



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 5, No. 19, Autumn 2024



Investigating the effects of climate change on droughts in Razavi Khorasan province using the SPEI index

Mahsan Koroozhdeh¹, Karim Amininia^{2*}, Seyed Mahdi Saghebian³

¹ Doctoral student of Climatology, Department of Geography, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran, Email: mahsankoroozhdeh@gmail.com

² Department of Geography, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran, Email: karimaminini@gmail.com

³ Department of Civil Engineerin, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran, Email: smsaghebian@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2024-4-24
Accepted: 2024-6-25

Keywords:
SSP scenario
CMHyd software
DCF method
SPEI index
CMIP6 models

ABSTRACT

Khorasan Razavi province is one of the provinces prone to drought in Iran. This study has assessed the spatio-temporal changes in the drought events in Khorasan Razavi province using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). For this purpose, initially, the IPSL-CM6, MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4, and MIROC6 models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) were examined on an annual scale. The results showed that among the models, GFDL-ESM4 has a higher correlation with temperature and precipitation data from synoptic stations. Therefore, this model was selected and then downscaled using the CMHyd software, and the results of this model were used to calculate drought. In this research, the delta change factor (DCF) method was used for downscaling precipitation and temperature. Also, the intermediate scenario (SSP2-4.5) was used for drought projecting. The intensity and frequency of meteorological drought during the historical period from 1990 to 2014 and the future period from 2026 to 2050 were examined. The results indicated that drought in Khorasan Razavi province is subject to significant changes; such that the maximum annual frequency of drought during the historical period is 25%, and under the SSP2-4.5 scenario, it reaches 31%. The frequency and intensity of drought in the future, especially during the spring and summer seasons, will significantly increase. Geographically, the intensity of drought in all seasons is highest in the north and east of the province.

Cite this article: Koroozhdeh, M., Amininia, K., Saghebian, S.M. (2024). Investigating the effects of climate change on droughts in Razavi Khorasan province using the SPEI index. *Journal of the Climate Change eSearch*, 5 (19), 19-36.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.455649.1213



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال پنجم / شماره مسلسل نوزدهم / پاییز ۱۴۰۳ / صفحات: ۳۶-۱۹

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص SPEI

مهسان کروژده^۱، کریم امینی‌نیا^{۲*}، سیدمهدی ثاقبیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری رشته آب و هواشناسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران، رایانامه: mahsankoroozhdeh@gmail.com

^۲ گروه جغرافیا، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران، رایانامه: karimaminini@gmail.com

^۳ گروه عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران، رایانامه: smsagheblian@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: سناریوهای SSP نرم افزار CMHyd روش DCF شاخص SPEI مدل‌های CMIP6</p>	<p>این مطالعه تغییرات مکانی-زمانی وقوع خشک‌سالی را در استان خراسان رضوی توسط شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) ارزیابی کرده است. برای این منظور ابتدا مدل‌های IPSAL-CM6، MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 و MIROC6 از سری مدل‌های فاز ششم (CMIP6) در مقیاس سالانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که GFDL-ESM4 از بین مدل‌های مورد بررسی دارای همبستگی بالاتری با دما و بارش داده‌های ایستگاهی است. پس از انتخاب مدل GFDL-ESM4 با استفاده از نرم‌افزار CMHyd ریزمقیاس‌نمایی انجام شده است و از نتایج این مدل برای محاسبه خشک‌سالی استفاده شد. در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی از روش تغییر عامل دلتا (DCF) برای بارش و دما استفاده شد. همچنین برای پیش‌نگری خشک‌سالی از سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) استفاده شد. شدت و فراوانی خشک‌سالی هواشناسی در دوره تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و دوره آینده ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که خشک‌سالی در استان خراسان رضوی دارای تغییرات زیادی است؛ به طوری که بیشینه فراوانی سالانه خشک‌سالی در دوره تاریخی ۲۵ درصد است و این مقدار تحت سناریوی SSP2-4.5 به ۳۱ درصد می‌رسد. فراوانی و شدت خشک‌سالی در آینده به ویژه در طول فصول بهار و تابستان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از نظر جغرافیایی شدت خشک‌سالی در تمامی فصول در شمال و شرق استان بیشینه است.</p>

استناد: کروژده، مهسان؛ امینی‌نیا، کریم؛ ثاقبیان، سیدمهدی. (۱۴۰۳). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص SPEI. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۹)، ۳۶-۱۹.

Doi: 10.30488/CCR.2024.455649.1213

ناشر: دانشگاه گلستان
© نویسندگان.



مقدمه

خشک‌سالی پیامدهای اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی در سطح جهانی دارد و مدیریت آن به دلیل رخداد آهسته آن دشوار است (Bachmair et al., 2016). پیامدهای خشک‌سالی در بیشتر موارد، زمانی احساس می‌شود که تأمین آب برای مصارف کشاورزی و انسانی پایدار نباشد (Clark et al., 2016). با این حال، خشک‌سالی‌ها می‌توانند اثرات مخربی بر ساختار و عملکرد پوشش گیاهی داشته باشند و در نهایت می‌توانند تغییرات گسترده‌ای در اکوسیستم‌ها ایجاد کنند (Fensham et al., 2012). خشک‌سالی به طور طبیعی رخ می‌دهد اما می‌تواند توسط عوامل انسانی و اقلیمی تشدید شود (Lott et al., 2013). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی، فراوانی و شدت خشک‌سالی را در سراسر جهان تشدید کرده است. بانک جهانی به طور مستقیم بیش از هشتصد هزار مرگ‌ومیر در سراسر جهان را به خشک‌سالی‌هایی نسبت داده که بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۷ اتفاق افتاده است. همچنین خشک‌سالی را مسئول بزرگ‌ترین کاهش تولید ناخالص داخلی (GDP) معرفی کرده است (World Bank, 2018).

خشک‌سالی‌ها مخاطرات طبیعی هستند که تحت تأثیر تغییر اقلیم تشدید می‌شوند و در مقیاس‌های مختلف زمانی-مکانی رخ می‌دهند (Mishra & Singh, 2010). برخلاف خشکی که یک ویژگی اقلیمی است، خشک‌سالی‌ها به دلیل عدم تعادل موقت در دسترسی به آب ایجاد می‌شوند. دهه‌های پایانی قرن بیستم و سال‌های اولیه قرن بیست و یکم مخاطرات اقلیمی بسیاری در سراسر جهان اتفاق افتاده است که از میان آن‌ها خشک‌سالی و امواج گرمایی بیش‌تر از سایر مخاطرات اتفاق افتاده‌اند (IPCC, 2022). در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی مانند سیل یا طوفان، تشخیص خشک‌سالی پیچیده‌تر است؛ چرا که خشک‌سالی اساساً یک پدیده خزنده است و اثرات طولانی‌مدت آن ممکن است ماه‌ها یا حتی سال‌ها پس از اوج خشک‌سالی ظاهر شود (Cherlet et al., 2018).

خشک‌سالی انواع و تعاریف مختلفی دارد که می‌توان به خشک‌سالی‌های هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی، اجتماعی-اقتصادی و خشک‌سالی اکولوژیکی اشاره کرد (Mishra & Singh, 2010). خشک‌سالی هواشناسی نشان‌دهنده فقدان بارش در یک دوره زمانی کوتاه‌مدت معمولاً کمتر از ۳ ماه است که البته این دوره زمانی می‌تواند برای هر منطقه بیش‌تر یا کمتر باشد (Wilhite & Glantz, 1985). در صورتی که خشک‌سالی کشاورزی نشان‌دهنده کاهش بارش و رطوبت خاک به قدری است که رشد گیاه متوقف شود و در نهایت خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر چرخه آب تأثیر می‌گذارد. انواع مختلف خشک‌سالی می‌تواند منجر به اثرات متفاوت و اغلب جبران‌ناپذیر بر بخش‌های مختلف اقتصادی مانند کشاورزی، منابع آب، تولید برق آبی و... شود. همچنین خشک‌سالی اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی بسیاری همانند خشک شدن تالاب، تخریب خاک و زمین و مهاجرت را به همراه دارد (Cook et al., 2015). در نتیجه بررسی خشک‌سالی به عنوان یک مخاطره اقلیمی و همچنین درک بهتر جنبه‌های مختلف آن در شرایط تغییر اقلیم ضروری است.

چندین شاخص برای تعیین کمیت خشک‌سالی توسعه داده شده است؛ به عنوان مثال می‌توان به شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI) و نسخه‌های اصلاح‌شده آن (Dai, 2011)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (McKee et al., 1993) و شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) اشاره کرد. هر یک از این شاخص‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند (Dai, 2011). در مقایسه با سایر شاخص‌ها، SPI که بر اساس بارش است می‌تواند در هر مقیاس مکانی و زمانی مورد استفاده قرار گیرد (McKee et al., 1993). خشک‌سالی را می‌توان با استفاده از ویژگی‌های مختلفی مانند فراوانی و شدت مورد بررسی قرار داد (Zhai et al., 2016). در سال‌های اخیر، مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل‌های جفت شده (CMIP6) به ابزارهای کلیدی برای پیش‌نگری خشک‌سالی آینده

در ماه‌های فصل تابستان فراوانی بیشتری را نشان می‌دهد (Essa et al. 2023).

تحقیقات متعددی خشک‌سالی را در مناطق مختلف ایران بررسی کرده‌اند. تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی خشک‌سالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص SPEI نشان دادند که عامل تبخیر و تعرق، نقش مؤثری در تغییر شدت خشک‌سالی دارد، به گونه‌ای که با وجود افزایش (کاهش) بارش در مقایسه با میانگین بلندمدت به‌ویژه در بخش‌های جنوبی کشور، به علت افزایش (کاهش) تبخیر و تعرق، شدت خشک‌سالی افزایش (کاهش) یافته است. مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۳۹۵) به تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد که ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی SPI و SPEI، شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص نموده است. بررسی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز قره‌سو پژوهشی است که کریمی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی آن پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد شدت خشک‌سالی از سال ۱۳۷۸ به تدریج افزایش یافته است که شدیدترین خشک‌سالی طبق مقادیر به‌دست‌آمده از هر یک از شاخص‌های خشک‌سالی در سال ۱۳۸۶ و طولانی‌ترین خشک‌سالی طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ رخ داده است. همچنین نتایج نشان داد که در سال‌های اخیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی با یک تأخیر زمانی یک تا دو ساله نسبت به خشک‌سالی هواشناسی رخ داده است. بر اساس نتایج خشک‌سالی هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی در طبقه متوسط و خشک‌سالی هیدرولوژیکی منابع آب زیرزمینی در شمال شرقی و جنوب غربی حوضه و تا حدی بخش‌های مرکزی در طبقه خیلی شدید قرار گرفته است. حاجی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۹) به پیش‌نگری خشک‌سالی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم در منطقه بیرجند پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که در دوره آماری ۲۰۲۶

تبدیل شده‌اند (Cook et al., 2015). دافی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های منطقه آمازون پرداختند. آن‌ها نشان دادند که فراوانی و شدت خشک‌سالی در منطقه آمازون به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و پیش‌بینی می‌شود که مناطق تحت تأثیر خشک‌سالی تا پایان قرن بیست و یکم تقریباً سه برابر شود (Duffy et al., 2015). بررسی‌ها در سطح جهانی نشان داد که خشک‌سالی در مناطق مرطوب جهان در هشت دهه آینده روند افزایشی خواهد داشت (Martin, 2018). ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی احتمالاً در طول قرن بیست و یکم روند افزایشی خواهد داشت، به طوری که تقریباً ۳۰ درصد از مناطق زمینی تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای آتی کمبود آب را تجربه خواهند کرد (Vicente-Serrano et al., 2020). چن و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی به بررسی رژیم‌های خشک و مرطوب پیش‌بینی‌شده در چین با استفاده از شاخص SPEI بر اساس مدل‌های CMIP6 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به جز شمال غربی چین و فلات تبت، مدت و شدت خشک‌سالی شدید در سایر مناطق افزایش می‌یابد (Chen et al., 2022). ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) افزایش خطر خشک‌سالی‌های آینده در حوضه رودخانه یانگ تسه را بر اساس مدل‌های CMIP6 مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نسبت خشک‌سالی‌های شدید پاییزی در اواسط قرن بیست و یکم افزایش خواهد یافت. همچنین آن‌ها نشان دادند که مواجهه با خطر خشک‌سالی شدید در بخش بالایی و در عین حال در مناطق متوسط پایین‌دست حوضه، به‌ویژه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۴۰ افزایشی خواهد بود (Zhang et al., 2023). در پژوهشی دیگر اسما و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های خشک‌سالی را در مدیترانه تحت تغییرات آب و هوایی آینده با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی کردند و نشان دادند که رخداد خشک‌سالی در این منطقه فصلی بوده و خشک‌سالی‌های هواشناسی

شمالغرب و غرب حوضه آبریز کارون بیشتر در معرض شرایط خشک قرار خواهند داشت. لذا با توجه به روند افزایش شاخص خشکسالی به سمت شرایط خشک در ایستگاه‌های بروجرد، صفی‌آباد و کوهرنگ، خطر خشکسالی طی دوره‌های ۲۰۷۳-۲۰۹۹ و ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در این ایستگاه‌ها بیشتر است. بررسی‌های پژوهشی در زمینه خشکسالی ایران با استفاده از مدل‌های CMIP6، روند نگران‌کننده‌ای از افزایش شدت خشکسالی در کشور را نشان می‌دهد بطوریکه جعفرپور و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی فضایی ویژگی‌های خشکسالی ناشی از تغییر اقلیم در اقلیم‌های مختلف بر اساس شاخص خشکی دمارتن در ایران پرداخت. نتایج وی نشان داد که با افزایش دما شرایط خشکسالی را کشور تشدید خواهد شد. نتایج پژوهش تحلیل‌های مکانی خشکسالی در استان فارس توسط طاهری و مسعودی (۲۰۲۳)، خطر گسترده شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید را در این استان نشان داده و بر اهمیت ارزیابی مخاطرات خشکسالی برای برنامه‌ریزی کارآمد استفاده از زمین و مدیریت منابع تاکید کردند. عسگری و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CMIP6 به این نتیجه رسیدند که شرایط منطقه در دهه‌های آتی در محدوده‌های نزدیک به نرمال یا ترسالی خواهد بود. این وضعیت در دوره آینده نزدیک در سناریو SSP5-8.5 نیز ادامه دارد. اثرات تغییر اقلیم بر ریسک مخاطره خشکسالی در تهران با بهره‌گیری از مدل‌های CMIP6 پژوهشی است که محمدی و حجازی‌زاده (۱۴۰۳) به بررسی آن پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که انتظار می‌رود با توجه به دوره‌های خشکسالی را که تهران تجربه کرده است، مستعد خشکسالی خیلی شدید در دوره‌های آتی باشد.

استان خراسان رضوی یکی از مراکز اصلی جمعیتی و قطب کشاورزی و صنعتی شمال شرق ایران است. طبیعتاً مناطق مختلف استان به دلیل احاطه شدن توسط مناطق خشک و به دلیل داشتن

تا ۲۰۳۵ بر اساس پیش‌نگری مدل‌ها تحت هر دو سناریوی واداشت تابشی RCP4.5 و RCP8.5 و مقادیر شاخص SC-PDSI، شدت خشکسالی کشاورزی بیش از سال‌های دیگر دوره آینده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد، مدل‌های MIROC-ESM و CSIRO-Mk3.6 و نیز سناریوی RCP8.5 بیشترین تعداد سال همراه با خشکسالی را در آینده پیش‌نگری می‌کنند. زرین و داداشی‌رودباری (۱۴۰۰) به پیش‌نگری همادی نمایه‌های خشکسالی در ایران مبتنی بر برون‌داد چند مدل CMIP5 پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد شاخص خشکی (AI) که تعادل بین عرضه و تقاضای آب را در فصل مشترک جو-زمین نشان می‌دهد حداکثر ۳/۱۵ درصد در متوسط پهنه ایران افزایش خواهد داشت. همچنین روزهای خشک و دوره خشک حداکثر به ترتیب ۷/۵۰ و ۲۸/۸۴ درصد در دهه‌های آینده افزایش دارند. حیدرزاده و نوحه‌گر (۱۴۰۰) به پایش خشکسالی هواشناسی آینده با استفاده از مدل‌های CMIP5 و زنجیره مارکوف در بندرعباس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد بررسی احتمال خشکسالی با زنجیره مارکوف هر طبقه تمایل به انتقال طبقه نزدیک خود دارد. طبق هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بیشترین احتمال مربوط به طبقه نرمال است. پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه پژوهشی است که زرین و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی آن پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که پیش‌نگری خشکسالی با مدل‌های CMIP6 نشان از افزایش قابل توجه رخداد‌های خشکسالی عمدتاً در غرب و شمال حوضه برای دوره گرم سال دارد. شدت خشکسالی و درصد سال‌های کمتر از نرمال در آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) بیش‌تر از آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) بخصوص برای سناریو SSP5-8.5 در متوسط پهنه‌ای حوضه است. کوهی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 با استفاده از روش فازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق شمالی،

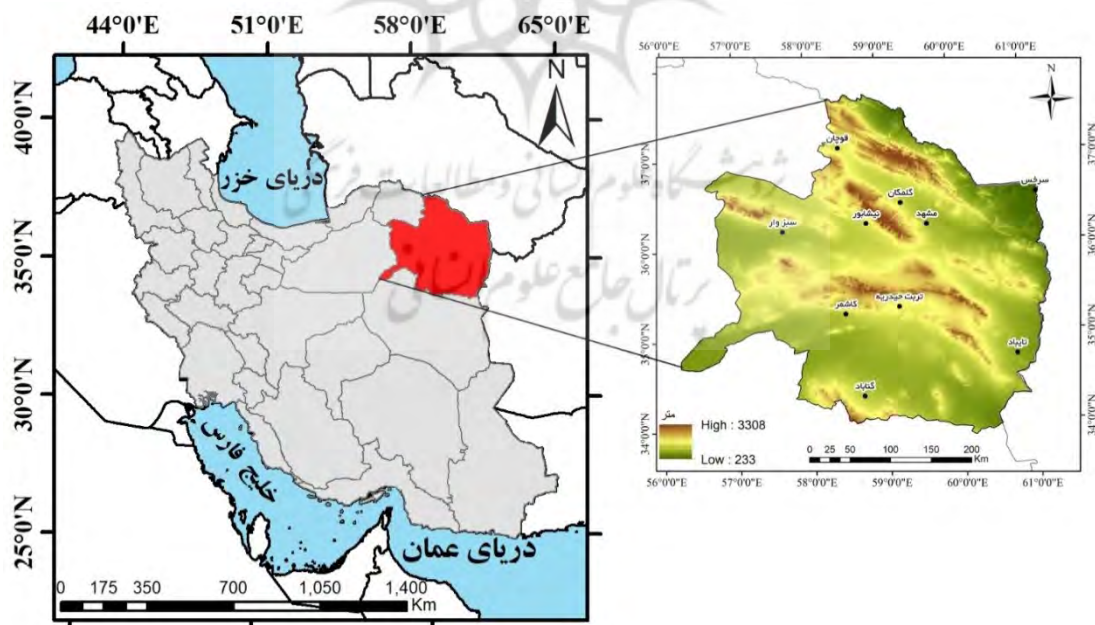
شاخص خشک‌سالی هواشناسی در نتیجه تغییرات مستقیم بارش تحت شرایط تغییر اقلیم است در این پژوهش از شاخص SPEI-1 استفاده شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند نقش مهمی را در برنامه‌های مرتبط با آب و کشاورزی داشته باشد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه: استان خراسان رضوی بین ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول خاوری و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته که از شمال به کشور ترکمنستان، از شرق به افغانستان، از غرب و شمال غربی به استان‌های خراسان شمالی و سمنان و از جنوب و جنوب غربی به استان‌های خراسان جنوبی و یزد محدود است. در این پژوهش به منظور ارزیابی خشک‌سالی از ایستگاه‌های سینوپتیک در استان با دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌ها و جدول (۲) مشخصات مدل‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

توپوگرافی پیچیده، نسبت به تغییر اقلیم بسیار شکننده است. افزایش دما و کاهش بارش در استان باعث بروز حوادث غیرمنتظره جوی همانند امواج گرمایی و خشک‌سالی و در نتیجه از بین رفتن تنوع زیستی و بهره‌وری کشاورزی شده است (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰). اثرات بالقوه تغییر اقلیم در این استان شامل بارش‌های نامنظم، خشک‌سالی و بیابان‌زایی است. لذا بررسی خشک‌سالی‌های آینده این استان یک ضرورت کلیدی محسوب می‌شود.

در حالی که خشک‌سالی‌های جدی در استان خراسان رضوی وجود داشته است، ارزیابی مکانی و زمانی طولانی‌مدت وقوع خشک‌سالی به خصوص در آینده ناشناخته باقی مانده است. این امر منجر به آمادگی ضعیف و راهبردهای ناآگاهانه برای مدیریت خشک‌سالی در استان شده است. از سوی دیگر این شاخص‌ها تأثیر تغییر اقلیم بر الگوهای خشک‌سالی را نشان نمی‌دهند. برای این منظور، نیاز به یک بررسی دقیق از الگوهای مکانی-زمانی طولانی‌مدت خشک‌سالی آن هم با شاخصی دقیق‌تر همانند SPEI در استان خراسان رضوی وجود دارد. از آنجاییکه



شکل ۱. موقعیت استان خراسان رضوی و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی

بیشینه، قوچان سردترین ایستگاه استان است. پایین‌ترین و بالاترین دمای کمینه به ترتیب در ایستگاه قوچان برابر با ۵/۸۹ و در ایستگاه کاشمر برابر با ۱۲/۱۷ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. ضمن اینکه دمای بیشینه در استان بین ۱۹/۸۱ تا ۲۵/۵۲ درجه سانتی‌گراد در تغییر است (جدول ۱).

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی استان طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴، بیشترین بارش در ایستگاه قوچان با ۳۲۱ میلی‌متر و کمترین بارش در ایستگاه گناباد با ۱۳۲ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین بررسی متغیرهای دمایی نیز نشان داده است بر اساس متغیرهای دمای میانگین، دمای کمینه و دمای

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی همدید در استان خراسان رضوی

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دمای کمینه	دمای بیشینه	دمای میانگین	بارش
۱	سرخس	۲۷۵	۶۱/۱۵	۳۶/۵۴	۱۱/۶۹	۲۵/۵۲	۱۸/۷۴	۱۹۷/۲۸
۲	تایباد	۹۰۰/۴	۶۰/۷۷	۳۶/۷۵	۱۱/۵۶	۲۴/۸۲	۱۸/۶۴	۲۳۴/۱۲
۳	گناباد	۱۰۵۶	۵۸/۶۸	۳۶/۳۵	۱۱/۲۱	۲۴/۲۲	۱۸/۵۳	۱۳۲/۱۰
۴	تربت حیدریه	۱۴۵۱	۵۹/۲۱	۳۵/۳۳	۷/۸۹	۲۱/۱۳	۱۴/۳۰	۲۴۸/۴۱
۵	کاشمر	۱۱۰۹/۷	۵۸/۴۷	۳۵/۲۷	۱۲/۱۷	۲۴/۰۵	۱۸/۵۸	۱۹۳/۰۲
۶	مشهد	۹۹۹/۲	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹/۲۴	۲۲/۳۰	۱۵/۴۶	۲۴۴/۴۹
۷	گلمکان	۱۱۷۶	۵۹/۲۸	۳۶/۴۸	۶/۸۴	۲۰/۴۲	۱۵/۴۹	۲۰۷/۲۵
۸	نیشابور	۱۲۱۳	۵۸/۸۰	۳۶/۲۷	۶/۷۹	۲۲/۳۴	۱۴/۸۱	۲۳۵/۴۳
۹	سبزوار	۹۶۲	۵۷/۶۵	۳۶/۲۱	۱۲/۰۳	۲۵/۰۶	۱۷/۹۴	۱۸۳/۸۷
۱۰	قوچان	۱۲۸۷	۵۸/۴۵	۳۷/۱۲	۵/۸۹	۱۹/۸۱	۱۲/۵۹	۳۲۱/۶۵

مدل‌ها و سناریوهای مورد بررسی: در این پژوهش از GCM^۱ های تولیدشده توسط پروژه CMIP6^۲ تحت سناریوهای اقتصادی-اجتماعی (SSPs^۳) استفاده شده است. مدل‌های CMIP6 جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم هستند که تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی در اختیار پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها دارای تفکیک افقی و طرح‌واره‌های فیزیکی^۴ بهتری نسبت به مدل‌های CMIP5 هستند (O'Neill et al., 2016). مجموعه مدل‌های CMIP6 در یک شبکه استاندارد، دامنه‌های ثابت و فرمت‌های گوناگون در اختیار پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از سناریوی حد واسط SSP2-4.5 استفاده شد.

سناریوی SSP2-4.5 برای تحقیق در زمینه آسیب‌پذیری‌های ناشی از تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Warnatzsch & Reay, 2019). در این تحقیق مبنای انتخاب مدل‌ها بر اساس مدل سیستم زمین (ESM) و تفکیک افقی بالا بوده لذا برای این منظور مدل‌های IPSAL-CM6، MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 و MIROC6 مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲). این مدل‌ها از پایگاه <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz> قابل اخذ هستند.

¹ General circulation models (GCMs)

² Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

³ Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

⁴ Physical schemas

جدول ۲. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحقیق

نام مدل	موسسه	کشور	تفکیک مکانی
IPSAL-CM6	موسسه پیر سیمون لاپلاس	فرانسه	150 km
MRI-ESM2-0	موسسه تحقیقات هواشناسی	ژاپن	100 km
GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک شارهای ژئوفیزیکی	ایالات متحده آمریکا	50 km
MIROC6	موسسه ملی مطالعات محیط‌زیست، دانشگاه توکیو	ژاپن	250 km

تائید شده است (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹). روش DCF از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$T_{contr}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \quad (1)$$

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[\frac{\mu_{mP_{frc}(t)}}{\mu_{mP_{contr}(t)}} \right], \quad (2)$$

در روابط بالا، T متغیر مورد نظر است (می‌تواند دما، بارش و یا هر متغیر دیگری باشد)؛ contr تعداد سری‌های شبیه‌سازی شده GCM در طول دوره کنترل، obs دوره زمانی مشاهداتی و frc سری زمانی آینده است که باید اریبی آن حذف شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده است که اریبی آن حذف شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت مدت ماهانه است (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹).

ارزیابی مدل‌های تغییر اقلیم: پس از گزینش اولیه مدل‌ها با روش همبستگی و انتخاب مدل GFDL-ESM4 به عنوان مدلی با همبستگی بالاتر در مرحله بعدی از سه شاخص متوسط اریبی خطا (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) برای بررسی مقدار اریبی و خطای این مدل به شکل ایستگاهی استفاده شده است. MBE در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت و منفی باشد که مثبت بودن شاخص نشان دهنده بیش برآوردی مدل و منفی بودن آن نشان دهنده کم‌برآوردی مدل است.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (3)$$

از RMSE معمولاً برای ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (رضیئی و ستوده، ۱۳۹۶). هر چه مقدار آن به صفر

سری زمانی نزدیک‌ترین نقطه به هر ایستگاه با استفاده از تابع جستجوی نزدیکترین همسایه (NNS^1) استخراج شد. سپس در مرحله بعدی، متوسط ۱۰ نقطه نزدیک به ایستگاه‌ها با مقدار متوسط سالانه کل ایستگاه‌های استان (متوسط کل استان خراسان رضوی) همبستگی گرفته شد. در این تحقیق از روش همبستگی پیرسون استفاده شد. این روش رایج‌ترین روش همبستگی است زیرا اندازه‌گیری شفافیت از رابطه خطی بین دو متغیر پیوسته ارائه می‌دهد. این روش امکان استنباط قوی از داده‌ها را فراهم می‌کند و همچنین بیانگر قدرت رابطه است و بینشی نسبت به اندازه رابطه ارائه می‌دهد که برای درک اهمیت عملی همبستگی مفید است (Caicedo et al. 2017). همان‌طور که گفته شد برای بررسی وضعیت آینده خشک‌سالی‌ها در استان خراسان رضوی از سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) طی دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰ استفاده شده است. در این سناریو افزایش دمای جهانی بین ۱/۴ تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد است (IPCC, 2021). جهت ریزمقیاس‌نمایی برونداد مدل GFDL-ESM2M از نرم‌افزار CMHyd استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط رادجنز و همکاران (۲۰۱۶) در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است. نرم‌افزار CMHyd از نه روش تصحیح اریبی طی فرآیندهای مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند که پنج روش برای بارش و چهار روش برای دما است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی از روش تغییر عامل دلتا (DCF) که هم برای بارش و هم دما قابل اجرا می‌باشد، استفاده شده است. این روش در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و دقت آن نیز

¹ Nearest neighbor search (NNS)

$$PET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

در این رابطه که R_n تابش خالص سطح است، U_2 سرعت باد سطحی (متر/ثانیه) در ارتفاع ۲ متری است. Δ شیب منحنی فشار بخار آب اشباع شده-دما و γ گرمای نهان بخار آب است (لی و همکاران، ۲۰۲۲). برای محاسبه تبخیر-تعرق از بسته آماری Evapotranspiration در R استفاده شده است. شرح کامل محاسبه، متغیرها و بسته آماری مربوطه از لینک <https://cran.r-project.org/web/package/Evapotranspiration/index.html> قابل دریافت شد. بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۰) یک رخداد خشک‌سالی زمانی اتفاق می‌افتد که شاخص از ۱- کمتر شود و حداقل در دو ماه متوالی تکرار شود. فراوانی خشک‌سالی نیز از تعداد گام‌های زمانی در مقیاس سالانه و فصلی که شاخص ۱- است تقسیم بر کل تعداد گام‌های زمانی ضربدر ۱۰۰ محاسبه می‌شود. شدت خشک‌سالی نیز برابر خواهد بود با:

$$DS = \sum_i^n SPEI_i \quad (8)$$

$$DI = \frac{DS}{DD} \quad (9)$$

در رابطه (۶)، DI شدت خشک‌سالی، DS بزرگی خشک‌سالی و DD طول دوره رخداد خشک‌سالی است. شدت و بزرگی خشک‌سالی بی‌مقیاس هستند. زمانیکه شاخص‌های شدت و بزرگی بین ۰/۹۹ تا ۰/۹۹- نزدیک به نرمال، ۱- تا ۱/۴۹- خشک‌سالی متوسط، ۱/۵۰- تا ۱/۹۹- خشک‌سالی شدید و ۲- و کمتر بی‌نهایت خشک است.

درونیابی نقشه‌های خشک‌سالی: برای بسیاری از کاربردهای جغرافیایی، داشتن داده‌های اقلیمی دقیق با تفکیک مکانی بالا ضروری است. با این حال، ایستگاه‌های مستقیم اندازه‌گیری اغلب به صورت پراکنده توزیع شده‌اند که منجر به وجود شکاف‌هایی در داده‌ها می‌شود. کریجینگ (Kriging) یک روش میان‌یابی زمین‌آماري است که برای مقابله با این چالش به کار می‌رود. این روش از ساختار خودهمبستگی مکانی متغیرهای اقلیمی برای برآورد

نزدیک‌تر باشد بیانگر خطای کمتر در داده‌های شبیه‌سازی شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (4)$$

ضریب تعیین (R^2) نیز یکی دیگر از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی میان دو متغیر است که مقدار آن از صفر تا یک تغییر می‌کند.

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

در رابطه‌های (۱ تا ۳)، P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار اندازه‌گیری، \bar{P} و \bar{O} میانگین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده و N تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI): شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI)، توسط ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۰) به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارش و تبخیر و تعرق نیاز دارد (Serrano et al., 2010-Vicente).

شاخص SPEI در مقیاس‌های مختلف ۱ تا ۴۸ ماهه محاسبه می‌شود. مقیاس‌های ۱ تا ۳ ماهه معرف خشک‌سالی هواشناسی، ۳ تا ۶ ماهه معرف خشک‌سالی کشاورزی، ۶ تا ۱۲ ماهه معرف خشک‌سالی هیدرولوژیکی و بیشتر از آن معرف خشک‌سالی‌های اجتماعی-اقتصادی است (ستاگه و همکاران، ۲۰۱۵). در این تحقیق هدف بررسی خشک‌سالی هواشناسی یا همان شاخص SPEI-1 بوده است. شاخص SPEI به طور کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SPEI = P_i - PET_i \quad (6)$$

که P و PET به ترتیب بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل، SPEI شاخص خشک‌سالی و i شماره گام زمانی (SPEI-1) موردنظر است (Vicente-Serrano et al., 2010). در این مطالعه برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش پنمن-مانتیت فائو (FAO Penman-Monteith) استفاده شد. تبخیر-تعرق (PET) برآورد شده با پنمن-مونتیث (PM) با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

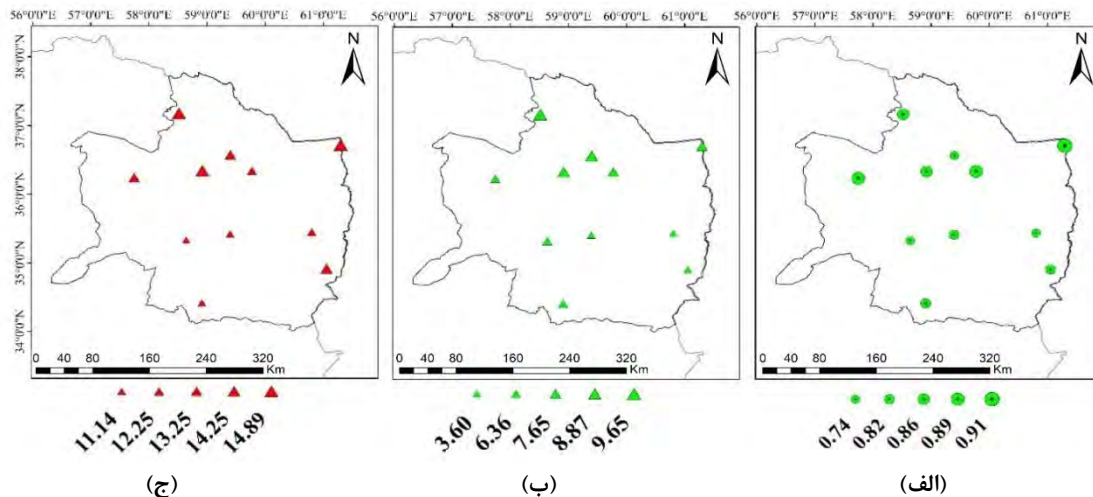
مقادیر در مکان‌های نمونه‌برداری نشده استفاده می‌کند. کریجینگ داده‌های اقلیمی را با دقت و قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش‌های ساده‌تر درون‌یابی ارائه می‌کند. این روش به دلیل وابستگی ذاتی داده‌های اقلیمی به مکان، برای این نوع داده‌ها بسیار ارزشمند است (Boulos, 2004). در این تحقیق به دلیل تعداد کم ایستگاه‌ها از روش درون‌یابی کریجینگ با متغیر کمکی ارتفاع استفاده شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل اقلیمی GFDL-ESM4: بررسی همبستگی اولیه بین داده‌های مدل با داده‌های دما و بارش در متوسط کل استان خراسان رضوی نشان داده است که همبستگی بین بارش مدل و بارش ایستگاهی به ترتیب برای مدل‌های IPSAL-CM6، MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 و MIROC6، ۰/۷۱، ۰/۷۳، ۰/۷۶ و ۰/۶۹ بوده که در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. به همین ترتیب متوسط دمای استان با دمای مدل‌های فوق به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۸۴، ۰/۸۶ و ۰/۷۸ به دست آمده که همانند متغیر بارش در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بوده است. لذا در تحقیق حاضر از داده‌های مدل GFDL-ESM4 با قدرت تفکیک ۰/۵۰ درجه قوسی برای بررسی خشک‌سالی استفاده شد.

برای بررسی مدل‌های CMIP6 در این تحقیق مدل‌های IPSAL-CM6، MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 و MIROC6 مورد بررسی قرار گرفته‌اند و همان‌طور که گفته شد برای انتخاب اولیه مدل‌ها همبستگی بین متوسط دما و بارش استان بر اساس داده‌های ایستگاهی با داده‌های مدل بررسی شد. نتیجه اولیه نشان داد که مدل GFDL-ESM2M از سری مدل‌های CMIP6 در استان خراسان رضوی از دیگر مدل‌ها همبستگی بیشتری (۰/۷۶) دارد. پس از انتخاب مدل بهینه بر اساس روش همبستگی در مرحله بعد برای ارزیابی دقیق‌تر این مدل، صحت‌سنجی خروجی متغیرهای اصلی اقلیمی مؤثر در

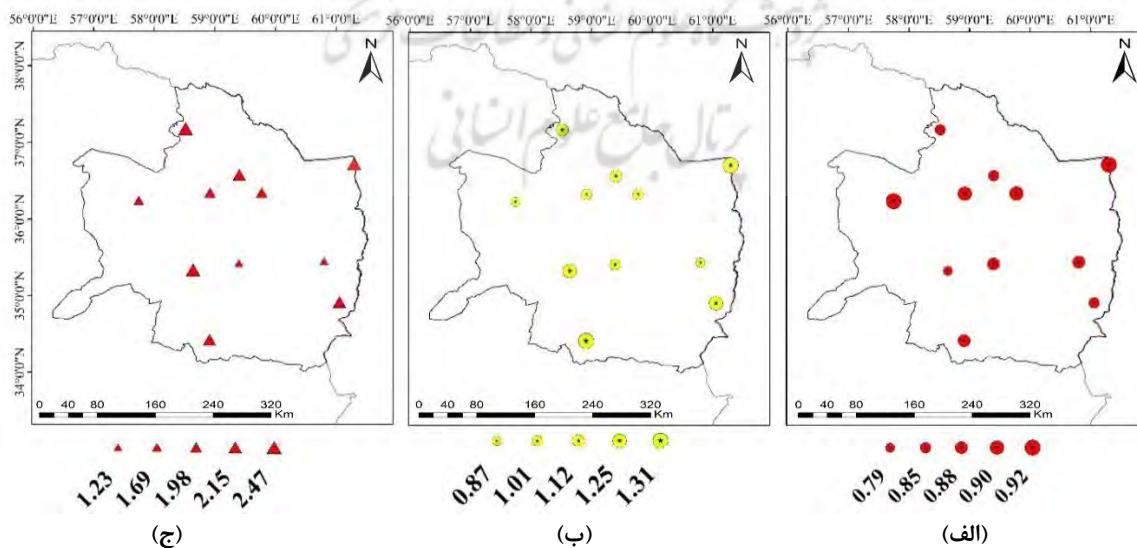
خشک‌سالی (دما و بارش) با سه شاخص RMSE، MBE و R^2 انجام و نتایج آن در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشخص است ضریب تعیین (R^2) مدل GFDL-ESM2M در سطح استان خراسان رضوی بین ۰/۷۴ تا ۰/۹۱ در مقیاس سالانه در تغییر است. کمترین ضریب تعیین در ایستگاه‌های کاشمر و تربت‌جام و بالاترین مقدار شاخص ضریب تعیین در ایستگاه‌های سرخس و سبزوار به دست آمده است. مقدار ضریب تعیین در غالب ایستگاه‌های مورد بررسی بالاتر از ۰/۸۱ است که نشان‌دهنده توافق بالای مدل GFDL-ESM2M برای متغیر بارش در استان خراسان رضوی است. مقدار RMSE که خطای مدل را برای بارش سالانه نشان می‌دهد در استان خراسان رضوی بین ۱۱/۱۴ میلی‌متر تا ۱۴/۸۹ میلی‌متر در تغییر است. این مقدار RMSE مدل نسبت به بارش ایستگاهی چندان قابل توجه نمی‌باشد. به طوری که بیشینه بارش استان ۳۲۱/۶۵ میلی‌متر محاسبه شده است و مقدار بیشینه RMSE تنها ۴/۶۲ درصد از کل بارش نشان می‌دهد که خطای مدل در برآورد بارش سالانه در ایستگاه قوچان که پر بارش‌ترین ایستگاه استان خراسان رضوی است کمتر از ۵ درصد کل بارش است که این نتیجه نشان‌دهنده کارایی بالای مدل مورد بررسی در استان است. کمترین مقدار شاخص RMSE در ایستگاه گناباد و بیشینه آن در ایستگاه قوچان به دست آمده است. به‌طور کلی ارزیابی مدل GFDL-ESM2M برای بارش در استان خراسان رضوی در تمامی ایستگاه‌ها مثبت است. بالاترین مقدار ارزیابی در ایستگاه قوچان با مقدار ۹/۶۵ میلی‌متر در مقیاس سالانه به دست آمده است. کمترین مقدار ارزیابی نیز با مقدار ۳/۶ میلی‌متر در ایستگاه تربت‌جام محاسبه شده است. این نتیجه پیش‌تر در سایر مناطق ایران توسط زرین و همکاران (۱۴۰۱) نیز در خصوص دقت بالای مدل‌های CMIP6 نشان داده شده است.



شکل ۲. ارزیابی نتایج مدل GFDL-ESM2M از سری مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی برای متغیر بارش؛
الف (R2، ب) MBE، ج) RMSE

همانند سبزواری که کمتری را نسبت به ایستگاهی همانند قوچان ارائه داده است. در نهایت ضریب تعیین مدل GFDL-ESM2M برای دما در بازه ۰/۷۹ تا ۰/۹۲ در سطح استان تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل نیز پیداست ایستگاه قوچان پایین‌ترین مقدار ضریب تعیین را دارد. این نتیجه در تأیید نتایج به دست آمده توسط دو شاخص RMSE و اریبی است که بالاترین مقدار را نشان داده‌اند. به‌طور کلی می‌توان اذعان داشت که مدل در برآورد دما در استان خراسان رضوی دارای دقت بالایی است (شکل ۳).

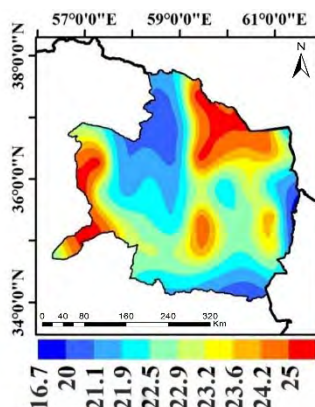
صحت سنجی متغیر دما نشان داده است که این متغیر نسبت به بارش از دقت بالاتری در استان برخوردار است (شکل ۳). مقدار شاخص RMSE برای دما در ایستگاه‌های منتخب استان بین ۱/۲۳ درجه سانتی‌گراد تا ۲/۴۷ درجه سانتی‌گراد است. مقدار RMSE در ایستگاه‌های واقع در مناطق شمالی استان بیش‌تر از مناطق جنوبی استان است. این نتیجه نشان‌دهنده این امر است که مدل در مناطق کوهستانی خطای بیشتری را نسبت به سایر مناطق دارد. مقدار شاخص اریبی نیز در استان بین ۰/۸۷ تا ۱/۳۱ درجه سانتی‌گراد است. ایستگاه‌های خشکی



شکل ۳. ارزیابی نتایج مدل GFDL-ESM2M از سری مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی برای متغیر دما؛
الف (R2، ب) MBE، ج) RMSE

استان دیده می‌شود. مقدار ۲۵ درصدی برای فراوانی خشک‌سالی نشان‌دهنده این است که خشک‌سالی در یک‌چهارم سری زمانی مورد بررسی در استان خراسان رضوی اتفاق افتاده است.

تحلیل خشک‌سالی: بر اساس شکل (۴)، فراوانی خشک‌سالی سالانه در استان خراسان رضوی طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) بین ۱۶/۷ تا ۲۵ درصد در تغییر است. مقدار بیشینه فراوانی خشک‌سالی در استان خراسان رضوی در مناطق غربی و شمال شرقی

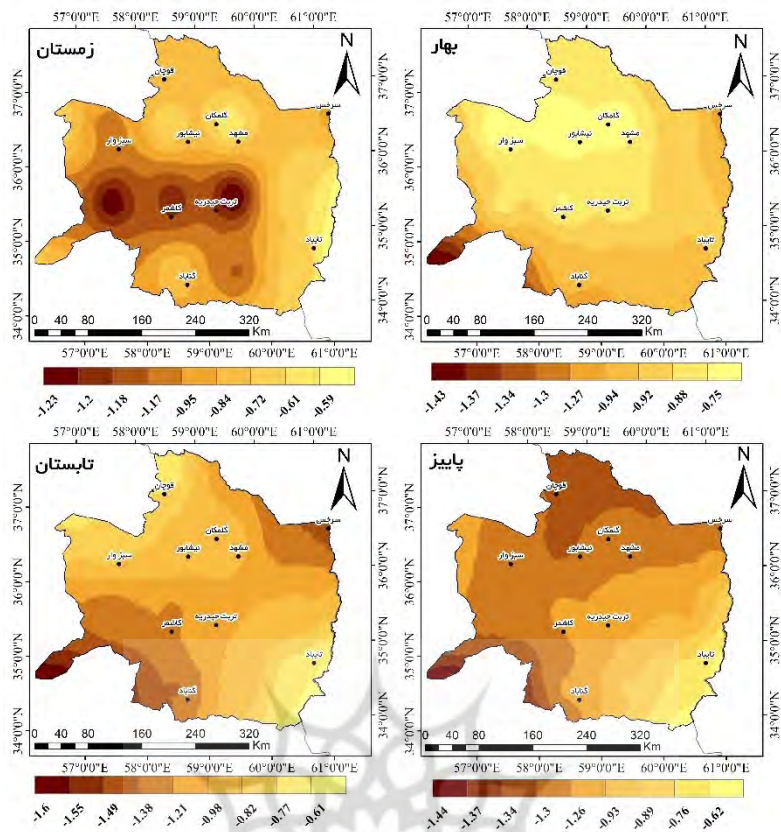


شکل ۴. فراوانی رخداد خشک‌سالی در استان خراسان رضوی طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) (واحد: درصد)

فصل مناطق شرقی استان شدت کمتری از خشک‌سالی را نشان داده‌اند. شدت شاخص خشک‌سالی در سرخس واقع در شرق استان در فصل بهار با مقدار ۱/۳- به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده شرایط نسبتاً خشک است (شکل ۵).

در فصل تابستان شرایط خشک‌سالی استان تقریباً همانند فصل بهار است. چرا که در مناطق جنوبی و جنوب شرقی استان بیشینه مقدار شدت خشک‌سالی دیده می‌شود. شدت خشک‌سالی در فصل تابستان بین ۰/۶۱- تا ۱/۶۰- است که شرایط نسبتاً خشک را نشان می‌دهد. در نهایت مقدار شدت خشک‌سالی در فصل پاییز بین ۰/۶۲- تا ۱/۴۴- است که در دو طبقه نسبتاً خشک و خشک‌سالی شدید قرار می‌گیرد (شکل ۵). مناطق جنوبی با خشک‌سالی شدید در فصل تابستان در مناطق مختلف استان پراکنده شده‌اند. این مناطق بیش‌تر در بخش‌های شمال، شمال غربی و جنوب غربی تا مرکز استان قرار گرفته‌اند. مناطق جنوب شرقی استان در فصل پاییز کمینه مقدار شدت خشک‌سالی را نشان داده‌اند.

شدت خشک‌سالی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و پیش‌نگری بر اساس شاخص SPEI با استفاده از بارش و دمای به‌دست‌آمده از خروجی‌های مدل‌های تغییر اقلیم محاسبه شده است. نتایج نشان داده است که شدت خشک‌سالی در استان خراسان رضوی طی دوره تاریخی مورد بررسی حداقل ۰/۵۹- در فصل زمستان تا حداکثر ۱/۶۰- در فصل بهار در تغییر است. در فصل زمستان شدت شاخص SPEI بین ۰/۵۹- تا ۱/۲۳- در تغییر است. این مقدار از شاخص نشان می‌دهد استان خراسان رضوی در فصل زمستان دارای خشک‌سالی نسبتاً خشک تا خشک‌سالی شدید است. خشک‌سالی شدید در فصل زمستان بیشتر در مناطق شرقی استان دیده می‌شود که از سرخس تا کاشمر و تربت حیدریه در مرکز استان کشیده شده است و سبزوار را نیز در بر می‌گیرد. در فصل بهار شدت خشک‌سالی با بیشینه مقدار در غرب و جنوب غربی استان است. بالاترین مقدار شاخص با مقدار ۱/۴۳- در حوالی بردسکن و کاشمر دیده می‌شود. شدت خشک‌سالی حتی تا مناطق شمالی استان نیز کشیده شده است. در این



شکل ۵. شدت خشک‌سالی فصلی در استان خراسان رضوی طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) بر اساس خروجی مدل GFDL

تعیین می‌شود (شکل ۶). بررسی این مشخصه خشک‌سالی نشان داد بین شدت و مدت خشک‌سالی همبستگی قوی (۰/۸۱) وجود دارد. افزایش خشک‌سالی در طول زمستان با افزایش شدت خشک‌سالی مطابقت دارد.

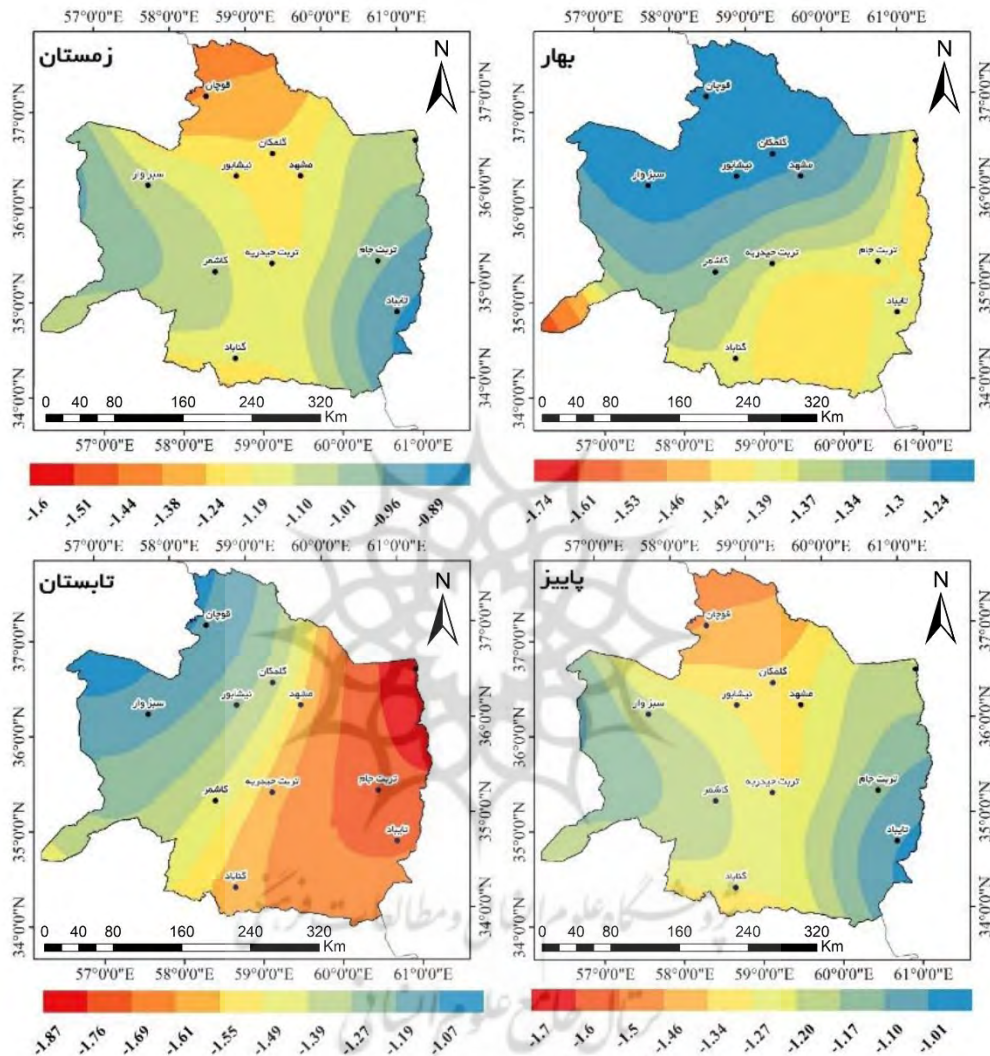
همان‌طور که در شکل نیز مشخص است بیشینه شدت خشک‌سالی در مناطق شمالی و به خصوص شمال غربی استان دیده می‌شود. بالاترین مقدار شدت خشک‌سالی با ۱/۸۷- در فصل تابستان دیده می‌شود. به‌طور کلی دوره خشک‌سالی در استان خراسان رضوی از شمال به جنوب روند کاهشی را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در آینده مناطق شمالی و به خصوص شمال غربی استان خشک‌سالی با شدت بیش‌تری را نسبت به مناطق جنوبی خواهد داشت. در واقع مناطق جنوبی استان که دارای اقلیم خشک و بیابانی هستند کمتر نسبت به مناطق کوهستانی

فراوانی خشک‌سالی در استان خراسان رضوی در مقیاس سالانه بر اساس سناریوی حد واسط SSP2-4.5 برای دوره آینده ۲۰۲۶-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. فراوانی خشک‌سالی طی دوره آینده در مناطق شرقی و شمالی استان نسبت به مناطق غربی استان بیش‌تر است. بیشینه فراوانی خشک‌سالی در آینده ۳۱ درصد است. به جهت مکانی نیز فراوانی خشک‌سالی در آینده تحت سناریوی SSP2-4.5 تغییراتی خواهد داشت. بیشینه فراوانی خشک‌سالی در این دوره در مناطق شمالی و غربی استان دیده می‌شود. شدت خشک‌سالی بر اساس شکل (۶) در مقیاس فصلی برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل (۶) نیز دیده می‌شود شدت خشک‌سالی با فراوانی خشک‌سالی که در شکل (۴) ارائه شده است، در ارتباط است. شدت یک رویداد خشک‌سالی با قدر مطلق مجموع تمام مقادیر SPEI

بالای خشک‌سالی را در فصل تابستان خواهد کرد. پیش‌نگری وضعیت خشک‌سالی در استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که شدت خشک‌سالی در آینده در فصول سرد سال افزایش خواهد داشت.

شمالی درگیر شدت‌های خشک‌سالی بالا می‌شوند. شدت خشک‌سالی تحت سناریوی SSP2-4.5 نشان داده است که کانون اصلی بیشینه شدت خشک‌سالی در آینده کماکان مناطق شمالی استان است. با این حال مناطق شرق و جنوب شرقی استان نیز شدت



شکل ۶. شدت خشک‌سالی فصلی در استان خراسان رضوی تحت سناریوی SSP2-4.5 طی دوره آبی ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰

CMIP6 را در بررسی تغییرات خشک‌سالی نشان می‌دهد. علاوه بر این، این تحلیل مدل GFDL-ESM2M را به عنوان مدلی بسیار کارآمد در نمایش ویژگی‌های خشک‌سالی در استان خراسان رضوی شناسایی کرد. این یافته‌ها بینش ارزشمندی را برای تحقیقات آینده در زمینه خشک‌سالی در استان خراسان رضوی ارائه داده است. اثربخشی کلی مدل‌های

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از داده‌های CMIP6 به ارزیابی پیش‌نگری‌های خشک‌سالی آینده در استان خراسان رضوی، پرداخته است. این مطالعه ابتدای کارایی مدل‌های CMIP6 را در برآورد خشک‌سالی برای استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار داد. نتایج به طور رضایت بخشی کارایی بالای کل مدل‌های

توسط زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) که خشک‌سالی را برای کل ایران تا پایان قرن حاضر پیش‌نگری کرده‌اند همخوانی دارد. چرا که آن‌ها نیز نشان دادند که روزهای خشک و دوره خشک حداکثر به ترتیب ۷/۵۰ و ۲۸/۸۴ درصد در دهه‌های آینده افزایش دارند که با نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق هم‌راستاست. افزایش خشک‌سالی در سطح جهانی نیز گزارش شده است. به طوری که (Essa et al. (2023) افزایش شدت و فراوانی خشک‌سالی را در مدیترانه نشان داده‌اند. افزایش خشک‌سالی در سایر مناطق ایران نیز همانند دریاچه ارومیه توسط زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۱) نیز نشان داده شده است. به هر حال پیش‌بینی می‌شود که خشک‌سالی فصلی در مناطق شرقی استان به میزان کمتری نسبت به مناطق غربی و شمال غربی افزایش یابد. این خشک‌سالی‌های فزاینده در استان خراسان رضوی مشکلات بسیاری را همچون کمبود آب و تهدید برای امنیت غذایی به همراه خواهد داشت. خشک‌سالی فصلی همچنین با کاهش عملکرد محصول و آتش‌سوزی جنگل‌ها مرتبط است. عوامل کلیدی افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی در استان خراسان رضوی کاهش بارش همراه با افزایش دما و افزایش تقاضای تبخیر در سطح استان است.

CMIP6 اعتماد به پیش‌نگری و ارزیابی خشک‌سالی را تقویت می‌کند. همچنین، عملکرد برتر مدل GFDL-ESM2M نشان دهنده پتانسیل آن به عنوان یک مدل ترجیحی برای تحقیقات خشک‌سالی در مناطق مشابه کشور است.

نتایج، روند نگران‌کننده‌ای از افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی را در سراسر استان نشان می‌دهد. در مقایسه با دوره تاریخی (حداکثر فراوانی سالانه ۲۵ درصد)، پیش‌نگری‌های آتی تحت سناریو SSP2-4.5 افزایش قابل توجهی از خشک‌سالی را به ۳۱ درصد نشان می‌دهد. به طور قابل توجهی، انتظار می‌رود فصول بهار و تابستان بیشترین افزایش شدت خشک‌سالی را تجربه کنند. این یافته‌ها بر نیاز مبرم به راهبردهای پیشگیرانه برای کاهش اثرات خشک‌سالی در استان خراسان رضوی تاکید می‌کند. با اذعان به افزایش پیش‌نگری‌های وقایع خشک‌سالی، ذینفعان می‌توانند برنامه‌های مدیریت آب کارآمد را اجرا کنند. در سرتاسر استان خراسان رضوی، تغییرات پیش‌بینی‌شده در خشک‌سالی فصلی تغییرات مکانی و زمانی زیادی را نشان می‌دهد. فراوانی و شدت خشک‌سالی در آینده به ویژه در طول فصول بهار و تابستان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش رخداد خشک‌سالی در استان خراسان رضوی که در این تحقیق نشان داده شده است با نتایج به‌دست‌آمده

منابع

۱. بابائیان، ا.، مدیریان، ر.، خزانه‌داری، ل.، کریمی‌ان، م.، کوزه‌گران، س.، کوهی، م.، فلامرزی، ی.، ملیوسی، ش. ۱۴۰۲. چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌گاهی آماری بر برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیک زمین و فضا. ۴۹(۲): ۴۳۱-۴۴۹.
۲. تاج‌بخش، س.، عیسی‌خانی، ن. و فضل‌کازمی، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص «استانداردشده بارش و تبخیر-تعرق (SPEI)». فیزیک زمین و فضا. ۴۱(۲): ۳۱۳-۳۲۱.
۳. حاجی‌آبادی، ف.، حسن‌پور، ف.، یعقوب‌زاده، م. و حمامی، ح. ۱۳۹۹. پیش‌نگری خشک‌سالی با استفاده از
- داده‌های گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم در منطقه بیرجند. هواشناسی کشاورزی. ۸(۱): ۵۱-۶۱.
۴. حیدرزاده، م. و نوحه‌گر، ا. ۱۴۰۰. پایش خشک‌سالی هواشناسی آینده با استفاده از مدل تغییر اقلیم سری CMIP5 و زنجیره مارکوف. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. ۴۰(۴۷): ۲۱-۳۲.
۵. رضیعی، ط. و ستوده، ف. ۱۳۹۶. بررسی دقت مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF) در پیش‌بینی بارش مناطق گوناگون اقلیمی ایران. فیزیک زمین و فضا. ۴۳(۱): ۱۳۳-۱۴۷.
۶. زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ۱۳۹۹. پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد

16. Boulos, M. N. K. 2004. Towards evidence-based, GIS-driven national spatial health information infrastructure and surveillance services in the United Kingdom. *International Journal of Health Geographics*, 3(1), 1.
17. Caicedo, J. C., Cooper, S., Heigwer, F., Warchal, S., Qiu, P., Molnar, C., Vasilevich, A. S., Barry, J. D., Bansal, H. S., Kraus, O., Wawer, M., Paavolainen, L., Herrmann, M. D., Rohban, M., Hung, J., Hennig, H., Concannon, J., Smith, I., Clemons, P. A., . . . Carpenter, A. E. 2017. Data-analysis strategies for image-based cell profiling. *Nature Methods*, 14(9), 849–863.
18. Chen, X., Li, Y., Yao, N., Liu, D. L., Liu, Q., Song, X., ... & Feng, P. 2022. Projected dry/wet regimes in China using SPEI under four SSP-RCPs based on statistically downscaled CMIP6 data. *International Journal of Climatology*. 42(16): 9357-9384.
19. Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S. and Von Maltitz, G. 2018. World atlas of desertification rethinking land degradation and sustainable land management, Publication Office of the European Union. Luxembourg.
20. Clark, J. S., Iverson, L., Woodall, C. W., Allen, C. D., Bell, D. M., Bragg, D. C. and Zimmermann, N. E. 2016. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. *Global change biology*. 22(7): 2329-2352.
21. Cook, B. I., Ault, T. R. and Smerdon, J. E. 2015. Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances*. 1(1): e1400082.
22. Dai, A. 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 116(D12).
23. Duffy, P. B., Brando, P., Asner, G. P. and Field, C. B. 2015. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proceedings of*
- پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6).
فیزیک زمین و فضا. ۴۶(۳): ۵۸۳-۶۰۲.
۷. زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ۱۴۰۰. پیش‌نگری همادی نمایه‌های خشک‌سالی در ایران مبتنی بر برون‌داد چند مدلی CMIP5. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. ۲(۷): ۷۱-۸۲.
۸. زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ۱۴۰۰. مدیریت ریسک خشک‌سالی در شرایط تغییر اقلیم: نقش سیاست‌های ملی و برنامه مدیریت خشک‌سالی (DMP). آب و توسعه پایدار، ۸(۱)، ۱۰۷-۱۱۲.
۹. زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. کدخدا، ا. ۱۴۰۱. پیش‌نگری خشک‌سالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۳(۷): ۱۴۹۹-۱۵۱۶.
۱۰. عسگری، ا.، نوروزی‌نظر، م.ص.، باعقیده، م. و انتظار، ع. ۱۴۰۲. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CMIP6. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۴): ۲۷-۴۲.
۱۱. کریمی، م.، شاهدی، ک. و خسروی، خ. ۱۳۹۵. بررسی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی در حوزه آبخیز قره‌سو. فیزیک زمین و فضا. ۴۲(۱): ۱۵۹-۱۷۰.
۱۲. کوهی، س.، عزیزیان، ا. و مازندرانی زاده، ح. ۱۴۰۱. اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 با استفاده از روش فازی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۳): ۱-۱۷.
۱۳. محمدی، ن. و حجازی زاده، ز. ۱۴۰۳. اثرات تغییر اقلیم بر ریسک مخاطره خشک‌سالی در تهران با بهره‌گیری از CMIP6. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۲).
۱۴. مصطفی‌زاده، ر. و ذبیحی، م. ۱۳۹۵. تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPEI و SPI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). فیزیک زمین و فضا. ۴۲(۳): ۶۳۳-۶۴۳.
15. Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., and Overton, I. C. 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 3(4): 516-536.

30. Martin, E. R. 2018. Future projections of global pluvial and drought event characteristics. *Geophysical Research Letters*. 45(21): 11-913.
31. McKee, T. B., Doesken, N. J. and 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).
32. Mishra, A. K. and Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*. 391(1-2): 202-216.
33. O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
34. Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. 2016. CMhyd User Manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. Texas: SWAT.
35. Stage, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.
36. Tahery, Z., T., Masoudi, M., & Fischer, T. 2023. Hazard assessment of drought using PNPI and GIS in Fars Province. *Iran. J. Environ. Assess. Policy Manag.*
37. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and 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.
38. Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., McVicar, T. R., Tomas-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., Noguera, I. and El Kenawy, A. 2020. Global characterization of hydrological and meteorological droughts under future climate change: The importance of timescales, vegetation-CO2 feedbacks and changes to distribution functions. *International the National Academy of Sciences*. 112(43): 13172-13177.
24. Essa, Y. H., Hirschi, M., Thiery, W., El-Kenawy, A. M., & Yang, C. 2023. Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *npj Climate and Atmospheric Science*. 6(1): 133.
25. Fensham, R. J., Fairfax, R. J., and Dwyer, J. M. 2012. Potential aboveground biomass in drought-prone forest used for rangeland pastoralism. *Ecological Applications*. 22(3): 894-908.
26. IPCC 2021. Summary for policymakers *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2021).
27. IPCC 2022. Summary for Policymakers [H-O Pörtner, DC Roberts, ES Poloczanska, K Mintenbeck, M Tignor, A Alegría, M Craig, S Langsdorf, S Löschke, V Möller, A Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H-O Pörtner, DC Roberts, M Tignor, ES Poloczanska, K Mintenbeck, A Alegría, M Craig, S Langsdorf, S Löschke, V Möller, A Okem, B Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press Jacob D, Petersen J, Eggert B et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14:563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
28. Jafarpour, M., Adib, A., Lotfirad, M., & Kisi, Ö. 2023. Spatial evaluation of climate change-induced drought characteristics in different climates based on De Martonne Aridity Index in Iran. *Applied Water Science*, 13(6), 133.
29. Lott, F. C., Christidis, N. and Stott, P. A. 2013. Can the 2011 East African drought be attributed to human-induced climate change?. *Geophysical Research Letters*. 40(6): 1177-1181.

- United Nations Development Programme, p. 18.
42. Zhai, J., Sang, X. and Ye, Y. 2016, December. Research on quantitative evaluation method of regional hydrological drought and its application. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2016, pp. H53C-1723).
43. Zhang, Y., Hu, X., Zhang, Z., Kong, R., Peng, Z., Zhang, Q., & Chen, X. 2023. The increasing risk of future simultaneous droughts over the Yangtze River basin based on CMIP6 models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 1-25.
- Journal of Climatology. 40(5): 2557-2567.
39. Warnatzsch, E. A. and Reay, D. S. 2019. Temperature and precipitation change in Malawi: Evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning. *Science of the Total Environment*. 654: 378-392.
40. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. 1985. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.
41. World Bank 2018. *Somalia Drought Impact & Needs Assessment*, vol. I.

