



Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran

Elham Salahshur Boghmechi ¹, Reza Doostan ^{1*}, Iman Babaeian ²

¹ Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Research Institute for Meteorology and Atmospheric Science, Climate Research Center, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 29 October 2025

Revised: 01 February 2026

Accepted: 02 February 2026

Available Online:

07 February 2026

Keywords:

Precipitation

Altitude Zones

Climate Change

CMIP6

Shared Socioeconomic
Pathways (SSPs)

Iran

ABSTRACT

The aim of this study is to project future changes in precipitation across the altitudinal zones of Iran under global climate change scenarios. Daily precipitation data from 14 selected synoptic stations located in mountainous and highland regions during the baseline period (1985–2014), along with the outputs of CMIP6 models under three green house-gas emission scenarios—low (SSP1-2.6), moderate (SSP2-4.5), and high (SSP5-8.5) were employed. The results reveal that precipitation changes over Iran are spatially heterogeneous and largely affected by altitude and geographical position. On an annual scale, among six altitudinal zones, only the northern lowlands (Caspian coast) and the southern lowlands (Persian Gulf and Oman Sea coasts) exhibit statistically significant precipitation trends, whereas the other four zones (mountainous, inner foothill, outer foothill, and central regions) show non-significant increasing or decreasing trends. Seasonally, spring precipitation is expected to increase under the low-emission (sustainable development) scenario in both near and distant futures. Summer precipitation is projected to decline in northern lowlands, while an increase in summer and autumn rainfall is anticipated for southern lowlands and outer foothills. Moreover, most altitudinal zones show a positive tendency in autumn precipitation, although not statistically significant in some scenarios. Overall, the findings align with the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and with credible regional studies, emphasizing the need to focus water-resource management on areas with significant precipitation decrease (northern lowlands) and those with marked increase (southern lowlands), as well as on the generally decreasing trends observed in the high-altitude regions.

* Corresponding author: Reza Doostan

E-mail address: doostan@um.ac.ir

How to cite this article: Salahshur Boghmechi, E., Doostan, R., & Babaeian, I. (2026). Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 170-192. <https://doi.org/10.22067/geoh.2026.96222.1621>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

The aim of this study is to project future precipitation changes across different altitudinal zones of Iran under global climate change conditions. Climate change is widely recognized as one of the greatest challenges facing humanity in the twenty-first century. According to major international organizations, climate change is defined in two principal ways: the World Meteorological Organization (WMO) describes it as a long-term increase or decrease in the mean values of climatic variables, whereas the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emphasizes changes in climate anomalies driven primarily by human activities. These anomalies manifest through altered patterns of droughts, floods, heatwaves, cold spells, glacier retreat, sea-level rise, and other extreme events (Ahmadi et al., 2015).

The specific climate hazards affecting any region depend largely on its inherent climatic characteristics. Climate change influences the hydrological cycle, water availability, and water demand mainly through modifications in temperature and precipitation regimes. In this context, projecting future changes in temperature and precipitation using models from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), which benefit from improved physical parameterizations and higher accuracy, can provide valuable insights for long-term water-resource planning and management (Mahabadi et al., 2013). Iran is predominantly an arid and semi-arid country, receiving less than one-third of the global average annual precipitation (Alizadeh, 2017). Moreover, this limited precipitation has become increasingly irregular under climate change conditions. For instance, previous studies have projected a declining precipitation trend in northwestern Iran toward the end of the twenty-first century (Mohammadi et al., 2012), while changes in eastern Iran range from -11% to -15% in the near future and from -8% to $+15\%$ in the distant future relative to the observational period (Babaeian et al., 2021).

The natural setting of Iran is unique. The Iranian Plateau lies within the extensive Alpine–Himalayan mountain belt while simultaneously occupying the core of the world's largest desert belt, stretching from the Sahara Desert in North Africa to the Gobi Desert in Central Asia. Historically, due to pronounced altitudinal variability and limited atmospheric precipitation, human settlements in Iran have mainly developed in foothill regions and along river corridors in plains. Altitude therefore plays a critical role in shaping Iran's climate, with precipitation generally increasing with elevation in most regions. Given this background, the present study investigates future precipitation changes across Iran's altitudinal zones at both annual and seasonal scales. Particular emphasis is placed on assessing the role of altitude in modulating precipitation responses under different socioeconomic scenarios, an aspect that has received relatively limited attention in previous studies.

Material and Methods

This study employs both observational data and climate model outputs from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Daily observational precipitation data were obtained from 14 synoptic stations representing different altitudinal zones of Iran (Alijani, 2002). The baseline period of 1985–2014 corresponds to the historical reference period adopted in the Sixth Assessment Report of the IPCC.

Climate model data for the historical period (1985–2014) and the future period (2021–2100) were extracted from the Earth System Grid Federation (ESGF) database. Future projections were analyzed under three Shared Socioeconomic Pathway scenarios: sustainable development (SSP1-2.6), intermediate development (SSP2-4.5), and fossil-fuel-based development (SSP5-8.5). Four Earth System Models CMCC-ESM2, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, and NorESM2-MM—were selected for analysis.

Future precipitation changes were assessed for two time horizons: the near future (2021–2050) and the far future (2061–2090). Accordingly, precipitation trends under different socioeconomic scenarios were evaluated for mountainous, inner and outer foothill, northern lowland, southern lowland, and central zones. The statistical significance of precipitation trends was assessed using Student's t-test.

Results and Discussion

Annual precipitation in the high-altitude zone (1,340 m), represented by the Tabriz station, is projected to decrease by approximately 5–10% under all scenarios and in both future periods relative to the baseline period. Overall, precipitation in this zone exhibits a decreasing trend; however, this decline is statistically significant only in the distant future under the medium-emission scenario (SSP2-4.5). In the inner foothill zone (1,247 m), precipitation at the Mashhad station shows a statistically significant increase in both the near and distant future under the low-emission scenario (SSP1-2.6), whereas a non-significant decreasing trend is observed under the other scenarios. The most pronounced seasonal increase in precipitation is projected for autumn, with the highest increase occurring at the Isfahan station. Seasonally, under the SSP1-2.6 scenario, winter precipitation shows a significant increase in the near future at Mashhad. In contrast, a significant decrease in precipitation in the distant future under the medium-emission scenario is observed only at the Isfahan station.

For the outer foothill zone (1,242 m), an increase in annual precipitation is projected, which is statistically significant in the near future under both SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios. The magnitude of this increase ranges from approximately 10% to 40% compared to the baseline period (1985–2014). In general, autumn precipitation in the outer foothill zone shows a decreasing tendency. Conversely, winter precipitation increases under most scenarios—except for the high-emission scenario (SSP5-8.5)—although these increases are not statistically significant.

In the central region (1,300 m), annual precipitation is projected to increase by about 5–10%. This increase is statistically significant only in the near future under the SSP1-2.6 scenario, while no significant changes are detected under other scenarios. Autumn precipitation increases under all scenarios, with a statistically significant rise observed at the Zahedan station. Winter precipitation generally shows a non-significant increasing trend, except under the distant-future SSP5-8.5 scenario, where a decrease is projected. In the northern lowland region (12 m), annual precipitation changes are negative under most scenarios, except for the near-future SSP1-2.6 scenario, and the decreasing trend is statistically significant under the medium-emission scenario. Summer precipitation across this region shows a significant decline. Changes in autumn precipitation are not statistically significant in any scenario–period combination and generally remain below normal conditions. At the Sari station, precipitation follows the overall regional decreasing trend, whereas at the Gorgan station, precipitation exhibits a non-significant increase in most scenario periods, except under the medium-emission scenario in the distant future. Winter precipitation in this region also generally decreases, except under SSP1-2.6 and SSP2-4.5 in the near future. Overall, precipitation trends in the northern lowlands are predominantly negative, although most are not statistically significant. In contrast, annual precipitation in the southern lowland region (12 m) shows a statistically significant increase under several scenarios in both the near and distant future. This region exhibits the largest increase in precipitation among all six altitudinal zones. In general, summer and autumn precipitation are projected to increase, whereas winter precipitation tends to decrease. This decrease is statistically significant under the medium-emission scenario in the distant future, with the most pronounced decline observed at the Abadan station. Conversely, winter precipitation at the Chabahar station increases and is statistically significant under the near-future SSP5-8.5 scenario.

Table 1 summarizes precipitation changes across the different altitudinal zones of Iran and highlights trends that are statistically significant at the 0.05 level. Among the six altitudinal zones, statistically significant precipitation changes are observed only in the two low-lying regions: the northern lowlands (Caspian Sea coast) and the southern lowlands (Persian Gulf and Oman Sea coast). In contrast, precipitation changes in the remaining four higher-elevation zones mountainous, inner foothills, outer foothills, and central regions are not statistically significant.

Table 1- Changes in regional precipitation in the country (in percentage) and their significance at the 0.05 level

Southern lowland	Northern lowland	Central	Outer-Foothill	Inner-Foothill	High	Scenario	Period
18.6	2.6	23.3	33.2	35.7	3.7	SSP1-2.6	2050-2021
14.2	-1.7	21	39.2	4.2	1.5	SSP2-4.5	
32.9	-6.5	21.1	20.1	2.4	-3.2	SSP5-8.5	
29.7	-1.4	18.9	32	13.7	-4.8	SSP1-2.6	2061-2090
4.9	-7.7	17.9	27.5	-0.5	-4.2	SSP2-4.5	
44.9	-5.2	17.1	22.1	3.7	-4.6	SSP5-8.5	

Conclusion

This paper projected future precipitation behavior across different altitudinal zones of Iran using observational data from 14 representative synoptic stations and bias-corrected outputs from climate models participating in the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) under multiple socioeconomic scenarios. The results reveal a heterogeneous pattern of precipitation change across Iran's altitudinal zones, highlighting the critical role of elevation and geographic location in shaping future precipitation regimes. On an annual scale, among the six investigated altitudinal zones, statistically significant precipitation changes are observed only in two low-lying regions: the northern lowlands along the Caspian Sea coast and the southern lowlands adjacent to the Persian Gulf and the Oman Sea. In these regions, precipitation is projected to decrease and increase significantly, respectively, under different scenarios. In contrast, the remaining four zones mountainous regions, inner foothills, outer foothills, and central highlands exhibit both increasing and decreasing precipitation trends, none of which are statistically significant at the annual scale. Although a decreasing trend dominates in the mountainous zone, it does not reach statistical significance. Similarly, projected increases in precipitation in the central and outer foothill zones remain positive but statistically insignificant.

At the seasonal scale, a notable increase in spring precipitation is projected under the low-emission scenario (SSP1-2.6) in both the near and distant future. Summer precipitation is expected to decline in the northern lowlands, whereas an increase in summer and autumn precipitation is projected for the southern lowlands and, to a lesser extent, the outer foothill zones. Moreover, the direction of autumn precipitation changes in many high-elevation regions of Iran is generally positive, although these changes are not statistically significant in some scenario-period combinations. In the overall assessment, it is important to note that actual water availability and demand are influenced not only by precipitation but also by other climatic factors, particularly temperature. Based on established hydro-meteorological relationships, an increase of 1 °C in air temperature leads to an approximate 7% rise in atmospheric moisture demand, which may partially or fully offset the benefits of increased precipitation in some regions.

The findings of this study are consistent with those reported in reputable national and international research, including the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Overall, the results demonstrate that future precipitation changes across Iran's altitudinal zones are highly heterogeneous, underscoring the need for region-specific adaptation and water-resource management strategies, with particular attention to areas experiencing significant precipitation reductions in the northern lowlands and pronounced increases in the southern lowlands.



دسترسی آزاد



نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2026.96222.1621

مقاله پژوهشی



چشم انداز آینده بارش نواحی ارتفاعی ایران

الهام سلحشور بقمچی^۱  رضا دوستان^{۱*}، ایمان بابائیان^۲^۱ گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران^۲ پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳	هدف این پژوهش پیش‌نگری تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی ایران تحت شرایط تغییر اقلیم جهانی است. به این منظور بارش روزانه ۱۴ ایستگاه سینوپتیک منتخب در نواحی ارتفاعی از ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و مدل‌های فاز ششم پروژه CMIP6، تحت سه سناریوی انتشار کم (SSP1-2.6)، میانه (SSP2-4.5) و خیلی زیاد (SSP5-8.5) گازه‌های گلخانه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد، تغییرات بارش ایران، ناهمگون و متأثر از ارتفاع و موقعیت جغرافیایی است. در مقیاس سالانه، از شش ناحیه ارتفاعی، تنها دو ناحیه پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) تغییرات معنادار بارش دارند. تغییرات بارش چهار ناحیه دیگر (مرتفع، کوهپایه داخلی - بیرونی و مرکزی) روند افزایشی و کاهش‌ی غیرمعنادار است. در مقیاس فصلی، افزایش بارش بهار در سناریوی انتشار کم (توسعه پایدار) در آینده نزدیک و دور قابل انتظار است. کاهش بارش تابستان برای نواحی پست شمالی و افزایش بارش تابستان و پاییز برای نواحی پست جنوبی و کوهپایه بیرونی پیش‌نگری شد. افزون بر این، جهت تغییرات بارش فصل پاییز در بسیاری از نواحی ارتفاعی ایران مثبت است، اگر چه در برخی سناریوها معنادار تشخیص داده نشد. یافته‌های این تحقیق با گزارش ششم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مطالعات معتبر داخلی همخوانی دارد. این نتایج، ضرورت تمرکز بر مناطق دارای کاهش معنادار بارش مانند ناحیه پست شمالی و افزایش معنادار در ناحیه پست جنوبی و کاهش بودن اغلب بارش‌ها در نواحی مرتفع را برای توسعه پایدار منابع آب مورد تأکید قرار می‌دهد.
کلمات کلیدی: بارش نواحی ارتفاعی تغییر اقلیم پروژه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) سناریوهای مشترک اقتصادی - اجتماعی (SSPs) ایران	

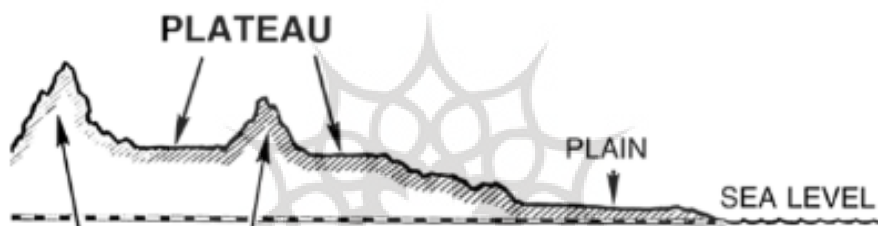
مقدمه

بارش از تغییر پذیرترین عناصر جوی از نظر زمانی و مکانی است (Halibian, 2008) و به عنوان ورودی چرخه آب در یک ناحیه می باشد (Mohammadi, Sari-Saraf & Rostamzadeh, 2012). یکی از بزرگ ترین چالش های بشر در قرن بیست و یکم، تغییر اقلیم است. دو تعریف عمده تغییر اقلیم، کاهش یا افزایش مستمر میانگین پارامترهای اقلیمی توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) و افزایش ناهنجاری های اقلیمی ناشی از فعالیت های انسان توسط هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) می باشد. امروزه عمدتاً تأکید بر تعریف دوم است. مخاطرات اقلیمی در قالب تغییر در الگوی رفتاری خشکسالی، سیل، موج گرما و سرما، ذوب یخ ها و بالا آمدن سطح آب دریا، و غیره نمود دارد (Ahmadi, Lashkari, Azadi & Kaykhosravi, 2015). طبیعتاً نوع مخاطرات اقلیمی هر منطقه متناسب با ویژگی های اقلیمی آن منطقه است. کره زمین از آخرین دوره یخبندان حدود ۱۲۰۰۰ سال قبل، وارد دوره گرم یا بین یخچالی شده است و به طور طبیعی دمای کره زمین رو به گرم شدن دارد، اما انسان در طی سده گذشته تا کنون با مصرف بیش از حد سوخت های فسیلی از یک سو و افزایش جمعیت جهان و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر، سرعت گرمایش و تغییر زمین را تسریع کرده است. چنانکه دانشمندان از جمله تیندال (Tyndall, 1861)، تغییر اقلیم ناشی از تغییر دی اکسید کربن جو، و آرهینوس (Arrhenius, 1896)، دو برابر شدن مقدار دی اکسید کربن و افزایش دمای ۵ درجه ای را پیش بینی کردند. امروزه بعد از تغییر اقلیم مرتبط با انسان، که با تخریب اکوسیستم ها در کره زمین همراه است، چشمگیرتر است. تغییر اقلیم موجب افزایش مخاطرات زیست محیطی، کاهش بارش و افزایش بارش جدی در جهان می شود. میانگین نزولات جوی با توجه به الگوی گردش کلی هوا در ایران، یک سوم میانگین جهانی است که گرمایش جهانی و تغییر اقلیم باعث کاهش بارش و افزایش پهنه های کم بارش، روزهای بی بارش، بارش های حدی و سیلاب شده است. پیش نگرانی بارش همواره مورد توجه محققان در مناطق مختلف بوده است، چنانکه حسین و همکاران (Hussien, Memon & Savic, 2016) پیش نگرانی بارش های آینده را با استفاده از روش پیش نگرانی های احتمالی تحت سناریوهای انتشار مختلف (RCP^۱) در راستای کاهش ریسک کمبود آب و توسعه برنامه مدیریت شبکه آب هوشمند مطالعه کردند. آنها نشان دادند که روش های پیش نگرانی نقش مهمی در پیش نگرانی دقیق بارش دارند. اخیراً، از روش های یادگیری ماشین به طور گسترده ای برای پیش نگرانی بارش استفاده می شود (Huang, Lin, Huang & Xing, 2017). شناخت الگوهای مقیاس کاهی در مقیاس منطقه ای برای شبیه سازی بارش، اولین قدم ضروری قبل از پیش نگرانی بارش در آینده است. روش های آماری تصحیح برون داد بارش مدل های اقلیمی معمولاً متناسب با آمار بارش مشاهداتی هستند. بر اساس نظریه فیشر (Fisher et al., 1994)، سناریوی تغییر اقلیم مرحله ای از تغییر در متغیرهای هواشناسی است که بر اساس سطح پذیرفته شده ای از غلظت دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه ای بنا شد و تنظیم سناریوهای تغییر اقلیم آینده همگی بر اساس سطح تمرکز گازهای گلخانه ای در جو است. تولید سناریوهای اقلیمی لازمه پیش نگرانی اقلیم آینده است. در حال حاضر مهم ترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی، مدل های گردش عمومی می باشند (Bazrafshan Moghadam, 2016). تغییر اقلیم با تغییر در دما و بارش بر چرخه هیدرولوژیک، منابع آب در دسترس و تقاضای آب اثر می گذارد. در این راستا پیش نگرانی تغییرات دما و بارش توسط مدل های گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم به دلیل افزایش دقت در برون داد آنها، می تواند کمک شایانی برای برنامه ریزی و مدیریت منابع آب در دوره آینده باشد (Ansari Mahabadi, Dehban, Zareian & Farrokhnia, 2022). ارتفاع از طریق تأثیر بر چرخه های آب و انرژی، نقش مهمی در تعدیل توزیع مکانی تغییرات اقلیمی در مناطق کوهستانی ایفا می کند. مناطق کوهستانی تحت تأثیر گرمایش انسانی، تغییرات سریع محیطی است که نرخ این تغییرات اغلب بر اساس ارتفاع طبقه بندی می شود (Pepin et al., 2025). اثر تغییر اقلیم در ارتفاعات ترکیه در نواحی منتخب مطالعه و نشان از اقلیم خشک در این نواحی دارد (Gur et al., 2024). ایران به لحاظ موقعیت طبیعی شرایط خاصی دارد، به گونه ای که فلات ایران از یک سو روی یکی از بزرگ ترین و فعال ترین کمربندهای کوهزایی جهان، یعنی کمربند آلپ-همیالیا، قرار

گرفته و از سوی دیگر در کانون بزرگ‌ترین کمربند بیابانی جهان واقع شده است؛ کمربندی که از صحرای بزرگ آفریقا در شمال این قاره آغاز شده و تا بیابان گبی در مغولستان آسیای مرکزی امتداد دارد. فلات ایران دارای دو رشته کوه البرز در شمال با جهت غربی - شرقی و زاگرس با جهت شمال غربی - جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده در مناطق مرکزی است. از گذشته با توجه به این تنوع ارتفاعی، و از طرفی کاهش نزولات جوی، عمدتاً شهرهای ایران در مناطق پایکوهی و یا در کنار رودخانه‌ها در دشت‌ها و جلگه‌ها استقرار دارند. در واقع ارتفاع نقش مهمی در اقلیم ایران بازی می‌کند و بارش‌ها با ارتفاع در غالب مناطق ایران همبستگی مستقیمی دارند و با افزایش ارتفاع، بارش‌ها افزایش نشان می‌دهند (Alijani, 2002). ایران سرزمینی خشک و بیابانی با نزولات جوی بسیار کم بوده که میزان بارندگی در آن کمتر از یک سوم بارندگی در سطح دنیا است (Alizadeh Choubari & Najafi, 2017). پیش‌نگری بارش در شمال غرب کشور، حاکی از روند کاهشی بارش تا پایان قرن ۲۱ است (Mohammadi et al., 2012). پیش‌نگری بارش و دمای شرق ایران با مقیاس کاهی دینامیکی - آماری در سناریوی متوسط بررسی شد، تغییرات بارش شرق در آینده نزدیک بین ۱۱- تا ۱۵- درصد و در آینده دور بین ۸- تا ۱۴/۹+ درصد نسبت به دوره دیدبانی است (Babaian, Karimian, Modirian, Flamarzi & Kouhi, 2021). پیش‌نگری شدت بارش ایران در اقلیم‌های مختلف با مدل منطقه‌ای RegCM4.5 انجام شد. انتخاب پیکربندی بهینه بر مبنای ایده طرحواره همرفت مبتنی بر طبقه اقلیمی، عملکرد مدل منطقه‌ای را در پیش بینی فصلی بارش ایران افزایش می‌دهد (Eghbali, Babaian, Azadi, Habibi Nokhandan & Zarrin, 2021). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب تمامی مدل‌ها، سناریوها و کاهش بارش (0.05-11.15 درصد) را در اغلب مدل‌ها و سناریوها نشان می‌دهد (Fallah Kalaki, Shokri Kouchak & Ramezani Etidali, 2021). مقایسه مقادیر پیش‌نگری شده بارش و دما تحت سناریو RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 در سه دوره ۲۰۳۸-۲۰۱۸، ۲۰۶۸-۲۰۳۹، ۲۰۶۹-۲۱۰۰ با دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۰۵)، در هر دو ایستگاه بابل و قراخیل، نشان‌دهنده کاهش بارش متوسط سالانه و افزایش دمای متوسط سالانه تحت هر سه سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه است (Mortazavifar, Mobin, Mokhtari, Ekrami & Rafiei Sardavii, 2018). ایران از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای قرار گرفته که نه تنها به طور طبیعی و ذاتی بخش عمده آن جزو مناطق خشک و فراخشک محسوب می‌شود (حدود ۶۶ درصد)، بلکه جزو کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری آن از تغییر اقلیم بالاتر از متوسط جهانی است (Azare, 2016). بنابراین رویداد حدی کاهش بارش (خشکسالی) (Hajiabadi, Hassanpour, Yaghoubzadeh & Hamami, 2019) و رویدادهای حدی افزایش بارش (رخداد سیل) نشان از تغییر رژیم بارش آینده دارد (Khazaei, Khazaei & Thaqfian, 2019). از این رو، ضروری است بارش حدی و تأثیر گرمایش جهانی بر مقادیر حدی بارش مطالعه شود (Fattahi & Moghimi, 2019). در دهه‌های اخیر، در کشور روند بارش‌ها نزولی بوده است و با ادامه این روند، مشکل شدید کم آبی و افزایش مخاطره خشکسالی می‌باشد. بر این اساس، در این پژوهش سعی بر این است که با مطالعه و پیش‌نگری بارش در آینده با استفاده از برون‌داد مدل‌های گردش کلی، مقدار و روند آن در آینده برآورد گردد و چشم انداز نزولات جوی برای برآورد منابع آبی در آینده ارائه شود. این تحقیق، به دنبال ارزیابی و بررسی بارش‌های آینده در ایران با استفاده از مدل‌های آماری و داده‌های ایستگاهی از نقاط ارتفاعی مختلف ایران است تا با استفاده از نتایج آن یک دیدگاه کلی از شرایط بارشی غالب آینده حاصل شود. این تحقیق میزان و زمان بارش‌ها را به صورت سالانه و فصلی در مناطق ارتفاعی مختلف برآورد نموده و اثر تغییر اقلیم بر بارش پهنه‌های ارتفاعی را بررسی و ارزیابی می‌کند. بررسی پژوهش‌های مختلف نشان داد که نقش ارتفاع در تغییرات بارش ایران تحت سناریوهای اقتصادی - اجتماعی (SSP¹) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس پیش‌نگری الگوی رفتاری بارش‌ها در مناطق ارتفاعی ایران تحت سه سناریوی انتشار کم (توسعه پایدار)، میانی (توسعه میانی) و خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) در آینده بررسی شد.

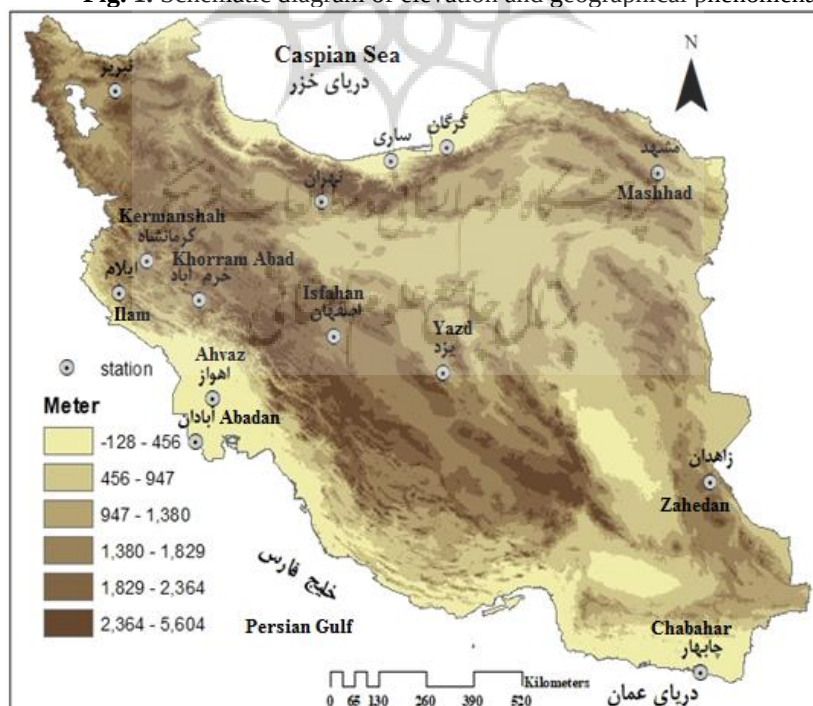
منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه از دو سری داده مشاهداتی و برونداد مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده استفاده شد. داده‌های مشاهداتی شامل ۱۴ ایستگاه (جدول ۱) در مناطق ارتفاعی مختلف از ۲۰۱۴-۱۹۸۵ است، بر مبنای تقسیم‌بندی ایستگاه‌های سینوپتیک در پهنه‌های ارتفاعی ایران (Alijani, 2002)، مطالعه انجام شد (شکل ۲). ایران به لحاظ موقعیت طبیعی شرایط خاصی دارد، طوری که فلات ایران بر روی بزرگترین رشته کوه (کمر بند آلپ- هیمالیا) و در کانون بزرگترین کمر بند بیابانی جهان از صحرا در شمال آفریقا تا گبی در مغولستان قرار دارد. فلات ایران با دو رشته کوه البرز در شمال با جهت غربی - شرقی و زاگرس با جهت شمال غربی - جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده در مناطق مرکزی است. از گذشته با توجه به این تنوع ارتفاعی (شکل ۱)، و از طرفی کاهش نزولات جوی، عمدتاً شهرهای ایران در مناطق پایکوهی و یا در کنار رودخانه‌ها در دشت‌ها و جلگه‌ها مستقر شدند. در واقع ارتفاع نقش مهمی در اقلیم ایران دارد و بارش‌ها با ارتفاع در غالب مناطق ایران همبستگی مستقیمی (افزایش ارتفاع = افزایش بارش) دارند. حال با پیشگیری آینده بارش‌ها در مناطق ارتفاعی، می‌توان به نوعی اثر تغییر اقلیم و بر بارش‌ها در ارتفاعات مختلف را آشکار کرد.



شکل ۱- طرح شماتیک ارتفاع و پدیده‌های جغرافیایی

Fig. 1. Schematic diagram of elevation and geographical phenomena



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک

Fig. 2. Geographical location of synoptic stations

جدول ۱- ویژگی جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 1- Geographical characteristics of synoptic stations

بارش (میلیمتر) (mm)Precipitation					Annual سالانه	Height ارتفاع	Lat عرض	Lon طول	code کد	ایستگاه Station	منطقه ارتفاعی Altitude zone
فصلSeason											
Winter زمستان	Autumn پاییز	Summer تابستان	Spring بهار								
69	70	15	94	249	1361	46.28	38.07	40706	تبریز Tabriz	داخلی In	کوهپایه Foothills
192	148	4	75	419	۱۳۱۹	47.07	34.32	40766	کرمانشاه Kermanshah		
122	48	5	70	246	999.2	59.6	36.29	40745	مشهد Mashhad		
109	74	5	48	236	1191	51.31	35.68	40754	تهران Tehran	بیرونی Out	
49	31	2	24	107	۱۵۵۲	51.87	32.74	40802	اصفهان Esfahan		
214	163	1	90	468	۱۱۴۸	48.17	33.26	40782	خرم آباد Khoramabad		
293	186	3	79	551	1337	46.41	33.63	40780	ایلام Ilam	مرکزی Central	
31	16	0	7	54	۱۲۳۰	54.35	31.89	40821	یزد Yazd		
42	18	2	14	75	1370	60.86	29.48	40856	زاهدان Zahedan		
222	309	123	108	740	23	52.59	36.32	40759	ساری Sari	شمالی North	پست Lowland
171	168	79	100	519	0	54.43	36.84	40738	گرگان Gorgan		
64	0	16	72	152	6.6	48.37	30.36	40831	آبادان Abadan		
43	6	10	64	122	8	60.64	25.29	40898	چابهار CHababar	جنوبی South	
96	0	19	102	218	22.5	48.67	31.31	40811	اهواز Ahvaz		

دوره مورد مطالعه در گذشته دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ انتخاب شد تا با دوره تاریخی گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم تطابق داشته باشد. داده‌های مشاهداتی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. داده‌های مدل‌های اقلیمی برای دو دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۱ از پایگاه ESGF¹ استخراج شدند. داده‌های دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) سه طیف سناریوی انتشار کم (SSP1-2.6)، انتشار میانه (SSP2-4.5) و انتشار خیلی زیاد (SSP5-8.5) را پوشش می‌دهند. همه داده‌های فوق در مقیاس روزانه می‌باشند.

مواد و روش‌ها

برونداد مدل‌های گردش کلی در مطالعات در مقیاس منطقه‌ای و یا محلی نیازمند مقیاس‌کاهی می‌باشند. برای مقیاس‌کاهی داده‌های مشاهداتی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ با داده‌های تاریخی مدل در دوره مشابه مقایسه شده و برونداد مدل در دوره تاریخی اصلاح شد. معادلات مستخرج در این دوره برای تصحیح برونداد مدل‌ها در آینده تحت سناریوهای مختلف استفاده شد. به دلیل تعدد مدل‌های گردش کلی، مدل‌ها فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6²) غربالگری شدند، به این صورت که ابتدا شرط در دسترس بودن داده‌های تاریخی و سناریو بر مدل‌های اعمال شد، لذا آن گروه از مدل‌هایی که یکی از داده‌های تاریخی یا سناریو را نداشتند، از فرآیند انتخاب حذف شدند. سپس فیلتر واریته (ripf) شبیه‌سازی مدل اعمال شد و در نهایت از بین مدل‌های موجود مدل‌های سامانه زمین (ESM³) که در مقایسه با سایر مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده دارای قابلیت‌های

1 - Earth System Grid Federation

2 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

3 - Earth System Models

بیشتری در شبیه سازی فرآیندهای سطحی، بیوسفر، آتروسفرها و ... می باشند، انتخاب شد. تعداد مدل های در دسترس ۷ مدل برآورد شد. از بین هفت مدل یادشده، چهار مدل انتخاب شدند که دلیل انتخاب این چهار مدل این است که آنها از نوع مدل های سامانه زمین هستند که نسخه با کیفیت بهتر از مدل های گردش عمومی (GCM^1) هستند، زیرا مولفه های بیشتری از سامانه اقلیم را در فرآیند مدل سازی در نظر می گیرند و ضمناً دارای تفکیک مکانی بیشتری در مقایسه با مدل های گردش عمومی هستند. به همین دلیل مدل های CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-HR, GFDL-ESM4, NorESM2-MM به عنوان مدل های نهایی انتخاب شدند. برای انجام محاسبات و مقیاس کاهی از نرم افزار CMhyd استفاده می شود. از نرم افزار GrADS برای کار با داده های با فرمت nc و نوشتن اسکریپت در محیط gs و از نرم افزارهای SPSS و Excel برای بررسی آماری و ترسیم نمودارها استفاده شد. پس از دانلود و دریافت فایل های چهار مدل (CMCC-ESM2, MPI-ESM1-2-HR, GFDL-ESM4, NorESM2-MM) با استفاده از فرامین CDO بخش مورد نظر ایران را از فایل ها جدا کرده تا بهتر و دقیق تر محدوده مورد نظر مطالعاتی ارزیابی شود (در حال حاضر نیازی به این کار نیست زیرا پایگاه داده کوپرنیک^۲ امکان دانلود داده های فاز ششم پروژه مقایسه مدل های جفت شده برای محدوده های زمانی و مکانی دلخواه را با حجم بسیار کم فراهم کرده است). سپس داده های هر ایستگاه طبق چهار مدل به صورت داده های TXT استخراج شد و بعد از فرآیند مرتب سازی داده ها توسط نرم افزار CMhyd مقیاس کاهی شد. در مرحله داده های آینده تحت سناریوهای توسعه پایدار، توسعه میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی مرتب سازی شدند و تا سال ۲۱۰۰ داده های مقیاس کاهی شده طبق سناریوهای نامبرده در هر ایستگاه و مدل تحلیل شدند. پنج روش برای مقیاس کاهی برون داد بارش، چهار مدل از مجموعه مدل های فاز ششم پروژه مقایسه مدل های جفت شده انتخاب شد که نتایج در جدول ۲ به عنوان نمونه برای ایستگاه هواشناسی مشهد آورده شده است. بر اساس نتایج، روش های مقیاس کاهی به ترتیب بر اساس توانمندی آنها در شبیه سازی پنج نمایه آماری همبستگی، RMSE، انحراف استاندارد، صدک ۹۵ بارش برای چهار مدل فوق مرتب شدند. نتایج نشان دادند که از بین چهار روش مقیاس کاهی، دو روش Linear Scaling (LS) و Local Precipitation Intensity (LI) دارای توانمندی بیشتری در مقایسه با دو روش دیگر دارند؛ به طوری که روش های LS و LI به ترتیب در ۶۳ و ۶۷ درصد موارد پنج شاخص آماری فوق را بهتر از سایر روش های شبیه سازی کرده اند در حالی که این مقدار در مورد دو شاخص Power Distribution Mapping (DM) و Transformation (PT) به ترتیب ۲۱ و ۱۷ درصد است. نتایج فوق با قدری انحراف برای سایر ایستگاه های مورد مطالعه نیز صادق است بر این اساس دو روش LS و LI به عنوان روش های مقیاس های مورد استفاده قرار گرفتند.

بعد از فرایند مقیاس کاهی و استخراج داده های آینده در سه سناریو، مرتب سازی داده ها تا ۱۰۰ سال آینده و مقیاس کاهی بر روی سناریوهای نامبرده در هر ایستگاه و مدل انجام شد. در گام بعدی تحقیق در نرم افزار اکسل پارامترهای مختلف را در نظر گرفته تا بارش ها در آینده ارزیابی شود؛ بدین منظور داده های آینده را به دو دوره تقسیم بندی شد، یک دوره آینده نزدیک که از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ (دهه ۲۰۳۰) و دوره آینده دور که از سال ۲۰۶۱ تا ۲۰۹۰ (دهه ۲۰۷۰) را شامل می شود و سپس با تقسیم بندی این دو دوره، آینده دور و نزدیک به مقایسه این دو دوره با دوره گذشته ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ (دهه ۲۰۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی، نمودارهای هر ایستگاه برای دوره مشاهداتی و سه سناریوی آینده ترسیم شدند که بر اساس آن به پیش نگر بارش ها در بازه های آینده دور، نزدیک و مقایسه آن با بارش های گذشته پرداخته شد. در این تحقیق در نقاط ارتفاعی مختلف کشور شامل: ناحیه (1340m)، ناحیه کوهپایه ای بیرونی (1247m)، ناحیه کوهپایه ای داخلی (1242m)، ناحیه پست سواحل شمالی (12m)، ناحیه پست سواحل جنوبی (12m) و نواحی مرکزی (1300m)، تغییرات بارش ها بر اساس سناریوهای سناریوهای اقتصادی - اجتماعی مطالعه شد. سپس با استفاده از آزمون تی - استیودنت و سطح معنی دار ۰.۰۵ درصد معناداری روند بارش ها تعیین شد. انتخاب آماره تی - استیودنت به دلیل نرمال بودن توزیع اکثر ایستگاه های مورد مطالعه در سطح معناداری ۰/۰۵ و یک مورد در سطح ۰/۱۰ بوده است.

1 - Global Climate Model

2 - <https://cds.climate.copernicus.eu>

نتایج و بحث

در این بخش پیش‌نگری ناحیه‌ای بارش کشور بر اساس داده‌های بارش تصحیح اریبی شده برون‌داد مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده منتخب در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دور (۲۰۶۱-۲۰۹۰) طبق سه سناریوی توسعه پایدار، توسعه میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در دو مقیاس زمانی سالانه و فصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- توانمندی روش‌های مختلف مقیاس‌کاهی بارش در دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۱۴، ایستگاه مشهد

Table 2- Performance of different precipitation downscaling methods during the observational period (1985–2014) at Mashhad station

روش مقیاس‌کاهی Downscaling method	میانگین (م.م. بر روز) Mean (mm day ⁻¹)	RMSE	انحراف استاندارد (نسبی) Standard deviation (relative)	صدک ۹۵ (م.م.) 95th percentile (mm)
مشاهداتی	0.66	-	2.89	4.1
LS	0.65	3.87	0.93	4.11
LI	0.63	3.76	0.96	4.14
PT	0.64	3.89	1.07	3.88
DM	0.62	4.49	1.21	3.59

ناحیه مرتفع (ارتفاع ۱۳۴۰ متر)

تغییرات سالانه بارش در دو ایستگاه منتخب ناحیه مرتفع (تبریز و کرمانشاه) را نشان می‌دهد (شکل ۳ و جدول ۳)، بارش ایستگاه تبریز در همه سناریوها و در هر دو دوره آینده نسبت به گذشته ۵ تا ۱۰ درصد کاهش دارد. در ایستگاه کرمانشاه در دو سناریوی توسعه پایدار و توسعه میانه در دوره نزدیک، افزایش بارش خواهند داشت، ولی در دوره آینده دور بارش‌ها کاهش می‌یابند. به طور میانگین، ناحیه مرتفع در مقیاس سالانه با کاهش بارش‌ها در آینده نزدیک و دور در سناریوهای مختلف روبرو خواهد شد. همچنین بارش فصل بهار ایستگاه تبریز در سناریوی توسعه پایدار و میانه در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۹۰)، افزایش خواهد داشت ولی این افزایش در سطح ۰.۰۵ معنادار نیست و کاهش بارش این ایستگاه طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی معنادار نیست. اما در کرمانشاه در همه سناریوها بارش فصل بهار افزایش غیر معنی دار را نشان می‌دهد. به طور کلی در کل ناحیه، بارش‌ها در سناریوی توسعه پایدار و توسعه میانه دوره آینده دور، افزایش و در دیگر سناریوها کاهش غیر معنی دار مشهود است. بارش‌های تابستان در ایستگاه تبریز به جر در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده دور، کاهش غیر معنی دار است، اما در کرمانشاه در همه سناریوها افزایش دارد و تنها در سناریوی انتشار میانه در دوره آینده دور معنی دار است. بارش‌های پاییز در تبریز در اغلب سناریوها روند افزایشی دارد ولی هیچ یک در سطح ۰.۰۵ معنادار نیستند. در ایستگاه کرمانشاه تنها در دوره آینده نزدیک طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش معنادار بارش پیش‌نگری شده است، اما در همه سناریوهای دیگر روند کاهشی غیر معنادار دیده می‌شود. در کل ناحیه نیز اگر چه اغلب روندهای افزایش بارش پیش‌نگری شده است، اما تنها افزایش بارش طبق سناریوی توسعه پایدار در آینده نزدیک معنادار است، در حالی که وضع موجود انتشار گازهای گلخانه‌ای در کره زمین در حال حاضر و تا میانه آینده نزدیک طبق سناریوی میانه تا توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی مورد انتظار است. بارش‌های زمستان تبریز در دو دوره آینده ترکیبی از روندهای افزایشی و کاهشی است، اما هیچ یک معنادار نیستند. در کرمانشاه بارش‌های زمستان در اغلب سناریوها کاهشی است، و کاهش پیش‌نگری شده بارش‌ها طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در هر دو دوره معنادار است. در مجموع در این ناحیه ارتفاعی، در اکثر سناریوها بارش روند کاهشی دارد ولی این کاهش تنها در دوره آینده دور و طبق سناریوی انتشار میانه معنادار است.

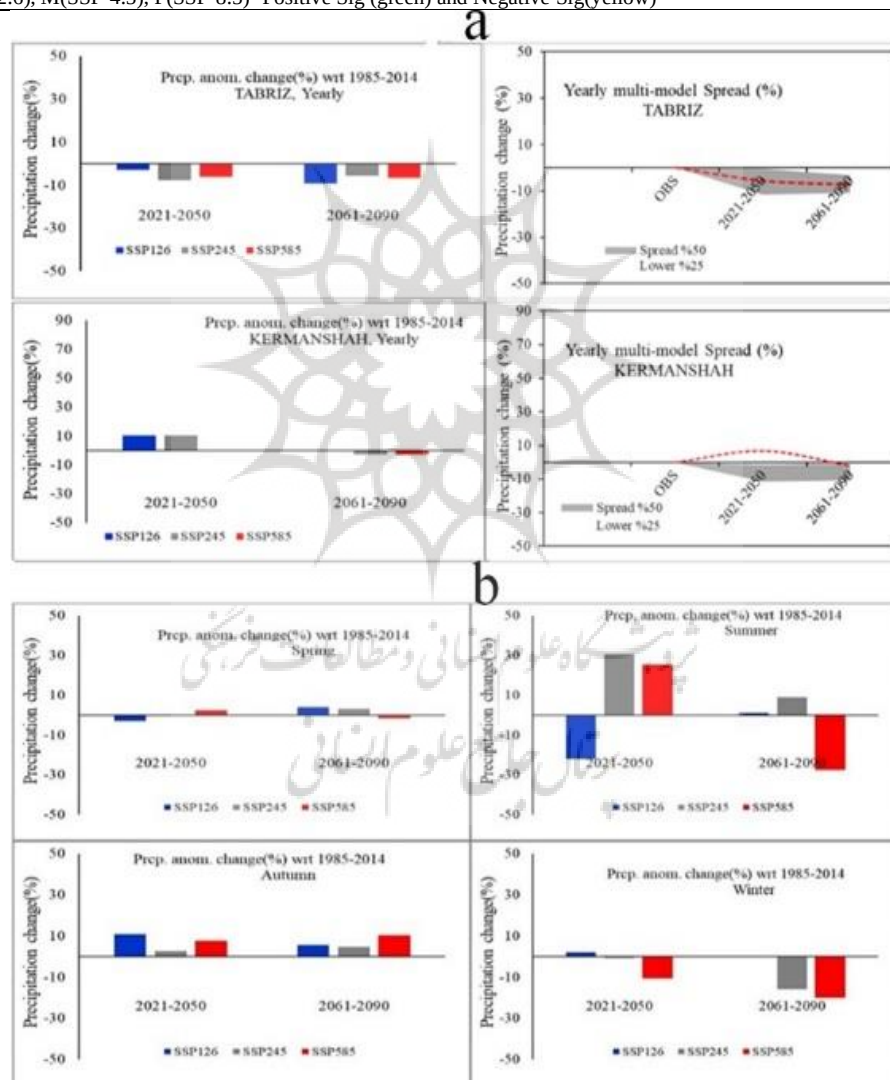
جدول ۳- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه مرتفع

Table 3- Annual and seasonal precipitation variations in the high-altitude zone

دوره	سناریو	تبریز (Tabriz)				کرمانشاه (Kermanshah)				ناحیه مرتفع			
		فصل				فصل				فصل			
		ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز
۲۰۵۰-۲۰۶۰	ک	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
	م	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	خ	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
۲۰۹۰-۲۰۹۵	ک	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+
	م	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	-
	خ	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)

Scenario: P(SSP-2.6), M(SSP-4.5), F(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل ۳- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ)، محدوده عدم قطعیت (٪) (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه مرتفع

Fig. 3. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the high-altitude zone

ناحیه کوهپایه داخلی (ارتفاع ۱۲۴۷ متر)

پیش‌نگری بارش برای ناحیه کوهپایه‌ای داخلی در مقیاس سالانه، نشان می‌دهد (شکل ۴ و جدول ۴)، بارش ایستگاه مشهد طبق سناریوی توسعه پایدار در هر دو دوره آینده نزدیک و دور افزایش بارش معنادار است و در دیگر سناریوها روند کاهشی بوده ولی معنادار نیستند. در ایستگاه اصفهان فقط در دوره آینده نزدیک و طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش بارش معنادار است ولی در سایر سناریوها روند افزایش بارش معنادار نیستند. در ایستگاه تهران در هیچ یک از سناریوها تغییرات بارش معنادار نیست، هر چند طبق سناریوی توسعه پایدار در آینده نزدیک روند افزایش مشاهده می‌شود. به طور کلی در این ناحیه ارتفاعی، تنها در سناریوی توسعه پایدار و در آینده نزدیک افزایش بارش معنادار است و در سایر سناریوها، تغییرات بارش معنادار نیستند. در مقیاس فصلی، تغییرات بارش فصل بهار در هیچ ایستگاهی در سناریوهای مورد بررسی معنادار نیست. با این حال طبق سناریوی توسعه پایدار، در همه دوره‌ها روند افزایش بارش و طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در همه دوره‌ها روند کاهش بارش دیده می‌شود که در سطح ۰/۰۵ معنادار نیست. در فصل تابستان در اغلب سناریوها روند بارش در ایستگاه‌های مشهد و تهران کاهشی بوده ولی معنادار نیست، اما در ایستگاه اصفهان روند بارش در همه سناریوها افزایشی است که تنها در دوره آینده طبق سناریوی میانه افزایش معنادار نیست. در مجموع تغییرات بارش فصل تابستان در این ناحیه بارشی معنادار نیست. در بین فصول مختلف، بیشترین افزایش بارش معنادار این ناحیه ارتفاعی در فصل پاییز برآورد شده است، بطوریکه طبق سناریوی توسعه پایدار در هر دو دوره و طبق سناریوی میانه فقط در آینده نزدیک روند افزایش بارش معنادار است، اما در سایر سناریوها افزایش بارش معنادار نیست. از بین سه ایستگاه واقع در این ناحیه، بیشترین افزایش بارش برای ایستگاه اصفهان پیش‌نگری شده است. در فصل زمستان، طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش بارش در آینده نزدیک معنادار است و در سایر سناریوها تغییرات بارش معنادار نیست. همچنین افزایش بارش طبق سناریوی توسعه پایدار و در هر دو دوره، در ایستگاه مشهد معنادار است و تنها در ایستگاه اصفهان کاهش بارش در آینده دور طبق سناریوی میانه، معنادار است.

ناحیه کوهپایه بیرونی (ارتفاع ۱۲۴۲ متر)

در مقیاس سالانه، پیش‌نگری بارش‌های سالانه در هر سه سناریو و در هر دو دوره مطالعاتی در این ناحیه افزایش را نشان می‌دهد، که افزایش طبق سناریوی توسعه پایدار و طبق سناریوی میانه در آینده نزدیک معنادار است. مقادیر افزایش بارش‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) متغیر است (جدول ۵ و شکل ۵). مقادیر و سناریوهای افزایش بارش در ایستگاه ایلام بیش از خرم‌آباد است. در مقیاس فصلی، بیشترین افزایش بارش برای فصل بهار پیش‌نگری شده است که در ایستگاه ایلام در همه سناریوها افزایشی و عمدتاً معنی‌دار است، اما ایستگاه خرم‌آباد، سناریوی توسعه میانه نزدیک و توسعه پایدار و توسعه میانه دور، افزایش معنی‌دار و در دیگر سناریوها کاهش دارد. به طور کلی نیز بارش‌های بهار، به جز در توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی نزدیک و دور، در دیگر سناریوها افزایش معنی‌داری دارند. بارش‌های تابستان خرم‌آباد افزایش دارد که در سناریوی میانه آینده دور معنی‌دار می‌باشد، اما در ایستگاه ایلام، در اغلب سناریوها روند بارش کاهشی برآورد شده است که در هیچ یک تغییرات معنادار نیستند. به طور کلی نیز در این ناحیه ارتفاعی، بارش‌های تابستانه در سناریوی میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دور افزایشی معنی‌دار و در سناریوهای نزدیک کاهشی است. بارش‌های فصل پاییز در دو ایستگاه متفاوت است، چنانکه در خرم‌آباد، در تمام سناریوها افزایشی است که تنها در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، افزایش معنی‌دار است، اما در ایلام بارش‌ها در تمامی سناریوها کاهشی است که تنها در سناریوی میانه دوره نزدیک کاهش معنی‌دار می‌باشد. به طور کلی نیز بارش‌های این فصل در منطقه کوهپایه بیرونی کاهشی است. بارش‌های زمستان در ایستگاه خرم‌آباد در همه سناریوها کاهشی بوده ولی در هیچ یک معنادار نیستند، اما در ایستگاه ایلام، بارش‌های زمستان در همه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی است که افزایش تنها در آینده دور معنادار نیست. در کل ناحیه نیز عمدتاً در همه سناریوها به جز توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی، افزایش بارش زمستان حادث می‌شود که افزایش در هیچ یک از سناریوها معنادار نیست.

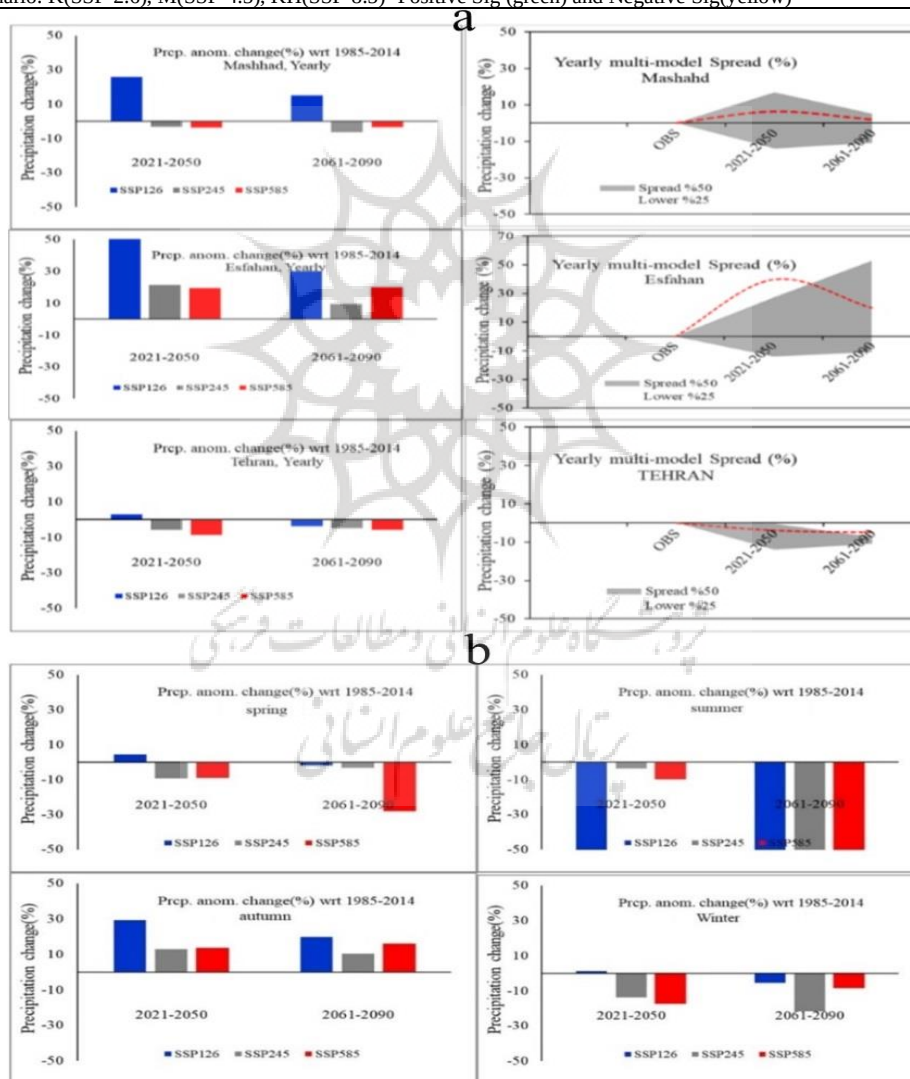
جدول ۴- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه کوهپایه داخلی

Table 4- Annual and seasonal precipitation variations in the inner piedmont zone

دوره Period	سال Year	مشهد (Mashhad)				تهران (Tehran)				اصفهان (Esfahan)				ناحیه کوهپایه داخلی			
		فصل Season				فصل Season				فصل Season				فصل Season			
		ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز
۲۰۲۱-۲۰۵۰	ک	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	م	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
۲۰۵۰-۲۰۶۱	خ	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	ک	-	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
۲۰۶۱-۲۰۹۰	م	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-
	خ	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig (yellow)



شکل ۴- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪) (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه کوهپایه داخلی
Fig. 4. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the inner piedmont zone

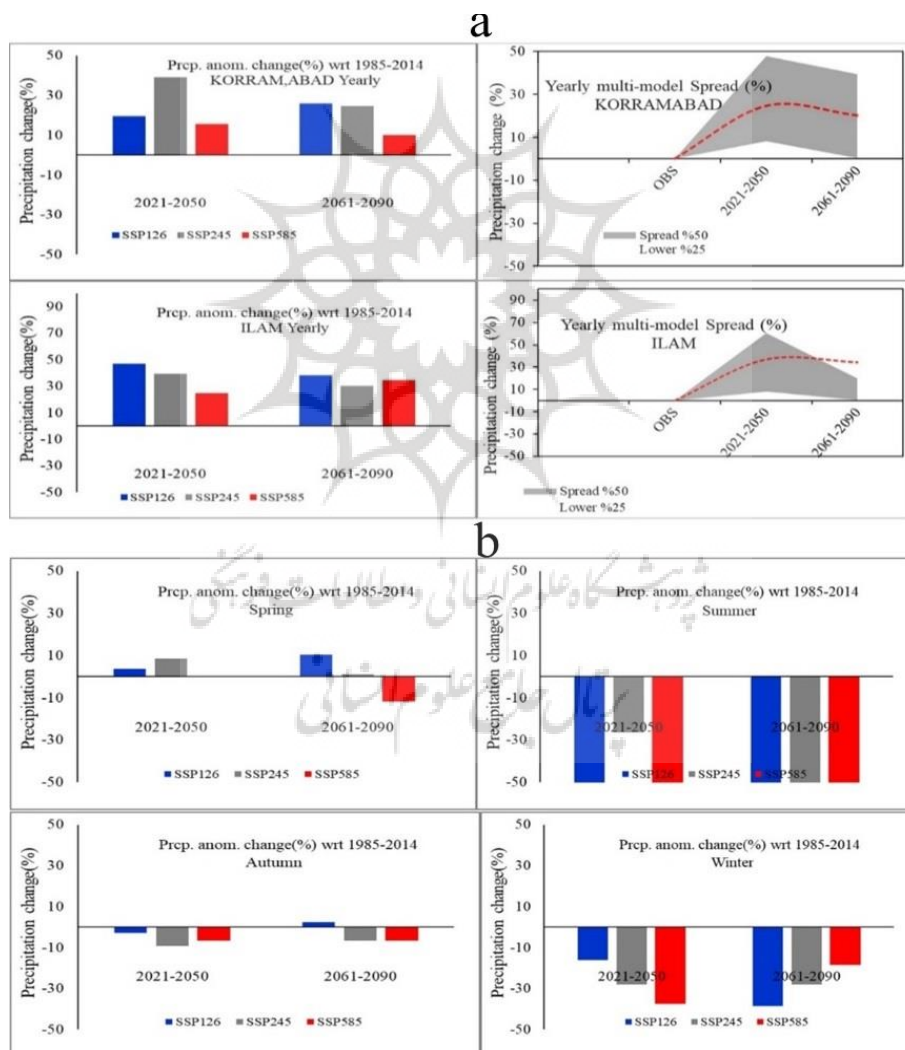
جدول ۵- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه کوهپایه بیرونی

Table 5- Annual and seasonal precipitation variations in the outer piedmont zone

دوره Period	تاریخ Date	خرم آباد (Khoramabad)				ایلام (Ilam)				ناحیه کوهپایه بیرونی			
		فصل Season				فصل Season				فصل Season			
		ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز	ب	ت	پ	ز
ک	۲۰۵۰	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+
م	۲۰۲۱	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+
خ	۲۰۲۱	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+
ک	۲۰۹۰	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+
م	۲۰۶۱	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+
خ	۲۰۶۱	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل ۵- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪) (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه کوهپایه بیرونی

Fig. 5. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the outer piedmont zone

ناحیه مرکزی (ارتفاع ۱۳۰۰ متر)

بارش‌های این ناحیه ارتفاعی در مقیاس سالانه (جدول ۶ و شکل ۶) افزایشی بین ۵ تا ۱۰ درصد دارد که در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، افزایش بارش معنی‌دار و در سایر سناریو تغییرات معنادار نیست. چنانکه در ایستگاه یزد، به جز سناریوی میانه دوره آینده دور در دیگر سناریوها افزایش غیر معنی‌داری دارد و در ایستگاه زاهدان بارش سالانه در همه سناریوها، افزایش ولی تنها در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، معنی‌دار می‌باشد. در این دوره بارش‌ها بین ۱۰ تا ۳۰ درصد در سناریوهای مختلف افزایش دارند. در مقیاس فصلی، بارش‌های فصل بهار ناحیه مرکزی در تمام سناریوها، افزایشی است ولی تنها در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک افزایش معنادار است و در سایر سناریوها افزایش بارش‌ها معنادار نیستند. چنانکه در یزد بارش‌های فصل بهار عمدتاً در سناریوهای مختلف افزایش غیر معنی‌داری دارد، اما در زاهدان بارش‌ها در همه سناریوها، افزایش و در سناریوی توسعه پایدار نزدیک، معنی‌دار می‌باشد. بارش‌های فصل تابستان در این ناحیه، به طور کلی در سه سناریوی دوره آینده نزدیک افزایشی و در سناریوهای دوره آینده دور، کاهش می‌باشد، اما هیچ یک از آنها در سطح 0.5 معنادار نیستند. چنانکه در یزد، بارش‌ها به جز در سناریوی توسعه پایدار و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، در سایر دوره - سناریوها افزایش غیر معنی‌داری داشته و در زاهدان در همه سناریوها افزایش غیر معنی‌دار بارش‌ها مشهود است. در این ناحیه، بارش‌های پاییز در تمامی دوره - سناریوها افزایشی است، اما در نیمی از دوره - سناریوها افزایش بارش معنادار است، چنانکه در یزد و زاهدان در همه سناریوها افزایش بارش‌ها پاییزه حادث شده ولی در زاهدان این افزایش‌ها معنی‌دار است. بارش‌های زمستان به طور کلی در این ناحیه، به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، افزایشی غیر معنی‌دار است. چنانکه در بارش‌های زمستان یزد و زاهدان بجز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور که کاهش می‌باشد، در دیگر سناریوها افزایشی می‌باشد، اما در هیچکدام از ایستگاه‌ها، معنی‌دار نیست.

ناحیه پست شمالی (ارتفاع ۱۲ متر)

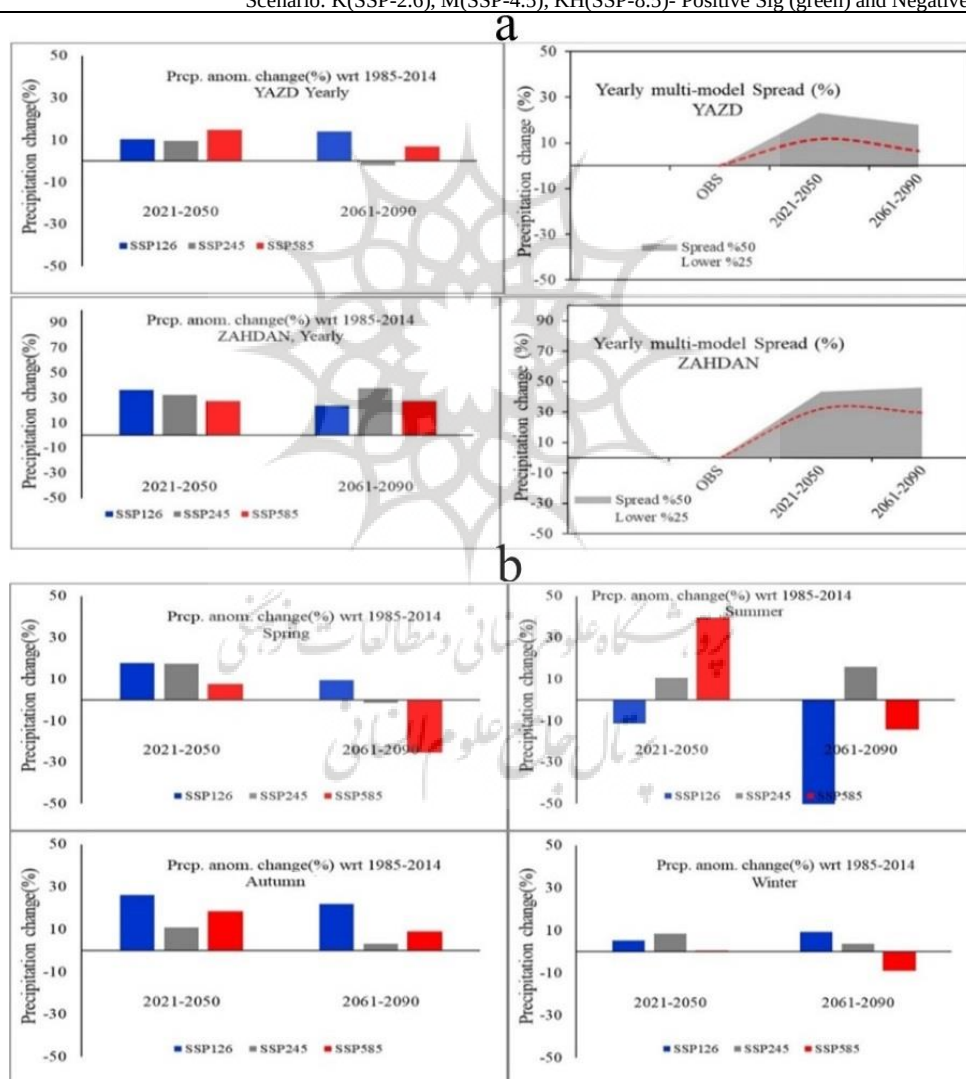
تغییرات بارش‌ها غالب سناریوها در مقیاس سالانه، به جز در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک، کاهش می‌باشد که در سناریوی میانه دوره آینده دور، کاهش بارش معنی‌دار نیز می‌باشد (جدول ۷ و شکل ۷). چنانکه کاهش بارش‌های ساری، در آینده دوره عمدتاً معنادار است، اما در گرگان به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده نزدیک و سناریوی میانه دوره آینده دور، که بارش‌ها کاهش می‌باشد، در دیگر سناریوها، افزایش نشان می‌دهد. در مقیاس فصلی، به طور کلی بارش‌های فصل بهار در این ناحیه هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهش دیده می‌شود ولی هیچ یک از این تغییرات معنادار نیستند. چنانکه در ساری، بارش‌های فصل بهار عمدتاً افزایشی به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، اما در گرگان در دوره نزدیک کاهش می‌باشد و در دوره آینده دور افزایش دارد. به طور کلی بارش‌های تابستان در کل ناحیه، کاهش معنی‌دار است. در فصل تابستان بارش‌های ساری در همه سناریوها کاهش و عمدتاً معنی‌دار می‌باشد. در گرگان نیز بارش‌ها به جز در سناریوی میانه آینده نزدیک و سناریوی توسعه پایدار دوره آینده دور، در بقیه سناریوها کاهش است. تغییرات بارش فصل پاییز در هیچ سناریویی معنادار نیست و عمدتاً گرایش به کمتر از نرمال دارد. در ساری مشابه روند کلی این ناحیه، روند بارش‌ها عمدتاً کاهش می‌باشد، اما در گرگان به جز در سناریوی میانه دوره آینده دور، در سایر سناریوها، بارش افزایش غیر معنی‌دار دارد. به طور کلی بارش‌های زمستان نیز در این ناحیه به جز در سناریوی توسعه پایدار و میانه در دوره آینده نزدیک، در سایر سناریوها کاهش است. در مجموع در این ناحیه و همچنین در هر دو ایستگاه مورد مطالعه روند بارش‌ها عمدتاً کاهش است ولی هیچ یک از روندها معنادار نیستند.

جدول ۶- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه مرکزی

Table 6- Annual and seasonal precipitation variations in the central zone

دوره Period	سناریو	یزد (Yazd)					زاهدان (Zahedan)					ناحیه مرکزی				
		فصل Season					فصل Season					فصل Season				
		ب	ت	پ	ز	م	ب	ت	پ	ز	م	ب	ت	پ	ز	م
-۲۰۵۰	ک	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲۰۲۱	م	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲۰۲۱	خ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
-۲۰۹۰	ک	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
۲۰۶۱	م	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲۰۶۱	خ	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)
 Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig (yellow)



شکل ۶- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (چپ) و محدوده عدم قطعیت (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه مرکزی

Fig. 6. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the central zone

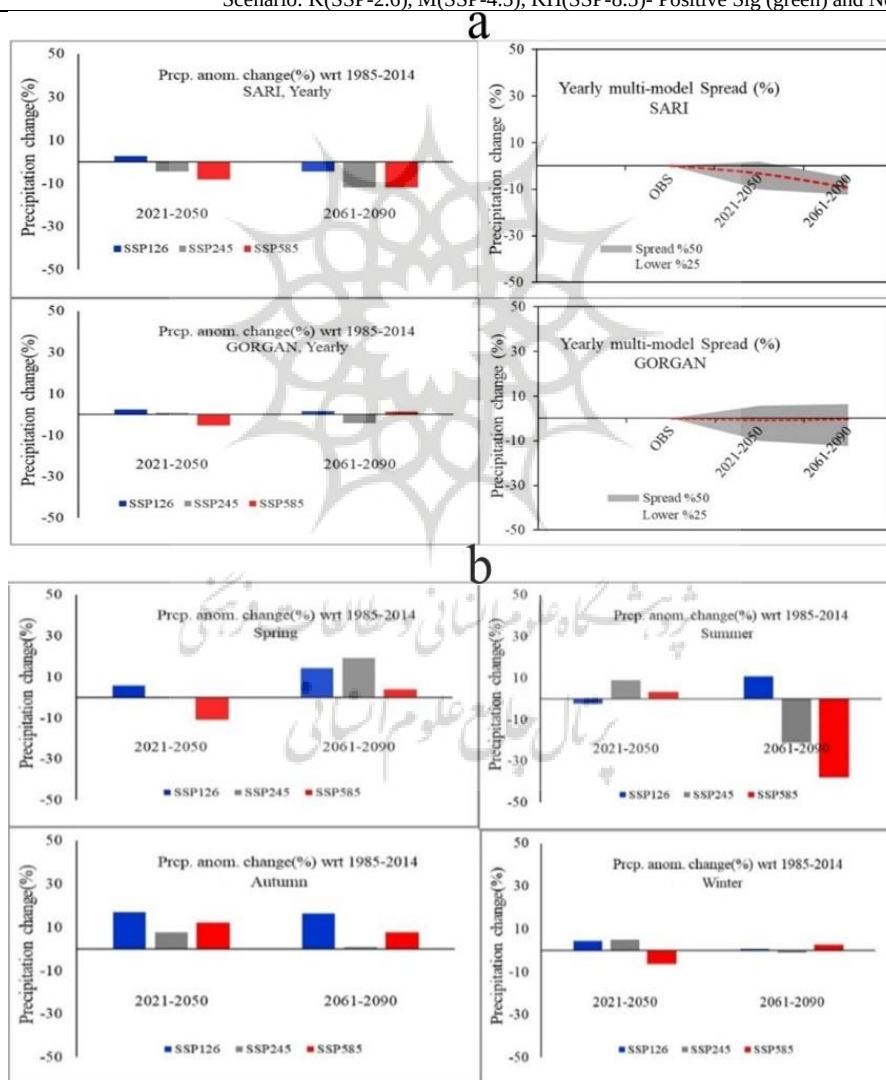
جدول ۷- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه پست شمالی

Table 7- Annual and seasonal precipitation changes in the northern lowland zone

دوره Period	سناریو Scenario	ساری (Sari)					گرگان (Gorgan)					ناحیه پست شمالی				
		فصل Season					فصل Season					فصل Season				
		ب	ت	پ	ز	میانگین	ب	ت	پ	ز	میانگین	ب	ت	پ	ز	میانگین
۲۰۵۰-۲۰۲۱	ک	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+
	م	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	خ	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
۲۰۹۰-۲۰۶۱	ک	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-
	م	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	خ	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig (yellow)



شکل ۷- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (چپ) و محدوده عدم قطعیت (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه پست شمالی
Fig. 7. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the northern lowland zone

ناحیه پست جنوبی (ارتفاع ۱۲ متر):

بارش‌های سالانه در ناحیه پست جنوبی افزایش معنی‌داری را در سناریوهای مختلف در دوره آینده نزدیک و دور نشان می‌دهد (جدول ۸ و شکل ۸). بیشترین افزایش معنادار بارش در بین شش ناحیه مورد بررسی در این ناحیه رخ می‌دهد. چنانکه در هر سه ایستگاه ساحلی جنوب ایران، آبادان، اهواز و چابهار، افزایش معنی‌داری در بارش‌های سالانه مشهود است. در بین این سه ایستگاه، افزایش بارش در ایستگاه چابهار بیشتر است که افزایش بین ۱۰ تا بیش از ۵۰ درصد برآورد شده است. بارش‌های فصل بهار به طور کلی به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی آینده نزدیک و سناریوی میانه دوره آینده دور، کاهش می‌دهد، و در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک، کاهش معنی‌دار می‌باشد. چنانکه این کاهش در ایستگاه آبادان در همه سناریوها معنی‌دار می‌باشد، اما در ایستگاه اهواز، به جز در سناریوی توسعه پایدار در دیگر سناریوها افزایش غیر معنی‌داری را نشان می‌دهد. در چابهار بارش‌های بهار در تمامی سناریوها افزایشی، غیر معنی‌دار است. بارش‌های فصل تابستان به طور کلی در این ناحیه، به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، افزایشی است که افزایش در سناریوهای توسعه پایدار و میانه در دوره دور معنادار است. به طور کلی بارش‌های فصل تابستان در این ناحیه افزایشی است. چنانکه در ایستگاه آبادان بارش‌های تابستانه در تمامی سناریوها افزایش معنی‌داری دارد، اما در اهواز بارش‌ها در دوره آینده نزدیک کاهش و در دوره دور افزایشی غیر معنی‌دار می‌باشد. بارش‌های چابهار نیز، در تابستان به جز در سناریوی توسعه پایدار دوره نزدیک، افزایش غیر معنی‌داری دارد. بارش‌های فصل پاییز به طور کلی در این ناحیه افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. چنانکه در ایستگاه‌های آبادان، اهواز و چابهار در این فصل بارش‌ها در تمام سناریوها به جز در سناریوی توسعه پایدار در اهواز، افزایشی است. این افزایش در ایستگاه آبادان و اهواز عمدتاً معنی‌دار است. بارش‌های زمستان به طور کلی در این ناحیه ارتفاعی، کاهش می‌دهد که در سناریوی میانه دوره دور، معنی‌دار نیز می‌باشد. بیشترین کاهش معنی‌دار بارش‌های زمستان در آبادان بوده که در تمامی سناریوها کاهش و معنی‌دار می‌باشد. اما در اهواز، به جز در سناریوی توسعه میانه دوره نزدیک و توسعه پایدار دوره دور، کاهش بارش‌های آینده مشهود است، برعکس در چابهار بارش‌های زمستان افزایش را نشان می‌دهد و در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره نزدیک معنی‌دار می‌باشد.

مقادیر کمی تغییرات ناحیه‌ای بارش

تغییرات بارش نواحی ارتفاعی مختلف کشور (جدول ۹) همراه با معناداری تغییر آنها در سطح ۰/۰۵ تعیین شد. مناطق با تغییرات معنادار است در کنار درصد تغییر بارش مشخص شده است. همانطور که در جدول مشهود است، از شش ناحیه ارتفاعی مورد بررسی تنها در دو ناحیه پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) تغییرات بارش معنادار است و تغییر در چهار ناحیه ارتفاعی دیگر (مرتفع، کوهپایه داخلی، کوهپایه بیرونی و مرکزی) معنادار نیستند. اگر چه در ناحیه مرتفع در اغلب سناریوها، روند کاهش در بارش مشاهده می‌شود، اما سطح کاهش بارش به اندازه‌ای نیست که معنادار باشد. در نواحی ارتفاعی مرکزی و کوهپایه بیرونی کشور در تمامی سناریوها، بارش افزایش یافته است، اما سطح افزایش به اندازه‌ای نیست که معنادار تشخیص داده شود. علاوه بر این، بایستی به این موضوع توجه کرد که در طبیعت نیاز به آب تابعی از عرضه و تقاضای آب است، به نحوی که با افزایش دمای هوا طبق رابطه کلاسیوس-کلاپیرون به طور میانگین ۷ درصد نیاز آبی در طبیعت افزایش می‌یابد که به همین میزان عرضه آب را بلاثر می‌کند، لذا در صورت اعمال اثر افزایش دما ممکن است در تعداد زیادی از نواحی نیاز واقعی آب بیشتر باشد و حتی افزایش بارش نیز نیاز ناشی از گرمایش جهانی را جبران نکند. یافته‌های این تحقیق با نتایج تعداد به نسبت زیادی از پژوهش‌های خارجی و داخلی از جمله لی و همکاران (Lee et al., 2023) و بلبائیان و همکاران (Babaian, Karimian, Modirian & Mirzaei, 2019)، هماهنگی دارد.

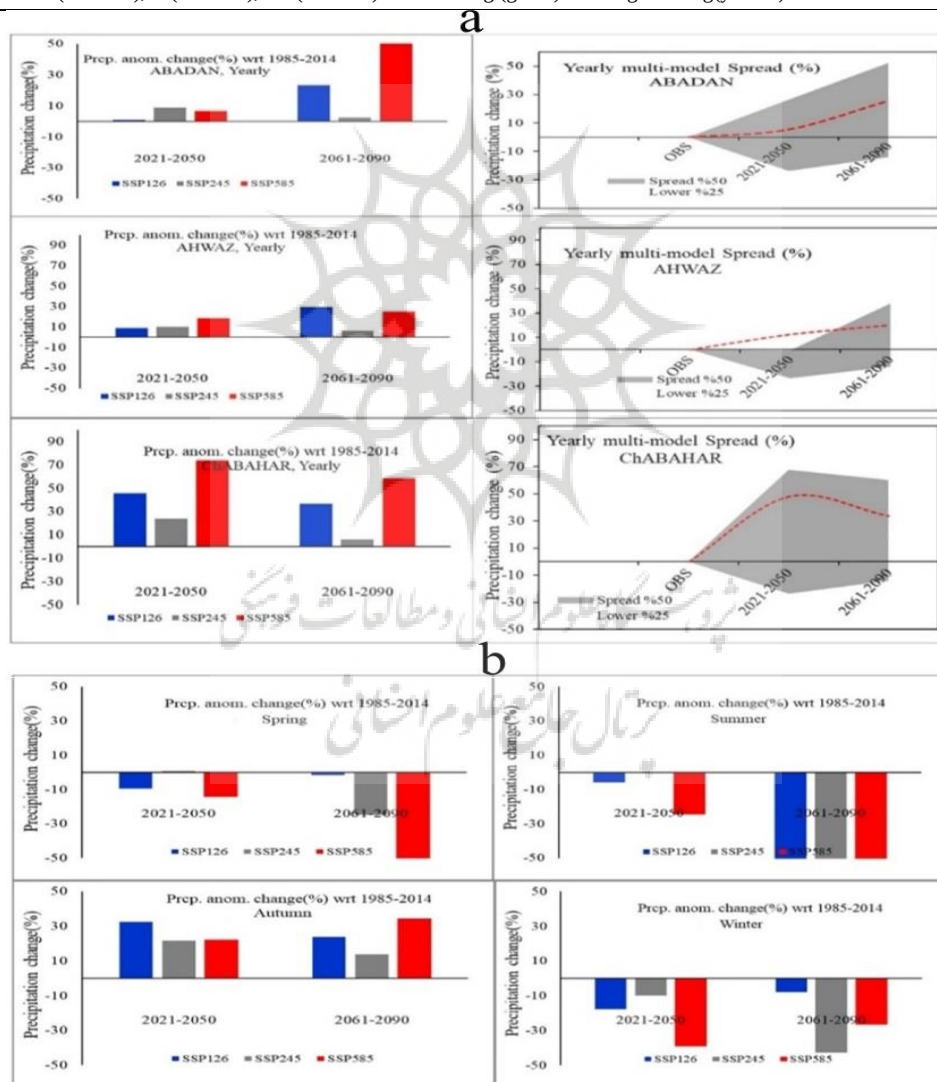
جدول ۸- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه پست جنوبی

Table 8- Annual and seasonal precipitation changes in the southern lowland zone

دوره	سناریو	آبادان (Abadan)	اهواز (Ahvaz)	چابهار (Chabahar)	ناحیه
Period	Scenario	Season فصل	Season فصل	Season فصل	Season فصل
		ب	ت	پ	ز
		ب	ت	پ	ز
۲۰۲۱-۲۰۵۰	ک	+	+	+	+
۲۰۲۱-۲۰۵۰	م	+	+	+	+
۲۰۲۱-۲۰۵۰	خ	+	+	+	+
۲۰۶۱-۲۰۹۰	ک	+	+	+	+
۲۰۶۱-۲۰۹۰	م	+	+	+	+
۲۰۶۱-۲۰۹۰	خ	+	+	+	+

سناریو انتشار: کم (توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) - معنی داری مثبت (سبز)، معنی داری منفی (زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig (yellow)



شکل ۸- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (چپ) و محدوده عدم قطعیت (راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه پست جنوبی

Fig. 8. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the southern lowland zone

جدول ۹- تغییرات بارش ناحیه‌ای کشور (بر حسب درصد) و معناداری آنها در سطح ۰/۰۵

Table 9- Regional precipitation changes across the country (percentage) and their significance at the 0.05 level

دوره Period	سناریو Cenario	مرتفع High	کوهپایه Foothills		مرکزی Central	پست ساحلی Coastal Lowland	
			داخلی In	بیرونی Out		شمالی N	جنوبی S
2021- 2050	SSP1-2.6	3.7	35.7	33.2	23.3	2.6	18.6
	SSP2-4.5	1.5	4.2	39.2	21	-1.7	14.2
	SSP5-8.5	-3.2	2.4	20.1	21.1	-6.5	32.9
2061- 2090	SSP1-2.6	-4.8	13.7	32	18.9	-1.4	29.7
	SSP2-4.5	-4.2	-0.5	27.5	17.9	-7.7	4.9
	SSP5-8.5	-4.6	3.7	22.1	17.1	-5.2	44.9

نتیجه‌گیری

این پژوهش به شناخت الگوی رفتاری بارش‌های آینده ایران در پهنه‌های ارتفاعی مختلف تحت سناریوهای مختلف اقتصادی - اجتماعی (SSP) با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۱۴ ایستگاه همدیدی کشور، به عنوان نماینده ایستگاه‌های واقع در نواحی ارتفاعی مختلف، و برونداد تصحیح شده مدل‌های مجموعه فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) می‌پردازد. نتایج پیش‌نگری‌ها و تحلیل‌ها نشان‌دهنده روند ناهمگن تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی کشور است که حاکی از اهمیت تأثیر ارتفاع و ناحیه جغرافیایی در چگونگی بارش‌های آینده کشور دارد. در مقیاس سالانه از شش ناحیه ارتفاعی مورد بررسی، تنها دو ناحیه پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) شاهد تغییرات معنادار بارش هستند، به طوری که در این دو ناحیه تغییرات بارش به ترتیب به صورت کاهش و افزایش معنادار در دوره‌های آینده پیش‌نگری شده است. اما در چهار ناحیه ارتفاعی مرتفع، کوهپایه داخلی، کوهپایه بیرونی و مرکزی، گرچه هر دو روندهای کاهش و افزایش بارش مشاهده می‌شود، اما این تغییرات از نظر آماری معنادار نیستند. به‌ویژه آنچه نمود غالبی در پیش‌نگری‌های دارد، کاهش بارش در ناحیه مرتفع کوهستانی است، هر چند معنادار شناخته نشد. این ناحیه که منبع تامین آب رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی است، اهمیت زیادی در محیط زیست و حیات ایران دارد. همچنین افزایش بارش در نواحی مرکزی و کوهپایه بیرونی نیز مثبت ولی غیر معنادار است. از طرف دیگر در مقیاس فصلی، عمده افزایش در بهار طبق سناریوی انتشار کم، در هر دو دوره آینده نزدیک و دور مورد انتظار است. در نواحی پست شمالی در فصل تابستان کاهش معنی‌دار بارش‌ها برآورد شد، در حالی که در ناحیه پست جنوبی افزایش بارش تابستانی و پاییز مورد انتظار است. در ناحیه مرکزی افزایش بارش تابستان و پاییز طبق سناریوی انتشار کم پیش‌نگری شد. در نواحی کوهپایه بیرونی افزایش بارش در فصل بهار و تابستان برای برخی سناریوها برآورد گردید. همچنین در ناحیه کوهپایه بیرونی برای آینده نزدیک و سناریوی انتشار کم، افزایش بارش پیش‌نگری شد. در نواحی مرتفع تنها برای پاییز و آینده نزدیک طبق سناریوی انتشار کم، افزایش بارش برآورد گردید، اما در سایر فصول نواحی مختلف ارتفاعی بارش‌ها عمدتاً کاهشی خواهد بود. در ارزیابی کلی باید توجه داشت که نیاز واقعی به آب متأثر از عوامل دیگری مانند دما و تقاضای آبی نیز می‌باشد، و هر یک درجه افزایش دمای هوا حدود ۷ درصد نیاز آبی را در طبیعت افزایش می‌دهد که می‌تواند افزایش بارش‌ها را کم اثر سازد. یافته‌های این مطالعه با نتایج معتبر داخلی و بین‌المللی از جمله گزارش ششم ارزیابی هیات بین دولتی تغییر اقلیم همخوانی دارد و اهمیت بالای مدیریت منابع آب و سازگاری برای مخاطرات ناشی از تغییرات بارش را در کشور یادآوری می‌کند. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی مختلف ایران ناهمگون بوده و تمرکز ویژه بر مناطق با کاهش معنادار در نواحی پست شمالی، افزایش معنادار در نواحی پست جنوبی و اغلب کاهشی در نواحی مهم و حیاتی مرتفع، برای آمایش اقلیمی و مدیریت منابع آب ضروری است.

References

- Ahmadi, M., Lashkari, H., Azadi, M., & Kaykhosravi, Q. (2015). Detection of climate change with extreme precipitation indices in great Khorasan. *Researches in Earth Sciences*, 6(3), 34-52. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1394.6.3.3.1>
- Alijani, B. (2002). *Iran's Climate*. Payam Noor Publications, Tehran. [In Persian]
- Alizadeh Choubari, O., & Najafi, M. S. (2017). Trends in changes in air temperature and precipitation in different regions of Iran. *Physics of Earth and Space*, 43(3), 569-584. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.60300>
- Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M. J., & Farrokhnia, A. (2022). Studying the trend of temperature and precipitation changes in Iranian watersheds over the next 20 years based on the output of CMIP6 models, *Iranian Water Research*, 16(1), 11-24. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204>
- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature on the ground. *The Philosophical Magazine*, 41, 237-276.
- Azare, A. (2016). *Modeling the effects of climate change on groundwater depletion and land degradation (case study, Qazvin Plain)*. (PhD thesis), University of Tehran, Faculty of Natural Resources. [In Persian]
- Babaian, I., Karimian, M., Modirian, R., & Mirzaei, E. (2019). Forecasting the country's climate parameters using the CMIP5 series general circulation models: period 2100-2020. *Newar*, 43(104-105), 67-77. [In Persian] <https://10.30467/nivar.2019.142745.1103>
- Babaian, I., Karimian, M., Modirian, R., Flamarzi, Y., & Kouhi, M. (2021). Forecasting precipitation and temperature in the east of the country using combined dynamic-statistical downscaling. *Climate Change Research*, 2(5), 41-58. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/ccr.2020.252239.1026>
- Bazrafshan Moghadam, M. (2016). *Study of the effect of climate change on precipitation and different regions of the country*. (Master's thesis), Shahrood University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department. [In Persian]
- Eghbali, A., Babaian, I., Azadi, M., Habibi Nokhandan, M., & Zarrin, A. (2021). Optimal configuration of the Mitney REGCM4.5 model on climatic zones for predicting precipitation during the rainy season in Iran (November-May), case study: years 2014-2019. *Climatological Research*, 13(49), 1-14. [In Persian]
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kouchak, V., & Ramezani Etidali, H. (2021). Simulation of the effects of climate change using CMIP5 and CMIP6 climate models on runoff using the SWAT hydrological model (case study: Tashk-Bakhtegan watershed). *Iranian Water Resources Research*, 17(3), 345-359. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5>
- Fattahi, A., & Moghimi, Sh. (2019). Trends in snow cover changes in northwest Iran under the influence of climate change. *Applied Research in Geographic Sciences*, 19, 54, 65-79. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1230677/>
- Fisher, M. J., Rao, I. M., Ayarza, M. A., Lascano, C. E., Sanz, J. I., Thomas, R. J., & Vera, R. R. (1994). Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, 371(6494), 236-238. <https://doi.org/10.1038/371236a0>
- Gur, E., Palta, S., Ozel, H. B., Varol, T., Sevik, H., Cetin, M., & Kocan, N. (2024). Assessment of climate change impact on highland areas in Kastamonu, Turkey. *Anthropocene*, 46, 100432. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100432>
- Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoubzadeh, M., & Hamami, H. (2019). Drought forecasting using data from the Fifth Climate Change Assessment Report in Birjand region. *Agricultural Meteorology*, 8(1), 51-61. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1126425/>
- Halibian, A. H. (2008). *Studying the effect of the Azores high pressure on the temperature and precipitation of Iran*. (PhD thesis), University of Isfahan, Department of Geography. [In Persian]

- Huang, M., Lin, R., Huang, S., & Xing, T. (2017). A novel approach for precipitation forecast via improved K-nearest neighbor algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.05.003>
- Hussien, W. E. A., Memon, F. A., & Savic, D. A. (2016). Assessing and modelling the influence of household characteristics on per capita water consumption. *Water Resources Management*, 30(9), 2931-2955. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1314-x>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Zommers, Z. (2023). *Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. <https://10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>
- Khazaei, M. R., Khazaei, H., & Thaqfian, B. (2019). The effect of climate change on extreme precipitation in dry regions of Iran. *Quarterly Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9), 31-42. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jest.2021.40667.4508>
- Mohammadi, N., Sari-Saraf, B., & Rostamzadeh, H. (2012). Precipitation forecasting using CMIP6 models until the end of the 21st century in northwestern Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 173-194. [In Persian] <https://10.22067/geoh.2022.76646.1223>
- Mortazavifar, S. M., Mobin, M. H., Mokhtari, M. H., Ekrami, M. & Rafiei Sardavii, E. (2018). Assessment of the effects of climate change on precipitation and temperature variables based on radiative forcing scenarios, case study: East of Mazandaran province. *Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1(4), 351-364. [In Persian] https://www.ims-jmas.net/article_113845.html
- Pepin, N., Apple, M., Knowles, J., Terzago, S., Arnone, E., Hänchen, L., ... & Zardi, D. (2025). Elevation-dependent climate change in mountain environments. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-17. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00740-4>
- Tyndall, J. (1861). On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 22, 169-194. <https://doi.org/10.1098/rstl.1861.0001>