

## **Spatial Distribution of Changes in the Trend of Extreme Precipitation Indices in Northwest Iran and Its Relationship with The General Circulation of the Atmosphere in the Region**

A. Movaghari<sup>1\*</sup>, Kh. Javan<sup>2</sup>

1. Assistant Professor of Climatology, Urmia University, Faculty of Literature & Humanities, Department of Geography, Urmia, Iran.
2. Associate Professor of Climatology, Urmia University, Faculty of Literature & Humanities, Department of Geography, Urmia, Iran.

\* Corresponding Author: a.movaghari@urmia.ac.ir

Received date: 23/07/2023

Accepted date: 27/10/2023

 [10.22034/JDMAL.2023.2007679.1428](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2007679.1428)

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

Extreme precipitation has a significant impact on the frequency, severity, and duration of natural hazards, such as floods, droughts, and landslides. This has a significant impact on human life, the economy, natural ecosystems, and agriculture (Song et al, 2015: 34). Between 1880 and 2012, there was a 0.85 °C increase in the average global temperature, with a general increase in precipitation in the mid-latitudes of the Northern Hemisphere (IPCC, 2013: 2; Lio et al, 2017: 822). In addition, there is a possibility of a rise in extreme precipitation in the future (Klein Tank et al, 2006: 1), and so far, the reason for these changes and their relationship with the general circulation of the atmosphere have not been considered. The aim of this study is to analyze the trend of changes in extreme precipitation indices in northwestern Iran and its association with the general circulation of the atmosphere.

#### **Material and Methods**

In order to analyze the changes in extreme precipitation events in northwestern Iran, daily precipitation data was collected from 20 synoptic stations in the region between 1986 and 2010. The region that is being studied encompasses West Azerbaijan, East Azerbaijan, Ardabil, Zanjan, and Kurdistan. In assessing limit events, high quality and reliable long-term climate data with daily (or higher) resolution is required (Clintonak et al., 2009: 9). The first step was to examine the quality control and homogeneity of data. The RClimDex software package, introduced as a standard tool by ETCCDI, was used to perform quality control and evaluate data homogeneity in this research. The Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI) introduced 11 indexes to examine changes in precipitation level indices in northwest Iran. RClimDex software calculates these indicators with a significance level of 0.05. This process seeks to establish a standard set of indicators to examine and compare the characteristics of



different regions. The software was used to calculate precipitation indices and display the trend and rate of change on a map.

### Results and Discussion

The extreme precipitation indices were calculated to determine the regional trend and percentage of stations with positive and negative trends for the studied stations in northwestern Iran. Afterward, a map was created showing the spatial distribution of the slope for each of the indices. All precipitation indexes, except for the maximum growth period index (CDD), are declining according to the results. The probability of precipitation has decreased due to the more stable winter atmosphere in the region from the point of view of general atmospheric circulation. The region's spring atmosphere, similar to that of winter, shows an increase in stability, which will result in less rainfall. In summer, except for the coastal provinces of the Caspian Sea and the coasts of the Oman Sea, the rest of the country has recorded a decrease in rainfall of 1 mm per day. Most parts of the country experienced an increase in atmosphere thickness to 6 meters in autumn in the study area. Autumn in the region is typically stable and barotropic, but the study area is experiencing less rainfall. This study examines the trend of changes in extreme precipitation indices in northwestern Iran and its relation to a large-scale general circulation of the atmosphere. According to the results, 75% of stations in the region are experiencing a decrease in the maximum daily rainfall (RX1day) and 80% are experiencing a decrease in the maximum five-day rainfall (RX5day). While both the very wet (R95P) and ultra-wet (R99P) day indices are experiencing a downward trend, the R95P index is experiencing a more pronounced downward trend. All three indices R10, R20, and R25 have been declining for the past 25 years, but the R10 index has fallen more rapidly than the other two indices. Sarab station has a positive CWD trend alone, while other stations have a negative and decreasing trend of this index. In most stations throughout the region, the CDD index is increasing. In 85% of stations in the region, the PRCPTOT index is decreasing and there is a noticeable increase in rainfall. The SDII index is experiencing a decrease in 60% of the stations in northwestern Iran, while an increase is being observed in 40%. All precipitation indices, except for the CDD index, have a decreasing trend in general. Drawing and analyzing combined difference maps for geopotential height parameters of 500 hPa, relative rotation of 500 hPa, vertical velocity ( $\omega$ ), rainwater and precipitation rate to study the general atmospheric circulation of the region indicates an increase in altitude has led to a 500 hPa increase in climate stability in the study area (northwest of Iran). The study of  $\omega$  and relative rotation shows that the region is experiencing a decrease in upward currents and positive rotation. The lack of atmospheric moisture load and rainfall in all seasons can be seen in rainfall water difference maps and rates. Precipitation indices and the general circulation model of the region's atmosphere are compared, indicating that the moisture load of the region's atmosphere has decreased, resulting in drought.

**Keywords:** Climate change; Reanalyzed data; Maximum length of dry spell; Humidity; Desertification





## توزیع مکانی روند تغییر فراسنج‌های فرین بارش شمال غرب ایران و ارتباط آن با گردش عمومی جو منطقه

علیرضا موقری<sup>۱\*</sup>، خدیجه جوان<sup>۲</sup>

۱. استادیار آب و هواشناسی دانشگاه ارومیه، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، ارومیه، ایران.

۲. دانشیار آب و هواشناسی دانشگاه ارومیه، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، ارومیه، ایران.

\* نویسنده مسئول: [a.movaghari@urmia.ac.ir](mailto:a.movaghari@urmia.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵

doi: [10.22034/JDMAL.2023.2007679.1428](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2007679.1428)

### چکیده

گرمایش جهانی موجب افزایش میزان بخار آب اتمسفر و تغییر در چرخه آب‌شناسی و افزایش بارش‌های فرین شده است. هدف از پژوهش جاری بررسی روند تغییرات فراسنج‌های فرین بارش شمال غرب ایران و ارتباط آنها با گردش عمومی جو است. بدین منظور داده‌های بارش ۲۰ ایستگاه همدید شمال غرب ایران در مقیاس روزانه برای سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۰ استخراج و شاخص‌های بارش محاسبه و نقشه‌های توزیع مکانی این شاخص‌ها ترسیم شد. برای بررسی تغییرات گردش عمومی جو و مطالعه تأثیر آن بر وقایع حدی نیز، داده‌های ترکیبی میانگین گردش اتمسفری سالانه دوره ۱۳۶۴-۱۳۴۰ که نمایشگر اقلیم گذشته و مقطع زمانی ۱۳۶۵-۱۳۹۵ به عنوان دوره نوین بر پایه داده‌های بازتحلیل شده NCEP/NCAR دریافت شد. سپس نقشه‌های تفاضل با استفاده از متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ hp، امگای سطح زمین، تاوانی نسبی سطح ۵۰۰ hp، آب بارش‌پذیر و میزان بارش برای آشکارسازی تغییرات گردش اتمسفری در دو دوره فوق محاسبه و تولید شد و نتایج حاصل با برونداد فراسنج‌های حدی دما مقایسه شد. بررسی تغییرات فراسنج‌ها حاکی از این بود که تمام شاخص‌های بارش به جز شاخص بیشینه طول دوره رشد (CDD) دارای روند کاهشی هستند. مطالعه گردش عمومی جو نیز حاکی از افزایش ارتفاع تراز ۵۰۰ hp و در نتیجه پایداری جو منطقه می‌باشد. مطالعه امگا و چرخندگی نسبی نیز حاکی از تضعیف جریانات صعودی و چرخندگی مثبت در منطقه است. نقشه‌های تفاضل آب قابل بارش و نرخ بارش نیز کمبود بار رطوبتی جو و گرایش منطقه به سمت اقلیم خشک را نشان می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم؛ داده‌های واسنجی شده؛ شاخص حداکثر طول دوره رشد؛ رطوبت جو؛ بیابان‌زایی



## ■ مقدمه

بارش‌های حدی تأثیر زیادی بر فراوانی، شدت و مدت مخاطرات طبیعی مانند سیل، خشکسالی و رانش زمین دارد و آسیب‌های زیادی بر زندگی انسان، اقتصاد، اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی وارد می‌کند (۲۲). متوسط جهانی دما طی سال‌های ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ تقریباً  $0.85^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته است. تحت تأثیر این گرمایش، ذوب یخچال‌ها امنیت ۸۰۰ میلیون ساکن پایین دست کوهستان‌های بلند آسیا را بحرانی نموده و تقریباً در تمام حوضه‌های اصلی در سراسر جهان تا قرن بیست و یکم افزایش خواهد یافت (۳۸). عرض‌های میانه در نیمکره شمالی به طور کلی افزایش بارش را نشان داده‌اند (۶، ۱۲). تحلیل بارش‌های روزانه ثبت شده بین نیمه دوم قرن بیستم تا اوایل قرن بیست و یکم در مناطق مختلف دنیا مانند کانادا (۱۳)، اروپا و خاورمیانه (۲۶)، هند (۱۱) و در مقیاس جهانی (۵) افزایش معنی‌داری را در فراوانی و مقدار بارش‌های بیشینه نشان می‌دهند. علاوه بر این پیش‌بینی می‌گردد بارش‌های فرین در آینده نیز تشدید تغییرات را تجربه نمایند (۸). بنابراین، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه و ارائه راهکارهای مناسب برای سازگاری و کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی برای دانشمندان مهم است (۸). طبق پنجمین گزارش هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC<sup>۱</sup>)، در اثر گرم شدن کره زمین، شدت وقایع فرین بارش تقریباً ۷٪ فزونی می‌یابد که بسیار سریعتر از نرخ افزایش میانگین بارش که ۱-۳٪ است، می‌باشد (۶). بنابراین بررسی تغییرات بارش‌های فرین برای بررسی آسیب پذیری مناطق مختلف و پیش‌بینی تغییرات آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم بسیار ضروری است. در این راستا و به منظور ارزیابی و آنالیز مقادیر فرین بارش، مجموعه شاخص‌های فرین شبکه حمایت آب و هوای اروپا مشتمل بر ۱۱ شاخص فرین بارش قابلیت استفاده دارد. این نمایه‌ها در سال ۱۹۹۸ و توسط کمیسیون آب و هواشناسی سازمان هواشناسی جهانی (CCL) و برنامه تحقیقات آب و هوای جهانی (WCRP) مرتبط با طرح پیش‌بینی پذیری و

تغییرپذیری آب و هوا (CLIVAR<sup>۲</sup>) تشکیل یافته از یک گروه ارزیابی در حیطه نمایان‌سازی و رصد تغییر آب و هوا و نمایه‌های آن (ETCCDMI<sup>۳</sup>) به منظور ارزیابی و مشخص نمودن نمایه‌های فرین آب و هوایی، انتخاب گردیدند.

در چند سال گذشته تحقیقات بسیاری جهت شناخت روند بارش‌های فرین در اقصی نقاط دنیا صورت گرفته است (۱۸، ۲۹، ۲۵، ۲، ۲۲، ۳۱، ۳۰، ۱۵). علاوه بر آنالیز تغییرات نمایه‌های فرین بارش، آگاهی از دلایل و محرک‌های این تغییرات نیز ضروری است. بخش قابل توجهی از این تغییرات ناشی از عناصر گردش عمومی جو و درجه حرارت سطح دریا مانند نوسان قطب شمال (AO)، فشار زیاد نیمه گرمسیری غرب اقیانوس آرام (WPSH<sup>۴</sup>) و شاخص انسو<sup>۵</sup> می‌باشد (۳۰، ۲۲). همچنین وجود ارتباط قوی بین الگوهای پیوند از دور و تغییر اقلیم در مدیترانه شرقی و خاورمیانه شناسایی شده است (۱۰، ۲۴). بنابراین بسیاری از اقلیم‌شناسان و همچنین محققان دیگر، به بررسی در مورد تغییرات گذشته و آینده وقایع حدی و سازوکارهای به وجود آورنده این تغییرات پرداخته‌اند.

مطالعه شدت تغییر وقایع فرین دما و بارش در ۶۰۰ سال گذشته توسط سناریوهای متفاوت آب و هوایی در حوضه رود زرد ثابت نمود که در قرن ۲۱، شاخص‌های دما و تبخیر فزونی و بارش بیشینه و متوسط آن کاهش خواهد داشت (۲۸). بررسی تغییرات فراسنج‌های حدی آب‌وهوایی بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۳ در جنوب‌باختری چین و تأثیرهای گردش اتمسفری بر این دگرگونی حاکی از این بود که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی، افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل، تضعیف جریان مونسونی و انتقال بخار آب در قاره اوراسیا، تغییرات اقلیمی در جنوب غرب چین را تشدید کرده است (۳۲). بررسی رخداد بارش‌های فرین زمستانه در طول کرانه‌های شمال غربی آمریکا و کرانه‌های شرقی اقیانوس آرام برای سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۰ نشان داد که ناهنجاری منفی فشار تراز دریا و GPT سطوح بالا در اقیانوس آرام مرکزی، ناهنجاری فشار در جنوب باختری آمریکا، آنومالی‌های مثبت

<sup>۴</sup> The Western Pacific Subtropical High

<sup>۵</sup> ENSO

<sup>۱</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>۲</sup> Climate Variability and Predictability

<sup>۳</sup> Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices

و شرق کشور به غیر از منطقه قوچان و تا حدی بجنورد، دیگر مناطق تغییرات شدید بارشی را در طی ۲۵ سال اخیر تجربه کرده‌اند. همچنین نتایج حاکی از این است که تأثیر عامل عرض جغرافیایی نسبت به ارتفاع در تغییر اقلیم منطقه بارزتر می‌باشد، چرا که ایستگاه‌هایی که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر واقع شده‌اند در تعدادی از شاخص‌های حدی، روند افزایشی را از خود نشان می‌دهند. در حالی که ارتفاع زیاد ایستگاه‌هایی که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر قرار گرفته‌اند، نتوانسته است روندهای افزایشی، از بین نمایه‌های فرین بارش را برجسته سازد (۱). در پژوهشی دیگر به منظور شناسایی تغییرات آب و هوا در ایران با استفاده از نمایه‌های تغییر اقلیم طی دوره ۱۹۶۲ تا ۲۰۰۴، نتایج تحقیق نشان داد که شاخص‌های فرین گرم طی دوره مورد مطالعه رو به افزایش است، در حالی که روند شاخص‌های فرین سرد منفی و رو به کاهش است. امواج گرمایی طولانی‌تر شده و برعکس، امواج سرد کوتاه‌تر شده‌اند (۳). همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که فراوانی رخداد بارش‌های فرین رو به فزونی است. کما اینکه مطالعه روند رخدادهای فرین آب و هوایی در شمال شرق ایران نشان داد که نمایه‌های فرین گرم رو به فزونی رفته که این تغییرات برای نمایه‌های روزهای تابستانه، تعداد شب‌های گرمسیری و همچنین روز و شب‌های گرم معنی‌دار بود. در صورتیکه نمایه‌های فرین سرد روند نزولی داشته که حاکی از کاهش شدت و بسامد رخدادها و روز و شب‌های سرد است. روند نزولی بارش در بررسی همه شاخص‌های بارش، وجود داشت، هر چند تعداد کمی روند معنادار در طول دوره مورد مطالعه مشاهده شد (۱۰). مطالعه تغییرپذیری و آنالیز نوسانات بارش‌های فرین باختر و شمال باختری ایران طی دوره آماری ۱۳۸۹-۱۳۴۰ نشان داد که بارش‌های مفرط در طول ۵ دهه گذشته روند کاهشی را ثبت نموده که این روند کاهشی در رابطه با رفتار شاخص‌های پیوند از دور AO، NAO و ENSO و به علاوه مراکز موثر بر بارش ناحیه از قبیل فشار زیاد سیبری، کم‌فشار سودانی و کم‌فشار مدیترانه است (۲۰). آشکارسازی و تعیین سهم اثرات محرک‌های مختلف تغییر اقلیم بر تغییرات بارش‌های

دمای تراز ۸۵۰hp در طول ساحل و آب بارش‌پذیر فراوان و جریان بخار آب در جنوب باختر، موجب نزول بارش‌های فرین در منطقه می‌شود (۲۹). بررسی روند بارش‌های حدی در چین در دوره آماری ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۲ با تقسیم این کشور به ۹ منطقه حاکی از این است که شمال شرق، شرق و حوضه رود زرد، روند کاهشی را طی ۵۰ سال اخیر تجربه کرده، در حالی که شش منطقه دیگر روند افزایشی دارند. همچنین نتایج نشان داد دلایلی که منجر به تغییرات بارش‌های حدی در چین می‌شود شامل شاخص انسو، شدت مونسون شرق آسیا، گردش باد و گرمایش جهانی می‌شود، ولی فقط محدود به این فاکتورها نیست (۶). مطالعه روند نمایه‌های فرین بارش در بخش‌های جنوبی چین و ارتباط آن با الگوهای پیوند از دور و ارزیابی تأثیر گردش عمومی جو بر این تغییرات (۳۲) نشان داد که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی، تضعیف جریان مونسونی، انتقال بخار آب در اوراسیا و افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل در دگرگونی بارش‌های فرین جنوب چین موثر است. همچنین در پژوهشی دیگر، ارزیابی روند نمایه‌های فرین بارش چین و رابطه آنها با الگوهای دور پیوندی برای سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۴ نشان داد که همه شاخص‌های حدی بارش به جز SDII و R10 دارای روند کاهشی هستند که نشانگر تمایل آب و هوای منطقه به خشکی است همچنین نتایج ثابت کرد که تغییر در این نمایه‌ها زیر تأثیر نمایه‌های انسو، موسمی تابستانه آسیای شرقی (EASM<sup>۱</sup>) و نمایه دهه‌ای اقیانوس آرام (PDO<sup>۲</sup>) است (۳۱). بررسی روند نمایه‌های فرین دما و بارش چین در دوره ۲۰۱۳-۱۹۶۰ و رابطه آن با الگوهای دور پیوندی و گردش عمومی جو حاکی از این است که از بین الگوهای دور پیوندی مورد مطالعه، نمایه فشار زیاد نیمه گرمسیری غرب اقیانوس آرام (WPSHII) و نوسان قطب شمال (AO<sup>۳</sup>) بیشترین تأثیر را بر نمایه‌های فرین داشته و در تغییر اقلیم منطقه مؤثر است (۲۴).

در پژوهش‌های صورت گرفته داخلی، واکاوی نمایه‌های فرین بارش به جهت نمایان‌سازی تغییر آب و هوای خراسان بزرگ طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۶۶ نشان داد که در شمال شرق

<sup>3</sup> The Arctic Oscillation

<sup>1</sup> The East Asian Summer Monsoon

<sup>2</sup> The Pacific Decadal Oscillation

## ■ مواد و روش

### منطقه مورد بررسی

در پژوهش حاضر، برای بررسی تغییرات رخدادهای فرین بارش، شمال‌باختری ایران به دلیل متأثر بودن از خشکی دریاچه ارومیه و خطرهای محیط‌زیستی پیش‌رو، مورد بررسی قرار گرفت. منطقه مورد نظر شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان است (شکل ۱). در واقع علت انتخاب این محدوده واقع شدن آن در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین آبخیز دائمی در آسیای غربی واقع در شمال غربی فلات ایران است. حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع و معادل بیش از ۳٪ مساحت کل کشور ایران می‌باشد. این دریاچه توسط مجموع ۶۰ رودخانه سیرآب می‌شود که ۲۱ رودخانه دائمی یا فصلی هستند و ۳۹ مورد دیگر دوره‌ای می‌باشند. از این میان زرينه رود، سیمینه رود و آجی‌چای ورودی‌های اصلی به دریاچه ارومیه می‌باشند. این حوضه با داشتن دشتهایی مانند دشت ارومیه، تبریز، آذرشهر، بوکان، بناب، ملکان، میاندوآب، مهاباد، نقده، سلماس، پیرانشهر و اشنویه، یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران به‌شمار می‌رود (۸).

### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش پیش‌رو از داده‌های بارش روزانه ۲۰ ایستگاه همدیدی که دارای آمار بلند مدت و قابل اطمینان بودند، در دوره زمانی ۱۳۶۵-۱۳۹۰ استفاده شد. با توجه به اینکه در ارزیابی رویدادهای فرین، به داده‌های اقلیمی طولانی مدت با کیفیت بالا و قابل اعتماد با تفکیک روزانه یا بالاتر مورد نیاز است (۹)، بر این اساس به عنوان گام آغازین کنترل کیفی و ارزیابی همگنی داده‌ها با بسته نرم‌افزاری RCLimDex انجام شد که با عنوان ابزار پذیرفته شده بوسیله ETCCDI<sup>۵</sup> معرفی شده است.

حدی جنوب غرب کشور با بهره‌گیری از متد انگشت نگاری مطلوب<sup>۱</sup> نیز حاکی از این است که بهره‌سیگنال تأثیرهای مرکب انسانی و طبیعی<sup>۲</sup> (ALL) در دگرگونی نزولات حدی دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۵۱ قابل آشکارسازی و تناسب دهی هستند، اما هیچ‌گونه آشکارسازی برای تأثیرهای مستقل طبیعی<sup>۳</sup> (NAT) و تأثیرات مستقل گازهای گلخانه‌ای<sup>۴</sup> (GHG) تایید نگردید (۲۱). مطالعه روند تغییرات نمایه‌های فرین بارش روزانه ایران طی دوره ۲۰۱۲-۱۹۸۲ نشان می‌دهد که طی دوره مطالعاتی، کل فراسنج‌های حدی بارش کشور با تغییر و شیب مواجه است. همچنین، بیشتر ایستگاه‌ها با نزول بارش سالیانه و فزونی روزهای خشک مواجه شده است (۱۷). علاوه بر پژوهش‌های فوق، بررسی‌های دیگری نیز در زمینه تغییرات بارش‌های فرین در کشور (۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۲) انجام شده است.

یکی از مهم‌ترین مشکلات - محیط‌زیستی شمال غرب ایران خشکی دریاچه ارومیه است که موجب بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه شده است. بیابان‌زایی فرآیند تخریب و نابودی زیست‌بوم‌های طبیعی مناطق خشک، نیمه‌خشک و خشک نیمه‌مرطوب است که کاهش تولید بایومس و بروز اثرات تخریب خاک یا فرسایش را به دنبال دارد. بیابان‌زایی بر اثر عوامل طبیعی نظیر متغیرهای اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی می‌دهد و تأثیر آن بر فرایندهای اکولوژیک بسیار زیاد و پیچیده است؛ نظیر تأثیر منفی بر ویژگی‌های گیاهی مانند زیست‌توده، تراکم و مساحت اراضی زیر پوشش گیاهی، کاهش تنوع زیستی و باروری خاک و تغییر در چشم‌انداز نواحی خشک در مقیاس‌های متنوع جغرافیایی (۹). بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی تغییرات بارش شمال غرب ایران زیر تأثیر گرم شدن کره زمین و تغییر آب و هوا که موجب تغییر در چرخه آب‌شناسی و به تبع آن بارش‌های فرین می‌شود. با تعیین مجموعه استانداردی از نمایه‌های تخصصی و ارزیابی دلیل‌های این تغییرات از نظر تغییر در گردش عمومی جو می‌توان تأثیر آن بر روند خشکی منطقه را بررسی کرد.

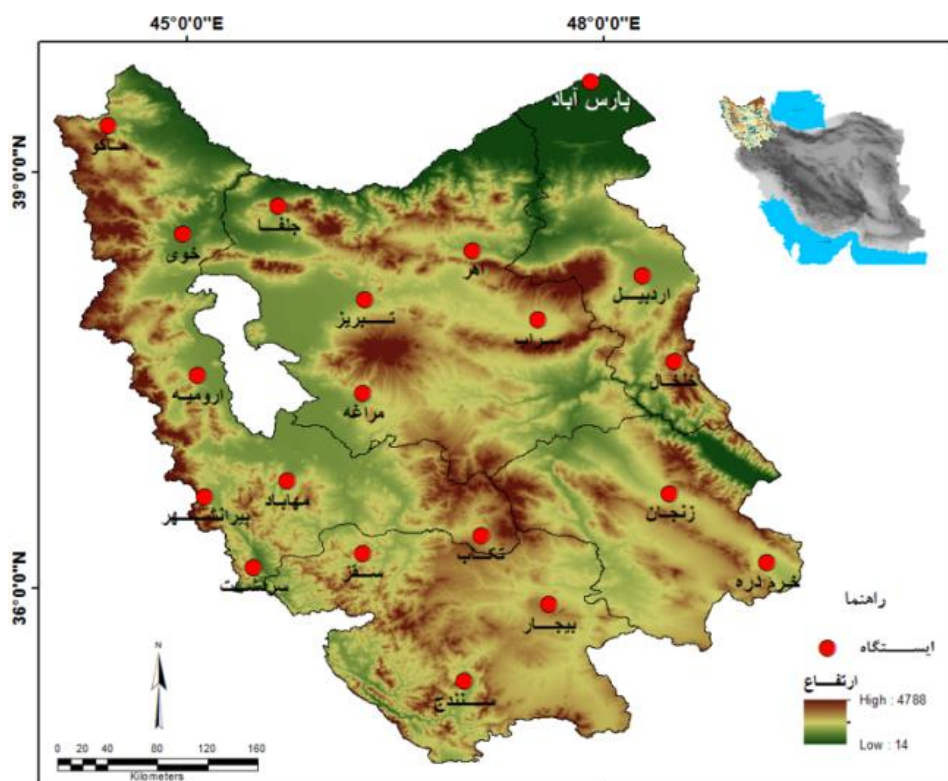
<sup>4</sup> Greenhouse gases forcing alone

<sup>5</sup> The Expert Team on Climate Change Detection and Indices

<sup>1</sup> Optimal Fingerprinting

<sup>2</sup> Combined Effect of External Anthropogenic and Natural Forcing

<sup>3</sup> Anthropogenic forcing alone



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب ایران

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)
مهاباد	۳۶/۷۶	۴۵/۷۲	اردبیل	۳۸/۲۴	۴۸/۲۹
مراغه	۳۷/۳۸	۴۶/۲۳	زنجان	۳۶/۶۸	۴۸/۵۰
ارومیه	۳۷/۵۴	۴۵/۰۷	پارس آباد	۳۹/۶۴	۴۷/۹۱
سقز	۳۶/۲۴	۴۶/۲۷	بیجار	۳۵/۹۸	۴۷/۶۸
خلخال	۳۷/۳۸	۴۸/۶۰	تکاب	۳۶/۳۹	۴۷/۱۰
سهند	۳۷/۷۲	۴۶/۵۰	سنندج	۳۵/۳۱	۴۶/۹۹
تبریز	۳۸/۰۷	۴۶/۲۸	پیرانشهر	۳۶/۶۹	۴۵/۱۴
ماکو	۳۹/۲۹	۴۴/۴۶	خوی	۳۸/۵۴	۴۴/۹۵
جلفا	۳۸/۹۳	۴۵/۶۲	خرمدره	۳۶/۲۰	۴۹/۱۹
سردشت	۳۶/۱۵	۴۵/۴۷	اهر	۳۸/۴۷	۴۷/۰۶

روش‌های مورد استفاده

محاسبه نمایه‌های فرین بارش

به منظور مطالعه تغییرات نمایه‌های فرین بارش در شمال‌باختری ایران، ۱۱ نمایه فرین بارش (جدول ۱) معرفی شده توسط تیم کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و

شاخص‌ها (ETCCDMI) استفاده شد (۱۶). این شاخص‌ها

توسط نرم‌افزار RClimDex و در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ برآورد شد. با استفاده از این نرم‌افزار، شاخص‌های بارش محاسبه شده و روند و نرخ روند تغییر شاخص‌ها به صورت نقشه نمایش داده شد.

جدول ۲. فهرست و تعاریف نمایه‌های فرین بارش

تعریف	نام تشریحی	نمایه
بیشینه بارش ۱ روزه	بیشینه بارش ۱ روزه	RX1DAY
بیشینه بارش ۵ روز متوالی	بیشینه بارش ۵ روزه	RX5DAY
مجموع سالیانه بارش روزهای با بارش افزون بر صدک ۹۵ دوره پایه	روزهای بسیار مرطوب	R95P
مجموع سالیانه بارش روزهای با بارش افزون بر صدک ۹۹ دوره پایه	روزهای فوق مرطوب	R99P
تعداد سالانه روزهای با بارندگی بیشتر و یا مساوی ۱۰mm	شمار روزهای با بارش سنگین	R10
شمار سالیانه روزهای با بارندگی بیشتر و یا مساوی ۲۰mm	شمار روزهای با بارش خیلی سنگین	R20
شمار سالیانه روزهای با بارندگی بیشتر و یا مساوی ۲۵mm	روزهای با بارش بیش از ۲۵ mm	R25
بیشینه تعداد روزهای پیاپی با بارش کمتر از ۱mm	بیشینه طول دوره خشک	CDD
بیشینه تعداد روزهای پیاپی با بارش بیشتر و یا مساوی ۱mm	بیشینه طول دوره مرطوب	CWD
مجموع بارش سالیانه تقسیم بر تعداد روزهای تر (بارش افزون و یا مساوی ۱mm)	شاخص ساده شدت بارش روزانه	SDII
مجموع بارش سالیانه روزهای تر (بارش افزون و یا مساوی ۱mm)	مجموع بارش سالیانه روزهای تر	PRCPTOT

منبع: <http://ccma/seos.uvic.ca/ETCCDMI>

## آزمون معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها

برای مقایسه دو میانگین از آزمون t استفاده شد (رابطه ۱)

(۱)

$$t_c = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

که در آن  $X_1$  و  $X_2$  میانگین دو دوره آماری،  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب تعداد سال‌های دوره اول و دوم و  $S_p$  انحراف معیار می‌باشد که از رابطه ۲ به دست آمد:

$$S_p = \left( \frac{[\sum x_{1j}^2 + \frac{(\sum x_{1j})^2}{n_1}] + [\sum x_{2j}^2 + \frac{(\sum x_{2j})^2}{n_2}]}{n_1 + n_2 - 2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

که در آن  $n_1$  و  $n_2$  به ترتیب تعداد سال‌های دوره اول و دوم می‌باشد و  $X_{1j}$  و  $X_{2j}$  به ترتیب مقدار زام در سری اول و دوم می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر فوق،  $t_c$  با  $t$  جدول student  $t$  با درجه آزادی  $n_1 + n_2 - 2$  و سطح اطمینان (a) ۵٪ مقایسه گردید.

## مطالعه گردش اتمسفری

برای بررسی تغییرات گردش کلی بزرگ مقیاس اتمسفر و ارزیابی تأثیر گردش اتمسفری در رویدادهای حدی اقلیمی، داده‌های ترکیبی متوسط سالانه گردش اتمسفر<sup>۱</sup> مقطع زمانی ۱۳۶۴-۱۳۴۰ که نمایشگر آب و هوای گذشته

و دوره زمانی ۱۳۹۵-۱۳۶۵ به نمایندگی عصر نوین بر پایه داده‌های واسنجی شده NCEP/NCAR استخراج شد. سپس نقشه‌های تفاضل<sup>۲</sup> به وسیله کسر چارچوب زمانی جدید از مقطع زمانی پیشین جهت آشکارسازی تغییرات گردش کلی اتمسفر در دو دوره فوق با بکارگیری نرم‌افزار Grads تولید گردید. نقشه‌های مرکب با بکارگیری پارامترهای GPT سطح ۵۰۰mb، حرکت قائم سطحی، تاوانی نسبی سطح ۵۰۰mb، آب بارش‌پذیر و میزان بارش تهیه شد. در ادامه، نقشه‌ها تحلیل گردیده و نتایج آن با برونداد فراسنج‌های بارش حدی مقایسه شد تا تأثیر گردش کلی اتمسفر بر شیب تغییرات بارش آشکار شد.

## نتایج و بحث

## تحلیل روند نمایه‌های فرین بارش

پس از محاسبه نمایه‌های فرین بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب ایران، همانند پژوهش‌های مشابه روند منطقه‌ای این شاخص‌ها و درصد ایستگاه‌های با روند مثبت و منفی مشخص شد (۳، ۸ و ۱۸). به منظور مقایسه شاخص‌ها در دو مقطع زمانی از آزمون مقایسه میانگین (رابطه ۱) برای دو دوره ۱۳۷۷-۱۳۶۵ و ۱۳۹۰-۱۳۷۸ استفاده و نتایج آن مورد واکاوی قرارگرفت (جدول ۴). سپس نمودار روند داده‌های حدی ترسیم (شکل ۲) و

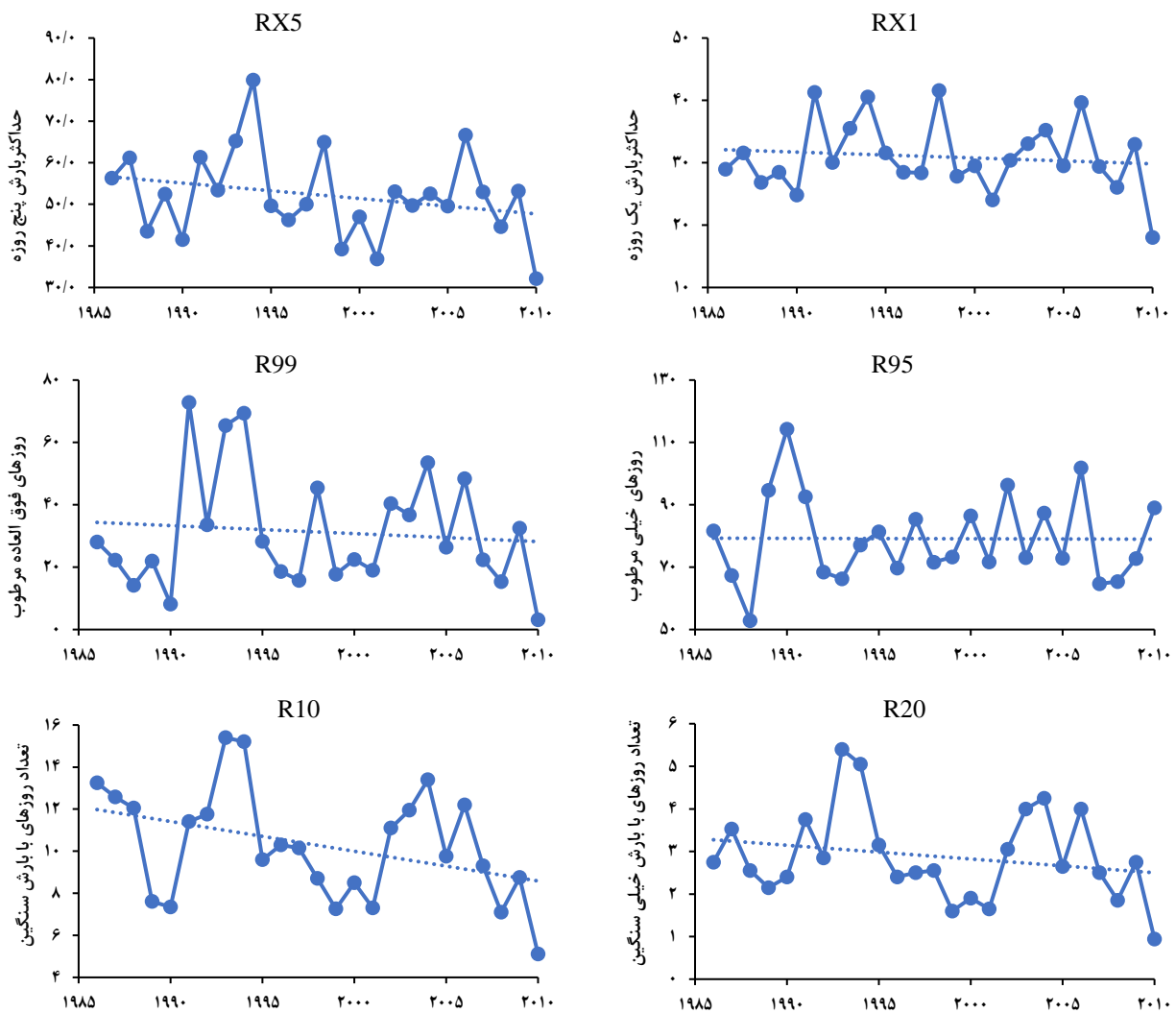
<sup>2</sup> Difference Map<sup>1</sup> Mean Circulation Composites



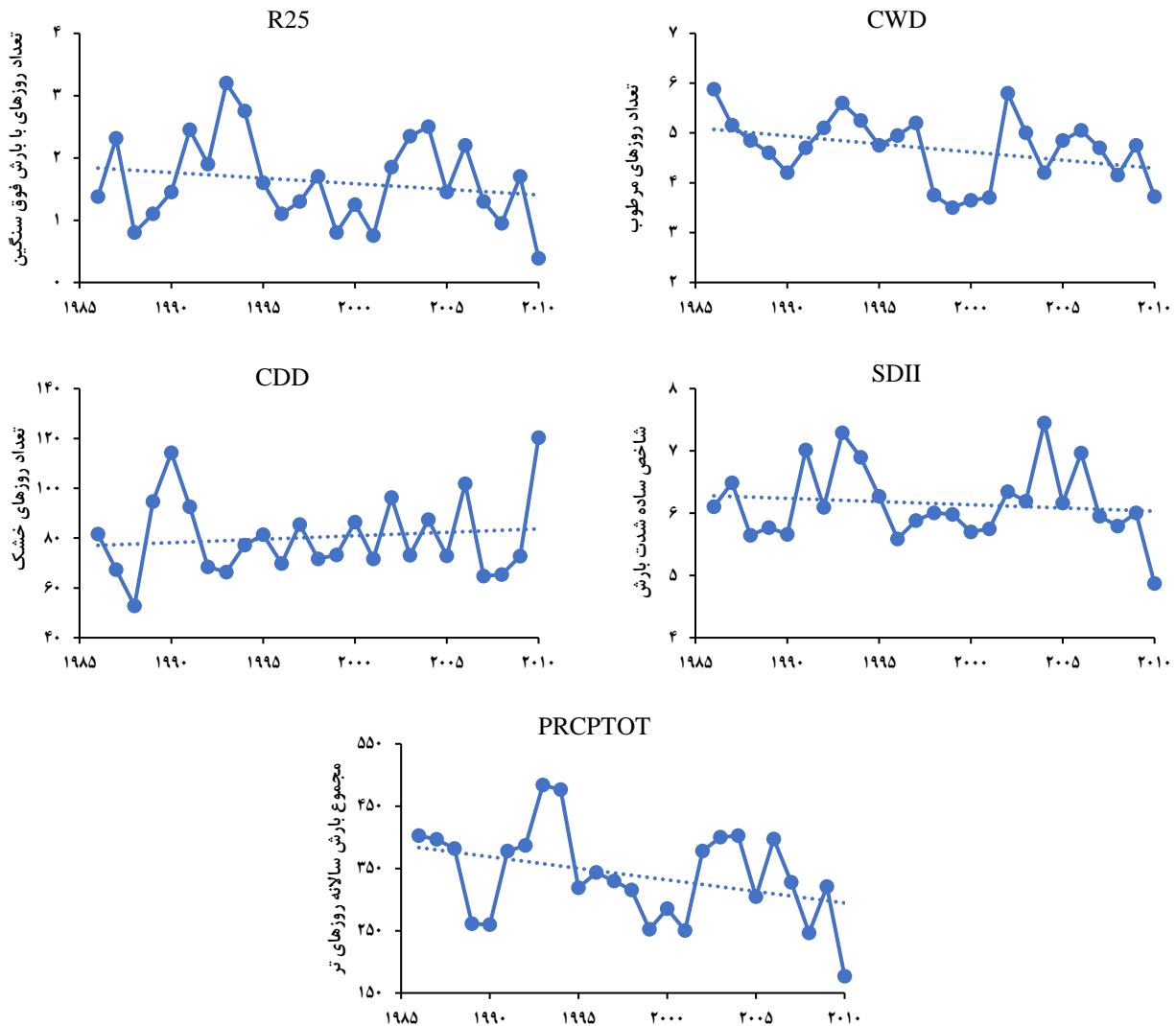
پراکندگی فضایی شیب هر کدام از شاخص‌ها به صورت نقشه تهیه شد (شکل‌های ۳ تا ۶). شاخص‌های بارش به جز شاخص بیشینه طول دوره رشد (CDD) دارای روند کاهشی هستند (جدول ۳ و شکل ۲).

جدول ۳. روند منطقه‌ای شاخص‌های حدی بارش و درصد ایستگاه‌های با روند مثبت و منفی

شاخص دمایی	روند منطقه‌ای	دامنه	درصد ایستگاه‌های با روند مثبت	درصد ایستگاه‌های با روند منفی
RX1 <sub>day</sub>	-۰/۰۷	۱/۳۶ تا -۰/۶۱	٪۲۵	٪۷۵
RX5 <sub>day</sub>	-۰/۳۳	۱/۱۸ تا -۱/۳۵	٪۲۰	٪۸۰
R95 <sub>P</sub>	-۰/۶۶	۵/۲۱ تا -۳/۱۵	٪۳۰	٪۷۰
R99 <sub>P</sub>	-۰/۲۱	۳/۹۹ تا -۲/۶۵	٪۳۵	٪۶۵
R10	-۰/۱۳	۰/۰۳ تا -۰/۳۸	٪۳۰	٪۷۰
R20	-۰/۰۳	۰/۱۴ تا -۰/۱۱	٪۲۵	٪۷۵
R25	-۰/۰۲	۰/۱۱ تا -۰/۰۷	٪۲۰	٪۸۰
CDD	۰/۲۳	۲/۵۴ تا -۱/۰۸	٪۵۵	٪۴۵
CWD	-۰/۰۳	۰/۰۷ تا -۰/۰۹	٪۵	٪۹۵
SDII	-۰/۰۱	۰/۱۰ تا -۰/۰۶	٪۴۰	٪۶۰
PRCPTOT	-۳/۴۴	۲/۸۳ تا -۸/۳۰	٪۱۵	٪۸۵



شکل ۲. منحنی توزیع داده‌های حدی و روند تغییرات آن در طول زمان



ادامه شکل ۲. منحنی توزیع داده‌های حدی و روند تغییرات آن در طول زمان

سقر و تکاب و بیش‌ترین روند افزایشی در ایستگاه سردشت دیده می‌شود.

بررسی شاخص‌های تعداد روزهای خیلی مرطوب (شکل ۴-الف) و فوق‌العاده مرطوب (شکل ۴-ب) در شمال غرب ایران نشان می‌دهد که هر دو شاخص دارای روند کاهشی هستند، ولی شاخص تعداد روزهای خیلی مرطوب روند کاهشی شدیدتری نسبت به تعداد روزهای فوق‌العاده مرطوب دارد. ۷۰٪ ایستگاه‌های منطقه با کاهش تعداد روزهای خیلی مرطوب و حدود ۶۵٪ با کاهش تعداد روزهای فوق‌العاده مرطوب روبه‌رو هستند. از نظر هر دو شاخص، ایستگاه‌های سقر و تکاب دارای بیشترین روند کاهشی و سردشت دارای بیشترین روند افزایشی است.

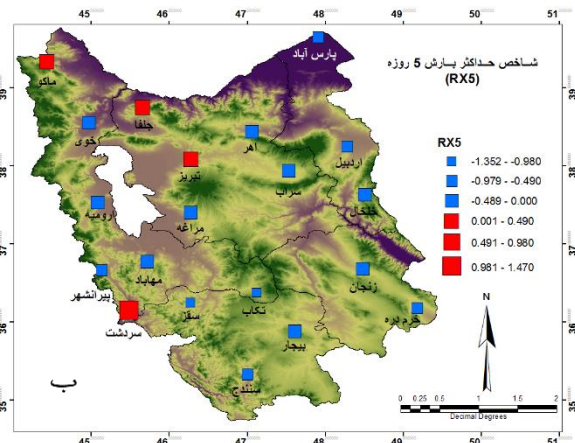
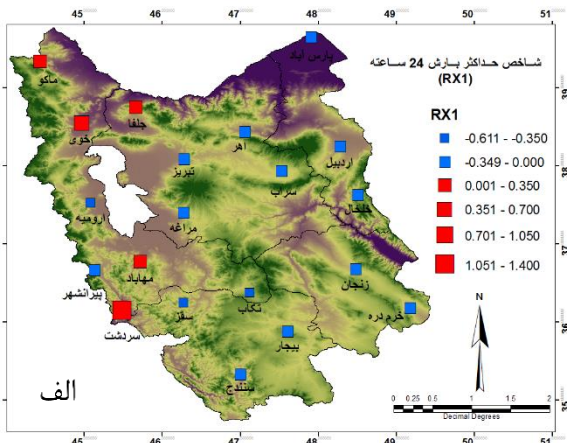
توزیع فضایی شیب شاخص‌های بیشینه بارش ۱ روزه ( $RX1_{day}$ ) و ۵ روزه ( $RX5_{day}$ ) در شمال غرب ایران حاکی از این است که در مجموع ۷۵٪ ایستگاه‌های منطقه با کاهش بیشینه بارش یک‌روزه و ۸۰٪ با کاهش بیشینه بارش پنج‌روزه مواجه هستند (شکل ۳ و جدول ۳). قابل ذکر است که شدت شیب نزولی این نمایه‌ها نسبت به شیب صعودی در ایستگاه‌های مطالعاتی، بیشتر است. به طور میانگین، مقدار بیشینه بارش یک‌روزه در شمال غرب ایران در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۶ حدود  $0.07mm$  در دهه (شکل ۳-۳) و مقدار بیشینه بارش پنج‌روزه (شکل ۳-ب) حدود  $0.33mm$  در دهه کاهش یافته‌است. بیش‌ترین روند کاهشی بیشینه بارش یک‌روزه و پنج‌روزه در ایستگاه‌های

از نظر R25 نیز، ۸۰٪ ایستگاه‌های منطقه دارای روند کاهشی هستند و میزان روند کاهشی این شاخص ۰/۰۲ روز در دهه می‌باشد. ایستگاه بیجار و پیرانشهر با کاهش تعداد روزهای بارش بیش از ۲۵mm و ایستگاه سردشت با افزایش این شاخص روبرو بوده‌اند (شکل ۵-ج). در مجموع می‌توان گفت طی ۲۵ سال اخیر هر سه شاخص فوق، روند کاهشی داشته‌اند، ولی شاخص R10 روند کاهشی شدیدتری نسبت به دو شاخص دیگر داشته است. نتایج به دست آمده همانند کارهای مشابه (۸ و ۳)، حاکی از کاهش مقدار بارش در شمال غرب کشور در دهه‌های آینده و افزایش خشکی است.

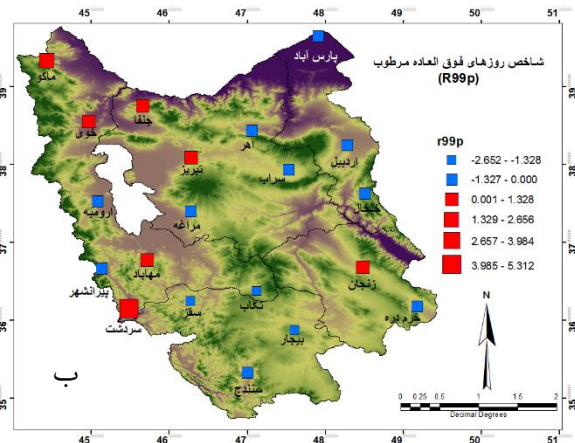
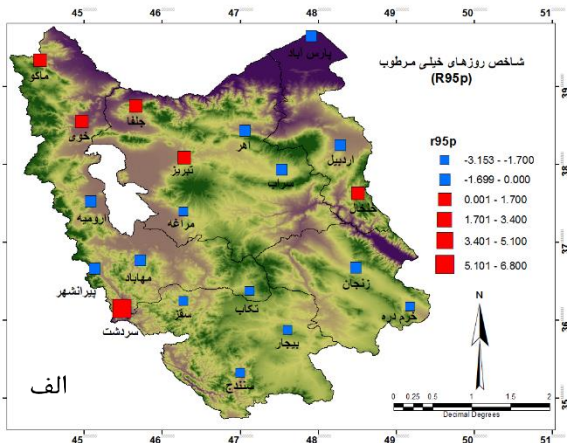
روند شاخص بیشینه طول دوره مرطوب (CWD) تنها در ایستگاه سراب مثبت بود و در دیگر ایستگاه‌ها، روند این شاخص منفی و کاهشی می‌باشد.

بررسی نمایه‌های شمار روزهای بارش سنگین و خیلی سنگین (R10، R20 و R25) در شمال غرب ایران نشان داد که در طی دوره مورد مطالعه شیب این شاخص‌ها در اکثر ایستگاه‌ها کاهشی و فراوانی آنها پایین است. از نظر شاخص R10، ۷۰٪ ایستگاه‌ها دارای روند منفی و ۳۰٪ دارای روند مثبت هستند (شکل ۵-الف). بیشترین شیب افزایشی این شاخص در جلفا و سردشت و بیشترین شیب کاهشی در پیرانشهر و تکاب دیده می‌شود. میزان این شاخص به طور میانگین حدود ۰/۱۳ روز در دهه کاهش می‌یابد. در طی دوره مورد مطالعه، حدود ۷۵٪ ایستگاه‌های منطقه از نظر شاخص R20 روند کاهشی دارند که میزان این روند به طور میانگین ۰/۰۳ روز در دهه است.

بیشترین شیب کاهشی این شاخص در ایستگاه‌های سنندج و پیرانشهر و بیشترین شیب افزایشی در سردشت مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب).



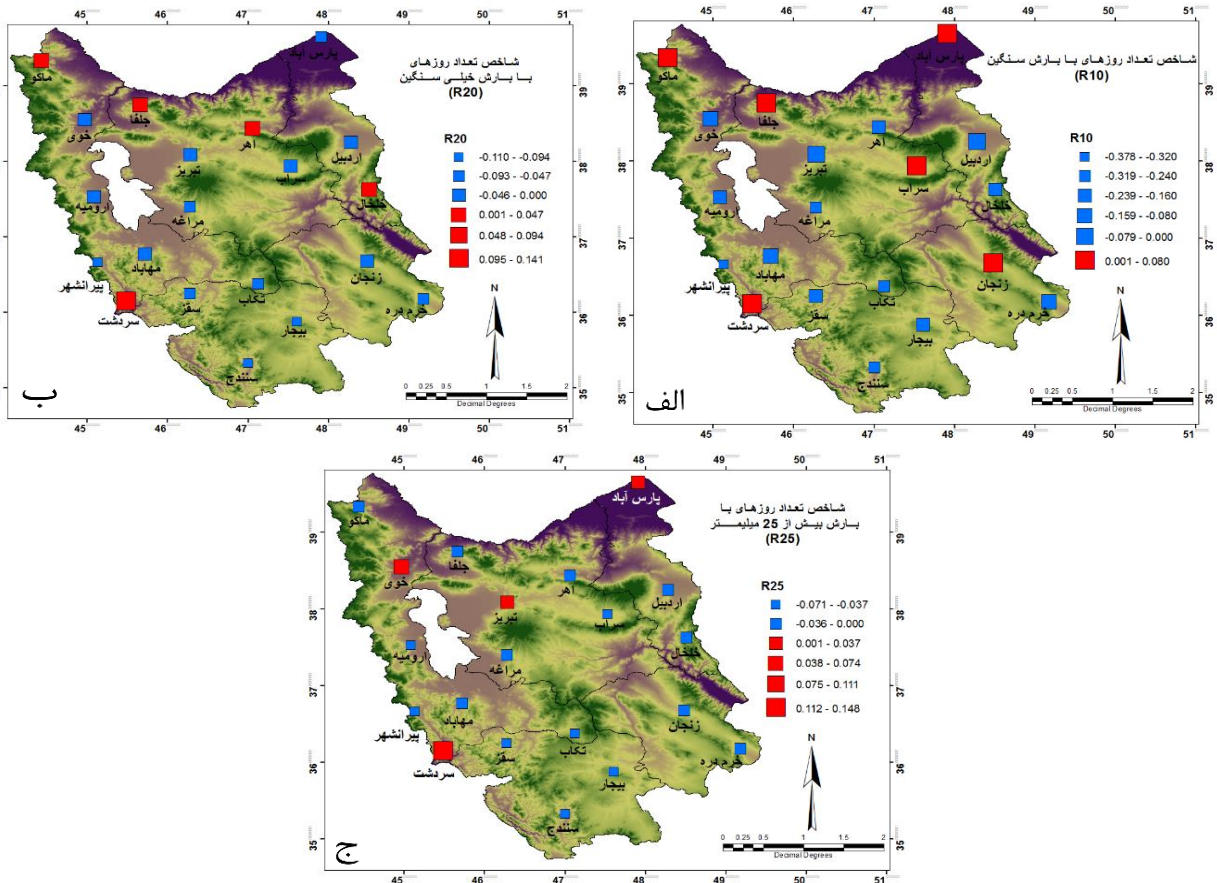
شکل ۳. توزیع فضایی شیب شاخص‌های بیشینه بارش ۱ روزه (الف) و ۵ روزه (ب)



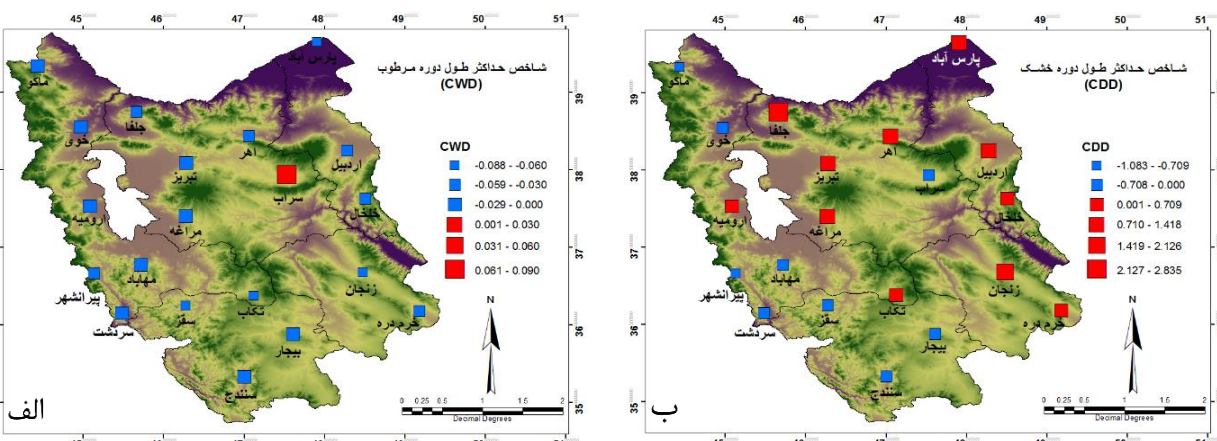
شکل ۴. توزیع فضایی شیب شاخص‌های روزهای خیلی مرطوب (الف) و فوق‌العاده مرطوب (ب)

(شکل ۶). بنابراین از یک‌سو تعداد روزهای مرطوب متوالی در اکثر ایستگاه‌ها با تقلیل مواجه شده و از دیگر سو شمار روزهای متوالی خشک با افزونی در بیش از ۵۰٪ ایستگاه‌ها روبرو شده است. از این رو می‌توان گفت در طول ۲۵ سال گذشته در شمال غرب ایران تعداد روزهای خشک در طول سال افزایش یافته است که این موضوع می‌تواند در مسائل مربوط به کشاورزی اهمیت زیادی داشته باشد.

تعداد روزهای مرطوب متوالی با شیب ۰/۰۳ روز در دهه در حال کاهش است. فراسنج بیشینه طول دوره خشک (CDD) روند افزایشی را در اکثر ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که حاکی از افزونی خشکی سالیانه در منطقه مطالعاتی می‌باشد. در مجموع بیشتر ایستگاه‌های غربی منطقه که در مسیر توده‌های باران‌آور قرار دارند دارای شیب نزولی هستند، اما سایر نواحی شیب صعودی را نشان داده اند



شکل ۵. توزیع فضایی شیب تعداد روزهای بارش سنگین (الف)، خیلی سنگین (ب) و بیش از ۲۵mm (ج)



شکل ۶. توزیع فضایی شیب شاخص بیشینه طول دوره مرطوب متوالی (الف) و بیشینه طول دوره خشک (ب)

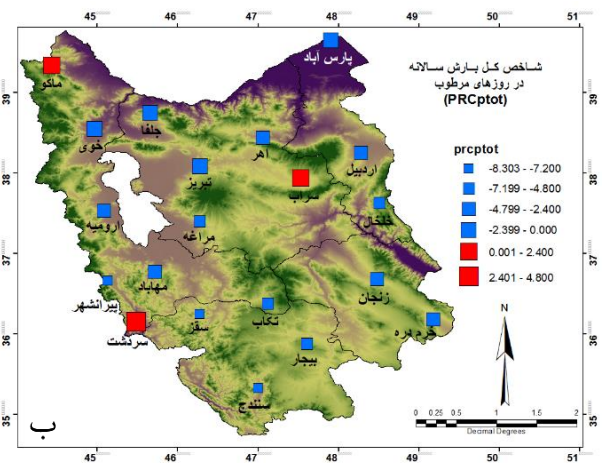
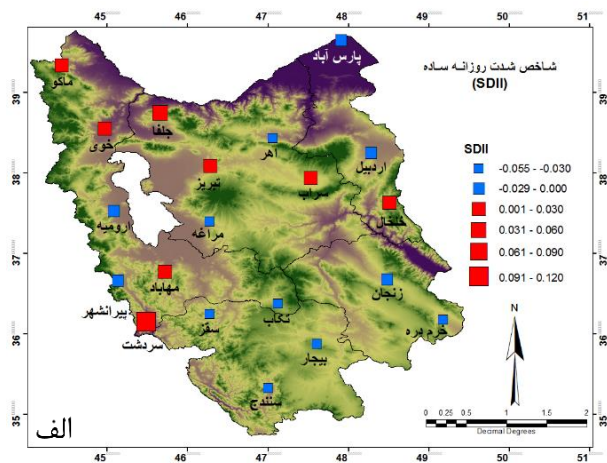


۰/۰۶mm در دهه و شدیدترین روند افزایشی در سردشت به میزان ۰/۱mm در دهه می‌باشد (شکل ۷-ب) که به خوبی خروجی‌های پژوهش دیگری که در این زمینه انجام شده را تایید می‌کند (۱۸).

**آزمون معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها**

به منظور مقایسه شاخص‌ها در دو مقطع زمانی از آزمون مقایسه میانگین (رابطه ۱) برای دو دوره ۱۳۶۵-۱۳۷۷ و ۱۳۷۸-۱۳۹۰ استفاده گردید که جزئیات آن در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردیده است. همانگونه که مشهود است (جدول ۴)، به غیر از دو شاخص R10 و PRCPTOT که تفاوت معنی‌دار در دو دوره را نشان می‌دهند، سایر شاخص‌ها حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین دو دوره می‌باشد.

شاخص PRCPTOT که نشان‌دهنده مقدار سالانه بارش در روزهای مرطوب می‌باشد، در ۸۵٪ ایستگاه‌های منطقه دارای روند کاهشی بوده و میزان کاهش بارش در منطقه محسوس است (شکل ۷-الف). به طور میانگین، میزان این شاخص حدود ۳/۴۴mm در دهه کاهش می‌یابد. بیش‌ترین روند کاهشی آن در ایستگاه‌های پیرانشهر، سنندج و سقز و بیش‌ترین روند افزایشی در ایستگاه‌های سردشت و ماکو دیده می‌شود. شاخص ساده شدت بارش روزانه (SDII) در ۶۰٪ ایستگاه‌های شمال‌غرب ایران روند کاهشی و در ۴۰٪، روند افزایشی دارد که تاییدی بر کارهای انجام شده مشابه در این زمینه می‌باشد (۸، ۱۸). مقدار کاهش شدت بارش روزانه به طور میانگین ۰/۰۱mm در دهه است. شدیدترین روند کاهشی در بیجار به میزان



شکل ۷. توزیع فضایی شاخص شدت روزانه ساده (الف) و مقدار سالانه بارش در روزهای مرطوب (ب)

**جدول ۴. آزمون معنی‌داری اختلاف میانگین‌ها**

وضعیت	P-VAIUE	آماره T	شاخص حدی
تایید فرض صفر	۰/۵۱۹	۰/۶۶۴	RX1day
تایید فرض صفر	۰/۱۰۵	۱/۷۵۶	RX5day
تایید فرض صفر	۰/۶۸۴	-۰/۴۱۷	R95p
تایید فرض صفر	۰/۴۹۸	۰/۶۹۹	R99p
رد فرض صفر	۰/۰۳۲	۲/۴۲۸	R10
تایید فرض صفر	۰/۰۹۲	۱/۸۳۳	R20
تایید فرض صفر	۰/۲۰۱	۱/۳۵۴	R25
تایید فرض صفر	۰/۶۸۴	-۰/۴۱۷	CDD
تایید فرض صفر	۰/۰۵۵	۲/۱۲۵	CWD
تایید فرض صفر	۰/۵۵۱	۰/۶۱۳	SDII
رد فرض صفر	۰/۰۴۵	۲/۲۳۳	PRCPTOT

## تغییرات در گردش بزرگ مقیاس جوی

## نتایج تحلیل فصل زمستان

نقشه تفاضل آب قابل بارش (شکل ۸-الف) بین سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۹۵ و ۱۳۶۴-۱۳۴۰ حاکی از این است که کل پهنه کشور کاهش میزان این پارامتر را نشان می‌دهد که این مقدار برای منطقه مورد مطالعه به  $1 \text{ kg/m}^2$  و برای جنوب غرب کشور حتی به  $3 \text{ kg/m}^2$  نیز می‌رسد. نکته قابل توجه، وجود مقادیر منفی این پارامتر در کل حوضه دریای مدیترانه، سرخ، سیاه و حتی خلیج فارس است که حاکی از کاهش بار رطوبتی جو منطقه در سال‌های اخیر می‌باشد. مطابق نقشه مرکب تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500 \text{ hp}$  که به صورت رنگی و امگای سطح زمین که با خطوط پربند نشان داده شده، تمام پهنه کشور با افزایش ارتفاع جو روبه‌رو شده که این مقدار در منطقه مورد مطالعه بالغ بر  $20 \text{ m}$  می‌باشد که نشان دهنده تقویت سامانه پرفشار و پایداری بیشتر جو منطقه است (شکل ۸-ب). افزایش ارتفاع تراز  $500 \text{ hp}$  به میزان  $40 \text{ m}$  بر روی بخش عظیمی از منطقه، جو زمستانه منطقه را به شدت پایدار نموده است. محل تلاقی عرض  $55^\circ$  و طول  $45^\circ$  تنها منطقه‌ای است که کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل سطح  $500 \text{ hp}$  را به مقدار  $15 \text{ m}$  نشان می‌دهد. خطوط پربند، مقدار امگای سطح زمین را به نمایش می‌گذارد. منطقه شمال‌باختری ایران فزونی میزان حرکت قائم جو به میزان  $0.05 \text{ p/s}$  را ثبت کرده که همانند نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل، حاکی از افزایش پایداری جو منطقه در دوره  $1986-2016$  نسبت به دوره  $1961-1985$  می‌باشد. نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500 \text{ hp}$  و ضخامت جو (شکل ۸-ج) نیز حاکی از تشدید چرخندگی منفی بر روی منطقه است. به عبارت دیگر، در دوره  $1986-2016$  میزان چرخندگی نسبت به دوره  $1961-1985$  کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که نشان‌دهنده تشدید جو پایدار بر روی شمال غرب کشور و بخش عظیمی از ایران است. تنها بخش کوچکی از شمال شرق و جنوب غرب کشور افزایش چرخندگی نسبی مثبت را نمایش می‌دهد. مشاهده نقشه ضخامت جو نیز حکایت از افزایش ارتفاع جو منطقه در فصل زمستان دارد که این مقدار در شمال غرب کشور بالغ بر  $3 \text{ m}$  بود. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که جو

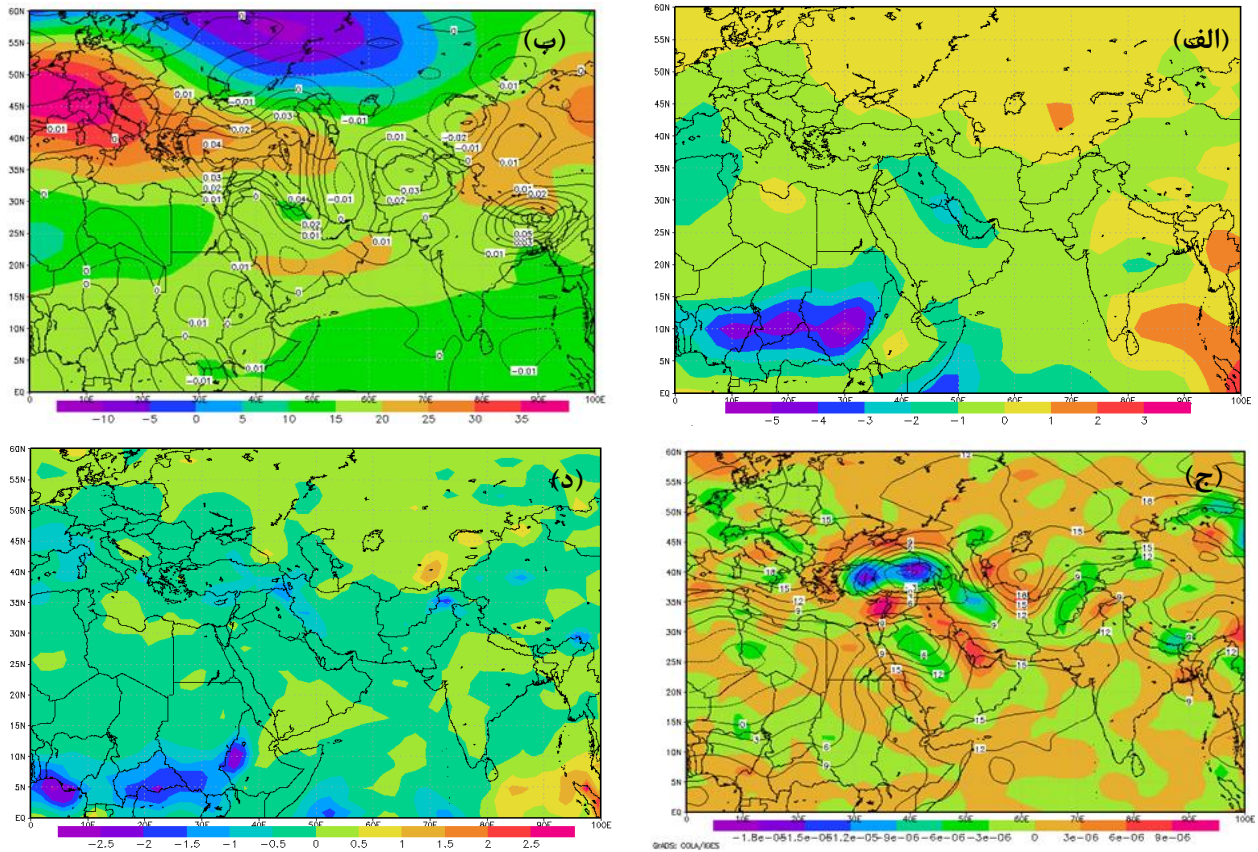
زمستانه منطقه پایدارتر و در نتیجه احتمال وقوع بارش کاهش یافته است.

نقشه تفاضل نرخ بارش زمستانه (شکل ۸-د) حاکی از این است که علاوه بر بیشتر مناطق کشور که افت میزان بارش را به نمایش می‌گذارند، منطقه مورد مطالعه نیز با کاهش  $1.5 \text{ mm}$  در روز روبرو بوده است.

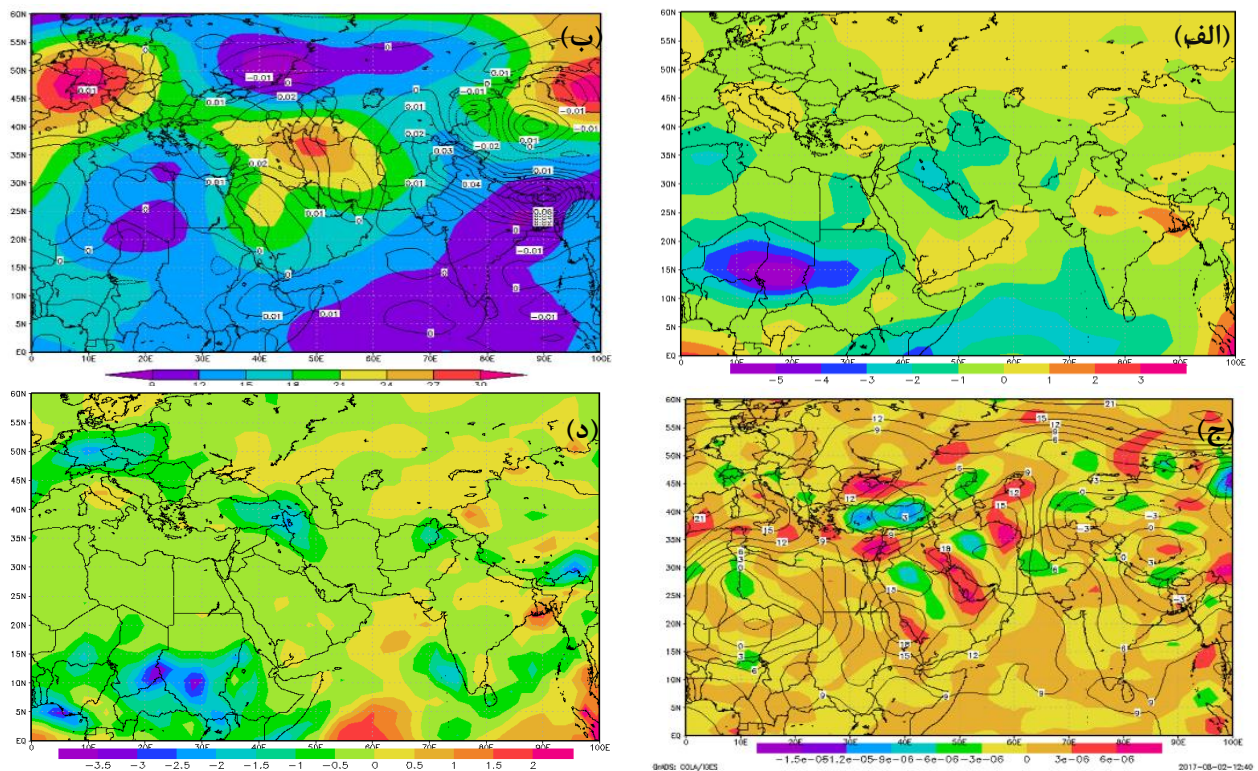
## نتایج تحلیل فصل بهار

نقشه تفاضل آب قابل بارش فصل بهار (شکل ۹-الف) کاهش میزان رطوبت جو را حتی به  $2 \text{ kg/m}^2$  در بعضی مناطق شمال غرب کشور ثبت کرده است.

نقشه ترکیبی تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500 \text{ hp}$  و امگای سطح زمین بین سال‌های  $1986-2016$  و  $1985-1961$  فصل بهار (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد که کل منطقه خاورمیانه افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500 \text{ hp}$  را نشان می‌دهد که این میزان برای منطقه مورد مطالعه به  $30 \text{ m}$  نیز می‌رسد که حاکی از تشدید جو باروتروپیک بر روی منطقه است. نکته حائز اهمیت افزایش بیشتر این پارامتر در عرض‌های میانه نسبت به عرض‌های پایین است که می‌تواند نشانه توسعه سامانه ارتفاع زیاد جنب حاره به نواحی شمالی باشد. میزان حرکت قائم جو نیز در کشور افزایش یافته که برای منطقه شمال غرب کشور این میزان بالغ بر  $0.2 \text{ p/s}$  بود. جو بهاره منطقه نیز همانند فصل زمستان افزایش پایداری را نشان می‌دهد که کاهش بارندگی را در پی داشته است. نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500 \text{ hp}$  و ضخامت جو فصل بهار (شکل ۹-ج) حاکی از کاهش چرخندگی نسبی بر روی منطقه مورد مطالعه است؛ نقشه ضخامت جو نیز افزایش ارتفاع جو در کل پهنه کشور را نشان می‌دهد که این مقدار برای منطقه مورد مطالعه به  $15 \text{ m}$  متر نیز رسیده که پایداری جو منطقه را از طریق گردش عمومی جو به خوبی توجیه می‌نماید. در نقشه تفاضل نرخ بارش (شکل ۹-د) علاوه بر کل کشور، خاورمیانه و حتی اروپا که افت میزان بارش را ثبت نموده، این میزان برای شمال غرب کشور به  $2/5 \text{ mm}$  در روز رسیده که زنگ خطری برای تشدید خشکسالی بر روی منطقه است.



شکل ۸. نقشه ترکیبی تفاضل آب قابل بارش (الف)، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ hp و امگای سطح زمین (ب)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ hp و ضخامت جو (ج) و تفاضل نرخ بارش (د) فصل زمستان



شکل ۹. نقشه ترکیبی تفاضل آب قابل بارش (الف)، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ hp و ام گای سطح زمین (ب)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ hp و ضخامت جو (ج) و تفاضل نرخ بارش (د) فصل بهار



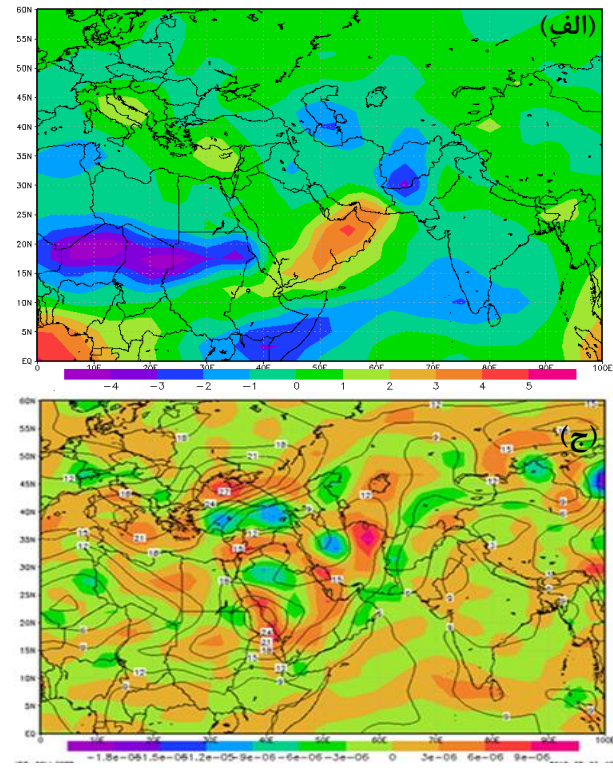
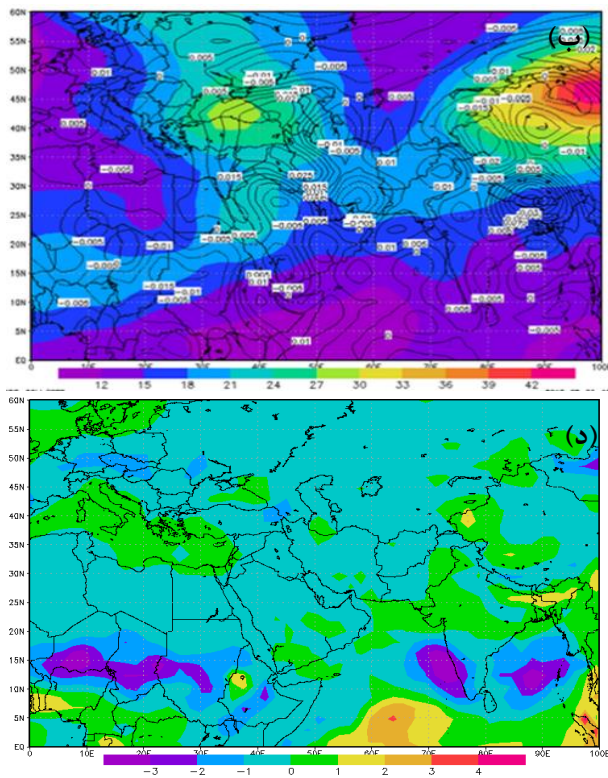
## نتایج تحلیل فصل تابستان

نقشهٔ تفاضل آب قابل بارش فصل تابستان (شکل ۱۰-الف)، کاهش میزان رطوبت جو به مقدار  $1\text{ kg/m}^2$  را نمایش می‌دهد که خشکی بیشتر منطقه را مانند دیگر فصل‌ها نشان می‌دهد. تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500\text{ hp}$  بین دوران گذشته و حال نشان‌دهندهٔ افزایش این شاخص در کل خاورمیانه و ایران است که این مقدار برای منطقه مورد مطالعه بیشتر از  $27\text{ m}$  است و نشانهٔ تشدید پایداری جوی است. میزان تفاضل امگا نیز مقادیر مثبت را نشان می‌دهد که حکایت از تضعیف جریانات صعودی و در نتیجه گرایش منطقه به سوی جو باروتروپیک و در نتیجه کاهش بارندگی دارد (شکل ۱۰-ب). مطابق نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500\text{ hp}$  و ضخامت جو فصل تابستان (شکل ۱۰-ج) همانند فصول گذشته، تفاضل چرخندگی نسبی بین دو دوره  $1986-2016$  و  $1961-1985$  کمیت منفی را بر روی بخش عظیمی از منطقه مورد مطالعه نشان داد که نشان‌دهنده تضعیف چرخندگی مثبت در سال‌های اخیر است که پایداری بیشتر جو را در برداشته است. نقشه ضخامت جو نیز همچنان حکایت از افزایش ارتفاع جو منطقه دارد. چرخندگی نسبی

منفی و افزایش ضخامت جو به طور توأمان خبر از افزایش توان فشار زیاد نیمه گرمسیری در تابستان می‌دهد. میزان تغییرات نرخ بارش بین دو دوره برای فصل تابستان نشان می‌دهد که به جزء استان‌های ساحلی دریاچه خزر و کرانه دریای عمان، بقیه مناطق کشور کاهش بارش به مقدار  $1\text{ mm}$  در روز را ثبت کرده‌اند (شکل ۱۰-د).

## نتایج تحلیل فصل پاییز

نقشهٔ تفاضل آب قابل بارش فصل پاییز (شکل ۱۱-الف) همانند فصول گذشته، کاهش بار رطوبتی جو را به مقدار  $1\text{ kg/m}^2$  بر روی شمال غرب کشور نشان داد که کاهش بارش‌های فصل پاییز منطقه را به خوبی توضیح می‌دهد. نقشهٔ ترکیبی تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500\text{ hp}$  و امگای سطح زمین بین سال‌های  $2016-1986$  و  $1985-1961$  نشان داد که در فصل پاییز نیز که آغاز استیلای موج بادهای غربی بر روی کشور است، تفاضل مثبت به مقدار  $24\text{ m}$  دیده می‌شود که نشان‌دهنده تضعیف جریانات غربی و در نتیجه حاکمیت جو پایدارتر بر روی منطقه و کل پهنه کشور می‌باشد (شکل ۱۱-ب).



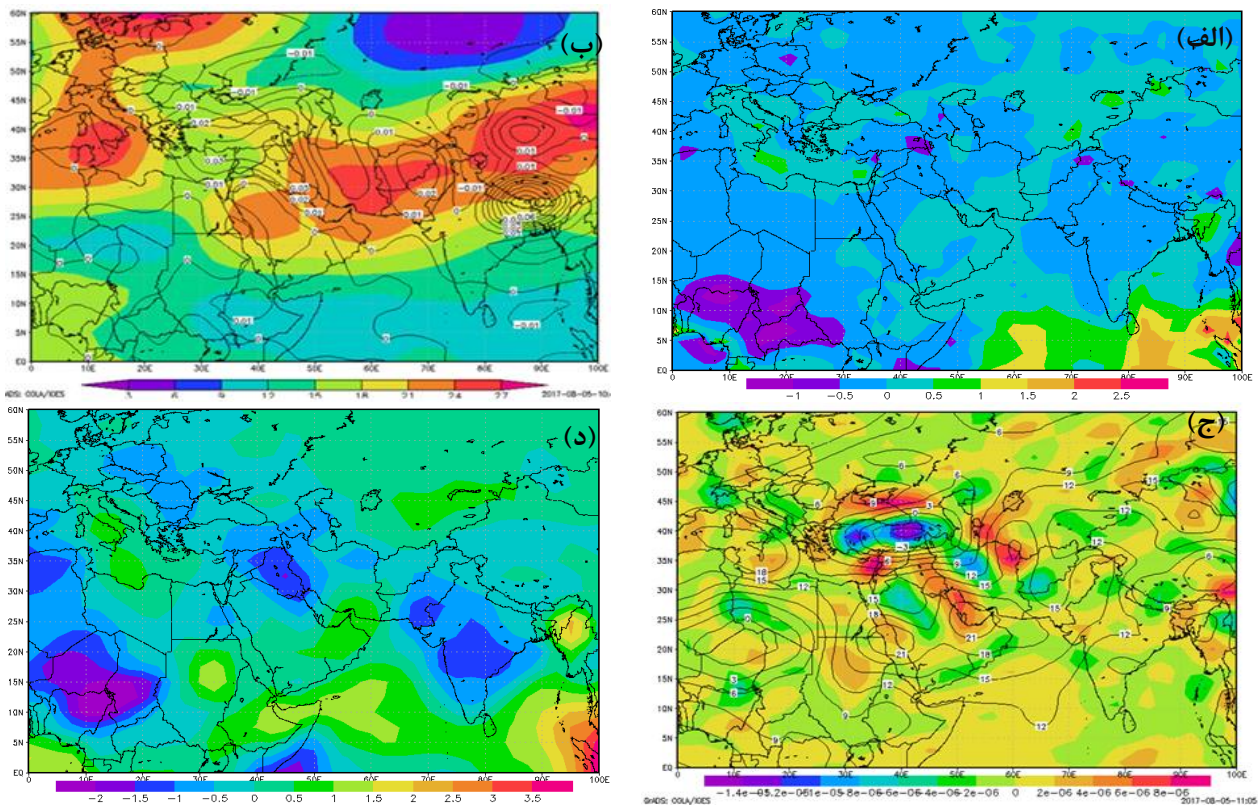
شکل ۱۰. نقشهٔ تفاضل آب قابل بارش (الف)، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500\text{ hp}$  و امگای سطح زمین (ب)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500\text{ hp}$  و ضخامت جو (ج) و تفاضل نرخ بارش (د) فصل تابستان



در پژوهش انجام شده روند تغییر نمایه‌های فرین بارش شمال غرب ایران و ارتباط آن با گردش عمومی بزرگ مقیاس جو بررسی شد. نتایج مشخص کرد که منطقه مورد مطالعه به طور کلی با کاهش بارش و رطوبت و همچنین افزایش خشکی روبه رو شده و شوربختانه در حال سیر به اقلیم خشک می‌باشد. بهترین شاهد برای این ادعا خشکی دریاچه ارومیه می‌باشد. از دیگر سو، مطالعه گردش عمومی جو منطقه نیز نتایج جدید و قابل تاملی را به دنبال داشت. بدین صورت که بر خلاف باور عمومی و مطالعات فراوان انجام شده در این حیطة، دلیل خشکی منطقه و به تبع آن دریاچه ارومیه تنها عوامل آنتروپوژنیک نیست و عامل همدیدی و تغییر بزرگ مقیاس در گردش جو از قبیل کاهش ناپایداری در منطقه، کاهش جریان‌های صعودی و کاهش ورود جریان‌ات مرطوب به شمال غرب کشور موجب گرایش منطقه به سمت اقلیم خشک شده است. بر این اساس بررسی‌های بیشتر و جزئی‌تر در زمینه گردش عمومی جو منطقه می‌تواند ابعاد تازه‌تری از دلایل این تغییرات را روشن سازد.

میزان حرکت قائم جو نیز همانند سایر فصول کمیت مثبت را نمایش می‌دهد که حاکی از تضعیف جریانات صعودی است که کاهش جابجایی عمود هوا را در برداشته و کمبود بارش پاییزه را سبب می‌گردد. تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500\text{ hp}$  و ضخامت جو نیز همچنان مقادیر منفی چرخندگی را نشان داده که به معنی تضعیف ناپایداری در این فصل بر روی منطقه است. ضخامت جو در بخش عمده کشور بیشتر شده که این مقدار برای منطقه مورد مطالعه به  $6\text{ m}$  هم می‌رسد. بطور کلی، جو پاییزه منطقه، جوی پایدار و باروتروپیک است (شکل ۱۱-ج). مطابق نقشه تفاضل نرخ بارش برای فصل پاییز نیز منطقه مورد مطالعه با کاهش میزان بارش روبرو است (شکل ۱۱-د). شوربختانه ادامه این روند می‌تواند در سال‌های آتی شمال غرب ایران را وارد اقلیم خشک نموده و روند بیابان‌زایی که اکنون محدود به پیرامون دریاچه ارومیه می‌باشد، تشدید و در کل منطقه مورد مطالعه گسترش دهد.

#### نتیجه‌گیری



شکل ۱۱. نقشه ترکیبی تفاضل آّب قابل بارش (الف)، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز  $500\text{ hp}$  و امگای سطح زمین (ب)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز  $500\text{ hp}$  و ضخامت جو (ج) و تفاضل نرخ بارش (د) فصل پاییز

## ■ سپاسگزاری

دادن آمار و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی منطقه  
مورد مطالعه قدردانی کند.

نگارندگان پژوهش حاضر بر خود لازم می‌دانند از اداره  
کل هواشناسی استان آذربایجان غربی برای در اختیار قرار

## ■ References

- Ahmadi, M., Lashkari, H., Azadi, M., & Keikhosravi, G. (2015). Detection of climate change with extreme precipitation indices in great Khorasan. *Researches in Earth Sciences*, 6(23), 34-52. [In Persian]
- Bennett, K. E., & Walsh, J. E. (2015). Spatial and temporal changes in indices of extreme precipitation and temperature for Alaska. *International Journal of Climatology*, 35(7), 1434-1452. DOI: doi.org/10.1002/joc.4067
- Darand, M. (2015). Assessment and detection of climate change in Iran during recent decades. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(30), 1-14. [In Persian]
- Data, C. (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. World Meteorological Organization.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P. M., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate research*, 19(3), 193-212. DOI: doi.org/10.3354/cr019193
- Gobin, A., Tarquis, A. M., & Dalezios, N. R. (2013). Weather-related hazards and risks in agriculture. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 13(10), 2599–2603. DOI: http://doi.org/10.5194/nhess-13-2599-2013
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Javan, K., Movaghari, A., & Park, J. S. (2023). Projected changes in extreme precipitation indices over the Lake Urmia basin in Iran. *Water and Climate Change*, 14(8), 2564-2582. DOI: doi.org/10.2166/wcc.2023.447
- khodaei Geshlag, F., roostaei, S., & mokhtari, D. (2020). Monitoring the desertification trend in the areas surrounding Lake Urmia (2000-2018). *Geography and Environmental Planning*, 31(3), 21-40. DOI: 10.22108/GEP.2020.121458.1264
- Klein Tank, A. M., Peterson, T. C., Quadir, D. A., Dorji, S., Zou, X., Tang, H., ... & Spektorman, T. (2006). Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia. *Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D16). DOI: doi.org/10.1029/2005JD006316
- Kouzegaran, s, Mousavi Bayg, M. (2015). Investigation of meteorological extreme events in the north-east of Iran. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 750-764. DOI: 10.22067/JSW.V0I0.40845 [In Persian]
- Krichak, S. O., Breitgand, J. S., Gualdi, S., & Feldstein, S. B. (2014). Teleconnection–extreme precipitation relationships over the Mediterranean region. *Theoretical and applied climatology*, 117(3-4), 679-692. DOI: doi.org/10.1007/s00704-013-1036-4
- Krishnamurthy, C. K. B., Lall, U., & Kwon, H. H. (2009). Changing frequency and intensity of rainfall extremes over India from 1951 to 2003. *Climate*, 22(18), 4737-4746. DOI: doi.org/10.1175/2009JCLI2896.1
- Liu, J., Du, H., Wu, Z., He, H. S., Wang, L., & Zong, S. (2017). Recent and future changes in the combination of annual temperature and precipitation throughout China. *International Journal of Climatology*, 37(2), 821-833. DOI: doi.org/10.1002/joc.4742

15. Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., & Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347(1), 197-210. DOI: doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.019
16. Marofi, S., Sohrabi, M. M., Mohammadi, K., Sabziparvar, A. A., & Abyaneh, H. Z. (2011). Investigation of meteorological extreme events over coastal regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 103, 401-412. DOI: doi.org/10.1007/s00704-010-0298-3
17. Merino, A., Fernández-Vaquero, M., López, L., Fernández-González, S., Hermida, L., Sánchez, J.L., García-Ortega, E. & Gascón, E. (2016). Large-scale patterns of daily precipitation extremes on the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 36(11), 3873-3891. DOI: doi.org/10.1002/joc.4601
18. Mohammadi, H., Azizi, G., khoshahklagh, F., & Ranjbar, F. (2017). Analysis of daily precipitation extreme indices trend in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(1), 21-37. DOI: 10.22059/JPHGR.2017.61577 [In Persian]
19. Molanejad, M., Soltani, M., & Ranjbar, A. (2014). Changes in precipitation extremes in climate variability over northwest Iran. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 2(10), 334-345. DOI: doi.org/10.15739/IJAPR.005
20. Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology*, 29(3), 329-343. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.1739
21. Rezai Banafsheh, Majid, Najafi, Mohammad Saeed, Naghizadeh, Habibeh, & Abkharabat, Shoaib. (2015). The Study of relationship between variability of extreme precipitation and the main factors affecting the precipitation in the west and north west of Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 4(13), 133-153. DOI: 10.22067/GEO.V4I1.37833 [In Persian]
22. Saadi, Tofigh, Alijani, Bohloul, Massah Bavani, Alireza, & Akbari, Mehri. (2016). Detection of extreme precipitation changes and attribution to climate change using standard optimal fingerprinting (Case Study: The Southwest of Iran). *Journal Of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 3(3), 65-80. DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.65 [In Persian]
23. Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M.M., Molanejad, M., Sabziparvar, A.A., Ranjbar SaadatAbadi, A., Ranjbar, F., Roustaa, I. and Zawar-Reza, P. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3-4), 775-795. DOI: doi.org/10.1007/s00704-015-1609-5
24. Song, X., Song, S., Sun, W., Mu, X., Wang, S., Li, J., & Li, Y. (2015). Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013. *Atmospheric Research*, 157, 137-152. DOI: doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.022
25. Sun, W., Mu, X., Song, X., Wu, D., Cheng, A., & Qiu, B. (2016). Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960–2013 under global warming. *Atmospheric Research*, 168, 33-48. DOI: doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.001
26. Tabari, H., & Willems, P. (2016). Daily precipitation extremes in Iran: decadal anomalies and possible drivers. *the American Water Resources Association*, 52(2), 541-559. DOI: doi.org/10.1111/1752-1688.12403
27. Tabari, H., AghaKouchak, A., & Willems, P. (2014). A perturbation approach for assessing trends in precipitation extremes across Iran. *Hydrology*, 519, 1420-1427. DOI: doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.019

28. Tank, A. K., Wijngaard, J., & van Engelen, A. (2002). *Climate of europe. assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. european climate assessment*. De Bilt, The Netherlands. ISBN 90-396-2208-9.
29. Tingley, M. P., & Huybers, P. (2013). Recent temperature extremes at high northern latitudes unprecedented in the past 600 years. *Nature*, 496(7444), 201-205. DOI: doi.org/10.1038/nature11969
30. Wang, X., Yang, T., Shao, Q., Acharya, K., Wang, W., & Yu, Z. (2012). Statistical downscaling of extremes of precipitation and temperature and construction of their future scenarios in an elevated and cold zone. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 26(3), 405-418. DOI: doi.org/10.1007/s00477-011-0535-z
31. Warner, M. D., Mass, C. F., & Salathe Jr, E. P. (2012). Wintertime extreme precipitation events along the Pacific Northwest coast: Climatology and synoptic evolution. *Monthly Weather Review*, 140(7), 2021-2043. DOI: doi.org/10.1175/MWR-D-11-00197.1
32. Wei, W., Shi, Z., Yang, X., Wei, Z., Liu, Y., Zhang, Z., Ge, G., Zhang, X., Guo, H., Zhang, K. & Wang, B. (2017). Recent trends of extreme precipitation and their teleconnection with atmospheric circulation in the Beijing-Tianjin sand source region, China, 1960–2014. *Atmosphere*, 8(5), 83. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos8050083
33. Zhang, X., E. Aguilar, S. Sensoy, H. Melkonyan, U. Tagiyeva, N. Ahmed, N. Kutaladze, F. Rahimzadeh, A. Taghipour, T.H. Hantosh, P. Albert, M. Semawi, M. Karam Ali, M. Halal Said Al-Shabibi, Z. AlOulan, Taha Zatari, I. Al Dean Khelet, S. Hammoud, M. Demircan, M. Eken, M. Adiguzel, L. Alexander, T. Peterson & Wallis, T. (2005). Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D22). DOI: https://doi.org/10.1029/2005JD006181
34. Zhao, Y., Zou, X., Cao, L., & Xu, X. (2014). Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960–2012. *Quaternary International*, 333, 26-39. DOI: doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.060
35. Zhou, B., Xu, Y., Wu, J., Dong, S., & Shi, Y. (2016). Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1051-1066. DOI: doi.org/10.1002/joc.4400
36. Zollo, A. L., Rillo, V., Bucchignani, E., Montesarchio, M., & Mercogliano, P. (2016). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004. DOI: doi.org/10.1002/joc.4401
37. Zongxing, L., He, Y., Wang, P., Theakstone, W.H., An, W., Wang, X., Lu, A., Zhang, W. & Cao, W. (2012). Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80, 255-272. DOI: doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.008
38. Zongxing, L., Juan, G., Baijuan, Z., & Qi, F. (2021). Soil water sources in permafrost active layer of Three-River Headwater Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-59. DOI: doi.org/10.5194/hess-2021-558