بررسی اقلیمی هر شهر ضرورتی است که برای برنامه‌ریزی مقابله به تغییر اقلیم ضروری است. از این رو، فلاحتی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی بر روی دمای شهر اراک به این نتیجه رسیدند که تا سال ۲۰۲۵، دمای این شهر مرتباً در حال افزایش خواهد بود. این نتایج توسط عساکره و شاه‌منصوری (۱۳۹۵) مورد تأیید قرار گرفت چون آنها دمای هوای شهر اراک را با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برای دهه ۲۰۳۰ پیش‌نمایی نمودند و مشاهده کردند که دمای میانگین، کمینه و بیشینه اراک به ترتیب از ۱۳/۹۸، ۷/۱۱ و ۲۰/۸۳ به حدود ۱۴/۵، ۷/۸ و ۲۳/۲ درجه سلسیوس خواهد رسید. همپنین حلیان و همکاران (۱۴۰۰) از وجود جزایر حرارتی شهری در نقاط مختلف شهر اراک خبر داده‌اند که از سال ۲۰۰۲، شدت آنها افزایش چشمگیری داشته است. تغییر اقلیم بر شهرهایی با آب و هوای خشک و شهرهای صنعتی مانند اراک تأثیر بیشتری نسبت به سایر شهرها دارد. شهر اراک اگرچه شهر صنعتی می‌باشد اما دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و هر نوع تغییری در دمای این شهر می‌تواند به طور مستقیم بر میزان عرضه و تقاضای آب تأثیرگذار باشد. با روند رو به رشد دما در جهان و مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک امکان دارد این شهر در دهه‌های آتی با انواع تنش‌های آبی، اجتماعی و مهاجرتی مواجه شود، به‌طوری‌که مرکزیت آن به عنوان یک شهر صنعتی، توریستی و مرکز ورزشی با خطرات جدی مواجه گردد؛ بنابراین، لازم است که تغییرات اقلیمی این شهر برای دهه‌های آتی مورد بررسی و ارزیابی قرار بگیرد. با توجه به اینکه انسان همواره به دنبال راهی بوده است که بتواند با استفاده از تاریخچه اقلیمی گذشته، تغییرات اقلیمی آینده را پیش‌نمایی نموده تا راه‌کارهایی در راستای مقابله با آن پیدا کند (تیرنی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰)؛ بنابراین، ضروری است که تغییرات فاکتورهای اقلیمی در گذشته بررسی و نوسانات و روند آنها در اثر تغییر اقلیم در آینده به صورت واضحی مشخص گردد (مک‌کارتی و همکاران، ۲۰۱۰). به همین دلیل، هدف این پژوهش، پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش، دمای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه شهر اراک تحت سناریوهای اقلیمی جدید مبتنی بر آخرین گزارش IPCC یعنی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دهه آتی تا سال ۲۱۰۰ میلادی می‌باشد. برای اینکه بتوان درک و فهم درستی از اثرات تغییر اقلیم بر مناطق شهری داشت، لازم است که تغییرات اقلیمی آینده پیش‌نمایی و شبیه‌سازی شوند. در این صورت می‌توان تصمیمات و سیاست‌های درست را برای مقابله و یا کاهش خطرهای اقتصادی و اجتماعی این تغییرات به‌ویژه در مناطق شهری اتخاذ نمود. تحقیق حاضر به دنبال بررسی تغییر عناصر اقلیمی بارش و دما در شهر اراک با استفاده از جدیدترین سناریوهای پیشنهادی IPCC می‌باشد که در مطالعات قبلی کمتر در نظر گرفته شده است.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، شهر اراک، مرکز استان مرکزی است که با جمعیتی حدود ۶۰۰ هزار نفر، از شهرهای مهم کشور و یکی از قطب‌های صنعتی ایران به شمار می‌رود. این شهر در ۳۴ درجه، ۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی و ۴۹ درجه، ۴۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی قرار دارد و در ارتفاع متوسط ۱۷۱۸ متر از سطح دریا قرار دارد. اراک دارای زمستان‌های سرد و نسبتاً مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک است و اقلیم آن بر اساس طبقه‌بندی دوماستن، نیمه‌خشک و بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه، خشک و سرد است. میانگین بارش سالانه حدود ۳۴۶ میلی‌متر و تعداد روزهای یخبندان سالانه بین ۶۵ تا ۱۲۰ روز گزارش شده است. ویژگی‌های طبیعی پیرامون شهر، از جمله تالاب

میقان، دشت فراهان و کوه‌های اطراف، در شکل‌گیری شرایط اقلیمی منطقه نقش دارند. همچنین، شهر اراک دارای جاذبه‌های طبیعی و تاریخی متعددی است و به دلیل میزبانی برخی رویدادهای ورزشی، از ظرفیت‌های گردشگری ورزشی نیز برخوردار است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی شهر اراک

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

برای ریزمقیاس‌نمایی بارش، دمای بیشینه و کمینه، از داده‌های اقلیمی دوره مشاهداتی ۳۵ ساله از ۱۹۷۹-۲۰۱۴ استفاده شد. چون متغیر بزرگ مقیاس NCEP در گزارش ششم IPCC (AR6) برای دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ می‌باشد، به همین دلیل دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد. اطلاعات اقلیمی ایستگاه اراک در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول ۱. اطلاعات اقلیمی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اراک

فصول سال	بارش (mm)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)
زمستان	۱۵۵/۴	۵/۶	-۵/۹
بهار	۸۶/۸	۱۷/۷	۴/۱
تابستان	۲/۴	۳۲/۲	۱۷/۹
پاییز	۱۰۱/۱	۲۱/۰	۷/۷
سالانه	۳۴۵/۷	۱۹/۲	۶/۰

منبع: عساکره و شاه‌منصوری، ۱۳۹۵

روش تحقیق

این پژوهش تحت عنوان تحقیقات اقلیمی شناخته می‌شود که در دسته‌بندی تحقیقات محیطی و اقلیمی قرار می‌گیرد. داده‌های مشاهداتی دما و بارش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اراک از سایت (<https://open-meteo.com/>) دانلود شد. در این پژوهش برای برآورد پارامترهای هواشناسی از خروجی مدل CanESM5 که جزو سری مدل‌های CMIP6 و گزارش ششم IPCC است، استفاده شد. CanESM5 یک مدل اقلیمی جامع جهانی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا توسعه یافته است. این مدل برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و نوسانات تاریخی، انجام پیش‌نمایی‌های اقلیمی در مقیاس صد ساله و تولید پیش‌نمایی‌های فصلی و ده‌ساله طراحی شده است. CanESM5 شامل اجزایی برای جو، اقیانوس، یخ دریا، سطح زمین و چرخه‌های کربن است و رویکردی جامع به مدل‌سازی اقلیم ارائه می‌دهد (سوارت^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). CMIP6 آخرین مرحله از یک تلاش مشترک برای مدل‌سازی اقلیمی است که هدف آن بهبود و استانداردسازی مدل‌های اقلیمی مورد استفاده برای پیش‌نمایی شرایط اقلیمی آینده می‌باشد. CMIP6 بخشی از چارچوب وسیع‌تر IPCC است که به ارزیابی علم مرتبط

با تغییرات اقلیمی می‌پردازد (آیرینگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). در این تحقیق از متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP برای بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی استفاده شد. داده‌های بزرگ مقیاس اقلیمی به دلیل دقت پایین (۳۰۰-۱۰۰ کیلومتر) نیاز به ریزمقیاس‌نمایی دارند تا به دقت ۵۰-۱ کیلومتر برسند و ویژگی‌های محلی و منطقه‌ای را بهتر ثبت کنند. ریزمقیاس‌نمایی تأثیر ویژگی‌های محلی مانند توپوگرافی، کاربری اراضی و خطوط ساحلی را دقیق‌تر مدل‌سازی کرده و پیش‌بینی‌های آب و هوایی را بهبود می‌بخشد. این روش اطلاعات دقیق‌تری برای بخش‌هایی مانند کشاورزی، منابع آب و برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌کند و عملکرد مدل‌ها را در پیش‌بینی رویدادهای شدید جوی ارتقا می‌دهد (ویلای^۲ و ویگلی^۳، ۱۹۹۷؛ گیورگی^۴ و مرنز^۵، ۱۹۹۹). در این تحقیق از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده شد. داده‌های روزانه مشاهداتی هواشناسی (دما و بارش) به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته می‌شوند. اجرای مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM دارای هفت مرحله می‌باشد: (۱) جمع‌آوری داده‌ها؛ داده‌های اقلیمی مشاهده‌شده (مانند دما، بارش) را برای مکان مورد مطالعه جمع‌آوری شود؛ (۲) پیش‌پردازش داده‌ها؛ انجام کنترل کیفیت، تبدیل و پیش‌غیرالگوری متغیرهای پیش‌نمایی کننده؛ (۳) کالیبراسیون مدل؛ از داده‌های مشاهداتی برای کالیبراسیون روابط آماری بین پیش‌نمایی‌کننده‌های بزرگ مقیاس (از مدل‌های گردش عمومی جو) و متغیرهای اقلیمی محلی استفاده می‌شود؛ (۴) اعتبارسنجی مدل؛ مدل با استفاده از مجموعه داده‌های مستقل اعتبارسنجی شود تا دقت و قابلیت اطمینان آن را تضمین شود؛ (۵) توسعه سناریو؛ مدل کالیبره شده را به خروجی‌های گردش عمومی جو اعمال کنید تا سناریوهای اقلیمی آینده برای مکان مورد مطالعه تولید شود؛ (۶) تست تشخیصی؛ انجام آزمایش‌های تشخیصی پایه و تحلیل‌های آماری برای ارزیابی عملکرد مدل و (۷) تحلیل نمودارها؛ از ابزارهای گرافیکی برای تصویرسازی داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده و سناریوها استفاده می‌شود (ویلای و همکاران، ۱۹۹۸؛ ویلای و دوسون، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۴). مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) مجموعه‌ای از سناریوهای تغییرات اقلیمی هستند که آینده‌های ممکن مختلف را بر اساس شرایط اجتماعی-اقتصادی متنوع توصیف می‌کنند. این مسیرها برای گزارش ارزیابی ششم (AR6) توسط IPCC توسعه یافته‌اند و چارچوبی برای بررسی چگونگی تأثیر مسیرهای توسعه جهانی مختلف بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهند. بر اساس مطالعات آیرینگ و همکاران (۲۰۱۶)، اونیل^۶ و همکاران (۲۰۱۶)، هوسفادر^۷ (۲۰۱۹) و IPCC (۲۰۲۱)، سناریوهای اقلیمی SSP به ۵ گروه تقسیم می‌شوند:

- الف) SSP1-1.9: پایداری و مسیری سبز با تمرکز بر رفاه انسانی و کاهش مصرف منابع؛ بر اساس این سناریو، جهان به تدریج به سمت مسیری پایداری حرکت می‌کند و بر توسعه فراگیر که به مرزهای زیست‌محیطی احترام می‌گذارد، تأکید می‌کند.
- ب) SSP1-2.6: میانه راه (میانه با رشد نابرابر و تخریب متوسط محیطی)؛ بر اساس این سناریو، جهان مسیری را دنبال می‌کند که در آن روندهای اجتماعی، اقتصادی و فناوری به طور قابل توجهی از الگوهای تاریخی منحرف نمی‌شوند.
- ج) SSP2-4.5: رقابت منطقه‌ای (رقابت منطقه‌ای با ملی‌گرایی، نابرابری و آسیب‌های شدید زیست‌محیطی)؛ بر اساس این سناریو، ملی‌گرایی و درگیری‌های منطقه‌ای مسائل جهانی را به حاشیه می‌رانند و سیاست‌ها بر امنیت ملی و منطقه‌ای متمرکز می‌شوند.
- د) SSP3-7.0: نابرابری (نابرابری شدید و سیاست‌های زیست‌محیطی ناموفق)؛ فاصله بین جوامع توسعه یافته و آن‌هایی که در مرحله توسعه پایین‌تری متوقف شده‌اند، افزایش می‌یابد.
- ه) SSP5-8.5: توسعه (توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با نوآوری بالا اما چالش‌های زیست‌محیطی گسترده)؛ بازارهای جهانی به طور فزاینده‌ای یکپارچه شده‌اند که منجر به نوآوری‌ها و پیشرفت‌های فناوری بر اساس بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی می‌شود.
- در این پژوهش، بارش و دماهای بیشینه و کمینه شهر اراک تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای ۷ دهه آینده پیش‌نمایی خواهند شد.

در این پژوهش از پنج شاخص برای ارزیابی کارایی مدل‌های شبیه‌سازی استفاده شد. این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

- (۱) خطای میانگین مطلق: این معیار به طور معمول در آمار و تحلیل داده‌ها برای کمی‌سازی اندازه متوسط خطاها در مجموعه‌ای از پیش‌نمایی‌ها بدون در نظر گرفتن جهت آن‌ها استفاده می‌شود. خطای مطلق میانگین به عنوان میانگین تفاوت‌های مطلق بین مقادیر پیش‌نمایی شده و مقادیر واقعی محاسبه می‌شود (ویلای و دوسون، ۲۰۰۱).

$$MAE = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} |P_i - O_i|}{n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. Eyring
2. Wilby
3. Wigley
4. Giorgi
5. Mearns
6. O'Neill
7. Hausfather

خطای میانگین مطلق بین صفر و $+\infty$ متغیر است. هر چه به صفر نزدیکتر باشد، مدل‌سازی بهتر است.

(۲) خطای جذر میانگین مربعات: خطای میانگین مربعات ریشه یک معیار رایج برای اندازه‌گیری دقت پیش‌نمایی‌های یک مدل است. این معیار تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌نمایی شده توسط یک مدل را کمی می‌کند. خطای جذر میانگین مربعات مفید است زیرا اندازه‌ای از بزرگی متوسط خطاها در یک مجموعه داده را با در نظر گرفتن جهت آن‌ها ارائه می‌دهد (ویلبای و دوسون، ۲۰۰۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

هر چه مقدار به دست آمده از این شاخص کمتر باشد، دلیل به‌تر بودن شبیه‌سازی است.

(۳) میانگین درصد خطای مطلق: خطای میانگین درصد مطلق، که به عنوان انحراف درصدی مطلق میانگین نیز شناخته می‌شود، معیاری برای دقت پیش‌نمایی در آمار است. این معیار دقت را به صورت نسبتی بیان می‌کند که با محاسبه میانگین خطاهای درصدی مطلق بین مقادیر پیش‌نمایی شده و مقادیر واقعی به دست می‌آید.

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|O_i - P_i|}{|O_i|} \quad \text{رابطه (۳)}$$

مقدار خطای میانگین درصد مطلق هر چقدر کمتر باشد، بهتر است ولی به طور کلی زیر ۲۵ درصد قابل قبول است.

(۴) خطای میانگین بایاس: این خطا تفاوت بین مقادیر پیش‌نمایی شده و مقادیر واقعی را اندازه‌گیری می‌کند و نشان می‌دهد که آیا پیش‌نمایی‌ها به‌طور سیستماتیک بالاتر یا پایین‌تر از مقادیر واقعی تمایل دارند.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad \text{رابطه (۴)}$$

خطای میانگین بایاس هر چقدر به صفر نزدیکتر باشد، بهتر است.

(۵) ضریب ناش^۱-ساتکلیف^۲: ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) یک معیار پرکاربرد در هیدرولوژی است که برای ارزیابی قدرت پیش‌نمایی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این معیار داده‌های مشاهداتی را با داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل مقایسه می‌کند تا تعیین کند که مدل چقدر به‌خوبی عمل می‌کند (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مقدار این ضریب بین $-\infty$ و ۱ متغیر است. هر چه به ۱ نزدیکتر باشد، بهتر است. به طور کلی اگر مقدار آن کمتر از ۰/۵ باشد، غیرقابل قبول خواهد بود؛ اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ باشد، رضایت‌بخش خواهد بود؛ اگر بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ باشد، خوب و اگر بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد عالی خواهد بود.

(۶) نمایه توافق ویلموت: شاخص توافق ویلموت، که به عنوان شاخص توافق نیز شناخته می‌شود، یک معیار استاندارد شده است که برای اندازه‌گیری درجه توافق بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌نمایی شده در مدل‌ها استفاده می‌شود. این شاخص در سال ۱۹۸۱ توسط ویلموت معرفی شد و به طور گسترده‌ای در هیدرولوژی و سایر زمینه‌ها برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویلموت^۳، ۱۹۸۱).

$$WAI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

این شاخص بین صفر و ۱ متغیر است و هر چه به ۱ نزدیکتر باشد، شبیه‌سازی بهتر انجام شده است.

در تمامی روابط ۱ تا ۶، P_i داده شبیه‌سازی شده، O_i داده مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی و n تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

یافته‌ها و بحث

ارزیابی شبیه‌سازی بارش، دمای بیشینه و کمینه

شبیه‌سازی بارش، دمای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه شهر اراک برای ۷ دهه آینده تا سال ۲۱۰۰ میلادی در این مطالعه توسط ۶ شاخص خطای میانگین مطلق، خطای جذر میانگین مربعات، میانگین درصد خطای مطلق، خطای میانگین بایاس، ضریب ناش-ساتکلیف و نمایه توافق ویلموت ارزیابی گردید که نتایج آن در جدول شماره ۲ آمده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که شبیه‌سازی بارش، دمای بیشینه و

دمای کمینه شهر اراک در ۷ دهه آینده به صورت کاملاً قابل قبول و رضایت‌بخشی انجام شده است و مدل‌های مورد استفاده کاملاً قادر به تخمین درست این عناصر اقلیمی بوده‌اند.

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی شبیه‌سازی بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه شهر اراک برای ۷ دهه آینده تا سال ۲۱۰۰ میلادی

شاخص‌های ارزیابی	بارش		دمای بیشینه		دمای کمینه	
	فصلی	سالانه	فصلی	سالانه	فصلی	سالانه
MA	۲/۲۹	۱/۶۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱
RMSE	۲/۹۶	۱/۶۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱
MAPE	%۵/۲۰	%۰/۸۰	%۰/۰۰۰	%۰/۰۰۰	%۰/۰۰۰	%۰/۰۰۰
MBE	۰/۱۰۳	۱/۶۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱
NSE	۰/۹۹۲	-	۱	-	۱	-
WAI	۰/۹۹۸	-	۱	-	۱	-

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

تغییر اقلیم و تغییرات فصلی و سالانه بارش

تأثیر تغییر اقلیم بر بارش شهر اراک در فصول مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج بررسی تغییرات بارش نشان داد که این متغیر اقلیمی در فصول مختلف سال تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی در ۷ دهه آینده (۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰) کاهش پیدا خواهد کرد. در فصل زمستان و تحت سناریوی SSP1-2.6، میزان کاهش متوسط بارش ۱۲/۹- درصد در هر دهه بوده که بیش‌ترین میزان کاهش ۱۴/۸- درصد در دهه ۲۰۸۰ و کم‌ترین آن ۱۰/۴- درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. در سناریوی SSP2-4.5، میزان متوسط کاهش بارش ۱۰/۰- درصد در هر دهه خواهد بود که بیش‌ترین میزان کاهش ۱۶/۱- درصد در دهه ۲۰۴۰ و کم‌ترین میزان کاهش ۳/۷- درصد در دهه ۲۰۸۰ خواهد بود. میزان متوسط کاهش بارش در سناریوی SSP5-8.5 حدود ۱۴/۴- درصد در هر دهه خواهد بود که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کاهش بارش در این سناریو ۱۹/۷- و ۸/۱- درصد به ترتیب در دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۶۰ خواهد بود. تغییرات بارش در فصل زمستان در سناریوهای مختلف در شکل ۲ الف نشان داده شده است.

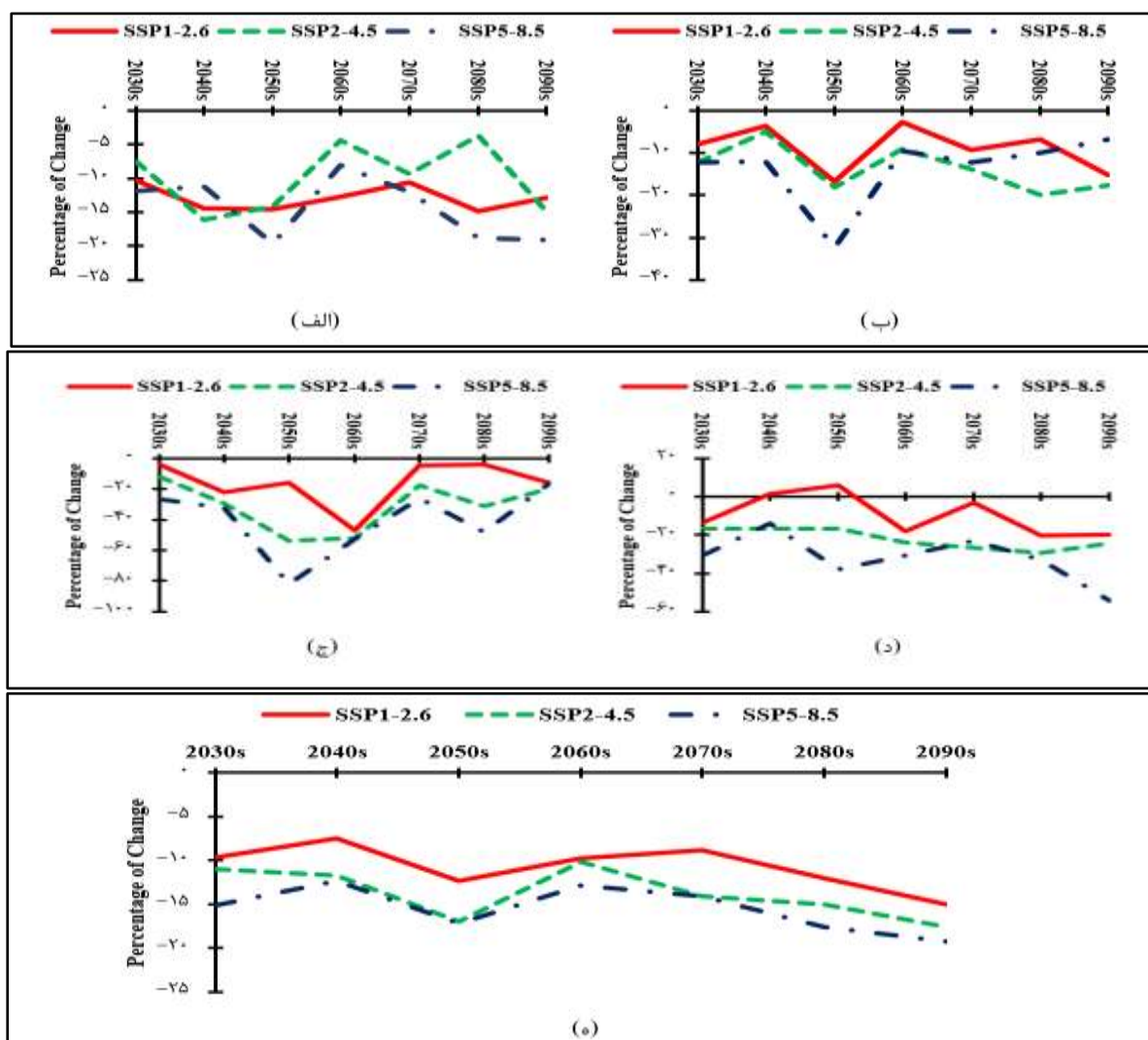
در فصل بهار، میزان متوسط کاهش بارش در سناریوی SSP1-2.6، حدود ۸/۹- درصد در هر دهه می‌باشد که ۱۶/۷- درصد و ۳/۶- درصد در دهه‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کاهش بارش خواهند بود. تحت سناریوی SSP2-4.5، میزان متوسط کاهش بارش شهر اراک حدود ۱۳/۷- درصد در هر دهه خواهد بود. در این سناریو، بیشینه کاهش میزان بارش ۱۹/۹- درصد در دهه ۲۰۸۰ و کمینه آن ۵/۰- درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. میزان متوسط کاهش بارش تحت سناریوی SSP5-8.5 خیلی شبیه به سناریوی SSP2-4.5 می‌باشد که میزان آن ۱۳/۶- درصد است. کاهش ۳۲/۲- درصدی، بیشینه کاهش بارش در این سناریو است که در دهه ۲۰۵۰ اتفاق می‌افتد در حالی که کمینه کاهش بارش ۶/۷- درصد است که در دهه ۲۰۹۰ رخ خواهد داد. تغییرات بارش در فصل بهار در سناریوهای مختلف در شکل ۲ ب نشان داده شده است.

در سناریوی SSP1-2.6 در فصل تابستان، شهر اراک کاهش ۱۶/۲- درصدی بارش را به طور متوسط در ۷ دهه آینده تجربه خواهد کرد. بیشینه و کمینه کاهش بارش در این سناریو به ترتیب حدود ۲۲/۳- و ۳/۹- درصد خواهد بود که در دهه‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۸۰ اتفاق خواهد افتاد. تحت سناریوی SSP2-4.5، میزان متوسط کاهش بارش در هر دهه ۳۰/۹- درصد خواهد بود که بیشینه کاهش مربوط به دهه ۲۰۶۰ با میزان ۵۲/۰- درصد و کمینه آن مربوط به دهه ۲۰۳۰ با میزان ۱۱/۹- درصد خواهد بود. بیش‌ترین میزان متوسط کاهش بارش شهر اراک در فصل تابستان در سناریوی SSP5-8.5 پیش‌نمایی می‌شود که میزان آن ۴۰/۶- درصد می‌باشد. تحت این سناریو، بیشینه و کمینه میزان کاهش بارش به ترتیب ۵۲/۸- درصد در دهه ۲۰۶۰ و ۱۶/۵- درصد در دهه ۲۰۹۰ خواهد بود. شکل ۲ ج به‌وضوح تغییرات بارش در شهر اراک را در سناریوهای مختلف در فصل تابستان نشان داده است.

در فصل پاییز و تحت سناریوی SSP1-2.6، میزان کاهش بارش ۹/۶- درصد در هر دهه تا پایان سال ۲۱۰۰ خواهد بود که بیش‌ترین کاهش بارش در دهه ۲۰۸۰ با میزان ۲۰/۱- درصد و کم‌ترین کاهش بارش در دهه ۲۰۵۰ با میزان ۱۶/۱- درصد خواهد بود. تحت سناریوی SSP2-4.5، میزان متوسط کاهش بارش شهر اراک حدود ۲۲/۰- درصد در هر دهه پیش‌نمایی می‌شود. در این سناریو، بیشینه و کمینه کاهش بارش در این شهر به میزان به ترتیب ۲۹/۲- درصد در دهه ۲۰۸۰ و ۱۶/۷- درصد بوده که در دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ اتفاق خواهند افتاد. میزان متوسط کاهش بارش در سناریوی SSP5-8.5 به مقدار ۳۱/۹- درصد در هر دهه پیش‌نمایی شده است که تحت این سناریو، بیشینه کاهش

بارش ۵۴/۳- درصد و کمینه آن ۱۳/۸- درصد به ترتیب در دهه‌های ۲۰۹۰ و ۲۰۴۰ خواهد بود. تغییرات بارش در فصل پاییز در شهر اراک در شکل ۲ د نشان داده شده است.

نتایج بررسی سالانه تغییرات بارش در شهر اراک و پیش‌نمایی آن در ۷ دهه آینده در سناریوهای مختلف اقلیمی نشان داد که میزان کاهش بارش سالانه در سناریوی SSP1-2.6، حدود ۱۰/۷- درصد در هر دهه تا پایان سال ۲۱۰۰ خواهد بود. در مقیاس سالانه، بیشینه میزان متوسط کاهش بارش به مقدار ۱۵/۰- درصد در دهه ۲۰۹۰ و کمینه آن به مقدار ۷/۴- درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. تحت سناریوی SSP2-4.5، میزان متوسط کاهش بارش ۱۳/۸- درصد در هر دهه پیش‌نمایی می‌شود که بیشینه و کمینه کاهش متوسط سالانه بارش به میزان به ترتیب ۱۷/۶- درصد و ۱۰/۱- درصد در دهه‌های ۲۰۹۰ و ۲۰۶۰ خواهد بود. مطالعه تغییرات بارش سالانه شهر اراک تحت سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد که میزان متوسط کاهش بارش سالانه حدود ۱۵/۵- درصد در هر دهه می‌باشد. بیشینه کاهش متوسط بارش سالانه ۱۹/۲- درصد در دهه ۲۰۹۰ پیش‌نمایی می‌شود در حالی که کمینه کاهش متوسط آن ۱۲/۴- درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. شکل ۲ ه تغییرات بارش سالانه شهر اراک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. درصد تغییرات بارش شهر اراک در فصول زمستان (الف)، بهار (ب)، تابستان (ج)، پاییز (د) و مقیاس سالانه (ه) تحت سه سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ۷ دهه آینده

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

تغییر اقلیم و تغییرات فصلی و سالانه دمای بیشینه

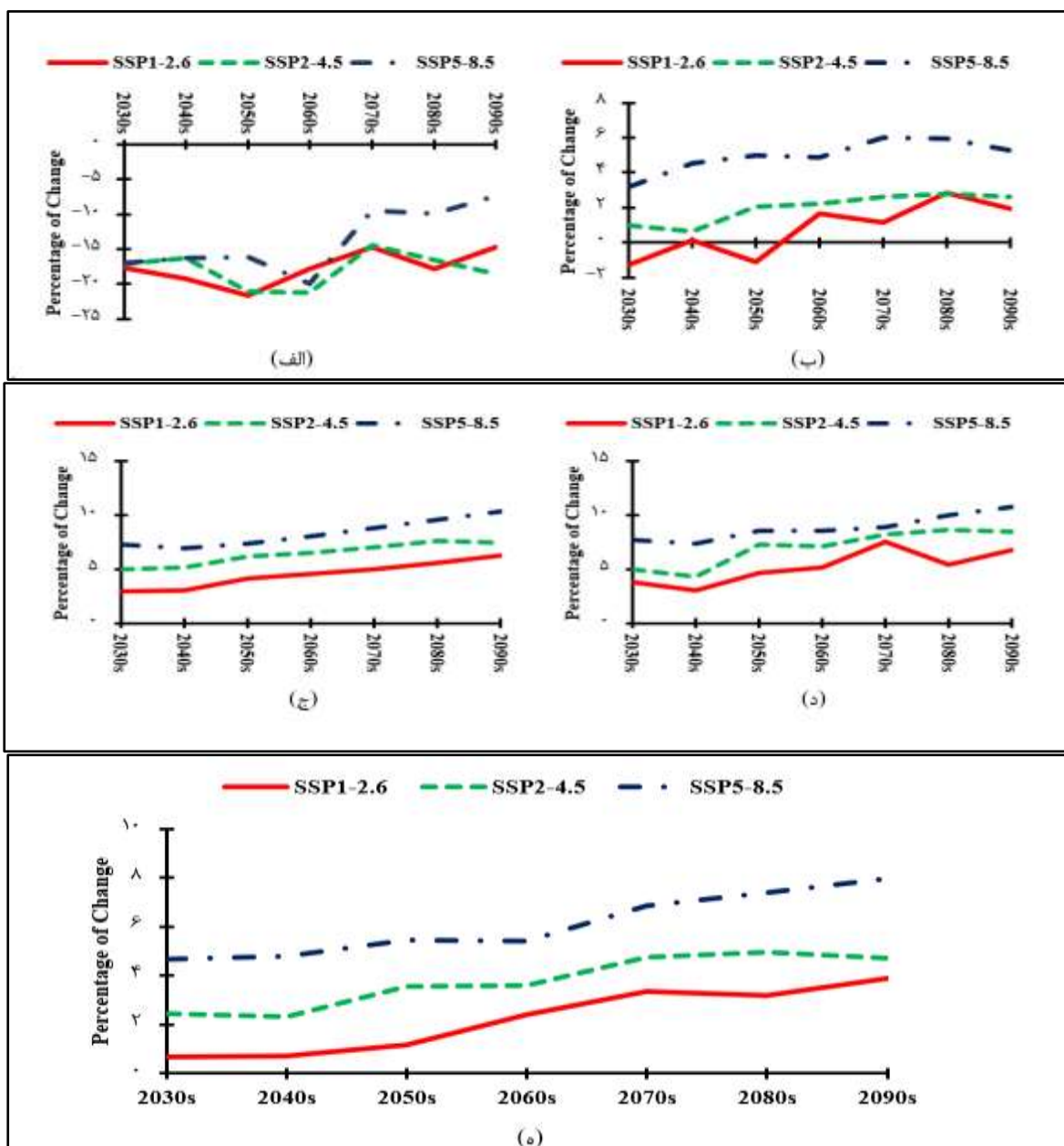
تأثیر تغییر اقلیم بر دمای بیشینه شهر اراک در فصول مختلف سال در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج بررسی تغییرات دمای بیشینه نشان داد که این متغیر اقلیمی در فصول مختلف سال تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی در ۷ دهه آینده (۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰) رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد به طوری که در فصل زمستان میزان آن کاهش و در سایر فصول و به صورت سالانه افزایش پیدا خواهد کرد. دمای بیشینه شهر اراک در فصل زمستان و تحت سناریوی اقلیمی SSP1-2.6 به میزان متوسط ۱۷/۷- درصد در هر دهه کاهش پیدا خواهد کرد که بیشینه میزان کاهش ۲۱/۷- درصد در دهه ۲۰۵۰ و کمینه میزان آن ۱۴/۶- درصد در دهه ۲۰۷۰ خواهد بود. پیش‌نمایی دمای بیشینه شهر اراک در سناریوی SSP2-4.5 نشان داد که این عنصر اقلیمی به طور متوسط در هر دهه به میزان ۱۷/۹- درصد کاهش خواهد داشت به طوری که بیشینه و کمینه کاهش دمای بیشینه به میزان ۲۱/۳- و ۱۴/۵- درصد در دهه‌های به ترتیب ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ اتفاق خواهد افتاد. سناریوی SSP5-8.5 در فصل زمستان برای دمای بیشینه شهر اراک میزان کاهش متوسط ۱۳/۷- درصد در هر دهه را پیش‌نمایی می‌کند که بیش‌ترین میزان کاهش در این سناریو ۲۰/۰- درصد در دهه ۲۰۶۰ و کم‌ترین میزان کاهش ۹/۵- درصد در دهه ۲۰۷۰ خواهد بود. تغییرات دمای بیشینه و پیش‌نمایی آن برای شهر اراک در فصل زمستان در سناریوهای مختلف در شکل ۳ الف نشان داده شده است.

پیش‌نمایی تغییرات دمای بیشینه شهر اراک در فصل بهار در سناریوی SSP1-2.6 نشان داد که این متغیر اقلیمی افزایش پیدا خواهد کرد به طوری که در هر دهه تا پایان سال ۲۱۰۰ به طور متوسط ۰/۷+ درصد افزایش دمای بیشینه در این شهر تجربه خواهد شد. بیشینه و کمینه میزان افزایش دمای بیشینه این شهر به ترتیب ۲/۹+ درصد در دهه ۲۰۸۰ و ۱/۳+ درصد در دهه ۲۰۳۰ پیش‌نمایی شده است. تحت سناریوی SSP2-4.5 میزان افزایش دمای بیشینه بیشتر خواهد بود چون متوسط افزایش ۲/۰+ درصد در هر دهه پیش‌نمایی می‌شود. بیشینه افزایش دمای بیشینه در این سناریو ۲/۸+ درصد خواهد بود که در دهه ۲۰۸۰ اتفاق خواهد افتاد و کمینه آن ۰/۷+ درصد خواهد بود که در دهه ۲۰۴۰ مشاهده خواهد شد. سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 افزایش دمای بیشینه بیشتری را برای شهر اراک پیش‌نمایی می‌کند به طوری متوسط افزایش دمای بیشینه ۵/۰+ درصد در ۷ دهه آینده تجربه خواهد شد. در این سناریو بیشینه افزایش دمای بیشینه ۶/۰+ درصد در دهه‌های ۲۰۷۰ و ۲۰۸۰ مشاهده خواهد شد و کم‌ترین افزایش دمای بیشینه به میزان ۳/۲+ درصد در دهه ۲۰۳۰ حس خواهد شد. شکل ۳ ب پیش‌نمایی دمای بیشینه شهر اراک را در دهه‌های آتی در فصل بهار تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نشان می‌دهد.

شهر اراک در فصل تابستان افزایش دمای بیشینه بیشتری را دهه‌های آتی تجربه خواهد نمود. تحت سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، مقدار ۴/۵+ درصد افزایش دما به طور متوسط در هر دهه پیش‌نمایی می‌شود که بیشینه آن ۶/۳+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و کمینه آن ۲/۹+ درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. متوسط افزایش دمای بیشینه در این شهر تحت سناریوی SSP2-4.5 به میزان ۶/۴+ درصد در هر دهه خواهد بود که بیشینه و کمینه آن ۷/۶+ و ۵/۰+ درصد به ترتیب در دهه‌های ۲۰۸۰ و ۲۰۳۰ خواهد بود. سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 افزایش دمای بیشینه شهر اراک را به طور متوسط ۸/۳+ درصد در هر دهه پیش‌نمایی می‌کند که بیشینه و کمینه این افزایش به ترتیب ۱۰/۳+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و ۶/۹+ درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. پیش‌نمایی دمای بیشینه شهر اراک در فصل تابستان در سناریوهای مختلف اقلیمی در شکل ۳ ج نشان داده شده است.

دمای بیشینه شهر اراک در فصل پاییز هم توأم با افزایش محسوس خواهد بود به طوری که تحت سناریوی SSP1-2.6 به طور متوسط ۵/۲+ درصد در هر دهه افزایش خواهد داشت که در این سناریو، بیشینه افزایش دمای بیشینه ۷/۵+ درصد خواهد بود که در دهه ۲۰۷۰ رخ خواهد داد و کمینه آن ۳/۱+ درصد می‌باشد که مربوط به دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. تحت سناریوی SSP2-4.5، افزایش متوسط ۷/۰+ درصدی در هر دهه در دمای بیشینه شهر اراک برای ۷ دهه آینده پیش‌نمایی می‌شود که بیشینه آن در دهه ۲۰۸۰ با مقدار ۸/۶+ درصد و کمینه آن در دهه ۲۰۴۰ با مقدار ۴/۳+ درصد خواهد بود. مقدار ۸/۸+ درصد در هر دهه متوسط افزایش دمای بیشینه شهر اراک تحت سناریوی SSP5-8.5 می‌باشد که بیشینه آن ۱۰/۷+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و کمینه آن ۷/۳+ درصد در دهه ۲۰۴۰ مشاهده خواهد شد. شکل ۳ د پیش‌نمایی دمای بیشینه شهر اراک را تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در فصل پاییز نشان می‌دهد.

پیش‌نمایی دمای بیشینه شهر اراک در مقیاس سالانه نشان می‌دهد که در سناریوی SSP1-2.6 این عنصر اقلیمی افزایش متوسطی به میزان ۲/۲+ درصد در هر دهه خواهد داشت که بیشینه آن ۳/۹+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و کمینه آن ۰/۷+ درصد در دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ حس خواهد شد. تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5، دمای بیشینه شهر اراک افزایش متوسط ۳/۸+ درصدی در هر دهه را تجربه خواهد کرد به طوری که بیشینه آن ۵/۰+ درصد در دهه ۲۰۸۰ و کمینه آن ۲/۳+ درصد در دهه ۲۰۴۰ تجربه خواهد شد. سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، افزایش بیشتری را برای دمای بیشینه پیش‌نمایی می‌کند چون متوسط ۶/۱+ درصدی در هر دهه را نشان می‌دهد که بیشینه این افزایش در دهه ۲۰۹۰ با مقدار ۸/۰+ درصد و کمینه آن در دهه ۲۰۳۰ با مقدار ۴/۷+ درصد خواهد بود. پیش‌نمایی افزایش دمای بیشینه در سناریوهای مختلف اقلیمی در مقیاس سالانه برای شهر اراک در دهه‌های آتی در شکل ۳ ه نمایش داده شده است.



شکل ۳. درصد تغییرات دمای بیشینه شهر اراک در فصول زمستان (الف)، بهار (ب)، تابستان (ج)، پاییز (د) و مقیاس سالانه (ه) تحت سه سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ۷ دهه آینده

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

تغییر اقلیم و تغییرات فصلی و سالانه دمای کمینه

نتایج پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر روی دمای کمینه شهر اراک در فصول مختلف و در طول سال تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در دهه‌های آتی تا سال ۲۱۰۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمای کمینه شهر اراک در مقیاس فصلی و سالانه تحت سناریوهای مختلف به صورت تدریجی به استثنای فصل زمستان در حال افزایش خواهد بود. دمای کمینه شهر اراک در فصل زمستان و تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان $+0/1$ درصد در هر دهه در حال افزایش خواهد بود به طوری که بیشینه این افزایش $+10/2$ درصد در دهه ۲۰۹۰ بوده ولی کمینه آن به میزان $-11/9$ درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. نرخ متوسط افزایش دمای کمینه این شهر در سناریوی SSP2-4.5 افزایش یافته و به میزان $+4/8$ درصد در هر دهه خواهد رسید که بیشینه و کمینه آن به ترتیب $+13/4$ درصد در دهه ۲۰۹۰ و $-3/5$ درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. سناریوهای SSP5-8.5 پیش‌نمایی می‌کند که دمای کمینه شهر اراک در دهه‌های آتی با نرخ متوسط $+5/7$ درصد افزایش خواهد یافت که تحت این سناریو، بیشینه افزایش مربوط به دهه ۲۰۹۰ با نرخ متوسط $+14/2$ درصد و کمینه کاهش در دهه

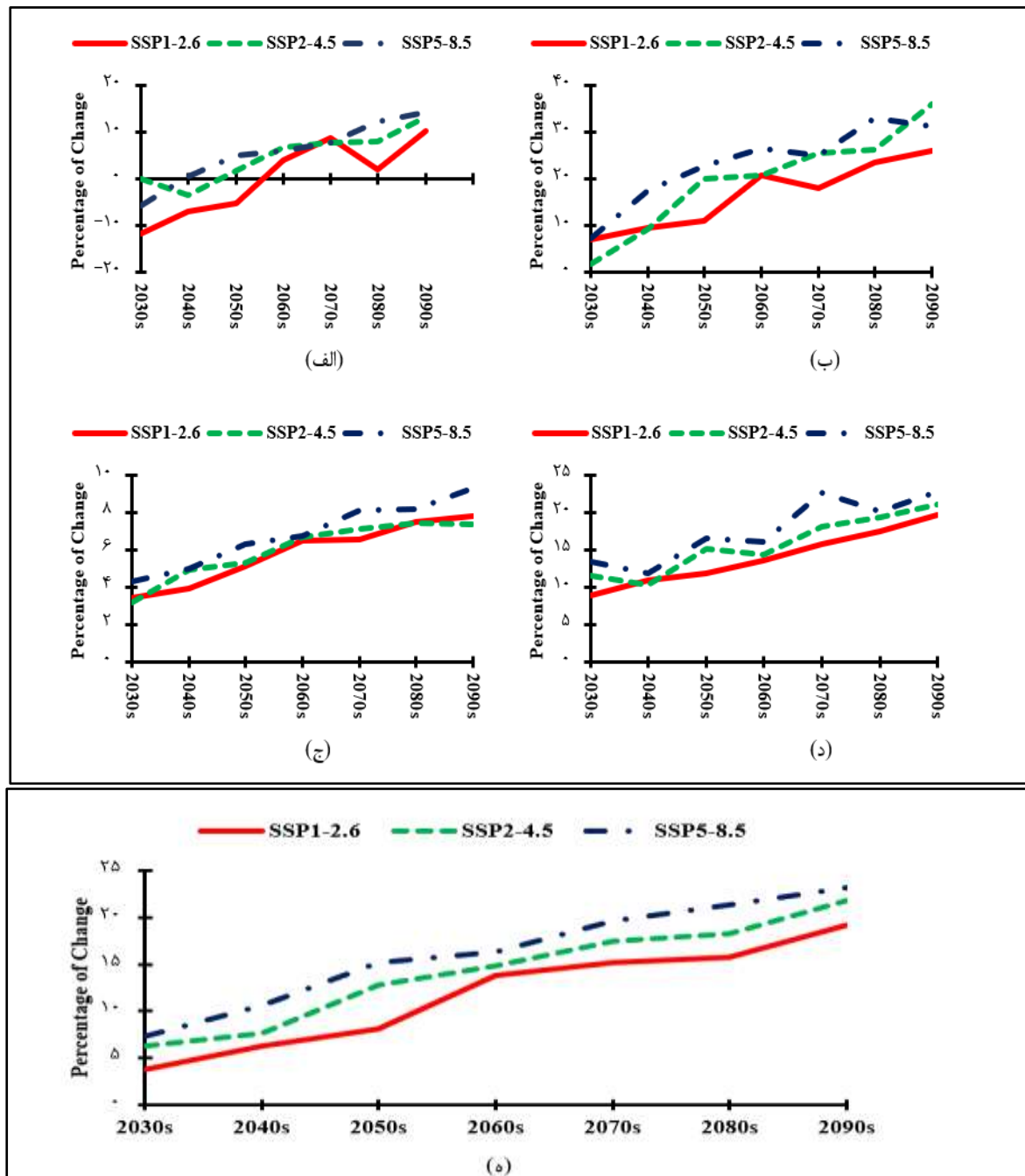
۲۰۹۰ با نرخ متوسط ۵/۸- درصد در دهه ۲۰۳۰ پیش‌نمایی می‌شود. شکل ۴ الف نشان‌دهنده روند تغییرات دمای کمینه اراک در فصل زمستان تحت سه سناریوی اقلیمی مورد مطالعه است.

در فصل بهار، تمامی سناریوهای اقلیمی حاکی از افزایش دمای کمینه شهر اراک با نرخ متوسط بیشتر نسبت به زمستان در دهه‌های آینده می‌باشند به طوری که تحت سناریوی SSP1-2.6، دمای کمینه اراک با افزایش متوسط ۱۶/۵+ درصدی در هر دهه تا پایان سال ۲۱۰۰ مواجه خواهد بود که بیشینه و کمینه آن به ترتیب ۲۶/۰+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و ۷/۰+ درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. سناریوی SSP2-4.5، افزایش دمای کمینه اراک را بیشتر پیش‌نمایی می‌کند بدین ترتیب که نرخ متوسط افزایش آن را ۱۹/۹+ درصد در هر دهه برآورد کرده و بیشینه و کمینه این افزایش را ۳۶/۰+ درصد و ۱/۷+ درصد به ترتیب در دهه‌های ۲۰۹۰ و ۲۰۳۰ تخمین زده است. افزایش دمای کمینه شهر اراک در سناریوی اقلیمی بعدی (SSP5-8.5) مقدار بیشتری را نشان می‌دهد که میزان آن ۲۳/۳+ درصد در هر دهه پیش‌نمایی شده است. تحت این سناریو، بیشینه و کمینه افزایش دمای کمینه شهر اراک به ترتیب ۳۳/۱+ درصد در دهه ۲۰۸۰ و ۷/۳+ درصد در دهه ۲۰۳۰ برآورد می‌شود. روند تغییرات دمای کمینه شهر اراک در فصل بهار در سناریوهای مختلف اقلیمی در شکل ۴ ب نشان داده شده است.

دمای کمینه شهر اراک در فصل تابستان و تحت تمامی سناریوهای اقلیمی شاهد نرخ افزایش کمتری نسبت به بهار خواهد بود. در سناریوی SSP1-2.6، نرخ متوسط افزایش دمای کمینه اراک حدود ۵/۹+ درصد در هر دهه در تمامی ۷ دهه آینده تا پایان سال ۲۱۰۰ پیش‌نمایی شده است، چنان‌که بیش‌ترین نرخ افزایش در دهه ۲۰۹۰ به میزان ۷/۸+ درصد و کم‌ترین نرخ افزایش در دهه ۲۰۳۰ به میزان ۳/۵+ درصد خواهد بود. نرخ متوسط افزایش دمای کمینه این شهر تحت سناریوی SSP2-4.5 حدود ۶/۰+ درصد در هر دهه پیش‌نمایی شده است که ۷/۵+ درصد و ۳/۲+ درصد به ترتیب بیشینه و کمینه افزایش دمای کمینه هستند که در دهه‌های ۲۰۸۰ و ۲۰۳۰ رخ خواهند داد. پیش‌نمایی دمای کمینه در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 تفاوت زیادی با سناریوی SSP2-4.5 ندارد به طوری که نرخ متوسط افزایش به ۶/۹+ درصد در هر دهه خواهد رسید و بیش‌ترین نرخ افزایش در دهه ۲۰۹۰ خواهد بود که میزان آن ۹/۳+ درصد بوده و کم‌ترین نرخ افزایش در دهه ۲۰۳۰ می‌باشد که مقدار آن ۴/۳+ درصد خواهد بود. نحوه تغییرات دمای کمینه شهر اراک در دهه‌های آتی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در شکل ۴ ج نشان داده شده است.

بررسی نحوه تغییر دمای کمینه در شهر اراک در فصل پاییز نشان می‌دهد که تحت سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، نرخ متوسط افزایش در هر دهه حدود ۱۴/۱+ درصد خواهد بود که بیشینه آن ۱۹/۷+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و کمینه آن ۹/۰+ درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. نرخ متوسط افزایش دمای کمینه این شهر تحت سناریوی SSP2-4.5 به ۱۵/۷+ درصد در هر دهه خواهد رسید که در این سناریو، بیش‌ترین افزایش با نرخ متوسط ۲۱/۲+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و کم‌ترین آن با نرخ متوسط ۱۰/۳+ درصد در دهه ۲۰۴۰ خواهد بود. سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 پیش‌نمایی می‌کند که دمای کمینه در این شهر دارای نرخ افزایشی ۱۷/۶+ درصد در هر دهه خواهد بود به طوری که بیشینه نرخ متوسط افزایش به میزان ۲۲/۹+ درصد در دهه ۲۰۹۰ رخ خواهد داد و کمینه نرخ متوسط افزایش ۱۱/۸+ درصد در دهه ۲۰۴۰ اتفاق خواهد افتاد. پیش‌نمایی افزایش دمای کمینه شهر اراک برای دهه‌های آتی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در فصل پاییز در شکل ۴ د نمایش داده شده است.

پیش‌نمایی روند تغییرات دمای کمینه شهر اراک در دهه‌های آتی تا پایان سال ۲۱۰۰ در مقیاس سالانه تحت سناریوهای اقلیمی مختلف نشان می‌دهد که این متغیر اقلیمی تحت سناریوی SSP1-2.6 با نرخ متوسط ۱۱/۷+ درصد در هر دهه افزایش پیدا خواهد نمود که بیشینه این افزایش ۱۹/۱+ درصد بوده که در دهه ۲۰۹۰ قابل پیش‌نمایی است و کمینه آن ۳/۸+ درصد است که در دهه ۲۰۳۰ حس خواهد شد. تحت سناریوی SSP2، نرخ متوسط افزایش دمای کمینه در مقیاس سالانه حدود ۱۴/۲+ درصد در هر دهه خواهد بود چنان‌که بیشینه و کمینه آن به ترتیب ۲۱/۸+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و ۶/۳+ درصد در دهه ۲۰۳۰ پیش‌نمایی می‌شود. دمای کمینه شهر اراک در سناریوی SSP5-8.5 با افزایشی کم نسبت به سناریوی SSP2-4.5 به نرخ متوسط ۱۶/۲+ درصد در هر دهه خواهد رسید. تحت سناریوی SSP5-8.5، بیش‌ترین کم‌ترین نرخ افزایش دمای کمینه شهر اراک در مقیاس سالانه به ترتیب ۲۳/۱+ درصد در دهه ۲۰۹۰ و ۷/۳+ درصد در دهه ۲۰۳۰ خواهد بود. این نتایج در شکل ۴ ه نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. درصد تغییرات دمای کمینه شهر اراک در فصول زمستان (الف)، بهار (ب)، تابستان (ج)، پاییز (د) و مقیاس سالانه (ه) تحت سه سناریوهای اقلیمی SSP1، SSP2 و SSP5 در ۷ دهه آینده

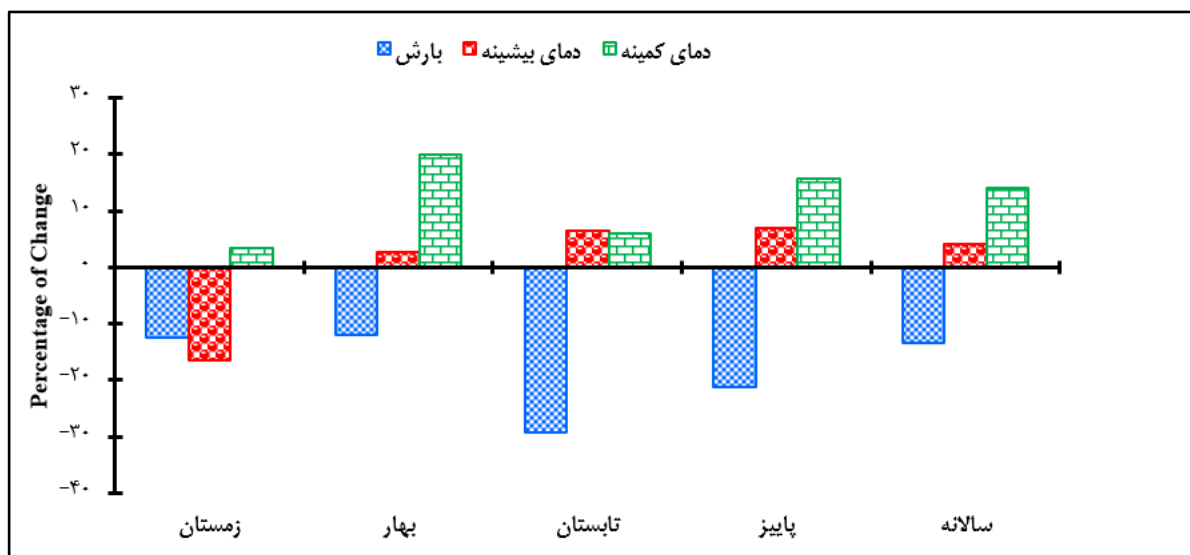
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتایج پیش‌نمایی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه شهر اراک در دهه‌های آتی تا پایان سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (شکل ۵) نشان می‌دهد بارش فصل زمستان این شهر به طور متوسط در سناریوهای مختلف با نرخ کاهش ۱۲/۴ درصدی در هر دهه روبرو خواهد بود. این نرخ کاهش در فصول بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۱۲- درصد، ۲۹/۲- درصد و ۲۱/۱- درصد پیش‌بینی می‌شود که در مقیاس سالانه مقدار آن ۱۳/۳- درصد در هر دهه خواهد رسید. هم راستا با نتایج این تحقیق، مرادی‌نژاد و خسروبیگی (۱۴۰۳) کاهش بارش شهر اراک را تا سال ۲۰۸۰ تحت سه سناریوی اقلیمی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 گزارش کرده‌اند.

تحلیل نتایج حاصل از پیش‌نمایی تغییرات دمای بیشینه شهر اراک در دهه‌های آتی تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که این متغیر اقلیمی در فصل زمستان در همه سناریوها با کاهش مواجه بوده است به طوری که نرخ کاهش متوسط آن در فصل زمستان تحت هر ۳ سناریوی اقلیمی به میزان ۱۶/۴- درصد در هر دهه خواهد رسید. این عنصر اقلیمی مهم در سایر فصول و همچنین در مقیاس سالانه با افزایش روبرو شده است به طوری که در فصول بهار، تابستان و پاییز به ترتیب نرخ متوسط افزایش آن ۲/۶+ درصد، ۶/۴+ درصد و ۷/۰+ درصد در هر دهه بوده است و در مقیاس سالانه این نرخ افزایش حدود ۴/۰+ درصد تخمین زده شده است. محققین متعددی با اندکی تفاوت، همین نتایج را برای شهر اراک در پیش‌نمایی‌های کوتاه‌مدت‌تر بدست آورده‌اند. به عنوان مثال، عساکره و شاه‌منصوری (۱۳۹۵) افزایش دمای بیشینه و کمینه شهر اراک را تا سال ۲۰۳۰ پیش‌نمایی نموده‌اند و اظهار داشته‌اند که دمای بیشینه ۱۱/۴+ درصد و دمای کمینه ۹/۷+ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. حلییان و همکاران (۱۴۰۰) هم برای شهر اراک نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند که حاکی از افزایش دمای هوا می‌باشد. مرادی‌نژاد و خسروبیگی (۱۴۰۳) افزایش دمای بیشینه را هم به صورت فصلی و هم به صورت سالانه تحت سه سناریوی اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 گزارش کرده‌اند.

بررسی نتایج پیش‌نمایی تغییرات دمای کمینه شهر اراک تا سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سه سناریوی اقلیمی مورد مطالعه نشان داد که دمای کمینه این شهر افزایش پیدا خواهد کرد و میزان متوسط افزایش آن در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۳/۵+ درصد، ۱۹/۹+ درصد، ۲/۲+ درصد و ۱۵/۸+ درصد در هر دهه خواهد بود. در مقیاس سالانه، شهر اراک نرخ کاهش متوسط ۱۴/۰+ درصد در هر دهه را در دمای کمینه تجربه خواهد کرد. عساکره و شاه‌منصوری (۱۳۹۵)، حلییان و همکاران (۱۴۰۰) و مرادی‌نژاد و خسروبیگی (۱۴۳۰) پیش‌نمایی نموده‌اند که دمای کمینه شهر اراک در سناریوهای اقلیمی مختلف در دهه‌های آتی کاهش پیدا خواهد کرد که نتایج آنها، یافته‌های این تحقیق را قویاً تأیید می‌نماید.

تحلیل بیشتر نتایج آشکار می‌کند که بیش‌ترین نرخ کاهش بارش در فصل تابستان اتفاق می‌افتد، زمانی که کم‌ترین نرخ افزایش دمای کمینه رخ خواهد داد. همچنین کم‌ترین نرخ کاهش بارش در فصل بهار خواهد بود زمانی که کم‌ترین نرخ افزایش دمای بیشینه اتفاق خواهد افتاد. بیشینه افزایش دمای بیشینه در فصل پاییز خواهد بود و کمینه آن در بهار مشاهده خواهد شد. بیش‌ترین افزایش دمای کمینه در فصل بهار خواهد بود و کم‌ترین افزایش دمای کمینه در فصل تابستان حس خواهد شد. بیش‌ترین تفاوت بین نرخ تغییرات دماهای بیشینه و کمینه در فصل زمستان خواهد بود که تقریباً ۲۰ درصد می‌باشد زمانی که دمای بیشینه کاهش ۱۶/۴- درصدی خواهد داشت ولی دمای کمینه افزایش ۳/۵+ درصدی را نشان خواهد داد؛ و کم‌ترین تفاوت در فصل تابستان خواهد بود که ۰/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۴. نرخ متوسط تغییرات بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه شهر اراک در ۷ دهه آینده تا پایان سال ۲۱۰۰ میلادی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتیجه‌گیری

تأثیر تغییر اقلیم جهانی بر بارش، دماهای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه شهر اراک در ۷ دهه آتی تا پایان سال ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از مدل گردش عمومی CanESM5 استفاده شد و برای ریزمقیاس نمودن خروجی‌های این مدل، از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها با ۶ شاخص ارزیابی دقیق شامل MAE، RMSE، MAPE، MBE، NSE و WAI اعتبارسنجی شدند و با مقادیری که حاکی از دقت بالا در شبیه‌سازی فصلی و سالانه بود، مورد تأیید قرار گرفتند. با این حال، عدم قطعیت ذاتی مدل‌ها - ناشی از پیچیدگی‌های سیستم اقلیمی، محدودیت‌های داده‌های ورودی، و حساسیت به پارامترهای اولیه - باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند از طریق روش‌های آماری مانند تحلیل حساسیت یا استفاده از شبیه‌ساز مدل‌ها کاهش یابند، اما کاملاً حذف‌شدنی نیستند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که بارش در شهر اراک که در منطقه نیمه‌خشک مرکزی ایران واقع است، تحت تمام سناریوها کاهش قابل‌توجهی خواهد داشت. متوسط کاهش سالانه بارش ۱۰/۷- درصد در SSP1-2.6، ۱۳/۸- درصد در SSP2-4.5 و ۱۵/۵- درصد در SSP5-8.5 در هر دهه پیش‌بینی می‌شود؛ اما کاهش فصلی بارش متفاوت است: در زمستان که معمولاً فصل پربارش است، کاهش متوسط ۱۲/۴- درصدی مشاهده می‌شود با بیش‌ترین کاهش (۱۴/۴- درصد) که در سناریوی SSP5-8.5 اتفاق خواهد افتاد. این امر می‌تواند به دلیل تغییرات در الگوهای گردش جوی مانند جابجایی جت استریم یا کاهش رطوبت ورودی از دریای مدیترانه باشد. در بهار، کاهش ۱۲/۰- درصدی متوسط که کمترین نرخ فصلی است، ممکن است با افزایش تبخیر ناشی از گرمایش همراه باشد، اما همچنان منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تابستان، با کاهش شدید ۲۹/۲- درصدی، بیشترین آسیب را می‌بیند، که این می‌تواند منجر به تشدید خشکسالی‌های تابستانی و کاهش تولیدات کشاورزی شود. پاییز نیز با ۲۱/۱- درصد کاهش، نشان‌دهنده ادامه روند خشک‌شدن است. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مانند مرادی‌نژاد و خسرویگی (۱۴۰۳) همخوانی دارد، که کاهش بارش تحت سناریوهای RCP را گزارش کرده‌اند. عدم قطعیت مدل‌ها در پیش‌بینی بارش بیشتر است، زیرا بارش پدیده‌ای محلی و وابسته به عوامل میکرواقلیمی است؛ برای مثال، مدل‌ها ممکن است اثرات توپوگرافی محلی اراک را به طور کامل مدل‌سازی نکنند که می‌تواند منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد شود. استفاده از مدل‌های ریزمقیاس مانند RCM‌های مناسب، می‌تواند دقت را بالاتر برد.

در مورد دمای بیشینه، الگوی نامتقارنی مشاهده می‌شود. دمای بیشینه در زمستان کاهش می‌یابد (متوسط ۱۶/۴- درصد در هر دهه) که ممکن است به دلیل افزایش ابرناکی یا تغییرات در الگوهای بادهای سرد و یا اختلال در گرداب‌های قطبی باشد که کوهن^۱ و همکاران (۲۰۱۴) به آن اشاره کرده‌اند. این مسأله بر خلاف گرمایش جهانی است ولی با مطالعات هو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) در آسیای مرکزی همخوانی دارد. این کاهش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی مطالعه‌شده، متفاوت است، اما کلیت آن نشان‌دهنده سردتر شدن زمستان‌ها است که می‌تواند بر مصرف انرژی برای گرمایش تأثیر بگذارد. در مقابل، در بهار افزایش ۲/۶+ درصدی متوسط، در تابستان ۶/۴+ درصدی و در پاییز ۷/۰+ درصدی پیش‌نمایی می‌شود که منجر به افزایش متوسط سالانه ۴/۰+ درصدی می‌گردد. بیشترین افزایش در تابستان تحت سناریوی SSP5-8.5 (۸/۳+ درصد) است که می‌تواند موج‌های گرمایی را تشدید کند و سلامت عمومی و به‌ویژه گروه‌های آسیب‌پذیر مانند سالمندان را تهدید نماید. این نتایج با تحقیقات عساکره و شاه‌منصوری (۱۳۹۵) و حلبیان و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد که افزایش دما را پیش‌بینی کرده‌اند. عدم قطعیت در مدل‌های دما، کمتر از بارش است، اما همچنان وجود دارد؛ برای مثال، مدل‌ها ممکن است اثرات جزیره گرمایی شهری در اراک را نادیده بگیرند که می‌تواند افزایش دما را تشدید کند. علاوه بر این، حساسیت مدل‌ها به غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند در سناریوهای بدبینانه مانند SSP5-8.5، انحرافات ایجاد کند، جایی که بازخوردهای مثبت مانند ذوب یخ‌ها می‌تواند گرمایش را بیشتر کند.

دمای کمینه نیز روند افزایشی با متوسط سالانه ۱۴/۰+ درصد را در هر دهه در اراک طی ۷ دهه آینده نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند شب‌های گرم‌تری ایجاد کند که بر الگوهای خواب، کشاورزی (مانند کاهش دوره سرمازدگی برای محصولات) و اکوسیستم تأثیر بگذارد. تحت سناریوی SSP5-8.5، افزایش دمای کمینه در بهار به ۲۳/۳+ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده تشدید گرمایش شبانه است. این یافته‌ها توسط مطالعات مرادی‌نژاد و خسرویگی (۱۴۰۳) تأیید می‌شود که افزایش دمای کمینه را گزارش کرده‌اند. اینجا، عدم قطعیت تا حدودی مشهود است؛ مدل‌ها ممکن است اثرات محلی مانند پوشش گیاهی یا آلودگی هوا را کم‌ارزایی کنند که می‌تواند دمای کمینه را تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، تفاوت بین دمای بیشینه و کمینه کاهش می‌یابد که می‌تواند بر تنوع زیستی تأثیر بگذارد.

تحلیل کلی نشان می‌دهد که بیشترین کاهش بارش در تابستان همزمان با کمترین افزایش دمای کمینه است که می‌تواند خشکسالی را تشدید کند. کمترین کاهش بارش در بهار با کمترین افزایش دمای بیشینه همراه است که ممکن است فرصتهایی برای کشاورزی فراهم کند. دمای بیشینه و کمینه شهر اراک در ۷ دهه آینده تحت تمامی سناریوهای اقلیمی افزایش (به استثنای کاهش دمای بیشینه در زمستان) پیدا خواهد کرد که نرخ افزایش دمای کمینه تقریباً ۳ برابر نرخ افزایش دمای بیشینه (به استثنای تابستان) خواهد بود؛ موضوعی که آرگوئسو و همکاران (۲۰۱۳) برای شهر سیدنی پیش‌نمایی کرده بودند. این به وضوح آشکار می‌کند که شهر اراک در آینده در فصول بهار، تابستان و پاییز، گرم‌تر از وضعیت فعلی خواهد بود ولی دارای زمستان‌های سردتر خواهد شد. بیشترین تفاوت بین دماهای بیشینه و کمینه در زمستان (حدود ۲۰ درصد) است، که نشان‌دهنده تغییرات شدید فصلی است. این الگوها بر لزوم استراتژی‌های سازگاری تأکید دارد: مدیریت پایدار منابع آب، توسعه کشاورزی مقاوم به خشکی و کاهش انتشار از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر.

هر نوع تغییری بر دمای مناطق شهری می‌تواند تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم زیادی بر زندگی ساکنان آن داشته باشد. با توجه به آب و هوای خشک و نیمه‌خشک شهر اراک، این شهر می‌تواند در برابر تأثیرات تغییر اقلیم حساس‌تر از سایر شهرها باشد چون تغییر اقلیم در مکان‌های مختلف تأثیرات متفاوتی دارد؛ بنابراین لازم است که آمادگی مواجهه با این کاهش بارش و افزایش دما در مردم و مسئولین بوجود بیاید و اقداماتی در جهت سازگاری و انطباق مجموعه شهری با این تغییرات اعمال گردد. تلاش برای استفاده از تکنولوژی‌های نوین و سبز، استفاده از انرژی‌های پاک در مدیریت شهری، افزایش فرهنگ عمومی در راستای استفاده از سیستم حمل و نقل عمومی، ترویج فرهنگ دوچرخه‌سواری از طریق تکنیک رژیم جاده‌ای^۱، بازطراحی فضاهای شهری با تکنیک‌های جدید مانند پشت‌بام‌های سبز می‌تواند راه کارهای مناسبی برای انطباق با تغییرات اقلیمی در آینده باشد. توسعه فضای سبز شهری از طریق گونه‌های گیاهی مناسب و سازگار با تغییر اقلیم یکی از راه کارهای اساسی در مدیریت شهری در آینده نزدیک و دور خواهد بود (ریبی صادقی‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). ترکاشوند (۱۳۹۵) ضمن گزارش افزایش دمای شهر اراک در طی سالیان اخیر، یکی از راه کارهای کاهش دما و کمک به خنک‌شدگی شهر مخصوصاً در فصول گرما برای جلوگیری از مشکلات سلامتی، افزایش فضای سبز شهری می‌داند که هادی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) هم این مسأله را در مطالعه خود برای شهر اراک تأیید نموده‌اند. تغییر اقلیم در میان و درازمدت مفهوم شهرهای سنتی را تغییر خواهد داد و قطعاً با رویکردهای سنتی، سازگاری با تغییرات اقلیمی گسترده در محیط‌های شهری امکان‌پذیر نخواهد بود. برنامه‌ریزان شهری از الان باید به فکر جایگزین مناسبی برای شهرهای سنتی در کشور باشند و مفاهیم جدیدی مانند شهرهای پایدار، شهرهای سازگار و شهرهای نوآور بر پایه استراتژی‌های طبیعت‌دوست با ساختمان‌های هوشمند و بیوکلیماتیک را برای غلبه بر مخاطرات اقلیمی جستجو نمایند و در عمل پیاده کنند. این مسأله به جد در مستندات علمی جدید مورد تأکید قرار گرفته است (هوبی^۲ و گریم، ۲۰۲۰؛ کومار^۳، ۲۰۲۱؛ غفاری گیلانده و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین در برنامه‌ریزی برای توسعه شهر، فقط توسعه فیزیکی نباید مورد توجه برنامه‌ریزان باشد بلکه تراکم جمعیتی شهر هم فاکتور بسیار مهمی در برنامه‌ریزی برای کاهش مخاطرات اقلیمی می‌باشد که باید مجدانه مورد توجه قرار گیرد (چاپمن و همکاران، ۲۰۱۷). اگر برنامه‌ریزی توسعه و مدیریت شهر اراک در آینده منطبق با الگوهای سازگاری در برابر تغییر اقلیم نباشد، این شهر با چالش‌های مهاجرتی، توسعه صنعتی، توریسم ورزشی و تاریخی مواجه خواهد شد، به‌طوری‌که نمی‌تواند به عنوان یک مرکز اصلی فعالیت‌های فوق‌مدنظر قرار بگیرد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که پیش‌نمایی بارش بسیار سخت‌تر از پیش‌نمایی دمای هوا است چون بارش دارای نوسانات بسیار بیشتری است؛ به همین دلیل نمی‌توان به صورتی کلی بیان کرد که بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش بارش فصلی و سالانه در چه دهه مشخصی و تحت چه سناریویی اتفاق خواهد افتاد ولی در مورد دمای بیشینه و کمینه می‌توان اظهار نظر کرد (کومو و رامستورف^۴، ۲۰۱۲؛ تورتی^۵ و همکاران، ۲۰۱۳؛ شو^۶ و همکاران، ۲۰۱۳) چون مشخصاً بیشینه افزایش دمای بیشینه و کمینه در شهر اراک در دهه‌های ۲۰۸۰ و ۲۰۹۰ روی خواهد داد در حالی که کمینه افزایش این متغیرهای اقلیمی در دهه‌های نزدیک به زمان حال یعنی ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ خواهد بود. سناریوی SSP1-2.6 کم‌ترین تغییرات نوسانی متغیرهای اقلیمی را پیش‌نمایی نمود و سناریوی SSP5-8.5 بیش‌ترین نوسانات اقلیمی را برای اراک پیش‌نمایی کرد.

نتایج این پژوهش، با وجود ارائه تصویری قابل اتکا از روندهای احتمالی تغییرات دما و بارش شهر اراک تا افق ۲۱۰۰، با محدودیت‌هایی از جمله اتکا به یک مدل اقلیمی (CanESM5)، استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و عدم لحاظ هم‌زمان عدم قطعیت ناشی از سایر مدل‌های اقلیمی، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و تغییرات جمعیتی و کاربری زمین مواجه است؛ بنابراین، راهکارهای مستخرج از پژوهش

1. Road diet
2. Hobbie
3. Kumar
4. Coumou and Rahmstorf
5. Toreti
6. Xu

بر ضرورت تقویت برنامه‌های سازگاری شهری با کاهش بارش و افزایش دما، توسعه و حفظ فضای سبز با استفاده از گونه‌های مقاوم به گرما و کم‌آبی، گسترش زیرساخت‌های سبز و بام‌های سبز، بهبود مدیریت مصرف و منابع آب، استفاده از مصالح و طراحی‌های سازگار با اقلیم، و ارتقای حمل‌ونقل پاک و انرژی‌های کم‌کربن تأکید دارد. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از مجموعه‌ای از مدل‌های GCM/RCM و روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی برای کمی‌سازی عدم قطعیت، بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر شاخص‌های آسایش حرارتی، تقاضای آب، سلامت و گردشگری شهری و نیز تلفیق سناریوهای اقلیمی با سناریوهای توسعه شهری و تغییر کاربری زمین استفاده شود تا ارزیابی جامع‌تری از آسیب‌پذیری و ظرفیت سازگاری شهر اراک در برابر تغییر اقلیم به دست آید.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این اثر با استفاده از گرنت پژوهشی شماره ۲/۹/۳۹۲۲۹/ص نویسنده مسئول انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول وظیفه طراحی اولیه پژوهش، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها و تهیه بخشی از نسخه اولیه مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم تجزیه و تحلیل داده‌ها و آزمون‌های آماری را انجام داده است. نویسنده سوم (نویسنده مسئول) بازطراحی پژوهش، نظارت بر تجزیه و تحلیل داده‌ها و بازنویسی و تکمیل متن اولیه مقاله را بر عهده داشته است.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزار هوش مصنوعی (AI) برای نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- برنا، رضا. (۱۴۰۰). تحلیل وضعیت بیابان‌زایی با استفاده از مدل IMDPA با رویکرد تغییر اقلیم (مطالعه موردی: شهرستان شادگان). *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۲(۶)، ۳۰-۱۹. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.277914.1040>
- ترکاشوند، محمدقاسم. (۱۳۹۵). آشکارسازی جزایر حرارتی شهر اراک مبتنی بر تحلیل‌های خودهمبستگی فضایی. *آمایش محیط*، ۹(۳۵)، ۱۲۳-۱۴۸. <https://sanad.iau.ir/fa/Journal/ebtp/Article/532371?jid=532371>
- حلبیان، امیرحسین، پروین، نادر و نقیب‌زاده، رؤیا. (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات مکانی - زمانی الگوهای حرارتی شهر اراک با پردازش تصاویر ماهواره‌ای و GIS. *فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۰(۱۱۹)، ۱۲۱-۱۳۹. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.247885>
- خوش‌اخلاق، فرامرز، نگهبان، سعید، روشن، غلامرضا و غریبی، ابراهیم. (۱۳۸۹). بررسی نقش و تأثیر تغییر اقلیم بر روی اقلیم آسایش شهر یزد با استفاده از مدل اوانز (EVANZ). *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۸(۲۰)، ۱۶۷-۱۸۱. <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.636>
- ربانی‌ها، مهناز. (۱۳۹۹). تغییر رویکرد مدیریت شیلاتی، راهکار سازگاری با شرایط تغییر اقلیم. *مجله ترویجی بوم‌شناسی منابع آبی*، ۴(۱)، ۲۷-۱۹. https://ewrj.areeo.ac.ir/article_123117.html
- ربیعی صادق‌آبادی، مالک، نوری، امید و دیهیم‌فرد، رضا. (۱۳۹۹). انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب برای فضای سبز شهرهای نیمه خشک با تأکید بر تغییر اقلیم (مورد مطالعه: شهر تهران). *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۸(۱)، ۲۱۹-۲۳۶. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.219>
- سوره، احسان و محمدی، بختیار. (۱۴۰۳). واکاوی شرایط اقلیم گردشگری استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص‌های زیست‌اقلیمی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۵(۱)، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.136135.1563>

- صالحی، سعدی، فضلی، سارا و حاتمی، فضیله. (۱۳۹۷). اثر تغییرات اقلیمی بر پرورش ماهی (منطقه‌ی مورد مطالعه: شهرستان سروآباد). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۳۱(۳)، ۷۵۰-۷۶۱. https://www.gahr.ir/article_82632_60b08acc1f3a4db4ff5f01c9fd828776.pdf
- عابدی، سمانه و صداقت، ملیحه. (۲۰۲۲). ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر تقاضای گردشگری در شهرهای ایران. *فصلنامه علمی اقتصاد و مدیریت شهری*، ۱۰(۳۷)، ۱۸-۱. <http://iueam.ir/article-1-1818-fa.html>
- عساکره، حسین و شاه‌منصوری، بهرام. (۱۳۹۵). بررسی و پیش‌بینی تغییرات دمای ایستگاه اراک براساس مدل ریزمقیاس نمایی آماری. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۲)، ۱۹۳-۲۱۲. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.59356>
- علیچانی، بهلول، مؤیدفر، سعیده و صبابی‌مهر، مهدیه. (۱۳۸۹). بررسی تغییرات اقلیمی شهر یزد در رابطه با توسعه شهری و منطقه‌ای. *پژوهش و برنامه‌ریزی شهری*، ۱(۳)، ۴۱-۵۸. <https://ensani.ir/file/download/article/20120427100531-8086-17.pdf>
- غفاری گیلانده، عطا، سبحانی، بهروز، میکائیلی، خدیجه و قویدل، فاطمه. (۱۳۹۸). تأمین انرژی ساختمان در شهر تبریز با توجه به تغییر اقلیم بر مبنای مدل ANP. *اندیشه جغرافیا*، ۱۱(۲۱)، ۱۳۹-۱۶۰. https://geonot.znu.ac.ir/article_36051.html?lang=fa
- فاتحی، زانبار و شاهویی، سید وحید. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم جهانی بر دمای بیشینه و کمینه سالانه و فصلی شهرستان همدان. *پنجمین همایش بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست*، ۱-۱۴. <https://civilica.com/doc/1168561>
- کاویانی‌راد، مراد، آفتابی، زکیه و ولی‌زاده، حوا. (۱۳۹۹). تبیین نسبت امنیت غذایی و امنیت زیست محیطی با تغییر اقلیم نمونه پژوهی: شهرستان جیرفت. *دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی*، ۱(۲)، ۲۴-۴۶. https://cccd.znu.ac.ir/article_44662.html?lang=fa
- مرادی‌نژاد، امیر و خسرویگی، سعید. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش منطقه اراک. *مطالعات علوم محیط زیست*، ۹(۴)، ۹۵۳۴-۹۵۲۴. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.458377.2258>
- مریانجی، زهره، طولابی‌نژاد، میثم و دولت‌شاهی، زینب. (۱۴۰۲). اثر تغییر اقلیم بر بارش برف و پیش‌بینی آن در شهرستان همدان. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۱(۵۵)، ۱۱۳-۱۲۹. <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358026.1007765>
- نصیری، رسول، متصدی زرنندی، سعید و اسماعیل مطلق، محمد. (۱۴۰۰). تغییر اقلیم و چالش‌های ارزیابی کمی تغییرات اقلیم شهری: مطالعه موردی کلان‌شهر تهران. *مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی*، ۱۹(۳)، ۳۱۴-۳۹۳. <https://sjsph.tums.ac.ir/article-1-6064-fa.html>
- هادی‌پور، مهرداد، دارابی، حمید و داودی‌راد، علی‌اکبر. (۱۳۹۸). بررسی جزایر حرارتی شهری و ارتباط آن با شرایط آلودگی هوا و شاخص‌های NDVI و NDBI در شهر اراک. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۲)، ۲۴۹-۲۶۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38619>
- Alcoforado, M.J., Andrade, H. (2008). *Global Warming and the Urban Heat Island*. In: Marzluff, J.M., et al. *Urban Ecology*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_14
- Al-Falahi, A. H., Saddique, N., Spank, U., & Bernhofer, C. (2024). Building high-resolution projections of temperature potential changes using statistical downscaling for the future period 2026–2100 in the highland region of Yemen—A supportive approach for empowering environmental planning and decision-making. *Environmental and Sustainability Indicators*, 24, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100490>
- Al-Mukhtar, M. (2018). Integrated approach to forecast future suspended sediment load by means of SWAT and artificial intelligence models, a case study. *Freiberg Online Geoscience*, 51, 52-77.
- Al-Mukhtar, M., & Qasim, M. (2019). Future predictions of precipitation and temperature in Iraq using the statistical downscaling model. *Arabian journal of geosciences*, 12(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4187-x>
- Argüeso, D., Evans, J. P., Fita, L., & Bormann, K. J. (2014). Temperature response to future urbanization and climate change. *Climate dynamics*, 42, 2183-2199. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1789-6>
- Arnell, N. W., Lowe, J. A., Challinor, A. J., & Osborne, T. J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155, 377-391. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02464-z>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Beshir, S., Moges, A. & Dananto, M. (2025) Climate change projections using CMIP6 GCMs and downscaling approaches in the Upper Wabe Shebele Basin, Ethiopia. *Scientific Reports*, 15, 39521. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23194-6>
- Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921-1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- Chen, W., Alharthi, M., Zhang, J., & Khan, I. (2024). The need for energy efficiency and economic prosperity in a sustainable environment. *Gondwana Research*, 127, 22-35. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.025>

- Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., ... & Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature geoscience*, 7(9), 627-637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- Cook, B. I., Mankin, J. S., & Anchukaitis, K. J. (2018). Climate change and drought: From past to future. *Current Climate Change Reports*, 4, 164-179. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>
- Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature climate change*, 2(7), 491-496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Davis, R. E., Knappenberger, P. C., Michaels, P. J., & Novicoff, W. M. (2004). Seasonality of climate-human mortality relationships in US cities and impacts of climate change. *Climate Research*, 26(1), 61-76. <https://doi.org/10.3354/cr026061>
- Dieleman, H. (2013). Organizational learning for resilient cities, through realizing eco-cultural innovations. *Journal of Cleaner Production*, 50, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.027>
- Dukes, J. S., Mooney, H. A. (1999). Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14(4), 135-139. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01554-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01554-7)
- Esfandeh, S., Daneshkar, A., Salmanmahiny, A., Alipour, H., Kazemzadeh, M., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Climate change projection using statistical downscaling model over southern coastal Iran. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29416>
- Evans, G. W. (2019). Projected behavioral impacts of global climate change. *Annual review of psychology*, 70(1), 449-474. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-103023>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fenta Mekonnen, D., & Disse, M. (2018). Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2391-2408. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2391-2018>
- Ghazi B, Jeihooni E (2022) Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7):621. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Grimm, N. B., Morgan Grove, J., Pickett, S. T., & Redman, C. L. (2000). Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems. In: *Urban ecological systems present multiple challenges to ecologists—pervasive human impact and extreme heterogeneity of cities, and the need to integrate social and ecological approaches, concepts, and theory*. *BioScience*, 50(7), 571-584. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_8
- Haji Mohammadi, M., Shafaie, V., Nazari Samani, A., Zare Garizi, A., & Movahedi Rad, M. (2024). Assessing future hydrological variability in a semi-arid mediterranean basin: soil and water assessment tool model projections under shared socioeconomic pathways climate scenarios. *Water*, 16(6), 805. <https://doi.org/10.3390/w16060805>
- Halecki, W., Stachura, T., Fudała, W., Stec, A., & Kuboń, S. (2023). Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104280. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104280>
- Hausfather, Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. Carbon Brief. Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
- Hobbie, S. E., & Grimm, N. B. (2020). Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0124>
- Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J. S. (2021). Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in Iran from the CMIP6 ensemble. *Atmosphere*, 12(8), 1052. <https://doi.org/10.3390/atmos12081052>
- Hu, Z., Li, Q., Chen, X., Teng, Z., Chen, C., Yin, G., & Zhang, Y. (2016). Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3), 519-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1568-x>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001:451–485. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening*

- the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kalkstein, L. S., & Greene, J. S. (1997). An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental health perspectives*, 105(1), 84-93. <https://doi.org/10.1289/ehp.9710584>
- Kearl, Z., & Vogel, J. (2023). Urban extreme heat, climate change, and saving lives: lessons from Washington state. *Urban climate*, 47, 101392. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101392>
- Kerr, R. A. (2007). Global warming is changing the world. *Science*, 316(5822), 188-190. <https://doi.org/10.1126/science.316.5822.188>
- Kumar, P. (2021). Climate change and cities: challenges ahead. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 645613. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.645613>
- Lenton, T. M., Xu, C., Abrams, J. F., Ghadiali, A., Loriani, S., Sakschewski, B., ... & Scheffer, M. (2023). Quantifying the human cost of global warming. *Nature Sustainability*, 6(10), 1237-1247. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6>
- Lin, J., & Qian, T. (2022). Earth's Climate History from 4.5 Billion Years to One Minute. *Atmosphere-Ocean*, 60(3-4), 188-232. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2082914>
- Lindley, S. J., Handley, J. F., Theuray, N., Peet, E., & McEvoy, D. (2006). Adaptation strategies for climate change in the urban environment: assessing climate change related risk in UK urban areas. *Journal of risk research*, 9(5), 543-568. <https://doi.org/10.1080/13669870600798020>
- Lu, K., Arshad, M., Ma, X., Ullah, I., Wang, J., & Shao, W. (2022). Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs. *International Journal of Climatology*, 42(15), 7703-7729. <https://doi.org/10.1002/joc.7673>
- Masek, J. G., Lindsay, F. E., & Goward, S. N. (2000). Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International journal of remote sensing*, 21(18), 3473-3486. <https://doi.org/10.1080/014311600750037507>
- McCarthy, M. P., Best, M. J., & Betts, R. A. (2010). Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical research letters*, 37(9). <https://doi.org/10.1029/2010GL042845>
- Melesse, A., Abtew, W., & Senay, G. (2019). *Extreme hydrology and climate variability: Monitoring, modelling, adaptation and mitigation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04193-9>
- Mills, G. (2006). Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. *Theoretical and applied climatology*, 84(1-3), 69-76. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0145-0>
- Misslin, R., Telle, O., Daudé, E., Vaguet, A., & Paul, R. E. (2016). Urban climate versus global climate change—what makes the difference for dengue? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1382(1), 56-72. <https://doi.org/10.1111/nyas.13084>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Oke, R. T. (1997). *Urban climate and global environmental change*. In: Perry, A., Thompson, R. (Eds.), *Applied climatology: Principles and Practice*, London: Routledge, 273-287. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3058458>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310-317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Phuong, D. N. D., Duong, T. Q., Liem, N. D., Tram, V. N. Q., Cuong, D. K., & Loi, N. K. (2020). Projections of future climate change in the Vu Gia Thu Bon River Basin, Vietnam by using statistical downscaling model (SDSM). *Water*, 12(3), 755. <https://doi.org/10.3390/w12030755>
- Pili, A. N., Leroy, B., Measey, J. G., Farquhar, J. E., Toomes, A., Cassey, P., ... & Chapple, D. G. (2024). Forecasting potential invaders to prevent future biological invasions worldwide. *Global Change Biology*, 30(7), e17399. <https://doi.org/10.1111/gcb.17399>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16(4), 1690. <https://doi.org/10.3390/en16041690>

- Pottier, A., Fleurbay, M., Méjean, A., & Zuber, S. (2021). Climate change and population: An assessment of mortality due to health impacts. *Ecological Economics*, 183, 106967. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106967>
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., ... & Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), 353-357. <https://doi.org/10.1038/nature06937>
- Rossati, A. (2016). Global warming and its health impact. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.15171/ijoem.2017.963>
- Roychoudhury, N., & Mishra, R. K. (2024). Climate Change-Global Warming. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(8), 1382-1384. <https://ijrpr.com/uploads/V5ISSUE8/IJRPR32215.pdf>
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475-2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Salinger, M. J. (2005). Climate variability and change: past, present and future—an overview. *Climatic change*, 70(1), 9-29. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5936-x>
- Schwarzbach, M. (1963). *Climates of the past: an introduction to paleoclimatology*. D. Van Nostrand (Ed.), 328 pp. https://books.google.com/books?id=M5uIzwEACAAJ&newbks=0&hl=en&source=newbks_fb
- Shaffril, H. A. M., Abu Samah, A., & Samsuddin, S. F. (2022). The Impacts of Fishermen's Resilience towards Climate Change on Their Well-Being. *Sustainability*, 14(6), 3203. <https://doi.org/10.3390/su14063203>
- Siabi, E. K., Awafo, E. A., Kabo-bah, A. T., Derkyi, N. S. A., Akpoti, K., Mortey, E. M., & Yazdanie, M. (2023). Assessment of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate scenarios and its impacts on the Greater Accra region. *Urban Climate*, 49, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101432>
- Solecki, W. D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., & Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 6(1), 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002>
- Steiger, R., Knowles, N., Pöll, K., & Rutty, M. (2024). Impacts of climate change on mountain tourism: A review. *Journal of Sustainable Tourism*, 32(9), 1984-2017. <https://doi.org/10.1080/09669582.2022.2112204>
- Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., & Winter, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, 12, 4823-4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>
- Tierney, J. E., Poulsen, C. J., Montañez, I. P., Bhattacharya, T., Feng, R., Ford, H. L., ... & Zhang, Y. G. (2020). Past climates inform our future. *Science*, 370(6517), eaay3701. <https://doi.org/10.1126/science.aay3701>
- Toreti, A., Naveau, P., Zampieri, M., Schindler, A., Scoccimarro, E., Xoplaki, E., Dijkstra, H. A., Gualdi, S., & Luterbacher, J. (2013). Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4887-4892. <https://doi.org/10.1002/grl.50940>
- Vaezi, A., Routh, J., Rana, A., Sokhansefat, S., & Nasserli, M. (2025). Linking Future Hydroclimatological Changes with Past Climatic Conditions in Southeastern Iran: Insights from Models and Observations. *International Journal of Environmental Research*, 19(1), 38. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00704-4>
- Vargas-Hernández, J. G., Pallagst, K., & Zdunek-Wielgołaska, J. (2023). *Urban green spaces as a component of an ecosystem*. In: Sustainable development and environmental stewardship: Global initiatives towards engaged sustainability (pp. 165-198). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28885-2_8
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2001). SDSM — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 16(4), 339-354. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2004). Using SDSM Version 3.1 — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. UNFCCC Resource Materials. Retrieved from https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/v_and_a/Resource_materials/Climate/SDSM/SDSM.Manual.pdf
- Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4), 530-548. <https://doi.org/10.1177/030913339702100403>
- Wilby, R. L., T. M. L. Wigley, D. Conway, P. D. Jones, B. C. Hewitson, J. Main, & D. S. Wilks. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34, 2995-3008. <https://doi.org/10.1029/98WR02046>
- Wilhelm, M. (2011). *The Role of Community Resilience in Adaptation to Climate Change: The Urban Poor in Jakarta, Indonesia*. In: Otto-Zimmermann, K. (ed.) Resilient Cities. Local Sustainability, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6_5

- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physics Geography*, 2, 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Xu, L., Wang, A., Wang, D., & Wang, H. (2019). Hot spots of climate extremes in the future. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(6), 3035-3049. <https://doi.org/10.1029/2018JD029980>
- Yang, X., Xu, X., Wang, Y., Yang, J., & Wu, X. (2024). Heat exposure impacts on urban health: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 174650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174650>
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686-693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>
- Zeleňáková, M., Purcz, P., Hlavatá, H., & Blišťan, P. (2015). Climate change in urban versus rural areas. *Procedia Engineering*, 119, 1171-1180. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.968>

References

- Alcoforado, M.J., Andrade, H. (2008). *Global Warming and the Urban Heat Island*. In: Marzluff, J.M., et al. Urban Ecology. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_14
- Al-Falahi, A. H., Saddique, N., Spank, U., & Bernhofer, C. (2024). Building high-resolution projections of temperature potential changes using statistical downscaling for the future period 2026–2100 in the highland region of Yemen—A supportive approach for empowering environmental planning and decision-making. *Environmental and Sustainability Indicators*, 24, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100490>
- Al-Mukhtar, M. (2018). Integrated approach to forecast future suspended sediment load by means of SWAT and artificial intelligence models, a case study. *Freiberg Online Geoscience*, 51, 52-77.
- Al-Mukhtar, M., & Qasim, M. (2019). Future predictions of precipitation and temperature in Iraq using the statistical downscaling model. *Arabian journal of geosciences*, 12(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4187-x>
- Argüeso, D., Evans, J. P., Fita, L., & Bormann, K. J. (2014). Temperature response to future urbanization and climate change. *Climate dynamics*, 42, 2183-2199. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1789-6>
- Arnell, N. W., Lowe, J. A., Challinor, A. J., & Osborn, T. J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155, 377-391. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02464-z>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Beshir, S., Moges, A. & Dananto, M. (2025) Climate change projections using CMIP6 GCMs and downscaling approaches in the Upper Wabe Shebele Basin, Ethiopia. *Scientific Reports*, 15, 39521. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23194-6>
- Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921-1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- Chen, W., Alharthi, M., Zhang, J., & Khan, I. (2024). The need for energy efficiency and economic prosperity in a sustainable environment. *Gondwana Research*, 127, 22-35. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.025>
- Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., ... & Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature geoscience*, 7(9), 627-637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- Cook, B. I., Mankin, J. S., & Anchukaitis, K. J. (2018). Climate change and drought: From past to future. *Current Climate Change Reports*, 4, 164-179. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>
- Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature climate change*, 2(7), 491-496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Davis, R. E., Knappenberger, P. C., Michaels, P. J., & Novicoff, W. M. (2004). Seasonality of climate-human mortality relationships in US cities and impacts of climate change. *Climate Research*, 26(1), 61-76. <https://doi.org/10.3354/cr026061>
- Dieleman, H. (2013). Organizational learning for resilient cities, through realizing eco-cultural innovations. *Journal of Cleaner Production*, 50, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.027>
- Dukes, J. S., Mooney, H. A. (1999). Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14(4), 135-139. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01554-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01554-7)
- Esfandeh, S., Danekhar, A., Salmanmahiny, A., Alipour, H., Kazemzadeh, M., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. (2024). Climate change projection using statistical downscaling model over southern coastal Iran. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29416>
- Evans, G. W. (2019). Projected behavioral impacts of global climate change. *Annual review of psychology*, 70(1), 449-474. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-103023>

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fenta Mekonnen, D., & Disse, M. (2018). Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2391-2408. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2391-2018>
- Ghazi B, Jeihouni E (2022) Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7):621. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Grimm, N. B., Morgan Grove, J., Pickett, S. T., & Redman, C. L. (2000). Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems. In: Urban ecological systems present multiple challenges to ecologists—pervasive human impact and extreme heterogeneity of cities, and the need to integrate social and ecological approaches, concepts, and theory. *BioScience*, 50(7), 571-584. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_8
- Haji Mohammadi, M., Shafaie, V., Nazari Samani, A., Zare Garizi, A., & Movahedi Rad, M. (2024). Assessing future hydrological variability in a semi-arid mediterranean basin: soil and water assessment tool model projections under shared socioeconomic pathways climate scenarios. *Water*, 16(6), 805. <https://doi.org/10.3390/w16060805>
- Halecki, W., Stachura, T., Fudała, W., Stec, A., & Kuboń, S. (2023). Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104280. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104280>
- Hausfather, Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. Carbon Brief. Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
- Hobbie, S. E., & Grimm, N. B. (2020). Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0124>
- Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J. S. (2021). Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in Iran from the CMIP6 ensemble. *Atmosphere*, 12(8), 1052. <https://doi.org/10.3390/atmos12081052>
- Hu, Z., Li, Q., Chen, X., Teng, Z., Chen, C., Yin, G., & Zhang, Y. (2016). Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3), 519-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1568-x>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001:451–485. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kalkstein, L. S., & Greene, J. S. (1997). An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental health perspectives*, 105(1), 84-93. <https://doi.org/10.1289/ehp.9710584>
- Kearl, Z., & Vogel, J. (2023). Urban extreme heat, climate change, and saving lives: lessons from Washington state. *Urban climate*, 47, 101392. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101392>
- Kerr, R. A. (2007). Global warming is changing the world. *Science*, 316(5822), 188-190. <https://doi.org/10.1126/science.316.5822.188>
- Kumar, P. (2021). Climate change and cities: challenges ahead. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 645613. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.645613>
- Lenton, T. M., Xu, C., Abrams, J. F., Ghadiali, A., Loriani, S., Sakschewski, B., ... & Scheffer, M. (2023). Quantifying the human cost of global warming. *Nature Sustainability*, 6(10), 1237-1247. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6>
- Lin, J., & Qian, T. (2022). Earth's Climate History from 4.5 Billion Years to One Minute. *Atmosphere-Ocean*, 60(3-4), 188-232. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2082914>

- Lindley, S. J., Handley, J. F., Theuray, N., Peet, E., & McEvoy, D. (2006). Adaptation strategies for climate change in the urban environment: assessing climate change related risk in UK urban areas. *Journal of risk research*, 9(5), 543-568. <https://doi.org/10.1080/13669870600798020>
- Lu, K., Arshad, M., Ma, X., Ullah, I., Wang, J., & Shao, W. (2022). Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs. *International Journal of Climatology*, 42(15), 7703-7729. <https://doi.org/10.1002/joc.7673>
- Masek, J. G., Lindsay, F. E., & Goward, S. N. (2000). Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International journal of remote sensing*, 21(18), 3473-3486. <https://doi.org/10.1080/014311600750037507>
- McCarthy, M. P., Best, M. J., & Betts, R. A. (2010). Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical research letters*, 37(9). <https://doi.org/10.1029/2010GL042845>
- Melesse, A., Abtew, W., & Senay, G. (2019). *Extreme hydrology and climate variability: Monitoring, modelling, adaptation and mitigation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04193-9>
- Mills, G. (2006). Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. *Theoretical and applied climatology*, 84(1-3), 69-76. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0145-0>
- Misslin, R., Telle, O., Daudé, E., Vaguet, A., & Paul, R. E. (2016). Urban climate versus global climate change—what makes the difference for dengue? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1382(1), 56-72. <https://doi.org/10.1111/nyas.13084>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Oke, R. T. (1997). *Urban climate and global environmental change*. In: Perry, A., Thompson, R. (Eds.), *Applied climatology: Principles and Practice*, London: Routledge, 273-287. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3058458>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310-317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Phuong, D. N. D., Duong, T. Q., Liem, N. D., Tram, V. N. Q., Cuong, D. K., & Loi, N. K. (2020). Projections of future climate change in the Vu Gia Thu Bon River Basin, Vietnam by using statistical downscaling model (SDSM). *Water*, 12(3), 755. <https://doi.org/10.3390/w12030755>
- Pili, A. N., Leroy, B., Measey, J. G., Farquhar, J. E., Toomes, A., Cassey, P., ... & Chapple, D. G. (2024). Forecasting potential invaders to prevent future biological invasions worldwide. *Global Change Biology*, 30(7), e17399. <https://doi.org/10.1111/gcb.17399>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16(4), 1690. <https://doi.org/10.3390/en16041690>
- Pottier, A., Fleurbac, M., Méjean, A., & Zuber, S. (2021). Climate change and population: An assessment of mortality due to health impacts. *Ecological Economics*, 183, 106967. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106967>
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., ... & Imeson, A. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), 353-357. <https://doi.org/10.1038/nature06937>
- Rossati, A. (2016). Global warming and its health impact. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.15171/ijoem.2017.963>
- Roychoudhury, N., & Mishra, R. K. (2024). Climate Change-Global Warming. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(8), 1382-1384. <https://ijrpr.com/uploads/V5ISSUE8/IJRPR32215.pdf>
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475-2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Salinger, M. J. (2005). Climate variability and change: past, present and future—an overview. *Climatic change*, 70(1), 9-29. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5936-x>
- Schwarzbach, M. (1963). *Climates of the past: an introduction to paleoclimatology*. D. Van Nostrand (Ed.), 328 pp. https://books.google.com/books?id=M5ulzwEACAAJ&newbks=0&hl=en&source=newbks_fb
- Shaffril, H. A. M., Abu Samah, A., & Samsuddin, S. F. (2022). The Impacts of Fishermen's Resilience towards Climate Change on Their Well-Being. *Sustainability*, 14(6), 3203. <https://doi.org/10.3390/su14063203>

- Siabi, E. K., Awafo, E. A., Kabo-bah, A. T., Derkyi, N. S. A., Akpoti, K., Mortey, E. M., & Yazdanie, M. (2023). Assessment of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate scenarios and its impacts on the Greater Accra region. *Urban Climate*, 49, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101432>
- Solecki, W. D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., & Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 6(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002>
- Steiger, R., Knowles, N., Pöll, K., & Rutt, M. (2024). Impacts of climate change on mountain tourism: A review. *Journal of Sustainable Tourism*, 32(9), 1984–2017. <https://doi.org/10.1080/09669582.2022.2112204>
- Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., & Winter, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, 12, 4823–4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>
- Tierney, J. E., Poulsen, C. J., Montañez, I. P., Bhattacharya, T., Feng, R., Ford, H. L., ... & Zhang, Y. G. (2020). Past climates inform our future. *Science*, 370(6517), eaay3701. <https://doi.org/10.1126/science.aay3701>
- Toreti, A., Naveau, P., Zampieri, M., Schindler, A., Scoccimarro, E., Xoplaki, E., Dijkstra, H. A., Gualdi, S., & Luterbacher, J. (2013). Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4887–4892. <https://doi.org/10.1002/grl.50940>
- Vaezi, A., Routh, J., Rana, A., Sokhansefat, S., & Nasser, M. (2025). Linking Future Hydroclimatological Changes with Past Climatic Conditions in Southeastern Iran: Insights from Models and Observations. *International Journal of Environmental Research*, 19(1), 38. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00704-4>
- Vargas-Hernández, J. G., Pallagst, K., & Zdunek-Wielgołaska, J. (2023). *Urban green spaces as a component of an ecosystem*. In: Sustainable development and environmental stewardship: Global initiatives towards engaged sustainability (pp. 165–198). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28885-2_8
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2001). SDSM — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 16(4), 339–354. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2004). Using SDSM Version 3.1 — A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. UNFCCC Resource Materials. Retrieved from https://unfccc.int/resource/cd_roms/nal/v_and_a/Resource_materials/Climate/SDSM/SDSM.Manual.pdf
- Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4), 530–548. <https://doi.org/10.1177/030913339702100403>
- Wilby, R. L., T. M. L. Wigley, D. Conway, P. D. Jones, B. C. Hewitson, J. Main, & D. S. Wilks. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34, 2995–3008. <https://doi.org/10.1029/98WR02046>
- Wilhelm, M. (2011). *The Role of Community Resilience in Adaptation to Climate Change: The Urban Poor in Jakarta, Indonesia*. In: Otto-Zimmermann, K. (ed.) Resilient Cities. Local Sustainability, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6_5
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physics Geography*, 2, 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Xu, L., Wang, A., Wang, D., & Wang, H. (2019). Hot spots of climate extremes in the future. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(6), 3035–3049. <https://doi.org/10.1029/2018JD029980>
- Yang, X., Xu, X., Wang, Y., Yang, J., & Wu, X. (2024). Heat exposure impacts on urban health: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 174650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174650>
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>
- Zelenáková, M., Purcz, P., Hlavatá, H., & Blišťan, P. (2015). Climate change in urban versus rural areas. *Procedia Engineering*, 119, 1171–1180. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.968>
- Abedi, S., & Sedaghat, M. (2022). The assessment of climate change effects on tourism demand in the cities of Iran. *Journal of Urban Economics and Management*, 10(37), 1–18. <http://iueam.ir/article-1-1818-fa.html> (In Persian)
- Alijani, B., Moayedfar, S., & Sabaeimehr, M. (2010). Climate change study of Yazd city in relation to regional and urban development. *Research and Urban Planning*, 1(3), 41–58. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22285229.1389.1.3.3.6> (In Persian)
- Asakere, H., & Shahmansouri, B. (2016). Investigation and prediction of the temperature changes of Arak station based on statistical downscaling model. *Physical Geography Research*, 48(2), 193–212. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.59356> (In Persian)

- Borna, R. (2021). Analysis of desertification use IMDPA model with emphasis on climate and vegetation criteria (Case study: Shadegan Town). *Climate Change Research*, 2(6), 19–30. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.277914.1040> (In Persian)
- Fatehi, Z., & Shahoei, S. V. (2021). Simulation of the effect of global climate change on the maximum and minimum annual and seasonal temperatures of Hamadan city. *5th International Conference on Applied Research in Agriculture, National Resources and Environment*, Hamedan, Iran. <https://civilica.com/doc/1168561> (In Persian)
- Ghaffarigilandeh, A., Sobhani, B., Mikaeili, Kh., & Ghavidel, F. (2019). Energy supply of building in Tabriz city in relation to climate change using model ANP. *Geographic Notion*, 11(21), 139–160. https://geonot.znu.ac.ir/article_36051.html?lang=en (In Persian)
- Hadipour, M., Darabi, H., & Davudirad, A. (2020). Investigating urban heat islands (UHI) and the irrelation with air pollution, NDVI and NDBI in Arak using RS techniques. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 249–264. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38619> (In Persian)
- Halabian, A., Parvin, N., & Naghibzadeh, R. (2021). Analysis of the spatial and temporal variations in the thermal patterns of the Arak City in Iran using satellite image processing. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(119), 121–139. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.247885> (In Persian)
- Kaviyanirad, M., Aftabi, Z., & Valizadeh, H. (2022). Explaining the relationship between food security and environmental security in the context of climate change (a case study from Jiroft, Iran). *Climate Change and Climate Disasters*, 1(2), 24–46. https://cccd.znu.ac.ir/article_44662.html?lang=en (In Persian)
- Khosh Akhlagh, F., Negahban, S., Roshan, Gh., & Gharibi, E. (2010). Review the role and effect of climate changes on the climate comfort of Yazd City by the use of EVANZ model. *Geography and Development*, 8(20), 167–181. <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.636> (In Persian)
- Maryanji, Z., Toulabi Nejad, M., & Dolatshahi, Z. (2023). The effect of climate change on snowfall and its prediction in Hamedan County. *Physical Geography Research Quarterly*, 55(1), 113–129. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358026.1007765> (In Persian)
- Moradinejad, A., & Khosrobegi, S. (2025). Assessing the impact of climate change on temperature and precipitation parameters in Arak region. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(4), 9524–9534. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.458377.2258> (In Persian)
- Nasiri, R., Motesaddi Zarandi, S., & Esmaeil Motlagh, M. (2021). Climate change and the challenges of quantitative assessment of urban climate change: A case study in Tehran metropolis. *Scientific Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 19(3), 293–314. <https://sisph.tums.ac.ir/article-1-6064-fa.html> (In Persian)
- Rabaniha, M. (2020). Changing the fishery approach management, a solution to adapt to climate change conditions. *Ecology and Water Resources*, 4(1), 19–27. https://ewrj.areeo.ac.ir/article_123117.html (In Persian)
- Rabiei Sadeghabadi, M., Nouri, O., & Deihimfard, R. (2020). Plant selection for semi-arid urban landscapes with an emphasis on climate change (case study: Tehran). *Environmental Sciences*, 18(1), 219–236. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.219> (In Persian)
- Salehi, S., Fazil, S., & Hatami, F. (2018). The effect of climate change on fish-breeding (the region case study: The city of Sarvabad). *Geography and Human Relationships*, 1(3), 750–761. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1397.1.3.43.8> (In Persian)
- Soureh, E., & Mohammadi, B. (2024). Analyzing the climatic conditions of tourism in West Azerbaijan Province using bioclimatic indicators. *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 1–18. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.136135.1563> (In Persian)
- Torkashvand, M. G. (2017). Detection of heat islands over Arak City based on spatial autocorrelation analysis. *Environmental Based Territorial Planning (Amayesh)*, 9(35), 123–148. <https://sanad.iau.ir/journal/ebtp/Article/532371?jid=532371&lang=en> (In Persian)