

## ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوضه آبخیز تمر (بالادست سد گلستان) با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI تحت شرایط اقلیمی حال و آینده

عبدالله پیرنیا<sup>۱</sup>، محمد گلشن<sup>۱</sup>، سمیرا بیگنه<sup>۲</sup>، کریم سلیمانی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد

۳. استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی ساری، ساری

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۵/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۴)

### چکیده

خشکسالی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین بلاای طبیعی است که با رخداد تغییر اقلیم پیچیده‌تر می‌شود. برای فراهم کردن یک دید کلی از شرایط خشکسالی، شاخص‌هایی برای پیش‌آن به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. در این مطالعه، برای ارزیابی وضعیت خشکسالی آینده حوضه آبخیز تمر (بالادست سد گلستان)، ابتدا داده‌های روزانه خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 با استفاده از مدل SDSM برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹، ریزمقیاس و پیش‌بینی شدند. در ادامه، با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده و شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI، وضعیت خشکسالی در آینده بررسی شد. همچنین، آنالیز روند داده‌های دما و بارندگی، با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال انجام گرفت. نتایج آنالیز روند بیان‌کننده تغییرات ناچیز بارندگی و افزایش معنادار دما در بیشتر سری‌های زمانی است. همچنین، عملکرد مدل SDSM برای پیش‌بینی داده‌های دما و بارندگی بسیار خوب ارزیابی شد و خروجی‌های آن نشان داد دما و بارندگی نسبت به زمان حال افزایش می‌یابند. نتایج شاخص SPI نشان داد در هر دو دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹)، بیشترین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دو دوره رخ داده‌اند. از آنجا که در شاخص SPEI در مقایسه با شاخص SPI پارامترهای اقلیمی بیشتری علاوه بر بارندگی برای ارزیابی خشکسالی لحاظ می‌شود و با توجه به افزایش روند دما در دوره حال و آینده، می‌توان گفت که نتایج شاخص SPEI، واقعی‌تر و منطقی‌تر از نتایج شاخص SPI است به طوری که ارزیابی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI، شرایط خشکسالی شدیدتری را نسبت به شاخص SPI نشان داد.

**کلیدواژگان:** حوضه آبخیز تمر، خشکسالی، شاخص‌های SPI و SPEI، گزارش پنجم IPCC، مدل SDSM.

## مقدمه

پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، به‌ویژه بر اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای طی سال‌های اخیر مشکلات زیادی به‌همراه داشته که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بخش‌های مختلف جامعه را تحت تأثیر قرار داده است. خشکسالی از مهم‌ترین و شایع‌ترین بلایای متأثر از تغییر اقلیم است که به‌طور آرام و پیش‌رونده‌ای به خسارت‌های زیست-محیطی، کشاورزی و اقتصادی در هر دو اقلیم خشک و مرطوب در سرتاسر دنیا منجر می‌شود [۱]. در دهه‌های اخیر در میان حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده است، زیان‌بارترین آنها از نظر شدت، مدت، گستره تحت پوشش و خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی وارد شده، پدیده خشکسالی بوده است [۲]. اگرچه امروزه به‌علت پیشرفت‌های علمی و گسترش ارتباطات و حمل‌ونقل، بروز آثار خشکسالی به شکل قحطی و مرگ دسته‌جمعی کمتر بروز می‌کند، آثار و تبعات دیگر ناشی از خشکسالی همچنان پابرجاست [۳ و ۴]. از آنجا که خشکسالی، بخش‌های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، اقتصاد، بهداشت و... را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین پیش و ارزشیابی این عامل در حال و آینده به‌منظور ارائه برنامه‌ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه امری لازم و ضروری است.

مطالعات متعددی در این زمینه در نقاط مختلف دنیا و همچنین ایران صورت گرفته است: مرادی و همکارانش [۵] با استفاده از شاخص بارش استاندارد<sup>۱</sup> (SPI) و آزمون‌های آماری پارامتری و ناپارامتری، به تحلیل روند خصوصیات مکانی شدت خشکسالی‌های استان فارس پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد شدت خشکسالی‌ها در نواحی مرکزی استان فارس نسبت به سایر مناطق بیشتر است و وجود روند در بیشتر ایستگاه‌ها آشکار شد. معافی‌مدنی و همکارانش [۶] تأثیرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی استان خراسان رضوی طی دو دهه آینده با استفاده از شاخص دهک‌ها<sup>۲</sup> (DI) و شاخص SPI را ارزیابی کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد این دو نمایه هم‌خوانی خوبی با هم دارند و در حالت کلی در بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی طی بیست سال آینده، وضعیت ترسالی افزایش می‌یابد. صالح‌پور جم و همکارانش [۷] اثر تغییر اقلیم را بر ویژگی‌های

خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک شمال غربی ایران با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بارندگی در آینده نسبت به زمان حال کاهش و همچنین شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در آینده افزایش خواهد یافت. یوسفی و همکارانش [۸] با استفاده از شاخص SPI و شاخص اکتشاف خشکسالی<sup>۳</sup> (RDI)، به پهنه‌بندی و مدیریت خشکسالی استان مرکزی پرداختند و نتیجه گرفتند که مناطق مرکزی و غربی استان مرکزی در زمان وقوع خشکسالی، آسیب‌پذیر هستند که در این میان، شهرهای اراک، کمیجان و شازند ریسک‌پذیری شایان توجهی دارند. جهانگیر و همکارانش [۹] وضعیت خشکسالی را با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در استان‌های تهران و البرز بررسی کردند و دریافتند که نیمی از ایستگاه‌های مطالعه‌شده وضعیت نرمال و حدود یک‌سوم آنها شرایط خشکسالی را تجربه کرده‌اند. آنها با استفاده از شبکه عصبی نیز نتیجه گرفتند که مقادیر پیش‌بینی‌شده خشکسالی با مقادیر مشاهداتی بسیار نزدیک است. اکبری و همکارانش [۱۰] با استفاده از شاخص‌های SPI و RDI نشان دادند علاوه بر وجود خشکسالی‌های کنونی، در آینده نزدیک و همین‌طور در دوره‌های آبی طولانی‌تر، مناطق نیمه‌خشک در غرب استان گلستان شرایط خشکسالی شدیدتری را تجربه خواهند کرد. پروانه و همکارانش [۱۱] وضعیت خشکسالی استان لرستان را در دو دهه آینده با استفاده از شاخص خشکسالی SPI بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده آن بود که در آینده بارندگی افزایش و خشکسالی کاهش می‌یابد.

لوکاس و همکارانش [۱۲] در مطالعه خود تأثیر تغییر اقلیم را بر شدت خشکسالی در منطقه تسالی (Thessaly) واقع در کشور یونان بررسی کردند. به این‌منظور از نمایه بارش استاندارد شده برای پیش‌بینی خشکسالی دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) استفاده شد. یافته‌ها نشان داد تحت تأثیر تغییر اقلیم در آینده شدت خشکسالی سالانه برای همه ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد و تحت سناریوی A2 بیشترین شدت را دارد. وروچیدو و همکارانش [۱۳] با استفاده از سه مدل گردش عمومی جو<sup>۴</sup> (GCMs) و سناریوهای A2 و B1 تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی در حوضه پلاتیس واقع در یونان را بررسی کردند. یافته‌های هر سه مدل نشان داد حوضه

3. Reconnaissance Drought Index  
4. General Circulation Models

1. Standardized Precipitation Index  
2. Deciles Index

سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 با استفاده از مدل SDSM. ۳. آشکارسازی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI طی دوره‌ی حال (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹).

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز تهر یکی از زیرحوضه‌های گرگان‌رود و در استان گلستان واقع شده است. مساحت حوضه بررسی شده ۱۵۲۵/۳ کیلومترمربع است و از نظر جغرافیایی در محدوده ۲۴° ۳۷' تا ۴۹° ۳۷' عرض شمالی و ۲۹° ۵۵' تا ۰۴° ۵۶' طول شرقی قرار دارد. مرتفع‌ترین نقطه در منطقه خوش‌بیلاق در جنوب حوضه با ارتفاع ۲۰۹۸ متر و پست‌ترین نقطه محل سد گلستان ۲ با ارتفاع ۱۱۷ متر از سطح دریاست. مرکز گرانی حوضه از نظر جغرافیایی دارای عرض شمالی ۳۶° ۳۷' و طول شرقی ۴۷° ۰۴' است و در ارتفاع ۹۰۰ متری قرار دارد. موقعیت منطقه مطالعه شده در ایران و استان گلستان در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### داده‌ها و دوره آماری

در این تحقیق از داده‌های روزانه بارندگی، کمترین دما و بیشترین دما استفاده شده است. برای ارزیابی خشکسالی و نیز آنالیز روند پارامترهای اقلیمی مطالعه شده در زمان حال، دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و برای ارزیابی خشکسالی در آینده و مقایسه آن با دوره حال، دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۴۹ انتخاب شدند. در این مطالعه، برای استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و استفاده از سناریوهای RCP، برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل یادشده، دوره آماری ۱۹۶۱-۱۹۹۰ در نظر گرفته شد. همچنین، برای آنالیز روند، از داده‌های ماهانه ۱۰ ایستگاه استفاده شده است که نسبت به سایر ایستگاه‌ها، نزدیک‌ترین فاصله را به منطقه مطالعه شده دارند. موقعیت ایستگاه‌های مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از انتخاب داده‌ها و دوره آماری مد نظر، کنترل کیفیت روی داده‌ها انجام گرفت و در ادامه نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف<sup>۲</sup> تأیید و همچنین همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون توالی<sup>۳</sup> ارزیابی و تصادفی بودن مقادیر در سطح ۰/۹۵ پذیرفته شدند.

در آینده شاهد شرایط سخت خشکسالی خواهد بود و نتایج برای سناریوی A2 شدیدتر از سناریوی B1 است. فلیپ و همکارانش [۱۴] اثر تغییر اقلیم را بر خشکسالی هیدرواقلمی در سراسر حوضه آبخیز ولتا در غرب آفریقا بررسی کردند و نشان دادند وسعت خشکسالی‌ها در آینده بین ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد و بزرگی افزایش خشکسالی‌ها با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPEI) بیشتر از شاخص SPI است.

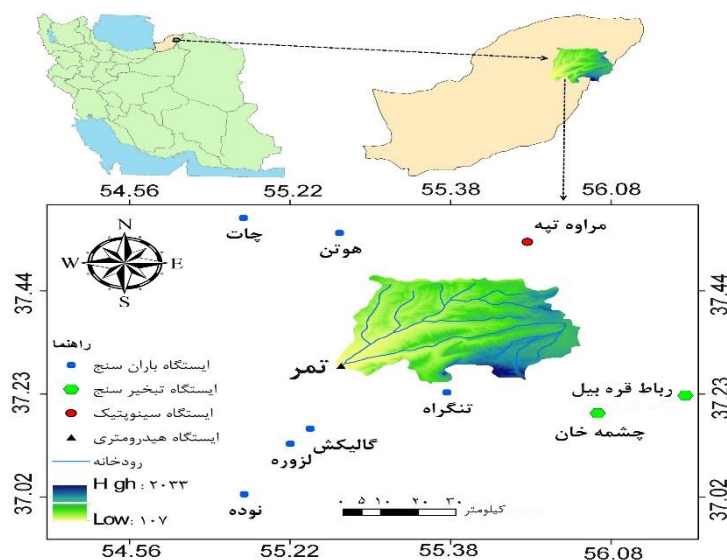
با توجه به مرور مطالعات در زمینه تغییر اقلیم و خشکسالی، قابل درک است که این پدیده بر ابعاد مختلف زندگی انسان اعم از اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیطی، پیامدهای منفی درخور توجهی می‌تواند داشته باشد. ارزیابی خشکسالی حوضه آبخیز تهر واقع در بالادست سد گلستان به دلیل اهمیت این منطقه در تأمین آب برای مصارف مختلف به خصوص کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد که می‌تواند شناخت نسبتاً خوبی را نسبت به وضعیت اقلیم و منابع آب برای تصمیم‌گیران و البته ساکنان و ذی‌نفعان اصلی منطقه برای مشارکت در راهکارهای سازگاری و کاهش آثار این پدیده، فراهم کند. پایش، ارزیابی و نیز اطلاع‌رسانی به موقع بروز خشکسالی‌ها به دلیل اهمیت منطقه به منظور تولید محصولات کشاورزی و باغی اهمیت دارد. در مطالعه حاضر برای رسیدن به این هدف و نیز افزایش صحت نتایج و داشتن اطمینان زیاد به آنها، از سناریوهای جدید اقلیمی و نیز انتخاب مناسب‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی شرایط تغییرپذیری اقلیم و خشکسالی در زمان حال و آینده استفاده شد. با توجه به اینکه خشکسالی در یک منطقه می‌تواند تحت تأثیر پارامترهای مختلف اقلیمی باشد، در این مطالعه علاوه بر استفاده از شاخص پرکاربرد SPI، که به طور گسترده در مناطق مختلف استفاده می‌شود، شاخص مهم SPEI نیز به دلیل در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم اقلیمی، برای ارزیابی خشکسالی استفاده شد و نتایج این دو شاخص در زمینه دیگر نتایج مطالعه، ارزیابی و مقایسه شد. به این منظور، اهداف تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

۱. آنالیز روند پارامترهای دما و بارندگی طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴.

۲. پیش‌بینی این پارامترها طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ بر اساس داده‌های روزانه خروجی مدل CanESM2 تحت

2. Kolmogorov-Smirnov  
3. Run test

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز تمر و ایستگاه‌های مطالعه‌شده در استان گلستان و ایران

جفت‌شده<sup>۷</sup> (CGCM4) است و جزء سری مدل‌های CMIP5 و گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم است [۱۷]. مشخصات این مدل در جدول ۱ نشان داده شده است. انتخاب روش مناسب برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش باید با توجه به رژیم منطقه‌ای این پارامترها انجام شود. به این منظور، در ایران نیز روش‌های یادشده در شرایط اقلیمی ایران بررسی شده‌اند [۱۸ و ۱۹]. در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو، از مدل آماری رگرسیونی SDSM<sup>۸</sup> ابداع‌شده و توسعه‌یافته توسط ویلی و داوسون [۲۰] استفاده می‌شود. این مدل ترکیبی از روش‌های تولید آب و هوای مصنوعی و رگرسیونی است که بر اساس برقراری ارتباط آماری مناسب بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس منطقه (NCEP) و متغیرهای پیش‌بینی‌شونده (داده‌های مشاهداتی)، می‌توان به روابط مناسبی برای پیش‌بینی متغیرهای آب و هوایی در دوره‌های آتی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم دست یافت. عملکرد مدل SDSM در چهار مرحله صورت می‌گیرد: ۱. انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (متغیر مستقل) که در این مرحله متغیرهای مستقل دارای بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی شناسایی می‌شوند؛ ۲. کالیبراسیون مدل؛ ۳. اعتبارسنجی مدل؛ ۴. تولید سناریوهای آتی، که در این مرحله با استفاده از داده‌های دوره زمانی آینده مدل بزرگ‌مقیاس CanESM2، داده‌های بارندگی

#### ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی

با شروع دهه ۲۰۱۰ و در پنجمین گزارش ارزیابی<sup>۱</sup> (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> (IPCC)، CMIP5 سناریوهای جدید RCP<sup>۴</sup> را به جای سناریوهای SRES<sup>۵</sup> پیشنهاد داد که سناریوهای پیشنهادی در چهار حالت ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ هستند. سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرک‌های تابشی هستند و در میان آنها سناریوی RCP 2.6 سناریوهای انتشار و محرک‌های تابشی کم (تقریباً مشابه با سناریوهای B1 یا B2) و سناریوی RCP 8.5 محرک‌های تابشی و سناریوهای انتشار زیاد (تقریباً مشابه با سناریوهای A1 یا A2) را نشان می‌دهند. همچنین، سناریوهای RCP 4.5 و RCP 6 حالت متوسط دارند [۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق برای تحلیل آینده از میان سناریوهای معرفی‌شده توسط پنجمین گزارش ارزیابی IPCC (AR5)، دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ انتخاب شدند.

با توجه به وجود برخی محدودیت‌ها در استفاده از داده‌های مدل‌های GCM در زمینه استفاده از سناریوهای گزارش پنجم، در این تحقیق از داده‌های مدل CanESM2<sup>۶</sup> استفاده شده است. مدل CanESM2 یک مدل جامع و جفت‌شده و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی

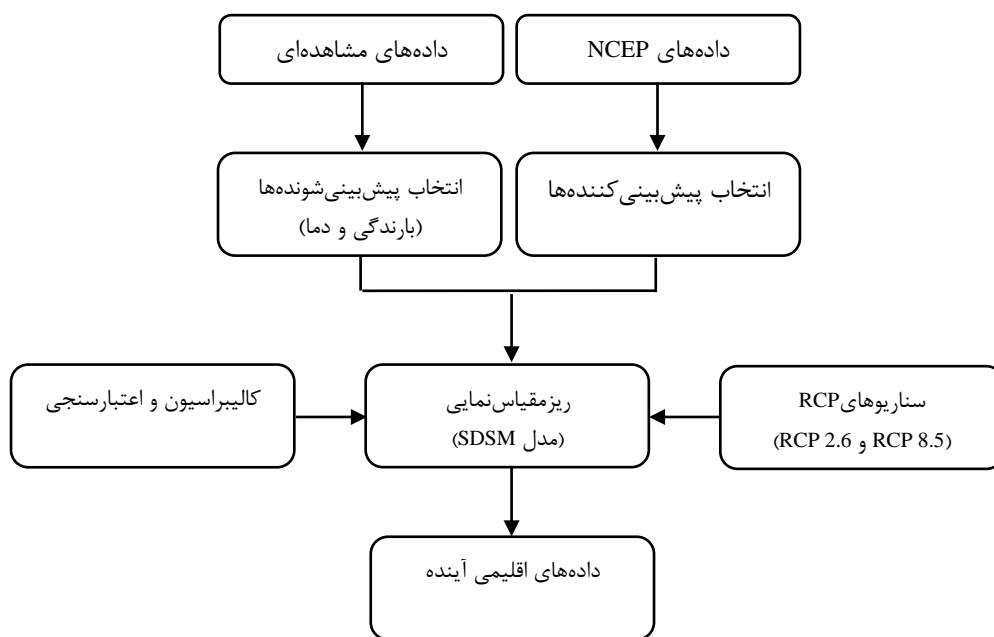
7. Fourth-generation Coupled Global Climate Model  
8. Statistical Downscaling Model

1. Fifth Assessment Report  
2. International Panel on Climate Change  
3. Coupled Model Intercomparison Project 5  
4. Representative Concentration Pathways  
5. Special Report on Emissions Scenarios  
6. Second generation Canadian Earth System model

و دما برای دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و تحت سناریوهای RCP 2.6 و 8.5 برآورد می‌شوند. فرایند ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل SDSM در شکل ۲ به صورت ساده و خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل CanESM2 [۱۷]

نام مدل	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول×عرض)	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول×عرض)	گروه مؤسس	دوره شبیه‌سازی تاریخی/آینده	سناریوهای شبیه‌سازی	مرجع
CanESM2 (2010)	۲۸۱°×۲۸۱°	۱.۴۱°×۰.۹۴°	CCCMA، کانادا	۱۸۵۰-۲۰۰۶/۲۰۰۵-۲۱۰۰	RCP 4.5, RCP 2.6 و RCP 8.5	آرورا و همکارانش (۲۰۱۱)



شکل ۲. فرایند ریزمقیاس‌نمایی به وسیله مدل SDSM

هر دوره زمانی تعیین کرد. بنابراین، بر اساس این شاخص علاوه بر محاسبه شدت خشکسالی، مدت آن را نیز می‌توانیم تعیین کنیم. برای تعیین درجه خشکسالی با استفاده از این شاخص، از جدول ۲ استفاده می‌شود.

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت خشکسالی و احتمال وقوع شاخص

(۲۱) SPI

احتمال (%)	مقادیر SPI	طبقه خشکسالی
۲/۳	$\geq +2$	ترسالی بسیار شدید
۴/۴	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۹/۲	۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۳۴/۱	۰ تا ۰/۹۹	ترسالی کم
۳۴/۱	۰ تا -۰/۹۹	خشکسالی کم
۹/۲	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
۴/۴	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
۲/۳	$\leq -2$	خشکسالی بسیار شدید

### شاخص بارش استاندارد (SPI)

از بین شاخص‌های کمی در تحلیل خشکسالی، شاخص SPI به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای دوره‌های متفاوت زمانی و همچنین مقیاس‌های مکانی مختلف، به عنوان شاخص مناسب به منظور تحلیل خشکسالی مقبولیت جهانی یافت و توسط مک‌کی و همکارانش [۲۱] ارائه شد. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص، بارندگی است. این شاخص معمولاً در مقیاس‌های زمانی مشخصی محاسبه می‌شود. در این تحقیق، از مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده شده است. ویژگی دیگر شاخص SPI این است که بر اساس آن می‌توان آستانه خشکسالی را برای

$$SPEI = W - \frac{C_1 + C_2 + C_3 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (5)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (6)$$

برای  $P \leq 0.5$ ، احتمال تجاوز مقدار  $D$  تعیین شده برابر می شود با:

$$P = 1 - F(x) \quad (7)$$

برای  $P > 0.5$ ،  $P$  به وسیله  $1 - P$  جایگزین و علامت  $SPEI$  محاسبه شده، معکوس می شود. ضرایب عبارتند از:

$$C_1 = 2/51, C_2 = 0/8, C_3 = 0/01, \quad (8)$$

$$d_1 = 1/43, d_2 = 0/189, d_3 = 0/013$$

مقدار متوسط  $SPEI$  برابر با صفر و انحراف معیار برابر با یک است.  $SPEI$  یک متغیر استاندارد شده است و بنابراین می تواند با دیگر مقادیر  $SPEI$  در مکان و زمان های دیگر مقایسه شود. در توسعه شاخص  $SPEI$ ، از مفاهیم شاخص  $SPI$  استفاده شده است. بنابراین، مقادیر طبقه های مختلف شدت خشکسالی در آنها مشابه با طبقه های ارائه شده توسط ادوارد و مک کی برای شاخص  $SPI$  است که در جدول ۲ ارائه شده اند. شاخص  $SPEI$  می تواند در مقیاس های زمانی مختلف مانند یک، سه، شش، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه شود. این شاخص می تواند برای پایش دوره های خشک و مرطوب استفاده شود که در آن خشکسالی هنگامی شروع می شود که مقادیر شاخص به مقدار ۱- برسد و با مثبت شدن آن خاتمه یابد.

### آزمون همبستگی پیاپی

شناسایی روند بدون توجه به همبستگی پیاپی بین داده ها، سبب اشتباه در تعیین روند می شود و در همه مطالعات برای آنالیز روندهای زمانی باید به این خصوصیت توجه کافی کرد [۲۶]. برای بررسی وجود رابطه بین مشاهدات نزدیک به هم و یا همبستگی پیاپی در هر سری زمانی، می توان از آزمون Durbin-Watson استفاده کرد [۲۷]. از آنجا که همبستگی پیاپی بر آماره من- کندال هنگامی که اندازه نمونه بیشتر از ۵۰ باشد اثر کمی دارد [۲۸]، و با توجه به اینکه در این تحقیق، دوره مطالعه شده کمتر از ۵۰ سال است، همه سری های زمانی در این مطالعه مورد این آزمون قرار گرفتند و مشخص شد که تعداد کمی از سری ها همبستگی پیاپی دارند که در نتایج به دست آمده از این مطالعه تأثیری نداشتند.

### شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص  $SPEI$  [۲۲] یک شاخص چندمتغیره براساس داده های هواشناسی است که برای شناسایی شروع، مدت و شدت خشکسالی در شرایط نرمال سیستم های مدیریت شده و طبیعی مانند کشاورزی، اکوسیستم ها، رودخانه ها و منابع آب استفاده می شود. شاخص  $SPEI$  در مقایسه با شاخص  $SPI$  دما را نیز در ارزیابی خشکسالی در نظر می گیرد که می تواند شرایط واقعی تر و منطقی تری از خشکسالی منطقه مطالعه شده را نمایش دهد [۲۳]. در آنالیز  $SPEI$ ، معادله پنمن-مانتیت [۲۴] استفاده شده است. برای محاسبه شاخص  $SPEI$ ، در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود. سپس، از طریق یک مدل ساده بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه  $i$  بر اساس معادله ۱ محاسبه می شود:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

مقادیر  $D_i$  محاسبه شده در مقیاس های زمانی مختلف با هم جمع می شوند:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1} - PET_{n-i}) \quad (2)$$

در اینجا  $k$ ، مقیاس زمانی و  $n$ ، واحد زمان را نشان می دهند. ویسنت سرانو [۲۲] با بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ-لجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر  $D_i$  تشخیص دادند. برای توابع توزیع احتمال، توزیع سه پارامتری لوگ-لجستیک با تابع چگالی احتمال، به شکل رابطه ۳ بیان می شود.

$$f(X) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \left[ 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^\beta \right]^{-\alpha} \quad (3)$$

در اینجا،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و موقعیت برای مقادیر  $D$  در دامنه  $-\infty < D < \gamma$  هستند. تابع توزیع احتمال  $D$  بر اساس توزیع لوگ-لجستیک به شکل رابطه ۴ بیان می شود:

$$F(X) = \int_0^x f(t) dt = \left[ 1 + \left( \frac{1-\gamma}{\alpha} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

سپس،  $SPEI$  بر اساس مقدار استاندارد شده تابع  $F(x)$  به عنوان تابع تخمینی کلاسیک آبراموویچ و استیگان [۲۵] به دست می آید:

باشد، در سطح اطمینان ۰/۰۵ دارای روند مشخص و معنادار است و برای قدر مطلق Z بزرگ‌تر از ۲/۵۷۵، روند در سطح ۰/۰۱ معنادار است [۳۳]. روابط مربوط به آنالیز روند در منابع یادشده نشان داده شده‌اند.

### یافته‌ها و بحث

#### آنالیز روند

نتایج آنالیز روند نشان داد به‌طور کلی بارندگی در مقیاس سالانه و در بیشتر ایستگاه‌ها با افزایش ناچیز مواجه بوده است و فقط در ایستگاه تهر در سطح اطمینان پنج درصد معنادار است (جدول ۳). همچنین، بارندگی فقط در ایستگاه مراوه‌تپه کاهش یافته است که معنادار نیست. تغییرات دما نیز بررسی شد و نتایج نشان داد به‌طور کلی در هر دو پارامتر، دما افزایش یافته است که البته در کمترین دما، شاهد افزایش به‌مراتب شدیدتر و معنادارتری هستیم.

#### آزمون روند من - کندال (Mann-Kendall)

آزمون من - کندال جزء متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرومتئورولوژیکی به‌شمار می‌رود که به‌طور گسترده در علوم محیطی استفاده می‌شود [۲۹-۳۱]. از مزایای اصلی روش‌های ناپارامتری این است که وجود داده‌های پرت، نتیجه روند داده‌ها را کمتر از روش‌های پارامتری تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزون بر این، برای سری داده‌هایی مناسب‌تر است که طول آنها کم و توزیع آماری آنها نرمال نیست و یا داده‌های گمشده داشته باشند [۳۲]. وجود روند معنادار آماری با استفاده از مقدار آماره آزمون من - کندال (Z) مشخص می‌شود که توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک داشته باشد. اگر برای Z مقداری مثبت به دست آید، بیان‌کننده یک روند افزایش در سری زمانی است، در حالی که مقدار منفی، نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی است. همچنین، اگر قدر مطلق Z، بزرگ‌تر از ۱/۹۶

جدول ۳. نتایج آزمون من - کندال بر سری‌های زمانی سالانه پارامترهای مطالعه‌شده

ایستگاه	بارندگی			کمترین دما			بیشترین دما		
	Z	p-value	شیب سن	Z	p-value	شیب سن	Z	p-value	شیب سن
تمر	۲/۲*	۰/۰۳	۷/۸	۲/۷**	۰/۰۰۵	۰/۰۵	-۱/۴	۰/۱	-۰/۰۲
چشمه‌خان	۰/۴	۰/۷	۰/۵	۲/۱*	۰/۰۳	۰/۰۳	۱	۰/۳	۰/۰۱
رباط قره‌بیل	۰/۶	۰/۵	۱/۱۱	-۱/۴	۰/۱	-۰/۰۴	-۰/۳	۰/۷	-۰/۰۱
لزوره	۰/۲	۰/۸	۰/۹	۳/۵**	۰/۰۰۰۵	۰/۰۵	-۰/۰۶	۰/۹	-۰/۰۰۱
تنگراه	۱/۶	۰/۰۸	۳/۴	۲/۳*	۰/۰۲	۰/۰۵	۱/۷	۰/۰۷	۰/۰۴
مراوه‌تپه	-۰/۱	۰/۹	-۰/۳	۳/۶**	۰/۰۰۰۳	۰/۰۴	۱/۳	۰/۲	۰/۰۱
هوتن	۰/۲	۰/۸	۰/۷۶	۱/۹۷*	۰/۰۵	۰/۰۴	۲/۵*	۰/۰۲	۰/۰۵
چات	۰/۶	۰/۶۹	۱/۲	۲/۶**	۰/۰۱۵	۰/۰۳۲	۰/۹	۰/۵	۰/۰۰۹
نوده	۰/۴	۰/۷	۰/۶	۳**	۰/۰۰۰۷	۰/۰۴	۰/۷	۰/۵	۰/۰۰۸
گالیکش	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۵	۲/۱*	۰/۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۰/۸۲	۰/۰۰۲

\* معناداری را در سطح احتمال پنج درصد و \*\* معناداری را در سطح احتمال یک درصد نشان می‌دهد.

همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای (پیش‌بینی‌شونده‌ها) و متغیرهای اتمسفریک بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌های NCEP<sup>۱</sup>) تعیین کردیم. سپس، این متغیرها به‌وسیله مدل SDSM برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها غربال و پیش‌بینی‌کننده‌های مناسب در حوضه، انتخاب شدند.

#### کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل SDSM

برای اجرای مدل SDSM، به کالیبره کردن رابطه بین پیش‌بینی‌شونده‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌ها قبل از شرایط

#### سناریوهای RCP تولیدشده به‌وسیله مدل SDSM

پارامترهای روزانه بارندگی، کمترین دما و بیشترین دمای مشاهده‌ای به‌عنوان داده‌های پیش‌بینی‌شونده انتخاب شده‌اند. سیستم‌های اقلیمی معمولاً به‌وسیله تأثیرات ترکیبی فاکتورهای اتمسفریک چندگانه برای یک گستره زمانی-مکانی تأثیر می‌پذیرند. بنابراین، بعید است که در نظر گرفتن فقط یک پیش‌بینی‌کننده برای آنالیز کامل و جامع، کافی باشد [۳۴]. با توجه به ویژگی‌های اقلیمی حوضه، متغیرهای اتمسفریک مربوط را از طریق آنالیز

۰/۷ است و مقادیر در این دو دوره با یکدیگر مطابقت دارند. اگرچه ضرایب  $R^2$  و NSE بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی نیز بیان‌کننده تطابق زیاد مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده است، مقدار این ضرایب در دوره صحت‌سنجی تا اندازه‌ای کمتر از مقادیر آنها در دوره کالیبراسیون است.

عملکرد ریزمقیاس‌نمایی درباره بارندگی، رضایت‌بخشی کمتری نسبت به دما در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی دارد زیرا بارندگی پیچیده‌تر و گسسته‌تر است [۳۴]. درنهایت، با توجه به نتایج دریافتیم که مدل SDSM در تولید سناریوهای اقلیمی آینده در حوضه مطالعه شده بسیار توانمند است.

اقلیمی آینده با خروجی‌های GCM نیاز داریم که در نتیجه آن، ریزمقیاس‌نمایی می‌تواند به‌طور مؤثری صورت گیرد. داده‌های ۱۵ سال ابتدای دوره (۱۹۶۱-۱۹۷۵) برای کالیبراسیون SDSM و داده‌های ۱۵ سال آخر دوره (۱۹۷۶-۱۹۹۰)، برای اعتبارسنجی استفاده شدند. مقادیر پارامترهای کمترین و بیشترین دمای مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده تقریباً یکسان بودند. ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و نش-ساتکلیف (NSE) بین دماهای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، بیشتر از ۰/۸ در کالیبراسیون است. بارندگی عملکرد کمتری نسبت به دما دارد؛ با این‌وجود، همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضرایب  $R^2$  و NSE بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره کالیبراسیون، بیشتر از

جدول ۴. نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل SDSM

صحت‌سنجی (۱۹۷۶-۱۹۹۰)		کالیبراسیون (۱۹۶۱-۱۹۷۵)		پیش‌بینی‌شونده‌ها
NSE	$R^2$	NSE	$R^2$	(Predictands)
۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷۸	بارندگی
۰/۷۹	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۹	کمترین دما
۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۸	۰/۸۸	بیشترین دما

نتایجی که در بررسی تغییرات بارندگی دوره آتی نسبت به زمان حال به‌دست آمده است، نشان داد بارندگی به میزان ۱۱/۸۳ میلی‌متر تا ۴۴/۵۴ میلی‌متر یعنی ۳/۳ تا ۱۲/۶ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۵). در مقیاس فصلی تقریباً در همه فصول جز زمستان، شاهد افزایش بارندگی هستیم که این افزایش به مقدار ۴ میلی‌متر تا ۲۹ میلی‌متر متغیر است (جدول ۶). به‌رغم پیش‌بینی افزایش بارندگی در این مطالعه، رواناب سطحی منطقه مطالعه‌شده در آینده بر اساس برخی مطالعات کاهش یافته است [۳۶ و ۳۷]. دلیل این امر می‌تواند مربوط به افزایش ناچیز بارندگی و افزایش شدید دما و متعاقب آن افزایش تبخیر و تفرق طی دوره آتی باشد. البته، تأثیرات فعالیت‌های انسانی به‌خصوص تغییر کاربری اراضی نیز می‌تواند تأثیر بسیار مهمی در تغییرات رواناب داشته باشد. این نتایج با یافته‌های تحقیق اکبری و همکارانش [۱۰] مطابقت دارد که افزایش دما، بارندگی و تبخیر و تفرق را در غرب استان گلستان پیش‌بینی کرده بودند.

#### ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای اقلیمی آینده

داده‌های خروجی مدل CanESM2، به‌عنوان ورودی مدل SDSM کالیبره‌شده برای تولید داده‌های روزانه بارندگی، کمترین و بیشترین دما در آینده هستند. بررسی تغییرات دما برای دوره زمانی آینده ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره آماری پایه نشان داد میانگین کمترین و بیشترین دمای سالانه در هر دو سناریو افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش مربوط به سناریو RCP 8.5 و به میزان ۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد برای کمترین دما و ۰/۴۲ درجه سانتی‌گراد برای بیشترین دماست. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، این افزایش دما به‌طور کلی در سناریوی RCP 8.5، شدیدتر از سناریوی RCP 2.6 است، زیرا در سناریوی RCP 8.5، رشد جمعیت، استفاده از انرژی و در نهایت تولید گازهای گلخانه‌ای، بیشترین مقدار را نسبت به سایر سناریوها دارد [۳۵]. همچنین، در مقیاس فصلی نیز دما در همه فصول به مقدار ۰/۱ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد در آینده افزایش خواهد یافت (جدول ۶). به‌طور کلی افزایش دما در فصول گرم یعنی بهار و تابستان، نسبت به فصول پاییز و زمستان آشکارتر است.



جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل SDSM در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه

مدل گردش عمومی جو	سناریو	بارندگی (میلی‌متر)	کمترین دما (°C)	بیشترین دما (°C)	میانگین دما (°C)
CanESM2	RCP 8.5	۴۴/۵۴	۰/۶۳	۰/۴۲	۰/۵۲
	RCP 2.6	۱۱/۸۳	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۳۱

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی در مقیاس فصلی با استفاده از مدل SDSM در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه

مدل گردش عمومی جو	سناریوی انتشار	دما (درجه سانتی‌گراد)				بارندگی (میلی‌متر)			
		بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
CanESM2	RCP 8.5	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۳	۲۳	۲۹	-۹	-۲
	RCP 2.6	۰/۳	۰/۶	۰/۲	۰/۱	۴	۴	۱۰	-۶

ماه) در این مقیاس زمانی را داشته است. نتایج این بررسی نشان داد در بین دوره‌های خشک به‌وقوع پیوسته در منطقه، دوره خشک ۲۰۰۹/۱ - ۲۰۱۲/۱۲ به مدت چهار سال (۴۸ ماه) به‌طول انجامیده است. بیشترین مقدار شاخص SPI، ۲/۵۳ مربوط به SPI یک‌ماهه در ۲۰۰۶/۴ و کمترین مقدار آن ۲/۳۴ - مربوط به SPI سه‌ماهه در ۲۰۰۰/۷ بوده است. همچنین، طول دوره‌های ترسالی و خشکسالی با افزایش مقیاس زمانی شاخص SPI افزایش ولی از تکرار این دوره‌ها کاسته شده است. برخی مطالعات نیز نتیجه مشابهی را گزارش داده‌اند [۴ و ۱۱].

**ارزیابی خشکسالی در دوره پایه بر اساس شاخص SPI**  
نتایج مقایسه میزان تغییرات دوره‌های ترسالی و خشکسالی با توجه به شکل‌های یادشده در جدول ۷ ارائه شده است. طبق نتایج، دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ از دوره‌های آماری نسبتاً مرطوب بوده و تداوم دوره خشک در این دوره نسبت به دوره‌های دیگر کمتر است. در بررسی SPI های کوچک‌تر از صفر و تداوم دوره‌های خشک طی ۳۰ سال دوره آماری پایه مشخص شد که در ۱۸۰ ماه، SPI در مقیاس زمانی یک‌ماهه کوچک‌تر از صفر بوده است. دوره خشک ۲۰۱۰/۱ - ۲۰۱۰/۸ بیشترین تداوم (هشت

جدول ۷. تعداد، تداوم، شدت، زمان وقوع و خاتمه دوره‌های خشک با استفاده از مقیاس‌های زمانی SPI

خصوصیات	یک‌ماهه	سه‌ماهه	شش‌ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تعداد SPI > ۰	۱۸۰	۱۶۶	۱۶۷	۱۵۴	۱۳۶
طولانی‌ترین مدت خشکسالی	۸	۳۵	۴۰	۴۸	۳۸
تعداد خشکسالی با بیشترین مدت	۴	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین خشکسالی	۲۰۱۰/۱ - ۲۰۱۰/۸	۲۰۰۹/۸ - ۲۰۱۲/۶	۲۰۰۹/۹ - ۲۰۱۲/۱۲	۲۰۰۹/۱ - ۲۰۱۲/۱۲	۲۰۰۹/۱۱ - ۲۰۱۲/۱۲
شدیدترین خشکسالی و زمان وقوع آن	۲/۳۲ - (۲۰۰۰/۹)	۲/۳۴ - (۲۰۰۰/۷)	۲/۲۱ - (۲۰۱۰/۵)	۲/۲۵ - (۲۰۱۰/۸)	۱/۹۸ - (۲۰۱۱/۶)
تعداد SPI < ۰	۱۸۰	۱۹۲	۱۸۸	۱۹۵	۲۰۱
طولانی‌ترین مدت ترسالی	۵	۱۹	۱۶	۵۰	۹۶
تعداد ترسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۲	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین ترسالی	۱۹۸۷/۱ - ۱۹۸۷/۵	۲۰۰۵/۳ - ۲۰۰۶/۹	۱۹۹۳/۳ - ۱۹۹۴/۶	۲۰۰۴/۹ - ۲۰۰۸/۱۰	۱۹۹۴/۵ - ۲۰۰۲/۴
شدیدترین ترسالی و زمان وقوع آن	۲/۵۳ (۲۰۰۶/۴)	۲/۴۳ (۱۹۸۷/۴)	۲/۲ (۱۹۹۲/۳)	۱/۹۵ (۲۰۰۶/۴)	۱/۹۹ (۲۰۰۶/۱۱)

ماهه به طول انجامیده است. بیشترین مقدار شاخص SPI، ۲/۸۷ مربوط به یک ماهه در ۲۰۲۵/۴ و کمترین مقدار آن ۲/۴- مربوط به یک ماهه در ۲۰۲۷/۵ بوده است. به طور کلی، در اینجا نیز مانند بسیاری از مطالعات [۴] و [۱۱]، با افزایش دوره بررسی شده به صورت سری زمانی ماهانه، طول دوره های ترسالی و خشکسالی بیشتر و مقدار آن کمتر شده است. شرایط خشکسالی و ترسالی در آینده براساس سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 به ترتیب افزایش و کاهش می یابد به طوری که شدت و مدت خشکسالی ها در سناریوی RCP 8.5 بیشتر از شدت و مدت خشکسالی ها در سناریوی RCP 2.6 است.

**ارزیابی خشکسالی در آینده بر اساس شاخص SPI**  
نتایج مقایسه میزان تغییرات آتی دوره های ترسالی و خشکسالی بر اساس سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5، به ترتیب در جدول های ۸ و ۹ ارائه شده است. بر اساس سناریوی RCP 2.6، در بررسی SPI های کوچک تر از صفر و تداوم دوره های خشک طی ۳۰ سال دوره آماری در آینده مشخص شد که در ۱۷۶ ماه، SPI در مقیاس زمانی یک ماهه کوچک تر از صفر بوده است. دوره خشک ۲۰۴۴/۵ - ۲۰۴۷/۸ بیشترین تداوم را (۴۰ ماه) در این مقیاس زمانی داشته است. نتایج این بررسی نشان داد در بین دوره های خشک وقوع یافته در منطقه، دوره خشک ۲۰۴۱/۹ - ۲۰۴۹/۷ به مدت (۹۵ ماه) مربوط به SPI ۲۴

جدول ۸. تعداد، تداوم، شدت، زمان وقوع و خاتمه دوره های خشک با استفاده از مقیاس های زمانی SPI و سناریو RCP 2.6

خصوصیات	یک ماهه	سه ماهه	شش ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تعداد SPI > ۰	۱۷۶	۱۶۲	۱۶۱	۱۶۵	۱۵۸
طولانی ترین مدت خشکسالی	۴۰	۳۰	۸۱	۷۶	۹۵
تعداد خشکسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی ترین خشکسالی	۲۰۴۷/۸ - ۲۰۴۴/۵	۲۰۴۶/۸ - ۲۰۴۴/۸	۲۰۴۲/۱۱ - ۲۰۴۹/۷	۲۰۴۳/۵ - ۲۰۴۹/۸	۲۰۴۱/۹ - ۲۰۴۹/۷
شدیدترین خشکسالی و زمان وقوع آن	۲/۴ - (۲۰۲۷/۵)	۲/۳۷ - (۲۰۲۸/۵)	۲/۲۸ - (۲۰۲۷/۹)	۲/۲ - (۲۰۴۶/۸)	۲ - (۲۰۴۷/۸)
تعداد SPI < ۰	۱۸۴	۱۹۶	۱۹۴	۱۸۴	۱۷۹
طولانی ترین مدت ترسالی	۲۳	۲۲	۲۳	۲۸	۷۷
تعداد ترسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی ترین ترسالی	۲۰۳۲/۳ - ۲۰۳۴/۱	۲۰۲۰/۳ - ۲۰۲۱/۱۲	۲۰۲۷/۹ - ۲۰۲۹/۷	۲۰۲۵/۱۰ - ۲۰۲۸/۲	۲۰۲۵/۱۰ - ۲۰۳۲/۲
شدیدترین ترسالی و زمان وقوع آن	۲/۸۷ (۲۰۲۵/۴)	۲/۵۵ (۲۰۲۶/۱۲)	۲/۶۳ (۲۰۲۷/۳)	۲/۶ (۲۰۲۰/۱۲)	۲/۳۲ (۲۰۳۰/۱۱)

جدول ۹. تعداد، تداوم، شدت، زمان وقوع و خاتمه دوره های خشک با استفاده از مقیاس های زمانی SPI و سناریوی RCP 8.5

خصوصیات	یک ماهه	سه ماهه	شش ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تعداد SPI > ۰	۱۷۸	۱۶۵	۱۶۷	۱۷۲	۱۶۶
طولانی ترین مدت خشکسالی	۴۲	۳۳	۷۹	۷۷	۹۸
تعداد خشکسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی ترین خشکسالی	۲۰۴۵/۳ - ۲۰۴۸/۸	۲۰۴۵/۵ - ۲۰۴۷/۱۲	۲۰۴۳/۱ - ۲۰۴۹/۷	۲۰۴۳/۵ - ۲۰۴۹/۹	۲۰۴۱/۹ - ۲۰۴۹/۱۰
شدیدترین خشکسالی و زمان وقوع آن	۲/۴۷ - (۲۰۲۶/۵)	۲/۴۵ - (۲۰۳۰/۶)	۲/۴۹ - (۲۰۲۷/۱۰)	۲/۳۵ - (۲۰۴۵/۸)	۲/۲ - (۲۰۴۷/۹)
تعداد SPI < ۰	۱۸۲	۱۹۳	۱۸۸	۱۷۷	۱۷۱
طولانی ترین مدت ترسالی	۲۲	۲۰	۲۱	۲۵	۷۲
تعداد ترسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی ترین ترسالی	۲۰۳۲/۱۱ - ۲۰۳۰/۴	۲۰۲۲/۳ - ۲۰۲۳/۱۰	۲۰۲۷/۱۱ - ۲۰۲۹/۷	۲۰۲۷/۱ - ۲۰۲۹/۲	۲۰۲۴/۵ - ۲۰۳۱/۲
شدیدترین ترسالی و زمان وقوع آن	۲/۸۳ (۲۰۲۴/۴)	۲/۴۸ (۲۰۲۵/۱۲)	۲/۵۳ (۲۰۲۵/۱)	۲/۳۷ (۲۰۲۱/۱۱)	۲/۱۷ (۲۰۳۰/۳)

مناطق که دما و تبخیر و تعرق زیاد باشد، استفاده از شاخصی مناسب‌تر است که تأثیر پارامتر دما و تبخیر و تعرق نیز در آن لحاظ شده باشد. به این منظور، در ادامه از شاخص SPEI استفاده کردیم که از یک طرف کلیه مزایای شاخص SPI از جمله امکان محاسبه در مقیاس‌های زمانی متفاوت را دارد و از طرف دیگر تأثیر پارامتر دما به همراه برخی دیگر از متغیرها بر وقوع خشکسالی‌ها نیز در آن لحاظ شده است [۲۲ و ۳۸]. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که خشکسالی و ترسالی بر اساس سناریوی RCP 8.5 به ترتیب بیشتر و کمتر از خشکسالی و ترسالی بر اساس سناریوی RCP 2.6 است (جدول‌های ۱۰ و ۱۱). برخی مطالعات نیز نشان داده‌اند خشکسالی تحت سناریوی RCP 8.5 دوره بازگشت به مراتب کمتری نسبت به رویداد خشکسالی تحت سناریوی RCP 2.6 دارد [۳۵]. ارزیابی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI، نشان می‌دهد شدت و مدت خشکسالی‌ها بر اساس نتایج این شاخص به طور نسبی بیشتر از شرایط خشکسالی بر اساس نتایج شاخص SPI است و با توجه به روند افزایشی دما در زمان حال و همچنین افزایش نسبی دما در آینده، بهتر می‌تواند وضعیت خشکسالی منطقه را نمایش دهد. این نتایج با بسیاری از مطالعات، که شاخص SPEI را مفیدتر و کامل‌تر از سایر شاخص‌ها در ارزیابی خشکسالی معرفی کرده‌اند، مطابقت دارد [۱۴ و ۳۹-۴۲].

ارزیابی خشکسالی در آینده بر اساس شاخص SPEI همان طور که در آنالیز روند نشان داده شد، تغییرات بارندگی در ایستگاه‌های مطالعه شده به جز ایستگاه تمر معنادار نیستند و با کاهش و افزایش‌های ناچیزی همراه بوده‌اند، اما دما به طور درخور توجه و معناداری در بیشتر ایستگاه‌ها طی دوره افزایش یافته است. در دوره آتی نیز افزایش دما نسبت به افزایش بارندگی شدیدتر است. همچنین، پایش خشکسالی بر اساس شاخص SPI در زمان حال و آینده نشان داد به طور کلی در دوره پایه، ترسالی‌ها در نیمه نخست دوره و همین‌طور در اواسط دهه ۲۰۰۱-۲۰۱۰ و خشکسالی‌ها در اواخر دوره رخ داده‌اند و در دوره آتی نیز خشکسالی‌ها بیشتر در اواخر دوره اتفاق افتاده‌اند. از طرف دیگر، در ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI، فقط پارامتر بارندگی لحاظ شده است. با توجه به موارد یادشده، می‌توان انتظار داشت که وضعیت روند واقعی افزایش خشکسالی شدیدتر باشد و این امر را برای دوره آتی هم می‌توان تصور کرد. این نتیجه‌گیری با توجه به نتایج برخی مطالعات [۳۶ و ۳۷]، که کاهش رواناب را برای آینده پیش‌بینی کرده‌اند، قطعیت بیشتری می‌یابد، زیرا نتیجه نهایی افزایش یا کاهش خشکسالی‌ها، کاهش یا افزایش منابع آب به خصوص رواناب سطحی است. از طرف دیگر، یوسفی و همکارانش [۸] در مطالعه‌شان بیان داشتند در

جدول ۱۰. تعداد، تداوم، شدت، زمان وقوع و خاتمه دوره‌های خشک با استفاده از مقیاس‌های زمانی SPEI و سناریوی RCP 2.6

خصوصیات	یک‌ماهه	سه‌ماهه	شش‌ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تعداد SPEI >۰	۱۸۸	۱۸۳	۱۷۲	۱۷۴	۱۷۱
طولانی‌ترین مدت خشکسالی	۳۹	۳۵	۷۵	۷۹	۹۴
تعداد خشکسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین خشکسالی	۲۰۴۵/۵ - ۲۰۴۸/۷	۲۰۴۶/۵ - ۲۰۴۹/۴	۲۰۴۱/۵ - ۲۰۴۷/۷	۲۰۴۱/۱۲ - ۲۰۴۸/۶	۲۰۴۰/۱۲ - ۲۰۴۸/۹
شدیدترین خشکسالی و زمان وقوع آن	۲/۷۸ - (۲۰۲۶/۶)	۲/۶۷ - (۲۰۲۸/۷)	۲/۷۱ - (۲۰۲۷/۱۰)	۲/۶ - (۲۰۴۶/۹)	۲/۵۵ - (۲۰۴۷/۸)
تعداد SPEI <۰	۱۷۲	۱۷۵	۱۸۳	۱۷۵	۱۶۶
طولانی‌ترین مدت ترسالی	۱۷	۲۲	۲۶	۳۶	۷۲
تعداد ترسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین ترسالی	۲۰۳۲/۱ - ۲۰۳۴/۳	۲۰۲۳/۵ - ۲۰۲۵/۲	۲۰۲۷/۱ - ۲۰۲۹/۲	۲۰۲۷/۱ - ۲۰۳۰/۱	۲۰۲۶/۸ - ۲۰۳۲/۷
شدیدترین ترسالی و زمان وقوع آن	۲/۶۵ (۲۰۲۵/۴)	۲/۴۴ (۲۰۲۶/۱۲)	۲/۳۳ (۲۰۲۷/۳)	۲/۲ (۲۰۲۰/۱۲)	۲/۱۷ (۲۰۳۰/۱۱)

جدول ۱۱. تعداد، تداوم، شدت، زمان وقوع و خاتمه دوره‌های خشک با استفاده از مقیاس‌های زمانی SPEI و سناریوی RCP 8.5

خصوصیات	یک‌ماهه	سه‌ماهه	شش‌ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تعداد SPEI > ۰	۱۹۴	۱۹۰	۱۸۶	۱۷۸	۱۷۶
طولانی‌ترین مدت خشکسالی	۴۲	۳۷	۷۴	۸۴	۹۳
تعداد خشکسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین خشکسالی	۲۰۴۸/۶ - ۲۰۴۵/۱	۲۰۴۹/۱ - ۲۰۴۶/۲	۲۰۴۹/۸ - ۲۰۴۳/۷	۲۰۴۹/۴ - ۲۰۴۲/۵	۲۰۴۶/۱۲ - ۲۰۳۹/۴
شدیدترین خشکسالی و زمان وقوع آن	۲۰۲۵/۲ - ۲/۸۸	۲۰۲۸/۵ - ۲/۸۵	۲۰۲۷/۱۱ - ۲/۸۶	۲۰۴۶/۱۰ - ۲/۷۴	۲۰۴۷/۸ - ۲/۶
تعداد SPEI < ۰	۱۶۶	۱۶۸	۱۶۹	۱۷۱	۱۶۱
طولانی‌ترین مدت ترسالی	۱۶	۲۰	۱۹	۲۸	۶۶
تعداد ترسالی با بیشترین مدت	۱	۱	۱	۱	۱
زمان وقوع طولانی‌ترین ترسالی	۲۰۳۵/۶ - ۲۰۳۴/۳	۲۰۲۲/۸ - ۲۰۲۱/۱	۲۰۲۷/۱۱ - ۲۰۲۶/۵	۲۰۲۹/۱ - ۲۰۲۶/۹	۲۰۳۱/۲ - ۲۰۲۵/۹
شدیدترین ترسالی و زمان وقوع آن	۲۰۲۶/۶ - ۲/۶	۲۰۲۵/۱۰ - ۲/۵۳	۲۰۲۵/۲ - ۲/۲۴	۲۰۲۰/۱۰ - ۲/۱۴	۲۰۳۰/۷ - ۲/۱

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا سری‌های زمانی دما و بارندگی در ایستگاه‌های نزدیک به حوضه آبخیز تمر و بالادست سد گرگان آنالیز روند شدند تا از شرایط تغییرات پارامترهای مهم اقلیمی منطقه در زمان حال شناخت نسبی حاصل شود. در ادامه، ارزیابی خشکسالی در زمان حال با استفاده از شاخص SPI انجام گرفت. سپس، از مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل CanESM2 بر اساس دو سناریوی RCP 8.5 و RCP 2.6 برای پیش‌بینی داده‌های دما و بارندگی به منظور پایش خشکسالی در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ در این منطقه استفاده شد و در پایان، ارزیابی خشکسالی در آینده با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI انجام گرفت. نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

نتایج آنالیز روند بیان می‌کند که تغییرات بارندگی درخور توجه نیست، اما دما به‌خصوص کمترین دمای روند افزایش معناداری طی دوره پایه داشته است و بیان می‌کند که حوضه به سمت خشکی پیش می‌رود. ارزیابی مدل SDSM نشان داد این مدل در تولید داده‌های آتی بسیار توانمند است به‌طوری که مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده بر اساس شاخص‌های ارزیابی  $R^2$  و NSE، تشابه زیادی دارند. همچنین، ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای آتی با استفاده از مدل SDSM نشان داد به‌طور کلی دما و بارندگی در آینده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که این افزایش درباره دما و استفاده از سناریوی RCP 8.5 چشم‌گیرتر است. بر اساس نتایج شاخص SPI در بررسی شرایط خشکسالی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴، نشان داده شد که بیشترین

خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به‌ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دوره رخ داده‌اند و با افزایش مقیاس زمانی، از شدت خشکسالی و ترسالی‌ها کاسته و تداوم آنها افزایش می‌یابد. ارزیابی خشکسالی در دوره آینده با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI، بیان می‌کند که بر اساس شاخص SPEI، حوضه شرایط خشکسالی بیشتری را تجربه خواهد کرد. زیادبودن شدت و مدت خشکسالی بر اساس شاخص SPEI و خروجی‌های سناریوی RCP 8.5، نکته درخور توجه در ارزیابی خشکسالی در آینده است. با توجه به روند افزایش دما طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و همچنین افزایش شدید دما طی دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به دوره پایه از یک سو و در نظر گرفتن پارامترهای اقلیمی بیشتر در شاخص SPEI برای ارزیابی خشکسالی از سوی دیگر، نشان داده شد که خروجی‌های شاخص SPEI به واقعیت نزدیک‌تر است.

به‌طور کلی، به‌رغم افزایش معنادار دما، بارندگی در آینده نسبت به دوره پایه تفاوت ناچیزی خواهد داشت و مهم این است که مدیریت منطقه مطالعه‌شده باید بیشتر بر آثار زیست‌محیطی که انسان به‌طور مستقیم از طریق تغییر کاربری اراضی و دیگر موارد که بر اکوسیستم منطقه و منابع آب آن می‌تواند بگذارد، تمرکز داشته باشد تا با مدیریت صحیح بتواند از آثار منفی در این زمینه جلوگیری کند و یا حتی در جهت بهبود وضعیت حال در زمینه منابع آب اقداماتی را انجام دهد. همچنین، پیشنهاد می‌شود که در ادامه مطالعات در این زمینه، آثار تغییرات پارامترهای اقلیمی و نیز تأثیرات خشکسالی بر منابع آب حوضه در دوره‌های آینده بررسی شود.

## منابع

- [1]. Li B, Su H, Chen F, Wu J, Qi J. The changing characteristics of drought in China from 1982 to 2005. *Natural Hazards*, 2013; 68:723-743
- [2]. Soleimani K, Ramazani K, Ahmadi MZ, Bayat F. Investigation of droughts and wets trend in basins of Mazandaran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of the Caspian Sea*, 2005; 3 (1): 13-28. [Persian]
- [3]. Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho O. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1999; 80 (3): 429-438.
- [4]. Bazrafshan O, Mohseni Saravi M, Malekian A, Moeini A. A study on drought characteristics of Golestan Province using Standardized Precipitation Index (SPI). *Iranian Journal of Range and Desert Reseach*, 2011; 18 (3):395-407. [Persian]
- [5]. Moradi H, Rajabi M, Farajzadeh M. Trend analysis and spatial characteristics of droughts intensity in Fars province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 2007; 14 (1): 97-109. [Persian]
- [6]. Moafi Madani SF, Mousavi Bayegi M, Ansari H. Prediction of drought in Razavi Khorasan province during 2011-2030 using LARS-WG model. *Geography and Environmental Hazards*, 2012; 3:21-37. [Persian]
- [7]. Salehpour Jam A, Mohseni Saravi M, Bazrafshan J, Khalighi Sigaroodi SH. Investigation of climate change effect on drought characteristics by HadCM3 Model in future (Case Study: North-Western of Iran). *Iranian Journal of Natural Resources*, 2014; 67(4):537-548. [Persian]
- [8]. Yousefi H, Nohegar A, Khosravi Z, Aziz Abadi Farahani M. Management and zonation of drought using by SPI and RDI indices (Case study: Markazi province), *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2015; 2 (3): 337-344. [Persian]
- [9]. Jahangir MH, Khosh Mashraban M, Yousefi H. Prediction of drought condition using by SPI index and artificial neural network of Multilayer Perceptron (MLP) (Case study: Tehran and Alborz province), *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2015; 2 (4): 417-428. [Persian]
- [10]. Akbari M, Ownegh M, Asgari H, Sadoddin A, Khosari H. Drought monitoring based on the SPI and RDI indices under climate change scenarios (Case study: Semi-Arid areas of West Golestan Province). *Ecopersia*, 2016; 4 (4): 1585-1602. [Persian]
- [11]. Parvaneh B, Shiravand H, Dargahian F. Prediction of Drought in Lorestan province during 2011-2030 by downscaling 4 GCM models. *Quarterly Geographical Journal of Territory*, 2015; 12 (45):1-13. [Persian]
- [12]. Loukas A, Vasiliades L, Tzabiras J. Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*, 2008; 17:23-29
- [13]. Vrochidou AE, Tsanis I, Grillakis M, Koutroulis A. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*, 2012; 476:290-301
- [14]. Philip GO, Babatunde JA, Gunner L. Impacts of climate change on hydro-meteorological drought over the Volta Basin, West Africa. *Global and Planetary Change*, 2017; 155; 121-132.
- [15]. Muhire I, Ahmed F. Spatiotemporal trends in mean temperatures and aridity index over Rwanda. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016; 123(1-2), 399-414
- [16]. Plattner GK, Stocker TF. From AR4 to AR5: New Scenarios in the IPCC Process. Workshop Report, 2010.
- [17]. Arora VK, Scinocca JF, Boer GJ, Christian JR, Denman KL, Flato GM, et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 2011; 38 (5): 1-6.
- [18]. Massah Bavani A, Morid S. Climate change effects on Zayandehrud river flow in Isfahan. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 2005; 9 (4) :17-27. [Persian]
- [19]. Noghankar H. Evaluation of global warming impact on agricultur droughts characteristics in Iran during 21 century (Case Study: some climatic simples). MSc Thesis, agriculture College, Tehran University, 2011; [Persian]
- [20]. Wilby RL, and Dawson WC. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, SDSM manual version 4.2, Environment Agency of England and Wales, 2007; 94pp
- [21]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relation of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, 1993; 179-184

- [22]. Vicente-Serrano SM, Begueria S, Lopez-Moreno JJ. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010; 23 (7):1696–1718
- [23]. Zhang Q, Kong D, Singh VP, Shi P. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 2017; 152: 1-11.
- [24]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO: Roma, 1998; Italia.
- [25]. Abramowitz M, Stegun IA. *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications, 1965; New York.
- [26]. Khaliq MN, Ouarda TBMJ, Gachon P, Sushama L, St-Hilaire A. Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 2009; 368: 117-130.
- [27]. Durbin J, Watson GS. Testing for serial correlation in least squares regression. III. *Biometrika*, 1971; 58: 1-19.
- [28]. Yue S, Wang CY. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 2002; 38 (6): 1068.
- [29]. Mann HB. Non-parametric tests against trend, *Econometric*, 1945; 13:245–259
- [30]. Kendall MG. *Rank Correlation Measures*. London: Charles Griffin. 1975.
- [31]. Yang Y, Chen Y, Li W, Wang M, Sun G. Impact of Climate Change on River Runoff in Northern Xinjiang of China over Last Fifty Years. *Chinese Geographical Science* 2010; 20 (3):193-201
- [32]. Sabziparvar A, Mirmasoudi SSh, Nazemosadat MJ. Investigation of evapotranspiration long term changes in few country warm climatic instances, *Natural Geography Researches*, 2011; 75: 1-17. [Persian]
- [33]. Ibrahimi H. Investigation of climate change effect on water consumptions of agriculture in Mashhad Plain. PhD thesis, Islamic Azad University, sciences and researches unit. 2005. [Persian]
- [34]. Yang T, Li H, Wang W, Xu CY, Yu Z. Statistical downscaling of extreme daily precipitation, evaporation, and temperature and construction of future scenarios. *Hydrological Processes*, 2012; 26 (23): 3510-3523.
- [35]. Aziz Abadi Farahani M, Bakhtiari B, Ghaderi K, Rezapour M. The survey of climate change impact on drought severity-duration-frequency curves using Copulas. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2016; 47 (4), 743-754. [Persian]
- [36]. Modaresi F, Araghinejad SH, Ebrahimi K, Kholghi M. Assessment of Climate Change Effects on the Annual Water Yield of Rivers: A Case Study of Gorganroud River, Iran. *Journal of Water and Soil*, 2011; 25 (6):1365-1377. [Persian]
- [37]. Karami M. Investigation of climate change effect on streamflow (Case Study: Gorganroud Basin). MSc Thesis, Natural Resources College, Malayer University, 2014; [Persian]
- [38]. Liu ZH, Wang Y, Shao M, Jia X, Li X. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2016; 534:281-299.
- [39]. Nosrati K. Evaluation of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for drought identification in different climates of Iran. *Journal of Environmental Sciences*, 2014; 12 (4). 63-74. [Persian]
- [40]. Zare-Abyaneh H, Ghabaei Sough M, Mosaedi A. Drought monitoring based on standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) under the effect of climate change. *Journal of Water and Soil*, 2015; 29 (2), 374-392. [Persian]
- [41]. Bazrafshan O, Mahmudzadeh F, Bazrafshan J. Evaluation of temporal trends of the SPI and SPEI drought indices in the Southern Coast of Iran. *Desert Management*, 2016; 4 (8), 54-69. [Persian]
- [42]. Zeynali B, Safarian Zengir V. Drought monitoring in Urmia Lake by fuzzy index. *Journal of Natural Environmental Hazard*, 2017; 6 (12), 37-62. [Persian]