



## Investigation of the Intensity and Duration of Meteorological Drought in South Khorasan Province in the Mid-Term Future Horizon

Amir Khayat<sup>1</sup>, Mahdi Amirabadizadeh<sup>2\*</sup>, Zahra Akhondi<sup>3</sup>

1- PhD Student in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, University of Birjand, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering and Member of the Drought and Climate Change Research Group, Faculty of Birjand, University of Birjand, Birjand, Iran.

3- South Khorasan Jihad-e-Agriculture Organization, Birjand, Iran.

\*Corresponding Author: [mamirabadizadeh@birjand.ac.ir](mailto:mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

### Keywords:

Drought index, South Khorasan, CMIP6, Climate change, Downscaling

### Extended Abstract

#### Introduction

Climate change is one of the most significant environmental challenges of the 21st century, profoundly affecting the global hydrological cycle and increasing the frequency and intensity of extreme weather events. Among these, drought represents one of the most persistent and destructive climatic hazards, particularly in arid and semi-arid regions such as eastern Iran. South Khorasan Province, characterized by limited precipitation and high evapotranspiration, has experienced recurrent droughts in recent decades, resulting in severe impacts on water resources, agriculture, and livelihoods. The objective of this study was to evaluate the impact of climate change on the intensity and duration of meteorological droughts in South Khorasan Province. The analysis focused on two representative synoptic stations—Ferdows and Tabas—under the SSP2-4.5 scenario for the mid-future period (2030–2059), using outputs from advanced CMIP6 climate models.

#### Materials and Methods

Observed monthly precipitation and temperature data for the 1990–2014 baseline period were obtained from the Iranian Meteorological Organization. Future climate projections were derived from two CMIP6 General Circulation Models (GCMs): IPSL-CM6A-LR

### Received:

09 Sep 2025

### Revised:

11 Oct 2025

### Accepted:

25 Oct 2025

### How to cite this article:

Khayat, A; Amirabadizadeh, M; & Akhondi, Z. (2025). Investigation of the Intensity and Duration of Meteorological Drought in South Khorasan Province in the Mid-Term Future Horizon. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 181-202. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.10060.1169>



and MPI-ESM1-2-HR. To enhance spatial and statistical accuracy, the Bias Correction and Spatial Disaggregation (BCSD) method was applied for downscaling and bias adjustment.

Drought characteristics were assessed using two key indices: the Standardized Precipitation Index (SPI), representing precipitation anomalies, and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), which accounts for both precipitation and temperature-induced evapotranspiration. In addition, Run Theory (RunDS) was employed to quantify drought duration and severity by identifying continuous periods of precipitation deficit. Model performance was validated using the Kling–Gupta Efficiency (KGE), Mean Error (ME), and Percent Bias (PBIAS) criteria. All computations and statistical analyses were conducted in RStudio.

### Results and Discussion

Model evaluation indicated satisfactory performance for both climate models. The IPSL-CM6A-LR model yielded higher accuracy for precipitation in Ferdows (KGE = 0.33) compared with MPI-ESM1-2-HR (KGE = 0.31), while the MPI model performed better in Tabas (KGE = 0.28). Temperature simulations from both models showed high correlation (KGE > 0.9) and minimal bias (<1%).

Future projections revealed significant intensification of drought severity and persistence. In Ferdows, the mean SPI declined from -0.4 in the baseline period to -0.9 in the future, while the SPEI decreased from -0.7 to -1.3, reflecting a 0.5–0.6 unit increase in drought intensity. In Tabas, the SPI decreased from -0.6 to -1.2 and the SPEI from -1.0 to -1.8, indicating an intensification of 0.7–0.8 units.

Run Theory analysis demonstrated that mean drought intensity increased from 2.54 to 3.28 in Ferdows and from 3.01 to 4.23 in Tabas, while total drought duration rose from 40 to 51 months and from 48 to 60 months, respectively—equivalent to a 25–30% increase in drought persistence. These results clearly indicate more frequent, intense, and prolonged drought episodes in the coming decades, particularly in Tabas.

The results are consistent with global studies indicating that warming trends intensify drought conditions through enhanced evapotranspiration and reduced soil moisture. The combined decline in SPI and SPEI suggests that future droughts will not only result from rainfall deficits but will also be exacerbated by rising air temperatures. The higher sensitivity of the SPEI index underscores the role of thermal stress in aggravating drought conditions across the study area.

Compared with other regions of Iran, the observed 25–40% increase in drought intensity is particularly alarming for eastern provinces with already fragile water systems. These findings emphasize the necessity of integrating climate projections into regional water resources management and agricultural planning.

**Conclusion**

Under the SSP2-4.5 scenario for the mid-future period (2030–2059), South Khorasan Province is projected to experience a substantial increase in both drought intensity and duration. The results highlight the vulnerability of arid environments to climate change, with potential adverse effects on water security, agricultural productivity, and ecosystem stability.

Effective adaptation strategies should include:

1. Establishing drought early warning systems based on multi-index monitoring.
2. Optimizing cropping patterns through the use of drought-resistant cultivars.
3. Promoting efficient irrigation technologies, such as drip and pressurized systems.
4. Implementing integrated water–climate management at the watershed scale.
5. Enhancing community awareness and policy-driven adaptation frameworks.

This study contributes valuable insights into regional drought dynamics under climate change and provides a scientific basis for sustainable management and climate resilience in eastern Iran.



## بررسی شدت و مدت خشکسالی هواشناسی استان خراسان جنوبی در افق آینده میانی

امیر خیاط<sup>۱</sup>، مهدی امیرآبادی زاده<sup>۲\*</sup>، زهرا آخوندی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۳- سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان جنوبی، بیرجند، ایران.

\*نویسنده مسئول: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

### چکیده

### واژه‌های کلیدی:

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شدت و تداوم خشکسالی‌های هواشناسی در استان خراسان جنوبی، با تمرکز بر دو شهرستان فردوس در شمال غرب و طبس در غرب استان خراسان جنوبی، انجام شد. برای این منظور، داده‌های بارش و دما در دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه مورد استفاده قرار گرفت و از خروجی دو مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR تحت سناریوی SSP2-4.5 برای پیش‌بینی شرایط دوره آتئی (۲۰۳۰-۲۰۵۹) بهره‌گیری شد. داده‌های مدل‌ها با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری BCSD تصحیح و اصلاح شدند و شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI به‌منظور کمی‌سازی تغییرات شدت و مدت خشکسالی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مقدار میانگین شاخص SPI در شهرستان فردوس از ۰/۴- در دوره پایه به ۰/۹- و شاخص SPEI از ۰/۷- به ۱/۳- در دوره آتئی کاهش یافته است. در شهرستان طبس نیز مقدار SPI از ۰/۶- به ۱/۲- و شاخص SPEI از ۱- به ۱/۸- کاهش یافته است. این تغییرات بیانگر افزایش ۰/۵ تا ۰/۸ واحدی در شدت خشکسالی در هر دو شهرستان می‌باشد. تحلیل تئوری ران نیز نشان داد که میانگین شدت خشکسالی در فردوس از ۲/۵۴ به ۳/۲۸ و در طبس از ۳/۰۱ به ۴/۲۳ افزایش یافته و مدت کل خشکسالی‌ها به ترتیب از ۴۰ به ۵۱ ماه و از ۴۸ به ۶۰ ماه رسیده است؛ که به‌معنای افزایش ۲۵ تا ۳۰ درصدی در تداوم خشکسالی‌ها است. این نتایج حاکی از آن است که در افق آینده، استان خراسان جنوبی به‌ویژه در شهرستان طبس با افزایش فراوانی، شدت و ماندگاری خشکسالی‌ها مواجه خواهد بود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در مدیریت تلفیقی منابع آب، طراحی سامانه‌های هشدار زود هنگام خشکسالی و برنامه‌ریزی سازگاری اقلیمی در مقیاس استانی و حوضه‌ای قرار گیرد.

شاخص خشکسالی، بارش استاندارد، خراسان جنوبی، CIMP6، تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۱۸

### تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۹

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۰۳

## مقدمه

مناسب و دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با استفاده از شاخص‌های خشکسالی می‌توان شدت، مدت و وسعت خشکسالی را کمی کرده و به‌صورت دوره‌ای ارزیابی نمود (Mazidi et al., 2023). پیش‌بینی می‌شود که دفعات و شدت خشکسالی‌ها در دهه‌های آینده به دلیل تغییر اوضاع (مانند افزایش دما) تغییر نماید، بنابراین پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی یک مبنای مهم برای درک تغییرات آینده می‌باشند و در نهایت به تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری‌های آینده کمک شایانی خواهند نمود.

شاخص‌های خشکسالی ابزارهای مؤثر برای تعیین کمیت تعاریف و اجرای طرح‌های خشکسالی می‌باشد و بل‌هایت و همکاران (Wilhite et al., 2007) و ابزارهای تحلیلی مؤثری برای ارزیابی و پایش کیفی خشکسالی بوده که برای مدیریت خشکسالی دارای کاربردپذیری بالا هستند (Vali et al., 2022). بارش و تبخیر و ترق، دو پارامتر مهم و ضروری برای پایش و کمی‌سازی خشکسالی‌ها می‌باشند. از این رو نمایه‌هایی که علاوه بر باران، مقدار تبخیر و ترق را نیز در نظر می‌گیرند، می‌توانند برای پایش تغییرات اقلیمی در شرایط فعلی و در دوره‌های آتی مفیدتر باشند. شاخص‌های مختلفی از متغیرهای بارش و تبخیر و ترق برای پایش خشکسالی بهره می‌گیرند که شاخص‌های شدت خشکسالی پالمر، شاخص شناسایی خشکسالی و شاخص بارش تبخیر-ترق استاندارد شده، از آن جمله هستند.

شاخص بارش-تبخیر و ترق (SPEI) شاخص جدیدی است که توسط وینسنت سرانو و همکاران به‌منظور پایش خشکسالی بر مبنای تفاوت بارش و پتانسیل تبخیر - ترق عمل می‌کند، ارائه گردید و توانایی محاسبه خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد و همچنین می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشکسالی لحاظ نماید و برای پایش تغییرات اقلیمی دوره‌های فعلی و آتی بر مبنای سناریوهای اقلیمی به کار رود. این شاخص به‌دلیل لحاظ نمودن بیلان آب، همبستگی قابل قبولی با میزان رطوبت خاک دارد. همچنین شاخص تک متغیره بارش استاندارد شده (SPI) یکی از شاخص‌های خشکسالی

تغییرات اقلیمی جهانی به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و ژئوفیزیکی قرن حاضر، تأثیرات عمیق و فراگیری بر سیستم زمین وارد ساخته است. تحلیل روندهای بلندمدت اقلیمی، استمرار و تشدید این پدیده‌ها را در آینده پیش‌بینی می‌کند (Almazroui et al., 2021). افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، متان و اکسیدهای نیتروژن، موجب افزایش توانایی جذب و بازتابش انرژی حرارتی در اتمسفر شده و تعادل انرژی کره زمین را بر هم زده است. این اختلال در سیستم اقلیمی باعث ایجاد تغییرات گسترده در پارامترهای کلیدی اقلیمی مانند دما، الگوهای بارش و رطوبت شده است. لازم به ذکر است که تأثیرات تغییر اقلیم اغلب به‌صورت تدریجی در متغیرهای میانگین دما و بارندگی نمایان نمی‌شود؛ بلکه در قالب افزایش فراوانی، شدت و مدت‌زمان رویدادهای اقلیمی حدی نظیر خشکسالی‌های طولانی‌مدت و سیلاب‌های شدید بروز می‌یابد، فرجاد و همکاران (Farjad et al., 2015) که در این میان خشکسالی در رده نخست فهرست رویدادهای مخاطره‌آمیز طبیعی قرار دارد (Pendergrass., 2020). خشکسالی به دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و یا بلندمدتی اطلاق می‌گردد که در آن‌ها کمبود بارش، افزایش دما و در نتیجه کاهش رطوبت رخ می‌دهد و شدت خشکسالی‌ها به درجه کاهش بارش و کمبود رطوبت، مدت پایداری و بزرگی ناحیه تحت تأثیر بستگی دارد (Hajiabadi et al., 2018). خشکسالی در ایران یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی است که هر ساله در بخش‌هایی از آن رخ داده و خسارت‌های زیادی را به همراه دارد. چنان‌که پیامدهای آن امروزه در بخش‌های مختلفی از جمله منابع آبی، محیط زیست، خشک‌شدن تالاب‌ها، دریاچه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌ها در مناطق مختلف ایران مشهود است (Doostan., 2016)؛ بنابراین تحقیقات در خصوص پایش هم‌زمان و دقیق شرایط پویای خشکسالی جهت کاهش اثرات مخرب این بلای اقلیمی حائز اهمیت است (Hajiabadi et al., 2018). در ارزیابی خشکسالی، تعیین مجموعه‌ای از شاخص‌های

اشاره نمود (Li et al., 2021). پژوهش‌های بسیاری روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را در مقیاس‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در پژوهشی به بررسی روند تغییرات خشکسالی هواشناسی در استان خراسان جنوبی پرداختند. آنها با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار R شدت خشکسالی شش شهرستان در استان خراسان جنوبی را طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۰ با شاخص‌های SPI و PNPI محاسبه و تغییرات ناگهانی خشکسالی آن‌ها را با استفاده از آزمون‌های من-کندال و پتیت بررسی کردند. نتایج آزمون من-کندال در تحلیل روند بارش سالانه و شاخص PNPI نشان داد روند در پنج شهرستان در دهه ۱۹۹۰ کاهشی بوده و بر روی شاخص SPI نشان داد در دو شهرستان روند بارش افزایشی و سه شهرستان روند بارش کاهشی بوده است (Izadi et al., 2025). به تجزیه و تحلیل خشکسالی با استفاده از داده‌های آب و هوایی به‌دست آمده از ۲۱۹ ایستگاه هواشناسی با توزیع همگن در ترکیه بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ با استفاده از سه شاخص SPI، SPEI و RDI پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد بارش‌های کمتر از حد نرمال در دوره‌های طولانی و افزایش دما به افزایش فراوانی رویدادهای خشکسالی هواشناسی کمک کرده است (Yaman Öz et al., 2024).

پیش‌بینی خشکسالی آینده را برای دهه آینده (۲۰۲۴-۲۰۳۴) در ۹ ایستگاه هواشناسی در حوضه ساکاریا، واقع در شمال غربی ترکیه با استفاده از داده‌های بارش ماهانه تاریخی از ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۳ را مورد بررسی قرار داد. وی از یادگیری عمیق شاخص (SPI) و حافظه کوتاه‌مدت- بلند مدت (LSTM) جهت پیش‌بینی آینده استفاده کرد. نتایج مطالعه نشان داد. مدل LSTM برای پیش‌بینی مقادیر SPI تاریخی و پیش‌بینی‌شده مناسب است (دیلک تایلان، ۲۰۲۴). در تحقیقی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CIMP6 پرداختند. برون‌داد دما و بارش ۸ مدل پروژه CMIP6 تحت دو سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) طی دو دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۴ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰

می‌باشد که به‌طور گسترده در تشخیص خشکسالی هواشناسی و ناهنجاری‌های بارندگی استفاده می‌شود. این شاخص توسط مک‌کی و همکاران (McKee et al., 1993) به‌منظور تعیین و پایش خشکسالی ارائه شد. این شاخص براساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و با توجه به انحراف معیار به‌دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی است (Nejad Moghbal et al., 2017). شاخص بارش استاندارد شده بر اساس احتمال بارش برای هر بازه زمانی می‌باشد و به‌منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد. این شاخص برای کمی نمودن کمبود بارش در بازه‌های زمانی چندگانه طراحی شده است بذرافشان (Bazrafshan., 2002) با توجه به نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته، این شاخص، داده‌های بارش ثبت شده در بلند مدت را به یک توزیع احتمالاتی برازش داده و سپس به یک توزیع نرمال، تغییر شکل می‌دهد. به‌طوری که میانگین SPI در مکان و دوره زمانی مورد نظر صفر است (Mostafazadeh and Zabih., 2016).

شاخص بارش استاندارد قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه را دارد. بدیهی است هرچه مقیاس زمانی مورد مطالعه بزرگ‌تر در نظر گرفته شود؛ توزیع داده‌ها به‌سوی توزیع نرمال گرایش بیشتری پیدا می‌کند. از این‌رو محاسبه SPI برای مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر قابل اعتمادتر می‌باشد. نتایج تحقیق یعقوب‌زاده و همکاران (Yaghoubzadeh et al., 2017) برای مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت، این شاخص نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت آن، افزایش خشکسالی بیشتر را نشان دادند. حسین‌آبادی و همکاران (Hosseinabadi et al., 2020) نیز در پژوهش خود با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم به ارزیابی خشکسالی هواشناسی در دو شهرستان زابل و شیراز پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مقادیر شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماه نسبت به ۳ ماهه شدت خشکسالی را بیشتر نشان می‌دهند. از مزایای شاخص بارش استاندارد شده می‌توان به‌سادگی محاسبات، داده‌های مورد نیاز قابل دسترس و انعطاف‌پذیری در انتخاب مقیاس زمانی

کشور، بررسی دقیق خشکسالی و تغییرات اقلیمی برای کاهش خسارات، مدیریت منابع آب، حفظ کشاورزی و معیشت، پیشگیری از بیابان‌زایی و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت ضروری است. تحلیل دقیق خشکسالی در استان می‌تواند به کاهش خسارات اقتصادی و اجتماعی کمک کند؛ بنابراین این پژوهش با هدف بررسی شدت و مدت خشکسالی در استان خراسان جنوبی در افق آینده میانی انجام پذیرفته است، در پژوهش حاضر به پیش‌بینی مقدار شاخص خشکسالی SPI، SPEI و Run DS در دو شهرستان استان خراسان جنوبی با استفاده از دو مدل (IPSL و MPI) GCM ارائه شده در CMIP6 که جدیدترین و پیشرفته‌ترین داده‌های اقلیمی را ارائه می‌دهد که شبیه‌سازی واقعی‌تری از فرایندهای مؤثر بر خشکسالی دارد پرداخته شده است و از سناریو SSP2-4.5 به علت کاربرد بیشتر و نزدیک بودن به شرایط واقعی استفاده شده است.

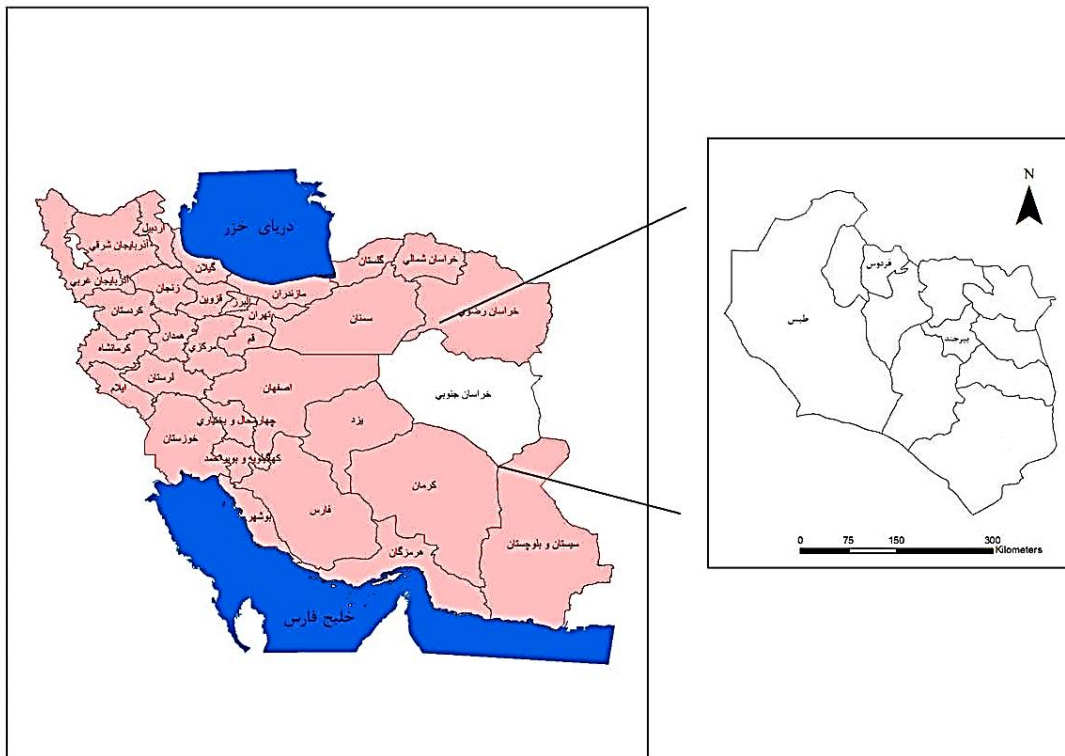
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی با وسعتی در حدود ۱۵۱۱۹۳ کیلومترمربع در شرق ایران واقع شده است که بین مدار جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۶۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان از شمال به خراسان رضوی، از غرب به یزد و کرمان، از جنوب به سیستان و بلوچستان و از شرق به کشور افغانستان محدود می‌شود. استان خراسان جنوبی دارای اقلیم خشک تا نیمه‌خشک است و میانگین سالانه دما در حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بارش سالانه بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد. محدوده مطالعه شامل دو شهرستان موقعیت این استان و شهرستان‌های تابعه بر اساس تقسیمات کشوری در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده مطالعاتی، دو ایستگاه سینوپتیک در سطح استان خراسان جنوبی شامل شهرستان‌های فردوس (شمال غرب استان) و طبس (غرب استان) است که به دلیل شرایط اقلیمی خشک، اغلب تحت تأثیر رویدادهای اقلیمی حدی مانند خشکسالی قرار دارند می‌باشد (Doostan., 2016).

مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن مدل‌های گردش کلی جو از روش تصحیح اربیبی نگاشت چندک برای ریزگردانی GCM‌های منتخب استفاده شد. با پیش‌نمایی مقادیر بارش و دما، شاخص SPEI، در مقیاس زمانی سالانه برای دوره‌های پایه و آتی محاسبه و در ادامه، نمایه‌های خشکسالی (مدت، شدت و بزرگی) بر مبنای تئوری Run استخراج و برای دوره‌های پایه و آتی با هم مقایسه شدند (Asgari et al., 2023).

در مطالعه‌ای به ارزیابی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی شامل شدت، مدت و طول مدت دوره خشک هواشناسی ایران با رژیم بارشی متفاوت در سه دوره افق نزدیک، میانه و دور تحت اثر تغییر اقلیم پرداخته‌اند. ارزیابی سناریوهای خشکسالی آینده در مقیاس سالانه شرایط متفاوتی برای نواحی مختلف ایران در سه افق مذکور را در این ارزیابی نشان داد (Ghaemi et al., 2022). به طوری که می‌توان گفت به طور میانگین ایران با افزایش تغییرات در شدت خشکسالی‌ها مواجه خواهد شد. در مقاله‌ای به پیش‌بینی خشکسالی‌های هواشناسی دریاچه ارومیه تحت سناریوهای SSP پرداخته‌اند. خروجی‌ها حکایت از افزایش قابل توجه خشکسالی‌ها در غرب و شمال این حوضه برای دوره گرم سال دارد (Zarrin et al., 2022). زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi, 2021) با پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران به این نتیجه رسیدند که بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. همین‌طور در رابطه با پایش خشکسالی بر مبنای شاخص SPI و تغییر اقلیم می‌توان به مطالعات (Hajarian., 2025 ; Helmi & Shahidi., 2023 ; Behzadi et al., 2024 ; Dukat et al., ; Senatore et al., 2022 ; Sarker et al., 2022 ; 2022 ; Li et al., 2017 ; Delghandi et al., 2023) اشاره نمود. هرچند مطالعات فراوانی در زمینه تغییر اقلیم و وضعیت پارامترهای مختلف اقلیمی در سال‌های آینده به انجام رسیده، اما با توجه به موقعیت حساس استان خراسان جنوبی از نظر اقلیمی و اقتصادی در



شکل ۱. محدوده مطالعاتی  
Fig 1. Study Area

پدیده خشکسالی در دوره‌های پیاپی، کشور ایران را دربرگرفته است. از این رو جهت بررسی این پدیده، استان خراسان جنوبی که چندین دهه می‌باشد که با خشکسالی روبه‌رو است انتخاب گردید. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the studied stations

| ایستگاه | نوع ایستگاه  | ارتفاع از سطح دریا (متر)   | طول جغرافیایی (درجه) | عرض جغرافیایی (درجه) | شاخص دمارتن    | اقلیم                              |
|---------|--------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------|------------------------------------|
| Station | Station type | Altitude above sea level m | Longitude (degrees)  | Latitude (degrees)   | Demarton Index | Climate                            |
| فردوس   | سینوپتیک     | 1293                       | 58.18                | 34.03                | 7.2            | خشک تا نیمه‌خشک<br>Dry to semi-dry |
| طبس     | سینوپتیک     | 711                        | 56.95                | 33.60                | 3.7            | بسیار خشک<br>Very dry              |

شبکه‌ی داده‌های سیاره زمین (ESGF) دریافت شد.

#### داده‌های مورد استفاده

جهت مقایسه داده‌های مدل با داده‌های مشاهداتی، اطلاعات بارش، دمای حداقل و حداکثر دو ایستگاه سینوپتیک فردوس و طبس برای دوره آماری ۲۵ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۴) از اداره کل هواشناسی استان اخذ گردید. همچنین داده‌های مدل‌های GCM برای دوره تاریخی (منطبق بر داده‌های پایه) و آینده‌ی میانی مربوط به دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۹ تحت سناریوی میانی از فدراسیون

#### مدل‌های مورد استفاده

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) با هدف اصلی شناخت جنبه‌های تغییر اقلیم و به‌خصوص چگونگی اثر فعالیت‌های انسانی بر آن، پس از بررسی عنوان کرد که عوامل طبیعی و غیرطبیعی باعث برهم‌خوردن شرایط حاکمی بر اجزای مختلف اقلیم کره زمین

هوای آینده بر مناطق مختلف در سراسر جهان را تشریح می‌کند. یافته‌های این گزارش به ارائه درک درستی از وضعیت آب و هوای فعلی و آینده می‌پردازد و عملاً آنچه را برای محدود کردن پیامدهای تغییرات آب و هوایی در زمین لازم است، توصیف می‌کند. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ششم خود از سناریوهای جدید SSP تحت عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. برای ریزمقیاس‌نمایی در پژوهش حاضر از دو مدل GCM مربوط به داده‌های گزارش ششم IPCC شامل IPSL-CM6A-LR و MIP-ESM1-2-HR تحت سناریوی انتشار میانی SSP2-4.5 استفاده شد، که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است (IPCC AR6, 2021).

می‌شود. این هیئت از زمان شروع به کار خود مجموعه‌ای از گزارش‌های ارزیابی و تخصصی و مقالات فنی را منتشر نموده که به‌عنوان معتبرترین منابع اطلاعاتی در مورد تغییرات اقلیمی شناخته می‌شوند و تاکنون گزارش‌های ارزیابی اول تا ششم را تهیه و منتشر کرده است.

گزارش ششم این هیئت که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است در سال ۲۰۲۱ ارائه شده است. این گزارش آخرین پیشرفت‌ها در علوم آب‌وهوایی، مشاهدات، دیرینه اقلیم‌شناسی و شبیه‌سازی‌های اقلیمی را گرد هم می‌آورد تا به‌روزترین درک علوم فیزیکی از تغییرات آب‌وهوا را ارائه دهد. همچنین، این گزارش تأثیرات انسانی بر وضعیت فعلی آب و هوا و چگونگی تأثیرگذاری آب و

جدول ۲. مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده

Table 2. Specifications of the used GCM models

| مدل           | نام مرکز تحقیقاتی   | کشور توسعه‌دهنده    | تفکیک افقی            |
|---------------|---|---------------------|-----------------------|
| Model         | Name of the research center   | Developer's country | Horizontal separation |
| IPSL-CM6A-LR  | مؤسسه پیر سیمون لاپلاس<br>Institut Pierre Simon Laplace                             | فرانسه<br>France    | 0.5° - 0.5°           |
| MPI-ESM1-2-HR | مدل سامانه زمین مؤسسه ماکس پلانک<br>Max Planck Institute for Earth System Modelling | آلمان<br>Germany    | 0.5° - 0.5°           |

روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده در پژوهش حاضر، روش BCSD است. این روش اولین بار توسط وود و همکاران (Wood et al, 2002) به‌منظور تخمین مولفه‌های هیدرولوژی درازمدت به کار گرفته شد و امروزه در مطالعه‌های اقلیم‌شناسی با مقیاس ماهانه به‌وفور استفاده می‌شود، از جمله این موارد می‌توان به پژوهش‌های (Ataei et ; Tabatabaei et al., 2018) و (Hajiabadi et al., 2018 ; al., 2021) اشاره کرد. فرآیند ریزمقیاس‌نمایی با این روش در سه گام به شرح زیر انجام می‌شود:

- اصلاح انحراف آماری خروجی مدل‌های گردش عمومی در مقیاس ماهانه
- بعد از محاسبه ضرایب اصلاحی برای نقاط شبکه مدل‌های اقلیمی، با استفاده از ابزار درون‌یابی این ضرایب برای دقت‌های بالاتر  $1 \times 1$ ،  $0.5 \times 0.5$ ،

### روش ریزمقیاس‌نمایی BCSD

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ‌مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن نسبت به منطقه مطالعاتی است. دو نوع تکنیک برای به‌دست آوردن متغیرها در مقیاس محلی (ریز مقیاس‌نمایی) از روی مقیاس جهانی وجود دارد، یکی روش دینامیکی که شامل حل صریح معادلات دینامیکی سیستم است و دیگری روش آماری که از رابطه‌های استخراج شده از داده‌های مشاهده شده استفاده می‌کند. روش‌های دینامیکی به‌دلیل پرهزینه بودن و دشواری و همچنین عدم امکان تولید داده برای انواع سناریوهای مختلف، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hewitson & Crane., 1996). در مقابل روش‌های آماری با محاسبات ساده آماری، صرف زمان و هزینه کم امکان بررسی انواع سناریوهای اقلیمی و تحلیل عدم قطعیت آن‌ها را دارند.

1. Bias-Corrected Spatial Disaggregation

پیش‌بینی‌شده،  $\beta$  سوگیری نسبی: نسبت میانگین پیش‌بینی به میانگین مشاهدات و  $\gamma$  تغییرپذیری نسبی: نسبت انحراف معیار پیش‌بینی به انحراف معیار مشاهدات می‌باشد.

### معرفی شاخص‌های خشکسالی

#### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI یک شاخص اقلیمی است که جهت تعیین کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف کاربرد دارد. طبق این روش دوره خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد. همچنین زمانی پایان می‌یابد که شاخص SPI مثبت گردد. در این تحقیق پس از تهیه داده‌های مشاهداتی و همچنین GCM و منطقه‌ای کردن داده‌های بزرگ‌مقیاس، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها با استفاده از روش BCSD شده و در نهایت پس از آماده‌سازی داده‌ها اقدام به محاسبه شاخص SPI ۱۲ ماهه در نرم‌افزار R برای دو مدل GCM و تحت سناریو میانی SSP2-4.5 در ایستگاه‌های سینوپتیک فردوس و طبس شده و شرایط خشکسالی و تغییرات آن در دوره آینده میانی ۲۰۳۰-۲۰۵۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است. طبقه‌بندی شاخص SPI با استفاده از جدول ۳ انجام می‌شود.

#### شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI<sup>2</sup>)

امروزه در تحقیقات مختلف نقش دما در خشکسالی تحت تأثیر روند گرمایش جهانی مورد تأکید قرار گرفته است. لذا در این مطالعه برای پایش و پیش‌نگری خشکسالی از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده استفاده گردید. این شاخص چندکمیته است و در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. در این نمایه، با در نظر گرفتن تبخیر - تعرق پتانسیل، تفاوت بین بارش و تبخیر - تعرق پتانسیل برای ماه  $i$ ، بیان به‌صورت رابطه  $\gamma$  محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (7)$$

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (8)$$

۰/۲۵×۰/۲۵ و ۰/۱۲۵×۱۲۵ برآورد می‌گردد.

$$\begin{aligned} GCM_t &= F_t + OBS_t \\ GCM_p &= F_p * OBS_p \end{aligned} \quad (1)$$

در این رابطه  $GCM_t$  و  $GCM_p$  به ترتیب دما و بارندگی ماهانه خروجی مدل‌های گردش عمومی،  $OBS_t$  و  $OBS_p$  به ترتیب دما و بارندگی ماهانه مشاهداتی ایستگاه مورد نظر و در نهایت  $F_t$  و  $F_p$  ضریب اصلاحی برای دما و بارندگی نقاط شبکه خروجی مدل‌های گردش عمومی می‌باشند.

۳- ضرایب اصلاحی به‌دست آمده برای دقت‌های بالاتر در مقادیر مشاهداتی اعمال می‌شود تا خروجی مدل‌های گردش عمومی برای دقت مورد نظر برآورد گردد.

در نهایت با قبول فرضیه یکسان بودن میزان انحراف در دوره پایه و آتی خروجی مدل‌های گردش عمومی، تغییرات مولفه‌های اقلیمی برای سال‌های آتی تعیین می‌گردد. در پژوهش حاضر جهت استفاده از این روش ریزمقیاس‌نمایی از نرم‌افزار RStudio و پکیج آماری QMAP استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های CIMP6 در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، از شاخص‌های ارزیابی درصد ضریب اریبی (PBIAS)، میانگین خطا (ME) و کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شد که از روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})}{\sum_{t=1}^T x_{obs}} * 100 \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mod} - x_{obs}) \quad (3)$$

$x_{obs}$  و  $y_{mod}$  به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده و تعداد داده‌ها می‌باشد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\mu P}{\mu O} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\sigma P}{\sigma O} \quad (6)$$

$O$  و  $P$  به ترتیب مقادیر داده‌های مدل‌سازی شده و مشاهداتی،  $r$  میزان شباهت روند تغییرات: ضریب هم‌بستگی پیرسون بین مقادیر مشاهداتی و

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص SPI و تعریف کلاس‌های خشکسالی متناظر (Mckee et al, 1993)

Table 3. SPI classification and definition of corresponding drought classes (Mckee et al, 1993)

| مقدار شاخص SPI<br>SPI index value | طبقه‌بندی خشکسالی<br>Drought classification |
|-----------------------------------|---|
| >2                                | ترسالی بسیار شدید<br>Extremely wet          |
| 1.50 تا 1.99                      | ترسالی شدید<br>Severely wet                 |
| 1 تا 1.49                         | ترسالی متوسط<br>Moderately wet              |
| -0.99 تا 0.99                     | وضعیت نرمال<br>Normal condition             |
| -1 تا -1.49                       | خشکسالی متوسط<br>Moderately drought         |
| -1.50 تا -1.99                    | خشکسالی شدید<br>Severely drought            |
| > -2                              | خشکسالی بسیار شدید<br>Extremely drought     |

نزدیک به میانگین بلندمدت بارش انتخاب شود، حساسیت شاخص به تغییرات اقلیمی افزایش یافته و تعداد دوره‌های خشکسالی بیشتر خواهد شد. در مقابل، انتخاب آستانه‌ای پایین‌تر باعث کاهش تعداد خشکسالی‌ها اما افزایش شدت آن‌ها خواهد شد.

دو مؤلفه اصلی در تحلیل خشکسالی با استفاده از ران تئوری عبارت‌اند از:

- تداوم (Duration): طول دنباله زمانی مقادیر منفی.
- شدت (Severity): مجموع کمبود بارش در طول دوره خشکسالی، که گویای شدت کم‌بارشی در آن بازه زمانی است.

در سال ۲۰۱۷، در محیط نرم‌افزاری R و تحت کتابخانه‌ای با عنوان Drought، تئوری ران با شاخص RunDS پیاده‌سازی شد. این کتابخانه ابزارهایی برای پایش خشکسالی بر اساس شاخص‌های تک‌متغیره و چند متغیره فراهم کرده و امکاناتی برای پیش‌بینی آماری خشکسالی، تحلیل جریان، ارزیابی خطر خشکسالی و تهیه نقشه‌های پراکندگی آن ارائه می‌دهد (Hao et al, 2017)، این ابزار در مطالعات کاربردی خشکسالی در ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

که k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه می‌باشد. در ادامه با برآزش توزیع لجستیک لگاریتمی بر مقادیر D و تبدیل آن به مقادیر نرمال، مقدار شاخص SPEI استخراج می‌گردد.

#### شاخص شدت - مدت بارندگی (Run DS<sup>1</sup>)

یکی از روش‌های کمی در تحلیل خشکسالی، تئوری ران است که نخستین بار توسط یجوویچ در سال ۱۹۶۷ (Yevjevich, 1967) معرفی شد. این تئوری عمدتاً بر متغیرهای گسسته بنا شده است، اما قابلیت استفاده برای متغیرهای پیوسته را نیز دارد. در چارچوب این نظریه، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که مقدار یک متغیر هیدرولوژیکی (مانند بارندگی) از یک آستانه بحرانی از پیش تعیین‌شده کمتر شود و این کاهش در قالب باقیمانده‌های منفی نمایان می‌شود. هر دنباله‌ی پیوسته از این مقادیر منفی، به‌عنوان یک دوره خشکسالی در نظر گرفته می‌شود. مقدار که به‌عنوان سطح مبنا یا آستانه خشکسالی تعریف می‌شود، نقش مهمی در تشخیص رخداد‌های خشکسالی ایفا می‌کند. انتخاب این آستانه بر اساس اهداف مطالعه و شرایط اقلیمی منطقه می‌تواند متفاوت باشد. اگر آستانه

1. Duration- Severity (D-S)

## نتایج و بحث

### نتایج ارزیابی مدل‌های مورد استفاده

به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) در شبیه‌سازی پارامتر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر، شاخص‌های آماری شامل ضریب کارایی کلینگ-گوپتا (KGE)، میانگین خطا (ME) و درصد بایاس (PBIAS) برای دو مدل IPSL و MPI در دو ایستگاه فردوس و طبس محاسبه شدند. این شاخص‌ها با استفاده از داده‌های مشاهداتی در دوره‌ی تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ تعیین و نتایج در جدول (۴) ارائه شده است.

بررسی معیارهای آماری میانگین خطا، درصد بایاس و ضریب کارایی کلینگ-گوپتا برای مدل‌های اقلیمی مورد استفاده، نشان داد که دقت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های فردوس و طبس دارای تفاوت محسوسی است. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی بارش در ایستگاه فردوس، مقدار KGE برای مدل IPSL برابر ۰/۳۳ و برای مدل MPI برابر ۰/۳۱ که بیانگر هم‌بستگی نسبتاً قوی‌تر و بازتولید دقیق‌تر الگوی بارش توسط مدل IPSL می‌باشد. در ایستگاه طبس نیز مقدار KGE برای مدل IPSL برابر ۰/۲۴ و برای مدل MPI برابر ۰/۲۸ گزارش شده است؛ هرچند تفاوت مقادیر اندک است، اما مدل MPI عملکرد قابل قبول تری در بازنمایی رفتار بارش منطقه دارد. همچنین شاخص PBIAS که بیانگر میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل است، برای IPSL در ایستگاه فردوس ۰/۵ درصد و در ایستگاه طبس ۵/۱ درصد به‌دست آمد، این مقادیر نشان می‌دهند که مدل IPSL تمایل اندکی به بیش‌برآورد بارش در ایستگاه طبس دارد و در مقابل، مدل MPI مقادیر ۳/۹ درصد در فردوس و ۲/۳ درصد در طبس را نشان می‌دهد که حاکی از دقت نسبتاً مناسب این مدل در شهرستان طبس در برآورد مقادیر بارش است. مقدار ME نیز که بیانگر میانگین خطای مدل است، برای IPSL بین ۰/۰۶ تا ۰/۳۵ و برای MPI بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۴ متغیر است. در مقابل، عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دمای بیشینه بسیار مطلوب بوده است، به‌گونه‌ای که مقادیر KGE در محدوده ۰/۹۱ تا ۰/۹۴ و درصد

بایاس کمتر از ۰/۱ درصد، نشان‌دهنده هم‌بستگی بالا و انحراف حداقلی از داده‌های مشاهده‌شده است. نتایج مربوط به دمای کمینه از نوسان بیشتری برخوردار بود؛ به‌طوری‌که در ایستگاه فردوس، هر دو مدل تمایل به بیش‌برآورد دما داشتند PBIAS حدود ۴۶ درصد و KGE حدود ۰/۴۵ در حالی‌که در ایستگاه طبس، دقت شبیه‌سازی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و مقادیر KGE حدود ۰/۹۲ و PBIAS حدود ۴ درصد به‌دست آمد. به‌صورت کلی، در شهرستان فردوس مدل IPSL ثبات و دقت بیشتری در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی نشان داد، در حالی‌که در شهرستان طبس مدل MPI عملکرد قابل قبول تری داشت.

### نتایج شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق (SPEI)

پس از تهیه داده‌های مشاهداتی و همچنین GCM و منطقه‌ای کردن داده‌های بزرگ مقیاس و ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها به محاسبه شاخص SPI و SPEI برای دو مدل GCM تحت سناریو SSP2-4.5 در دو ایستگاه مورد مطالعه اقدام شد و شرایط خشکسالی و تغییرات آن در دوره آتی نسبت به دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ و ۳ روند تغییرات SPI و SPEI در دو شهرستان طبس و فردوس را در دوره پایه و همچنین با استفاده از دو مدل اقلیمی IPSL و MPI تحت سناریوی SSP2-4.5 به تفکیک نشان می‌دهد. در دوره پایه، مقدار میانگین شاخص SPI برای فردوس در حدود ۰/۴- و شاخص SPEI در حدود ۰/۷- برآورد می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی شرایط خشکی خفیف با تأثیر نسبی افزایش دما بر رطوبت خاک است. در این مرحله، اختلاف حدود ۰/۳ واحدی میان SPI و SPEI بیانگر حساسیت متوسط منطقه به تبخیر-تعرق پتانسیل است. اما در دوره آتی، هر دو شاخص روندی کاهشی و منفی‌تر نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که مقدار SPI به حدود ۰/۹- و SPEI به حدود ۱/۳- می‌رسد. این تغییر معادل حدود ۰/۵ تا ۰/۶ واحد کاهش نسبت به دوره پایه است. کاهش قابل توجه SPEI نسبت به SPI نشان می‌دهد که افزایش دما و تبخیر-تعرق (به‌ویژه در فصل‌های گرم‌تر) نقش

جدول ۴. نتایج معیارهای عملکردی برای مقایسه متغیرهای اقلیمی

Table 4. Results of performance criteria for comparing climate variables

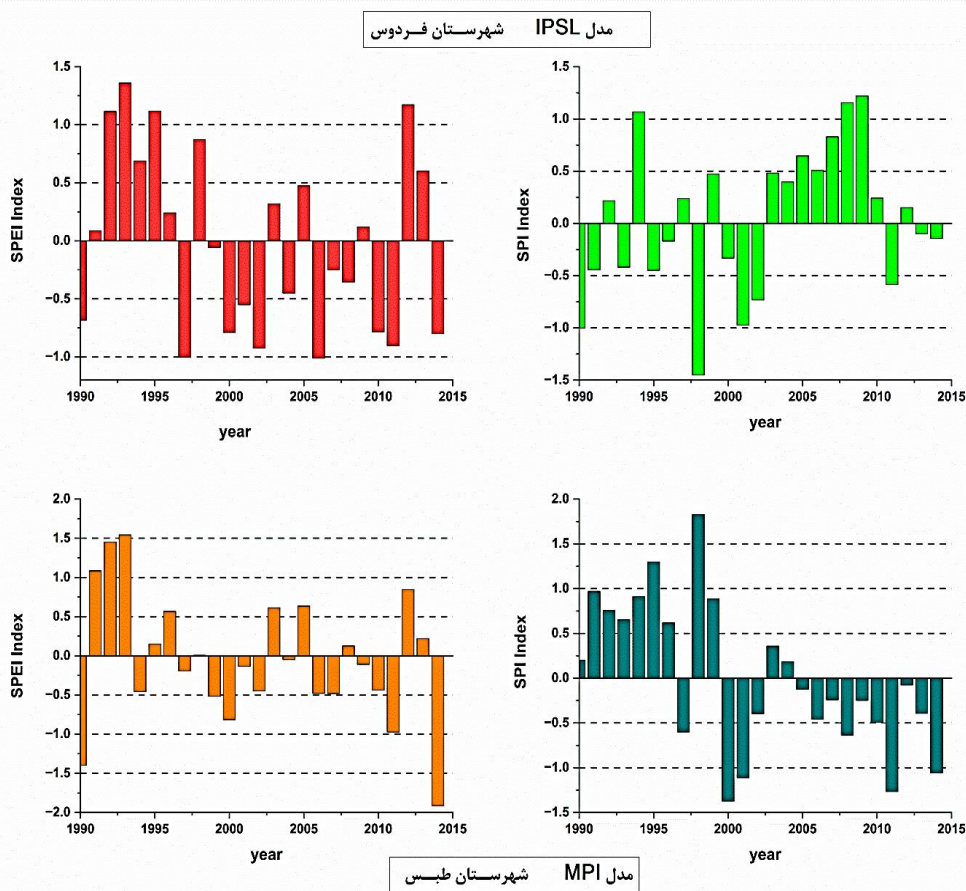
| میانگین خطا<br>ME | درصد اربیبی<br>PBIAS | کلینگ-گوپتا<br>KGE | مدل<br>Model | پارامتر<br>Parameter          | ایستگاه<br>Station |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| 0.06              | 0.5                  | 0.33               | IPSL         | بارش (میلی متر)               |                    |
| 0.44              | 3.9                  | 0.31               | MPI          | Precipitation (mm)            |                    |
| 0.01              | 0                    | 0.93               | IPSL         | دمای حداکثر (درجه سانتی گراد) | فردوس              |
| 0.02              | 0.1                  | 0.94               | MPI          | Maximum temperature (°c)      | Ferdows            |
| 2.02              | 46.4                 | 0.46               | IPSL         | دمای حداقل (درجه سانتی گراد)  |                    |
| 2.03              | 46.5                 | 0.46               | MPI          | Minimum temperature (°c)      |                    |
| 0.35              | 5.1                  | 0.24               | IPSL         | بارش (میلی متر)               |                    |
| 0.16              | 2.3                  | 0.28               | MPI          | Precipitation (mm)            |                    |
| 0.01              | 0                    | 0.93               | IPSL         | دمای حداکثر (درجه سانتی گراد) | طبس                |
| 0.01              | 0                    | 0.95               | MPI          | Maximum temperature (°c)      | Tabas              |
| 0.44              | 4.1                  | 0.92               | IPSL         | دمای حداقل (درجه سانتی گراد)  |                    |
| 0.44              | 4.1                  | 0.92               | MPI          | Minimum temperature (°c)      |                    |

این شهرستان به ویژه در فصل‌های تابستان و پاییز، با خشکسالی‌های شدید و طولانی مدت روبه‌رو شود. نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوی SSP2-4.5 در دو شهرستان مورد مطالعه نشان داد که به‌طور میانگین مقدار شاخص SPI در دوره پایه بین ۰ تا ۰/۵- و شاخص SPEI بین ۰/۵- تا ۱- متغیر بوده است که بیانگر وقوع شرایط نرمال تا خشکی خفیف در دو شهرستان طبس و فردوس است در دوره آتی، بر اساس خروجی مدل‌های اقلیمی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR، میانگین شاخص SPI به حدود ۰/۵- تا ۱- و SPEI به محدوده ۱- تا ۱/۵- کاهش یافته است، که نشان‌دهنده افزایش شدت خشکسالی در آینده است. اختلاف میان SPI و SPEI در هر دو مدل به‌ویژه در مدل IPSL بیشتر بوده و این امر بیانگر اثر قابل توجه افزایش دما و تبخیر-تعرق بر کاهش رطوبت خاک و تشدید خشکسالی است. به‌طور کلی، میانگین کاهش شاخص SPEI نسبت به دوره پایه در مدل IPSL حدود ۰/۶ واحد و در مدل MPI حدود ۰/۴ واحد برآورد شده است که نشان‌دهنده افزایش خشکسالی متوسط تا شدید در افق آینده است. این یافته‌ها حاکی از آن

کلیدی در تشدید خشکسالی آینده در فردوس خواهد داشت. در نتیجه، پیش‌بینی می‌شود شهرستان فردوس در افق آینده از شرایط خشکی خفیف به خشکسالی متوسط وارد شود و پایداری اقلیمی منطقه در برابر نوسانات بارش و گرمایش تضعیف گردد. در شهرستان طبس در دوره پایه، شاخص SPI برای طبس در حدود ۰/۶- و شاخص SPEI در حدود ۱- قرار دارد، که بیانگر شرایط خشکی نزدیک به متوسط است. اختلاف قابل ملاحظه بین SPI و SPEI (حدود ۰/۴ واحد) نشان‌دهنده نقش پررنگ دما و تبخیر در تعیین وضعیت خشکی این شهرستان در دوره مشاهداتی است. در دوره آتی، طبق مدل‌های IPSL و MPI، هر دو شاخص روند نزولی آشکاری دارند؛ مقدار SPI به حدود ۱- تا ۱/۲- و SPEI به حدود ۱/۶- تا ۱/۸- کاهش می‌یابد. این تغییرات به‌معنای افزایش شدت خشکسالی حدود ۰/۷ تا ۰/۸ واحد نسبت به دوره پایه است. مدل IPSL در مقایسه با MPI شدت بیشتری از خشکی را پیش‌بینی کرده است. از نظر اقلیمی، طبس با میانگین دمای بالاتر و تبخیر بیشتر، نسبت به فردوس آسیب‌پذیری بیشتری در برابر خشکسالی دارد. بنابراین انتظار می‌رود در دوره آتی،

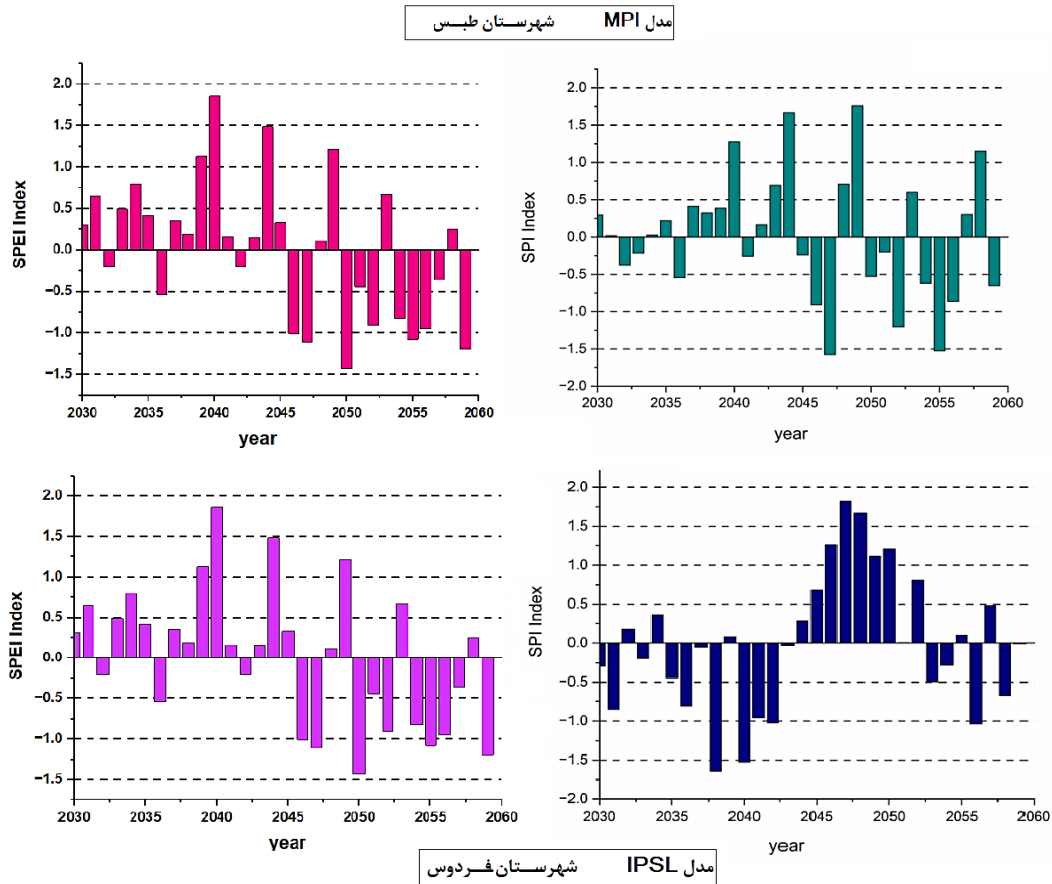
در گذشته با دوره‌های خشکسالی‌های شدید منطقه‌ای هم‌زمان بوده‌اند؛ به‌ویژه در دهه‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۰ که وقوع خشکسالی‌های ممتد منجر به کاهش محسوس ذخایر آبی، افت سطح آب‌های زیرزمینی و خسارت به بخش کشاورزی شده است. استمرار روند نزولی در شاخص‌ها در دوره آبی، احتمال تکرار یا تشدید چنین خشکسالی‌های تاریخی را افزایش می‌دهد. از دیدگاه اقلیمی، هم‌بستگی منفی بین SPI/SPEI و دماهای میانگین سالانه، همراه با تغییر در الگوهای فصلی بارش، می‌تواند سازوکار اصلی این تشدید باشد. در نتیجه، روندهای نزولی کنونی نه‌تنها هشداردهنده تشدید خشکسالی‌های آینده هستند، بلکه استمرار آن‌ها می‌تواند به تغییر رژیم هیدروکلیماتیک منطقه و گذار از شرایط نیمه‌خشک به خشک منجر شود.

است که با تداوم روند گرمایش و کاهش بارش‌های مؤثر، پایداری اقلیم منطقه در برابر تنش‌های آبی کاهش یافته و خطر بروز خشکسالی‌های فراگیر در دوره‌های آبی به‌طور محسوسی افزایش خواهد یافت. روندهای نزولی شاخص‌های SPI و SPEI در این پژوهش نشان‌دهنده افزایش فراوانی و شدت رخداد‌های خشکسالی در منطقه مورد مطالعه است. کاهش مقادیر SPI بیانگر افت بارش‌های مؤثر و کاهش تغذیه منابع آبی سطحی است، در حالی که کاهش SPEI علاوه بر اثر کاهش بارش، نقش افزایش دما و تبخیر-تعرق را نیز برجسته می‌سازد. این همگرایی روندهای منفی در هر دو شاخص نشان می‌دهد که خشکسالی‌های آینده نه‌تنها ناشی از کم‌بارشی، بلکه به‌شدت تحت تأثیر گرمایش اقلیم و افزایش تلفات رطوبتی خواهند بود. مقایسه این روندها با داده‌های تاریخی نشان می‌دهد که افت‌های مشابه در مقادیر SPI و SPEI



شکل ۲. نمودار تغییرات شاخص SPI و SPEI دوره پایه به تفکیک شهرستان

Fig 2. Graph of changes in SPI and SPEI indices during the base period, separated by city



شکل ۳. نمودار تغییرات شاخص SPEI و SPI برای دو مدل MPI و IPSL برای دوره آتی تحت سناریوی SSP2-4.5 به تفکیک شهرستان  
**Fig 3. Graph of changes in the SPI and SPEI indices for two IPSL and MPI models in the future period under the SSP2-4.5 scenario, separated by city**

در شهرستان فردوس، تغییرات بارزتر است. در دوره پایه، ۱۹۳ ماه در طبقه نرمال قرار داشته‌اند، در حالی که این مقدار در دوره آتی به ۲۲۹ ماه رسیده و افزایش ۳۶ ماهه را نشان می‌دهد. همزمان، ماه‌های بسیار مرطوب از ۲۳ به ۱۲ ماه و ماه‌های مرطوب از ۲۴ به ۳۶ ماه تغییر کرده‌اند؛ به این معنا که رخداد شرایط فوق‌العاده مرطوب کاهش یافته و سهم شرایط مرطوب معمولی افزایش یافته است. از سوی دیگر، شرایط نسبتاً خشک نیز از ۲۴ به ۳۶ ماه افزایش یافته و نشان‌دهنده افزایش تکرار خشکسالی‌های خفیف است. شرایط بسیار خشک و فرا خشک کاهش یافته‌اند، به طوری که بسیار خشک از ۲۳ ماه به ۱۲ ماه و فرا خشک از یک ماه به یک ماه ثابت مانده است. در مجموع، اقلیم فردوس در آینده با افزایش شرایط نرمال و کاهش افراط‌های رطوبتی (چه بسیار مرطوب و چه بسیار خشک) همراه خواهد بود.

مقایسه دو دوره پایه و آتی نشان می‌دهد که براساس نتایج جدول ۵ در شهرستان طبس، در دوره پایه ۲۳۶ ماه در شرایط نرمال قرار داشته‌اند که این مقدار در دوره آتی به ۲۲۹ ماه کاهش یافته است؛ این افت ۷ ماهه نشان‌دهنده کاهش پایداری اقلیم در محدوده نرمال است. در همین حال، ماه‌های نسبتاً خشک از ۳۵ ماه در دوره پایه به ۳۶ ماه در دوره آتی افزایش یافته و بیانگر احتمال افزایش رخداد خشکسالی‌های خفیف است. در سایر طبقات رطوبتی تفاوت چشمگیری مشاهده نمی‌شود؛ به‌عنوان مثال، شرایط بسیار مرطوب و فرا مرطوب هرکدام ثابت مانده‌اند (۱۲ ماه)، و شرایط بسیار خشک و فرا خشک نیز تقریباً بدون تغییر باقی مانده‌اند (۱۲ و ۱۱ ماه در دوره پایه در برابر ۱۲ و ۱۲ ماه در دوره آتی). بنابراین، تغییرات در طبس عمدتاً حول کاهش ماه‌های نرمال و افزایش اندک خشکی نسبی متمرکز است.

خشکسالی‌های خفیف همراه است، در حالی که در فردوس افزایش شرایط نرمال بسیار پررنگ‌تر بوده و با کاهش معنادار شرایط شدید (چه مرطوب و چه خشک) همراه است.

این نتایج به‌طور کلی نشان می‌دهد که در هر دو شهرستان، گرایش به‌سمت افزایش شرایط نرمال و کاهش رخدادهای افراطی وجود دارد، با این تفاوت که در طبس کاهش ماه‌های نرمال با اندکی افزایش

جدول ۵. تعداد ماه‌های طبقه‌بندی شده هر شهرستان بر اساس SPI

Table 5. Number of months classified by each city based on SPI

| فرا خشک<br>Super dry | بسیار خشک<br>Very dry | نسبتاً خشک<br>Relatively dry | نرمال<br>Normal | مرطوب<br>Humid | بسیار مرطوب<br>Very humid | فرا مرطوب<br>Ultra-humid | دوره<br>Period            | شهرستان<br>County |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| 12                   | 12                    | 36                           | 229             | 36             | 12                        | 12                       | دوره آتی<br>Future period | طبس<br>Tabas      |
| 11                   | 13                    | 35                           | 236             | 36             | 12                        | 12                       | دوره پایه<br>Base period  |                   |
| 12                   | 12                    | ۳۶                           | ۲۲۹             | ۳۶             | 12                        | 12                       | دوره آتی<br>Future period | فردوس<br>Ferdows  |
| 1                    | 23                    | 24                           | 193             | 24             | 23                        | 1                        | دوره پایه<br>Base period  |                   |

است؛ این موضوع نشان‌دهنده ماندگاری طولانی‌تر خشکسالی‌ها در دوره آتی است. در نهایت، مدت کل خشکسالی‌ها در شهرستان فردوس از ۴۰ ماه در دوره پایه به ۵۱ ماه در دوره آتی و در شهرستان طبس از ۴۹ ماه به ۶۰ ماه افزایش یافته است که بیانگر رشد حدود ۲۵ درصدی در مجموع زمان وقوع خشکسالی‌ها است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در هر دو شهرستان، اما به‌ویژه در طبس، روندی افزایشی در شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی‌ها در آینده پیش‌بینی می‌شود. این تغییرات حاکی از افزایش خطر خشکسالی‌های شدید و پایدار در منطقه بوده و بر ضرورت مدیریت هوشمند منابع آب، توسعه سامانه‌های هشدار زودهنگام، و برنامه‌ریزی سازگاری اقلیمی در مقیاس محلی و حوضه‌ای تأکید دارد.

#### نتایج شاخص شدت - مدت بارندگی

بر اساس نتایج جدول ۵ تغییرات شاخص‌های خشکسالی در هر دو شهرستان فردوس و طبس بیانگر افزایش شدت و تداوم این پدیده در آینده است. در شهرستان فردوس، تعداد رویدادهای خشکسالی از ۵ مورد در دوره پایه به ۶ مورد در دوره آتی افزایش یافته است که نشان‌دهنده رشد حدود ۲۰ درصدی در فراوانی رخداد خشکسالی‌ها است. در شهرستان طبس تعداد رویدادها بدون تغییر باقی مانده و برابر با ۶ مورد است، اما شاخص‌های شدت و مدت خشکسالی افزایش معنی‌داری نشان می‌دهند. مقدار بیشترین شدت خشکسالی در فردوس از ۸/۴۵ به ۸/۹۳ افزایش یافته است، در حالی که در طبس این شاخص از ۸/۹۲ به ۱۱/۳۲ رسیده است که بیانگر افزایش قابل توجه شدت خشکسالی در آینده می‌باشد. بیشترین مدت خشکسالی در هر دو شهرستان برابر با ۱۲ ماه گزارش شده و تغییری در این شاخص مشاهده نمی‌شود، اما میانگین شدت خشکسالی‌ها در فردوس از ۲/۵۴ به ۳/۲۸ و در طبس از ۳/۰۱ به ۴/۲۳ افزایش یافته است که نشان می‌دهد خشکسالی‌های آینده در هر دو منطقه از شدت بیشتری برخوردار خواهند بود. همچنین، میانگین مدت خشکسالی در فردوس از ۸ به ۸/۵ ماه و در طبس از ۸ به ۱۰ ماه افزایش یافته

جدول ۶. ویژگی رویدادهای خشکسالی دوره پایه و آتی شهرستان فردوس و طبس

Table 6. Characteristics of drought events in the base and future periods of Ferdows and Tabas counties

| شاخص<br>Index   | طبس (دوره آتی)<br>Tabas<br>(future period) | طبس (دوره پایه)<br>Tabas<br>(base period) | فردوس (دوره آتی)<br>Ferdows<br>(future period) | فردوس (دوره پایه)<br>Ferdows<br>(base period) |
|---|--|---|--|---|
| تعداد رخدادها<br>Number of events                         | 6  | 6   | 6  | 5   |
| بالاترین شدت<br>Highest intensity                         | 11.32                                      | 8.92                                      | 8.93   | 8.45  |
| طولانی ترین مدت (ماه)<br>Longest duration<br>(month)      | 12   | 12  | 12   | 12  |
| میانگین شدت<br>Average intensity                          | 4.23                                       | 3.01                                      | 3.28   | 2.54  |
| میانگین مدت (ماه)<br>Average duration<br>(month)          | 10   | 8   | 8.5  | 8   |
| مدت کل خشکسالی (ماه)<br>Total drought duration<br>(month) | 60   | 48  | 51   | 40  |

درصدی در شدت خشکسالی گزارش شد، در حالی که در پژوهش حاضر، افزایش ۲۵ تا ۴۰ درصدی در میانگین شدت خشکسالی‌ها در شهرستان‌های فردوس و طبس مشاهده گردید. این اختلاف نشان‌دهنده‌ی آسیب‌پذیری بیشتر اقلیم خشک شرق ایران در مقایسه با مناطق مرطوب‌تر شمال کشور است.

در سطح ملی، نتایج با مطالعه‌ی زرین و داداشی‌رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari., 2021) بر روی خشکسالی‌های هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه نیز هم‌راستا است، اما پژوهش حاضر با استفاده از شاخص RunDS مبتنی بر نظریه ران، توانسته است شدت و مدت خشکسالی‌ها را به‌صورت دقیق‌تری کمی‌سازی کند. این موضوع یکی از جنبه‌های متمایز و برتر این تحقیق نسبت به مطالعات مشابه محسوب می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بر پایه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI نشان داد که شهرستان‌های فردوس و طبس در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۹) تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 با افزایش معنادار شدت و تداوم خشکسالی مواجه

نتایج این پژوهش نشان داد که در افق آینده میانی (۲۰۳۰-۲۰۵۹) تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5، شدت و تداوم خشکسالی در استان خراسان جنوبی، به‌ویژه در شهرستان‌های طبس و فردوس، افزایش خواهد داشت. این یافته با نتایج مطالعات پیشین در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران و سایر نقاط جهان همسو است، اما از نظر ترکیب مدل‌ها، شاخص‌ها و روش تحلیل دارای نوآوری‌های روش‌شناختی است.

مطالعه‌ی ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2025) که روند خشکسالی‌های هواشناسی استان خراسان جنوبی را بر پایه شاخص‌های SPI و PNPI در دوره‌ی تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ تحلیل کردند، تنها به بررسی گذشته محدود بود و پیش‌بینی آینده اقلیم را انجام نداد. در مقابل، پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های نسل ششم اقلیمی (CMIP6) و روش آماری BCSD، تغییرات احتمالی خشکسالی در افق آینده را شبیه‌سازی کرده و تصویر کمی‌تری از شدت و تداوم آن ارائه می‌دهد. نتایج این تحقیق همچنین با یافته‌های عسگری و همکاران (Asgari et al., 2023) در حوضه آبخیز گرگانود قابل مقایسه است. در آن پژوهش، تحت سناریوهای اقلیمی CMIP6، افزایش حدود ۱۵ تا ۲۰

داشت. این امر می‌تواند منجر به تغییر رژیم هیدروکلیماتیک منطقه و گذار از شرایط نیمه‌خشک به خشک گردد. بنابراین، تلفیق داده‌های اقلیمی با سیاست‌گذاری‌های مدیریتی در سطح استانی و حوضه‌ای، شرط اساسی برای ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم‌ها، کشاورزی و معیشت انسانی در برابر تغییر اقلیم است.

#### منابع

Ataei, H., Kouhi, M., Modirian, R., & Bazrafshan, B. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over kashafrood basin based on statistical and dynamical downscaling methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), pp.183-202. <https://doi.org/10.22111/JNEH.2021.37827.1777>.

Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M. A. & Barlow, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.

Asgari, E., Norouzi Nazar, M. S., Baaghdeh, M., and Entezari, A. (2023). Assessing the impacts of climate change on future droughts in the Gorganroud Watershed under CIMP6 models. *Climate Change Research*, 4(14), 27-42. <https://doi.org/10.30488/ccr.2023.397170.1134>. (In Persian)

Bazrafshan, J., "Comparative study of meteorological drought in some climate sample of Iran", *M.A. Thesis in Agricultural Meteorology*, Tehran University, 2002. (In

خواهند بود. مقادیر میانگین شاخص SPI در شهرستان فردوس از ۰/۴- در دوره پایه به حدود ۰/۹- در دوره آتی و شاخص SPEI از ۰/۷- به ۱/۳- کاهش یافته است؛ این تغییرات نشانگر کاهش حدود ۰/۵ تا ۰/۶ واحدی در وضعیت رطوبتی و انتقال شرایط اقلیمی منطقه از خشکی خفیف به خشکسالی متوسط است. در شهرستان طبس، کاهش مقادیر شاخص‌ها چشمگیرتر بوده است؛ به طوری که SPI از ۰/۶- به حدود ۱/۲- و SPEI از ۱- به حدود ۱/۸- رسیده است. این مقدار تغییر معادل افزایش شدت خشکسالی حدود ۰/۷ تا ۰/۸ واحد است و نشان می‌دهد که طبس در مقایسه با فردوس آسیب‌پذیری بیشتری در برابر تغییرات اقلیمی دارد.

علاوه بر این، نتایج تحلیل تئوری ران نشان داد که میانگین شدت خشکسالی در شهرستان فردوس از ۲/۵۴ در دوره پایه به ۳/۲۸ و در شهرستان طبس از ۳/۰۱ به ۴/۲۳ افزایش یافته است، که بیانگر افزایش میانگین شدت خشکسالی به میزان ۲۵ تا ۴۰ درصد در افق آینده است. مدت کل خشکسالی‌ها نیز در فردوس از ۴۰ به ۵۱ ماه و در طبس از ۴۸ به ۶۰ ماه افزایش یافته است؛ این تغییرات نشان‌دهنده افزایش حدود ۲۰ تا ۲۵ درصدی در تداوم خشکسالی‌ها است. از منظر مدیریتی، این یافته‌ها حاکی از کاهش پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش احتمال افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی، و تهدید امنیت آبی در استان خراسان جنوبی است. لذا اتخاذ سیاست‌های سازگاری اقلیمی و مدیریت هوشمند منابع آب ضروری است. مهم‌ترین راهبردهای پیشنهادی شامل، بازنگری در الگوی کشت و جایگزینی گونه‌های مقاوم به خشکی، توسعه سامانه‌های آبیاری کارآمد (نظیر آبیاری قطره‌ای و تحت فشار)، طراحی سامانه‌های پایش و هشدار زودهنگام خشکسالی با استفاده از شاخص‌های چند متغیره، تدوین طرح‌های سازگاری منطقه‌ای بر اساس مدل‌های اقلیمی و مدیریت یکپارچه منابع آب و اقلیم با رویکرد بین‌بخشی می‌باشد. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه بیانگر آن است که خشکسالی‌های آتی در استان خراسان جنوبی نه تنها از نظر شدت، بلکه از نظر فراوانی و تداوم نیز روند افزایشی خواهند

- Ghaemi, A., Hashemi Monfared, S. A., Bahrpeyma, A., Mahmoudi, P. and Zounemat-Kermani, M. (2022). Spatiotemporal variation of projected drought characteristics of Iran under the climate change scenarios. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 5(1), 68-80. <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.390166.1199>
- Hajarian, A. (2025). Meteorological drought risk monitoring and zoning using random forest model. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 83-94. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>. (In Persian)
- Hajiabadi, F., Hasanpour, F., Yaghoobzade, M. and Hammami, H. (2018). Drought analyzing in Birjand with emphasis on calibrated palmer drought severity index and relative yield of rain-fed wheat crop. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(1), 130-142. (In Persian)
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., Ouyang, W., & Cheng, H. (2017). An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environmental modelling & software*, 91, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.008>
- Helmi, M. and Shahidi, A. (2023). The using of SPI and SPEI indices in evaluating the effect of drought on quality of surface water resources (case study: Kashafrud river). *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 83-96. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>
- Persian)
- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Moridi, A., and Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Determining the impact of climate change on groundwater drought using CMIP6 models (case study: Shahrekord Plain). *Journal of Ecohydrology*, 9(2), 419-436. <https://doi.org/10.22059/jje.2022.342077.1633>
- Delghandi, M., Joorablou, S., and Ganji Nowroozi, Z. (2023). The impact of climate change on the severity, duration, and magnitude of drought using SPI and RDI in semnan region. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 1-18. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>
- Doostan, R.. (2016). Analysis of the Iran droughts in the past half century. *Journal of climate research*. 6(23-24), 106-107. *SID*. <https://sid.ir/paper/355827/en>. (In Persian)
- Dukat, P., Bednorz, E., Ziemblńska, K., & Urbaniak, M. (2022). Trends in drought occurrence and severity at mid-latitude European stations (1951–2015) estimated using standardized precipitation (SPI) and precipitation and evapotranspiration (SPEI) indices. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00858-w>
- Farjad, B., Gupta, A. & Marceau, D. J. (2015). Hydrological regime responses to climate change for the 2020s and 2050s periods in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada. *Environmental management of river basin ecosystems*, 65-89. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13425-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13425-3_4)

- Khosravi, M., M. Akbari,(2009). "Analyzing drought features of South Khorasan", *Geography and Development Quarterly*, Vol. 14, pp. 51-68.
- Li XiangXiang, L. X., Ju Hui, J. H., Sarah, G., Yan ChangRong, Y. C., Batchelor, W. D., & Liu Qin, L. Q. (2017). Spatiotemporal variation of drought characteristics in the Huang-Huai-Hai Plain, China, under the climate change scenario. *Journal of Integrative Agriculture* 16(10): 2308–2322 [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61545-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61545-9).
- Li, Y., Lu, H., Yang, K., Wang, W., Tang, Q., Khem, S., & Huang, Y. (2021). Meteorological and hydrological droughts in Mekong River Basin and surrounding areas under climate change. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 36, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100873>
- Mazidi, ., Mohammadi Ravari, F. and Behzadi Shar Babak, Z. (2023). Assessment of the Drought Situation in Kerman Using Drought Indicators and its Relationship with the State of Vegetation Change in the Region. *Nivar*, 47(120-121), 166-180. <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.394900.1244>. (In Persian)
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183)*.
- Mostafazadeh, R. and Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using [org/10.22077/jdcr.2023.6023.1008](https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6023.1008)
- Hewitson, B. C., & Crane, R. G. (1996). Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7(2), 85-95. <https://doi.org/10.3354/cr007085>.
- Hosseinabadi, S., Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., & Foroozanmehr, M. (2020). Meteorological drought assessment in future periods by using of the data of the fifth report of climate change (Case study: Zabol and Shiraz Cities). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 10(40), 78-87. (In Persian)
- Huang, Y. F., Ang, J. T., Tiong, Y. J., Mirzaei, M., & Amin, M. Z. M. (2016). Drought forecasting using SPI and EDI under RCP-8.5 climate change scenarios for Langat River Basin, Malaysia. *Procedia Engineering*, 154, 710-717. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.573>
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Izadi, N., dastourani, M., and Amirabadizadeh, M. (2025). Investigation of trend changes in meteorological drought in South Khorasan province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 18(6), 879-893.

- Dastourani, M. 2018. Performance comparison of GP, ANN, BCSD and SVM models for temperature simulation. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1(1), pp. 51-64. <https://sid.ir/paper/268650/en>.
- Taylan, E. D. (2024). An approach for future droughts in Northwest Türkiye: SPI and LSTM methods. *Sustainability*, 16(16), 6905. <https://doi.org/10.3390/su16166905>.
- Vali, A. A., Zarepour, H., Ghorbani, H., Sadatinejad, S. J. and Alavinia, S. H. (2022). Long-term statistical analysis of meteorological drought trends in isfahan province. *Desert Ecosystem Engineering*, 11(34), 113-126. <https://doi.org/10.22052/deej.2021.11.34.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., & Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21, 763-774. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9076-5>.
- Wood, A.W., aurer, E.P., Kumar, A. and Lettenmaier, D.P., 00. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), pp.ACL-6. <https://doi.org/10.1029/2000JD001198>
- R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643. doi: 10.22059/jesphys.2016.57881. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.57881>.
- Nejad Moghbal, N, Mosaedi, A., Azari, M., Esmaili, K., & Farid Hosseini, A. (2017). Drought assessment based on SPI and SPEI indices and their relationship with groundwater resource drought (Case study: Jiroft plain). *14th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction*. (In Persian)
- Pendergrass, A. G., Meehl, G. A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., AghaKouchak, A. & Woodhouse, C. A. (2020). Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nature Climate Change*, 10(3), 191-199. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0709-0>.
- Sarker, M. A. R., Ansar, S. B., Esraz-Ul-Zannat, M., & Sarker, S. K. (2022). A meteorological drought index-based approach: a spatial and temporal investigation of wet and dry period trends in bangladesh between 1980 and 2018. *Available at SSRN 4245551*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4245551>
- Senatore, A., Fuoco, D., Maiolo, M., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2022). Evaluating the uncertainty of climate model structure and bias correction on the hydrological impact of projected climate change in a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101120. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101120>
- Tabatabaei, S. M., Nazeri Tahroudi, M, and

[org/10.1029/2001JD000659](https://doi.org/10.1029/2001JD000659).

- Yaghoub Zadeh, M., Ahmadi, M., Seyed Kaboli, H., Zamani, G. R. and Amir Abadi Zadeh, M. (2017). The evaluation of effect of climate change on agricultural drought using ETDI and SPI Indexes. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 43-61. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12202.2671>.
- Yaman Öz, F., e Özelkan, E., Tatlı, H. (2024). Comparative analysis of SPI, SPEI, and RDI indices for assessing spatio-temporal variation of drought in Türkiye. *Earth Science Informatics*. 17:4473–4505. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01401-8>
- Yevjevich, V. M. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts* (Vol. 23, p. 25). Fort Collins, CO, USA: Colorado State University.
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 643-660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022). Future changes in precipitation extremes over Iran: insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179(1), 441-464. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02904-x>. (In Persian)