



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مؤسسه تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی تحت تغییر اقلیم در آبخیز سد میناب

فاطمه پورحقوق‌وردی<sup>۱</sup>، ام‌البنین بذرافشان<sup>۲\*</sup>، حمید غلامی<sup>۳</sup>، مرضیه شکاری<sup>۴</sup>، حسین زمانی<sup>۵</sup>

۱ - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲ - استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳ - استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴ و ۵ - استادیار، گروه آمار و ریاضی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

پدیده تغییرات آب و هوا سبب تداوم تغییر الگوی آب و هوا در آینده است. هیئت تغییر اقلیم میان دولت‌ها با همکاری مراکز پژوهشی گوناگون در سراسر جهان از سال ۲۰۱۶، گردآوری گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم (CMIP6) را آغاز کرده است. به دلیل کم دقت بودن خروجی مدل‌های GCM، از آنها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مقیاس محلی استفاده نمی‌شود. از این رو، لازم است برای بررسی‌های منطقه‌ای، از مدل‌ها یا روش‌های مناسبی برای ریزمقیاس کردن خروجی این مدل‌ها استفاده شود. از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم، تأثیر روی بارش و رواناب آبخیز است که می‌تواند بر خشک‌سالی/ترسالی هواشناسی و آب‌شناختی تأثیرگذار باشد. یکی از مدل‌های معروف بارش-رواناب که نیاز به داده ورودی زیادی ندارد، IHACRES است. در دهه گذشته کاربرد آن به وسیله پژوهشگران استقبال شده است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی آبخیز سد میناب انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های اقلیمی و آب‌شناختی منطقه شامل بارش روزانه، میانگین روزانه دما و میانگین روزانه آب‌دهی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی روزانه آب‌دهی آبخیز میناب در دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. افزون بر این، از مدل در حال نگارش کانادایی گزارش ششم و سه سناریوی تغییر اقلیم

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

استناد: پورحقوق‌وردی، ف، بذرافشان، ا، غلامی، ح، شکاری، م. زمانی، ح. ۱۴۰۳. پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی تحت تغییر اقلیم در آبخیز سد میناب. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۳): ۹۳-۷۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.364078.1554

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱  
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۴، پاییز ۱۴۰۳، صفحه‌های ۷۶ تا ۹۳.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



SSP-3-7.5، SSP-1-2.5 و SSP-5-8.5 نیز استفاده شد. همچنین، از مدل IHACRES برای پیش‌بینی جریان رود در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۴۰، و از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما استفاده شد. برای مطالعه خشک‌سالی از شاخص بارش/رواناب استاندارد شده (SPI/SRI) بهره‌گرفته شد. برای تحلیل روند خشک‌سالی و مشخصه‌های آن در دوره پایه و آینده از آزمون ناپارامتری من‌کندال استفاده شد.

### نتایج و بحث

با استفاده از داده‌های مزبور، رواناب به‌وسیله مدل IHACRES واسنجی شد. پس از عملکرد مناسب مدل در مرحله واسنجی، مدل صحت‌سنجی شد و با استفاده از سه سناریوی گزارش ششم رواناب برای یک دوره در آینده پیش‌بینی شد. سپس، برای دوره‌های تاریخی و آینده اندازه‌های SPI، SRI و مشخصه‌های خشک‌سالی (شدت، مدت، بزرگی و اوج) برآورد شدند و روند تغییرات آنها در مقایسه با دوره آینده مقایسه شد. نتایج نشان داد روند تغییرات بارش در هر سه سناریو در فصل پاییز و زمستان کاهش یافت. همچنین، با استفاده از سه سناریو مشخص شد که بیشترین تغییرات در دوره مشاهده‌ای مربوط به ماه نوامبر بود. اما، این تغییرات در فصل تابستان افزایش یافت. هر سه سناریو در مقایسه با دوره پایه، افزایش تغییرات دما (تا ۴۰٪) به‌ویژه از ماه‌های آگوست تا دسامبر را پیش‌بینی کردند. همچنین، روند جریان رود، به‌دنبال کاهش بارش، کاهش یافت. کاهش تغییرات بیشتر مربوط به فصل‌های پاییز و زمستان (تا ۴۹٪) بود. اما روند این تغییرات در فصل تابستان در مقایسه با دوره پایه افزایش یافت. در کل دوره، شیب روند تغییرات بارش و آب‌دهی افزایش یافت. نتایج بررسی اثر اقلیم و خشک‌سالی هواشناسی در منطقه مطالعه‌شده نشان داد که روند اندازه‌های خشک‌سالی آب‌شناختی و هواشناسی در گذشته افزایشی بوده است، اما در بیشتر سناریوهای آینده روند خشک‌سالی کاهشی بود و به‌طور کلی از نظر آماری نیز معنی‌دار نبود. این وضعیت در مشخصه‌های خشک‌سالی نیز کاملاً مشاهده شد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بررسی تغییرات منطقه‌ای خشک‌سالی ناشی از تغییرات جهانی اقلیم همراه با ترکیب‌های گوناگونی از سناریوها می‌تواند برای هشدار زودهنگام خشک‌سالی و همچنین برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مفید باشد. هم‌اکنون وضعیت شرایط مدیریت و پیش‌آگاهی خشک‌سالی در بسیاری از نقاط ایران به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک مطلوب نیست. از این‌رو، ضروری است که امکان آمادگی لازم برای مقابله با آن فراهم شود. بنابراین، در خشک‌سالی‌های شدید، کاربرد مدل‌های تغییر اقلیم برای پیش‌گویی شرایط آینده در ارزیابی قابلیت تأمین آب و نیازمندی به منابع آب کمکی می‌تواند بسیار مفید باشد.

**واژگان کلیدی:** آبخیز میناب، شاخص بارش/رواناب استاندارد شده، گزارش ششم اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، مدل بارش - رواناب

### مقدمه

اجتناب‌ناپذیر است (آبرز و دادمن ۲۰۱۰: موناها و تنوآلد ۲۰۱۸). هیئت تغییر اقلیم میان دولت‌ها (IPCC)<sup>۱</sup> در ششمین گزارش ارزیابی خود (AR۶) افزایش میانگین جهانی دما را  $1.09^{\circ}\text{C}$  برای سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ در مقایسه با آغاز انقلاب صنعتی (۱۹۰۰-۱۸۵۰) برآورد کرد (آی‌پی‌سی‌سی ۲۰۲۱). برآورد می‌شود که گرمایش جهانی به‌وسیله عامل‌های انسانی، پیامدهای بلندمدتی (مانند تغییرات در توزیع روزانه بارش) بر تمام اجزای سامانه اقلیمی داشته باشد. خروجی مدل‌های گزارش ششم بر پایه سناریوهای جدید که غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP)<sup>۲</sup> را ارائه می‌دهند،

پدیده تغییرات آب و هوا سبب تداوم تغییر الگوی آب و هوا در آینده است. (آذری و همکاران ۲۰۱۶). تغییر اقلیم در مؤلفه‌های وضعیت آب و هوای سطح زمین، تغییرات زیادی ایجاد کرده است. از مهم‌ترین آثار مشاهده‌شده تغییر اقلیم می‌توان به تغییر در متغیرهای بارش و دمای کره زمین اشاره کرد. افزون بر این، تغییر اقلیم بر حجم جریان‌ات سطحی، اندازه تبخیر و تعرق، و سرانجام بر چرخه کلی بیلان آب نیز اثرگذار است. از این‌رو، دامنه تأثیر تغییر اقلیم بر کل ساختار منابع آب به‌اندازه‌ای گسترده است که مطالعه، پیش‌بینی و به‌کارگیری سیاست‌های درست برای رویارویی با آن یک ضرورت

1 - Intergovernmental Panel on Climate Change

2 - Representative Concentration Pathway

مدل 2-0ESM-MRI گزارش ششم (CMIP6) و سناریوهای انتشار متوسط و بدبینانه، استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که روند میانگین ماهانه کل بارش تحت هر دو سناریو در دوره آینده در مقایسه با دوره مشاهده‌ای افزایشی بود. آذرزین و رودباری (۲۰۲۱) تأثیر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران را با به‌کارگیری مدل همادی CMIP6 بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین افزایش تعداد روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به‌ترتیب در دریای خزر، دریاچه ارومیه و قره‌قوم مشاهده شد. همچنین، در میانگین پهنه‌ای کشور کمترین و بیشترین افزایش این شاخص به‌ترتیب ۲/۹۷٪/۱۸/۲۲٪ بود. رحیمی و مودت (۲۰۲۰) در پیش‌بینی رواناب ناشی از مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم از مدل IHACRES استفاده کردند. در این پژوهش اندازه‌های ماهانه بارش، دما و آب‌دهی سد جامیشان در دوره زمانی (۱۹۸۸-۲۰۱۷) در مقایسه با دوره پایه در نظر گرفته شده است. نتایج بارش شبیه‌سازی شده نشان داد که میانگین بلندمدت ماهانه تحت سناریو RCP8.5 در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه ۵/۸٪ کاهش یافت. دولابیان و همکاران (۲۰۲۱) اثر تغییر اقلیم بر سنجه‌های بارش و دما را در ایران با استفاده از مدل‌های GCM تحت سناریوهای RCP بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دما و اندازه‌های بارش در بیشتر مناطق کشور به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته است. میردشتوان و همکاران (۲۰۱۷) برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دوره‌های آتی (۲۰۷۰-۲۰۴۱)، خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 را با استفاده از روش SDSM کوچک مقیاس کردند و سپس جریان سطحی در مقیاس محلی را با استفاده از مدل آب‌شناختی IHARES شبیه‌سازی کردند. نتایج کوچک مقیاس سازی نشان داد بارندگی در دوره آتی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) تحت سناریوی A2 و B2 به‌ترتیب ۰/۱ میلی‌متر در روز کاهش و ۰/۰۳ میلی‌متر در روز افزایش داشت. بذرافشان و همکاران (۲۰۲۳) خطر خشک‌سالی تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران تحلیل کردند. نتایج این تحلیل نشان داد، خطر خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت در ایران در آینده افزایش می‌یابد. عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) اثر تغییر اقلیم بر بارش، رواناب و تبخیر-تعرق واقعی آبخیز میناب را با استفاده از گزارش ششم و مدل SWAT بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد، جریان رود فقط تحت تأثیر

همان خط روند بخش‌های اقتصادی-اجتماعی (SSPs) است. هیئت تغییر اقلیم میان دولت‌ها با همکاری مراکز پژوهشی گوناگون در سراسر جهان از سال ۲۰۱۶، گردآوری گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم را آغاز کرده است. نتیجه این همکاری منجر به فراهم‌سازی زمینه تولید مدل‌های جدید برای پیش‌بینی اقلیم آینده جهان بود که تکمیل آن‌ها تا سال ۲۰۲۲ ادامه یافت (تبادل و همکاران ۲۰۲۱). با این حال، تاکنون نیز خروجی برخی از مدل‌های مزبور به‌تدریج از پایگاه اطلاعاتی IPCC در اختیار همگان بوده است. به‌دلیل کم‌بودن وضوح مکانی خروجی مدل‌های GCM، استفاده از آنها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مقیاس محلی مناسب نیست و لازم است با استفاده از مدل یا روش‌های مناسب خروجی مدل‌های مزبور برای پژوهش‌های منطقه‌ای ریزمقیاس شوند. با توجه به آثار زیان‌بار پدیده تغییر اقلیم در دوره‌های آتی و لزوم بهره‌برداری بهینه از نظام‌های منابع آب از یک سو و پیش‌بینی وضعیت آینده آن برای استفاده نسل‌های آینده از سوی دیگر، باعث شده است که در سال‌های گذشته استفاده از روش‌های پیش‌بینی منابع آب، تأیید شود (اعلمی و همکاران ۲۰۱۳). در شرایطی که نیاز باشد فقط جریان رود در خروجی آبخیز شبیه‌سازی شود، از مدل‌های مفهومی بارش-رواناب (مانند مدل IHACRES) در مقایسه با دیگر مدل‌ها بیشتر استفاده می‌شود. زیرا، این مدل‌ها هم پاسخ مناسب ارائه می‌دهند و هم به عملیات محاسبه‌ای و داده‌های ورودی نیاز کمتری دارند (کوپر و همکاران ۲۰۰۷). از مهم‌ترین بخش‌های تحت تأثیر اقلیم، بخش منابع آب به‌ویژه تغییرات رواناب رود است که پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است. نتایج پژوهش باب‌الحکمی و همکاران (۲۰۱۹) بر آبخیز نکا نشان داد که در دوره‌های آتی میانگین سالانه رود تحت سناریو 4.5، 8.5 و RCP2.6 از ۱۵ تا ۴۳٪ کاهش یافت. آقابگی و همکاران (۲۰۱۹) نیز آثار تغییر اقلیم بر رواناب را با استفاده از مدل آب‌شناختی IHACRES در برخی از آبخیزهای اردبیل بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تعداد رخدادهای آب‌دهی اوج افزایش یافت ولی میانگین آب‌دهی کاهش یافت. از سوی دیگر، رهنما و همکاران (۲۰۲۲) دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ایستگاه بندرعباس را به‌شکل بلندمدت پیش‌نگری کردند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی سنجه‌های هواشناسی ایستگاه مزبور در دوره زمانی آینده (۲۰۹۰-۲۰۶۱) از

جیرفت، کرمان و شهرستان میناب استان هرمزگان است. از کل مساحت این آبخیز ۴۰٪ در استان هرمزگان و ۶۰٪ در استان کرمان است. آبخیز رود میناب در ناحیه شرقی ایران و شمال شرقی شهرستان میناب است و مختصات جغرافیایی آن طول  $56^{\circ}48'$  تا  $57^{\circ}59'$  شرقی و  $27^{\circ}$  تا  $28^{\circ}32'$  عرض شمالی است. این آبخیز از لحاظ منابع آب و کشاورزی یکی از آبخیزهای پرآب به‌شمار می‌آید و آب آن قابلیت خوبی برای شرب دارد. رود میناب دائمی است و وضعیت آن بارانی و سیلابی است. اقلیم آن گرم و فراخشک است و میانگین بارش آن نیز  $192/5$  میلی‌متر است. مشخصه‌های آماری بارش و جریان رود میناب در جدول ۱ نشان داده شده است. میانگین سالانه آب‌دهی  $30/82$  مترمکعب بر ثانیه است که بیشترین و کمترین اندازه آب‌دهی به ترتیب  $423/26$  (آذرماه) و یک مترمکعب بر ثانیه (مردادماه) است (عباس‌زاده و همکاران ۲۰۲۳).

تغییر اقلیم افزایش یافت، اما تحت تأثیر تغییرات کاربری و تغییرات اقلیم در هر سه سناریو به شکل میانگین ۴۵٪ کاهش یافت.

بر اساس دسترسی به نتایج مدل‌های گزارش ششم IPCC و تحول به وجود آمده در توسعه این مدل‌ها در مقایسه با گزارش‌های پیشین IPCC، در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و رواناب ایستگاه آب‌سنجی برنطین آبخیز سد استقلال میناب بر اساس مدل کانادایی گزارش ششم IPCC بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

منطقه پژوهش، آبخیز رود میناب در استان هرمزگان با مساحت  $1051900$  هکتار از مهمترین‌های آبخیزهای سواحل دریای عمان و خلیج فارس است. این آبخیز شامل مناطق گسترده‌ای از استان کرمان، شامل شهرستان‌های

جدول ۱- مشخصات متغیرهای آب‌شناختی در منطقه مطالعه شده.

Table 1- Hydrological characteristics in the study area.

Variables	Mean	Standard deviation	Median	Minimum	Maximum	Skewness	Kurt
Runoff	30.82	61.44	11.84	1	423.26	4.37	21.39
precipitation	16.77	36.19	0.01	0	197.92	2.98	9.35
Temperature	27.50	6.10	27.85	15.75	36.50	-0.21	-1.40

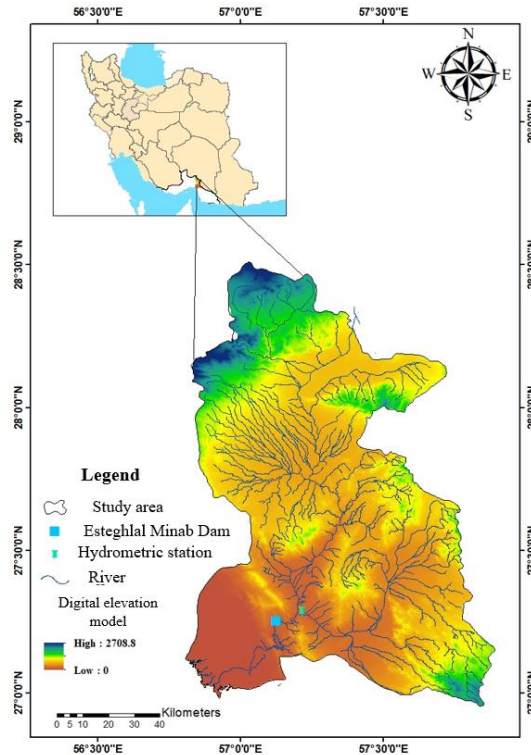
برای پرکردن فاصله میان این دو مقیاس و نیز استفاده از خروجی مدل‌های بزرگ مقیاس نیاز به ریز مقیاس‌سازی است. یکی از مدل‌های کاربردی در زمینه ریزمقیاس‌نمایی، مدل مولد داده LARS-WG است. ابتدا این مدل به وسیله راسکو و همکاران (۱۹۹۱) ارائه شد و سپس به وسیله سمونوف و همکاران (۱۹۹۸) بازنگری شد. مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی شرایط آب و هوا به اندازه‌های روزانه بارندگی، کمینه دما، بیشینه دما و تابش خورشید نیاز دارد. پیش از تولید داده به وسیله مدل مزبور یک گروه داده اقلیمی بدون به‌کارگیری سناریویی، تولید می‌کند. در شرایطی که تفاوت میان اندازه‌های میانگین و پراگندگی داده‌های تولیدشده و مشاهده‌ای، معنی‌دار نباشد می‌توان از داده‌های این مدل برای تولید داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای گوناگون استفاده کرد. از دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ برای واسنجی، و از دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ برای صحت‌سنجی و از دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ برای پیش‌بینی دوره آینده استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی از شاخص‌های پرشماری استفاده می‌شود. در این پژوهش از شاخص‌های  $R^2$ ،  $NSE$  و  $RMSE$  استفاده شد.

### داده‌های استفاده شده برای اجرای مدل

در این پژوهش از داده‌های اقلیمی و آب‌شناختی منطقه شامل بارش روزانه، میانگین روزانه دما و میانگین روزانه آب‌دهی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی روزانه آب‌دهی آبخیز میناب استفاده شد. از این‌رو، از داده‌های بارندگی روزانه، دما و جریان رود ایستگاه آب‌سنجی برنطین در یک دوره آماری (۲۰۱۸-۱۹۸۹) بهره‌گرفته شد. در این پژوهش برای بررسی تغییر اقلیم منطقه مزبور در مقیاس جهانی از گزارش ششم مدل‌های گردش کلی اقیانوس استفاده شد. در این بخش داده‌های اقلیمی لازم برای اجرای مدل CanESM5 گزارش ششم از پایگاه (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>) به دست آمد. از این داده‌ها برای هر سه سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، میانگین (SSP3-7.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای دوره آینده (۲۰۴۵-۲۰۲۳) استفاده شد.

### ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از LARS-WG

بر اساس کوچک بودن مقیاس داده‌های مشاهده‌ای و بزرگ بودن مقیاس داده‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم و



شکل ۱- موقعیت منطقه و ایستگاه مطالعه‌شده (آبخیز میناب).

Figure 1- The location of the study area and station (Minab Watershed).

سنجه‌های مدل در مدل‌های غیرخطی با سعی و خطا و با بررسی معیارهایی مانند اندازه‌های خطا و ضریب‌های همبستگی تعیین می‌شود. در مرحله صحت‌سنجی، با استفاده از سنجه‌های تعیین‌شده در مرحله واسنجی، جریان شبیه‌سازی می‌شود. سپس، در بازه زمانی خارج از محدوده زمانی دوره واسنجی، عملکرد مدل ارزیابی می‌شود. برای آگاهی بیشتر از اجرای مدل به مقاله کروک و همکاران (۲۰۰۵) مراجعه شود.

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی مدل از ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشه مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد (پاتیل و استیگلیتز ۲۰۱۵).

#### شاخص بارش/رواناب استاندارد شده (SPI/SRI) و مشخصه‌های خشک‌سالی

یکی از شاخص‌های بنیادی در مطالعه خشک‌سالی، شاخص بارش استاندارد شده است که اولین بار به وسیله مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) توسعه داده شد. شاخص SRI نیز به وسیله شوکلا و وود (۲۰۰۸) براساس روش‌شناسی SPI ارائه شد. مبنای هر دو براساس برازش تابع توزیع احتمال بر اندازه‌های متغیر بارش/دما، محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل تابع توزیع تجمعی به تابع

#### مدل بارش و رواناب IHACRES

مدل IHACRES یک مدل مفهومی بارش - رواناب است که نسخه اولیه آن به وسیله جکمن و همکاران (۱۹۹۰) توسعه یافت (کارکانو ۲۰۰۸). سپس، این مدل به شکل مشترک به وسیله دانشگاه ملی استرالیا و مرکز بوم‌شناختی و آب‌شناسی انگلستان توسعه یافت (زارعی و همکاران ۲۰۰۹). مدل IHACRES شش سنجه دارد و سه سنجه آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی  $f$ ،  $t_w$ ،  $C$  است که به ترتیب ظرفیت ذخیره رطوبت آبخیز، مدت زمانی که طول می‌کشد تا آبخیز خشک شود و ویژگی تعدیل حرارت آبخیز هستند. سه سنجه دیگر مربوط به بخش تابع تبدیل خطی  $\tau_q$  و  $\tau_s$  است که به ترتیب مدت زمانی که سپری می‌شود تا جریان سریع کاهش یابد و  $V_s$  حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رود مشارکت دارد، هستند.

واسنجی مدل شامل دو گام اصلی است. تعیین دوره واسنجی که بخشی از کل دوره آماری موجود است، با روش سعی و خطا بر اساس اندازه کمترین خطا، به عنوان بهترین دوره واسنجی انتخاب می‌شود. برای ساخت مدل (مدل‌های خطی و غیرخطی) در ابتدا اندازه تأخیر زمانی میان بارندگی و پاسخ رواناب تعیین می‌شود و سپس تابع متغیر انتخاب می‌شود. اندازه‌های بهینه

از نسبت شدت به مدت خشک‌سالی به دست می‌آید و با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$DM = \frac{DS}{DD} \quad (2)$$

DM: بزرگی خشک‌سالی و DD زمان تداوم خشک‌سالی است.

اوج خشک‌سالی کمترین اندازه SPI/SRI در تداوم زمانی خشک‌سالی و با استفاده از رابطه ۳ تعیین شد.

$$DP = \min [SPI_{i,j}] \quad (3)$$

DP: اوج خشک‌سالی و SPI<sub>i,j</sub>: اندازه رویداد در ماه و سال است.

طبقه‌بندی شرایط آب و هوایی برای اندازه‌های گوناگون SPI در جدول ۲ آورده شده است. سرانجام برای تحلیل روند خشک‌سالی، از روش من-کندال (من ۱۹۴۵ و کندال ۱۹۷۸) استفاده شد. برای آگاهی بیشتر از این روش، به مقاله سیزی پرور و شادمان (۲۰۱۳) مراجعه شود.

بهنجار استاندارد شده است. اندازه‌های مثبت SPI/SRI نشان‌دهنده بارندگی (رواناب) بیشتر از میانگین بارش و اندازه‌های منفی آن معنای عکس دارد. بر پایه این روش، خشک‌سالی هنگامی رخ می‌دهد که SPI/SRI به شکل پیوسته منفی باشد و به کمتر از صفر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI/SRI مثبت شود.

مشخصه‌های شدت، مدت، بزرگی و اوج خشک‌سالی از SPI/SRI به دست آمد. شدت هر دوره خشک‌سالی در ماه رویداد با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. شدت خشک‌سالی یعنی مجموع SPI/SRI در زمان رخداد خشک‌سالی است.

$$DS = \sum_{t=1}^{dl} |x_0 - x_t| \quad (1)$$

DS: شدت خشک‌سالی، x<sub>0</sub>: نقطه آستانه خشک‌سالی و x<sub>t</sub>: ماه رویداد است.

مدت یا زمان تداوم خشک‌سالی نیز دوره کسری بارندگی در زمان معین، یا تعداد ماه‌هایی که یک رویداد خشک‌سالی طول می‌کشد، است. بزرگی خشک‌سالی رویدادی است که

## جدول ۲- دسته‌بندی SPI/SRI برای شرایط گوناگون آب و هوایی.

Table 2- SPI/SRI classification for different weather conditions.

Class	SPI/SRI
extreme wet	SPI (SRI) > 2
severe wet	1.5 < SPI (SRI) < 2
moderate wet	1 < SPI (SRI) < 1.5
mild wet	0.5 < SPI (SRI) < 1
normal	-0.5 < SPI (SRI) < 0.5
mild drought	0 < SPI (SRI) < -0.5
moderate drought	-1 < SPI (SRI) < -1.5
severe drought	-1.5 < SPI (SRI) < -2
extreme drought	SPI (SRI) < -2

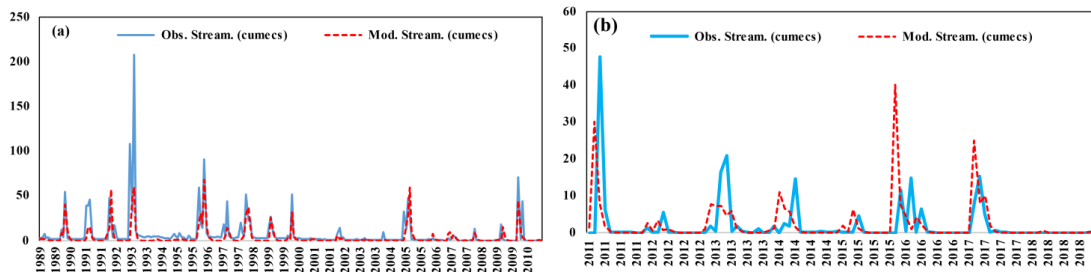
## نتایج و بحث

IHACRES واسنجی و سپس ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از سنج‌های محاسبه شده مدل برای ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعه شده در مرحله واسنجی با روش سعی و خطا در دوره‌های گوناگون در جدول ۳ نشان داده شده است. بر پایه نتایج جدول ۳ دوره واسنجی مزبور برای پیش‌بینی و برآورد اندازه رواناب بهترین عملکرد را داشت. همچنین، ضریب تبیین یک نیز نشان‌دهنده تطابق کامل است. اندازه‌های آب‌دهی محاسبه‌ای و آب‌دهی مشاهده‌ای در شکل ۲ آورده شده است. بر اساس شکل ۲ مشخص شد که مدل IHACRES توانایی زیادی در برآورد آب‌دهی‌های اوج را نداشت.

داده‌های لازم از مراکز مربوطه گردآوری شد و سپس دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ که برای دوره پایه بررسی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی آینده سنج‌های اقلیمی استفاده شده بود، برای دوره آماری مشترک انتخاب شد. پس از اطمینان از همگنی داده‌ها از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ برای دوره واسنجی و از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ برای دوره اعتبارسنجی انتخاب شد. پس از تعیین دوره واسنجی برای ارزیابی بردن خطاهای بارش و آب‌دهی باید دوره‌ای برای مدل‌سازی تعیین می‌شد که در این پژوهش به دلیل خشک بودن اقلیم، دوره زمانی ۵۰ ماه برای دوره مدل‌سازی انتخاب شد. به منظور شبیه‌سازی جریان در مقیاس روزانه، ابتدا مدل

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل IHACRES در طول دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۰.  
Table 3- The results of IHACRES model calibration during the period 1989-2010.

Index	NSE	RMSE	R <sup>2</sup>
Coefficient	0.81	0.52	0.83



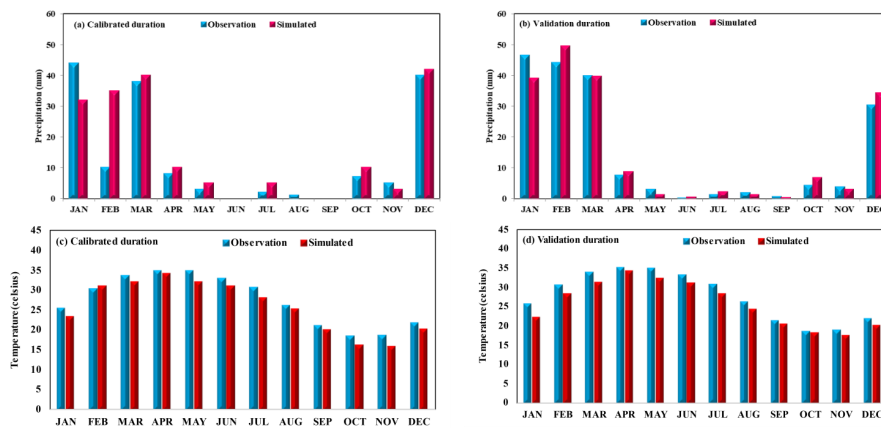
شکل ۲- آب‌دهی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب).

Figure 2- Observed and simulated discharge during calibration(a) and validation (b) period.

مشاهده‌ای وجود داشت. زیرا، اندازه خطا کم و ضریب‌های همبستگی زیاد بود. از این‌رو، مدل LARS-WG در کوچک مقیاس‌سازی داده‌های بارش به‌دست آمده از مدل IPCC6 توانایی قابل قبولی داشت. بنابراین، می‌توان از مدل مزبور برای تولید داده‌های اقلیمی در دوره آتی استفاده کرد.

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG در برآورد بارش و دما

نتایج واسنجی مدل برای برآورد بارش و دما در دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ و صحت‌سنجی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ ایستگاه برنطین در شکل ۳ نشان داده شده است. بر پایه این نتایج، انطباق زیادی میان اندازه‌های شبیه‌سازی شده و



شکل ۳- واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG برای داده بارش، الف و ب: واسنجی و صحت‌سنجی بارش، ث و د: واسنجی و صحت‌سنجی دما.

Figure 3- Calibration and validation of the LARS-WG model for precipitation data, a: calibration period and b: validation period, temperature c: calibration period and d: validation period.

برآورد کرد؛ به‌گونه‌ای که می‌توان انتظار داشت که دمای منطقه مطالعه‌شده در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در سناریوی SSP1-2.6، ۰/۲۵°C، و در سناریوی SSP-3-7.5 و SSP-5-8.5، ۰/۲۴°C، در مقایسه با دوره پایه افزایش یابد. همچنین، کاهش تغییرات بارش در آینده قابل توجه بود. احتمال کاهش بارش در سناریوی خوش‌بینانه ۵ میلی‌متر، در سناریوی میانگین ۱۳ میلی‌متر و در سناریوی بدبینانه

### ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم دما، بارش و رواناب در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

نتایج تغییرات ماهانه بارش، دما و رواناب در مقایسه با دوره پایه، در هر سه سناریو SSP-1-2.6، SSP-3-7.5 و SSP-5-8.5 در جدول ۴ ارائه شده است. تغییرات میانگین دما در هر سه سناریوی انتشار، اندازه‌های بیشتری را برای دوره آتی در مقایسه با دوره پایه

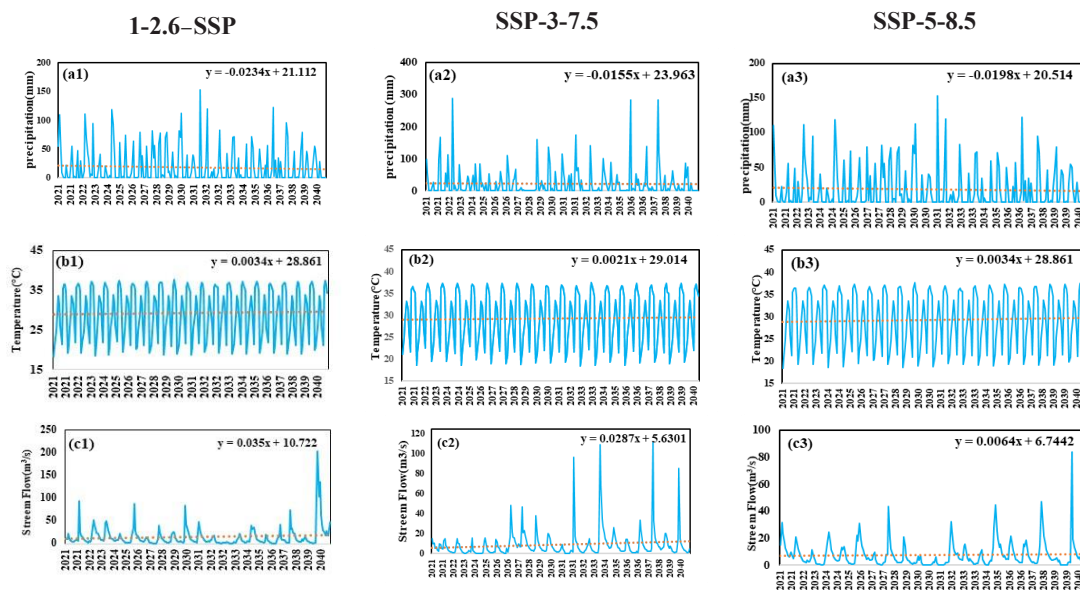
دما و تغییرات کاهش بارش و آب‌دهی رود در ماه‌های دسامبر تا مارس (دوره تر) بیشتر از ماه‌های خشک سال (آوریل تا نوامبر) بود. این نتایج با یافته‌های عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) در آبخیز میناب هم‌راستا است. افزایش دما و کاهش بارش در این دوره می‌تواند سبب کاهش بارش مؤثر، افزایش تبخیر و تعرق گیاهی و در نتیجه افزایش نیاز آبی گیاه شود و در نهایت منجر به افزایش نیاز آبیاری محصولات کشاورزی شود.

۲۵ میلی‌متر بود. بیشترین نرخ کاهش در فصل‌های پائیز و زمستان بود. نرخ تغییرات آب‌دهی رود نیز در بیشتر ماه‌ها کاهش بود. میانگین نرخ تغییرات در ماه‌های پائیز و زمستان ۰/۴۵ بود. نمودارهای روند تغییرات بارش، دما و رواناب بر اساس روابط وایزلی در دوره‌های آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. نکته قابل توجه تغییرات متغیرهای بررسی شده در فصل‌های تر سال در مقایسه با فصل‌های خشک بود. تغییرات افزایشی

جدول ۴- نرخ تغییرات ماهانه میانگین بارش، دما و رواناب برای هر کدام از سناریوهای تغییر اقلیم در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در مقایسه با دوره پایه.

Table 4- Average monthly changes in precipitation, temperature and runoff for each of the scenarios in the future period of 2021-2040 compared to the base period.

Variable	Scenarios	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Precipitation	SSP-1-2.6	-0.28	-0.04	-0.49	-1.93	-6.21	0.86	0.98	0.99	0.84	-0.61	-20.70	-6.98
	SSP-3-7.5	-0.52	-0.02	0.09	-2.29	-2.60	0.87	0.99	0.96	0.98	0.21	-133.37	-26.42
	SSP-5-8.5	-0.28	-0.04	-0.49	-1.93	-6.21	0.86	0.98	0.99	0.84	-0.61	-20.70	-6.98
Temperature	SSP-1-2.6	0.34	0.42	0.35	0.23	0.06	0.01	0.03	0.02	0.40	0.47	0.43	0.28
	SSP-3-7.5	0.25	0.36	0.29	0.17	0.01	0.04	0.02	0.07	0.43	0.50	0.45	0.32
	SSP-5-8.5	0.23	0.34	0.27	0.16	0.01	0.05	0.03	0.08	0.43	0.50	0.46	0.33
Streamflow	SSP-1-2.6	-0.34	-0.44	-0.34	-0.21	-0.04	-0.05	-0.17	-0.22	0.41	-0.50	-0.48	-0.37
	SSP-3-7.5	-0.35	-0.44	-0.36	-0.22	-0.05	-0.05	-0.15	-0.20	0.41	-0.50	-0.48	-0.37
	SSP-5-8.5	-0.23	-0.34	-0.27	-0.16	-0.01	0.05	0.03	0.08	0.43	-0.50	-0.46	-0.33



شکل ۴- روند تغییرات بارش، دما و رواناب در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریو SSP-1-2.6, SSP-3-7.5, SSP-5-8.5.  
Figure 4- Changes in precipitation, temperature and runoff in the upcoming period of 2021-2040 under the scenario SSP-1-2.6, SSP-3-7.5, SSP-5-8.5.

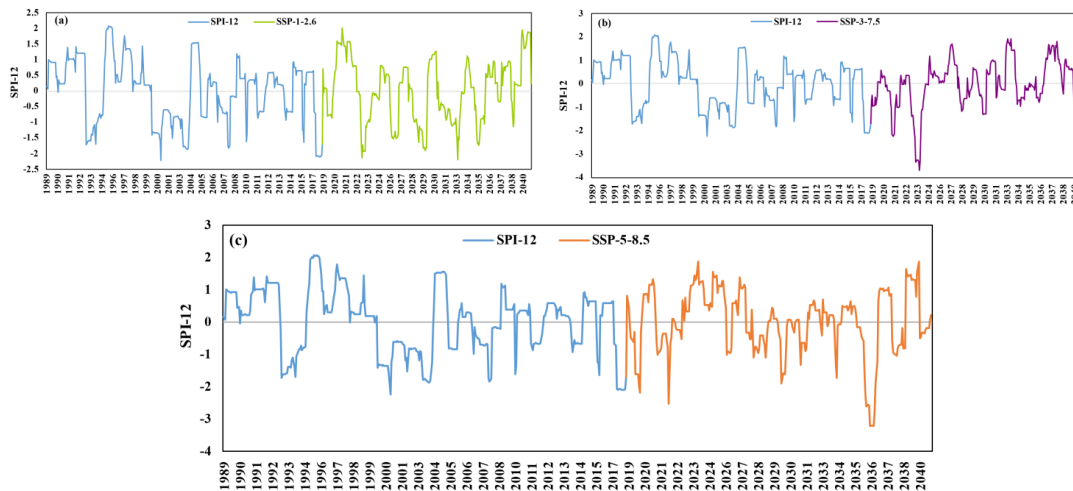
است. در دوره پایه ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ در منطقه مطالعه شده تناوب‌هایی از دوره خشک‌سالی و ترسالی مشاهده شد. همچنین، خشک‌سالی تاریخی در دو دوره (۱۹۹۵-۱۹۹۳) و (۲۰۰۴-۱۹۹۹) مشاهده شد. پس از آن در منطقه به شکل متناوب دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی یک‌ساله رخ داده است. افزون بر این، در دوره آینده (۲۰۱۹-۲۰۴۰) نیز سال‌های تاریخی خشک و تر به کرات مشاهده شد.

اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی هواشناسی از اندازه‌های بارش در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، شاخص خشک‌سالی هواشناسی برآورد شد. براساس نتایج پژوهش بهرامی و همکاران (۲۰۲۲)، بیشترین فراوانی خشک‌سالی در مقیاس ۱۲ ماهه در آبخیز میناب گزارش شده است. تغییرات اندازه SPI-12 در دوره پایه و آینده در سناریوی خوش‌بینانه در شکل ۵ الف نشان داده شده



تاریخی در ماه می (۲۰۲۳)، ۳/۹- مشاهده شد و پس از آن عموماً شدت تناوب‌های خشک‌سالی کمتر از ۱- بود و تناوب‌هایی از خشک‌سالی و ترسالی‌های کوتاه‌مدت مشاهده شد. در سناریوی بدبینانه SSP-5-8.5، در دوره آینده (۲۰۱۹، ۲۰۲۱، ۲۰۳۰، ۲۰۳۴ و ۲۰۳۶) خشک‌سالی‌های طبقه شدید و خیلی شدید (کمتر از ۱/۵-) مشاهده شد (شکل ۵).

مثلاً می‌توان گفت که اندازه شاخص خشک‌سالی در ماه می (۲۰۲۳)، ۱/۹۲-، در ماه اکتبر (۲۰۲۹)، ۱/۹۰- و در سال ۲۰۳۳، ۲/۲- است. در این سناریو نیز ترسالی‌های قابل توجهی در سال ۲۰۱۹، ۲۰۲۹ و ۲۰۳۹ رخ داد. تغییرات SPI-12 را در سناریوی میانگین SSP-3-7.5 در شکل ۵ ب، نشان داده شده است. در این سناریو، اندازه شاخص یک رخداد خشک‌سالی

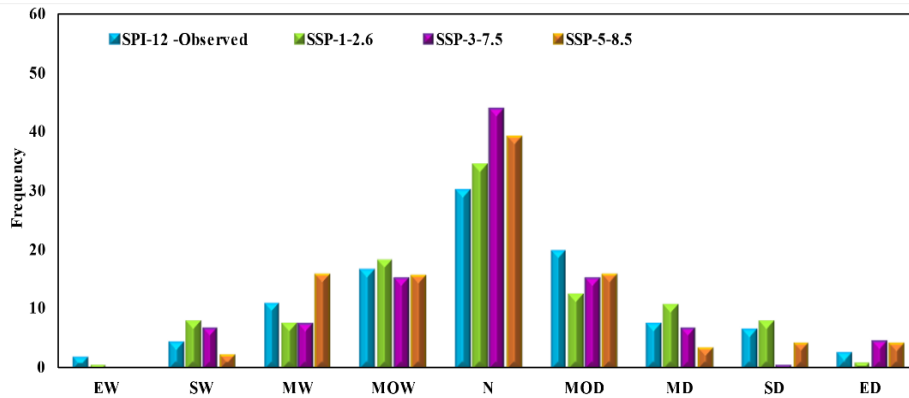


شکل ۵- تغییرات SPI-12 در دوره پایه و سناریوی SSP 1-2.6 (الف)، SSP 3-4.5 (ب) و SSP 5-8.5 (ج).

Figure 5-Temporal variation of SPI-12 during historical period and 2021-2040 using SSP 1-2.6 (a), (b) SSP 3-4.5 and (c) SSP 5-8.5 scenarios.

می‌توان انتظار داشت که به شکل میانگین به ۱۴/۵٪ کاهش یابد. پس از آن، دوره ترسالی میانگین بود که در دوره پایه ۱۷٪ و در آینده در تمام سناریوها به شکل میانگین ۱۵/۵٪ بود. افزون بر این در آینده درصد فراوانی ترسالی در مقایسه با گذشته در سناریوی SSP-1-2.6 افزایش (از ۳۳/۵٪ به ۳۵٪) داشت اما در دو سناریوی دیگر تغییر بسیار ناچیز بود. درصد خشک‌سالی‌ها به شکل میانگین نیز از ۳۶/۴٪ به ۲۸٪ در هر سه سناریو کاهش یافت. می‌توان گفت که اندازه درصد فراوانی خشک‌سالی از گذشته به آینده به ترتیب در سناریوی SSP-3-7.5، SSP-1-2.5 و SSP-5-8.5 به ۳۲٪، ۲۷٪ و ۲۸٪ کاهش یافت.

بر اساس جدول ۲ نمودار درصد فراوانی خشک‌سالی برای SPI-12 در دوره پایه و آینده بر اساس طبقه‌بندی (۹ دسته‌ای) لویدهیوز و ساندروز (۲۰۰۲) در شکل ۶، نشان داده شده است. در این راستا نتایج نشان داد که بیشترین درصد فراوانی خشک‌سالی‌های منطقه مطالعه شده در طبقه نرمال بود که در دوره پایه این اندازه ۳۰٪ بود و در دوره آینده در تمام سناریوها، روند شدت خشک‌سالی افزایشی بود. همچنین، طبقه خشک‌سالی نرمال در آینده به ۴۰٪ افزایش یافت و در سناریوی خوش‌بینانه این وضعیت بیشترین اندازه را داشت. پس از طبقه نرمال، بیشترین طبقه مربوط به خشک‌سالی ملایم (۲۰٪) بود که این طبقه نیز در آینده در تمام سناریوها روند کاهشی داشت و

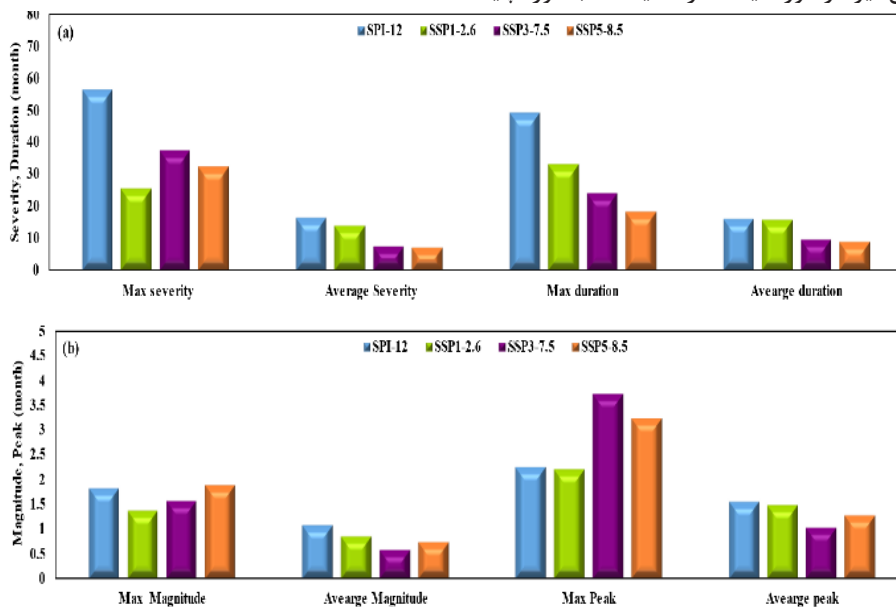


شکل ۶- درصد فراوانی خشک‌سالی هواشناسی در هر طبقه توصیفی خشک‌سالی/ترسالی (N: نرمال؛ EW: ترسالی خیلی شدید؛ SW: ترسالی شدید؛ MW: ترسالی متوسط؛ MOW: ترسالی ملایم؛ MOD: خشک‌سالی ملایم؛ MD: ترسالی متوسط؛ SD: خشک‌سالی شدید؛ ED: خشک‌سالی شدید) در دوره‌ی پایه و آینده.

Figure 6- Frequency of drought in each drought descriptive class category (N: normal; EW: very severe drought; SW: severe drought; MW: moderate drought; MOW: mild drought; MOD: moderate drought; MD: moderate drought; SD: severe drought; ED: severe drought) during historical and future periods.

در منطقه مطالعه‌شده کاهش یافت اما زمان تداوم خشک‌سالی افزایش یافت. هر چه شدت خشک‌سالی در دوره زمانی بیشتری به طول انجامد، از بزرگی یا سختی آن کاسته می‌شود (آشپته و همکاران ۲۰۲۳). در دوره آینده، سناریوی SSP-3-7.5 بیشترین شدت و تداوم را نشان داد و این رخدادی بود که در سال ۲۰۲۳ در این سناریو پیش‌بینی شد. در دوره آینده بزرگترین شدت به وسیله این سناریو برآورد شد. هر چه شدت خشک‌سالی در طول دوره‌ی زمانی بیشتری رخ دهد، از بزرگی یا سختی آن کاسته می‌شود (آشپته و همکاران ۲۰۲۳).

اندازه‌های بیشینه و میانگین شدت، مدت، بزرگی و اوج خشک‌سالی برای SPI-12 در دوره پایه و آینده برآورد شد و نتایج آن در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین شدت (بیش از ۷) و بیشترین مدت خشک‌سالی (۴۹ ماه بیش از ۴ سال متوالی) در دوره پایه رخ داده است (شکل ۷ الف). این در حالی است که در آینده در تمام سناریوها شدت و تداوم خشک‌سالی به شکل میانگین به ترتیب ۵۵ و ۴۶ ماه کاهش یافت. بیشترین تداوم و کمترین شدت خشک‌سالی در SSP-1-2.6 مشاهده شد. اندازه‌های میانگین شدت خشک‌سالی نیز در دوره آینده در مقایسه با دوره پایه



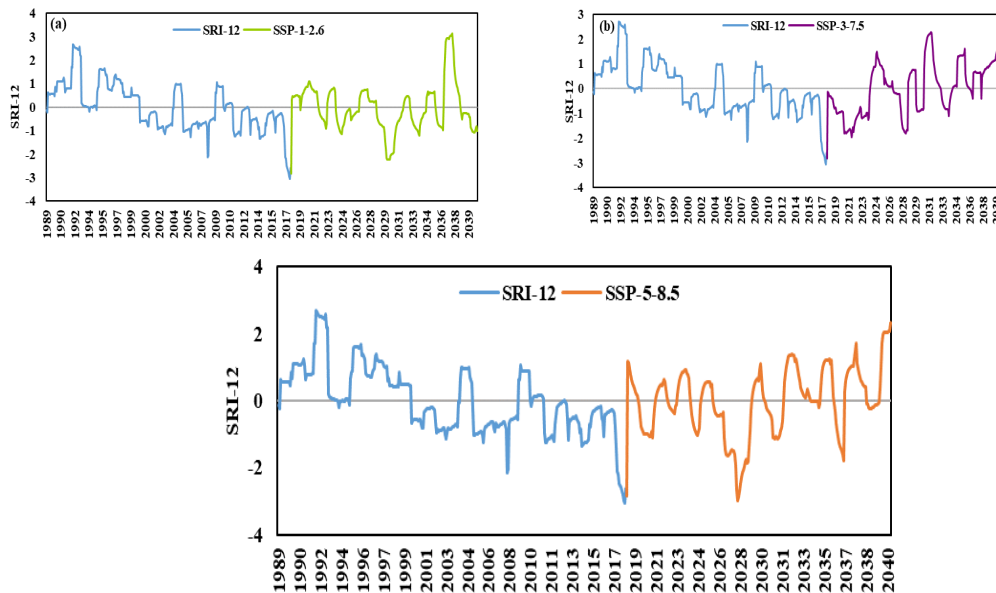
شکل ۷- مشخصه‌های خشک‌سالی هواشناسی در دوره پایه و آینده (الف) شدت و مدت خشک‌سالی، (ب) بزرگی و اوج خشک‌سالی.

Figure 7- Meteorological drought characteristics in basis and future period a: severity and duration, b: magnitude and peak.

مطالعه‌شده خشک‌سالی آب‌شناختی نیز با سناریوی SSP-1-2.6 با همین روند ادامه داشته است و تناوبی از خشک‌سالی و ترسالی دیده شد. می‌توان گفت که خشک‌ترین سال‌ها در سال ۲۰۳۰ است و وضعیت خشک‌سالی نیز خیلی شدید است و سال ۲۰۳۷ در آینده نیز ترسالی‌ترین است و وضعیت ترسالی آب‌شناختی آبخیز نیز شدید است.

بر اساس سناریوی SSP-3-7.5T در مقایسه با سناریوی SSP1-2.5، ترسالی‌های آبخیز میناب به شکل متناوب در سال‌های ۲۰۲۴، ۲۰۳۱ و ۲۰۳۳ بیشتر است. همچنین، بر اساس سناریوی SSP-5-8.5 در این آبخیز در سال ۲۰۲۸ خشک‌سالی تاریخی با شدت ۲/۹۸- است و خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها با میانگین یک‌ساله به شکل متناوب تکرارپذیرند.

**اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی آب‌شناختی**  
اندازه‌های SRI-12 پیرو SPI-12 بر پایه اندازه‌های رواناب برآورد شد و با استفاده از سناریوهای مزبور برای دوره آینده نیز پیش‌بینی شد. تغییرات آن در شکل ۸ نشان داده شده است. آبخیز مطالعه‌شده در دوره گذشته (۱۹۹۸-۱۹۹۹) ترسالی گسترده‌ای را داشته است. از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ نیز وارد دوره ترسالی شده است و یک دوره کوتاه ترسالی را پشت سر گذاشته است و دوباره وارد دوره خشک‌سالی چهارساله شده است و تا پایان دوره پایه نیز به همین ترتیب در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۷ نیز وارد دوره خشک‌سالی شده است. در دوره پایه، یک خشک‌سالی تاریخی خیلی شدید در نوامبر (۲۰۱۷) در منطقه رخ داده است و دیگر رخدادها عموماً خشک‌سالی‌های شدید و متوسط بوده‌اند. در آبخیز



شکل ۸- تغییرات SRI-12 در دوره پایه و سناریوی SSP 1-2.6 (الف)، SSP3-4.5 (ب) و SSP5-8.5 (ث).

Figure 8- Temporal variation of SRI-12 during historical period and 2021-2040 using SSP 1-2.6 (a), (b) SSP 3-4.5 and (c) SSP5-8.5 scenarios.

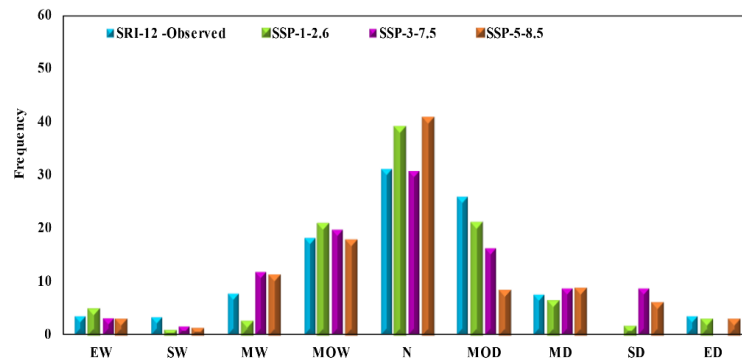
آینده در تمام سناریوها به‌طور میانگین ۲۰٪ افزایش یافت. درصد فراوانی ترسالی در دوره آینده در مقایسه با گذشته در سناریوی SSP-3-7.5 افزایشی (از ۸٪ به ۳۶٪) بود و در سناریوی SSP-1-2.5 به ۲۹٪ و در سناریوی بدبینانه ۳۳٪ افزایش یافت و وضعیت خشک‌سالی در سه سناریوی SSP-3-7.5، SSP1-2.5 و SSP-5-8.5 در مقایسه با دوره پایه از ۳۷٪ به ۳۲٪، ۳۳٪ و ۲۶٪ کاهش یافت.

بیشینه و میانگین اندازه شدت، مدت، بزرگی و بارش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۰ الف بیشترین اندازه شدت خشک‌سالی مربوط به دوره پایه (۷۱) بود که با زمان تداوم ۴۹ ماهه رخ داد. همچنین

درصد فراوانی خشک‌سالی آب‌شناختی در دوره پایه و آینده آبخیز میناب در شکل ۹ نشان داده شده است. در این راستا نتایج نشان داد که بیشترین درصد فراوانی خشک‌سالی‌ها در منطقه مطالعه‌شده مربوط به طبقه نرمال است که در دوره پایه این اندازه ۴۰٪ بود و در دوره آینده در تمام سناریوها، وضعیت افزایشی را نشان داد. طبقه خشک‌سالی نرمال در آینده به ۳۵٪ افزایش یافت. پس از طبقه نرمال، بیشترین طبقه مربوط به خشک‌سالی ملایم (۲۶٪) بود که وضعیت این طبقه نیز در آینده در تمام سناریوها، کاهش بود و به‌طور میانگین به ۱۵٪ کاهش یافت. پس از آن دوره ترسالی میانگین بود که در دوره پایه ۱۸٪ بود و در

خشک‌سالی در منطقه به‌وسیله سناریوی SSP-5-8.5 به ترتیب ۱/۴ و ۲/۹۸ برآورد شد (شکل ۱۰ ب). سپس با دو سناریوی دیگر این اندازه‌ها (۱/۱۵ و ۱/۰۷) بود. در دوره آینده پیش‌بینی میانگین و بیشترین شدت و بزرگی خشک‌سالی آب‌شناختی در مقایسه با دوره پایه، افزایشی بود.

در دوره آینده با سناریوی SSP-3-7.5 بیشترین شدت ۶۸ و با زمان تداوم ۶۴ ماهه رخ داد که در مقایسه با دوره پایه این اندازه‌ها کمتر بود. پس از این سناریو، بیشترین شدت و مدت به ترتیب مربوط به سناریوی SSP-5-8.5 (۵۴ و ۳۸ ماهه) و SSP-1-2.5 (۴۳ و ۳۸ ماهه) بود. در این راستا، بیشترین اندازه بزرگی و اوج



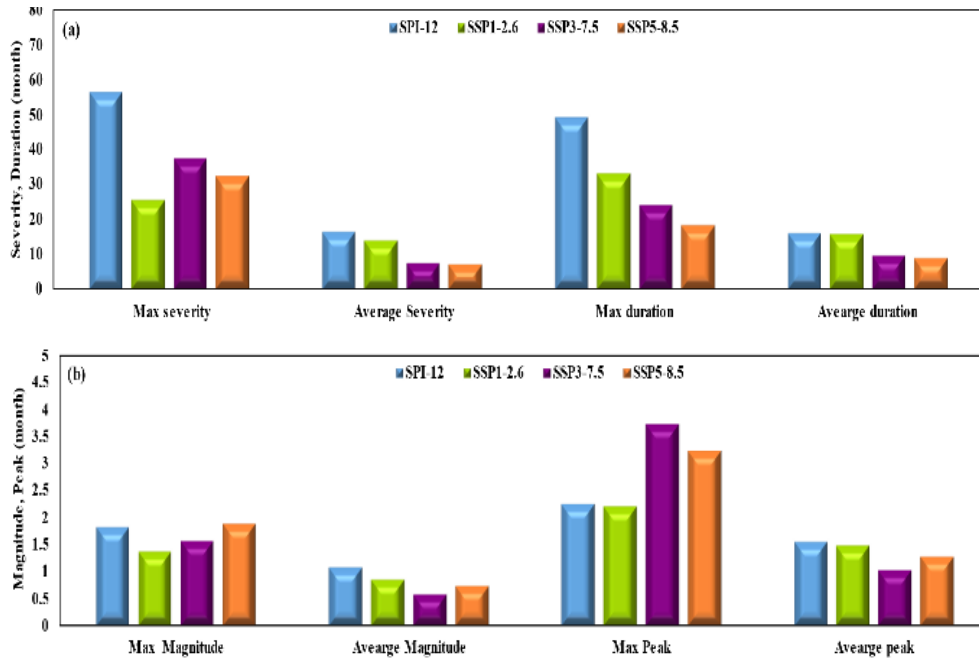
شکل ۹- فراوانی خشک‌سالی آب‌شناختی در هر دسته کلاس توصیفی خشک‌سالی/ترسالی (N: نرمال؛ EW: ترسالی خیلی شدید؛ SW: ترسالی شدید؛ MW: ترسالی متوسط؛ MOW: ترسالی ملایم؛ MOD: خشک‌سالی ملایم؛ MD: ترسالی متوسط؛ SD: خشک‌سالی شدید؛ SD: خشک‌سالی شدید).

Figure 9- Frequency of hydrological drought in each drought/drought descriptive class category (N: normal; EW: very severe drought; SW: severe drought; MW: moderate drought; MOW: mild drought; MOD: mild drought; MD: moderate drought; SD : severe drought; SD: severe drought).

همکاران (۲۰۱۹)، بذرافشان و همکاران (۲۰۲۳)، مظفری و همکاران (۲۰۲۱)، بینا و همکاران (۲۰۲۱) مبتنی بر افزایش بارش و کاهش خشک‌سالی‌ها با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که با در نظر گرفتن تغییرات کاربری زمین‌ها اندازه‌های بارش و رواناب تا ۸۰٪ در سناریوی SSP5-8.5 افزایش یافت. در این پژوهش نتایج سناریوی SSP-1-2.5 نشان داد که روند بارش از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما روند آب‌دهی جریان کاهشی و معنی‌دار بود. مبتنی بر نتایج پژوهش عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) و به‌رغم افزایش اندازه بارش در دوره‌های آتی، اندازه رواناب خروجی به دلیل افزایش دما و تغییرات کاربری زمین‌ها در بیشتر سناریوها کاهش یافت.

#### تحلیل روند متغیرهای بررسی‌شده

روند تغییرات متغیرهای بررسی‌شده در جدول ۵ نشان داده شده است. در این راستا نتایج نشان داد که روند هر دو نوع خشک‌سالی (آب-شناختی و هواشناسی) در دوره پایه، افزایشی و در سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار بود. در دوره آینده در سه سناریو، روند خشک‌سالی هواشناسی کاهشی بود و روند اندازه‌های SPI افزایشی بود. در این شرایط روند اندازه رواناب در سناریوی SSP-1-2.5 افزایشی و معنی‌دار بود اما در دو سناریوی دیگر افزایشی و بی‌معنی بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت، در دوره آینده مشاهده ترسالی بیشتر است. در جنوب ایران و شهرستان میناب نتایج پژوهشگران (عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳)، عظیمی‌سردری و



شکل ۷- مشخصه‌های خشک‌سالی هواشناسی در دوره پایه و آینده (الف) شدت و مدت خشک‌سالی، (ب) بزرگی و اوج خشک‌سالی.

Figure 7- Meteorological drought characteristics in basis and future period a: severity and duration, b: magnitude and peak.

رود به دنبال کاهش بارش کاهش یافت و این تغییرات بیشتر مربوط به فصل‌های پاییز و زمستان (۴۹٪ کاهش) بود. اما تغییرات روند جریان رود در فصل تابستان در مقایسه با دوره پایه افزایش یافت. شیب روند تغییرات بارش و آب‌دهی در کل دوره افزایشی بود. بررسی اثر اقلیم و خشک‌سالی هواشناسی در منطقه مطالعه شده نشان داد که روند اندازه‌های خشک‌سالی آب‌شناختی و هواشناسی در دوره تاریخی افزایشی بوده است اما در آینده در بیشتر سناریوها روند خشک‌سالی کاهش‌ی است که عموماً از نظر آماری نیز معنی‌دار نیست و این وضعیت در مشخصه‌های خشک‌سالی نیز به خوبی مشاهده شد.

بررسی تغییرات منطقه‌ای خشک‌سالی ناشی از تغییرات اقلیم جهانی همراه با ترکیب‌های گوناگونی از سناریوها می‌تواند برای هشدار زودهنگام خشک‌سالی و همچنین برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مفید باشد. در مجموع، شرایط مدیریت و پیش‌آگاهی خشک‌سالی در بسیاری از نقاط ایران بخصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک هم‌اکنون فاصله زیادی از وضعیت مطلوب دارد. بنابراین، ضروری است که آمادگی لازم برای مقابله با آن فراهم شود. از این‌رو، ضروری است که امکان آمادگی لازم برای مقابله با آن فراهم شود. بنابراین، در خشک‌سالی‌های شدید، کاربرد مدل‌های تغییر اقلیم برای پیش‌گویی شرایط آینده در ارزیابی قابلیت تأمین آب و نیازمندی به منابع آب کمکی می‌تواند بسیار مفید باشد.

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات بارش و رواناب در آبخیز سد میناب بررسی شد. از این‌رو، از داده‌های ایستگاه آب‌سنجی برنطین استفاده شد. اندازه‌های بارش و دما با استفاده از مدل LARS-WG و گزارش ششم ریزمقیاس شدند. با استفاده از داده‌های مزبور رواناب به وسیله مدل IHACRES واسنجی شد و پس از عملکرد مناسب مدل، داده‌ها صحت‌سنجی شد. سپس، رواناب برای یک دوره در آینده با استفاده از سه سناریوی انتشار SSP-1-2.5، SSP-3-7.5 و SSP-5-8.5 پیش‌بینی شد. اندازه‌های SPI و SRI برای دوره پایه و آینده برآورد شد و روند تغییرات آنها در مقایسه با دوره آینده مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، عملکرد مدل آب‌شناختی بارش-رواناب در دوره پایه مناسب بود. بنابراین، اندازه‌های رواناب برای دوره آینده برآورد شد و سرانجام تغییرات بارش، دما و رواناب در دوره آینده در مقایسه با دوره پایه برآورد شد. نتایج نشان داد روند تغییرات بارش برای سه سناریو در فصل پاییز و زمستان کاهش‌ی بود. با استفاده از سه سناریو، در مقایسه با دوره مشاهده‌ای بیشترین تغییرات مربوط به ماه نوامبر بود اما در فصل تابستان این تغییرات افزایش یافت. در این راستا، پیش‌بینی تغییرات دما به وسیله هر سه سناریو به‌ویژه از ماه‌های آگوست تا دسامبر تا ۴۰٪ در مقایسه با دوره پایه افزایشی بود. همچنین، روند جریان

فهرست منابع

- Aalami M, Agha Babaei b, Ahmadi M, Farzin S. 1393. Optimal allocation of water resource systems using dynamic system. *Journal of Water Resources Engineering*, 23(7):23-39. (In persian). <https://civilica.com/doc/50565/>.
- Abbaszadeh M, Bazrafshan O, Mahdavi R, Sardooi ER, Jamshidi S. 2023. Modeling future hydrological characteristics based on land Use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management*, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6>.
- Achite M, Bazrafshan O, Katipoğlu OM, Azhdari Z. 2023. Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical droughts in the Mediterranean climate of Algeria. *Natural Hazards*, pp. 1-27.
- Aghabeigi N, Ismaili Auri A, Moštafazadeh R, and Golshan M. 2018. Climate changes on runoff with the IHACRES hydrological model in the watersheds of Ardabil province. *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering in Iran*. 10 (38): 163-176. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/IWE.2019.100750>.
- Ayers J, Dodman D. 2010. Climate change adaptation and development I: The state of the debate. *Progress-in-Development-Studies* 10(2): 161-168. <https://doi.org/10.1177/146499340901000205>.
- Azari M, Moradi H. R, Saghafian B, Faramarzi M. 2016. Climate change impacts on stream flow. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967695>.
- Bahrami S, Bazrafshan O, esmaelpour Y. 2022. Efficiency of drought meteorological indices in hydrological and hydrogeological drought warning (Case study: The watershed of Esteghlal Dam -Minab). *Extension and Development of Watershed Management*, 10(36): 27-36. <https://doi.org/20.1001.1.26454777.1401.10.36.4.8>.
- Bazrafshan O, Zamani H, Mozaffari E, Azhdari, Shekari M. 2023. Trivariate risk analysis of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(6): 52-69. <https://doi.org/10.1007/s00703-023-00988-9>.
- Carcano EC, Bartolini P, Muselli M, Piroddi L. 2008. Jordan Recurrent Neural Network Versus IHACRES in modeling daily stream flows. *Hydrology*, 362(3): 291-307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.026>.
- Cooper VA, Nguyen VTV, Nichol JA. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology*. 334(3-4): 455-466. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.036>.
- Croke BFW, Jakeman AJ. 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions. In: Weather HS. Sorooshian S. Sharma KD. (Eds.), *Hydrological Modeling in Arid and Semi-arid Areas*. Cambridge University Press, Cambridge. pp.41-48.
- Croke BFW, Jakeman AJ. 2005. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions, in: *Hydrological Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*, edited by: Wheater, H., Sorooshian, S. and Sharma, K. D., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 41-48.
- Jakeman A, J, Hornberger GM. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*. 29(8): 2637-2649. <https://doi.org/10.1029/93WR00877>.
- Kendall M. 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin, London. [Citation Time(s):1]
- Lloyd EH. 1970. Return periods in the presence

- of persistence. *Journal of Hydrology*, 10(3): 291-298. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90256-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90256-8).
- Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrical: Journal of the Econometric Society*, pp. 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>.
- McKee T, Doesken N, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc Eighth Conference Appl Climatol*, American Meteorological Society, Boston. pp. 179-184.
- Monahan WB, Theobald DM. 2018. Climate change adaptation benefits of potential conservation partnerships. *PloSone* 13(2): 1-23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191468>.
- Mozaffari E, Moradi N, Bazrafshan O. 2021. Spatio-temporal variability of characteristics of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Desert Management*, 8(16):153-163. <https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.243146>.
- Mirdashtovan M, Malekian A, Mohseni Saravi, M. 2018. Stream flow simulation using statistical downscaling of climatic data: Urmia Lake Basin. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2): 419-431. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.232662.586>.
- Patil SD, Stieglitz M. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology* 525(2): 409-417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.003>.
- Rahimi B, Hafezparast M. 2020. Investigation of the IHACRES model in the prediction of runoff caused by climate models, the fifth report (Case study: Jamishan Dam). The First National Conference of Applied Reserches on Water and Power Industry Razi University, Kermanshah, pp. 30-31 December 2020. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1202087/>.
- Rahnama S, Shahidi A, Yaqubzadeh M. 2021. Forecasting climate change based on temperature and creation based on the 6th report of the IPCC (Case study: Bandar Abbas International Station and the 2th National Conference on Modeling and Technologies). *New in Water Management*, Birjand, <https://civilica.com/doc/1736910>.
- Rasco P, Szeidl L, Semenov MA. 1991. A serial approach to local stochastic models. *Journal of Ecological Modeling* 57, 27-41. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4). <https://doi:10.3354/cr010095>.
- Sabzi Parvar AA, Shadmani M. 2013. Analysis of reference evaporation and transpiration using Mann-Kendall and Spearman tests in dry areas of Iran, *Water and Soil Journal*, 25(4): 824-823. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.10242>.
- Shukla S, Wood AW. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2): 23-41. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>.
- Shukla S, Wood AW. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.* 35, L02405. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>.
- Tebaldi C, Debeire KV, Eyring E, Fischer J, Fyfe P, Friedlingstein R, Knutti J, Lowe B, O'Neill B, Sanderson, D. van Vuuren. 2021. Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1): 253-293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.
- Zareie M, Qanbarpur M, Habibnejad Roshan M, Shahedi K. 2009. Simulation of river flow using IHACRES: A case study in Kasilian Basin, *Journal of Iranian Engineering Sciences and Watershed Management* Vol. 8, pp 10-20 (In Persian). <http://jwmsei.ir/article-1-115-fa.html>
- Zarin A, Dadashi Rudbari A. 2021. Prediction of consecutive dry and wet periods in Iran based on Hamdi output of 6CMIP bias corrected models. *Earth and Space Phys-*

- ics, 47(3): 5-16 (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.319270.1007295>.
- Prediction of Meteorological and Hydrological Drought under Climate Change in the Minab Dam Watershed
- Fateme Pourhaghverdi 1, Ommolbanin Bazrafshan \*2, Hamid Gholami 3, Marzieh Shekari 4, Hossein Zamani 5
- 1- Ph.D., Student, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 3- Professor, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 4 and 5- Assistant Professor, Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran





## Prediction of Meteorological and Hydrological Drought under Climate Change in the Minab Dam Watershed

Fateme Pourhaghverdi <sup>1</sup>, Ommolbanin Bazrafshan <sup>\*2</sup>, Hamid Gholami <sup>3</sup>, Marzieh Shekari <sup>4</sup>, Hossein Zamani <sup>5</sup>

1- Ph.D., Student, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

3- Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

4 and 5- Assistant Professor, Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

The phenomenon of climate change is the reason for the continued change of the climate pattern in the future. In 2016, the Intergovernmental Panel on Climate Change, with the cooperation of various research centers around the world, has started compiling the sixth climate change assessment report CMIP(6). Due to the low spatial resolution of the output of GCM models, it is not appropriate to use them to evaluate the effect of climate change on a local scale. Consequently, it is necessary to scale the output of these models for regional studies using appropriate models or methods. One of the most important effects of climate change is the impact on rainfall and runoff in the watershed, which is effective on meteorological and hydrological droughts. One of the famous rainfall-runoff models that do not require a lot of input data is IHACRES. Researchers have welcomed its use in the last decade. The purpose of this research is to investigate the effects of climate change on meteorological and hydrological drought in the Minab Dam watershed.

#### Materials and Methods

In this study, climatic and hydrological data related to the region including daily precipitation, mean daily temperature and mean daily discharge were used to model and simulate the daily discharge

#### Article Type: Research Article

\*Corresponding Author E-mail: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

**Citation:** Pourhaghverdi, F., Bazrafshan, O., Gholami, H., Shekari, M., Zamani, H. 2024. Prediction of Meteorological and Hydrological Drought Under Climate Change in the Minab Dam Watershed. *Watershed Management Research*. 37(3):76-93.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2023.364078.1554

**Received:** 12 November 2023, **Received in revised form:** 03 December 2023, **Accepted:** 21 December 2023

**Published online:** 22 September 2024

*Watershed Management Research*, VOL. 37, No.3, Ser. No: 144, Autumn 2024, pp.76-93.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



of the Minab watershed during the statistical period of 1989 to 2018. From the Canadian model of the sixth report and three climate change scenarios SSP-1-2.5, SSP-3-7.5 and SSP-5-8.5, from the IHACRES model for predicting river flow for the future period from 2019 to 2040 and from the LARS-model WG was used for microscale precipitation and temperature. The Standardized Rainfall/Runoff Index (SRI/SRI) was used to study the drought. To analyze the drought trend and its characteristics, the Mann-Kendall test was utilized in both baseline and future periods.

### **Results and Discussion**

Using the mentioned data, the runoff was calibrated using the IHACRES model. After the proper performance of the model in the calibration stage, the model was verified and predicted using three scenarios of the sixth report of runoff for a period in the future. Then, SPI, SRI, and drought characteristics (severity, duration, magnitude, and peak) were estimated for the past and future periods, and their changes compared to the future period. The results showed that the trend of precipitation changes in all three scenarios decreased in autumn and winter.

Also, by using three scenarios, it was found that the most changes in the observation period were related to November. Also, regarding the flow of the river, its trend is decreasing due to the decrease of precipitation and these changes are mostly related to the autumn and winter seasons (up to 49% decrease), but its changes in the summer season have an increasing trend compared to the base period. In general, the trend of changes in precipitation and discharge in the entire period has an increasing slope. Investigating the effect of climate and meteorological drought in the study area showed that the hydrological and meteorological drought values have been increasing in the past, but in the future, in most scenarios, the drought trend is decreasing, which generally lacks a statistically significant trend. It is also clearly visible in the characteristics of drought.

### **Conclusion and Suggestions**

Considering the regional changes of drought caused by global climate changes, considering different combinations of scenarios can be useful for early warning of drought as well as water resources management planning. In general, the conditions of drought management and forecasting in many parts of Iran, especially in arid and semi-arid regions, are currently far from the ideal situation. Therefore, it is necessary to be prepared to deal with it. Therefore, in severe droughts, the use of climate change models to predict future conditions can be very useful in evaluating the ability to provide water and the need for auxiliary water sources.

**Keywords:** Downscaled, Minab watershed, Precipitation-runoff model, Sixth climate report, Standardized precipitation/runoff index