

## مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دهم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۹

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

صص ۷۵-۸۷

### ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در دوره‌های آتی به کمک داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم (مطالعه‌ی موردی: شهرستان‌های زابل و شیراز)

سعیده حسین‌آبادی\*، دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب-دانشگاه بیرجند  
مصطفی یعقوب‌زاده، استادیار گروه علوم و مهندسی آب-دانشگاه بیرجند  
مهدی امیرآبادی‌زاده، استادیار گروه علوم و مهندسی آب-دانشگاه بیرجند  
مهديه فروزان‌مهر، دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب-دانشگاه بیرجند

#### چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که بشر در سال‌های اخیر با آن مواجه شده است، بحران آب و وقوع خشک‌سالی است؛ به همین دلیل، بررسی وضعیت خشک‌سالی در مدیریت بهینه‌ی منابع آب حائز اهمیت خواهد بود. در مطالعه حاضر سعی شده است با استفاده از خروجی پنج مدل گردش عمومی جو (Gfdlcm2, Csiromk3.6, GISS-E2-R, Ipsi و MIROC-ESM) و چهار سناریوی (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 و RCP 8.5) داده‌های بارش برای دو دوره‌ی آتی (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و (۲۰۶۵-۲۰۸۵) تولید گردد و سپس با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شود. با استفاده از داده‌های بارش، شدت خشک‌سالی به کمک شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد (SPI) با مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه) برای دو منطقه‌ی زابل و شیراز تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه نسبت به ۳ ماهه شدت خشک‌سالی را بیش‌تر نشان می‌دهند. همچنین نتایج نشان داد که مدل MIROC-ESM نسبت به مدل‌های دیگر و سناریو RCP 8.5 نسبت به سناریوهای دیگر برای دو شهرستان زابل و شیراز خشک‌سالی را با شدت بیش‌تری نشان داده است. مقایسه‌ی سناریوها نیز نشان می‌دهد که در هر دو منطقه‌ی مورد مطالعه، سناریوی RCP 8.5 در هر دو دوره‌ی آتی، خشک‌سالی را در محدوده‌ی متوسط نسبت به دوره‌ی پایه نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: شاخص SPI، شدت خشک‌سالی، مدل گردش عمومی جو، مدل LARS-WG.

## ۱- مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای اقلیمی است که اثرات آن را نه فقط می‌توان در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بلکه گاهی در مناطق مرطوب نیز مشاهده کرد (سلطانی و مدرس، ۱۳۸۵: ۱۵). خشک‌سالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که ممکن است در هر وضعیت اقلیمی رخ دهد. خشک‌سالی غالباً به‌عنوان یک پدیده‌ی خزنده توصیف می‌شود و پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی آن بسیار مشکل است. بسیاری از تعاریف خشک‌سالی این ایده را در ذهن تداعی می‌کنند که خشک‌سالی دورانی است که در آن موجودیت بارش کم‌تر از حد نرمال است (علیزاده، ۱۳۹۱). خشک‌سالی با کمبود بارندگی آغاز و بسته به طول مدت و شدت آن می‌تواند پارامترهایی نظیر رطوبت خاک، حجم آب‌های سطحی و زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی و اکوسیستمی را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو محققان، خشک‌سالی را در چهار دسته‌ی خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیک و اقتصادی-اجتماعی تقسیم‌بندی نموده‌اند (ناصرزاده و احمدی، ۱۳۹۱: ۱۴۱). خشک‌سالی هواشناسی از مهم‌ترین انواع خشک‌سالی‌هاست که به دلیل کمبود و یا کاهش مقدار بارندگی طی دوره‌ای از زمان به وجود می‌آید و بررسی، پیش‌بینی و برآورد احتمال وقوع آن به‌عنوان سرآغاز پدیده خشک‌سالی می‌تواند تا حد بسیار زیادی از خسارت‌های این رخداد طبیعی بکاهد و در مدیریت بحران کمک فراوانی نیز داشته باشد (منتصری و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۸۹).

با افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های موجود در قرن اخیر، پدیده تغییر اقلیم است (van Pelt & Swart, 2011: 3837). تغییر اقلیم تأثیر به‌سزایی بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی و در نتیجه بر منابع آب، فراوانی و شدت خشک‌سالی و سیل دارد. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی اقلیمی آینده، استفاده از خروجی الگوهای جفت‌شده‌ی جو-اقیانوس گردش عمومی جو است (شاکرمی و مساح‌بوانی، ۱۳۸۶). گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که در صورت ادامه‌ی روند کنونی تولید گازهای گلخانه‌ای به دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی، غلظت این گازها تا قبل از پایان قرن ۲۱ می‌تواند به بیش از ۶۰۰ ppm برسد (IPCC, 2007). حال آنکه اگر انتشار این گازها کاهش نیابد، تحت چهار سناریوی جدید افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ارائه‌شده در گزارش پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم<sup>۲</sup>، دمای سطحی کره‌ی زمین تا اواخر قرن ۲۱ بیش از ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره‌ی ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ میلادی افزایش می‌یابد که این افزایش دما در سال‌ها و دهه‌های مختلف، یکسان نیست (IPCC, 2014). تبعات منفی پدیده‌ی تغییر اقلیم تا آنجاست که در بین ده عامل تهدیدآمیز بشر در قرن ۲۱ مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و... پدیده تغییر اقلیم مقام اول را دارد (کمال و مساح‌بوانی، ۱۳۸۹: ۹۲۰). پدیده‌های حدی مانند سیل و خشک‌سالی بیش از سایر پدیده‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند. از این رو، بررسی این پدیده‌ها برای مقابله، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برخلاف تحقیقات بی‌شماری که بر تأثیر تغییر اقلیم روی رواناب و سیل انجام گرفته است (Shi et al., 2013: 31; Braga et al., 2013: 46; Kobierska, 2013: 204). در زمینه‌ی خشک‌سالی مطالعات به مراتب کم‌تری انجام شده است. مدل ریزمقیاس‌نمایی که یک روش آماری ریزمقیاس‌نمایی بوده و از توزیع‌های نیمه‌ی تجربی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌کند و می‌تواند پارامترهای آبی اقلیمی را در سطح ایستگاه تولید نماید. یکی از مهم‌ترین سودمندترین کاربردهای این داده‌ها، استفاده از آن‌ها جهت پایش و ارزیابی خشک‌سالی‌های آبی است.

به منظور بررسی خشک‌سالی از ابعاد و دیدگاه‌های مختلف، شاخص‌های متنوعی ابداع شده است که اساس این شاخص‌ها اغلب بر مبنای سنجش انحراف مقادیر بارندگی از میانگین درازمدت طی یک دوره‌ی زمانی معین استوار است. یکی از کاراترین نمایه‌ها، شاخص بارش استاندارد (SPI)<sup>۳</sup> است که اولین بار توسط مک‌کی استفاده شد (Mckee

1- Intergovernmental Panel Of Climate Change (IPCC)

2- IPCC Fifth Assessment Report

3- Standardized Precipitation Index

179: 1993). این شاخص به دلیل تغییرپذیری هم در مقیاس‌های کوتاه‌مدت برای اهداف کشاورزی و هم در مقیاس‌های بلندمدت برای بررسی عناصر هیدرولوژی مناسب است. به همین دلیل و همچنین به دلیل اینکه در محاسبه‌ی آن تنها به داده‌های بارش نیاز است که دسترسی به آن آسان است، شاخص بارش استاندارد نسبت به سایر شاخص‌های خشک‌سالی ترجیح داده می‌شود (Caccamo et al., 2011: 2626).

بلنکینسو و فاولر<sup>۴</sup> در تحقیقی، با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو به بررسی خشک‌سالی‌های سال‌های آتی در انگلستان پرداختند. نتایج مطالعه‌ی ایشان حاکی از کاهش شدت و تداوم خشک‌سالی‌ها بوده است. لوکاس<sup>۵</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ اثرات تغییر اقلیم را بر شدت خشک‌سالی در ناحیه تسالی یونان مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از خروجی مدل GCM<sup>۶</sup> و سناریوهای انتشار A2 و B2 برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم و جهت بررسی روند خشک‌سالی از شاخص SPI برای دوره‌های (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شدت خشک‌سالی دارای روند افزایشی بوده و این افزایش تحت سناریوی A2 بیش‌تر از سناریوی B2 خواهد بود. وراشیدو<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی هیدرولوژیکی پرداختند. آن‌ها خروجی سه مدل گردش عمومی جو (دما و بارش) با داده‌های WFD را مورد اصلاح آریبی قرار دادند. سپس بر پایه‌ی سناریوی A2 و B1 خشک‌سالی در مقیاس حوضه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد طبق هر دو سناریو تعداد وقایع خشک‌سالی (سیلاب، افت آب زیرزمینی و رطوبت خاک) در دهه‌های آینده افزایش می‌یابد. اوگونتوند<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۷) اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی هیدرو اقلیمی حوضه آبخیز ولتا در غرب آفریقا را به کمک دو شاخص SPI و SPEI بررسی کردند. نتایج نشان داد که وسعت خشک‌سالی‌ها در آینده بین ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی، شدت خشک‌سالی‌ها با استفاده از شاخص SPEI بیش‌تر از شاخص SPI است. ویدال و واید<sup>۹</sup> در سال ۲۰۰۹ خشک‌سالی را با استفاده از شاخص بارش استاندارد، در بریتانیا تحت تأثیر تغییر اقلیم و تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 بررسی کردند، آن‌ها نشان دادند که در آینده تعداد خشک‌سالی‌های بسیار شدید با تداوم کم، افزایش یافته و در مقابل تعداد خشک‌سالی‌های بلندمدت، کاهش می‌یابد. یعقوب‌زاده و همکاران در تحقیقی نشان دادند که مقادیر شاخص SPI در ایستگاه نیشابور در مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت شدت خشک‌سالی بیش‌تری را نشان می‌دهد (یعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۲۴). جوان و عرفانیان در طی تحقیقی به بررسی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آتی با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG پرداختند که نتایج حاصله نشان داد تعداد سال‌های خشک‌سالی در سه دوره‌ی مورد مطالعه نسبت به دوره‌ی پایه کاهش و تعداد ترسالی‌ها افزایش می‌یابد (جوان و عرفانیان، ۱۳۹۹).

در اکثر تحقیقات صورت‌گرفته‌ی پیشین در زمینه‌ی تأثیر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی از خروجی یک مدل گردش عمومی اقیانوس-اتمسفر ۱۰ استفاده شده است. این مدل‌ها دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشند که توجه نکردن به آن‌ها می‌تواند سبب ایجاد خطا در پیش‌بینی و برنامه‌ریزی شود (آشفته و مساح‌یوانی، ۱۳۸۸: ۸۵). در این تحقیق با در نظر گرفتن ۵ مدل گردش عمومی جو و ۴ سناریو از داده‌های گزارش پنجم سعی شده است مقایسه‌ای بین مدل‌ها، سناریوها در دو ایستگاه هواشناسی با آب‌وهوای متفاوت انجام گیرد.

4- Blenkinso and Fowler

5- Loukas

6- Global Circulation Model

7- Vrochidou

8- Oguntunde

9- Vidal and Wade

10- Atmosphere- Ocean General Circulation Model

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه در تحقیق حاضر، دو ایستگاه سینوپتیک زابل و شیراز با آب‌وهوای متفاوت است که جدول ۱ معرف مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه است.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)		بارش روزانه (میلی‌متر)	رطوبت نسبی (درصد)	اقليم
			حداقل	حداکثر			
زابل	۳۱° ۲'	۶۱° ۳۹'	۱۵/۱	۳۰	۰/۱	۲۸	بیابانی
شیراز	۲۹° ۳۶'	۵۲° ۳۲'	۵/۴۴	۲۵	۰/۷	۳۵	معتدل

با توجه به اینکه مدیریت صحیح منابع آب در هر منطقه بسیار حیاتی است و بررسی وضعیت مناطق مورد مطالعه در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم نیز از موارد مهم و ضروری به شمار می‌رود و همچنین با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر در منطقه، این تحقیق با در نظر گرفتن پنج مدل گردش عمومی جو به بررسی وضعیت خشک‌سالی در آینده این مناطق و مقایسه‌ی نتایج مدل‌ها پرداخته است.

## ۳- مواد و روش‌ها

روش انجام تحقیق به این صورت است که ابتدا داده‌های مربوط به دما و بارش در دو ایستگاه زابل و شیراز با در نظر گرفتن دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) میلادی جمع‌آوری شدند. سپس با توجه به اینکه مدل‌های گردش عمومی جو معتبرترین ابزار برای بررسی تغییر اقلیم می‌باشند (شاه‌کرمی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱)، از ۵ مدل گردش عمومی جو شامل: MIROC-ESM و Ipsi، GISS-E2-R، Gfdlcm2، Csiromk3.6، RCP 4.5، RCP 2.6، RCP 8.5 و RCP 6.0 (جدول ۲) و مدل LARS-WG5.5 جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی در دوره‌های آتی (۲۰۴۵-۲۰۲۵) و (۲۰۶۵-۲۰۸۵) استفاده گردید. در نهایت با استفاده از شاخص بارش استاندارد SPI، خشک‌سالی‌های اقلیمی دوره‌ی پایه و دو دوره‌ی آتی نزدیک به هم ارزیابی شد و شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها در پنج مدل مذکور مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت، مقایسه‌ای بین وضعیت خشک‌سالی دوره‌ی آتی در منطقه‌های مورد مطالعه و پنج مدل و چهار سناریوی مختلف نیز صورت گرفت.

## ۳-۱- سناریوها و مدل‌های مورد استفاده در تغییر اقلیم

مدل‌های GCM، معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای تغییر اقلیم است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهای جدید RCP استفاده کرده است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهشی سخت‌گیرانه (RCP 2.6)، دو سناریوی حد واسطه (RCP 4.5، RCP 6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP 8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). این سناریوها در سال ۲۰۱۴ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی به وجود آمده‌اند. نام‌گذاری سناریوهای خانواده RCP بر اساس میزان سطح واداشتهای تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ شامل مقادیر ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر مترمربع انجام شده است. نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ را پوشش می‌دهد و تا سال ۲۹۰۰ نیز فرموله شده است.

سناریوی انتشار RCP 2.6: این سناریو توسط تیم مدل‌سازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. در این سناریو میزان جمعیت تا سال ۲۱۰۰ حدود ۷ میلیارد نفر پیش‌بینی شده است. میزان غلظت

دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی ۴۹۰ (قسمت در میلیون) و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۲/۶ وات بر مترمربع تخمین زده است. این سناریو دربرگیرنده‌ی کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است (IPCC, 2007, 2014).

سناریوی انتشار RCP 4.5: این سناریو توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.

سناریوی RCP 6: در این سناریو با کاهش واداشتهای تابشی، میزان افزایش دی‌اکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. این سناریو توسط گروه مدل‌سازی AIM در موسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن طراحی گردید. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند.

سناریوی RCP 8.5: این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و موسسه IIASA در مؤسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه‌ی آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است. میزان جمعیت برای سال ۲۱۰۰ در این سناریو حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود. در این سناریو میزان غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ میلادی ۱۹۶۰ (قسمت در میلیون) تخمین زده شده است. ادامه‌ی این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. با توجه به میزان جمعیت در نظر گرفته‌شده در این سناریو و نیاز جمعیت ساکن در کره‌ی زمین به تأمین انرژی، استفاده از انواع انرژی (به‌جز انرژی زیستی) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است (جعفرپور و کانونی، ۱۳۹۴).

مشخصات کلی پنج مدل مورد استفاده در تحقیق حاضر جهت ارزیابی تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در جدول ۲ بیان گردیده است. داده مدل‌ها از نوع BCSD است که خود ریزمقیاس شده‌اند و از سایت زیر قابل دریافت هستند. همچنین با استفاده از نرم‌افزار متلب و استفاده از چهار گرید مجاور ایستگاه موردنظر برای اطمینان بیش‌تر تبدیل به مقیاس محلی شدند. [ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/cmip5/global\\_mon/BCSD/](ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/cmip5/global_mon/BCSD/)

جدول ۲: مشخصات مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در تحقیق

نام مدل	سناریوی انتشار	سامان‌دهنده	دقت مکانی (درجه)
Csiromk3.6		استرالیا	۱/۸ × ۱/۸
Gfdlcm2	RCP 2.6	آمریکا	۲/۵ × ۲
GISS-E2-R	RCP 4.5 RCP 6.0	آمریکا	۲ × ۲
Ipsl	RCP 8.5	فرانسه	۱/۸۷۵ × ۳/۷۵
MIROC-ESM		ژاپن	۱/۷۷ × ۲/۸۱

### ۳-۱- مدل ریزمقیاس‌نمایی<sup>۱۱</sup>

مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است و برای تولید مقادیر روزانه‌ی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش یا ساعت آفتابی در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم پایه و آینده به کار می‌رود. به‌طورکلی تولید داده توسط این مدل در سه مرحله صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: کالیبره کردن داده‌ها، ارزیابی داده‌ها و تولید داده‌های هواشناسی برای دوره‌ی آتی. این مدل از روش‌های آماری تولید داده‌های اقلیمی استفاده می‌کند. این مدل از دسته مدل‌های weather generator است که با استفاده از زنجیره مارکف به تولید داده می‌پردازد (یعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۸۴).

### ۳-۲- شاخص بارش استاندارد (SPI)

این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط مکی و همکارانش به منظور تعیین و پایش خشک‌سالی ارائه شد. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. هدف از ارائه‌ی شاخص بارش استاندارد، ارائه‌ی یک شاخص عددی است که بتواند ریزش‌های جوی مناطق با اقلیم‌های متفاوت را با هم مقایسه کند. فرمول ۱ نشان‌دهنده نحوه محاسبه‌ی این شاخص است.

$$SPI = \frac{Pi - P}{S} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

در رابطه‌ی فوق،  $Pi$  مقدار بارش در دوره‌ی مدنظر،  $\bar{P}$  میانگین درازمدت بارش برای دوره‌ی مدنظر و  $S$  انحراف معیار مقادیر بارش است. تفسیر مقادیر به‌دست‌آمده از این روش مطابق جدول ۳ خواهد بود. طبق این جدول هرگاه مقادیر SPI منفی باشد و مقدار آن به ۱- یا کم‌تر برسد معرف وقوع خشک‌سالی است. همچنین مقادیر مثبت آن، نشان‌دهنده خاتمه‌ی دوره‌ی خشک‌سالی است (پروین‌نیا و ریاحی فارسانی، ۱۳۹۴: ۴۵).

جدول ۳: طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص بارش استاندارد (SPI)

طبقه‌بندی خشک‌سالی	مقدار شاخص SPI
ترسالی بسیار شدید	۲ و بیش‌تر از آن
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
وضعیت نرمال	-۰/۹۹ تا +۰/۹۹
خشک‌سالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشک‌سالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشک‌سالی بسیار شدید	-۲ و کم‌تر

### ۴- بحث و نتایج

شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده‌ی مقادیر متوسط ۲۱ ساله‌ی شاخص SPI با مقیاس‌های زمانی متفاوت (۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه) برای پنج مدل و چهار سناریو (RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6، RCP 8.5) گزارش پنجم تغییر اقلیم برای دو دوره آتی نزدیک به هم (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و (۲۰۶۵-۲۰۸۵) است. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌گردد که در هر دو ایستگاه مورد مطالعه و برای هر چهار سناریو تنها مقادیر شاخص SPI سه‌ماهه دارای مقادیر مثبت و بیش‌تر از صفر است و بقیه‌ی مقیاس‌های زمانی شاخص SPI در تمام سناریوها، دارای مقادیر منفی است که شدت خشک‌سالی را بیش‌تر مشخص می‌نمایند. نتایج شکل‌ها نشان می‌دهد که نمودار شاخص SPI در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (۳ ماهه) دارای نوسانات زیاد است و در مقیاس‌های بلندمدت این نوسانات کاهش می‌یابد. یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز برای مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت این شاخص نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت آن، افزایش خشک‌سالی بیش‌تر را نشان دادند. نصیری و همکاران (۱۳۸۸) نیز در تحقیقشان نتایج SPI بیش از ۱۲ ماهه را برای مطالعه‌ی دوره‌های خشک در شهرستان مرودشت رضایت‌بخش اعلام نمودند. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، در دو شهرستان زابل و شیراز و در دو دوره‌ی آتی تفاوت چندانی بین میانگین ۲۱ ساله‌ی شاخص SPI با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه و ۴۸ ماهه ملاحظه نگردید؛ بنابراین برای پیش‌بینی خشک‌سالی در دو منطقه مورد مطالعه می‌توان از شاخص SPI با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه استفاده نمود. در مقایسه‌ی مدل‌ها و سناریوها در شهرستان زابل و شیراز، همان‌گونه که از شکل ۱ و ۲ نتیجه‌گیری می‌شود، مدل Miroc خشک‌سالی را در این منطقه در هر دو دوره‌ی آتی نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌تر نشان می‌دهد.



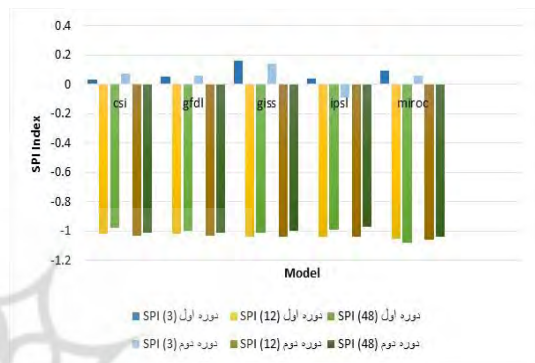
ب



الف



د



ج

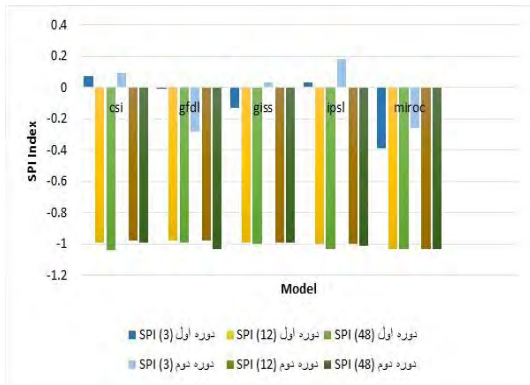
شکل ۱: شاخص SPI برای دو دوره‌ی آتی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۶۵ تا ۲۰۸۵ در شهرستان زابل (الف) سناریوی RCP 2.6 (ب) سناریوی RCP 4.5 (ج) سناریوی RCP 6 (د) سناریوی RCP 8.5



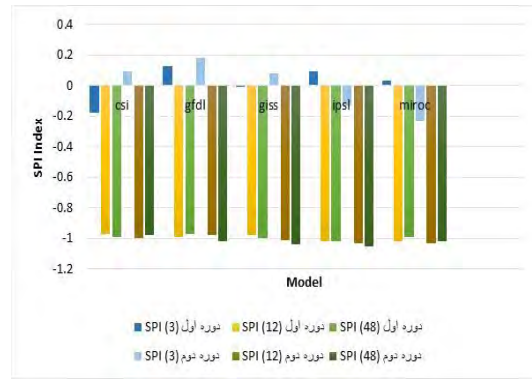
ب



الف



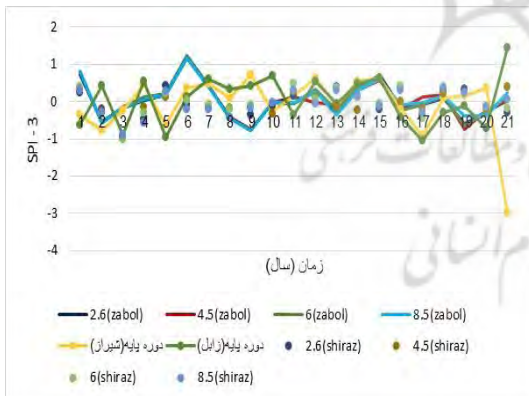
د



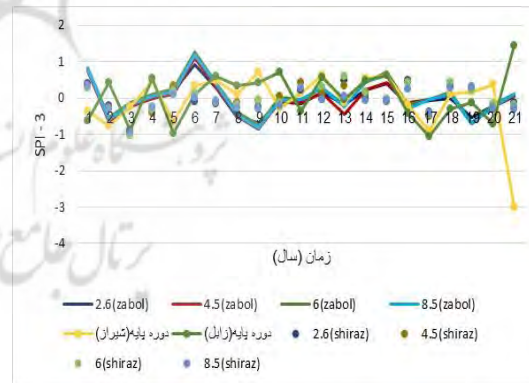
ج

شکل ۲: شاخص SPI برای دو دوره‌ی آتی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۶۵ تا ۲۰۸۵ در شهرستان شیراز (الف) سناریوی RCP 2.6 (ب) سناریوی RCP 4.5 (ج) سناریوی RCP 6 (د) سناریوی RCP 8.5

جهت مقایسه‌ی سناریوهای مورداستفاده در تحقیق حاضر، مقادیر میانگین شاخص SPI برای پنج مدل محاسبه گردید و مقادیر آن در مقیاس‌های زمانی متفاوت و طی ۲۱ سال برای دو دوره‌ی آتی طبق شکل‌های ۳ تا ۵ رسم گردید که نتایج نشان می‌دهد شاخص SPI با مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه شدت خشک‌سالی را در دوره بیش‌تر نشان می‌دهد و در این مقیاس‌های زمانی در هر دو منطقه‌ی مورد مطالعه سناریوی 8.5 در دو دوره‌ی آتی مورد بررسی، شدت خشک‌سالی را بیش‌تر نشان می‌دهند و بیان‌گر خشک‌سالی متوسط در هر دو منطقه‌ی مورد مطالعه است؛ بنابراین بهتر است جهت محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI و پیش‌بینی خشک‌سالی در حالت بدبینانه در دو منطقه‌ی زابل و شیراز از این سناریو استفاده گردد؛ زیرا این سناریو دما را نسبت به بقیه‌ی سناریوها بیش‌تر نشان می‌دهد و در این صورت انتظار می‌رود که میزان خشک‌سالی را هم بیش‌تر نشان دهد. یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) نیز نشان دادند که سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 4.5، مقادیر دمای بیش‌تر و بارش کم‌تر را برآورد می‌کند.



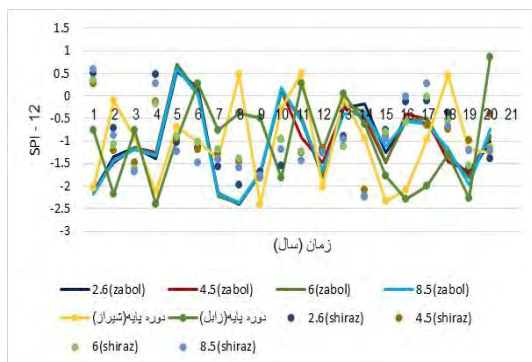
ب) دوره‌ی دوم



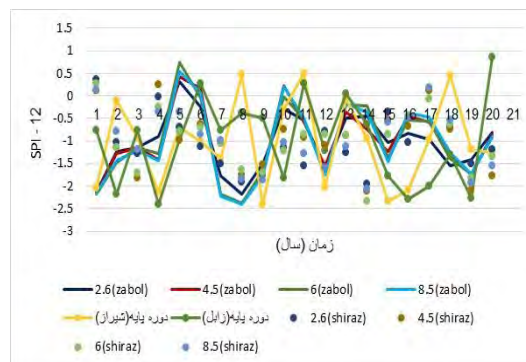
الف) دوره‌ی اول

شکل ۳: سری زمانی شاخص SPI سه‌ماهه در دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی



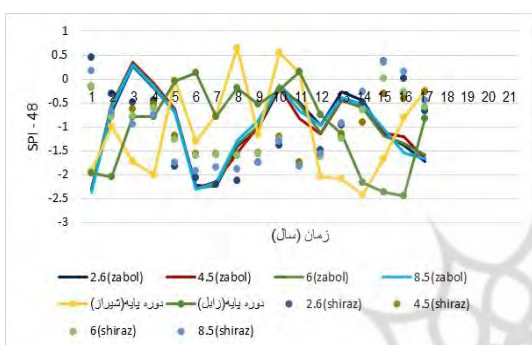


ب) دوره‌ی دوم

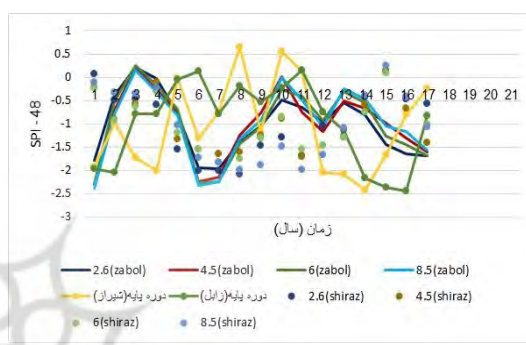


الف) دوره‌ی اول

شکل ۴: سری زمانی شاخص SPI دوازده‌ماهه در دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی



ب) دوره‌ی دوم



الف) دوره‌ی اول

شکل ۵: سری زمانی شاخص SPI چهل‌وهشت ماهه در دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی

در تحقیق حاضر همچنین تعداد سال‌های خشک در طی دوره‌ی پایه و آتی برای پنج مدل و چهار سناریو در مقیاس‌های زمانی ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول نیز ملاحظه می‌گردد که شاخص SPI در مقیاس زمانی ۳ ماهه تقریباً نشان‌دهنده‌ی سال خشک نیست و وضعیت نرمال را نشان می‌دهد، درحالی‌که تعداد سال‌های خشک در مقیاس ۱۲ ماهه برای هر چهار سناریو نسبت به دوره‌ی پایه افزایش یافته است. همچنین سناریوی RCP 8.5 در بیش‌تر مدل‌ها تعداد سال‌های خشک بیش‌تری را نسبت به بقیه‌ی سناریوها نشان می‌دهد. از طرفی مدل MIROC تحت سناریوی RCP 8.5 در شهرستان شیراز و زابل بیش‌ترین برآورد از تعداد سال‌های خشک را در دوره‌ی آتی در منطقه دارند.

همچنین نتایج دو جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در بدبینانه‌ترین حالت، تعداد سال‌های خشک در شهرستان زابل ۱۳ سال و در شهرستان شیراز ۱۴ سال پیش‌بینی شده است.

جدول ۴: تعداد سال‌های خشک در طی دوره‌ی پایه و آتی برای ۵ مدل و ۴ سناریوی انتشار در مقیاس‌های زمانی مختلف (زابل)

مدل	سناریو	مقیاس زمانی SPI		
		۳ ماهه	۱۲ ماهه	۴۸ ماهه
مجموع	2.6	۰	۹	۸
	4.5	۰	۱۱	۶
	6	۰	۱۱	۸
	8.5	۰	۱۱	۷
Csirumk3.6	2.6	۰	۱۱	۷
	4.5	۲	۱۲	۸

۱۹	۸	۱۱	۰	6	
۱۸	۸	۱۰	۰	8.5	
۲۰	۸	۱۲	۰	2.6	
۲۰	۸	۱۲	۰	4.5	GISS-E2-R
۱۹	۸	۱۱	۰	6	
۱۹	۸	۱۱	۰	8.5	
۱۹	۶	۱۳	۰	2.6	
۱۶	۶	۱۰	۰	4.5	Ipsl
۱۷	۷	۱۰	۰	6	
۲۰	۷	۱۲	۱	8.5	
۲۱	۹	۱۱	۱	2.6	
۱۹	۷	۱۲	۰	4.5	MIROC-ESM
۲۰	۸	۱۲	۰	6	
۱۷	۹	۸	۰	8.5	
۱۵	۶	۹	۰		دوره‌ی پایه

جدول ۵: تعداد سال‌های خشک در طی دوره‌ی پایه و آتی برای مدل ۵ و ۴ سناریوی انتشار در مقیاس‌های زمانی مختلف (شیراز)

مقیاس زمانی SPI						
مدل	سناریو	۳ ماهه	۱۲ ماهه	۴۸ ماهه	مجموع	
Csi	2.6	۱	۱۲	۸	۲۱	
	4.5	۱	۱۱	۱۰	۲۲	
	6	۰	۹	۷	۱۶	
	8.5	۰	۹	۶	۱۵	
Gfdl	2.6	۱	۱۰	۱۰	۲۱	
	4.5	۲	۸	۷	۱۷	
	6	۰	۱۰	۹	۱۹	
	8.5	۱	۱۳	۹	۲۳	
Giss	2.6	۰	۱۱	۶	۱۷	
	4.5	۰	۱۱	۸	۱۹	
	6	۰	۱۱	۹	۲۰	
	8.5	۰	۱۰	۷	۱۷	
Ipsl	2.6	۰	۱۰	۱۰	۲۰	
	4.5	۱	۱۱	۸	۲۰	
	6	۱	۱۱	۱۱	۲۳	
	8.5	۱	۱۰	۸	۱۹	
Miroc	2.6	۱	۱۴	۸	۲۳	
	4.5	۱	۱۴	۸	۲۳	
	6	۱	۱۴	۹	۲۴	
	8.5	۰	۱۴	۹	۲۳	
		۱	۱۰	۹	۲۰	دوره‌ی پایه

## ۵- نتیجه‌گیری

شاخص SPI که از عنصر اقلیمی بارش استفاده می‌کند، به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش شرایط خشک‌سالی، می‌تواند استفاده گردد. همان‌گونه که در این مطالعه نیز بررسی شد، این شاخص در دو شرایط اقلیمی متفاوت امکان مطالعه و بررسی وضعیت خشک‌سالی را فراهم می‌کند. فراهانی و همکاران در سال ۱۳۹۷ از خروجی سه مدل گردش عمومی جو BCC-CSM1-1، MPI-WSM-LR، و NORESM1-M تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشک‌سالی در حوضه‌ی شادگان استفاده کردند که نتایج حاصل نشان داد افزایش دما حداکثر و حداقل در تمام ماه‌های سال در دوره‌ی آتی (۲۰۳۹-۲۰۲۰) نسبت به دوره‌ی پایه در این حوضه وجود دارد. همچنین پیش‌بینی شد که در دوره‌ی آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوضه شادگان، تعداد ماه‌های خشک‌سالی نسبت به تعداد ماه‌های با وضعیت نرمال و مرطوب کم‌تر است (فراهانی و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیق حاضر نیز برای پیش‌بینی خشک‌سالی در زابل و شیراز از پنج مدل Csiromk3.6، GISS-E2-R، Ipsi، MIROC-ESM و RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.0 و RCP 8.5 استفاده گردید. به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی از مدل LARS-WG 5.5 استفاده شد و پارامترهای اقلیمی برای دوره‌ی آتی برآورد گردید. سپس به کمک شاخص SPI شدت خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه تعیین شد. نتایج محاسبه‌ی این شاخص نشان می‌دهد که مقادیر SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه تفاوت چندانی با هم ندارند و در مقایسه با مقادیر SPI در مقیاس‌های زمانی ۳ ماهه شدت خشک‌سالی را بیش‌تر نشان می‌دهند. همچنین نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که برای تعیین شدت خشک‌سالی در دو شهرستان زابل و شیراز می‌توان از مدل MIROC-ESM استفاده نمود. مقایسه‌ی سناریوها نیز نشان می‌دهد که در هر دو منطقه‌ی مورد مطالعه، سناریوی RCP 8.5 در هر دو دوره‌ی آتی، خشک‌سالی را در محدوده‌ی متوسط نسبت به دوره‌ی پایه نشان می‌دهند.

## ۶- منابع

- آشفته، پریسادات، مساح‌بوانی، علیرضا (۱۳۸۸). تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر دما و بارش حوضه‌ی آیدوغموش در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی، دانش آب‌و‌خاک، ۱۹، ۲، صص ۸۵-۹۸.
- پروین‌نیا، محمد، ریاحی‌فارسانی، مرتضی (۱۳۹۴). بررسی خشک‌سالی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص استاندارد بارش (SPI) و توزیع گاما، پژوهش‌های کاربردی علوم آب، ۱، ۲، صص ۴۱-۵۰.
- جعفرپور، شهرام، کانونی، امین (۱۳۹۴). سناریوهای تغییر اقلیم در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مقایسه‌ی آن با گزارش قبلی، دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه محقق اردبیلی.
- جوان، خدیجه، عرفانیان، مهدی (۱۳۹۹). ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی ایستگاه تبریز طی دوره‌های آتی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG، ۳، ۳۸، ۱۴-۱.
- سلطانی، سعید، مدرس، رضا (۱۳۸۵). تحلیل فراوانی و شدت خشک‌سالی استان اصفهان، منابع طبیعی ایران، ۵۹، ۱، صص ۱۵-۲۶.
- شاکرمی، نیما، مساح‌بوانی، علیرضا (۱۳۸۶). تحلیل عدم قطعیت الگوهای جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو بر سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در حوضه‌ی زاینده‌رود، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب.
- شاه‌کرمی، نازنین، مرید، سعید، مساح‌بوانی، علیرضا، فهیمی، هدایت (۱۳۸۷). تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM بر ریسک تغییر در نیاز آبی محصولات کشاورزی در اثر تغییر اقلیم در زاینده‌رود، آبیاری و زهکشی ایران، ۲، ۲، صص ۱۰-۱.
- علیزاده، امین (۱۳۹۱). اصول هیدرولوژی کاربردی، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- کمال، علیرضا، مساح‌بوانی، علیرضا (۱۳۸۹). تأثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوضه با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی، آب‌و‌خاک، ۲۴، ۵، صص ۹۲۰-۹۳۱.
- منتصری، مجید، نورجو، امیر، بهمنش، جواد، اکبری، مهدی (۱۳۹۷). بررسی ترسالی و خشک‌سالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه‌ی ارومیه (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌های آبریز زاینده‌رود و سیمینه‌رود)، اکوهیدرولوژی، ۵، ۱، صص ۱۸۹-۲۰۲.

۱۱. ناصرزاده، محمدحسین، احمدی، اسماعیل (۱۳۹۱). بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه‌بندی آن در استان قزوین، علوم جغرافیایی، ۱۲، ۲۷، صص ۱۴۱-۱۶۲.
۱۲. نصیری، محمدعلی، جباری، سحر، بوستانی، فردین، شمس‌نیا، سیدامیر (۱۳۸۸). تحلیل و پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش (SPI) (مطالعه‌ی موردی: شهرستان مرودشت)، همایش ملی مدیریت بحران آب، دانشگاه مرودشت.
۱۳. نوده فراهانی، محمدعلی، راسخی، آنا، پرماس، بهنام، کشوری، عبدالرحمن (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشک‌سال‌های دوره آتی حوضه شادگان، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳، ۳، صص ۱۶۰-۱۷۳.
۱۴. یعقوب‌زاده، مصطفی، امیرآبادی‌زاده، مهدی، خزیمه‌نژاد، حسین، زراعتکار، زهرا (۱۳۹۷). ارزیابی سه روش ریزمقیاس‌نمایی در پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم، آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲، ۲، صص ۳۳۴-۳۲۴.
۱۵. یعقوب‌زاده، مصطفی، صالحی طیس، مختار، هاشمی، سیدرضا، منصور، حامد، قوام‌سعیدی نوقایی، سعید (۱۳۹۸). برآورد خشک‌سالی کشاورزی برای دوره آتی به کمک شاخص SMDI و داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم، پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳، ۳، صص ۴۸۰-۴۹۱.
16. Blenkinsop, S., Fowler, H. J. (2007). Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *Journal of hydrology*, 342(1-2), 50-71.
17. Braga, A. C. F. M., da Silva, R. M., Santos, C. A. G., de Oliveira Galvão, C., Nobre, P. (2013). Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: A case study of Pirapama basin, Brazil. *Journal of hydrology*, 498, 46-58.
18. Caccamo, G., Chisholm, L. A., Bradstock, R. A., Puotinen, M. L. (2011). Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2626-2639.
19. IPCC. (2007). The Physical Science Basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge UK
20. IPCC. (2014). The Physical Science Basis. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press Cambridge.
21. Kobierska, F., Jonas, T., Zappa, M., Bavay, M., Magnusson, J., Bernasconi, S. M. (2013). Future runoff from a partly glacierized watershed in Central Switzerland: A two-model approach. *Advances in Water Resources*, 55, 204-214.
22. Loukas, A., Vasiliades, L., Tzabiras, J. (2008). Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*, 17, 23-29.
23. 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). Boston, MA: American Meteorological Society.
24. Oguntunde, P. G., Abiodun, B. J., Lischeid, G. (2017). Impacts of Climate Change on Hydro-Meteorological Drought Over the Volta Basin, West Africa. *Global and Planetary Change* 155, 121-132.
25. Shi, C., Zhou, Y., Fan, X., Shao, W. (2013). A study on the annual runoff change and its relationship with water and soil conservation practices and climate change in the middle Yellow River basin. *Catena*, 100, 31-41.
26. Van Pelt, S. C., Swart, R. J. (2011). Climate change risk management in transnational river basins: the Rhine. *Water resources management*, 25(14), 3837-3861.
27. Vidal, J. P., Wade, S. (2009). A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(14), 2056-2071.

28. Vrochidou, A. E., Tsanis, I. K., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G. (2013). The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*, 476, 290-301.

