نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال هجدهم- شماره ۶۵- تابستان ۱۴۰۳

Vol. 18, No. 65, Summer 2024

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی با شاخص‌های SPI و SPEI (مطالعه موردی حوضه آبریز کارون سه)

اریسا جهانگیری[1]، بهارک معتمدوزیری[2]* و هادی کیادلیری[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۵/۱۲

https://doi.org/10.22034/18.65.85

مقدمه

امروزه پدیده تغییر اقلیم از جمله معضلاتی است که همواره در جهان مورد توجه قرار گرفته است. یکی از دلایل وقوع پدیده تغییر اقلیم، افزایش گازهای گلخانه‌ای است که تأثیر به سزایی بر پدیده‌های حدی دارد. پیش‌بینی خشکسالی یکی از راهکارهای مدیریتی است که به برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده از منابع محدود آب کمک شایانی می‌نماید. همچنین بررسی تغییرات خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است؛ زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلندمدت، لازم است که چشم‌اندازی از وضعیت آینده بارندگی و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه تدوین شود. شاخص SPEIتوانایی محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را 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. همچنین شاخص استاندارد بارش (SPI) یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تحلیل خشکسالی است. این شاخص به دلیل سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های در دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی شناخته می‌شود. افزایش خشکسالی‌های اخیر در حوضه‌آبریز کارون سه باعث کمبود آب و خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی شده است. از این رو بررسی اثر تغییر اقلیم و تحلیل فراوانی خشکسالی از اهمیت زیادی برخوردار است. در راستای این هدف، در این پژوهش ابتدا به شبیه‌سازی مقادیر بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل هشت ایستگاه هواشناسی با استفاده از سه مدل اقلیمی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره (۲۰۳۰-۲۰۵۵) پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا داده‌های دما (حداکثر و حداقل) و بارش خروجی مدل‌های اقلیمی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت پروژه CORDEX برای سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به کمک نرم‌افزار CMhyd ریزمقیاس شده و سری‌های زمانی دمای حداکثر، حداقل و بارش برای هشت ایستگاه هواشناسی در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) تولید شد. سپس تغییرات دما و بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بررسی خشکسالی (فراوانی و تداوم) در دوره آتی تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 توسط شاخص‌های (SPI) و (SPEI) در سه مقیاس زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه با استفاده از نرم‌افزار DIP انجام گرفت. به منظور ارزیابی کارایی و دقت عملکرد سه مدل گـــردش عمومی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی، میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی در دوره (۱۹۹۰-۲۰۰۵) حاصل از خروجی مدل با مقادیر مشاهداتی متناظر مقایسه شد. بدین منظور از معیارهای عملکرد نش ساتکلیف (NS)، شاخص اریب (Bias) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد بیشترین افزایش دمای حداکثر مربوط به ایستگاه شوشتر بوده است. در این ایستگاه دمای حداکثر در سناریوی انتشار RCP8.5، ۱/٤٦ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی انتشار RCP4.5، یک درجه سانتی‌گراد به نسبت دوره پایه افزایش خواهد یافت. ایستگاه مسجد سلیمان بیشترین افزایش دمای حداقل را دارد. در این ایستگاه افزایش دمای حداقل تحت سناریو انتشار RCP8.5، ۲/٤۱ درجه سانتی‌گراد و در سناریو RCP4.5، ۱/۹۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین بارش در کل محدوده در دوره آتی روند نزولی داشته است. مقدار کاهش بارندگی در کوهرنگ در سناریو RCP8.5، ۱٤٦/۳ میلی‌متر و در سناریوی RCP4.5، ۵۳/٦ بوده است که به ترتیب حدود ۱۱/۷ و ٤/۳ درصد است. ازنظر فراوانی خشکسالی در دوره آماری (۲۰۳۰-۲۰۵۵) در مقیاس سه‌ماهه، در سناریوی RCP4.5 ایستگاه ایذه دارای بیشترین فراوانی با ١٤ بار تجربه خشکسالی، در مقیاس شش‌ماهه،

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم تحقیقات ، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
jahangirierisa@gmail.com

۲- نویسنده مسئول و دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم تحقیقات ، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
bmvaziri@gmail.com

۳- دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
h_kia2000@yahoo.com

در سناریوی RCP4.5، حداکثر دفعات خشکسالی در شهرکرد با ۱۶ بار و در مقیاس دوازده‌ماهه، در سناریوی RCP4.5 ایستگاه کوهرنگ با ۱۵ بار، بیشترین فراوانی را نشان می‌دهد. در سناریوی RCP8.5 ایستگاه ایذه دارای بیشترین فراوانی با ۲۰ بار تجربه خشکسالی بوده است. همچنین در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP4.5 در مقیاس سه، شش و دوازده به ترتیب ایستگاه شهرکرد، یاسوج و لردگان با هشت، ۱۱ و ۲۷ ماه و در سناریو RCP8.5 نیز به ترتیب مسجد سلیمان و شوشتر و لردگان بیشترین تداوم خشکسالی را خواهند داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد میانگین دراز مدت سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره آتی به نسبت دوره پایه در هر هشت ایستگاه روند صعودی داشته است. همچنین نتایج نشان داد دمای حداکثر تحت سناریو 8.5RCP افزایش بیشتری به نسبت سناریو انتشار 4.5RCP دارد. همچنین نتایج نشان داد ایستگاه کوهرنگ متأثر از تغییر اقلیم بیشترین کاهش بارش را در محدوده مطالعاتی طی دوره آتی خواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد در هر سه مقیاس زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه در دوره آتی به نسبت دوره پایه در سری زمانی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI نوسانات زیادی وجود دارد. همچنین حالت‌های حدی خشکسالی در دوره آتی افزایش یافته است. پیش‌بینی می‌شود در دوره آتی تعداد ماه‌های خشک نسبت به تعداد ماه‌های با وضعیت نرمال و مرطوب کمتر بوده است. همچنین در بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI مشاهده می‌شود که همانند شاخص SPI الگوی تغییرات دوره خشکسالی در ایستگاه‌ها قابل تشخیص است. قابل ذکر است شدت خشکسالی‌های محاسبه شده با استفاده از شاخص SPEI به ندرت از مقدار عددی دو بالاتر است. با مقایسه تداوم و فراوانی خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی و در مقایس‌های زمانی مختلف، مشخص شد که شاخص SPI به نسبت شاخص SPEI تداوم و فراوانی خشکسالی را در اغلب موارد بیشتر نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: *تغییر اقلیم، رواناب، خشکسالی، SPI، SPEI، کارون*

مقدمه

امروزه پدیده تغییر اقلیم از جمله معضلاتی است که همواره در جهان مورد توجه قرار گرفته است. یکی از دلایل وقوع پدیده تغییر اقلیم، افزایش گازهای گلخانه‌ای است که تأثیر بسزایی بر پدیده‌های حدی همچون سیل و خشکسالی دارد [۲۰]. لذا بررسی پدیده‌های حدی جهت مقابله، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خشکسالی به سبب تعداد، فراوانی، گستردگی و تبعات کوتاه و بلندمدت اقتصادی اجتماعی و محیط زیستی، از جمله مهم‌ترین حوادث طبیعی به شمار می‌رود [۵]. شاخص SPEI[1] شاخص جدیدی است که توسط سرانو [۲۱] ارائه شد و توانایی محاسبه شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را 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 بکار رود. این شاخص پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی نشان می‌دهد. زیرا به دلیل لحاظ نمودن بیلان آب، همبستگی قابل‌قبولی با میزان رطوبت خاک دارد [۱]. هم‌چنین شاخص استاندارد بارش[2] (SPI) یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تحلیل خشکسالی است. این شاخص به دلیل سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های در دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی شناخته می‌شود [۱۳]. مطالعات مختلفی در مقیاس‌های جهانی یا منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی در ارتباط با تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مقایسه شرایط اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم انجام شده که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. رضایی [۱۳]، تابوزاده [۱۹]، سبحانی [۱۷]، مندیچینو [۹]، زارچ [۲۲]، سان [۱۸]، نوروزی [۱۲]، سعیدی‌پور [۱۵]، کبوسی وکردجزی [۶]، لطفیراد [۷]، و زارعی [۲۳].

افزایش خشکسالی‌های اخیر در حوضه‌آبریز کارون ۳ باعث کمبود آب و خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی شده است. از این رو بررسی اثر تغییراقلیم و تحلیل فراوانی خشکسالی از اهمیت زیادی برخوردار است. در راستای این هدف، در این پژوهش ابتدا به شبیه‌سازی مقادیر بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل هشت ایستگاه هواشناسی با استفاده از سه مدل اقلیمی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره (۲۰۳۰-۲۰۵۵) پرداخته شد. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اقلیمی و به کمک شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI پایش و تجزیه تحلیل مشخصات خشکسالی برای دروه آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا داده‌های دما (حداکثر و حداقل) و بارش خروجی مدل‌های اقلیمی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت پروژ CORDEX[3] برای سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به کمک نرم‌افزار CMhyd[4] ریزمقیاس شده و سری‌های زمانی دمای حداکثر، حداقل و بارش برای هشت ایستگاه هواشناسی (جدول ۱) در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) تولید شد. سپس تغییرات دما و بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بررسی خشکسالی (فراوانی و تداوم) در دوره آتی تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 توسط

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

2. Standardized Precipitation Index

3. Coordinated Regional climate Downscaling Experiment

4. Climate Model data for hydrologic modeling

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی

Table 1. Geographical location of meteorological stations

ایستگاه هواشناسی weather station	مختصات جغرافیایی X	Y	ارتفاع altitude
بروجن (Borujen)	517079	3493897	2179
کوهرنگ (Kuhrang)	413355	3570735	2285
لردگان (Lordegan)	451470	3464070	1580
مسجد سلیمان (Masjed Soleyman)	326333	3494227	321
ایذه (Izeh)	354430	3484856	767
شهرکرد (Shahr-e Kord)	353817	3562709	1345
شوشتر (Shushtar)	263879	3545384	67
یاسوج (Yasuj)	531696	3364264	1832

شاخص‌های (SPI) و (SPEI) در سه مقیاس زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه با استفاده از نرم‌افزار DIP[1] انجام گرفت. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

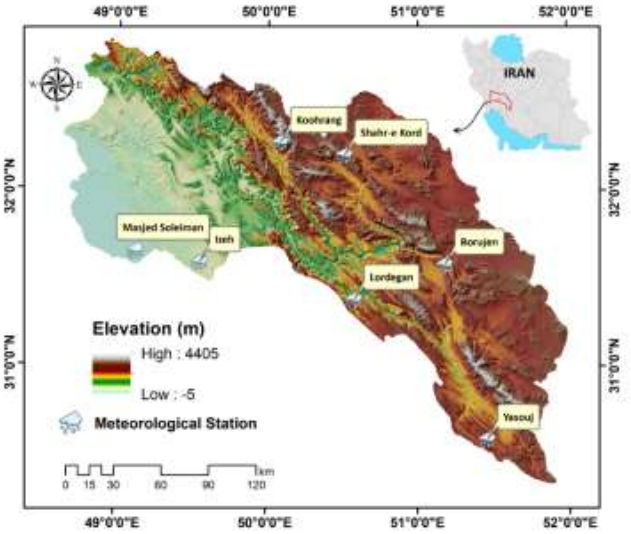
منطقه مورد مطالعه

منطقه موردمطالعه در این تحقیق حوزه آبخیز کارون سه به مساحت ۶۸۷۷۹ کیلومترمربع، بین طول جغرافیایی "۴۷'۳۹' ۴۸° تا "۵۹ '۵۹ ۵۱° و عرض جغرافیایی "۴۹ '۱۳ ۳۰° تا "۲۹'۵۲ ۳۲° واقع است. حوضه آبریز رودخانه کارون سه بخشی از حوزه آبخیز خلیج فارس و در داخل ارتفاعات زاگرس میانی قراردارد. حداکثر ارتفاع منطقه ۴۴۰۵ متر و قسمت عمده‌ای از استان‌های خوزستان، چهارمحال بختیاری، اصفهان، کهکیلویه و بویراحمد را در بر گرفته است (شکل ۱).

ریز مقیاس نمایی و پروژه CORDEX

خروجی مدل‌های گردش عمومی جو باید تحت سناریوهای مختلف برای منطقه مورد مطالعه کوچک مقیاس شوند. به دلیل بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی این متغیرها همراه با اغتشاش است. در چندسال اخیر با استفاده از مدل‌های آب و هوای منطقه‌ای مختلف و به منظور تولید مجموعه چند عضوی داده‌های ریزمقیاس نمایی شده در پروژه CMIP5 توسط WCRP[2] در اقدامی هماهنگ با انجمن بین‌المللی ریزمقیاس نمایی منطقه‌ای که CORDEX نامیده شد با هدف شناسایی تغییرات منطقه‌ای آب و هوا به عنوان ورودی در مطالعات اثر تغییر اب و هوا و راه‌های سازگاری با آن ایجاد شد [٤]. در پروژه CORDEX پهنه‌های خشکی زمین به ۱۳ بخش تقسیم شده است و خروجی مدل‌های اقلیم جهانی با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه تولید می‌شود. دقت زمانی خروجی مدل‌های ریزمقیاس گردانی دینامیکی این طرح نیز به صورت داده‌های سه ساعته، شش ساعته، روزانه، ماهانه و سالانه است [۱۶]. کشور ایران از نظر جغرافیایی در منطقه شش به نام جنوب آسیا (CORDEX-WAS) و منطقه هشت به نام شمال آفریقا و خاورمیانه (CORDEX-MENA) پروژه یاد شده قرار می‌گیرد. در طی فرآیند ریز مقیاس نمایی در پروژه CORDEX به علت مقیاس‌گذاری (میانگین‌گیری فضایی در سطح یک شبکه) و سایر تخمین‌ها، انحرافاتی به داده‌ها وارد شده که منجر به مقادیر داده‌های اقلیمی نادرست می‌شود. بنابراین، به منظور ارزیابی و پیشنگری تغییر اقلیم آینده در سطوح منطقه‌ای این انحرافات باید از داده‌های اقلیمی تولید شده حذف شود [۱۰]. به‌منظور تصحیح انحرافات (پس‌پردازش) داده‌های استخراج شده، از مدل CMhyd استفاده شد.

1. Drought Indices Package
2. World Climate Research Program



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

Fig 1. The study area

معیارهای عملکردی

به منظور ارزیابی کارایی و دقت عملکرد سه مدل گـــردش عمومی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی، میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی در دوره (۱۹۹۰-۲۰۰۵) حاصل از خروجی مدل با مقادیر مشاهداتی متناظر مقایسه شد. بدین منظور از معیارهای عملکرد نش ساتکلیف (NS)، شاخص اریب (Bias) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد که این معیارها به صورت زیر تعریف می شوند [۱٤]:

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s - \sigma_O}\right]^2 \quad (۱)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۲)$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i}\right] \quad (۳)$$

در روابط فوق، Q_i داده های مشاهداتی، P_i داده های برآورد شده، $\bar{O}$ و $\bar{S}$ میانگین داده های مشاهداتی و برآورد شده، σ واریانس و n تعداد سال‌های آماری است. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است، هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است. شاخص NS هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بیشتری برخودار خواهد بود و دامنه آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ ست. BIAS هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در برآورد متغیر مورد نظر خواهد بود. در صورتی که مقدار این پارامتر به سمت مثبت میل کند، نشان‌دهنده این است که متغیر مورد بررسی بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. اگر این پارامتر به سمت منفی میل کند، نشان می‌دهد که پارامتر مورد بررسی مقدار متغیر را بسیار بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

شاخص بارش- تبخیر و تعرق (SPEI)

این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنت‌وایت استفاده می‌نماید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرّق پتانسیل برای ماه i به‌صورت رابطه (٤) محاسبه می‌شود. مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه (٥) محاسبه می‌شود.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (٤)$$

$$D_n^K = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (٥)$$

که k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D بر اساس تابع لجستیک لگاریتمی به صورت رابطه (٦) است. که پارامتر α مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده γ<D<∞ است.

$$F(x) = \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\beta - \gamma}\right)\right]^{-1} \quad (۶)$$

بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌شود [۲۱]. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک ماه، سه ماه، شش ماه، ۱۲ ماه، ٢٤ ماه و ٤٨ ماه محاسبه شود. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. طبقه‌بندی این شاخص در جدول (۲) نشان داده شده است.

شاخص بارش استاندارد (SPI)

اساس شاخص بارش استاندارد (SPI) بر محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است که به منظور پایش و تعیین خشکسالی ارائه شد. این شاخص برای مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸، ٢٤ و ٤٨ ماهه محاسبه می‌شود. محاسبه مقدار این شاخص شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین است. مقادیر شاخص SPI به دست آمده از داده‌های بلندمدت بارش برای یک دوره زمانی، از توزیع نرمال تبعیت می‌کند که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است [۳، ۸]. اساس این شاخص، انحراف از میانگین نسبت به انحراف معیار داده‌های آماری بر مبنای رابطه SPI=(Pi-P)/SD است که در آن Pi بارندگی سال و P میانگین بارندگی بلندمدت و SD انحراف معیار بارش در طول دوره آماری است. برای دسته‌بندی خشکسالی و ترسالی بر اساس این شاخص، از معیارهای تعریف شده در جدول (۲) استفاده می‌شود. مطابق این جدول، هرگاه مقادیر SPI منفی باشد و مقدار آن به ۱- یا کم‌تر برسد معرف وقوع خشکسالی است. هم‌چنین مقادیر مثبت آن نشان دهنده خاتمه دوره خشکسالی است.

جدول ۲- طبقات مختلف شاخص SPI و SPEI [۲۲]

Table 2. Different classes of SPI and SPEI index [22]

شرایط اقلیمی Climate	مقدار value
شدیدا مرطوب (Extreme wet spell)	(2) ≤
بسیار مرطوب (Severe wet spell)	(1.5) - (1.99)
مرطوب متوسط (Moderate wet spell)	(1) - (1.49)
نزدیک نرمال (Near normal)	(-0.99) - (0.99)
خشک متوسط (Moderate drought)	(-1) - (-1.49)
بسیار خشک (Severe drought)	(-1.5) – (-1.99)
شدیدا خشک (Extreme drought)	(-2) ≥

نتایج

نتایج اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش

نتایج مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط شاخص‌های آماری در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری Bias، NS و R^2 نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M در شبیه‌سازی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر بوده است. همچنین معیارهای

جدول ۳- نتایج معیارهای عملکردی برای مقایسه متغیرهای اقلیمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره آماری (۱۹۹۰-۲۰۰۵)

Table 3. The results of performance criteria for the comparison of observed and simulated climatic variables in the statistical period (1990-2005)

پارامتر Parameter	مدل‌های اقلیمی Climate models	NS	Bias	R^2
بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	EC-EARTH	0/711	0/23	0/731
	CNRM-CM5	0/630	-0/55--	0/824
	GFDL-ESM2M	0/544	0/430	0/813
دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد) Maximum temperature (^{o}c)	EC-EARTH	0/423	0/131	0/952
	CNRM-CM5	0/772	0/334	0/995
	GFDL-ESM2M	0/591	0/215	0/981
دمای حداقل(درجه سانتی‌گراد) Minimum temperature (^{o}c)	EC-EARTH	0/893	0.435	0/972
	CNRM-CM5	0/24	0.106	0/983
	GFDL-ESM2M	0/576	0/349	0/996

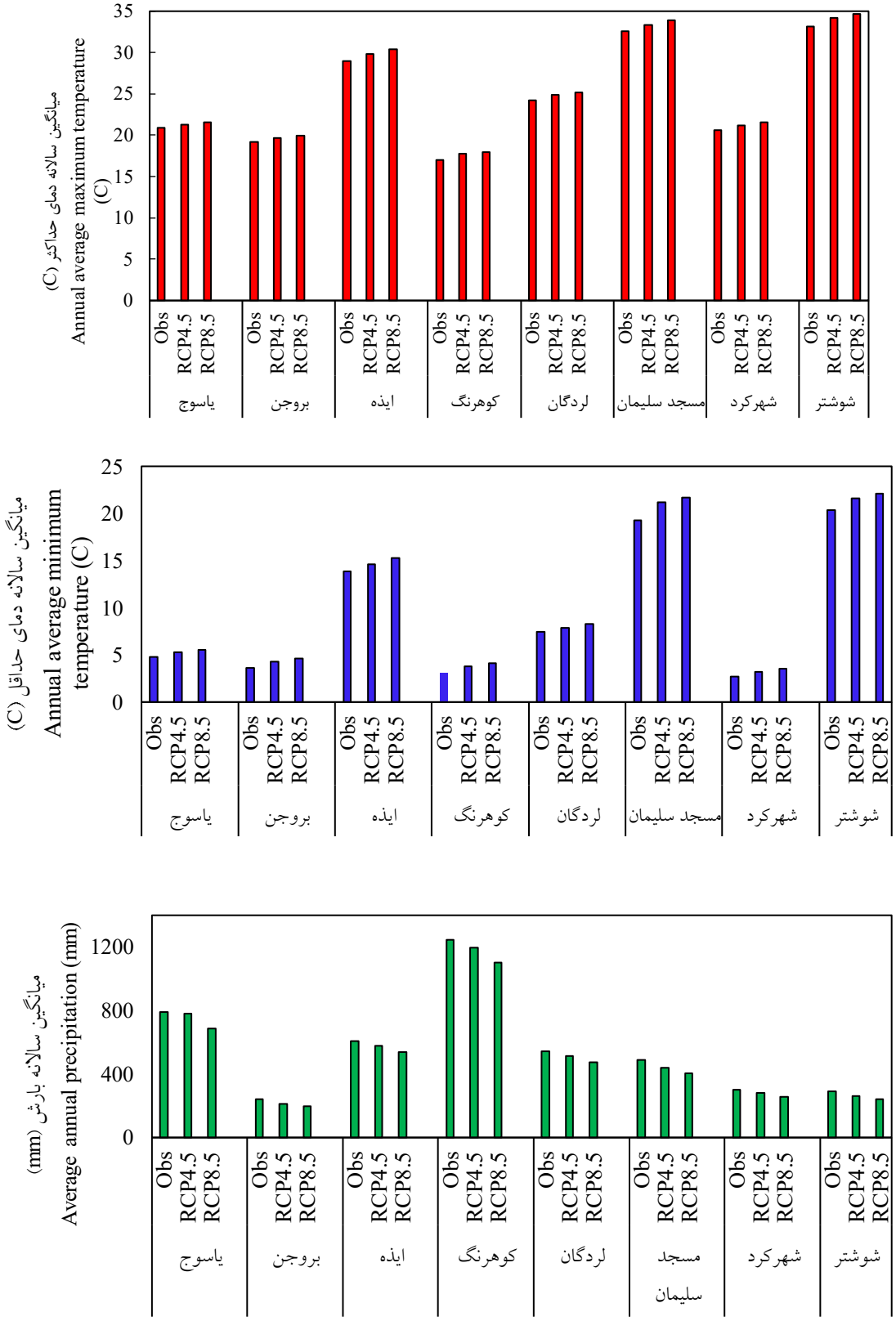
عملکردی نشان دادند که مدل‌های اقلیمی دمای حداکثر و حداقل را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کنند. پس از ارزیابی مدل‌های EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M، خروجی‌های حاصل از مدل‌ها در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۵) توسط نرم‌افزار CMhyd ریزمقیاس شد.

سپس تغییرات بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل حاصل از سه مدل اقلیمی تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آتی نسبت به دوره پایه بررسی شد (شکل ۲). نتایج نشان داد میانگین دراز مدت سالانه دمای حداکثر در دوره آتی به نسبت دوره پایه در هر هشت ایستگاه روند صعودی داشته است. همچنین نتایج نشان داد دمای حداکثر تحت سناریو RCP8.5 افزایش بیشتری به نسبت سناریو انتشار RCP4.5 دارد. بیشترین افزایش دمای حداکثر مربوط به ایستگاه شوشتر بوده است. در این ایستگاه دمای حداکثر در سناریوی انتشار RCP8.5، ۱/٤٦ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی انتشار RCP4.5، یک درجه سانتی‌گراد به نسبت دوره پایه افزایش خواهد یافت. ایستگاه یاسوج کم‌ترین میزان افزایش دمای حداکثر را برای دوره آینده به نسبت دوره پایه نشان داد. به این صورت که دمای حداکثر در سناریو انتشار RCP8.5 و RCP4.5 به‌ترتیب ۰/٦٨ و ۰/٤٢ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. نتایج میانگین دراز مدت سالانه دمای حداقل در دوره آتی به نسبت دوره پایه در هر هشت ایستگاه روند صعودی داشته است. در این میان ایستگاه مسجد سلیمان بیشترین افزایش دمای حداقل را دارد. در این ایستگاه افزایش دمای حداقل تحت سناریو انتشار RCP8.5، ۲/۲,٤١٤١ درجه سانتی‌گراد و در سناریو RCP4.5،۱/۹۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین بارش در کل محدوده در دوره آتی روند نزولی داشته است و سناریوی RCP8.5 به نسبت RCP4.5 کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد ایستگاه کوهرنگ متاثر از تغییر اقلیم بیشترین کاهش بارش را در دوره آتی خواهد داشت. مقدار کاهش بارندگی در کوهرنگ در سناریو RCP8.5، ١٤٦/٣ میلی‌متر و در سناریوی RCP4.5، ٥٣/٦ بوده است که به ترتیب حدود ١١/٧ و ٤/٣ درصد است.

نتایج **محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI**

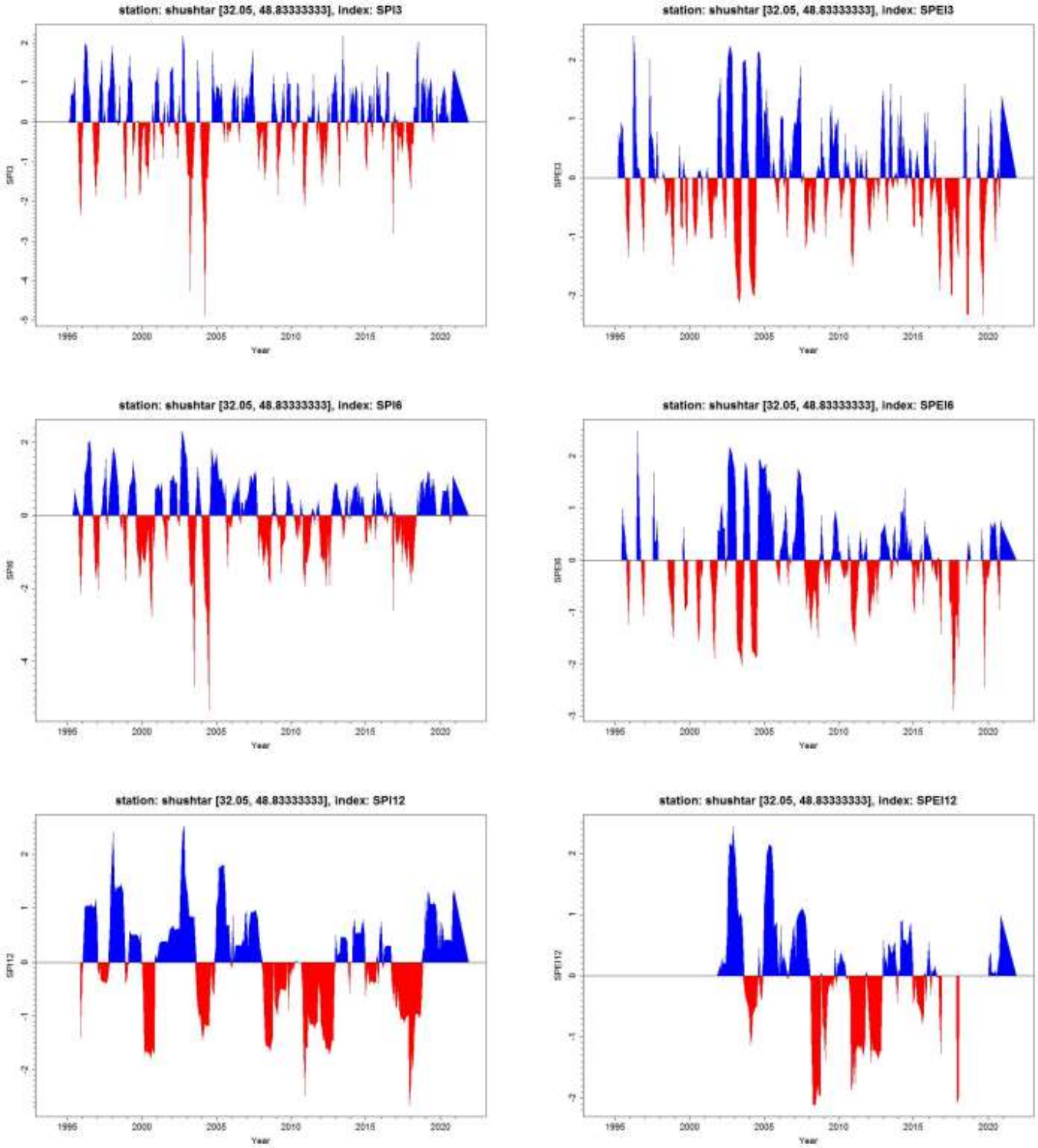
نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه شوشتر به عنوان یکی از هشت ایستگاه مورد استفاده در این پژوهش در دوره مشاهده‌ای (۱۹۹۵-۲۰۲۰) در شکل (۳) ارائه شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مقیاس سه ماهه در فاصله سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ وقوع ترسالی‌ها بیشتر بوده است. در مقیاس شش ماهه دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰٤، ۲۰۱۳-۲۰۱٤ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ و در مقیاس ۱۲ ماهه دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۳، ۲۰۰٦-۲۰۰۸، ۲۰۱۳-۲۰۱٤، ۲۰۱۸-۲۰۲۰ و سال‌های ۱۹۹٦، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ وقوع ترسالی بیشتر بوده است. همچنین در مقیاس ۱۲ ماهه دوره‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۳، ۲۰۱٦-۲۰۱۸ و سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۰٤ بیشتر درگیر خشکسالی بوده‌اند. همچنین شکل (٤ و ٥) وضعیت شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI را برای دوره آتی نشان می‌دهند. همانطور که پیداست در هر سه مقیاس زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه در دوره آتی به نسبت دوره پایه در سری زمانی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI نوسانات زیادی وجود دارد. همچنین حالت‌های حدی خشکسالی در دوره آتی افزایش یافته است. پیشبینی می‌شود در دوره آتی تعداد ماه‌های خشک نسبت به تعداد ماه‌های با وضعیت نرمال و مرطوب کمتر باشد.

نتایج جدول (٤) ویژگی‌های خشکسالی را به کمک شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه برای دوره پایه و آتی نشان



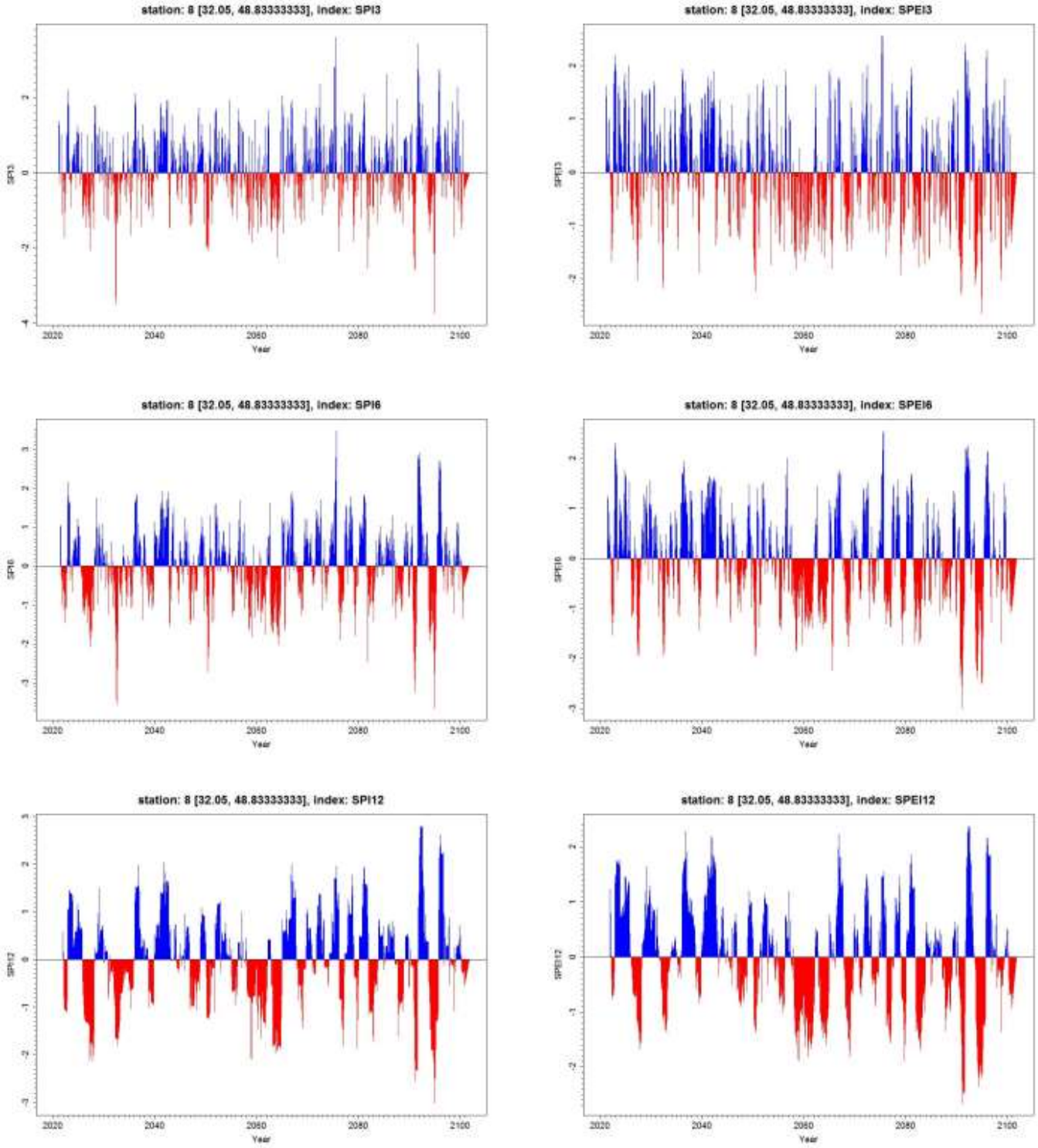
شکل ۲- مقایسه میانگین دراز مدت سالانه دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) و دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

Fig 2. Comparison of the annual long-term average maximum temperature, minimum temperature and precipitation in the base period (1990-2005) and the future period (2055-2030) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios



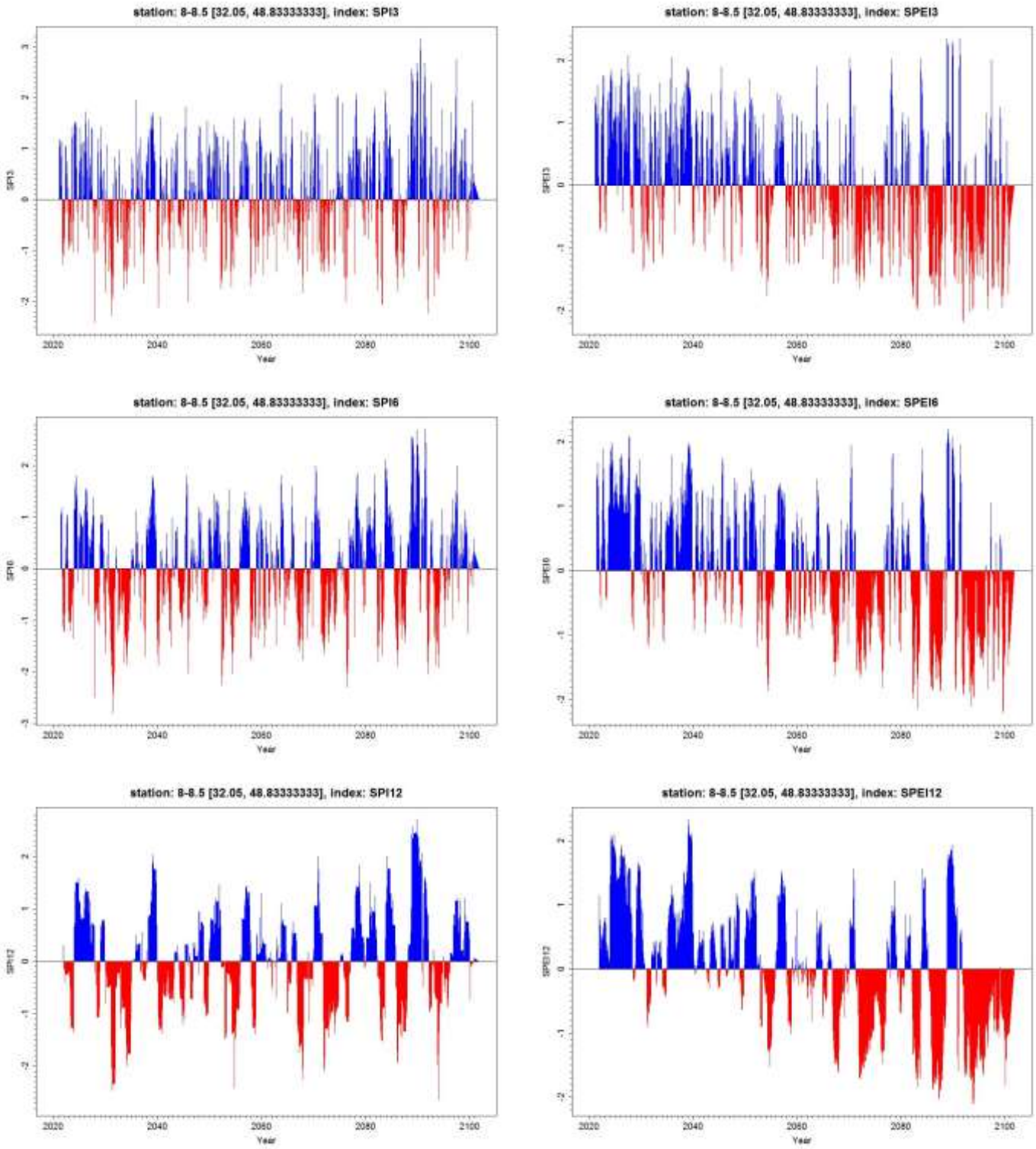
شکل ۳ـ ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦ و ۱۲ ماه در ایستگاه شوشتر در دوره (۱۹۹۵–۲۰۲۰)

Fig 3. Evaluation of SPI and SPEI drought indices in 3, 6 and 12 monthly at Shushtar station in the period (1995-220)



شکل ٤- ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦ و ۱۲ ماه در ایستگاه شوشتر در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5

Fig 4. Evaluation of SPI and SPEI drought indices in 3, 6 and 12 monthly at Shushtar station in the future period under RCP4.5 scenario



شکل ۵- ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦ و ۱۲ ماه در ایستگاه شوشتر در دوره آتی تحت سناریو RCP8.5

Fig 5. Evaluation of SPI and SPEI drought indices in 3, 6 and 12 monthly at Shushtar station in the future period under RCP8.5 scenario

می‌دهد. در مقیاس سه ماهه طولانی‌ترین تداوم خشکسالی مربوط به ایستگاه بروجن با نه ماه تداوم بوده است که از نوامبر ۲۰۰۷ شروع و در ژولای ۲۰۰۸ خاتمه می‌یابد؛ که در طبقات خشک‌سالی شدید (۵ماه)، خیلی شدید (۳ ماه) و متوسط (۱ ماه) قرارگرفته است. کم‌ترین تداوم خشکسالی نیز در ایستگاه لردگان با سه ماه تداوم بوده است. در مقیاس زمانی شش‌ماهه نیز کم‌ترین میزان تداوم در ایستگاه مسجد سلیمان با پنج ماه و طولانی‌ترین تداوم نیز ایستگاه بروجن با ۱۱ ماه بوده است که از نوامبر ۲۰۰۷ شروع و در سپتامبر ۲۰۰۸

جدول ٤- آنالیز خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦ و ۱۲ ماهه توسط شاخص SPI در دوره پایه و آتی

Table 4. Analysis of drought in 3, 6 and 12 monthly by SPI index in the base and future periods

ایستگاه station	دوره زمانی Time Period	1995-2020 فراوانی خشکسالی(درصد) متوسط Medi..um	شدید Inte..	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی (ماه) Long	RCP4.5 (2030-2050) فراوانی خشکسالی(درصد) متوسط Medi..	شدید Inte.	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی (ماه) Long	RCP8.5 (2030-2050) فراوانی خشکسالی(درصد) متوسط Medi..	شدید Inte.	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی (ماه) Long
Borujen بروجن	3	8	5	4	9	8	3	1	6	11	3	2	5
	6	6	4	6	11	7	4	2	9	9	4	1	8
	12	7	5	4	13	9	2	1	14	7	5	1	12
Kuhrang کوهرنگ	3	10	4	3	6	8	3	1	6	12	4	5	6
	6	11	3	3	7	7	4	2	8	7	7	3	7
	12	12	4	1	12	8	3	3	16	7	6	0	15
Lordegan لردگان	3	7	3	3	3	6	5	1	6	11	3	4	7
	6	7	4	4	7	6	6	2	8	8	6	2	7
	12	5	2	3	12	8	2	4	27	10	4	0	21
مسجدسلیمان Masjed Soleyman	3	5	3	2	4	6	3	1	5	8	4	2	7
	6	6	1	0	5	6	3	2	8	10	6	3	10
	12	3	0	0	4	10	4	0	13	8	4	4	13
Izeh ایذه	3	8	3	3	4	11	2	1	7	8	5	2	7
	6	10	4	2	6	8	4	2	10	11	5	4	9
	12	13	3	1	11	7	3	4	15	8	8	3	12
شهرکرد Shahr-e Kord	3	7	4	3	6	8	3	1	8	8	4	3	5
	6	8	4	5	8	8	5	3	8	12	2	2	8
	12	9	5	4	12	10	2	2	26	7	4	0	10
Shushtar شوشتر	3	9	4	3	6	7	2	2	6	10	4	1	7
	6	10	6	3	6	8	2	2	8	10	5	4	10
	12	11	8	1	11	6	3	0	12	13	4	4	14
Yasuj یاسوج	3	8	5	3	4	6	3	2	7	10	5	5	5
	6	8	4	4	8	7	3	2	11	8	5	4	7
	12	8	3	3	13	6	1	3	15	13	5	2	20

❊ Medi= medium; inte= intense Very..= very intense; Long= The longest drought

خاتمه می‌یابد که در طبقات خشک‌سالی شدید (سه ماه)، خیلی شدید (هفت ماه) و متوسط (یک ماه) قرارگرفته است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، طولانی‌ترین تداوم مربوط به ایستگاه‌های یاسوج و بروجن با ۱۳ ماه که در بروجن از فوریه ۲۰۰۸ شروع و در فوریه ۲۰۰۹ خاتمه می‌یابد که در طبقات خشکسالی خیلی شدید (۱۱ ماه) و متوسط (دو ماه) قرارگرفته است. ایستگاه مسجد سلیمان با سه ماه کم‌ترین تداوم خشکسالی را داشته است. از نظر طولانی‌ترین تداوم خشکسالی در دوره آماری (۲۰۳۰-۲۰۵۵) در مقیاس سه‌ماهه، در سناریوی $RCP_{4.5}$ در اکثر ایستگاه‌ها تداوم خشکسالی بین شش تا هفت ماه بوده است. اما بیشترین تداوم خشکسالی در ایستگاه شهرکرد با هشت ماه و حداقل آن در مسجدسلیمان با پنج ماه تداوم بوده است. در مقیاس شش ماهه، ایستگاه یاسوج با ۱۱ ماه تداوم خشکسالی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و اغلب ایستگاه‌ها با هشت ماه تداوم خشکسالی کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. در مقیاس دوازده ماهه، بیشترین تداوم خشکسالی در ایستگاه لردگان با ۲۷ ماه و حداقل آن در شوشتر با ۱۲ ماه تداوم بوده است. همچنین در RCP8.5 در مقیاس سه ماهه، در اکثر ایستگاه‌ها تداوم خشکسالی بین پنج تا هفت ماه است. در مقیاس شش ماهه، طولانی‌ترین تداوم خشکسالی مربوط به ایستگاه‌های مسجد سلیمان و شوشتر با ۱۰ ماه بوده است. ایستگاه‌های لردگان و یاسوج با سه ماه کم‌ترین تداوم خشکسالی را داشته است. در مقیاس دوازده ماهه، بیشترین تداوم خشکسالی در ایستگاه لردگان با ۲۱ ماه و حداقل آن در شهرکرد با ۱۰ ماه تداوم بوده است.

ازنظر فراوانی خشکسالی در دوره آماری (۱۹۹۵-۲۰۲۰) در مقیاس سه‌ماهه، ایستگاه کوهرنگ دارای بیشترین فراوانی با ۱۷ بار تجربه خشکسالی و ایستگاه مسجد سلیمان با ۱۰ بار تجربه

جدول ۵- آنالیز خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦ و ۱۲ ماهه توسط شاخص SPEI در دوره پایه و آتی

Table 5- Analysis of drought in 3, 6 and 12 monthly by SPEI index in the base and future periods

ایستگاه station	دوره زمانی Time Period	1995-2020 فراوانی خشکسالی(درصد) متوسط Medium	شدید Inte..	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی (ماه) Long	RCP4.5 (2030-2050) فراوانی خشکسالی(درصد) متوسط Medi..	شدید Inte.	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی (ماه) متوسط Long	RCP8.5 (2030-2050) فراوانی خشکسالی(درصد) شدید Medi..	بسیار شدید Inte.	بسیار شدید Very..	طولانی‌ترین خشکسالی Long
بروجن	3	11	4	1	6	6	4	0	5	1	0	0	1
Borujen	6	6	5	0	7	7	3	0	6	0	0	0	0
	12	6	4	0	12	4	1	0	6	1	0	0	0
کوهرنگ	3	9	3	0	8	8	3	1	6	10	4	1	5
Kuhrang	6	6	2	1	7	8	2	2	8	10	4	0	7
	12	2	0	0	6	8	4	1	16	9	0	0	6
لردگان	3	10	5	1	5	6	4	1	6	5	0	0	3
Lordegan	6	6	4	2	7	6	3	1	7	1	0	0	3
	12	4	2	2	13	6	4	0	16	0	0	0	0
مسجدسلیمان	3	9	5	1	4	8	2	1	5	7	0	0	3
Masjed	6	9	4	۰0	5	5	2	0	6	4	0	0	3
Soleyman	12	8	3	0	13	6	0	0	12	0	0	0	1
ایذهIzeh	3	11	4	2	5	7	4	1	6	8	1	1	4
	6	11	4	1	9	8	4	0	8	5	0	0	4
	12	17	2	0	19	4	5	0	14	4	0	0	4
شهرکرد	3	9	4	1	7	7	4	0	7	2	0	0	1
Shahr-e Kord	6	7	3	1	7	6	4	0	8	0	0	0	0
	12	4	4	0	12	5	2	0	7	0	0	0	0
شوشتر	3	8	7	2	6	9	2	1	5	7	1	0	5
Shushtar	6	6	4	1	6	6	3	0	6	4	1	0	7
	12	7	2	2	12	6	0	0	12	3	0	0	11
یاسوجYasuj	3	8	5	0	4	8	3	1	6	10	3	0	4
	6	6	4	1	6	6	3	2	8	9	2	0	5
	12	6	3	0	8	7	3	۱1	15	6	0	0	8

❊ Medi= medium; inte= intense Very..= very intense; Long= The longest drought

خشکسالی کم‌ترین بوده‌اند. در مقیاس زمانی شش‌ماهه ایستگاه شوشتر با ۱۹ بار خشکسالی و ایستگاه مسجد سلیمان با هفت بار خشکسالی به ترتیب بیشترین و کم‌ترین میزان خشکسالی را شامل شده‌اند. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، حداقل فراوانی خشکسالی در ایستگاه مسجدسلیمان با سه بار و حداکثر فراوانی خشکسالی در شوشتر با ۲۰ بار بیشترین و کم‌ترین میزان خشکسالی را نشان می‌دهند. ازنظر فراوانی خشکسالی در دوره آماری (۲۰۳۰-۲۰۵۵) در مقیاس سه‌ماهه، در سناریوی RCP4.5 ایستگاه ایذه دارای بیش‌ترین فراوانی با ١٤ بار تجربه خشکسالی نسبت به ایستگاه شوشتر در غرب با ۱۰ بار تجربه خشک‌سالی است که در ایستگاه شوشتر نسبت به دوره پایه، خشک‌سالی بسیار کمتری را نسبت به سایر ایستگاه‌ها تجربه می‌کند. در سناریوی RCP8.5 ایستگاه کوهرنگ دارای بیشترین فراوانی با ۲۱ بار تجربه خشکسالی نسبت به ایستگاه مسجدسلیمان با ١٤ بار خشکسالی است. در مقیاس شش‌ماهه، در سناریوی $RCP_{4.5}$، حداکثر دفعات خشکسالی در شهرکرد با ١٦ بار و حداقل آن نیز در ایستگاه مسجدسلیمان با ۱۱ بار خشکسالی است. در سناریوی $RCP_{8.5}$ ایستگاه ایذه دارای بیشترین فراوانی با ۲۰ بار تجربه خشکسالی نسبت به ایستگاه بروجن با ۱۵ بار خشک‌سالی بوده است. در مقیاس دوازده‌ماهه، در سناریوی $RCP_{4.5}$ ایستگاه کوهرنگ با ۱۵ بار، بیشترین فراوانی و ایستگاه شوشتر با نه بار، کم‌ترین فراوانی را خواهد داشت. در سناریوی $RCP_{8.5}$ ایستگاه شوشتر با ۲۱ بار بیشترین و ایستگاه شهرکرد با ۱۱ بار کم‌ترین فراوانی را خواهند داشت.

نتایج حاصل از بررسی خشکسالی توسط شاخص SPEI نیز در جدول (۵) ارائه شده است. در بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI مشاهده می‌شود که همانند شاخص SPI الگوی

تغییرات دوره خشکسالی در ایستگاه‌ها قابل تشخیص است. قابل ذکر است شدت خشکسالی‌های محاسبه شده با استفاده از شاخص SPEI به ندرت از مقدار عددی دو بالاتر است. با مقایسه تداوم و فراوانی خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی و در مقایس‌های زمانی مختلف، مشخص شد که شاخص SPI به نسبت شاخص SPEI تداوم و فراوانی خشکسالی را در اغلب موارد بیشتر نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی خشکسالی یکی از راهکارهای مدیریتی است که به برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده از منابع محدود آب کمک شایانی می‌نماید. همچنین بررسی تغییرات خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است؛ زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلندمدت، لازم است که چشم‌اندازی از وضعیت آینده بارندگی و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه تدوین شود. تحقیق حاضر به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و ارتباط و تأثیر متقابل آن بر روی خشکسالی محدوده مطالعاتی کارون سه در دوره آینده انجام شد. ابتدا به کمک سه مدل اقلیمی EC-EARTH، CNRM-CM5 و GFDL-ESM2M تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی اقلیمی دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۵) انجام گرفت سپس با خروجی دما و بارش دوره آتی و با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI به بررسی و مقایسه ویژگی‌های خشکسالی از جمله شدت و مدت آن در دوره آتی نسبت به دوره پایه در سه مقیاس زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه پرداخته شد. نتایج نشان داد میانگین دراز مدت سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره آتی به نسبت دوره پایه در هر هشت ایستگاه روند صعودی داشته است. همچنین نتایج نشان داد دمای حداکثر تحت سناریو 8.5RCP افزایش بیشتری به نسبت سناریو انتشار 4.5RCP دارد. همچنین نتایج نشان داد ایستگاه کوهرنگ متأثر از تغییر اقلیم بیشترین کاهش بارش را در محدوده مطالعاتی طی دوره آتی خواهد داشت. مقدار کاهش بارندگی در سناریو 8.5RCP، ۱٤٦/۳ میلی‌متر و در سناریوی 4.5RCP، ۵۳/٦ بوده است که به ترتیب حدود ۱۱/۷ و ٤/۳ درصد است. نتایج ارزیابی خشکسالی نشان می‌دهد تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد که با نتایج نوروزی]۱۲[، همخوانی دارد.

نیکبخت]۱۱[، در پژوهشی خشکسالی حوضه کارون را در دوره آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از ۱۱ مدل گردش کلی تحت سه سناریوی انتشار 2A، 1B و A۱B بررسی کرد. نتایج نشان داد که فراوانی سال‌های نرمال و مرطوب در سناریوی انتشار B۱ و A۲ بیشتر از A۱B است. همچنین برایند کلی از فراوانی‌های خشکسالی در دوره‌های آتی نشان داد که دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۰) با افزایش سال‌های مرطوب همراه خواهد بود و دوره (۲۰٤٦-۲۰٦۵) به تدریج وارد خشکسالی‌ها با تداوم بیشتر خواهد شد و در دوره (۲۰۸۰-۲۰۹۹) وضعیت خشکسالی‌ها بحرانی‌تر و با فراوانی بیشتری نسبت به دوره‌های قبلی رخ خواهد داد. ملاحظه می‌شود که نتایج این مطالعه به خصوص نتایج شاخص SPEI با نتایج نیکبخت]۱۱[در دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۰) همخوانی دارد.

سپاسگزاری

در نهایت نویسندگان مقاله بر خود واجب دانسته تا از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران در جهت فراهم نمودن امکانات پژوهشی در راستای انجام هزینه‌های طرح پژوهشی تشکر نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

«نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.»

دسترسی به داده‌ها

«داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.»

مشارکت نویسندگان

اریسا جهانگیری: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله

بهارک معتمدوزیری: مفهوم‌سازی، راهنمایی، کنترل نتایج، ویرایش و بازبینی مقاله

هادی کیادلیری: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

منابع مورد استفاده

1. Ahmadi, M., Nosrati, K. and Selki, E. 2013. Drought and its relationship with soil moisture (Case study: Kabodar Abad, Isfahan). Geographiy, 11(38), pp. 77-91. (In Persian).

2. Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., & Hrissanthou, V. 2012. Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. Water resources management, 26, 2453-2473.

3. Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., & Sutera, A. 2003. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. Water resources management, 17, 273-296.

4. Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. World Meteorological Organization (WMO) Bulletin, 58(3), 175.

5. Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harpham, C., Salmon, M., & Morice, C. P. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D5).

6. Kaboosi K, Kordjazi M. 2017. The effect of climate change on meteorological parameters and drought in

Golestan province. Iran Water Resources Research, 13(3):205–213 (In Persian).

7. Lotfirad, M., Esmaeili-Gisavandani, H., & Adib, A. 2022. Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and random forest model in various climates of Iran. Journal of Water and Climate Change, 13(2), 383-406.

8. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. 1993. 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).

9. Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. Journal of Hydrology, 357(3-4), 282-302.

10. Modala, N. R., Ale, S., Goldberg, D. W., Olivares, M., Munster, C. L., Rajan, N., & Feagin, R. A. 2017. Climate change projections for the Texas high plains and rolling plains. Theoretical and Applied Climatology, 129, 263-280.

11. Nikbakht Shahbazi, A. 2017. Assessment of climate change impact on precipitation and temperature variation in watershed of Karoon 3 Dam. Environment and Water Engineering, 3(2), 133-143.

12. Norozi E, Rostami N, Jahangir M H. 2018. Prediction of drought condition during 2018-2037 period under

climate change approach (Case study: Ilam and Dehloran stations). Iranian Journal of Ecohydrology 5(3):977–991(In Persian).

13. Rezaei, H., Khanmohammadi, N., Montasari, M. and Bahmanesh, J., 2016. Investigating the effect of distribution function and estimation method of potential evapotranspiration in determination of dry matter identification index. Journal of Irrigation Science and Engineering, Volume 40, Special Issue 1/1, pp. 167- 183. (In Persian).

14. Rezaie, H., Khanmohammadi, N., Montazeri, M., & Behmanesh, G. 2018. Evaluating the selection of the most suitable probability distribution function for using the RDI and SPI drought indices. Water and Soil Science, 28(1), 29-40.

15. Saeidipour, M., Radmanesh, F., & Eslamian, S. 2019. Meteorological drought monitoring using the multivariate index of SPEI (Case Study: Karun Basin). AUT Journal of Civil Engineering, 3(1), 85-92.

16. Senatore, A., Hejabi, S., Mendicino, G., Bazrafshan, J., & Irannejad, P. 2019. Climate conditions and drought assessment with the Palmer Drought Severity Index in Iran: evaluation of CORDEX South Asia climate projections (2070–2099). Climate dynamics, 52, 865-891.

17. Sobhani, B., Ghafari Gilandeh, A. and Golghoust, A. 2015. Dry dryness in Ardebil province using the developed SPEI index based on fuzzy logic. Journal of Applied Geosciences Research, Vol. 15, No. 36, pp. 52-71. (In Persian).

18. Sun, C. X., Huang, G. H., Fan, Y., Zhou, X., Lu, C., & Wang, X. Q. 2019. Drought occurring with hot extremes: Changes under future climate change on Loess Plateau, China. Earth's Future, 7(6), 587-604.

19. Taboozadeh, Sh., Zarei, H. and Bazrafshan, A. 2015. Analysis of severity, duration, frequency and extent of meteorological precipitation in Bakhtegan watershed. Journal of Irrigation Science and Engineering, Vol. 38, No. 4, pp. 109-123. (In Persian).

20. Van Pelt, S. C., & Swart, R. J. 2011. Climate change risk management in transnational river basins: the Rhine. Water resources management, 25, 3837-3861.

21. 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.

22. Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. 2015. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). Journal of hydrology, 526, 183-195.

23. Zarei, A. R., Mahmoudi, M. R., & Moghimi, M. M. 2023. Determining the most appropriate drought index using the random forest algorithm with an emphasis on agricultural drought. Natural Hazards, 115(1), 923-946.

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 18, No. 65, Summer 2024
سال هجدهم- شماره ۶۵- تابستان ۱۴۰۳

Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed)

Erisa jahangiri[1], Baharak Motamedvaziri[2]* and Hadi Kiadaliri[3]
Received: 2023-05-05 Accepted: 2023-08-03

Introduction

Today, the phenomenon of climate change is one of the problems that has always received attention in the world. One of the reasons for climate change is the increase of greenhouse gases, which have a significant effect on extreme phenomena. Drought forecasting is one of the management strategies that helps to plan properly for using limited water resources. It is also important to examine drought changes based on climate changes from various aspects; in many long-term plans, it is necessary to develop a vision of the future state of rainfall and drought periods for the region. The SPEI index can calculate drought in different time scales and can also include the effects of temperature changes in drought assessment and be used to monitor current and future climate changes based on climate scenarios. Also, the Standard Precipitation Index (SPI) is one of the most important indicators in drought analysis. This index is known as the most appropriate index for drought analysis due to the simplicity of calculations, the use of available rainfall data, and the ability to calculate for any desired time scale. The recent increase in droughts in the Karun 3 watershed has caused water shortages and economic and social damages. Therefore, investigating the effect of climate change and analyzing the frequency of drought is very important. In line with this goal, in this research, firstly, simulation of rainfall, maximum temperature, and minimum temperature of eight meteorological stations using three climate models EC-EARTH, CNRM-CM5, and GFDL-ESM2M under two release scenarios RCP4.5 and RCP8 5. It was forecated for the period (2055-2030).

Materials and methods

In this research, firstly, the temperature data (maximum and minimum) and precipitation output of EC-EARTH, CNRM-CM5 and GFDL-ESM2M climate models under the CORDEX project for RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios with the help of CMhyd Raz software Scaled and time series of maximum,

1.Ph.D. Student, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. jahangirierisa@gmail.com
2. Corresponding author and Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.bmvaziri@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Environment and Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.h_kia2000@yahoo.com

minimum and precipitation temperatures for eight meteorological stations in the future period (2055-2030) were produced. Then, the temperature and precipitation changes in the future period compared to the base period (1995-2020) were investigated. Finally, the investigation of drought (frequency and continuity) in the future period under two release scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 by (SPI) and (SPEI) indicators in three-time scales of three, six, and twelve months using DIP software was performed. To evaluate the efficiency and accuracy of three EC-EARTH, CNRM-CM5, and GFDL-ESM2M general circulation models for simulating climate data, the monthly average of climate variables in the period (1990-2005) obtained from the output of the model was compared with the corresponding observational values. For this purpose, Nash Sutcliffe (NS), bias index and coefficient of determination (R^2) were used.

Results and discussion

The results showed that the maximum temperature increase is related to Shushtar station. In this station, the maximum temperature will increase by 1.46 degrees Celsius in the RCP8.5 emission scenario and one degree Celsius in the RCP4.5 emission scenario compared to the base period. Masjid Sulaiman station has the highest increase in minimum temperature. At this station, the minimum temperature increase under the RCP8.5 release scenario is 2.41 degrees Celsius and under the RCP4.5 scenario, it is 1.92 degrees Celsius. Also, the rainfall in the whole range has been decreasing in the coming period. The decrease of rainfall in Kohrang in the RCP8.5 scenario is 146.3 mm and in the RCP4.5 scenario, it is 53.6 mm, which is about 11.7 and 4.3 percent, respectively. In terms of the frequency of drought in the statistical period (2055-2030) on a three-month scale, in the RCP4.5 scenario, Izeh station has the highest frequency with 14 droughts, on a six-month scale, in the RCP4.5 scenario, the maximum number of droughts in Shahrekord with 16 times and on a twelve-month scale, in the RCP4.5 scenario, Kohrang station shows the highest frequency with 15 times. In the RCP8.5 scenario, Izeh station has the highest frequency with 20 drought experiences. Also, in the upcoming period, under the RCP4.5 release scenario, on the scale of three, six, and twelve, respectively, Shahrekord, Yasouj, and Lordegan stations will have eight, 11, and 27 months, and in the RCP8.5 scenario, the drought will continue the most at Masjid Sulaiman, Shushtar, and Lordegan, respectively.

Conclusion

The results showed that the annual long-term average of the maximum and minimum temperature in the future period compared to the base period in all eight stations had an upward trend. Also, the results showed that the maximum temperature under the 8.5RCP scenario increases more than the 4.5RCP release scenario. Also, the results showed that the Kohrang station affected by climate change will have the largest decrease in rainfall in the study area during the coming period. Also, the results showed that in all three-time scales of three, six, and 12 months in the future period, compared to the base period, there are many fluctuations in the time series of SPI and SPEI drought indices. Also, extreme drought conditions will increase in the coming period. It is expected that in the coming period, the number of dry months will be less than the

number of months with normal and wet conditions. Also, when examining the drought situation using the SPEI index, it can be seen that, like the SPI index, the pattern of changes in the drought period can be recognized in the stations. It should be mentioned that the intensity of droughts calculated using the SPEI index is rarely higher than the numerical value of two. By comparing the duration and frequency of drought in the studied stations and in different time comparisons, it was found that the SPI index shows the continuity and frequency of drought in most cases compared to the SPEI index.

Keywords: *Climate change, runoff, drought, SPI, SPEI, Karun*

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Islamic Azad University of Tehran for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Erisa jahangiri: Statistical analyses, Writing the first version of the manuscript

Baharak Motamedvaziri: Conceptualization, Supervision, Control result, Editing and revising the manuscript

Hadi Kiadaliri: Supervision, Editing and revising the manuscript, Control result