

تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های خشکسالی پیش‌بینی شده ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم

علیرضا قائمی^۱، سید آرمان هاشمی منفرد^{۲*}، عبدالحمید بحرپیما^۲، پیمان محمودی^۳، محمد ذونعمت کرمانی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

^۳ استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه باهنر، کرمان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

چکیده

هدف این مطالعه، ارزیابی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی شامل شدت، مدت و طول مدت دوره خشک ۳۹ هواشناسی ایران با رژیم بارشی متفاوت در سه دوره افق نزدیک، میانه و دور تحت اثر تغییر اقلیم می باشد. براین اساس، از میانگین شش مدل آب و هوایی منطقه‌ای جنوب آسیا (CORDEX-SA) برای دوره پایه و دوره های آینده با در نظر گرفتن دو سناریوی RCP۴.۵ و RCP۸.۵ استفاده شد. در ابتدا، بدلیل عملکرد ضعیف میانگین RCM ها در شبیه سازی بارش در دوره پایه، از یک روش تصحیح اریبی (BC) بنام تصحیح اریبی مبتنی بر رتبه بندی چندکی (QRBC) استفاده گردید. سپس با استفاده از تئوری گردش ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، ویژگی های خشکسالی ایران در مقیاس سالانه استخراج شدند. ارزیابی سناریوهای خشکسالی آینده در مقیاس سالانه شرایط متفاوتی برای نواحی مختلف ایران در سه افق مذکور را نشان داد و می توان گفت که بطور میانگین ایران با افزایش تغییرات در شدت خشکسالی ها مواجه خواهد شد و بیشترین تغییرات در شدت خشکسالی (۳/۸۳ درصد در مقایسه با دوره تاریخی) مطابق سناریوی RCP۸.۵ در افق دور اتفاق خواهد افتاد. درحالیکه کمترین میزان تغییرات در افزایش شدت خشکسالی مطابق سناریوی RCP۴.۵ در افق میانه (۰/۶۷ درصد در مقایسه با دوره تاریخی) رخ خواهد داد که با کاهش تغییرات در طول دوره خشکسالی (۲/۰۴ درصد در مقایسه با دوره تاریخی) همراه خواهد بود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، مدل های ریزمقیاس نمایی، خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده، تئوری گردش ها

تغییر اقلیم یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست محیطی می‌باشد که جهان امروز با آن روبرو شده است. افزایش دما به سبب گرمایش جهانی باعث افزایش تبخیر و تعرق و در نتیجه باعث تغییر در شدت، مدت و فراوانی وقوع بارش‌ها و همچنین تغییر در توزیع زمانی- مکانی آن‌ها شده است. لذا انتظار وقوع مخاطرات هیدرولوژیکی شدیدتر و پرتکرارتر، همچون خشکسالی‌ها و سیل‌ها، می‌تواند یکی از اثرات اولیه تغییر اقلیم جهانی باشد (IPCC^۱، ۲۰۱۲، دای، ۲۰۱۲، محمودی و چاهی، ۲۰۱۹).

مطالعات بسیاری روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را در مقیاس‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی مورد مطالعه قرار داده‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی طبقه‌بندی نمود. دسته اول مطالعاتی هستند که روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را بر اساس داده‌های تاریخی مورد بررسی قرار داده‌اند و دسته دوم مطالعاتی هستند که همین تغییرات را برای آینده شبیه‌سازی نموده‌اند. مطالعاتی که روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را بر اساس داده‌های تاریخی در مقیاس‌های جهانی مورد مطالعه قرار داده‌اند گزارش کرده‌اند که هنوز هیچ الگوی رفتاری مشخصی در یک مقیاس جهانی مشاهده نشده است. اما در مقیاس‌های منطقه‌ای تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی‌ها در بسیاری از مطالعات مورد تایید قرار گرفته‌اند. برخی از این مطالعات ادعا می‌کنند که فراوانی و شدت خشکسالی‌ها از اواخر قرن بیستم به بعد افزایش داشته‌اند و برخی دیگر ادعا کرده‌اند که در قسمت‌هایی از جهان فراوانی و شدت خشکسالی‌ها کاهش یافته است (جو و همکاران، ۲۰۱۵، وانگ و همکاران، ۲۰۱۶، فانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

کشور ایران با بارشی در حدود یک سوم بارش جهانی در یکی از مناطق خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است و خشکی جزء ویژگی اصلی اقلیم آن به شمار می‌آید. میانگین بارش ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که حدود ۶۱ میلی‌متر از این بارش به رواناب تبدیل می‌شود. حدود ۱۷۵ میلی‌متر آن از طریق تبخیر و تعرق به جو باز می‌گردد و تنها حدود ۱۴

میلی‌متر از بارش در زمین نفوذ می‌کند که همین ۱۴ میلی‌متر منبع اصلی تأمین بخش بزرگی از آب ایران به شمار می‌رود که بصورت ذخایر زیر زمینی در می‌آیند (محمودی و همکاران، ۲۰۱۹). در ایران نیز مطالعات مختلفی روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را مورد توجه قرار داده‌اند. باری ابرقویی و همکاران (۲۰۱۱) روند تغییرات شدت خشکسالی‌های ایران را با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI^2) در مقیاس‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که روند کاهشی در شدت خشکسالی‌های ایران در جنوب شرق، غرب و جنوب غرب قابل توجه تر از دیگر مناطق ایران است. محمودی و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده‌اند که روند تغییرات شدت خشکسالی‌های ایران از فصلی به فصل دیگر و از یک مقیاس زمانی به یک مقیاس زمانی دیگر بسیار متفاوت بوده‌اند. در فصل پاییز تغییرات شدت خشکسالی‌های ایران روند افزایشی و در دو فصل زمستان و بهار روند کاهشی داشته‌اند. به عبارت دیگر در فصل پاییز بر شدت خشکسالی ایران افزوده شده است و در دو فصل زمستان و بهار از شدت آن‌ها کاسته شده است. نوری و همائی (۲۰۱۹) در چهار مقیاس زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه، روند شدت خشکسالی‌های ایران را با استفاده از دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و تبخیر و تعرق - بارش استاندارد شده ($SPEI^3$) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه این دو محقق نشان داد که بر اساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، ۷۶ درصد و بر اساس شاخص تبخیر و تعرق - بارش استاندارد شده ($SPEI$)، ۸۵ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه روند کاهشی داشته‌اند.

اما مطالعاتی که روند تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها را برای افق آینده تحت تاثیر گرمایش جهانی شبیه‌سازی نموده‌اند نشان می‌دهند که علیرغم تغییرات قابل توجه منطقه‌ای، یک روند خشک شدن جهانی در طول قرن بیست و یکم پیش‌بینی می‌شود. لیون (۲۰۰۹) خشکسالی‌های آینده را بر اساس دو شاخص ناهنجاری رطوبت خاک و تعداد روزهای خشک متوالی (CDD^4) برای جنوب و مرکز اروپا، مرکز آمریکای شمالی، آمریکای مرکزی و مکزیک، شمال شرق

2 Standardized precipitation index

3 Standardized precipitation-evapotranspiration

4 Number of consecutive dry days

برزیل و جنوب آفریقا افزایشی می‌داند. میانگین دهه ای نسخه خود-واستنجی شاخص شدت خشکسالی پالمر (scPDSI⁵) محاسبه شده با استفاده از میانگین ترکیبی ۲۲ مدل گردش عمومی جو (GCMs⁶)، خشکی فزاینده ای را بین دهه های ۱۹۵۰ و ۲۰۹۰ در بیشتر قاره آفریقا، جنوب اروپا و خاورمیانه، بیشتر قاره آمریکا، استرالیا و جنوب شرق آسیا نشان می‌دهد. بر اساس ۲۱ مدل گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوی SRES A1B پیش بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ رطوبت خاک در سطح جهان کاهش یابد و باعث خشکسالی در مناطق حاره و جنب حاره از جمله جنوب غرب آمریکای شمالی، آمریکای مرکزی، مدیترانه، استرالیا، بخش زیادی از آمازون، جنوب و غرب آفریقا شود. طبری و ویلمز (۲۰۱۸) با استفاده از نتایج ۶ مدل گردش عمومی جو (GCMs)، ریز مقیاس نمایی شده با دو مدل اقلیم منطقه ای RCA⁴ و REMO مربوط به پروژه آزمایش هماهنگ ریز مقیاس نمایی اقلیم منطقه ای بر روی حوزه جنوب آسیا (CORDEX-WAS) تحت سناریوی RCP⁷۴.۵، روزهای بارشی کمتر و دوره های خشک طولانی تری را برای خاورمیانه برای دوره ۲۰۷۱-۲۰۹۹ پیش‌بینی نموده‌اند. نتایج مطالعات وسیم و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش حدود ۵ درصدی دما و تبخیر و تفرق و کاهش حدود ۴۰ درصدی بارش را برای جنوب غرب پاکستان برای دوره آینده ۲۰۳۴-۲۰۱۹ و ۲۰۵۰-۲۰۳۵ نشان می‌دهد. این تغییرات در نهایت فراوانی وقوع بیشتر خشکسالی‌ها و شدیدتر شدن آنها را برای این منطقه از پاکستان به همراه دارد.

اما مطالعاتی که به بررسی نمایه های خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم، برای دوره‌های آینده، در مقیاس سرزمینی ایران پرداخته باشند بسیار محدود هستند. خزانه داری و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل آماری LARS-WG به پیش‌نگری وضعیت خشکسالی ایران طی ۳۰ سال آینده پرداختند و نشان دادند که بیشتر نقاط کشور تا سال ۲۰۳۹ با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبرو خواهند شد. زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) با پیش‌نگری دوره های خشک و مرطوب متوالی در ایران به این نتیجه رسیدند که بی‌هنجاری

دوره های خشک متوالی به عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی های کوتاه مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۲) همچنین در تحقیق دیگری اظهار داشتند که روزهای خشک به اندازه ۷/۵ درصد و طول دوره خشک به اندازه ۲۸/۸ درصد تا سال ۲۱۰۰ افزایش خواهند داشت. سناتور و همکاران (۲۰۱۸) نیز بر اساس داده های اقلیمی پروژه CORDEX-WAS تحت سناریو RCP⁴۵.۵ کاهش ۲۰ درصدی بارش ایران را برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ پیش بینی نموده‌اند. این کاهش ۲۰ درصدی در بارش های ایران در نهایت خشکسالی های شدیدتری را بر اساس scPDSI برای ایران به همراه خواهد داشت. میراکبری و ابراهیمی خوسفی (۲۰۲۱) نشان دادند که بر اساس دو شاخص SPEI و شاخص شناسایی خشکسالی (RDI⁸) شدت و مدت خشکسالی‌های بلندمدت در تالاب‌های شرقی ایران در مقایسه با تالاب‌های غربی ایران بیشتر خواهند بود. مطالعه صالحی طبس و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که هرچه بازه‌های زمانی شاخص SPI در دوره های آینده افزایش پیدا کند، مقادیر شدت خشکسالی در بیرجند افزایش خواهد یافت. مظفری و همکاران (۱۳۹۹) نیز بر مبنای شاخص SPI اظهار کردند که بخش عمده ای از مساحت ایران در دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۶ به سمت کاهش خشکسالی پیش خواهد رفت و بخش‌های شمالی، شمال شرقی، غربی و جنوبی ایران بیشترین مقادیر مشخصه‌های خشکسالی را تجربه خواهند کرد. علاوه بر این، نتایج آنها بیانگر کاهش شدت و طول دوره خشکسالی‌ها در دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۶ مطابق دو سناریو RCP⁴۵ و RCP⁸۵.۵ بود و از گستردگی مناطق دربرگیرنده خشکسالی‌های زیاد کاسته خواهد شد.

بنابراین هرگونه تغییری در ویژگی های مختلف خشکسالی های ایران تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده می تواند چالش‌های پیچیده تأمین آب را برای مصارف رقابتی در مناطق مختلف ایران در زمان کمبود شدید آب برجسته تر نماید. این پیچیدگی زمانی بیشتر خواهد شد که نگرانی های بسیاری در خصوص ناکارآمدی شیوه های کنونی مدیریت خشکسالی در ایران که عمدتاً مبتنی بر مدیریت بحران است وجود دارد. لذا با توجه به موارد اشاره شده در بالا و بر اساس

5 Self-calibrating palmer drought severity Index

6 General circulation models

7 Representative concentration pathway

8 Reconnaissance drought Index

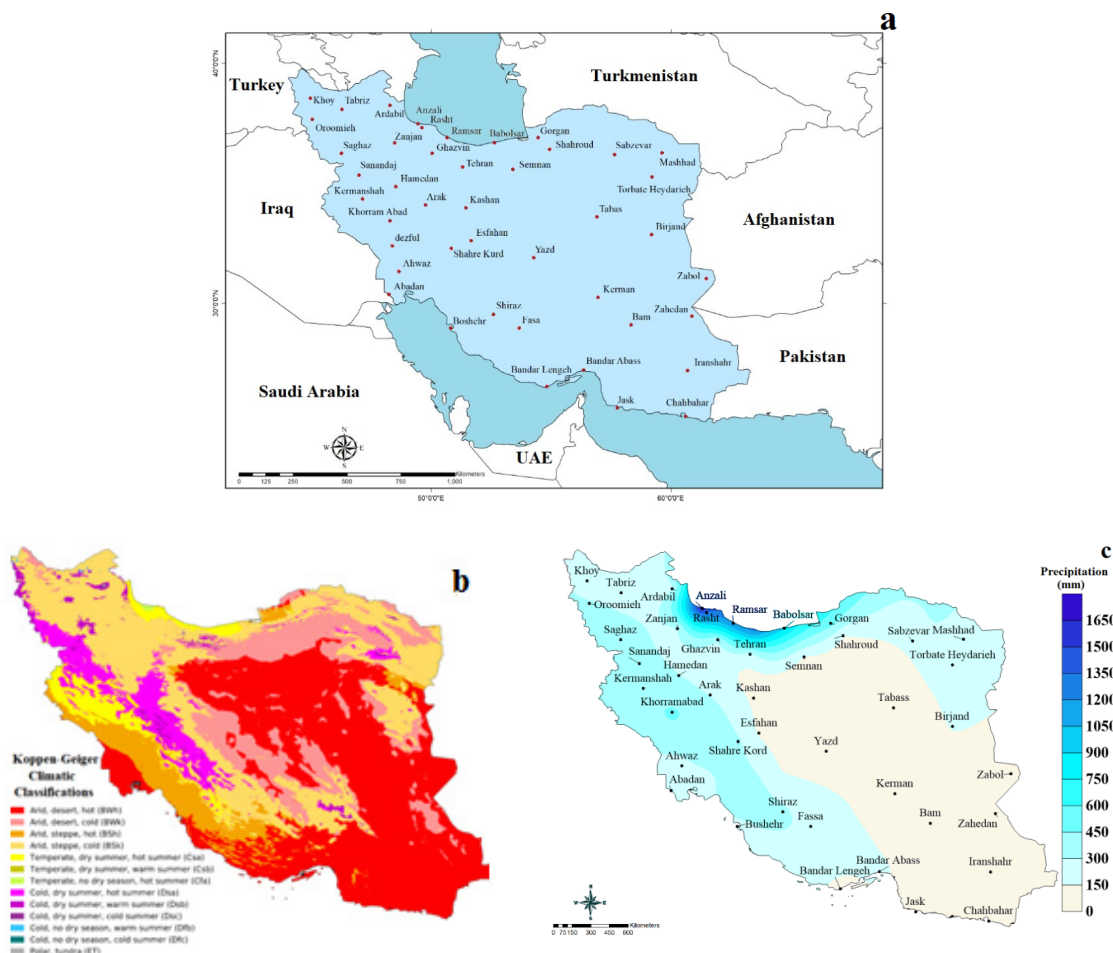
الف) (مربانجی، ۲۰۲۰). به سبب موقعیت خاص جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافی هر منطقه از ایران آب و هواهای متفاوتی بر آن حاکم است. به طوریکه بر اساس طبقه بندی اقلیمی کوپن-گایگر (کوئک و همکاران، ۲۰۰۶)، ایران را می‌توان به یازده طبقه اقلیمی تقسیم بندی نمود که قسمت اعظم آن را اقلیم های خشک و نیمه خشک در بر گرفته است (شکل ۳). میانگین بارش سالانه ایران نزدیک به ۲۵۰ میلی‌متر است که توزیع مکانی آن در نقاط مختلف کشور بسیار متفاوت است بطوریکه میانگین بارش سالانه در مناطق کویری آن کمتر از ۵۰ میلی متر و در برخی دیگر از نقاط آن مانند کرانه‌های غربی دریای خزر به ۱۸۰۰ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱ ج).

پیشینه تحقیق ارائه شده، هدف اصلی این مقاله مطالعه اثر تغییر اقلیم بر ویژگی های شدت، مدت و فراوانی خشکسالی های ایران در مقیاس زمانی سالانه است که در مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

الف - منطقه مورد مطالعه

کشور پهناور ایران با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی در کمربند بیابانی نیمکره شمالی در جنوب غرب آسیا گسترده شده است (شکل ۱



شکل ۱. الف) نقشه موقعیت جغرافیایی ایران در جنوب غرب آسیا، ب) نقشه طبقه بندی اقلیمی ایران بر اساس روش کوپن-گایگر، ج) نقشه توزیع مکانی میانگین بارش سالانه ایران (یک و همکاران، ۲۰۱۸، رحیمی و همکاران، ۲۰۲۰)

جدول ۱. مشخصات کلی تمامی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs)، مدل‌های اقلیم منطقه ای (RCMs) و قدرت تفکیک مکانی آنها

RCM institution(s)	RCM	GCM	Resolution
Indian Institute of Tropical Meteorology (IITM)	RegCM 4.4	CCCma-CanESM2	۰/۴۴
		CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	۰/۴۴
		CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-	۰/۴۴
		NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	۰/۴۴
		IPSL-IPSL-CM5A-MR	۰/۴۴
		MPI-M-MPI-ESM-LR	۰/۴۴

ب - انتخاب داده ها

داده‌های شبیه سازی شده، شرایط افق حاضر (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و سه دوره افق آینده را که با عبارات افق نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، افق میانه (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و افق دور (۲۰۹۹-۲۰۷۰) نام‌گذاری شده اند، تحت دو سناریوی نماینده خطوط سیر غلظت یعنی RCP۴.۵ (مطابق با حدود ۲ درجه سلسیوس گرمایش جهانی تا پایان قرن حاضر) و RCP۸.۵ (ادامه تجارت کما فی سابق تا پایان قرن حاضر) را پوشش می دهند. قدرت تفکیک مکانی این داده ها نیز حدود ۰/۴۴ درجه است. در جدول ۱ مشخصات کلی تمامی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs)، مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCMs) و قدرت تفکیک مکانی آنها آورده شده است.

داده‌های مورد نیاز این پژوهش شامل دو گروه داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده هستند. گروه اول مربوط به داده‌های بارش ماهانه ۳۹ ایستگاه هواشناسی همدیدی برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) بود که از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. علل انتخاب این ایستگاه‌ها، طول دوره آماری کافی (حداقل ۳۰ سال) و همچنین پراکنش مناسب مکانی آن‌ها بوده است. این داده‌ها دارای آماری کامل و فاقد هر گونه خلاء آماری بودند. توزیع و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ الف آورده شده است.

گروه دوم نیز داده‌های شبیه‌سازی شده بارش مدل اقلیم منطقه ای ۴.۴ RegCM مربوط به پروژه آزمایش هماهنگ ریزمقیاس نمایی اقلیم منطقه ای در حوزه جنوب آسیا (CORDEX-WS) در یک مقیاس ماهانه است. میدان‌های واداشتی استفاده شده در این ریزمقیاس نمایی دینامیکی مربوط به شش مدل گردش عمومی جو (GCM) هستند که همگی آنها به فاز ۵ پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP۵) تعلق دارند و عبارتند از: CCCma-CanESM۲، CNRM-CERFACS-CNRM-CM۵، CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-۰، NOAA-GFDL-GFDL-ESM۲M، IPSL-IPSL-CM۵A-MR، MPI-M-MPI-ESM-LR. تمامی این داده‌ها از درگاه اینترنتی مرکز تحقیقات تغییر اقلیم انستیتو هواشناسی حاره‌ای هندوستان به آدرس <http://cccr.tropmet.res.in/home/index.jsp> قابل دسترس هستند.

ج - تصحیح/اریب داده‌های شبیه سازی شده

بیشتر شبیه سازی های GCM به دلیل مشکلات مرتبط با مدلسازی اندرکنش های پیچیده اقلیمی دارای اریب هستند. اختلافات موجود بین شبیه سازی های GCM با داده های مشاهداتی به طور کلی ناشی از قدرت تفکیک نامناسب مدل اقلیمی از ناهمگنی های سطح زمین در مقیاس زیر شبکه ای است. بنابراین، قبل از استفاده از مجموعه داده های GCM در کاربردهای هیدرولوژیکی، اریب موجود در آنها بایستی اصلاح شوند. در ادبیات تحقیقاتی این موضوع تعدادی از تکنیک های تصحیح اریب همچون مقیاس بندی ثابت ، مقیاس بندی روزانه ، نگاشت چندکی ؛ تصحیح اریب متداخل ، تصحیح اریب متداخل برگشتی چند متغیره و تصحیح اریب مبتنی بر چندک شرطی قابل مشاهده است. با این وجود، در این

مختلف است. برای محاسبه شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، برای هر مقیاس زمانی مورد نظر، در شکل اولیه خود، چندین مرحله بایستی پیموده شود. این مراحل عبارتند از (بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲): (۱) محاسبه مجموع بارش تجمعی برای هر سال با استفاده از مقیاس زمانی k -ماهه؛ (۲) برازش توابع توزیع گاما به هر سال تقویم آبی، (۳) برآورد مقادیر تابع توزیع برای هر مجموع بارش؛ (۴) محاسبه مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با انتقال مقادیر تابع توزیع گاما به مقادیر متغیر نرمال استاندارد. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در واقع یک نمره Z است و انحراف یک رویداد از میانگین را نشان می‌دهد که به صورت واحدهایی از انحراف معیار بیان می‌شوند. این ویژگی امکان مقایسه بین مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مکان‌های مختلف و بین دوره‌های گوناگون را فراهم می‌سازد. هر زمان مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به صورت پیوسته منفی و شدت آنها ۱- و کمتر باشد یک خشکسالی رخ داده است. این رخداد زمانی به پایان می‌رسد که مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مثبت شوند. شدت خشکسالی‌ها به صورت قراردادی بر اساس مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در جدول ۲ لیست شده اند (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳).

هـ- تئوری گردش‌ها

تئوری گردش‌ها ($RT^{(i)}$) متکی بر انتخاب یک سطح آستانه بحرانی، y_c ، است. با در نظر گرفتن یک سری زمانی گسسته، $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ یک گردش منفی (مثبت) زمانی رخ می‌دهد که x_i به طور متوالی در طول یک یا چند بازه زمانی، کمتر (یا بیشتر) از y_c باشد. گردش‌های منفی در سری‌های زمانی SPI، اشاره به دوره‌های خشک و گردش‌های مثبت آن اشاره به دوره‌های تر دارد. یک گردش می‌تواند با ویژگی‌هایی همچون مدت (D) شدت (S) فراوانی (F) توصیف شوند. این ویژگی‌ها به صورت گرافیکی جهت درک بهتر آنها در شکل (۲) آورده شده است. در این مطالعه سه ویژگی مدت (D) شدت (S) فراوانی (F) خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی سالانه بر اساس این تئوری برای هر ایستگاه استخراج شدند.

مطالعه، یک تکنیک از تصحیح اریب مبتنی بر رتبه بندی چندکی ($QRBC^9$) که توسط مایتی و همکاران (۲۰۱۷) برای رطوبت خاک پیشنهاد شده است استفاده گردید.

برای تعیین پارامترهای QRBC، یک تابع توزیع تجمعی (CDF) تجربی بر هر یک از مجموعه داده‌های مشاهداتی و شبیه سازی شده GCM/RCM برای دوره تاریخی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برازش داده می‌شوند. مقادیر چندکی به دست آمده از مرحله قبل به ۱۰ قسمت مساوی بین ۰ تا ۱ بر اساس روش دهک‌ها تقسیم بندی می‌شوند. سپس مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده GCM/RCM به طور جداگانه به ترتیب ارزش از کمترین تا بالاترین مقدار بر اساس CDF آنها مرتب می‌شوند. در نهایت میانگین و انحراف استاندارد داده‌های مشاهده شده و شبیه سازی GCM/RCM در هر دهک محاسبه و مقدار GCM/RCM تصحیح شده بر اساس رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$Pr_{BC} = mean(Pr_{Obs}^i) + \quad (1)$$

$$\left((Pr_{GCM/RCM}^i - mean(Pr_{GCM/RCM}^i)) \times \frac{std(Pr_{Obs}^i)}{std(Pr_{GCM/RCM}^i)} \right)$$

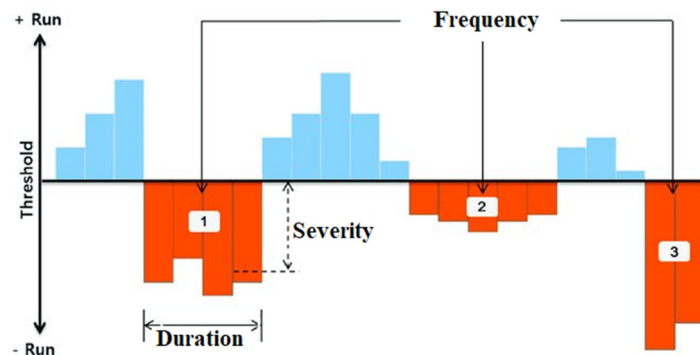
که $Pr_{GCM/RCM}^i$ نشان دهنده مقادیر خام شبیه‌سازی شده بارش GCM/RCM‌ها است، $mean(Pr_{GCM/RCM}^i)$ میانگین مقادیر خام بارش GCM/RCM‌ها برای بازه چندکی مورد نظر (که در اینجا دهک‌ها مد نظر است)، $mean(Pr_{Obs}^i)$ میانگین مقادیر مشاهداتی بارش برای بازه‌های چندکی مورد نظر و $std(Pr_{Obs}^i)$ و $std(Pr_{GCM/RCM}^i)$ نیز به ترتیب انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی و داده‌های خام شبیه سازی شده بارش برای بازه‌های چندک‌های مورد نظر است.

د- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ابزاری توسعه داده شده توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳، ۱۹۹۵) برای تعیین و پایش خشکسالی‌ها و شدت آن‌ها در مقیاس‌های زمانی

جدول ۲. طبقه بندی شدت خشکسالی براساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (استیج و همکاران، ۲۰۱۵)

وضعیت	عدد مربوط به شاخص
ترسالی حاد	$SPI \leq -2$
ترسالی شدید	$-1/5 \leq SPI \leq -1/99$
ترسالی متوسط	$1 \leq SPI \leq 1/49$
ترسالی خفیف	$-0/50 \leq SPI \leq +0/99$
نرمال	$-0/49 \leq SPI \leq +0/49$
خشکسالی ضعیف	$-0/99 \leq SPI \leq -0/50$
خشکسالی متوسط	$-1/49 \leq SPI \leq -1$
خشکسالی شدید	$-1/99 \leq SPI \leq -1/5$
خشکسالی بسیار شدید	$SPI \leq -2$

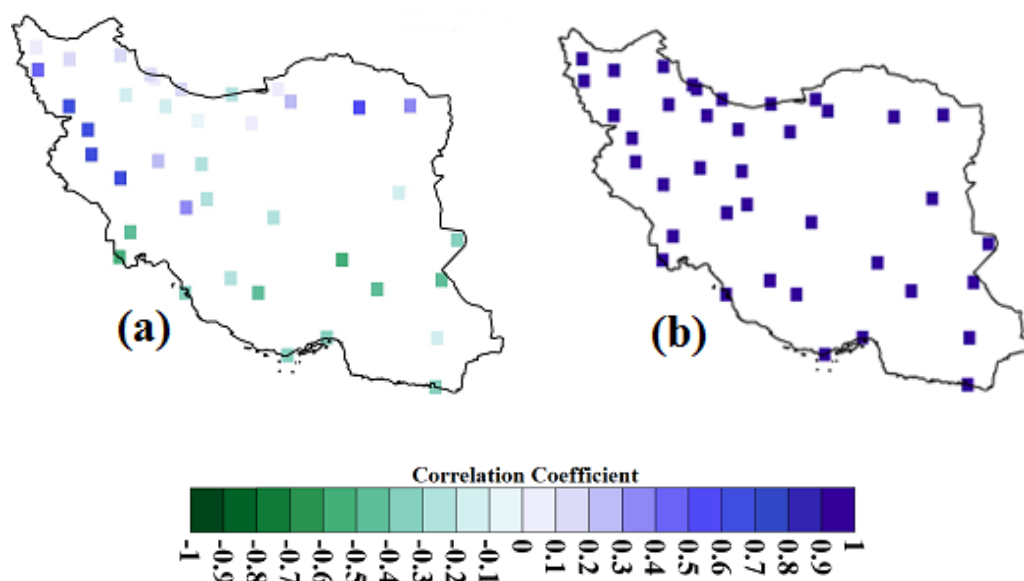


شکل ۲. نمودار فرضی تعیین خشکسالی ها و ویژگی های آنها با استفاده از تئوری گردش ها (لی و همکاران، ۲۰۱۷)

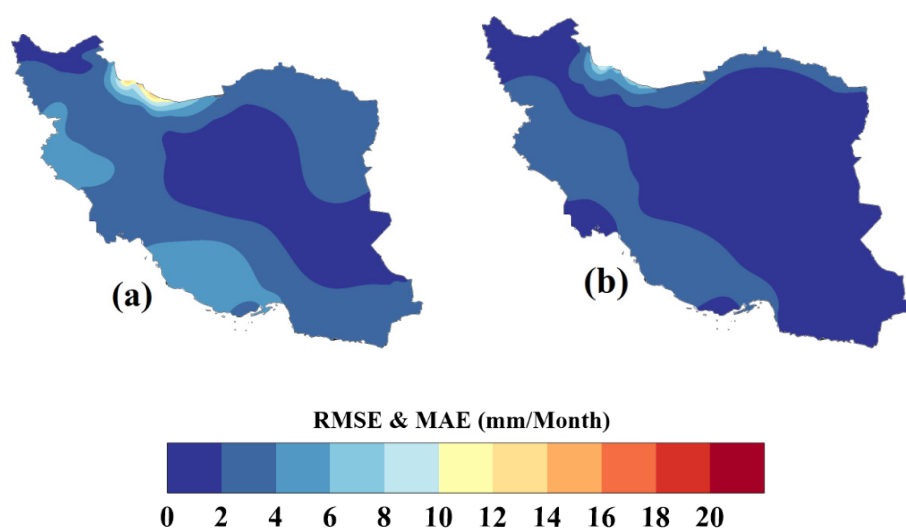
هر چند در برخی از مناطق مانند غرب ایران ضرایب همبستگی بالایی تا حدود ۰/۶ نیز مشاهده می شود (شکل ۳ الف). بنابراین توانایی ضعیف RCMS در شبیه سازی بارش های صفر به خصوص در نیمه گرم سال (از آوریل تا سپتامبر) باعث بیش برآوردی بارش در این اقلیم های خشک و نیمه خشک شده است، اما در ایستگاه های واقع در شمال ایران که دارای اقلیمی مرطوب است، بارش های شبیه سازی شده در مقایسه با بارش های مشاهداتی دارای کم برآوردی هستند. لذا برای اصلاح ارباب موجود در داده های شبیه سازی شده RCMS مورد استفاده در این مطالعه، از تصحیح ارباب مبتنی بر شرایط چندکی (QRBC) که توسط مایتی و چانتا (۲۰۱۷) برای رطوبت خاک پیشنهاد شده است، استفاده گردید. با انجام این تصحیح بر روی داده های شبیه سازی شده RCMS مشاهده گردید که ضریب همبستگی بین بارش های شبیه سازی شده و مشاهداتی برای

نتایج و بحث

بررسی عملکرد مدل های اقلیم منطقه ای (RCMS) در شبیه سازی بارش های ایستگاهی بر پهنه ایران : در این بخش، داده های شبیه سازی شده بارش RCMS مربوط به CORDEX-WS با داده های مشاهداتی ۳۹ ایستگاه هواشناسی همدیدی واقع در محدوده مرزهای سیاسی ایران برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ در یک مقیاس ماهانه مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این مقایسه نشان دادند که RCMS توانایی بالایی در شبیه سازی بارش های ماهانه ایران که کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک است نداشته اند (شکل ۳ الف). همانگونه که در شکل ۳ الف مشاهده می شود برای بیشتر ایستگاه های مورد مطالعه در ایران، ضریب همبستگی بین داده های شبیه سازی شده و مشاهداتی بین ۰/۳ و -۰/۳ بوده است که یک ضریب همبستگی بسیار پایینی به شمار می رود.



شکل ۳. ضریب همبستگی بین مقادیر بارش ماهانه مشاهده شده و شبیه سازی شده: الف) تصحیح نشده ب) تصحیح شده



شکل ۴. توزیع مکانی معیارهای ارزیابی جهت تخمین بارش ماهانه در طول دوره پایه الف) RMSE ب) MAE

نیز استفاده شده اند (شکل ۴). توزیع مکانی حاصل از معیارهای ارزیابی نشان می‌دهند که روش QRBC عملکرد قابل قبولی را در شبیه‌سازی مقادیر بارش های ماهانه را از خود نشان داد و بیشترین مقادیر RMSE و MAE به ترتیب ۱۵ و ۱۱ میلیمتر می‌باشند که مربوط به نواحی شمالی ایران بدلیل بارش ماهانه بسیار زیاد در مقایسه با سایر مناطق است.

تمامی ایستگاه ها به بالای ۰/۹ ارتقاء پیدا کرده‌اند (شکل ۳ ب). در این شکل نیز به روشنی ارتقاء ضریب همبستگی بعد از تصحیح اریب بین داده‌های شبیه سازی شده و مشاهداتی قابل مشاهده است. علاوه بر ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^{11}$) و میانگین خطای مطلق (MAE^{12})

11 Root mean square error

12 Mean absolute error

تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی های ایران در مقیاس سالانه

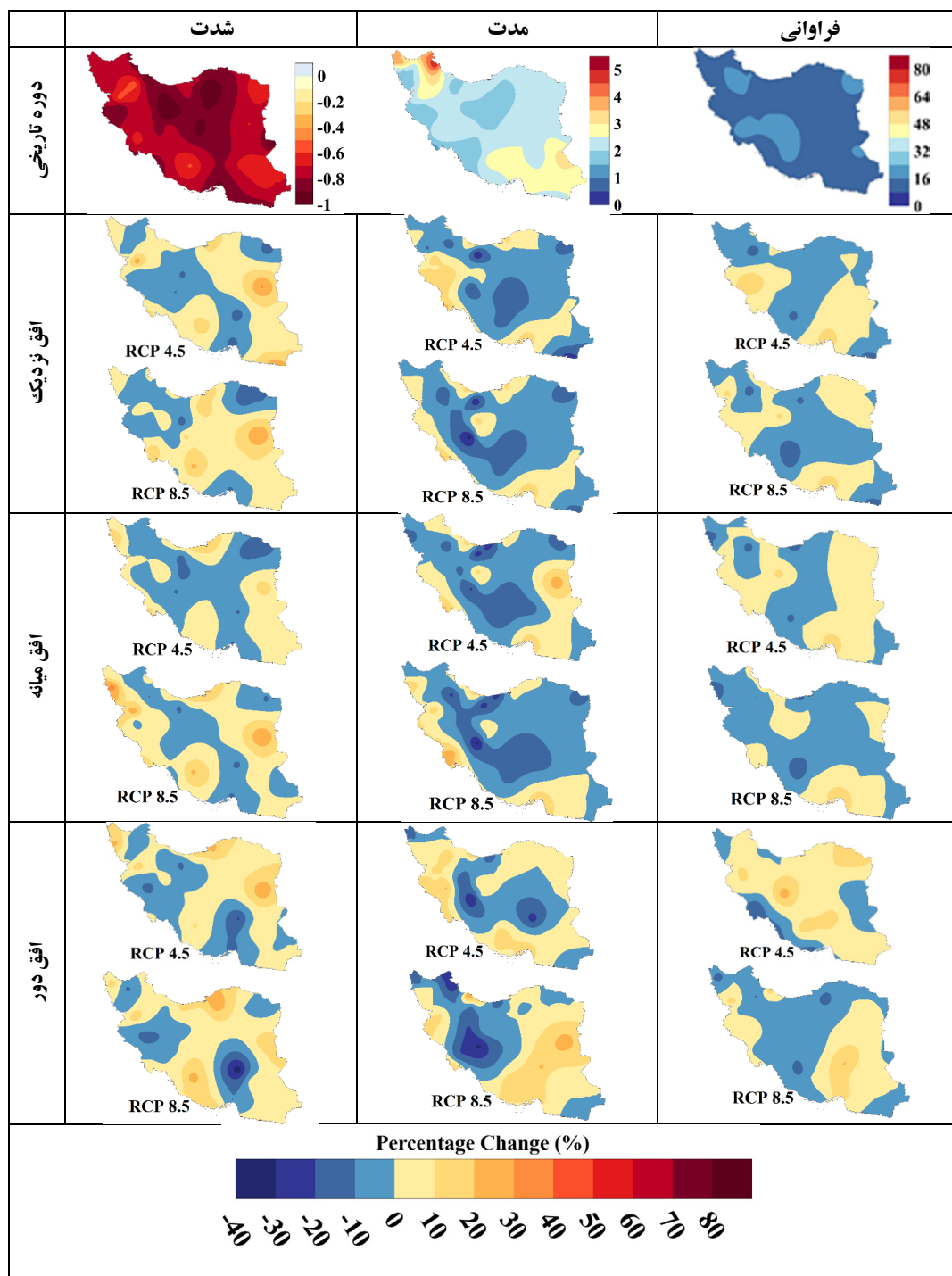
میانگین شدت خشکسالی های سالانه ایران بر اساس SPI برای تمامی ایستگاه های مورد مطالعه برای دوره تاریخی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و همچنین سه دوره افق آینده یعنی افق نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، افق میانه (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و افق دور (۲۰۹۹-۲۰۷۰) محاسبه شدند. در یک مقیاس کشوری (از نسبت مجموع میانگین بلندمدت شدت خشکسالی ایستگاه های مورد مطالعه بر تعداد آنها محاسبه شده است) میانگین شدت خشکسالی های ایران برای دوره تاریخی برابر با -0.78 بوده است (جدول ۳). با مبنا قرار دادن این عدد مشاهده می شود که شدت خشکسالی های ایران در یک مقیاس کشوری تحت دو سناریوی RCP۴.۵ و RCP۸.۵ برای سه افق نزدیک، میانه و دور افزایش شدت را نشان می دهد و بیشترین افزایش شدت مربوط به RCP۸.۵ برای افق دور ($3/83$ درصد افزایش نسبت به دوره تاریخی) بوده است.

در مقیاس ایستگاهی نیز مشاهده می شود که پهنه قابل توجهی از مساحت ایران خشکسالی هایی با دامنه متغیر بین -0.5 تا -1 را تجربه کرده اند. همچنین واضح است که بیشتر ایستگاه های واقع در مناطق شرقی و نوار جنوبی دریای خزر تا جنوب ایران مقادیر بالاتری از شدت خشکسالی را در دوره تاریخی به خود اختصاص داده اند (شکل ۵). اکنون با مبنا قرار

دادن شدت خشکسالی های دوره تاریخی ایستگاه های مورد مطالعه مشاهده می شود که بر اساس دو سناریوی RCP۴.۵ و RCP۸.۵ مناطق جنوبی ایران در سه افق نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، میانه (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و دور (۲۰۹۹-۲۰۷۰) با کاهش در شدت خشکسالی ها روبرو خواهند بود. همچنین مناطق شمال شرقی ایران در دو افق نزدیک و میانه کاهش شدت خشکسالی را تجربه می کنند که دامنه کاهش تغییرات در شدت خشکسالی می تواند تا 15% نسبت به دوره پایه برسد. اما براساس نتایج بدست آمده در افق دور، این مناطق با افزایش شدت در خشکسالی ها مواجه خواهند شد. علاوه بر این، قابل مشاهده هست که افزایش تغییرات در شدت خشکسالی ها در سایر ایستگاه های ایران در سه افق نزدیک، میانه و دور تجربه خواهد شد که دامنه شدت و گستردگی آنها بر اساس سناریوهای RCP۴.۵ و RCP۸.۵ متفاوت می باشد. به بیان دیگر، بالاترین افزایش شدت در خشکسالی ها در بین ایستگاه های مورد مطالعه بر اساس سناریوی RCP۴.۵ در ایستگاه بیرجند واقع در شرق ایران ($32/41$ درصد نسبت به دوره تاریخی) در افق نزدیک رخ خواهد داد. در صورتیکه مقایسه تغییرات شدت خشکسالی ها در بین ایستگاه های ایران نشان داد که بر اساس سناریوهای RCP۸.۵، ایستگاه ارومیه در شمال غرب ایران شاهد بیشترین افزایش شدت ($34/23$ درصد نسبت به دوره تاریخی) را در افق میانه خواهد بود. لازم به ذکر

جدول ۳. میانگین تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی های سالانه ایران در یک مقیاس کشوری و تغییرات آنها در افق نزدیک، میانه و دور

دوره	سناریو	شدت خشکسالی	طول دوره خشکسالی	فراوانی خشکسالی
تاریخی	-	-0.78	$2/35$	$15/10$
درصد تغییرات در افق نزدیک نسبت به دوره پایه	RCP 4.5	$2/08$	-0.96	-0.44
	RCP 8.5	$2/05$	$-1/65$	-0.66
درصد تغییرات در افق میانه نسبت به دوره پایه	RCP 4.5	$0/67$	$-2/04$	-0.07
	RCP 8.5	$3/53$	$-1/71$	$-1/5$
درصد تغییرات در افق دور نسبت به دوره پایه	RCP 4.5	$1/99$	$1/24$	$0/58$
	RCP 8.5	$3/83$	$0/38$	-0.91



شکل ۵. توزیع مکانی ویژگی‌های شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌های سالانه ایران در طول دوره تاریخی و تغییرات آنها در آینده نزدیک، میانه و دور

ایستگاه کرمان در افق دور خواهد بود.
در جدول ۳ میانگین طول دوره خشکسالی در دوره تاریخی و میانگین تغییرات آنها تا سال ۲۱۰۰ آورده شده است.

است که بالاترین کاهش در شدت خشکسالی‌ها بر اساس دو سناریوی RCP۴.۵ (۲۱/۹۱- درصد نسبت به دوره تاریخی) و RCP۸.۵ (۳۶/۸۴-درصد نسبت به دوره تاریخی) متعلق به

بر این اساس می‌توان گفت که میانگین طول دوره خشکسالی ایران ۲/۳۵ سال می‌باشد. شکل ۵ توزیع مکانی طول دوره خشکسالی ایران را برای دوره تاریخی نشان می‌دهد. براساس شکل ۶، طول دوره های خشکسالی ایران بین ۱/۵ تا ۵ سال متغیر بوده است و بیشترین طول دوره خشکسالی در مناطق شمال غربی ایران رخ داده که با بیشترین شدت خشکسالی نیز همراه بوده‌اند. این درحالی است که مناطق غربی طول دوره خشکسالی کمتری را نسبت به میانگین طول دوره خشکسالی ایران (۲/۳۵) تجربه کرده‌اند و شدت خشکسالی در این مناطق در مقایسه با سایر ایستگاه های ایران کمتر بوده است. با استفاده از نتایج خروجی مشخص گردید که تغییرات میانگین طول دوره خشک ایران در افق نزدیک در سناریو RCP۴.۵ برابر ۰/۹۶- درصد خواهد بود علیرغم کاهش تغییرات میانگین طول دوره خشکسالی ایران، نواحی غربی ایران مانند آبادان و سنجند افزایش طول دوره خشکسالی را تجربه خواهند کرد. این در حالیکه در دوره بعدی (افق میانه) نواحی شرقی شاهد افزایش تغییرات طول دوره خشکسالی خواهند بود و از طول دوره خشکسالی مناطق غربی در مقایسه با افق نزدیک کاسته خواهد شد. برخلاف دو افق نزدیک و میانه، ایران با قرار گرفتن در افق دور شاهد افزایش ۱/۲۴ درصدی در تغییرات طول دوره خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود و بجز مناطقی که در نزدیکی رشته کوه های البرز و زاگرس قرار دارند، دامنه افزایش تغییرات طول دوره خشکسالی در اکثر مناطق تا ۱۵ درصد نیز خواهد رسید. با مقایسه دو سناریو RCP۴.۵ و RCP۸.۵ نیز روشن گردید که تغییرات طول دوره خشکسالی تحت سناریو RCP۸.۵ از RCP۴.۵ کمتر خواهد بود. در سناریو RCP۸.۵، مناطق غربی و جنوبی در سال های ۲۰۴۰-۲۰۷۰ با افزایش تغییرات در طول دوره خشک مواجه خواهند شد و با قرار گرفتن در افق دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) از طول دوره خشکسالی در نواحی غربی کاسته خواهد شد اما افزایش قابل توجه تغییرات طول دوره خشکسالی نواحی شرقی را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

در مورد فراوانی وقوع خشکسالی ها می توان اظهار داشت که میانگین فراوانی وقوع خشکسالی های ایران ۱۵/۱۰ در دوره تاریخی می باشد و اغلب ایستگاه های ایران دارای فراوانی

وقوع ۱۲ تا ۱۶ مورد بوده اند. براساس سناریو RCP۴.۵ تا سال ۲۰۴۰ نواحی شمالی تا جنوب غربی ایران شاهد کاهش تغییرات در فراوانی وقوع خشکسالی ها خواهند بود. در افق میانه در ایستگاه های شمال شرقی و شمال غربی بر فراوانی وقوع خشکسالی ها افزوده خواهد شد و با رسیدن به افق دور، از فراوانی وقوع خشکسالی ها در شمال شرقی و جنوب غربی کاسته خواهد شد. درحالی که مناطق جنوبی، جنوب شرقی و غرب با افزایش فراوانی وقوع خشکسالی ها در هر سه افق نزدیک، میانه و دور همراه خواهند بود؛ بطوریکه افزایش تغییرات در مناطق غربی به حدود ۲۰٪ نیز خواهد رسید. نتایج حاصل از جدول ۳ و شکل ۵ نشان می‌دهد که سناریو RCP۸.۵ فراوانی وقوع خشکسالی ها در ایستگاه های غربی را کمتر از سناریو RCP۴.۵ نشان می‌دهد و فراوانی وقوع خشکسالی ها در هر سه افق تحت سناریو بدبینانه RCP۸.۵ کاهش یافته است و این روند کاهشی در افق میانه به حداکثر میزان خود (۱/۵ درصد) میرسد و بر تعداد ایستگاه هایی که روند کاهشی تغییرات فراوانی دارند افزوده خواهد شد.

بطور کلی مطالعات اندکی را میتوان یافت که تغییرات شدت، مدت و فراوانی خشکسالی های آینده را برای کل ایران پیش بینی کرده باشند و می توان بیان کرد که نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات قبلی مطابقت دارد. بطور مثال، این مطالعه می تواند با مطالعه سناتور و همکاران (۲۰۱۸) که با استفاده از شاخص خشکسالی پالمر برای آینده دور خشکسالی های شدیدی پیش بینی کرده بود مطابقت داشته باشد. همچنین، ززین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) در مطالعه ای که با مدل های CMIP۵ انجام دادند نشان دادند که شدت و فراوانی وقوع خشکسالی در ایران در افق آینده افزایش خواهد یافت که میتواند تهدیدی جدی برای منابع آبی و اکوسیستم ها محسوب بشود و نیازمند توجه ویژه به برنامه های مدیریت خشکسالی در کشور است. علاوه بر این، نتایج حاصل از مطالعه میراکبری و ابراهیمی خوسفی (۲۰۲۱) نشان داد که شدت و مدت خشکسالی های بلندمدت در تالاب های ایران در مقایسه با دوره پایه افزایش خواهد یافت و این افزایش در تالاب های شرقی بیشتر از تالاب های غربی ایران خواهد بود. همچنین مشخص شد که تالاب های جنوب شرقی در آینده

بطور میانگین در افق نزدیک و میانه شاهد افزایش در شدت و کاهش در طول دوره و فراوانی وقوع خشکسالی نسبت به دوره تاریخی خواهد بود. این درحالی است که خشکسالی‌هایی با شدت و طول دوره بلندتری نسبت به دوره تاریخی در افق دور ایران را تحت تاثیر قرار خواهد داد بطوریکه مطابق سناریو RCP۸.۵ بیشترین تغییرات در میانگین خشکسالی ایران (۳/۸۳ درصد افزایش نسبت به دوره تاریخی) همراه با طول بلندتر (۰/۳۸ درصد افزایش نسبت به دوره تاریخی) ایران را تحت تاثیر قرار خواهد داد. بررسی میزان تغییرات خشکسالی‌های سالانه ایران در مقیاس ایستگاهی در سه افق نزدیک، میانه و دور نشان میدهد که مناطق جنوبی ایران مطابق دو سناریو RCP۴.۵ و RCP۸.۵ خشکسالی‌هایی با شدت کمتر ولی طول دوره و فراوانی وقوع بیشتر نسبت به دوره پایه را تجربه خواهند کرد. درحالیکه بخش‌هایی از جنوب غربی ایران با افزایش شدت و کاهش طول دوره و فراوانی وقوع خشکسالی مواجه خواهند شد. علیرغم اینکه مطابق سناریو RCP۸.۵ مناطق شرقی ایران در دو افق نزدیک و میانه با افزایش شدت خشکسالی‌ها و کاهش فراوانی وقوع و طول دوره‌های خشکسالی در مقایسه با دوره تاریخی همراه است اما بر شدت، طول دوره و فراوانی وقوع خشکسالی‌ها در افق دور نسبت به دوره تاریخی افزوده خواهد شد.

مراجع

- مظفری، ا.، بذرافشان، ا.، و مرادی، ن.، ۱۳۹۹، تغییرات زمانی و مکانی خصوصیات خشکسالی هواشناسی در ایران تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم، مدیریت بیابان، ۸(۱۶)، ۱۵۳-۱۶۳
- صالحی طیس، م.، یعقوب‌زاده، م.، زمانی، غ.، و امیرآبادی زاده، م.، ۱۳۹۸، اثر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی خشکسالی در خراسان جنوبی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴(۲)، ۴۸۲-۴۹۷.
- Bari Abarghouei, H., Asadi Zarch, M.A., Dastorani, M.T., Kousari, M.R., and Safari Zarch, M., 2011, The survey of climatic drought trend in Iran, Stoch Environ Res Risk Assess, 25: 1-14.
- Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., and Wood, E.F., 2018, Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12.
- Chanda, K., and Maity, R., 2017, Assessment of trend in global drought propensity in the twenty-first century using drought management index, *Water Resources Management*, 31, 1209-1225.

خشکسالی‌های شدیدی را تجربه خواهند کرد. نتایج مطالعه دانشمند و محمودی (۲۰۱۷) که با شاخص خشکسالی موثر به بررسی خشکسالی‌های ایران پرداختند نیز نشان داد که شدت خشکسالی‌های سالانه ایران رو به افزایش است در حالیکه از طول دوره و فراوانی وقوع آنها کاسته میشود. مطالعه صالحی طیس و همکاران (۱۳۹۸) نیز بیانگر افزایش شدت مقادیر SPI در دوره‌های آینده در مقیاس سالانه در بیرجند خواهد بود. اگرچه نتایج حاصل از مطالعه مظفری و همکاران (۱۳۹۹) با نتایج حاصل از این مطالعه در مورد شدت خشکسالی‌ها در شمال ایران تفاوت‌هایی دارد، اما نتایج هر دو مطالعه نشان داد که بخش‌هایی از شمال شرق، شرق و جنوب شرق با افزایش شدت خشکسالی رو به رو خواهند شد. همچنین بررسی نتایج دو مطالعه نشان داد که بطور کلی، طول دوره خشکسالی‌ها در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه کاهش خواهد یافت.

جمع‌بندی

این مطالعه را می‌توان یک مطالعه جامع در مورد پیش‌بینی‌شدن تغییرات آب و هوایی در ایران تا پایان قرن بیست و یکم بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در چارچوب پروژه CORDEX جنوب آسیا دانست. ارزیابی اولیه عملکرد میانگین RCM‌ها در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ نشان داد که به طور کلی RCM‌ها عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی بارش داشتند. از اینرو از یک روش تصحیح اریبی بنام تصحیح اریب مبتنی بر رتبه بندی چندکی (QRBC) استفاده شد تا بتوان عملکرد مدل Ensemble را افزایش بدهد. بعد از بررسی تاثیر QRBC بر روی عملکرد مدل، میانگین خروجی مدل‌های RCM براساس این روش تا سال ۲۱۰۰ بصورت سه دوره ۳۰ ساله افق نزدیک، میانه و دور تصحیح شدند. سپس با استفاده از تئوری گردش‌ها و روش محاسبه شاخص بارش استاندارد شده که توسط محمودی و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده است، ویژگی‌های خشکسالی‌های ایران (شدت، طول دوره و فراوانی وقوع خشکسالی) در دوره تاریخی و تغییرات آنها تحت دو سناریو RCP۴.۵ و RCP۸.۵ در سه افق نزدیک، میانه و دور نسبت به دوره تاریخی در مقیاس سالانه بررسی شد. نتایج حاصل از SPI در مقیاس سالانه نشان داد که ایران

- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1995, Drought monitoring with multiple time scales, In: Proc. of Ninth Conference on Applied Climatology, Dallas, TX, Amer Meteor Soc 233-236
- Mirakbari, M., and Ebrahimi-Khusfi, Z., 2021, Evaluation of the climate change effects on the future drought characteristics of Iranian wetlands. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-24.
- Nouri, M., and Homaei, M., 2020, Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran, *Meteorol Appl* 27(2): 1-19
- Rahimi, J., Laux, P., and Khalili, A., 2020, Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen-Geiger climate zones. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 183-199.
- Senatore, A., Hejabi, S., Mendicino, G., Bazrafshan, J., and 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.
- Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F., and Stahl, K., 2015, Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.
- Tabari, H., and Willems, P., 2018, More prolonged droughts by the end of the century in the Middle East, *Environ. Res. Lett.* 13 104005. DOI 10.1088/1748-9326/aae09c.
- Waseem, M., Ajmal, M., Ahmad, I. et al., 2021, Projected drought pattern under climate change scenario using multivariate analysis, *Arab J Geosci* 14, 544 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06860-7>.
- Zarrin, A., and Dadashi-Roudbari, A., 2021, Drought Risk Management in a Changing Climate: The Role of National Policies and the Drought Management Plan (DMP), *Journal of Water and Sustainable Development*, Volume:8 Issue: 1, 2021, PP 107 -112.
- Zarrin, A., and Dadashi-Roudbari, A., 2022, Projection of drought indices in Iran based on CMIP5 multi-model ensemble, *Climate Change Research*, 2(7), 71-82 (In Persian).
- Dai, A., 2012, Increasing drought under global warming in observations and models, *Nat Clim Chang*, 3:52-58
- Fang, J., Kong, F., Fang, J., and Zhao, L., 2018, Observed changes in hydrological extremes and flood disaster in Yangtze River Basin: spatial-temporal variability and climate change impacts, *Natural Hazards*, 93, 89-107.
- Daneshmand, H., and Mahmoudi, P., 2017, Estimation and assessment of temporal stability of periodicities of droughts in Iran. *Water Resources Management*, 31, 3413-3426.
- Gu, H., Yu, Z., Wang, G., Wang, J., Ju, Q., Yang, C., and Fan, C., 2015, Impact of climate change on hydrological extremes in the Yangtze River Basin, China, *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29, 693-707.
- IPCC, 2012, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, in: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field, C., V. Barros, T. Stocker, D. Qin, D. Dokken, K. Ebi, M. Mastrandrea, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Allen, M. Tignor, and P. Midgley, eds.), p. 582, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Khazanedari, L., F. Abasi., S. Ghandhari., M. Kouhi., and S. Malbousi. 2009, Drought conditions in the next thirty years in Iran, *Journal of Geography and Regional Development*, 7(12): 83-98 (In Persian).
- Lyon, B., 2009, Southern Africa Summer Drought and Heat Waves: Observations and Coupled Model Behavior, *Journal of Climate*, 22(22), 6033-6046.
- Mahmoudi, P., Hamidian Pour, M., Sanaei, M., and Daneshmand, N., 2019, Investigating the Trends of Drought Severity Changes in Iran. In: *Proceedings of International Conference on Climate Change, Impacts, Adaptation and Mitigation*, 11 June, Kharzmi University, Tehran, Iran.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proc. of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer Meteor, Soc 179-184.

Spatiotemporal variation of projected drought characteristics of Iran under the climate change scenarios

**Alireza Ghaemi¹, Seyed Arman Hashemi Monfared^{2*}, Abdolhamid Bahrpeyma²,
Peyman Mahmoudi³, Mohammad Zounemat-Kermani⁴**

¹ Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

² Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

³ Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

⁴ Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

*Corresponding Author Email: hashemi@eng.usb.ac.ir

Received: 03 November 2021, accepted: 01 February 2022

ABSTRACT

This study aims to assess the change of drought characteristics (severity, duration, and frequency) under the effect of climate change. To attain this objective, two groups of observational and simulated data were applied. The observational data was related to the monthly precipitation data of 39 synoptic stations in Iran for 30 years (1976-2005) and the simulated monthly precipitation data are also related to the coordinated regional climate downscaling experiments-South Asia (CORDEX-WS) was under two scenarios RCP4.5 and RCP8.5. Due to the poor performance of average RCMs in simulating precipitation in the historical period, one of the bias correction (BC) methods called bias correction based on quantile ranking (QRBC) was used. Then, using the standardized precipitation index (SPI) and run theory (RT), the severity, duration, and frequency of droughts in Iran were extracted on annual time scale. The evaluation of the annual drought projection indicated various conditions for different regions of Iran during near-future, middle-future and far-future. Moreover, it can be said that Iran will face increased changes in the severity of droughts as according to the RCP8.5 scenario, the most changes in the severity of droughts (3.83% compared to the historical period) will occur during the far-future. While the minimum changes in the increase of drought severity according to the RCP4.5 scenario will occur in the middle climate (0.67% compared to the historical period), which is accompanied by a decrease in duration changes (2.04% compared to the historical period).

Keywords: CORDEX South Asia, Climate Change, Drought, Standardized precipitation index, Run theory

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ghaemi, A.; Hashemi Monfared, S.A.; Bahrpeyma, A.; Mahmoudi, P.; Zounemat-Kermani, M. (2022). Spatiotemporal variation of projected drought characteristics of Iran under the climate change scenarios. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 5(1): 68-80

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

