



Simulating and Drawing the Prospect of Drought in the Aras River Basin

Mahnaz Saber¹ , Bromand Salahi²

1. Postdoctoral Researcher of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mahnaz.saber@uma.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: salahi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 28 September 2024

Revised: 14 November 2024

Accepted: 27 November 2024

Published: 15 March 2026

Keywords:

CMIP6 Model,
Aras Basin,
Drought,
SSP.

ABSTRACT

In this research, the drought situation of Aras Basin under the conditions of climate change has been investigated. For this purpose, simulated precipitation data of CNRM-CM6-1-HR model with high horizontal resolution (10×10 km²) under SSP5-8.5 scenario during 76 years and 912 months of the future period (2100-2025) were used, and the SPI index was determined as a criterion for evaluating the drought situation. The monthly analysis of the future drought under the SSP5-8.5 scenario with the SPI index showed that the drought trend is decreasing in all stations except Jolfa station. Under the SSP5-8.5 scenario, the most severe drought of the period was simulated in Ardabil and Ahar in April 2094, in Jolfa in April 2094, in Parsabad in February 2028, in Khoi in September 2078 and in Mako in May 2080. On an annual scale, the frequency of drought in Mako, Jolfa, Parsabad, Khoi and Ardabil was calculated as 42, 41, 39, 36 and 34 years respectively. Spatial distribution of annual precipitation anomalies in Aras basin showed that the maximum of very severe drought and the minimum of very severe wets are located in the southeast of the basin (Ardabil station), while the maximum core of extreme wets and the minimum core of extreme drought are concentrated in the southwest of the basin. On a monthly scale, the core of maximum and minimum frequency of positive anomalies is mainly located in the western half of the basin. On an annual scale, the largest increase in the estimated positive precipitation anomalies was related to Ardabil, Parsabad and Ahar, and the largest decrease in negative anomalies was related to Ahar, Khoy and Ardabil. On a monthly scale, the maximum decrease in negative anomaly is related to Parsabad and the maximum percentage increase in positive anomaly is related to Jolfa.

Cite this article: Saber, M., & Salahi, B. (2026). Simulating and Drawing the Prospect of Drought in the Aras River Basin. *Journal of Geography and Planning*, 30(95), 137-155. <http://doi.org/10.22034/gp.2024.63747.3308>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2024.63747.3308>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction

Drought is a natural disaster that can appear in different parts of the world due to less than normal precipitation. This phenomenon has become a major threat to local sustainable development in the arid lands of the world and is the reason for excessive migrations and environmental destruction. Prediction of future drought changes is considered important, especially in the context of rapid warming. Also, drought monitoring is inevitable to manage and assess risk, as well as take effective measures to deal with and reduce the effects of drought. In this research, taking into account the possibility of the water situation becoming more critical in the future, the drought situation of the Aras basin has been investigated under climate change conditions.

Data and method

In this research, the simulated precipitation data and the CNRM model output from the CMIP6 were used. Precipitation data of the CMIP6 (CNRM-CM6) model was received under the SSP585 scenario for the historical period of 1985-2014 and the future period of 2025-2100. Precipitation data was extracted for selected stations of the Aras basin and evaluated with the SPI index of the climatic condition of the basin, and the precipitation and drought of the Aras basin during the next 76-year period (2100-2025) were analyzed on both annual and monthly scales and compared with the historical values of the model. The General Circulation Models (GCMs) based on the Sixth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (CMIP6) are an improved version of the previous CMIPs in several ways, including better geographic resolution and improved modeling of cloud microphysical processes; therefore, the 6th Report GCM ensembles are more reliable for climate forecasting than the previous CMIP ensembles. The CNRM-CM6-1-HR model was designed by the French CNRM research center, and its horizontal resolution is 10×10 km. SSP585 was also used, which is a pessimistic scenario and presents an upper bound on radiative forcings such that progress is associated with fossil fuel use and a high energy consumption pattern.

Discussion

The monthly review of the SPI index showed that the drought trend is decreasing in all stations except Jolfa station, and as the end of the period approaches, the frequency and severity of droughts increase so that the most severe drought of the period in Ardabil in April 2094 (-3.42), in Jolfa in April 2094 (-3.32), in Parsabad in February 2028 (-3.9), in Khoi in September 2078 (-3.34) and predicted in Mako in May 2080 (-4). On an annual scale, the frequency of drought in Mako, Jolfa, Parsabad, Khoi, and Ardabil was calculated as 42, 41, 39, 36, and 34 years respectively. The monthly frequency of dry and drought conditions also indicates the dominance of dry conditions over drought so that in Ardabil and Khoi stations, the frequency of wet years (42 and 40 wet years, respectively) will prevail over the frequency of dry years (34 and 36 years). While in Mako, Jolfa, and Parsabad, the frequency of dry years (42, 41, and 39 years) was predicted more than wet years (34, 35, and 37 years). The order of monthly SPI classes from more to less frequency are normal, mild drought, mild drought, moderate drought, moderate drought, severe drought, severe drought, very severe drought, very severe drought; Therefore, contrary to the frequency order of the annual SPI classes, the monthly SPI shows that a very strong fear will occur with the lowest probability in the months of the coming period, and a little more than that, a very severe drought is likely to occur, which compared to the annual scale of this index, the order of abundance of these two classes is shifted together. The Spatial distribution of annual precipitation anomalies in the Aras basin showed that the maximum of very severe drought and the minimum of very severe drought are located in the southeast of the basin (Ardebil station). While the maximum core of very severe drought and the minimum core of very severe drought are concentrated in the southwest of the basin and Khoi station. On a monthly scale, the core of the maximum and minimum frequency of positive anomalies are located in the western half of the basin, while the core of maximum droughts is concentrated in the center or east of the basin. Therefore, the east of the basin, which has a semi-arid (Ardebil station) to dry (Parsabad station) climate, is more exposed to different intensities of droughts. Under the SSP585 scenario, the percentage of annual frequency changes of SPI classes in the future period was estimated between -10 and +10 for the selected stations of The Aras basin, and the monthly changes of this index were estimated between -3.6 and +4.2 percent. The highest percentage of decrease and increase of positive and negative precipitation anomalies on an annual scale is related to Ardabil, Parsabad, and Khoi, and on a monthly scale, the highest percentage of negative anomaly decrease is related to Parsabad, and the highest percentage of positive anomaly increase is related to Jolfa.

Results

The highest monthly frequency of severe and very severe drought was predicted in Jolfa and Ardabil, respectively, which are located at a higher altitude than the rest of the stations. According to the spatial distribution of monthly precipitation anomalies in the Aras basin in the future period, the east of the Aras basin is

more exposed to different intensities of drought. Although the percentage of negative and positive precipitation anomalies in the future period compared to the historical period will decrease on average in the Aras basin stations, but the amount and intensity of this decrease is greater in the case of positive anomalies, and therefore the risk of drought reduction will be far greater than the reduction of drought. So that mild fear will decrease by -1.5% on average, very strong fear by -0.3%, moderate fear by -0.2%, while severe drought will decrease by -0.4 percent and very severe drought by -0.2 percent, mild drought (0.3 percent) and moderate drought (0.6 percent) will increase slightly.

Keywords: Aras Basin, Drought, CMIP6 Model, SSP.





شبیه سازی و ترسیم دورنمای خشک سالی حوضه آبریز رودخانه ارس با مدل اقلیمی CNRM-CM6

مهناز صابر^۱، برومند صلاحی^۲

۱. پژوهشگر پساکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mahnaz.saber@uma.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: salahi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

حوضه ارس،

خشک سالی،

مدل CMIP6، SSP.

در این پژوهش به بررسی وضعیت خشک سالی حوضه ارس در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شده است. برای این منظور، از داده بارش شبیه سازی شده مدل CNRM-CM6-1-HR با توان تفکیک افقی بالا (۱۰×۱۰ کیلومتر مربع) تحت سناریوی SSP5-8.5 طی ۷۶ سال و ۹۱۲ ماه از دوره آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰) استفاده شد و شاخص SPI به عنوان معیار ارزیابی وضعیت خشک سالی تعیین گردید. بررسی ماهانه خشک سالی آینده تحت سناریوی SSP5-8.5 با شاخص SPI نشان داد که روند خشک سالی در همه ایستگاه ها به جز ایستگاه جلفا نزولی است. تحت سناریوی SSP5-8.5، شدیدترین خشک سالی دوره در اردبیل و اهر در آوریل ۲۰۹۴، در جلفا در آوریل ۲۰۹۴، در پارس آباد در فوریه ۲۰۲۸، در خوی در سپتامبر ۲۰۷۸ و در ماکو در می ۲۰۸۰ شبیه سازی شد. در مقیاس سالانه، فراوانی خشک سالی در ماکو، جلفا، پارس آباد، خوی و اردبیل به ترتیب ۴۲، ۴۱، ۳۹، ۳۶ و ۳۴ سال محاسبه شد. توزیع فضایی آنومالی های بارش سالانه حوضه ارس نشان داد بیشینه خشک سالی خیلی شدید و کمینه ترسالی خیلی شدید در جنوب شرقی حوضه (ایستگاه اردبیل) قرار گرفته درحالی که هسته بیشینه ترسالی خیلی شدید و هسته کمینه خشک سالی خیلی شدید در جنوب غربی حوضه متمرکز است. در مقیاس ماهانه نیز هسته بیشینه و کمینه فراوانی آنومالی های مثبت عمدتاً در نیمه غربی حوضه قرار دارد. در مقیاس سالانه، بیش ترین درصد افزایش آنومالی های بارشی مثبت برآورد شده مربوط به اردبیل، پارس آباد و اهر و بیش ترین کاهش آنومالی های منفی مربوط به اهر، خوی و اردبیل بوده است. در مقیاس ماهانه، حداکثر میزان کاهش آنومالی منفی مربوط به پارس آباد و حداکثر درصد افزایش آنومالی مثبت مربوط به جلفا است.

استناد: صابر، مهناز و صلاحی، برومند (۱۴۰۵). شبیه سازی و ترسیم دورنمای خشک سالی حوضه آبریز رودخانه ارس با مدل اقلیمی CNRM-CM6. جغرافیا و برنامه ریزی، ۳۰ (۹۵)، ۱۵۵-۱۳۷.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.63747.3308>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه تبریز.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقدمه

خشک‌سالی بلای طبیعی است که می‌تواند در نواحی مختلفی از جهان به دلیل بارش کمتر از نرمال صرف‌نظر از رژیم‌های اقلیمی اتفاق بیفتد (سریدارا^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). هرچند اتفاق نظری در خصوص تعریف این پدیده وجود ندارد، بری و چورلی^۲ (۱۹۹۶) (به نقل از حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۸۹) خشک‌سالی را کمبود بارش در دوره‌ای بلندمدت می‌دانند که سبب کمبود رطوبت خاک و کاهش آب‌های جاری شده و سیستم‌های طبیعی را دچار اختلال می‌کند (مهدویان و همکاران، ۱۴۰۲؛ صابر و همکاران، ۱۴۰۳). این پدیده به تهدید عمده‌ای برای توسعه پایدار محلی در سرزمین‌های خشک جهان تبدیل شده و دلیل مهاجرت‌های بی‌رویه و تخریب محیط‌زیست است (حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۸۹: ۸). همچنین با افزایش فزاینده گرمایش جهانی، خشک‌سالی می‌تواند اثراتی بر روی کشاورزی منطقه‌ای، منابع آب و محیط اکولوژیکی داشته باشد. پیش‌بینی تغییرات خشک‌سالی آینده به‌ویژه در زمینه گرمایش سریع، بااهمیت تلقی می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۱ b). پژوهش‌های محققان نشان می‌دهد فراوانی وقوع خشک‌سالی در آینده به طرز معنی‌داری عمدتاً به‌عنوان پیامدی از تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت (ترنبرث^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طورکلی خروجی مدل‌های CMIP5 افزایش در شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها را به‌صورت جهانی برای قرن ۲۱ به تصویر می‌کشد (شفیلد و وود^۴، ۲۰۰۸؛ دای^۵، ۲۰۱۳؛ هوآنگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال مطالعات در زمینه تغییر و بزرگی آن هنوز به غنای لازم نرسیده است (استفن^۷ و همکاران، ۲۰۱۸). درک الگوهای خشک‌سالی تاریخی و آینده برای سازگاری و کاهش اثرات خشک‌سالی ضروری است. اثر منفی خشک‌سالی‌ها در هر منطقه‌ای بر روی اقتصاد جامعه توجهات را به خود جلب کرده است ولی هنوز تحقیقات جامع یا الگوی پایش بلندمدت برای خشک‌سالی‌های آینده وجود ندارد (زیس^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). پایش و ارزیابی اثرات خشک‌سالی مهم‌ترین استراتژی‌های کاهش در مصاف با اثرات خشک‌سالی است (سریدارا و همکاران، ۲۰۲۱). پایش خشک‌سالی به‌منظور مدیریت و ارزیابی ریسک و همچنین اقدام مؤثر جهت مقابله و کاهش اثرات خشک‌سالی اجتناب‌ناپذیر است. ویژگی‌های خشک‌سالی نظیر شدت، طول و گستره آن می‌تواند با ۱۴ شاخص مختلف خشک‌سالی مورد بررسی قرار گیرد. انتخاب شاخص‌های خشک‌سالی باید بر اساس داده‌های در دسترس و کیفیت و توانایی شاخص در تعیین ویژگی‌های زمانی- مکانی خشک‌سالی باشد (زارعی و همکاران، ۲۰۱۷). شاخص‌های خشک‌سالی ابزار فوق‌العاده کاربردی برای ارزیابی خشک‌سالی منطقه‌ای هستند (پرادهام و ساهو^۹، ۲۰۲۳) و با این شاخص‌ها به بررسی وضعیت خشک‌سالی در مناطق مختلف جهان پرداخته شده است.

لیو^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات وقایع اقلیمی فرین آسیای میانی را تحت شرایط گرمایش جهانی بررسی نمودند. نتایج برآورد خشک‌سالی با روش SPI نشان داد معنی‌داری شرایط خشک‌سالی در عمده نواحی آسیای مرکزی بیش‌تر از ۶۰٪ است و خشک‌سالی در آینده بیش‌تر خواهد بود. لی و همکاران (۲۰۲۰) شرایط خشک‌سالی شمال غرب چین را با شاخص PDSI^{۱۱} و بر اساس خروجی ۱۲ مدل CMIP6 تحت سناریوهای SSP-RCP را بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۹۹ پیش‌بینی نمودند. یافته‌ها نشان داد شدت خشک‌سالی تحت سناریوی SSP585 به‌سرعت روند افزایشی دارد و فراوانی خشک‌سالی تحت این سناریو کمتر از سناریوی SSP126 و SSP245 است. سریدارا و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص‌های مختلف محاسبه خشک‌سالی مبتنی بر بارش

1. Sridhara
2. Barry & Chorley
3. Trenberth
4. Sheffield & Wood
5. Dai
6. Huang
7. Steffen
8. Zice
9. Pradhan & Sahoo
10. Lu
11. Palmer Drought Severity Index

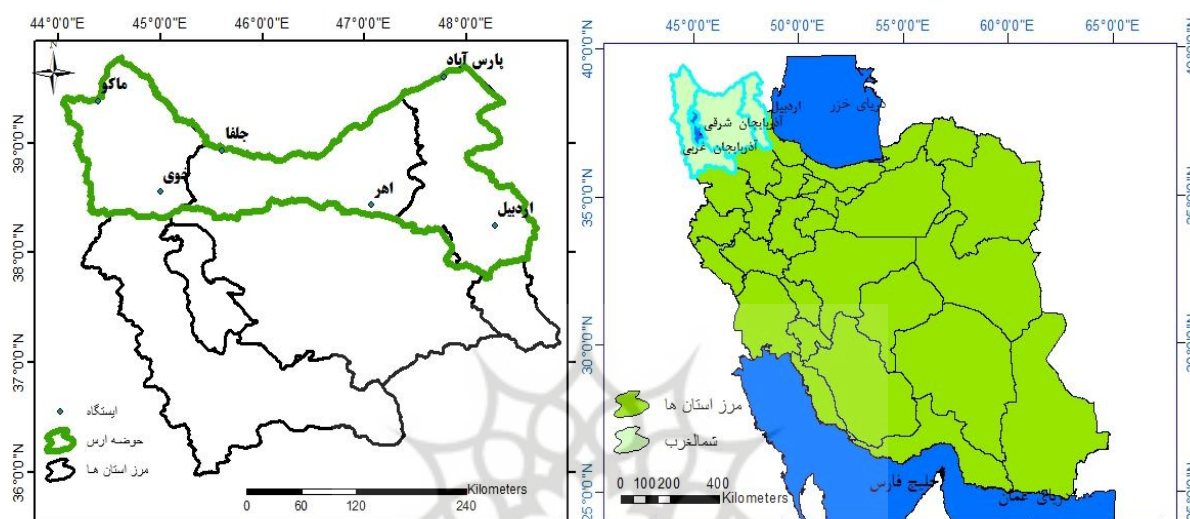
(DI^۱، PN^۲، CZI^۳، ZSI^۴ و SPI^۵) به ارزیابی خشک‌سالی در چیترا دوگرای کراماتاکا پرداختند. نتایج آشکار ساخت شاخص SPI بهترین شاخص برای پیش‌بینی خشک‌سالی در این منطقه است. لی و همکاران (۲۰۲۱a) خشک‌سالی هواشناسی در سرزمین‌های خشک آسیا را با استفاده از سناریوهای CMIP6 و شاخص SPI پیش‌بینی نمودند. یافته‌ها مشخص کرد مناطق دارای اقلیم خشک از خشک‌سالی‌های شدیدتر تحت سناریوهای SSP بیش‌تر رنج خواهد برد و وقتی انتشار تحت سناریوهای SSP افزایش می‌یابد اقلیم جهانی خشک‌تر و خشک‌سالی شدیدتر و طولانی‌تر می‌شود. آیوگی^۶ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات خشک‌سالی هواشناسی در شرق آفریقا با مدل‌های تصحیح اریبی شده CMIP6 و شاخص SPI پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود نواحی خشک واقع در این منطقه بیش‌تر در معرض وقوع خشک‌سالی از نظر فراوانی، طول بیش‌تر و شدت قوی‌تر قرار دارند. در مقابل، نواحی دریاچه‌ای و ارتفاعات زیاد انتظار کم‌تری برای وقوع این پدیده می‌رود. سو^۷ و همکاران (۲۰۲۱) خصوصیات خشک‌سالی آینده در چین را با استفاده از شاخص SEPI و خروجی ۴ مدل اقلیمی CMIP6 تحت سناریوهای SSP-RCP در سه دوره زمانی بین ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ استخراج نمودند. آنان دریافتند کاهش بارش و افزایش ET به تداوم شرایط خشک در بخش علیا و میانی حوضه یانگ تسه در دوره آینده منجر خواهد شد و نیز رخداد خشک‌سالی در مقایسه با دوره مرجع (۱۹۸۶-۲۰۰۵) فراوانی، شدت و تداوم بیش‌تری خواهد داشت. زایس^۸ و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی خشک‌سالی دوره گذشته و آینده در چین طی دوره ۲۰۹۹-۱۹۶۱ با استفاده از مدل چندگانه CMIP6 و متعاقب ارزیابی توانایی شبیه‌سازی دما و بارش این مدل‌ها پرداختند. نتایج نشان داد در مقایسه با دوره تاریخی وقوع خشک‌سالی فراوان‌تر شده، همچنین طول خشک‌سالی و شدت خشک‌سالی در دوره آینده تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت. نسکار^۹ و همکاران (۲۰۲۳) به پیش‌بینی تغییرات زمانی-مکانی بارش و خشک‌سالی هند با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای SSP برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۲۰ پرداختند. نتایج پژوهش آنان حداکثر تغییرات بارش آینده را در شمال هند آشکار نمود. در این دوره فراوانی خشک‌سالی تغییر قابل‌توجهی نداشته ولی تداوم خشک‌سالی در شمال غربی هند به‌ویژه در گجرات و راجستان تغییرات مکانی خواهد داشت. پرادهام و ساهو (۲۰۲۳) به پیاده‌سازی شاخص‌های خشک‌سالی بارش-مبنا برای ارزیابی خشک‌سالی منطقه‌ای اودیشای هند اقدام نمودند. نتایج حاکی از موفقیت‌آمیز بودن شاخص SPI در تشخیص دوره‌های خشک‌سالی شدید و حدی تاریخی بود و این شاخص را به‌عنوان ابزار ارزیابی خشک‌سالی در این منطقه پیشنهاد می‌دهد. یانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی تغییرات آبی منابع آب، سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌های حوضه چائوپرایای تایلند را تحت اثرات تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی با استفاده از سناریوهای SSP-RCP بررسی نمودند. نتایج نشان داد تغییر اقلیم اثر عمده‌ای بر فراوانی وقوع سیلاب‌ها و رخداد خشک‌سالی در آینده خواهد گذاشت و بر شمار آن‌ها افزوده خواهد شد.

اثرات خشک‌سالی بر روی اکوسیستم و محیط‌زیست ممکن است فاجعه‌ها و پیامدهایی در برنامه‌های اجتماعی-اقتصادی ایجاد کند (پرادهام و ساهو، ۲۰۲۳). رشد جمعیت و به‌تبع آن، افزایش تقاضا و رقابت برای دستیابی به منابع آبی محدود، سبب رشد آسیب‌پذیری است (حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۸۹: ۸). از این رو برای آگاهی از وضعیت خشک‌سالی حوضه ارس در دوره آینده با توجه به احتمال بحرانی‌تر شدن وضعیت آب، در این پژوهش به بررسی آن در شرایط تغییر اقلیم پرداخته می‌شود تا بتوان گامی در جهت مدیریت بهینه خشک‌سالی برداشت. پژوهش حاضر در همین راستا و با هدف بررسی وضعیت خشک‌سالی حوضه ارس تحت شرایط تغییر اقلیم انجام گرفت.

1. Deciles Index
2. Percent Normal
3. China-Z Index
4. Z-Score Index
5. Standardized Precipitation Index
6. Ayugi
7. Su
8. Zice
9. Naskar
10. Yang

محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، حوزه ارس به‌عنوان محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. این حوزه در واقع بخشی از زیر حوزه دریای خزر است که تقریباً نیمه شمالی سه استان شمال غرب را در بر می‌گیرد. رود ارس شریان اصلی این حوزه محسوب می‌شود و به دلیل موقعیت ژئوپلیتیکی و اهمیت اقتصادی حائز اهمیت است. ایستگاه‌های منتخب در این پژوهش که طول دوره آماری طولانی‌تری و داده مفقودی کم‌تری داشتند، شامل اردبیل، اهر، پارس‌آباد، جلفا، خوی و ماکو هستند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش فضایی ایستگاه‌های منتخب

داده‌ها و روش

داده‌ها

در این پژوهش از داده بارش شبیه‌سازی شده و خروجی مدل CNRM از مجموعه مدل‌های گزارش ششم IPCC (CMIP6) استفاده شد که داده بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 برای دوره تاریخی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره آینده ۲۰۲۵-۲۱۰۰ از سایت ESGF^۱ دریافت گردید. ابتدا داده بارش برای ایستگاه‌های منتخب حوزه ارس استخراج شد و از داده بارش مشاهداتی ۶ ایستگاه هواشناسی منتخب حوزه ارس برای اعتبارسنجی داده بارش مدل استفاده گردید. سپس با استفاده از شاخص SPI وضعیت خشک‌سالی حوزه برای دوره گذشته (تاریخی مدل) و دوره آینده ارزیابی شد.

مدل CMIP6: پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP) که در سال ۱۹۹۵ آغاز به کار کرد، هم‌اکنون در مرحله ششم کار خود (CMIP6) قرار دارد (Das و همکاران، ۲۰۲۱). از جمله مزایای آن نسبت به مدل CMIP5 ازدیاد تعداد لایه‌های قائم است که سبب شبیه‌سازی دقیق‌تر در استراتوسفر می‌شود. مدل‌های گردش عمومی (GCM) مبتنی بر گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) شکل بهبودیافته CMIPهای قبلی به طرق مختلف از جمله وضوح جغرافیایی بهتر و مدل‌سازی بهبودیافته فرایندهای میکروفیزیکی ابری هستند؛ بنابراین، گروه GCM گزارش ششم نسبت به مجموعه‌های قبلی CMIP برای پیش‌بینی آب و هوا قابل اعتمادتر هستند (کامروزم^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). CNRM یکی از مدل‌های CMIP6 است. مدل CNRM-CM6-1-HR توسط مرکز تحقیقاتی CNRM فرانسه طراحی شده است که قدرت تفکیک افقی آن ۱۰×۱۰ کیلومتر است.

1. <https://esgf-node.llnl.gov/>

2. Kamruzzaman

3. Centre National de Recherches Meteorologiques Scientifique

سناریوی SSP585: سناریوهای گزارش ششم به‌صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی-اجتماعی (SSP)، توسعه پایدار SSP1، توسعه بر اساس سیاست‌های بینابینی SSP2، رقابت منطقه‌ای SSP3، نابرابری SSP4 و توسعه استفاده از سوخت‌های فسیلی SSP5 و خط سیرهای غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) تولید می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی-اقتصادی از قبیل رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری را فراهم می‌کنند. در واقع SSP585 سناریوی بدبینانه است و حد بالای واداشت‌های تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت‌های فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (انصاری مهابادی و همکاران، ۱۴۰۱).

شاخص SPI: از آنجایی که خشک‌سالی و کمبود بارندگی بر روی منابع آب‌های زیرزمینی و رطوبت خاک و جریان رودخانه‌ها مؤثر است از نمایه شاخص استاندارد بارندگی یا SPI استفاده می‌شود تا بتوان تأثیر کمبود بارش را دوره‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ... ماهه کمی کرد (علیزاده، ۱۳۸۹: ۲۸۳). این شاخص را اولین بار مک‌کی و همکارانش که عضو مرکز اقلیمی کلرادو بودند در سال ۱۹۹۳ به‌منظور بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر روی منابع آب‌های زیرزمینی، ذخایر و مخازن و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان رودخانه‌ها ارائه دادند (رابطه ۱):

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در این رابطه، P_i : میزان بارش در دوره موردنظر، $\bar{P}$: میانگین بلندمدت بارش در دوره موردنظر و SD : انحراف معیار بارش در دوره موردنظر است. مقدار شاخص SPI که بدین نحو از داده‌های بلندمدت بارش برای دوره زمانی موردنظر به دست می‌آید، از توزیع نرمال تبعیت می‌کند که میانگین آن برابر صفر و انحراف معیار آن برابر یک است. این نتیجه عددی سبب می‌شود تا بتوان اقلیم خشک و مرطوب را به یک روش بررسی نمود (حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۸۹: ۲۲۹). به‌عبارتی‌دیگر، مشابه شاخص Z ، بی‌بعد می‌شود. محاسبه این شاخص بر اساس آمار بلندمدت بارش در دوره موردنظر استوار است. به این ترتیب که ابتدا داده‌های بارندگی در آن دوره را بر یک توزیع احتمالی برازش داده و سپس آن را به توزیع نرمال تبدیل می‌کنیم به‌طوری‌که میانگین SPI برای دوره و منطقه موردنظر صفر شود. حال مقادیر مثبت SPI بالاتر از میانه و مقادیر منفی SPI پایین‌تر از میانه داده‌های بارندگی خواهد بود؛ بنابراین چون SPI نرمالیزه شده، طبقه‌بندی خشک‌سالی و ترسالی از نظر بازه تقسیم‌بندی متقارن خواهد بود (علیزاده، ۱۳۸۹: ۲۸۳). در این پژوهش از دسته‌بندی این شاخص با ۹ طبقه استفاده شد که هر کدام معرف وضعیت آب و هوایی بخصوصی است. این ۹ طبقه در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. طبقات نمایه SPI برای ارزیابی وضعیت خشک‌سالی

(McKee et al., 1993; Giddins et al., 2005; Tigkas et al, 2015)

وضعیت آب و هوایی	دامنه نمایه SPI
خشک‌سالی خیلی شدید	> 2
خشک‌سالی شدید	$-1/5$ تا $-1/99$
خشک‌سالی متوسط	-1 تا $-1/49$
خشک‌سالی ملایم	$-0/5$ تا $-0/99$
نرمال	$-0/49$ تا $0/49$
ترسالی ملایم	$0/5$ تا $0/99$
ترسالی متوسط	$1/49$ تا 1
ترسالی شدید	$1/99$ تا $1/5$
ترسالی خیلی شدید	> 2

روش

داده بارش مدل CNRM-CM6 در دوره تاریخی و دوره آینده (تحت سناریوی SSP5-8.5) با استفاده از ابزار ArcToolBox در محیط GIS برای هر یک از ایستگاه‌ها (نزدیک‌ترین نقطه شبکه به مختصات ایستگاه) استخراج گردید. پس از آماده‌سازی اولیه داده‌های بارش و تبدیل واحد آن به میلی‌متر، داده بارش دوره تاریخی مدل با داده مشاهداتی ایستگاه‌ها مقایسه و اعتبار آن ارزیابی شد. در گام بعدی شاخص SPI برای دو مقیاس زمانی ۱ ماهه (SPI_1) و سالانه در دو دوره تاریخی و آینده مدل با استفاده از نرم‌افزار DIP محاسبه گردید. سپس فراوانی طبقات این شاخص شمارش شده و در قالب نقشه‌ها و نمودارهایی نمایش داده شد. لازم به ذکر است که برای ترسیم نقشه‌ها از روش درونیابی IDW استفاده گردید. همچنین برای انجام مقایسه تغییرات شدت‌های مختلف شاخص SPI در دو دوره با توجه به برابر نبودن تعداد سال‌های دوره آینده و تاریخی، فراوانی هر کدام از طبقات در دوره آینده و تاریخی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه به درصد تبدیل شد و اختلاف آن دو به صورت درصد باهم مقایسه شدند. تمام مراحل کار به صورت گرافیکی در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

یافته‌ها

اعتبارسنجی داده بارش مدل

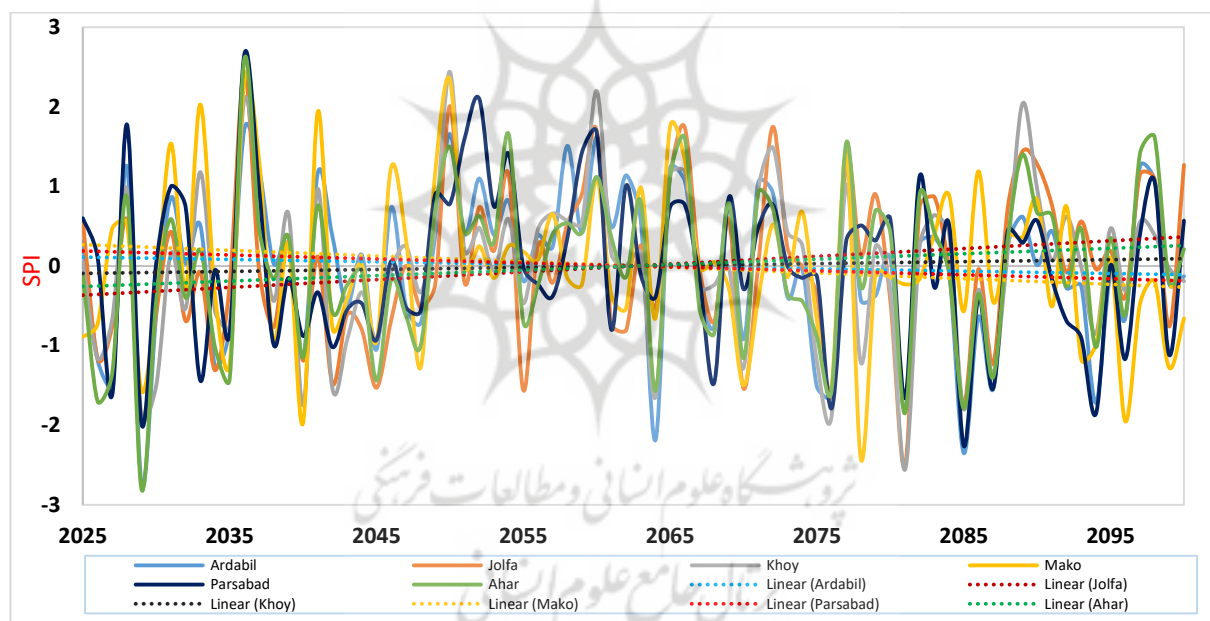
ابتدا اعتبار داده‌های بارش دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 با ضریب NS و R2 و RMSE بررسی گردید. ضریب NS در ایستگاه‌ها بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۳ به دست آمد که نشان‌دهنده قابل قبول بودن دقت مدل است. همچنین R2 بین ۰/۳۴ تا ۰/۶۷ و RMSE بین ۲۹ تا ۴۳ میلی‌متر محاسبه شد. بر اساس مقدار ضریب NS و معیار RMSE دقت مدل در شبیه‌سازی بارش جلفا، بر اساس ضریب همبستگی در شبیه‌سازی بارش ماکو بیش‌تر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد.

سری زمانی و روند خشک‌سالی آینده حوضه ارس

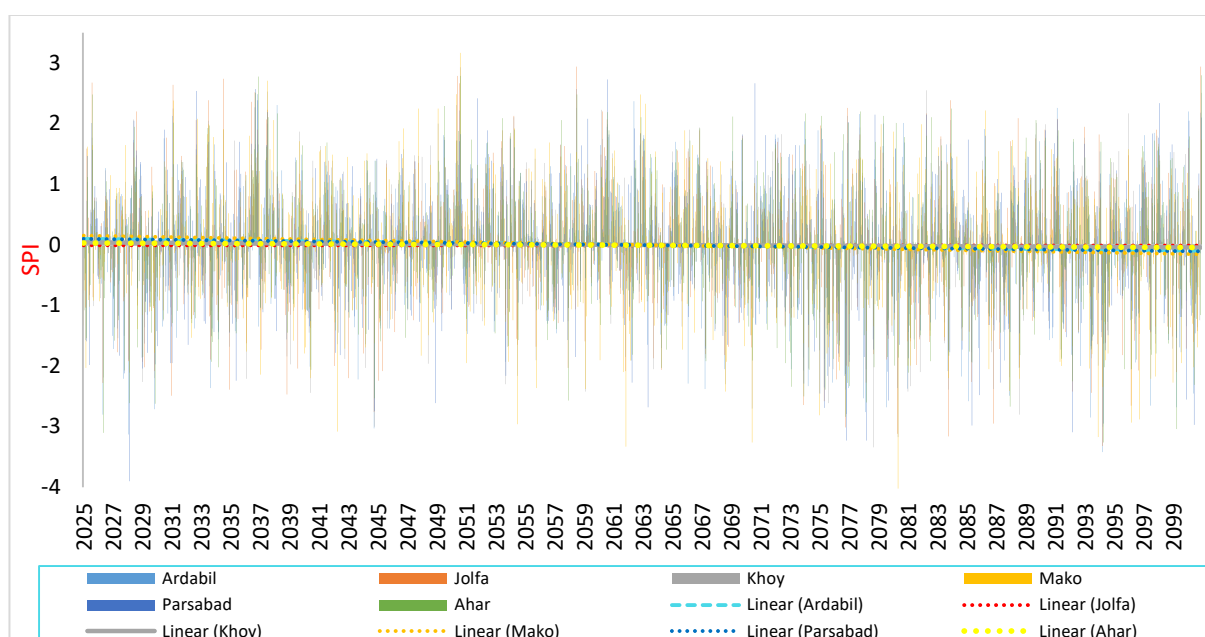
در مقیاس زمانی سالانه: سری زمانی سالانه مقادیر شاخص SPI برای ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس در دوره آینده بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 نشان داد (شکل ۳) روند این شاخص در اهر، جلفا و خوی

صعودی است که در جلفا شیب بیش‌تری نسبت به خوی دارد. تحت سناریوی مورد مطالعه، وقوع شرایط ترسالی و مقادیر بارش بیش‌تر از میانگین در این ایستگاه‌ها در اواخر دوره آینده بیش‌تر محتمل است. در مقابل، در ماکو، پارس‌آباد و اردبیل روند این شاخص نزولی است و احتمال بالا بودن فراوانی رخداد خشک‌سالی در اواخر دوره بیش‌تر است. همچنین تحت این سناریو، احتمال وقوع ترسالی شدیدی در سال ۲۰۳۶ و ۲۰۵۰ و خشک‌سالی فراگیر در سال ۲۰۲۹ و ۲۰۸۱ برای همه ایستگاه‌ها پیش‌بینی شده است.

در مقیاس زمانی ۱ ماهه: سری زمانی ماهانه (از اولین ماه سال ۲۰۲۵ تا آخرین ماه سال ۲۱۰۰) مقادیر شاخص SPI برای ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس در دوره آینده بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 نشان داد (شکل ۴) روند این شاخص در همه ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه جلفا نزولی است. به‌عبارتی هر چه به انتهای دوره نزدیک‌تر می‌شویم فراوانی و شدت وقوع خشک‌سالی افزایش پیدا می‌کند. به‌طوری‌که شدیدترین خشک‌سالی دوره در اردبیل و اهر در آوریل ۲۰۹۴ (به ترتیب ۳/۴۲- و ۳/۲۶-)، در جلفا در آوریل ۲۰۹۴ (۳/۳۲-)، در پارس‌آباد در فوریه ۲۰۲۸ (۳/۹-)، در خوی در سپتامبر ۲۰۷۸ (۳/۳۴-) و در ماکو در می ۲۰۸۰ (۴-) شبیه‌سازی شد. همچنین تحت سناریوی مورد مطالعه، وقوع شدیدترین ترسالی در اردبیل در جولای ۲۰۵۸ (۲/۵۷)، در جلفا در جولای ۲۰۵۸ و دسامبر ۲۱۰۰ (۲/۹۴)، در پارس‌آباد در اوت ۲۰۶۰ (۲/۷۳)، در خوی در اوت ۲۰۵۰ (۲/۹۳) و در ماکو در اوت ۲۰۵۰ (۳/۱۷) پیش‌بینی شده است.



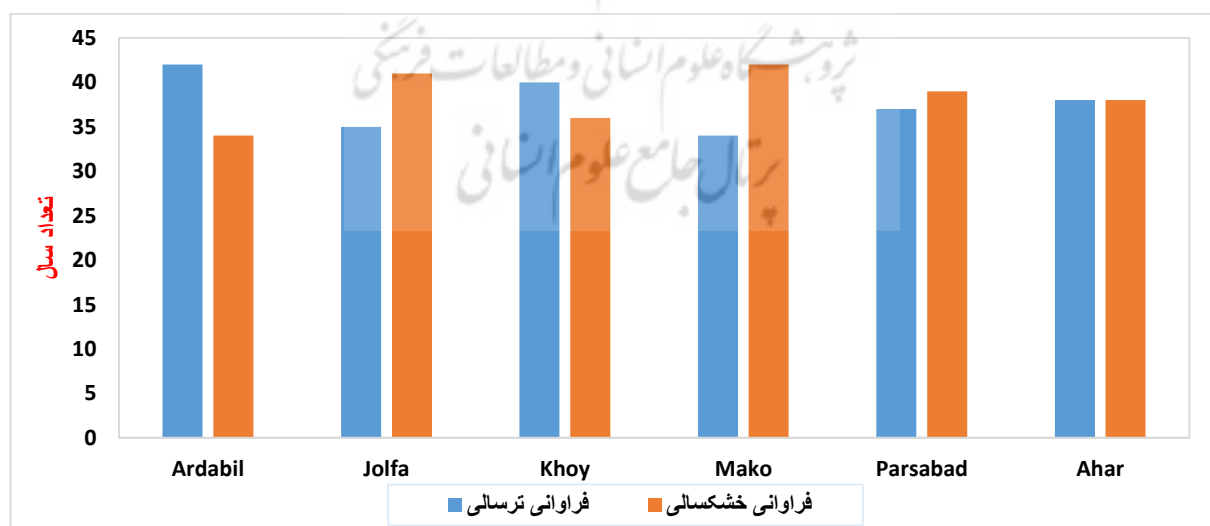
شکل ۳. سری زمانی و روند سالانه وضعیت نرمال/ترسالی/خشک‌سالی در ایستگاه‌های ارس بر اساس خروجی مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره پیش‌بینی



شکل ۴. سری زمانی ماهانه وضعیت نرمال/ترسالی/خشک‌سالی در ایستگاه‌های ارس بر اساس خروجی مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره پیش‌بینی

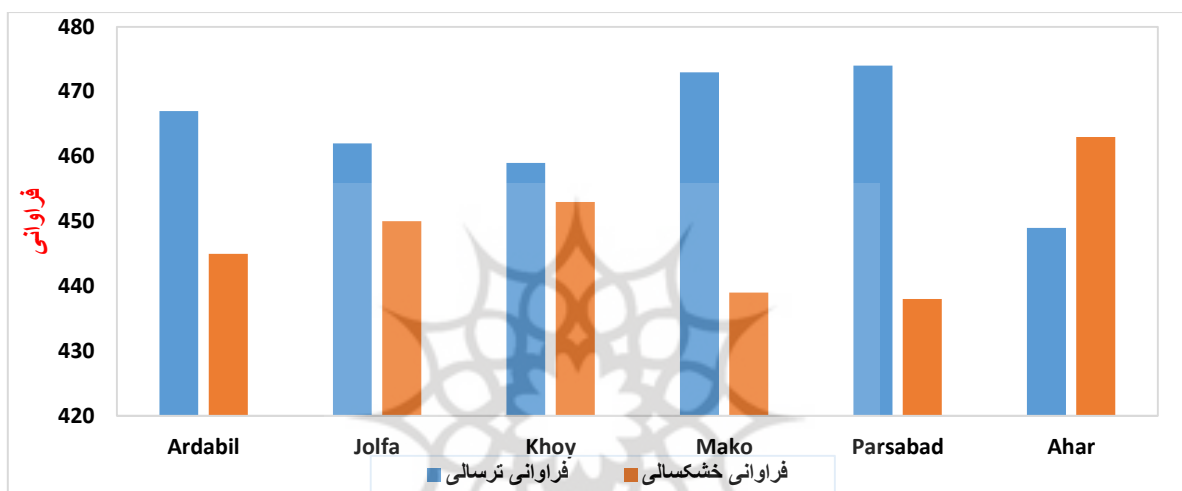
فراوانی ترسالی‌ها و خشک‌سالی‌های حوزه ارس بر اساس شاخص SPI

فراوانی ترسالی و خشک‌سالی سالانه ارس در دوره آینده: نتایج محاسبه فراوانی سالانه ترسالی و خشک‌سالی ایستگاه‌های منتخب حوزه ارس در دوره آینده بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 و با استفاده از شاخص SPI (شکل ۵) نشان می‌دهد در ایستگاه اردبیل و خوی فراوانی سال‌های تر (به ترتیب با ۴۲ و ۴۰ سال مرطوب) بر فراوانی سال‌های خشک (۳۴ و ۳۶ سال) چیره خواهد بود در حالی که در ماکو، جلفا و پارس‌آباد فراوانی سال‌های خشک (۴۱، ۴۲ و ۳۹ سال) بیش‌تر از سال‌های مرطوب (۳۴، ۳۵ و ۳۷ سال) و در اهر برابر پیش‌بینی شده است.

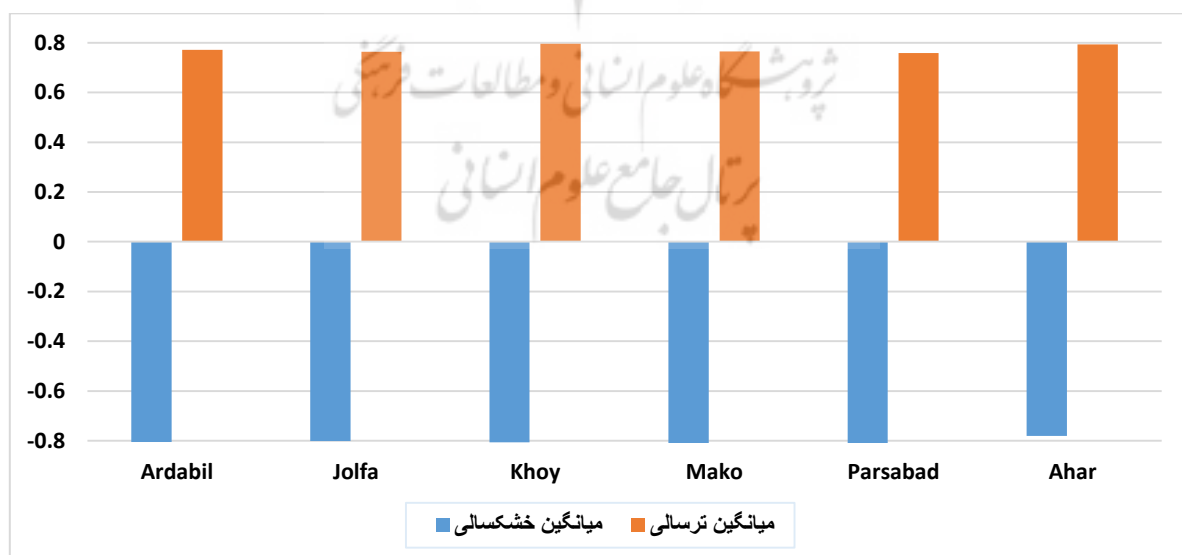


شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای فراوانی ترسالی و خشک‌سالی در سال‌های دوره آینده در ایستگاه‌های حوزه ارس بر اساس شاخص SPI و خروجی مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5

فراوانی ترسالی و خشک‌سالی ارس در ۹۱۲ ماه دوره آینده: نتایج محاسبه فراوانی ترسالی و خشک‌سالی ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس در کل ماه‌های دوره آینده (۹۱۲ ماه از ژانویه ۲۰۲۵ تا دسامبر ۲۱۰۰) بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 و با استفاده از شاخص SPI (شکل ۶) نشان داد در همه ایستگاه‌های منتخب حوضه فراوانی ماه‌های مرطوب بر ماه‌های خشک غلبه دارد. به‌طوری‌که تعداد کل ماه‌های مرطوب در پارس‌آباد ۴۷۴، در ماکو ۴۷۳، در اردبیل ۴۶۷، در جلفا ۴۶۲، در خوی ۴۵۹ و در اهر ۴۴۹ ماه برآورد شد. در مقابل، فراوانی کل ماه‌های خشک در این ایستگاه‌ها ۴۳۸، ۴۳۹، ۴۴۵، ۴۵۰، ۴۵۳ و ۴۶۳ ماه محاسبه گردید. نکته مهم‌تر در خصوص این یافته، توجه به درجه و شدت ترسالی‌ها و خشک‌سالی‌ها و نه صرفاً فراوانی آن‌هاست که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. (شکل ۷). بر این اساس مشاهده می‌شود هر چند فراوانی وقوع ترسالی‌ها بر خشک‌سالی‌ها در ایستگاه‌ها غلبه دارد ولی متوسط ماهانه خشک‌سالی‌های آینده (بزرگ‌تر از ۰/۸-) در مقایسه با ترسالی‌ها (کوچک‌تر از ۰/۸) شدت بیش‌تری دارند.



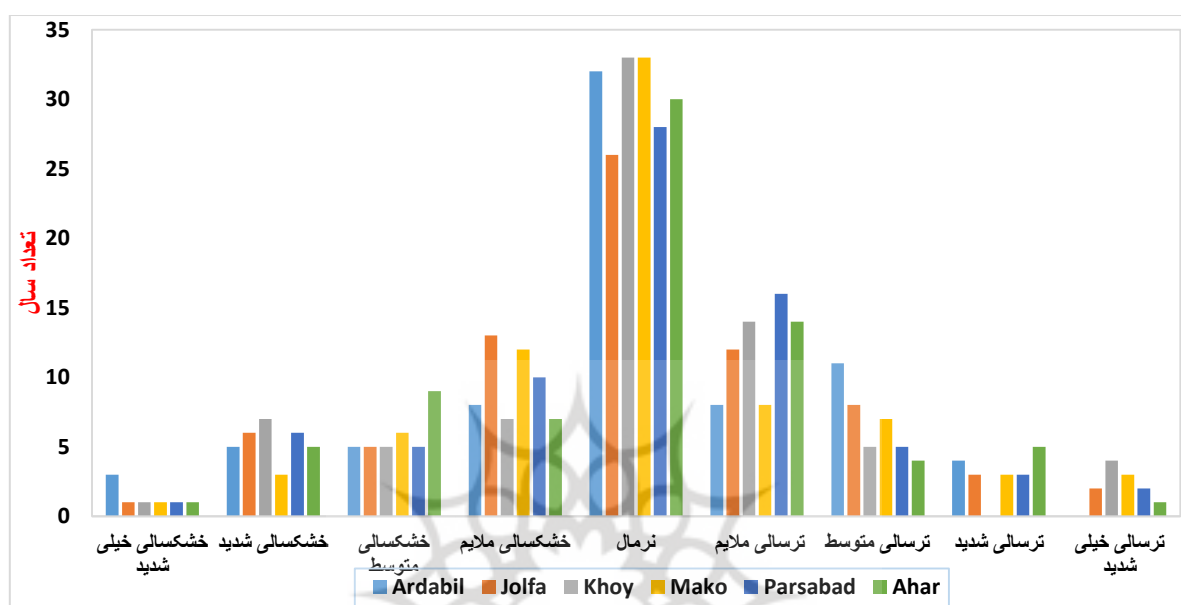
شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای فراوانی ترسالی و خشک‌سالی در کل ماه‌های دوره آینده (۹۱۲ ماه) در ایستگاه‌های حوضه ارس بر اساس شاخص SPI و خروجی مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5



شکل ۷. متوسط ماهانه ترسالی و خشک‌سالی ایستگاه‌ها در دوره آینده

فراوانی شدت‌های مختلف شاخص SPI در دوره آینده

در مقیاس سالانه: نتایج محاسبه فراوانی هر یک از طبقات شاخص SPI سالانه برای ایستگاه‌های منتخب حوزه ارس در سال‌های دوره آینده بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 (شکل ۸) نشان داد در همه ایستگاه‌های منتخب حوزه بیش‌ترین فراوانی مربوط به شرایط نرمال است که مقداری بین ۲۶ تا ۳۳ سال را به خود اختصاص داده است.



شکل ۸. فراوانی کلی شدت‌های مختلف شاخص SPI در سال‌های دوره آینده بر اساس بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5

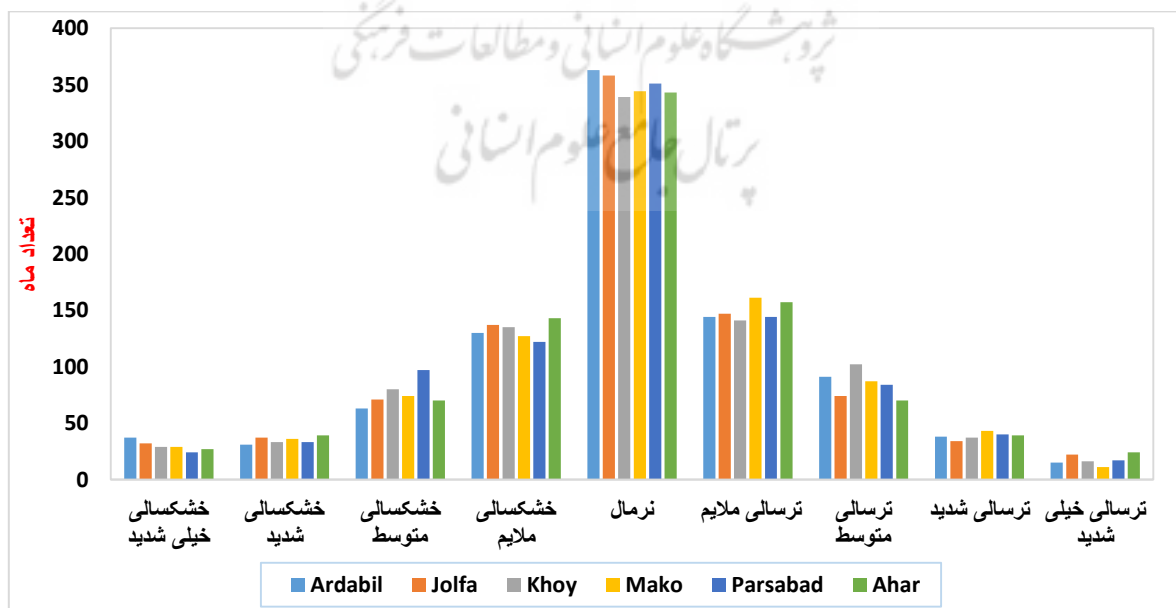
کم‌ترین فراوانی شرایط نرمال مربوط به جلفا و بیش‌ترین آن مربوط به خوی و ماکو است. تحت این سناریو، شرایط نرمال برای اردبیل در ۳۳ سال و اهر در ۳۰ سال از دوره آینده و پارس‌آباد در ۲۸ سال از آن پیش‌بینی شد. بعد از وضعیت نرمال، ترسالی ملایم فراوانی بیش‌تری دارد که بین ۸ تا ۱۶ سال از دوره آینده را شامل می‌شود. کمینه فراوانی ترسالی ملایم به ماکو و اردبیل و بیشینه آن به پارس‌آباد تعلق دارد. خشک‌سالی ملایم از نظر فراوانی در مرتبه سوم قرار گرفته و در ایستگاه‌ها بین ۷ تا ۱۳ سال احتمال رخداد این نوع خشک‌سالی وجود دارد. کم‌ترین فراوانی این نوع خشک‌سالی در خوی و بیش‌ترین آن در جلفا محاسبه گردید. ترسالی متوسط از نظر فراوانی در رتبه چهارم قرار دارد و احتمال وقوع آن در دوره آینده در اردبیل ۱۱ سال، در جلفا ۸ سال، در ماکو ۷ سال، در ماکو و پارس‌آباد ۵ سال و در اهر ۴ سال برآورد شد. همچنین خشک‌سالی متوسط با فراوانی ۵ سال (در اردبیل، پارس‌آباد، جلفا و خوی) و ۶ سال (در ماکو) و ۹ سال در اهر در رتبه پنجم قرار دارد. خشک‌سالی شدید بین ۳ تا ۷ سال از دوره آینده را تحت تأثیر قرار خواهد داد که حداقل فراوانی آن در ماکو و حداکثر آن در خوی پیش‌بینی شده است. ترسالی شدید در خوی پیش‌بینی نشد ولی در اهر در ۵ سال و در سایر ایستگاه‌ها در ۳ یا ۴ سال احتمال رخداد این آنومالی مثبت وجود دارد. ترسالی خیلی شدید نیز با فراوانی ۲ تا ۴ سال در مرتبه هشتم قرار می‌گیرد که کمینه آن در جلفا و پارس‌آباد و بیشینه آن در خوی پیش‌بینی شد ولی در اردبیل احتمال رخداد این فرین صفر است. فراوانی وقوع خشک‌سالی خیلی شدید در اردبیل ۳ سال و در سایر ایستگاه‌ها تنها ۱ سال پیش‌بینی شد.

در مقیاس ۱ ماهه: نتایج محاسبه فراوانی هر یک از طبقات شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱ ماهه برای ایستگاه‌های منتخب حوزه ارس در سری زمانی ۹۱۲ ماه دوره آینده بر اساس ریزگردانی بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 (شکل ۹) نشان داد در همه ایستگاه‌های منتخب حوزه بیش‌ترین فراوانی مربوط به شرایط نرمال است که با داشتن فراوانی کلی

بین ۳۳۹ تا ۳۶۳ ماه، حدود یک‌سوم کل ماه‌های دوره آینده را شامل می‌شود. کم‌ترین فراوانی وضعیت نرمال مربوط به خوی و بیش‌ترین آن مربوط به اردبیل است. تحت این سناریو، تعداد ماه‌های دارای شرایط بارشی نرمال در جلفا، پارس‌آباد، ماکو و اهر به‌ترتیب ۳۵۸، ۳۵۱، ۳۴۴ و ۳۴۳ ماه برآورد شده است. ترتیب طبقات SPI ماهانه از فراوانی بیش‌تر به کم‌تر در چهار مورد اول مشابه سالانه است و عبارت‌اند از نرمال، ترسالی ملایم، خشک‌سالی ملایم، ترسالی متوسط، خشک‌سالی متوسط، ترسالی شدید، خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی خیلی شدید، ترسالی خیلی شدید؛ بنابراین برخلاف ترتیب فراوانی طبقات SPI سالانه، SPI ماهانه نشان می‌دهد ترسالی خیلی شدید با کم‌ترین احتمال در ماه‌های دوره آینده رخ خواهد داد و کمی بیش‌تر از آن خشک‌سالی خیلی شدید احتمال وقوع دارد که در مقایسه با مقیاس سالانه این شاخص، ترتیب فراوانی این دو طبقه باهم جابجا شده است. این ترتیب نشان می‌دهد هرچند فراوانی ماهانه خشک‌سالی خیلی شدید بیش‌تر از ترسالی خیلی شدید بوده ولی قدرمطلق آن بزرگ‌تر از ترسالی خیلی شدید بوده که توانسته در مقیاس سالانه رتبه آن را به خود اختصاص دهد. در ادامه به ارائه توضیحات جزئی‌تر درباره فراوانی وقوع طبقات این شاخص می‌پردازیم.

ترسالی ملایم که در مرتبه دوم فراوانی قرار دارد بین ۱۴۱ تا ۱۶۱ ماه از دوره آینده را شامل می‌شود که کمینه آن به خوی و بیشینه آن به ماکو تعلق دارد. خشک‌سالی ملایم از نظر فراوانی در مرتبه سوم قرار گرفته و در ۱۲۲ تا ۱۴۳ ماه از دوره آینده احتمال وقوع دارد که کم‌ترین آن در پارس‌آباد و بیش‌ترین آن در اهر پیش‌بینی شده است. ترسالی متوسط از نظر فراوانی در رتبه چهارم قرار دارد و احتمال وقوع آن در دوره آینده بین ۷۴ ماه (در جلفا) تا ۱۰۲ ماه (در خوی) متغیر است. همچنین خشک‌سالی متوسط بین ۶۳ تا ۹۷ ماه از دوره آینده را تحت تأثیر قرار خواهد داد که حداقل فراوانی آن در اردبیل و حداکثر آن در پارس‌آباد پیش‌بینی شده است. ترسالی شدید با فراوانی ۳۴ ماه (در جلفا) تا ۴۳ ماه (در ماکو) در رتبه ششم قرار دارد. احتمال رخداد آنومالی خشک‌سالی شدید در ایستگاه‌ها بین ۳۱ تا ۳۹ ماه از دوره آینده وجود دارد. فراوانی وقوع خشک‌سالی خیلی شدید در ایستگاه‌ها بین ۲۴ ماه (در پارس‌آباد) تا ۳۷ ماه از دوره آینده (در اردبیل) پیش‌بینی شد. ترسالی خیلی شدید نیز با فراوانی ۱۱ تا ۲۴ ماه در رتبه آخر قرار می‌گیرد که کمینه آن در ماکو و بیشینه آن در اهر پیش‌بینی شد.

همچنین از مقایسه نمودار فراوانی آنومالی‌های مثبت و منفی SPI (شکل ۶) که مطابق آن در پارس‌آباد، جلفا و ماکو وضعیت خشک‌سالی و فراوانی آن بر ترسالی غلبه دارد، با نمودار فراوانی شدت‌های مختلف این شاخص وضعیت نرمالی که در شکل (۸) آمده است، می‌توان چنین استنباط کرد که بیش‌تر فراوانی شرایط نرمال بارشی نزدیک و متمایل به مقادیر منفی و کران پایین این طبقه بوده است تا مقادیر مثبت (کران بالایی طبقه نرمال).

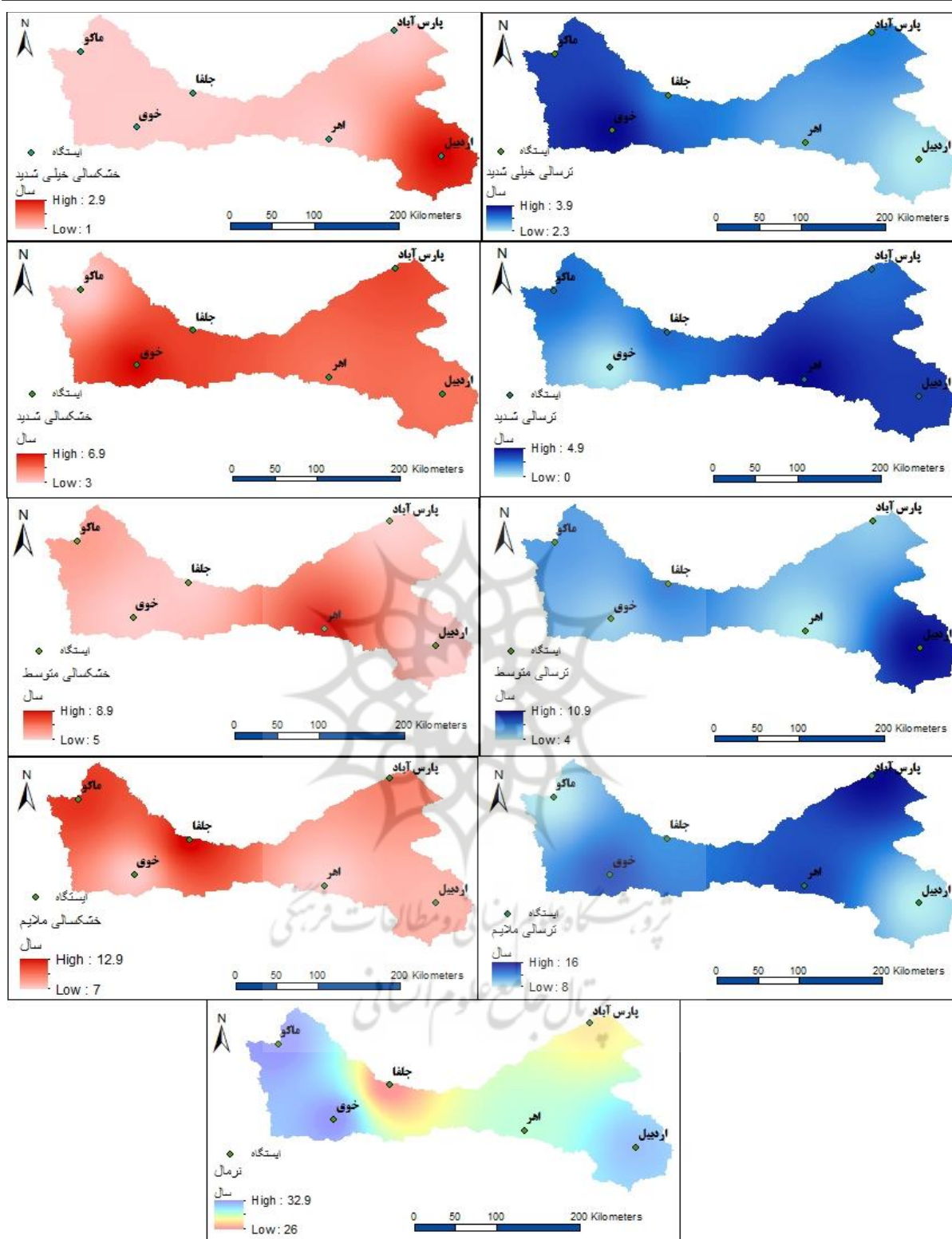


شکل ۹. فراوانی کلی شدت‌های مختلف شاخص SPI در ۹۱۲ ماه دوره آینده بر اساس بارش مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5

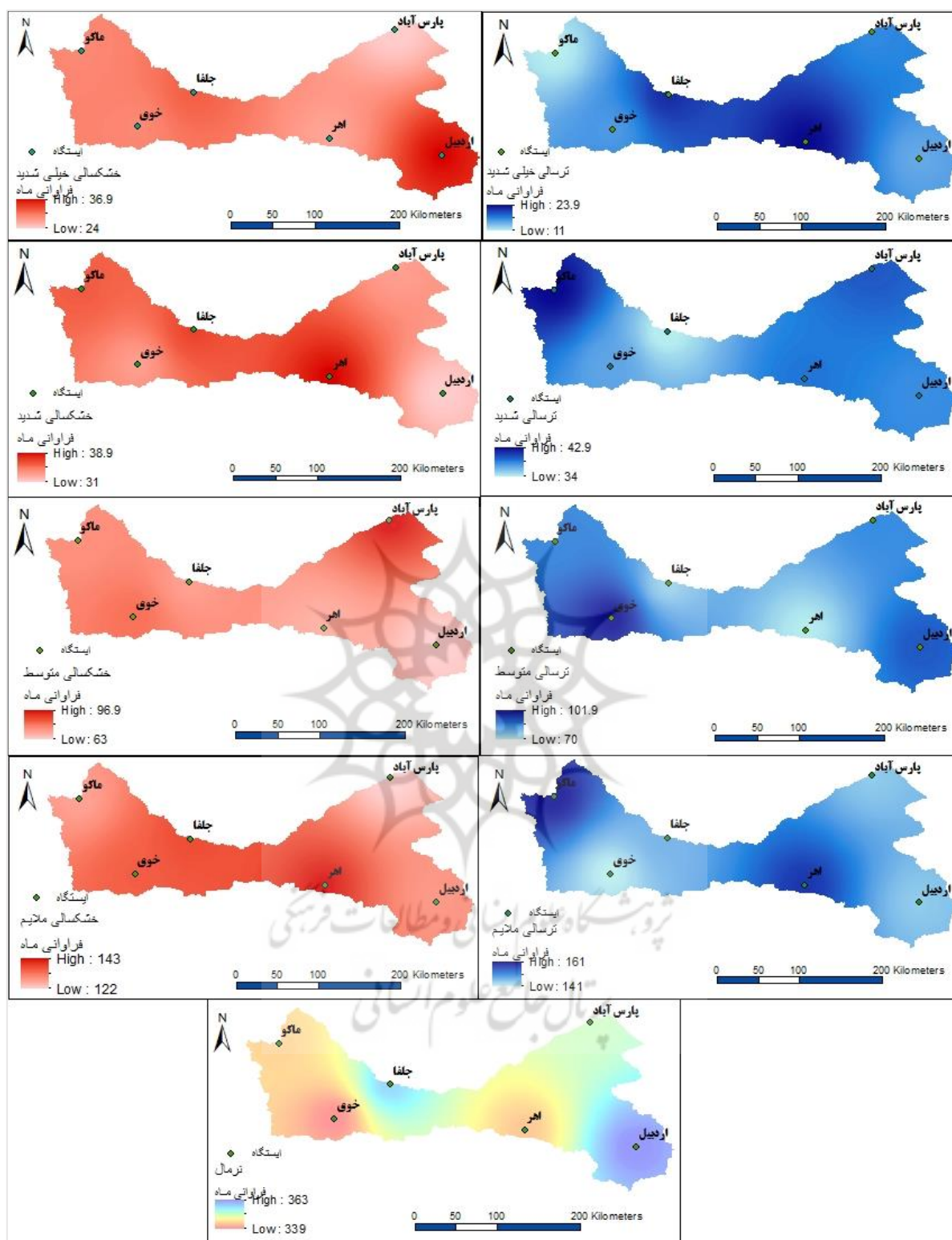
بررسی فضایی خشک‌سالی آینده در حوضه ارس

بررسی آنومالی‌های بارش حوضه ارس در سال‌های دوره آینده: توزیع فضایی آنومالی‌های بارش حوضه ارس در سال‌های دوره آینده (شکل ۱۰) نشان می‌دهد الگوی ترسالی و خشک‌سالی در این حوضه تقریباً قرینه هم بوده و در جایی که بیشینه ترسالی قرار دارد کمینه خشک‌سالی نیز در آنجاست. به بیان جزئی‌تر، بیشینه خشک‌سالی خیلی شدید و کمینه ترسالی خیلی شدید در جنوب شرقی حوضه (ایستگاه اردبیل) قرار گرفته و نیز هسته بیشینه ترسالی خیلی شدید و کمینه خشک‌سالی خیلی شدید در جنوب غربی حوضه مشاهده می‌شود. بیشینه خشک‌سالی شدید و کمینه ترسالی شدید در جنوب غربی حوضه و بیشینه ترسالی شدید در نیمه شرقی حوضه (ایستگاه اهر) قرار دارد. بیشینه ترسالی متوسط در جنوب شرقی حوضه و بیشینه خشک‌سالی متوسط در شرق میانی حوضه (اهر) و کمینه آن‌ها به ترتیب در شرق میانی حوضه و شمال شرق و غرب حوضه متمرکز است. الگوی فضایی آنومالی ملایم کمی متفاوت با بقیه ناهنجاری‌ها است به این صورت که بیشینه ترسالی ملایم در شمال شرقی حوضه و کمینه آن در جنوب شرقی و شمال غربی حوضه و بیشینه و کمینه خشک‌سالی ملایم در دو در نیمه غربی حوضه و به ترتیب در جلفا و خوی مشاهده می‌شود. همچنین شرایط نرمال بارشی در ۳۳ سال آینده در غرب حوضه (ماکو و خوی) و ۳۲ سال در جنوب شرقی حوضه (اردبیل)، ۳۰ سال در اهر و ۲۸ سال در شمال شرقی حوضه (پارس‌آباد) و با کم‌ترین فراوانی به تعداد ۲۶ سال در غرب مرکز حوضه (جلفا) پیش‌بینی شد.

بررسی آنومالی‌های بارش حوضه ارس در ماه‌های دوره آینده: توزیع فضایی آنومالی‌های بارش حوضه ارس در ۹۱۲ ماه دوره آینده (شکل ۱۱) نشان می‌دهد هسته بیشینه و کمینه فراوانی آنومالی‌های مثبت عمدتاً در نیمه غربی حوضه قرار دارند. درحالی‌که هسته بیشینه خشک‌سالی‌ها در نیمه شرقی حوضه متمرکز است. به عبارتی دقیق‌تر، هسته بیشینه خشک‌سالی خیلی شدید مشابه نقشه سالانه در جنوب شرقی حوضه و ایستگاه اردبیل ولی کمینه آن در شمال شرقی حوضه متمرکز است. بیشینه خشک‌سالی شدید و ملایم در شرق میانی حوضه (اهر) و شمال شرقی حوضه (پارس‌آباد) و بیشینه خشک‌سالی متوسط در شمال شرقی حوضه (پارس‌آباد) قرار دارد و نیز هسته کمینه این آنومالی‌های منفی به ترتیب در جنوب شرقی حوضه (اردبیل)، شمال شرقی حوضه (پارس‌آباد) و جنوب شرقی آن متمرکز است. بیشینه ترسالی خیلی شدید در شرق میانی حوضه (اهر)، بیشینه ترسالی شدید و ملایم در شمال غربی حوضه (ماکو) و هسته بیشینه ترسالی متوسط در جنوب غربی حوضه (خوی) قرار دارند. درعین حال هسته کمینه فراوانی ماه‌های دارای ترسالی خیلی شدید در شمال غربی حوضه (ماکو)، ترسالی شدید در غرب مرکز حوضه (جلفا) و ترسالی متوسط در شرق مرکز حوضه (اهر) و هسته کمینه ترسالی ملایم در جنوب غربی حوضه (ایستگاه خوی) قرار گرفتند. همچنین در مورد شرایط نرمال بارشی نیز می‌توان گفت نیمه شرقی حوضه بیش‌تر از غرب حوضه شرایط نرمالی در مقیاس ماهانه تجربه خواهد کرد و بیش‌ترین فراوانی ماه‌های نرمال به تعداد ۳۶۳ ماه در جنوب شرقی حوضه به مرکزیت اردبیل خواهد بود. کم‌ترین فراوانی شرایط نرمال نیز به تعداد ۳۳۹ ماه و برای جنوب غربی حوضه (خوی) پیش‌بینی شد.



شکل ۱۰. توزیع فضایی فراوانی تجمعی طبقات مختلف شاخص SPI سالانه در ۷۶ سال دوره آینده

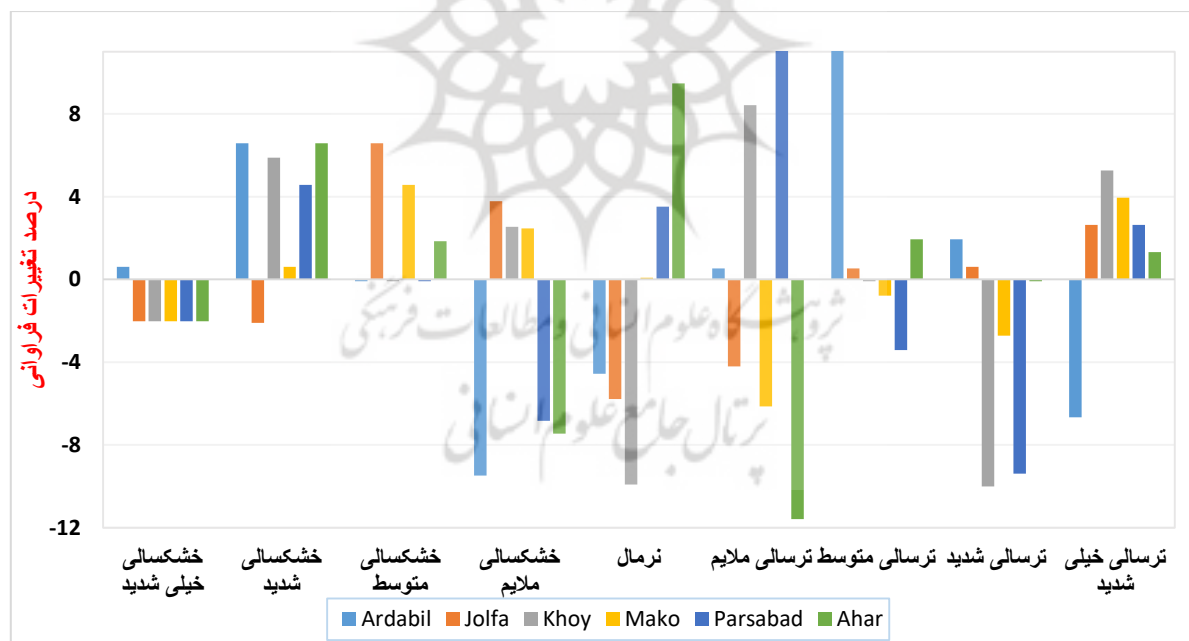


شکل ۱۱. توزیع فضایی مجموع فراوانی طبقات مختلف شاخص SPI ۱ ماهه در ۹۱۲ ماه دوره آینده

درصد تغییرات فراوانی طبقات شاخص SPI دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

در مقیاس سالانه: درصد تغییرات فراوانی سالانه طبقات شاخص SPI ایستگاه‌های حوضه ارس دوره آینده نسبت به دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 (شکل ۱۲) نشان می‌دهد بیش‌ترین درصد تغییرات افزایشی از بین طبقات این شاخص به میزان ۱۱/۱ درصد مربوط به ترسالی متوسط است که به ایستگاه اردبیل تعلق دارد. ترسالی ملایم در مرتبه بعدی قرار دارد که در پارس‌آباد ۱۱ درصد و در خوی ۸/۴ درصد مشاهده می‌شود. بیش‌ترین درصد تغییرات کاهش‌ی از بین طبقات این شاخص نیز ۱۱/۶- درصد برآورد شد که مربوط به ترسالی ملایم در ایستگاه اهر است و در مرتبه دوم ۱۱- درصد که وقوع آن برای ترسالی شدید در پارس‌آباد برآورد شده است. در عین حال ترسالی ملایم در ماکو و جلفا (به ترتیب ۶- و ۴- درصد) و ترسالی متوسط در پارس‌آباد و ماکو (به ترتیب ۳/۴- و ۰/۸- درصد) کاهش‌ی و در اهر ۱/۹ درصد افزایشی پیش‌بینی شد. در صورت وقوع سناریوی مورد مطالعه، ترسالی شدید در جلفا ۱۰ درصد، در پارس‌آباد ۹/۴ درصد و در ماکو ۲/۷ درصد نسبت به دوره تاریخی کاهش پیدا خواهد کرد.

خشک‌سالی شدید و متوسط در همه ایستگاه‌ها (به جز خشک‌سالی شدید در جلفا) تغییر افزایشی بین ۰/۶ تا ۶/۶ درصد خواهند داشت که بیش‌ترین درصد افزایش خشک‌سالی شدید در اردبیل و اهر و بیش‌ترین درصد افزایش خشک‌سالی متوسط در جلفا پیش‌بینی شده است. خشک‌سالی ملایم در اردبیل (۹/۵- درصد)، اهر (۷/۴- درصد) و پارس‌آباد (۶/۸- درصد) نسبت به دوره تاریخی کاهش‌ی ولی در سه ایستگاه دیگر بین ۲/۵ تا ۳/۷ درصد افزایش خواهد یافت. از طرفی خشک‌سالی خیلی شدید به جز در اردبیل - که ۰/۶ افزایش خواهد یافت- در بقیه ایستگاه‌ها ۲ درصد کمتر از دوره تاریخی پیش‌بینی شده است. همچنین شرایط نرمال در خوی ۹/۹- درصد، در جلفا ۵/۸- درصد و در اردبیل ۴/۵- درصد کاهش ولی در اهر ۹/۴ درصد، پارس‌آباد ۳/۵ درصد و ماکو ۰/۱ درصد افزایش خواهد یافت.

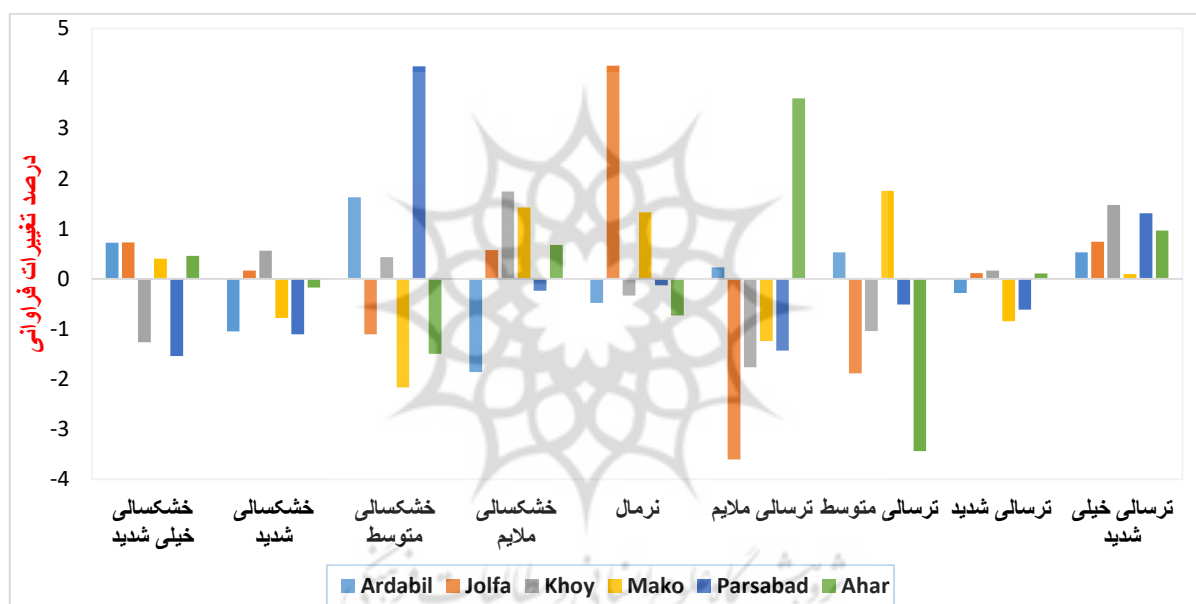


شکل ۱۲. درصد تغییرات فراوانی سالانه طبقات شاخص SPI دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

در مقیاس ۱ ماهه: درصد تغییرات فراوانی ماهانه طبقات شاخص SPI ایستگاه‌های حوضه ارس دوره آینده نسبت به دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 (شکل ۱۳) نشان می‌دهد دامنه این تغییرات نسبت به مقیاس سالانه کم‌تر بوده و تقریباً نصف مقادیر نوسانی سالانه است و بین ۳/۶- تا ۴/۲+ درصد قرار دارد. بیش‌ترین میزان کاهش آنومالی منفی مربوط به پارس‌آباد و بیش‌ترین درصد افزایش آنومالی مثبت مربوط به جلفا است. به بیان جزئی‌تر، بیش‌ترین درصد تغییرات افزایشی از بین طبقات این شاخص به میزان ۴/۲ درصد مربوط به خشک‌سالی متوسط است که به ایستگاه پارس‌آباد تعلق دارد و حداکثر درصد تغییرات

کاهش نیز مربوط به ترسالی ملایم و ایستگاه جلفا است. ترسالی ملایم دوره آینده در همه ایستگاه‌ها به‌استثنای اردبیل و اهر بین ۱/۲- تا ۳/۶- درصد کاهش نشان داد. همچنین تحت این سناریو ترسالی متوسط در اهر (۳/۴- درصد)، جلفا (۱/۹- درصد)، خوی (۱- درصد) و پارس‌آباد (۰/۵- درصد) کاهش و در ماکو و اردبیل (به‌ترتیب ۱/۷ و ۰/۵ درصد) افزایش خواهد داشت. تحت سناریوی مورد مطالعه، ترسالی شدید در اهر، جلفا و خوی افزایش ناچیز و در سه ایستگاه دیگر بین ۰/۳- تا ۰/۸- درصد کاهش خواهد یافت. در عین حال احتمال وقوع ترسالی خیلی شدید در همه ایستگاه‌ها بین ۰/۱ (ماکو) تا ۱/۵ درصد (خوی) افزایشی پیش‌بینی شده است.

خشک‌سالی شدید به‌جز جلفا و خوی در سایر ایستگاه‌ها تغییر کاهشی بین ۰/۱- تا ۱/۱- درصد خواهد داشت. خشک‌سالی متوسط در پارس‌آباد (۴/۲ درصد)، اردبیل (۱/۶ درصد) و خوی (۰/۴ درصد) افزایش خواهد یافت. تغییر خشک‌سالی خیلی شدید در خوی و پارس‌آباد کاهشی و در سایر ایستگاه‌ها افزایشی برآورد شده است. همچنین شرایط نرمال ماهانه بر خلاف سالانه، در جلفا ۴/۲ درصد و در ماکو ۱/۳ درصد افزایشی پیش‌بینی شده است. احتمال رخداد شرایط نرمال در سایر ایستگاه‌ها کمتر از ۱ درصد کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۳. درصد تغییرات فراوانی ماهانه طبقات شاخص SPI دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

بنا بر آنچه در بالا ذکر شد، هر چند درصد آنومالی منفی و مثبت بارش دوره آینده نسبت به دوره تاریخی به‌طور میانگین در سطح ایستگاه‌های حوضه، کاهش خواهد یافت ولی میزان و شدت این کاهش در خصوص آنومالی‌های مثبت بیش‌تر است و لذا ریسک کاهش ترسالی به‌مراتب بیش‌تر از کاهش خشک‌سالی خواهد بود. به‌گونه‌ای که ترسالی ملایم به‌طور متوسط ۱/۵- درصد، ترسالی خیلی شدید ۰/۳- درصد، ترسالی متوسط ۰/۲- درصد کاهش خواهد یافت. در حالی که خشک‌سالی شدید ۰/۴- درصد و خشک‌سالی خیلی شدید ۰/۲- کاهش خواهد یافت و خشک‌سالی ملایم (۰/۳ درصد) و خشک‌سالی متوسط (۰/۶ درصد) افزایش جزئی را نشان می‌دهند. لذا از جمع‌بندی یافته‌های پژوهش می‌توان نتیجه گرفت الگوهای مولد بارش در منطقه در دوره آینده تحت سناریوی بدبینانه تغییر معنی‌داری خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

بررسی سری زمانی شاخص SPI بر اساس خروجی مدل CNRM-CM6-1-HR تحت سناریوی SSP585 طی دوره ۷۶ سال آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰)، نشان داد که روند سالانه SPI دوره آینده در جلفا و خوی صعودی و در ماکو، پارس‌آباد و اردبیل نزولی

است و روند ماهانه آن در همه ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه جلفا نزولی است و هر چه به انتهای دوره نزدیک‌تر می‌شویم فراوانی و شدت وقوع خشک‌سالی بیش‌تر می‌شود. شدیدترین خشک‌سالی دوره در همه ایستگاه‌ها به‌جز پارس‌آباد در یک‌سوم انتهای دوره پیش‌بینی شد که با نتایج پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. همچنین فراوانی خشک‌سالی در مقیاس سالانه در ماکو، جلفا، پارس‌آباد، خوی و اردبیل به‌ترتیب ۴۲، ۴۱، ۳۹، ۳۶ و ۳۴ سال محاسبه شد و فراوانی ماهانه شرایط ترسالی و خشک‌سالی نیز حاکی از غلبه وضعیت ترسالی بر خشک‌سالی است. مهم‌تر از فراوانی این پدیده، شدت آن است. ترتیب فراوانی دامنه‌های این شاخص در مقیاس سالانه از بیش‌تر به کم‌تر عبارت است از نرمال، ترسالی ملایم، خشک‌سالی ملایم، ترسالی متوسط، خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی متوسط، ترسالی شدید، ترسالی خیلی شدید و خشک‌سالی خیلی شدید. در مقیاس ماهانه هم به‌ترتیب عبارت است از نرمال، ترسالی ملایم، خشک‌سالی ملایم، ترسالی متوسط، خشک‌سالی متوسط، ترسالی شدید، خشک‌سالی شدید، خشک‌سالی خیلی شدید و ترسالی خیلی شدید. بیش‌ترین فراوانی خشک‌سالی شدید و خیلی شدید به ترتیب در جلفا و اردبیل پیش‌بینی شد که در ارتفاع بالاتری نسبت به بقیه ایستگاه‌ها واقع هستند.

توزیع فضایی آنومالی‌های بارش سالانه حوضه ارس نشان‌دهنده این است الگوی ترسالی و خشک‌سالی در این حوضه تقریباً قرینه هم بوده و در جایی که بیشینه ترسالی قرار دارد کمینه خشک‌سالی نیز در آنجاست. بیشینه خشک‌سالی خیلی شدید و کمینه ترسالی خیلی شدید در جنوب شرقی حوضه (ایستگاه اردبیل) قرار گرفته درحالی‌که هسته بیشینه ترسالی خیلی شدید و هسته کمینه خشک‌سالی خیلی شدید در جنوب غربی حوضه متمرکز است. توزیع فضایی آنومالی‌های ماهانه بارش حوضه ارس طی ۹۱۲ ماه دوره آینده نیز نشان داد هسته بیشینه و کمینه فراوانی آنومالی‌های مثبت عمده‌تاً در نیمه غربی حوضه قرار دارند. همچنین هسته بیشینه خشک‌سالی‌ها در مرکز یا شرق حوضه تمرکز دارد. لذا شرق حوضه که اقلیم نیمه‌خشک (ایستگاه اردبیل) تا خشک (ایستگاه پارس‌آباد) دارد، بیش‌تر در معرض شدت‌های مختلف خشک‌سالی‌ها قرار دارد. این یافته نتایج پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۱ا) را تأیید می‌کند که نشان دادند تحت سناریوهای SSP مناطق دارای اقلیم خشک از خشک‌سالی‌های شدیدتر، بیش‌تر رنج خواهد برد و وقتی انتشار تحت سناریوهای SSP افزایش می‌یابد اقلیم جهانی خشک‌تر و خشک‌سالی شدیدتر و طولانی‌تر می‌شود. در مورد شرایط نرمال بارشی نیز می‌توان گفت نیمه شرقی حوضه بیش‌تر از غرب حوضه شرایط نرمالی در مقیاس ماهانه تجربه خواهد کرد و بیش‌ترین فراوانی ماه‌های نرمال در جنوب شرقی حوضه به مرکزیت اردبیل خواهد بود و کم‌ترین فراوانی شرایط نرمال برای جنوب غربی حوضه (خوی) پیش‌بینی شد. یافته‌ها همچنین نشان داد تحت سناریوی SSP585 درصد تغییرات فراوانی سالانه طبقات SPI در دوره آینده در برای ایستگاه‌های منتخب حوضه ارس بین -۱۰ و +۱۰ و تغییرات ماهانه این شاخص بین -۳/۶ تا +۴/۲ درصد برآورد شد. در مقیاس سالانه حداکثر درصد افزایش آنومالی‌های بارشی مثبت برآورد شده مربوط به اردبیل، پارس‌آباد و اهر و حداکثر کاهش آنومالی‌های منفی مربوط به اهر، خوی و اردبیل و در مقیاس ماهانه بیش‌ترین میزان کاهش آنومالی منفی مربوط به پارس‌آباد و بیش‌ترین درصد افزایش آنومالی مثبت مربوط به جلفا است. در مجموع از جمع‌بندی یافته‌ها و نقشه‌ها می‌توان نتیجه گرفت الگوهای مولد بارش در منطقه طی دوره آینده تحت سناریوی بدبینانه تغییر معنی‌داری خواهد داشت به‌ویژه اینکه اثرات متفاوتی بر بارش ایستگاه‌های نیمه غربی و شرقی حوضه بر جای خواهد گذاشت به‌طوری‌که الگو(های) مولد بارش در نیمه غربی حوضه توان پوشش‌دهی ایستگاه‌های شرقی را نخواهد داشت که یا به جهت کاهش رطوبت بسته هوا و یا به دلیل موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها یا سایر عوامل محلی و فرامنطقه‌ای و قادر نبودن ایستگاه‌ها به بهره‌مندی از الگوی بارشی اتفاق خواهد افتاد. بدیهی است هر مدلی با عدم قطعیت همراه است و پیش‌بینی‌های به‌دست آمده در این پژوهش در صورتی که سناریوی مورد مطالعه تا سال ۲۱۰۰ اتفاق بیفتد، احتمال وقوع دارند. نتایج پژوهش می‌تواند در تصمیم‌سازی برای کنترل خشک‌سالی آینده سودمند واقع شود.

منابع

- انصاری، مریم؛ نوری، غلامرضا و فتوحی، صمد (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما، بارش و دبی با استفاده از آزمون ناپارامتری من کندال (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه کاجو استان سیستان و بلوچستان)، *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۷ (۱۴)، ۱۵۸-۱۵۲.
- حجازی‌زاده، زهرا و جوی‌زاده، سعید (۱۳۸۹). *مقدمه‌ای بر خشک‌سالی و شاخص‌های آن*، تهران: سمت
- صابر، مهناز؛ صلاحی، برومند و ملکی مرشت، رقیه (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۹ (۹۲)، ۱۷۲-۱۹۳. Doi: 10.22034/gp.2024.61336.3253
- علیزاده، امین (۱۳۸۹). *اصول هیدرولوژی کاربردی*، چاپ ۲۸، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا علیه‌السلام.
- مهدویان، شیرین؛ زینالی، بتول و صلاحی، برومند (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی حوضه کیوی‌چای و تحلیل روند تغییرات بارش و دمای آن در دوره‌های آتی با مدل‌های CMIP5. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۷ (۸۵)، ۱۴۳-۱۳۳. Doi: 10.22034/gp.2022.50623.2977
- Ayugi, B., Shilenje, Z. W., Lim Kam Sian, K. T. C., Mumo, R., Nnamdi Dike, V., Iyakaremye, V., Chehbouni, A., Ongoma, V. (2021). *Projected Changes in Meteorological Drought Over East Africa Inferred from Bias-Adjusted CMIP6 Models*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-983012/v1>
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat Clim Chang*, 3, 52–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- Das, S., Das, J., Umamahesh, N. V. (2021). Identification of future meteorological drought hotspots over Indian region: a study based on NEX-GDDP data. *International Journal of Climatology*. 41(12), 5644-62.
- Giddins, L., Soto, M., Rutherford, B. M., et al. (2005). Standardized precipitation index zones for Mexico. *Atmósfera*, 18(1): 33–56.
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nat Clim Change*, 6, 166–171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
- IPCC (2014). *Summary for policymakers, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field C. B, Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., White, L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1–32.
- Kamruzzaman, M., Wahid, S., Shahid, S., Alam, E., Mainuddin, M., Islam, H. T., Cho, J., Rahman, M. M., Biswas, J. C., Thorp, K. R. (2023). Predicted changes in future precipitation and air temperature across Bangladesh using CMIP6 GCMs. *Heliyon*. 1, 9(5).
- Li, H., Li, Z., Chen, Y., Xiang, Y., Liu, Hu, Y., Sun, F. (2021a). Projected Meteorological Drought over Asian Drylands under Different CMIP6 Scenarios. *Remote Sens*. 13, 4409. <https://doi.org/10.3390/rs13214409>
- Li, H., Li, Z., Chen, Y., Xiang, Y., Liu, Y., Kayumba, P. M., Li, X. (2021b). Drylands face potential threat of robust drought in the CMIP6 SSPs scenarios. *Environmental Research Letters*. 16, 114004.
- Li, S. Y., Miao, L. J., Jiang, Z. H., Wang, G. J., Gnyawali, K. R. et al. (2020). *Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099*. ScienceDirect, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Liu, Y., Geng, X., Hao, Z., Zheng, J. (2020). Changes in Climate Extremes in Central Asia under 1.5 and 2°C Global Warming and their Impacts on Agricultural Productions. *Atmosphere*. 11, 1076. doi:10.3390/atmos11101076
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California: American Mete-

- orological Society, 179–184.
- Miao, L., Li, S., Zhang, F., Chen, T., Shan, Y., & Zhang, Y. (2020). *Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0 °C warming scenarios*. *Earth's Future*, 8, e2019EF001337. <https://doi.org/10.1029/2019EF001337>
- Naskar, P. R. Singh, G. P., Pattenai, D. R., Katyar, S. (2023). CMIP6 projections of spatiotemporal changes in rainfall and droughts over India. *J. Earth Syst. Sci.* 132:123. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02143-9>
- Prabhan, S., Sahoo, B. B. (2023). *Implementation of Rainfall-Based Drought Indices for Regional Drought Assessment*. *Hydrology and Hydrologic Modelling, Lecture Notes in Civil Engineering*, 312, https://doi.org/10.1007/978-981-19-9147-9_30
- Sheffield, J., Wood, E. F. (2008). *Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations*. *Clim Dyn*, 31, 79–105. <http://link.springer.com/10.1007/s00382-007-0340-z>.
- Sridhara, S., Chaithra, G. M., Gopakkali, P. (2021). Assessment and monitoring of drought in Chitradurga district of Karnataka using different drought indices. *Journal of Agrometeorology*, 23 (2), 221–227.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., Schellnhuber, H. J. (2018). *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 8252–8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, A., et al. (2021). *Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China*. *Atmospheric Research*. 250.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8(3):697–709. doi: 10.1007/s12145-014-0178-y
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nat Clim Chang*, 4, 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate20167>
- Yang, S., Zhao, B., Yang, D., Wang, T., Yang Y., Ma, T and Santisirisomboon, J. (2023). Future changes in water resources, floods and droughts under the joint impact of climate and land-use changes in the Chao Phraya basin. Thailand. *Journal of Hydrology*. 620, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129454>
- Zarei, A., Asadi, E., Ebrahimi, A., Jafary, M., Malekian, A., Tahmoures, M., Alizadeh, E. (2017). Comparison of meteorological indices for spatio-temporal analysis of drought in chahrmahal-bakhtiyari province in Iran. *Croatian Meteorological Journal*, 52, 13–26.
- Zice, M.; Peng, S.; Qiang, Z.; Yifan, Z.; Yinfeng, L.; Hu, L.; Donghua, C. (2022). Characterization and Evaluation of Future Droughts across China through the CMIP6 Multi- Model Ensemble. *Remote Sens.* 14, 1097. <https://doi.org/10.3390/rs14051097>