

بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه زرينه رود با استفاده از شاخص های SPI و SRI تحت سناریوهای تغییر اقلیم

ملیحه راهواره، بهارک معتمدوزیری*، علیرضا مقدم‌نیا^۲، علی مریدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷

چکیده

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی های هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز زرينه رود، از خروجی مدل گردش عمومی HADGEM2-ES و مدل ریزمقیاس‌نمایی CCT تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP2.6 برای دوره آینده ۲۰۲۵-۲۰۴۹ استفاده شد. برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به ترتیب از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) طی دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۹۰) و آینده در مقیاس زمانی سالانه استفاده شد. برای محاسبه مقادیر SPI در دوره آینده از داده‌های بارش شبیه‌سازی شده بر اساس مدل گردش عمومی استفاده شد. شاخص SRI بر اساس رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT برای دوره پایه محاسبه شد. در ادامه با معرفی نتایج ریزمقیاس‌شده مدل گردش عمومی به مدل SWAT، شاخص SRI برای دوره آینده شبیه‌سازی گردید. میانگین نتایج مدل CCT نشان داد که حداکثر و حداقل دما در دوره آینده ۱/۵ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و بارش سالانه ۳/۶٪ افزایش تحت RCP 2.6 و ۲/۹٪ کاهش تحت RCP 8.5 را نشان داد. بر اساس مقادیر مربوط به شاخص SPI و SRI سالانه، میانگین شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه در آینده به ترتیب ۱۷ و ۳۸٪ نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج RCP 8.5 نسبت به RCP 2.6 شدت خشکسالی بیشتری را نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، خشکسالی، زرينه رود، SPI، SRI، SWAT

۱. دانشجوی دکتری تخصصی رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
 ۲. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، نویسنده مسئول، bmvaziri@gmail.com
 ۳. دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
 ۴. استادیار گروه مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
- * این مقاله برگرفته از رساله دکتری است.

مقدمه

شبیه‌سازی پیش‌بینی دما و بارش دارد.

شاخص‌های تشخیص و پایش خشکسالی که برای نشان دادن شدت خشکسالی استفاده می‌شوند، معمولاً به چهار نوع خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و خشکسالی اجتماعی اقتصادی تقسیم می‌شوند (ویلهایت و گلاتنتز؛ ۱۹۸۵). به‌طور کلی، سه نوع خشکسالی ذکر شده، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با خشکسالی هواشناسی از طریق متغیرهایی مانند بارندگی، رطوبت خاک، جریان‌های سطحی، نفوذ، تخلیه آب‌های زیرزمینی، تبخیر و جریان رودخانه که همگی در چرخه هیدرولوژیکی دخیل‌اند، مرتبط هستند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۴). خشکسالی هواشناسی ناشی از کمبود بارندگی است که در صورت تداوم منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌شود (شکری‌کوچک و بهنیا، ۲۰۱۳). در دهه‌های اخیر، شاخص‌های مختلف پایش خشکسالی از جمله شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) برای ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی توسعه داده شده است (ویسته سرنو و همکاران، ۲۰۱۰). این شاخص‌ها به‌دلیل انعطاف‌پذیری و سادگی در محاسبه خشکسالی، در مقیاس‌های زمانی مختلف با الزامات داده‌ای محدود به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۴). فریتاس^۳ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از شاخص SPI به بررسی خشکسالی در حوزه آبخیز سائو فرانسیسکو برزیل پرداختند. نتایج نشان داد که طولانی‌ترین و شدیدترین دوره خشکسالی در حوزه بین سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۰ رخ داده است. پورکریمی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر تغییر اقلیم را بر خصوصیات خشکسالی با استفاده از دو شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) و شاخص رطوبت خاک استاندارد شده

پیامدهای تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژیکی در سال‌های آینده منجر به افزایش بلایای طبیعی شدید مانند سیل و خشکسالی در بسیاری از نقاط جهان می‌شود. خشکسالی یک فرایند طبیعی پیچیده است که عمدتاً به دلایل تغییر در الگوهای بارش و افزایش تبخیر و تعرق رخ می‌دهد (پادرون^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هری^۲ و همکاران؛ ۲۰۲۰). به‌دلیل گرم شدن کره زمین از سال ۱۹۵۰، دمای هوا افزایش یافته و برخی از مناطق ممکن است در آینده از بلایای خشکسالی مکرر و جدی رنج ببرند (گوو^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به روند افزایشی دمای جهانی و تأثیر آن بر اقلیم محلی، پیش‌بینی شده که تغییرات اقلیمی ممکن است فراوانی و شدت رویدادهای شدید مانند خشکسالی را تغییر دهد (هیئت بین دولتی تغییر اقلیم؛ ۲۰۱۳). بنابراین تجزیه و تحلیل انواع مختلف خشکسالی با توجه به تأثیر تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (گریلاکیس؛ ۲۰۱۹).

در این بین، از مدل‌های گردش عمومی جو^۴ (GCM) برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار استفاده می‌شود (ابراهیم خوسفی و میراکبری، ۲۰۲۰). با استفاده از این مدل‌ها می‌توان الگوی رفتاری دما، بارش و خشکسالی در آینده را شبیه‌سازی کرد (بحری و همکاران، ۲۰۱۳). از آنجاکه مدل‌های گردش عمومی جو قادر به تولید متغیرهای هواشناسی در مقیاس‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه خود نیستند، باید نتایج این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی، ریزمقیاس‌نمایی گردد. علیزاده و همکاران (۲۰۲۰) در حوزه دریان، برای ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح خطاهای داده‌های اقلیمی مدل‌های GCM از مدل CCT^۵ استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که این مدل توانایی خوبی جهت

8. Wilhite and Glantz

9. Zhao

1 . Standardized Precipitation Index 0

1 . Standardized Runoff Index 1

1 . Vicente-Serrano 2

1 . Freitas 3

1. Padrón

2. Hari

3. Guo

4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

5. Grillakis

6. Global Climate Models

7. Climate Change Toolkit

حوضه آبخیز زربینه رود یکی از زیرحوضه‌های اصلی تأمین‌کننده جریان ورودی به دریاچه ارومیه است. سطح آب دریاچه ارومیه در حال کاهش است که دلیل عمده آن ناشی از کاهش ورودی‌ها به آن است. دریاچه ارومیه در معرض خطر خشکسالی‌های متعدد و طولانی مدت قرار دارد؛ این خشک شدن منجر به پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بسیاری شده است (بروقانی و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین پایش خشکسالی و برنامه‌های مدیریت منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه برای مقابله با خشکسالی بسیار مهم است. از این رو هدف از این مطالعه، بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹ در حوضه زربینه رود با استفاده از مدل گردش عمومی HadGEM2-ES و مدل ریزمقیاس‌نمایی CCT تحت سناریوهای انتشار RCP2.6 و RCP8.5 است. در این راستا برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۸) و دوره آینده از شاخص SPI و برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی از شاخص SRI استفاده شد.

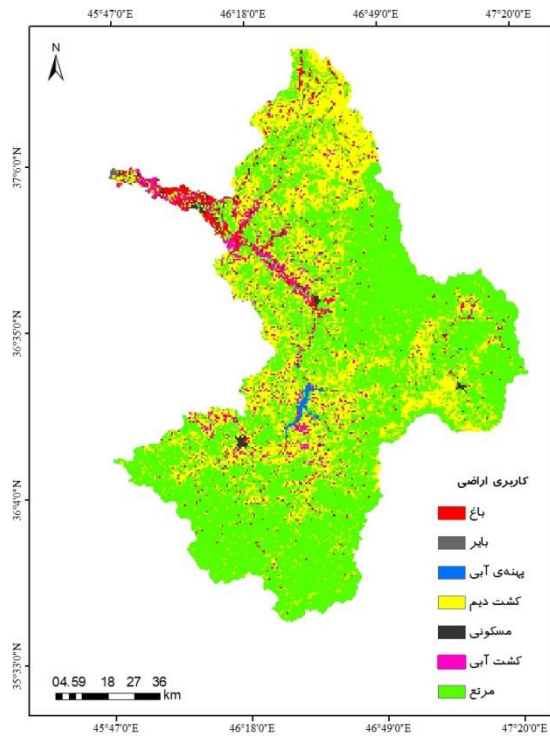
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

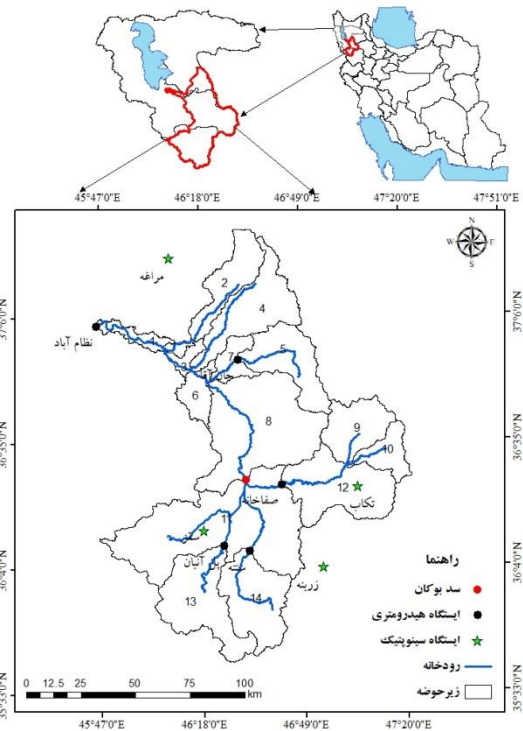
حوضه آبخیز زربینه رود با مساحتی بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر مربع، در شمال غربی ایران در موقعیت ۲۷° ۳۷'-۳۵° ۴۱' طول شرقی و ۲۰° ۲۷'-۲۷° ۴۷' عرض شمالی واقع شده است. رودخانه زربینه رود از مهم‌ترین و طویل‌ترین رودخانه‌های حوضه آبخیز دریاچه ارومیه است که از گوشه جنوب شرقی به دریاچه ارومیه می‌ریزد و طول آن ۲۴۰ کیلومتر و میانگین آبدهی این رودخانه ۱۳۹/۵ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. سد بوکان، سد اصلی مورد بهره‌برداری در این حوضه بوده و از آن برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می‌شود (امامی و همکاران، ۲۰۱۸). شکل (۱) موقعیت حوضه آبخیز زربینه رود و شکل (۲) کاربری اراضی این حوضه را نمایش می‌دهد.

و مدل^۱ SWAT در حوضه زربینه رود بررسی کردند. نتایج نشان داد میانگین بیشترین وقوع و تداوم خشکسالی کل حوضه در آینده نسبت به دوره پایه مربوط به شاخص رواناب استاندارد شده به ترتیب با ۲۳٪ افزایش تحت سناریو انتشار RCP2.6 و ۱۹/۷٪ افزایش تحت سناریو انتشار RCP8.5 بوده است. آذره و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های آینده در شهرستان خاتم، با استفاده از خروجی دو مدل گردش عمومی HADGEM2^۲ و BNU-ESM^۳ تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دو دوره آینده ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۱ پرداختند. نتایج نشان داد در هر دو دوره آینده در تمامی سناریوها، دمای متوسط سالانه افزایش و بارش متوسط سالانه کاهش می‌یابد و متعاقباً خشکسالی هواشناسی افزایش می‌یابد. جوان (۲۰۲۱) به بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم پرداخت. بدین منظور داده‌های بارش دوره‌های آینده به کمک مدل گزارش پنجم CanESM2 و سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM تعیین شدند. سپس مقادیر SPI در دوره پایه و آینده با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شد. نتایج آزمون من-کندال نشان‌دهنده روند معنی‌دار SPI در دوره پایه و دوره‌های آینده بر اساس سناریو RCP8.5 است. ساتو^۴ و همکاران (۲۰۲۲) زمان ظهور شرایط خشکسالی بی‌سابقه تحت تأثیر اقلیم را در سه منطقه جنوب غربی آمریکای جنوبی، اروپای مدیترانه‌ای و شمال آفریقا مورد بررسی دادند. نتایج نشان داد که این سه منطقه در سی سال آینده با شرایط خشکسالی بی‌سابقه‌ای مواجه می‌شوند و نتایج این مطالعه بر اهمیت بهبود آمادگی برای خشکسالی در افق‌های زمانی آینده تأکید می‌کند.

1. Soil & Water Assessment Tool
2. Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 Earth System
3. Beijing Normal University Earth System Model
4. Representative Concentration Pathway
5. Statistical Downscaling Model
6. Satoh



شکل (۲): نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز زرینه‌رود
 Figure (2): Land use map of Zarrineh River Basin



شکل (۱): موقعیت حوزه آبخیز زرینه‌رود و زیرحوضه‌های آن
 Figure (1): The location of Zarrineh River Basin and its sub-basins

روش تحقیق

مدل SWAT و داده‌های مورد استفاده

SWAT مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی است که مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه کرده و در مقیاس حوزه آبخیز استفاده می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۱۸). این مدل به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز، ابتدا حوضه را به قسمت‌های کوچک‌تری به‌عنوان زیرحوضه تقسیم می‌کند (آرنولد، ۱۹۹۸). ورودی‌های مدل SWAT شامل اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی، کاربری اراضی، مدل رقمی ارتفاعی^۳ (DEM) با اندازه سلولی ۳۰ متر و داده‌های نوع خاک از نقشه جهانی خاک^۴ FAO می‌باشد. رواناب که توسط SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر اساس معادله‌ی بیلان آب (رابطه ۱) است:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

که در آن SW_t ظرفیت نهایی آب در خاک، SW_0 ظرفیت اولیه آب در خاک، R_{day} بارش روزانه، Q_{surf} رواناب سطحی، E_a تبخیر و تعرق واقعی، W_{seep} آبی که به ناحیه غیراشباع خاک وارد می‌شود و Q_{gw} آب زیرزمینی که به رودخانه وارد می‌شود، می‌باشد (نیچ و همکاران، ۲۰۰۵).

از داده‌های هواشناسی، بارش، حداقل و حداکثر دما با گام زمانی روزانه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ میلادی مربوط به چهار ایستگاه سینوپتیک برای شبیه‌سازی رواناب استفاده گردید که از آن ۱۹۹۰-۱۹۹۴ به‌عنوان دوره گرم شدن مدل تعیین شد. همچنین اطلاعات سد بوکان و داده‌های خروجی

1. Yu
 2. Arnold
 3. Digital Elevation Model
 4 Food and Agriculture Organization

5. Neitsch

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری

Table (1): Information of synoptic and hydrometric stations

| نوع ایستگاه | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | ایستگاه |
|-------------|---------------|---------------|-----------|
| سینوپتیک | ۳۶/۰۶ | ۴۶/۹۱ | زربینه |
| سینوپتیک | ۳۶/۳۹ | ۴۷/۰۹ | تکاب |
| سینوپتیک | ۳۶/۲۲ | ۴۶/۳۱ | سقز |
| سینوپتیک | ۳۷/۳۴ | ۴۶/۱۴ | مراغه |
| هیدرومتری | ۳۷/۰۵ | ۴۵/۹۴ | نظام آباد |
| هیدرومتری | ۳۶/۹ | ۴۶/۴۹ | جان آقا |
| هیدرومتری | ۳۶/۴ | ۴۶/۷ | صفاخانه |
| هیدرومتری | ۳۶/۲ | ۴۶/۴۳ | پل آبیان |
| هیدرومتری | ۳۶/۱۷ | ۴۶/۵ | سنته |

شاخص‌های خشکسالی

در این مطالعه برای ارزیابی تغییرات خشکسالی در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم، از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) با مقیاس زمانی سالانه استفاده شد. شاخص SPI برای اندازه‌گیری خشکسالی هواشناسی (لنگ و همکاران، ۲۰۱۵) و شاخص SRI برای خشکسالی هیدرولوژیکی مناسب است (جانگ و چانگ، ۲۰۱۲).

شاخص بارش استاندارد شده، شاخصی است که با این دیدگاه توسعه یافته است که بارش بر منابع اصلی آب تأثیر می‌گذارد و یک شاخص احتمالی چندمقیاسی است که کمبود بارش را در طول دوره‌های مرطوب و خشک محاسبه می‌کند و امکان پایش خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). این شاخص با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$SPI = \frac{P_i - p^-}{SD} \quad (5)$$

در معادله فوق P_i معادل بارش در دوره مورد نظر به میلی‌متر، p^- میانگین بارش بلند برای دوره مورد نظر، SD انحراف معیار مقدار بارش است. در این مطالعه، مقادیر SPI در دوره پایه و دوره آینده محاسبه شد. برای محاسبه این

ماهانه مخزن سد بوکان در دوره بهره‌برداری ۱۹۷۲-۲۰۱۸ به مدل SWAT وارد شد. اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT با استفاده از آمار ماهانه رواناب پنج ایستگاه هیدرومتری برای دوره زمانی ۱۹۹۶-۲۰۱۷ که آمار سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۳ برای دوره اعتبارسنجی و ۲۰۱۴-۲۰۱۷ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی مدل تعیین شد.

شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی

برای پیش‌بینی اقلیم آینده، از آمار بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه مدل HadGEM2-ES مستخرج از گزارش پنجم هیئت بین‌کشوری تغییر اقلیم (همپل و همکاران، ۲۰۱۳) تحت دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شد؛ زیرا عملکرد این مدل در مطالعات تغییر اقلیم ایران مورد تأیید قرار گرفته است (واقفی و همکاران، ۲۰۱۹). برای ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی از نرم‌افزار CCT استفاده شد. جعبه‌ابزار CCT یک برنامه گرافیکی کاربردی است که به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های آب‌وهوایی شامل استخراج، ریزمقیاس‌نمایی و درون‌یابی داده‌های گردش عمومی جو توسط اشرف‌واقفی و همکاران (۲۰۱۷) توسعه یافته است. در این مدل پس از استخراج داده‌های تغییر اقلیم برای محدوده مطالعه، ابتدا ریزمقیاس‌سازی انجام شد، سپس میانگین ماهانه و سالانه محاسبه گردید. همچنین تصحیح خطاها برای داده‌های بارش با استفاده از روش تصحیح چندگانه (و برای داده‌های دمای حداقل و حداکثر روزانه از روش تصحیح جمع‌پذیری انجام شد).

همچنین اطلاعات سد بوکان و داده‌های خروجی ماهانه مخزن سد بوکان در دوره بهره‌برداری ۱۹۷۲-۲۰۱۸ به مدل SWAT وارد شد. اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT با استفاده از آمار ماهانه رواناب پنج ایستگاه هیدرومتری برای دوره زمانی ۱۹۹۶-۲۰۱۷ که آمار سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۳ برای دوره اعتبارسنجی و ۲۰۱۴-۲۰۱۷ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی مدل تعیین شد. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در جدول (۱) آمده است.

3. Leng

4. Jung and Chang

5. McKee

1. Ratio Method

2. Additive Method

زیرحوضه خود به ۶۶۶ واحد هیدرولوژیکی یکسان (HRU) تقسیم گردید. پس از این مرحله، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از آمار ماهانه رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب انجام شد. در این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم SUFI-2^۴ در برنامه SWAT-CUP^۵ صورت گرفته است. در این الگوریتم، روند کالیبراسیون به گونه‌ای است که در نهایت بیشتر داده‌های مشاهداتی در دامنه ۹۵٪ عدم قطعیت قرار می‌گیرند (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹). نتایج معیارهای ارزیابی قدرت مدل نشان داد که مقدار R² از ۰/۵۲ تا ۰/۷۰ برای اعتبارسنجی و از ۰/۴۴ تا ۰/۷۳ برای صحت‌سنجی متغیر است، درحالی‌که مقادیر NSE برای اعتبارسنجی از ۰/۵۲ تا ۰/۶۴ و برای صحت‌سنجی از ۰/۴۲ تا ۰/۶۴ متغیر است. بنابراین خروجی‌های مدل برای اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری را می‌توان رضایت‌بخش ارزیابی کرد (جدول ۳).

جدول (۳): نتایج اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT برای رواناب ماهانه

Table (3): Calibration and validation results of the SWAT model for monthly runoff

| دوره اعتبارسنجی | | دوره صحت‌سنجی | | ایستگاه هیدرومتری |
|-----------------|------|----------------|------|-------------------|
| R ² | NSE | R ² | NSE | |
| ۰/۷۳ | ۰/۶۴ | ۰/۶۳ | ۰/۶۰ | نظام‌آباد |
| ۰/۴۷ | ۰/۴۲ | ۰/۵۷ | ۰/۵۶ | جان‌آقا |
| ۰/۴۴ | ۰/۴۳ | ۰/۵۲ | ۰/۵۲ | صفاخانه |
| ۰/۵۴ | ۰/۵۰ | ۰/۷۰ | ۰/۶۴ | پل‌آنیان |
| ۰/۵۲ | ۰/۵۱ | ۰/۶۵ | ۰/۶۳ | سنته |

نتایج مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی

مقادیر میانگین بارش و دمای ماهانه دوره پایه و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 در مدل HadGEM2-ES در اشکال (۳) و (۴) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که دما در دوره آینده در همه ماه‌ها و در هر دو سناریو بیشتر از دوره پایه خواهد بود. همچنین بارش در دوره آینده در اکثر ماه‌ها در هر دو سناریو کاهش

شاخص در دوره آینده، از داده‌های بارش شبیه‌سازی شده در دوره آینده بر اساس مدل گردش عمومی جو استفاده شد.

شاخص رواناب استاندارد شده توسط شوکلا و وود^۱ (۲۰۰۸) پیشنهاد شد. روش محاسبه این شاخص کاملاً شبیه روش محاسبه شاخص SPI است، با این تفاوت که به جای داده‌های بارش، از سری داده‌های رواناب به عنوان داده ورودی استفاده می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه، رواناب توسط مدل SWAT برای دوره پایه و آینده شبیه‌سازی شد و برای محاسبه این شاخص، رواناب از خروجی‌های مدل SWAT استخراج شد. نرم‌افزار DIP از جمله نرم‌افزارهایی است که برای انجام پروژه‌های مربوط به خشکسالی استفاده می‌شود. به وسیله این نرم‌افزار که تحت ویندوز اجرا می‌شود، می‌توان با بازخوانی اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی و... شاخص‌های خشکسالی را به دست آورد (مرید، ۲۰۰۵). برای محاسبه مقادیر SPI و SRI در این پژوهش از نرم‌افزار DIP استفاده شد. تعیین طبقات مختلف خشکسالی در هر دو شاخص مذکور همانند یکدیگر بوده و در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): طبقه‌بندی دو شاخص خشکسالی SPI و SRI

Table (2): Classification of Drought Indicators

| شدت خشکسالی | مقدار شاخص‌های SPI و SRI |
|--------------------|--------------------------|
| خشکسالی خفیف | ۰ تا -۰/۹۹ |
| خشکسالی متوسط | -۱ تا -۱/۴۹ |
| خشکسالی شدید | -۱/۵ تا -۱/۹۹ |
| خشکسالی بسیار شدید | کوچکتر مساوی -۲ |
| ترسالی ملایم | ۰ تا ۱/۴۹ |
| ترسالی شدید | ۱/۵ تا ۲ |
| ترسالی بسیار شدید | بزرگتر مساوی ۲ |

نتایج

شبیه‌سازی حوضه، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

پس از تهیه داده‌های اقلیمی و مکانی مورد نیاز، با معرفی نقشه‌های خاک، کاربری زمین و شیب/توپوگرافی حوضه به مدل SWAT، حوضه به ۱۴ زیرحوضه تقسیم شد که این ۱۴

3. Hydrological Response Unit

4. Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2)

5. SWAT Calibration and Uncertainty Programs

1. Shukla and Wood

2. Vu

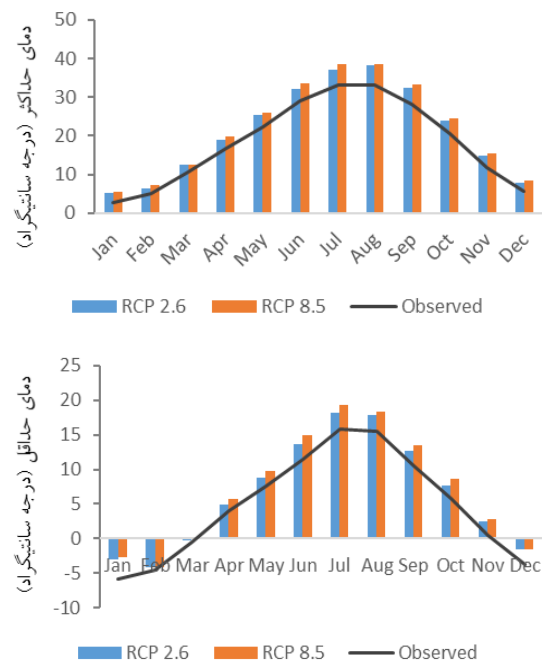
در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ در مقایسه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۸)

Figure (4): Average monthly rainfall under RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios in the period 2025-2049 compared to the observation period (1990-2018)

بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی هواشناسی حوضه

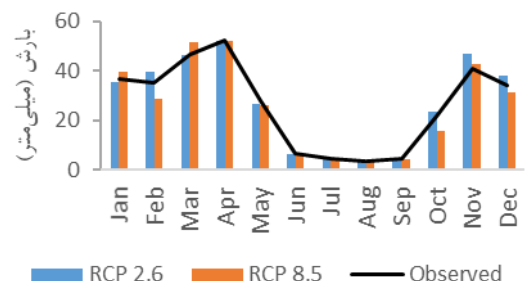
با استفاده از سری‌های زمانی بارش دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۸) و آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹)، مقادیر شاخص SPI برای بررسی روند خشکسالی هواشناسی حوضه زربنه رود در مقیاس زمانی سالیانه محاسبه شد. پس از بررسی و طبقه‌بندی شدت خشکسالی مشخص گردید که در دوره زمانی پایه و آینده، بیشترین فراوانی مربوط به طبقه نرمال بوده است. در دوره زمانی پایه، خشکسالی بسیار شدید رخ نداده است؛ در حالی که نتایج مقادیر SPI تولیدشده توسط RCP8.5 بیانگر وقوع یک رویداد خشکسالی هواشناسی بسیار شدید است که مقدار $2/23$ - را نشان می‌دهد. در دوره زمانی آینده فراوانی خشکسالی شدید نسبت به دوره پایه تغییر فاحشی نداشته است؛ در حالی که خشکسالی متوسط نسبت به دوره پایه 12% کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، ۲ واقعه ترسالی بسیار شدید طی سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ در دوره زمانی پایه رخ داده، اما در دوره زمانی آینده ترسالی بسیار شدید رخ نداده است؛ این در حالی است که فراوانی طبقه ترسالی ملایم در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه بیشتر می‌باشد. شدت خشکسالی هواشناسی تحت RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱۱ و 23% افزایش را نشان می‌دهد. به طور کلی در دوره زمانی پایه و آینده، طبقه خشکسالی نرمال، بالاترین فراوانی را به خود اختصاص داده و کمترین فراوانی طبقات مربوط به طبقه خشکسالی بسیار شدید است. شکل (۵) و (۶) روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هواشناسی به وقوع پیوسته در طول دوره زمانی پایه و آینده در مقیاس زمانی سالانه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

خواهد یافت. نتایج بررسی روند تغییرات دما و بارش سالیانه تحت سناریو RCP8.5 نشان می‌دهد که بارش سالیانه در دوره آینده به میزان $2/9\%$ نسبت به دوره مشاهداتی کاهش یافته و میانگین دمای حداقل و حداکثر سالیانه به ترتیب $2/4$ و $3/6$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. همچنین بررسی روند تغییرات دما و بارش سالیانه تحت سناریوی RCP 2.6 نشان می‌دهد که بارش سالیانه به میزان $3/6\%$ نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته و میانگین دمای حداقل و حداکثر سالیانه به ترتیب $1/8$ و 3 درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.

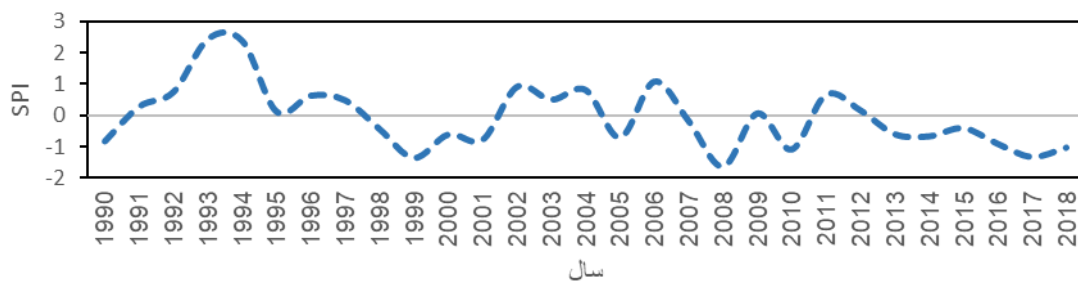


شکل (۳): میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه تحت RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۸)

Figure (3): Average monthly minimum and maximum temperature under RCP2.6 and RCP8.5 in the period 2025-2049 compared to the base period (1990-2018)

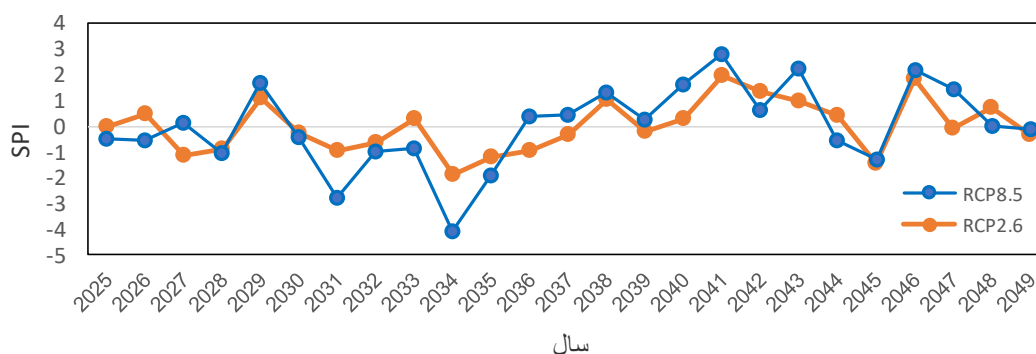


شکل (۴): میانگین بارندگی ماهانه تحت سناریو انتشار RCP2.6 و RCP8.5



شکل (۵): مقادیر شاخص سالانه در دوره زمانی پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۸)

Figure (5): Annual SPI index values for the base period (1990-2018)



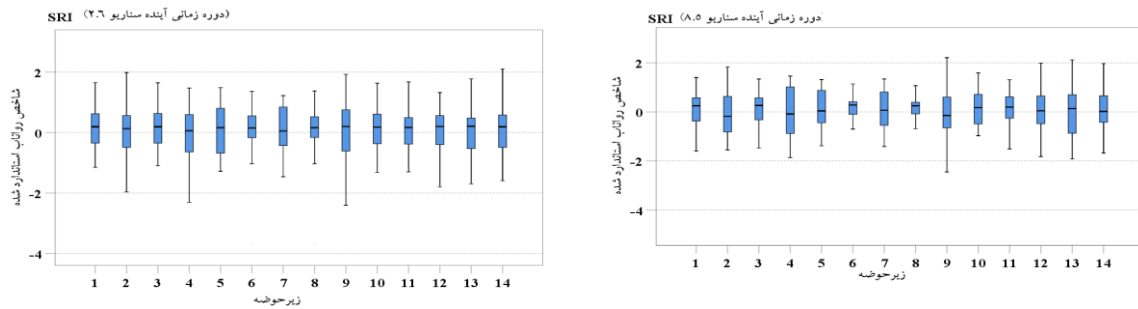
شکل (۶): مقادیر شاخص سالانه در دوره زمانی آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) تحت سناریوهای RCP

Figure (6): Annual SPI index values for the future period (2025-2049) under RCP scenarios

این دوره به ترتیب در حوضه شماره ۱۰ و ۲ روی می‌دهد. بر اساس نتایج، شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره آینده برابر با ۴/۱۳- تحت RCP 8.5 در زیرحوضه ۸ می‌باشد که نسبت به دوره پایه بیشتر است. شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره آینده در زیرحوضه ۱ نسبت به دوره پایه ۱۳٪ افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که زیرحوضه ۱ در قسمت خروجی حوزه آبخیز زرينه رود قرار گرفته است. بیشترین تعداد وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی تحت RCP 8.5 در زیرحوضه ۱۳ رخ می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی حوضه تحت RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۳۰٪ و ۴۶٪ افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که تعداد وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه تغییر فاحشی نداشته است (شکل ۷ و ۸).

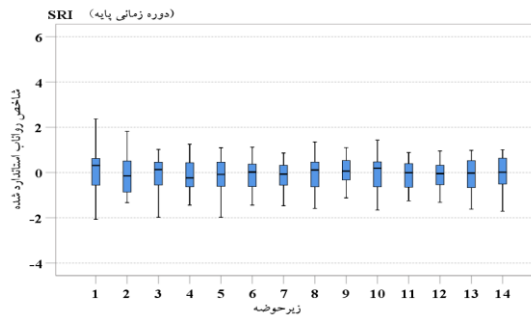
بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه

برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی، مدل SWAT برای دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۸)، واسنجی و اعتبارسنجی شد و با استفاده از رواناب شبیه‌سازی شده، شاخص SRI برای دوره پایه و برای هر ۱۴ زیرحوضه محاسبه گردید. سپس به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی هیدرولوژیکی، داده‌های ریزمقیاس شده مدل اقلیمی تحت هر دو سناریو (RCP2,6 و RCP8.5) به مدل SWAT معرفی و این بار مدل برای ۲۵ سال آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) اجرا شد و سپس با استفاده از رواناب حاصل از خروجی آن، شاخص SRI محاسبه گردید. شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص SRI در دوره پایه در حوضه شماره ۹ دیده شد که برابر با عدد ۳/۰۲- است و بیشترین وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی در



شکل (۷): نمودار جعبه‌ای مقادیر شاخص SRI سالانه در دوره زمانی آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) تحت سناریوهای RCP

Figure (7): Box plot of annual SRI index values for the future period (2025-2049) under RCP scenarios



شکل (۸): نمودار جعبه‌ای مقادیر شاخص SRI در دوره زمانی پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۸)

Figure (8): Box plot of annual SRI index values for the base period (1996-2018)

علت مدل SWAT در بعضی از ایستگاه‌ها رواناب مشاهده‌ای را در اوج با دقت کمتری شبیه‌سازی می‌کند. همچنین نتایج شاخص SPI نشان داد که میانگین شدت خشکسالی هواشناسی حوضه در هر دو سناریو (RCP2.6 و RCP8.5) نسبت به دوره پایه ۱۷٪ افزایش می‌یابد؛ به طوری که با نتایج آذر و همکاران (۲۰۲۱) و صالح پورجم همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد. بررسی مقادیر SRI تولیدشده در دوره آینده نشان داد که شدت خشکسالی هیدرولوژیکی به طور میانگین در کل حوضه در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه ۳۸٪ افزایش خواهد یافت؛ این در حالی است که تعداد وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه تغییر فاحشی نداشته است که نتایج پورکریمی و همکاران (۲۰۱۸) نیز این امر را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج، RCP 8.5 نسبت به RCP 2.6 شدت خشکسالی بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به افزایش حداقل و حداکثر دما در دوره آینده، می‌توان انتظار داشت که تبخیر افزایش یابد که می‌تواند منجر به افزایش شدت خشکسالی و کاهش منابع آبی در حوزه آبخیز زربنه رود شود که متعاقباً باعث کاهش تخلیه این رودخانه به دریاچه ارومیه می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد مدل SWAT کاربرد رضایت‌بخشی را برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه زربنه رود دارد، زیرا ورودی‌های زیادی برای شبیه‌سازی رواناب در مدل SWAT وجود دارد که توسط مدل استفاده می‌شود. اما در مرحله صحت‌سنجی، نتایج به دست آمده از ایستگاه‌های جان آقا و صفاخانه رضایت‌بخش نبودند که ناشی از فعالیت‌های انسانی افسارگسیخته در بالادست این دو ایستگاه در طول دوره صحت‌سنجی است. نتایج به دست آمده از ورودی‌های مدل SWAT مشابه نتایج واله و همکاران (۲۰۲۱) است. نتایج تغییرات دمایی در آینده نشان داد که میانگین دمای سالانه در حوضه افزایش می‌یابد. همچنین بررسی تغییرات بارش سالانه ۳/۶٪ افزایش تحت RCP 2.6 و ۲/۹٪ کاهش تحت RCP 8.5 را نشان داد. این نتایج پیش‌بینی شده در دوره‌های آینده مشابه نتایج مطالعه انجام شده در حوضه زربنه رود توسط امامی و کخ (۲۰۱۸) بود. بر اساس نتایج شاخص SPI در بررسی شرایط خشکسالی هواشناسی نشان داده شد که در دوره پایه شدت خشکسالی طی سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۲ بیشتر و بارش کمتر بوده، به همین

منابع

1. Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S., and Yang, H., 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Journal of Water resources research*, 45(10), W10434.
2. Alizadeh, E., mousavi, H., Yarahmadi, J., and Faraji, A., 2020. Assessment the Impact of Climate Change on Precipitation in Non-Observed data using the CCT Toolkit Case study: Daryan sub basin. *Journal of Geography and Planning*, 24 (73), 323-305 (in Farsi).
3. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
4. Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, N., Kamali, B., and Mikayilov, F., 2017. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, 96, 181-198.
5. Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., and Jafari Gadaneh, M., 2021. Investigating the Effect of Climate Change on Future Temperature, Precipitation, and Droughts Using BNU-ESM and HadGEM2 Models. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 10(31), 95-110 (in Farsi).
6. Bahri, M., Dastorani, M., and Goodarzi, M., 2013. Drought prediction for 2011-2030 under the effect of climate change (case study: Eskandari watershed, Isfahan province). *The 9th Iranian National Watershed Management Science and Engineering Conference*, 9th and 9th of November 2013, Yazd University (in Farsi).
7. Boroughani, M., Hashemi, H., Hosseini, SH., Pourhashemi, S., and Berndtsson, R., 2020. Desiccating Lake Urmia: A New Dust Source of Regional Importance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(9), 1483-1487.
8. Ebrahimi Khusfi, Z., and Mirakbari, M., 2020. Assessment the Impact of Climate Change on the Drought of Jazmourian Wetland Using CanESM2 Model. *Desert Management*, 7(14), 149-166 (in Farsi).
9. Emami, F., and Koch, M., 2018. Evaluation of statistical-downscaling/bias-correction methods to predict hydrologic responses to climate change in the Zarrine river basin, Iran. *Climate*, 6(2): 30-30.
10. Freitas, A.A., Drumond, A., Carvalho, V.S.B., Reboita, M.S., Silva, B.C., and Uvo, C.B., 2022. Drought Assessment in São Francisco River Basin, Brazil: Characterization through SPI and Associated Anomalous Climate Patterns. *Atmosphere*, 13, 41.
11. Grillakis, M.G., 2019. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Science of The Total Environment*, 660, 1245-1255.
12. Guo, y., Lu, X., Zhang, J., Li, K., Wang, R., Rong, G., Liu, X., and Tong, Z., 2022. Joint analysis of drought and heat events during maize (*Zea mays* L.) growth periods using copula and cloud models: A case study of Songliao Plain. *Journal of Agricultural Water Management*, 259, 107238.
13. Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., and Kumar, R., 2020. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci. Rep.*, 10, 1–10.
14. Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., and Piontek, F., 2013. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth Syst. Dynam.*, 4(2), 219-236.
15. IPCC., 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge UK; New York, USA.
16. Javan, Kh., 2021. Investigation of meteorological drought in Urmia using SPI under climate change scenarios (RCP. *Journal of Climate Change Research*, 2(5), 81-94.
17. Jung, I.W., and Chang, H., 2012. Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the Willamette River Basin, Oregon, USA. *Theor Appl Climatol* 108:355–371.
18. Leng, G., Tang, Q., and Rayburg, S., 2015. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China. *Glob Planet Change*, 126:23–34.
19. McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the International 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Anaheim, CA, USA, 17–22 January. pp. 179–184.
20. Morid, S., Moghaddam, M., Paymozd, Sh., and Ghaemi, H., 2005. "Design of Tehran province drought monitoring system. Final Report. "Water Resources Management Co. (WRMC-Iran), 196p. (In Farsi)
21. Neitsch, S., Arnolad, J. G., Kiniry, J., Williams, J., and King, K., 2005. Soil and water assessment tool (SWAT) theoretical documentation. Blackland Reaserch Center, Texas Agricululture Experiment Station, Temple, Texas (BRC Report 02-02).
22. Padrón, R.S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne., A., Lawrence, D.M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H., and Seneviratne, S.I., 2020. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nat. Geosci.* 13, 477–481.
23. Pourkarimi, Z., Moghaddasi, M., Mohseni Movahed, A., and Delavar, M. A. J. I. D., 2018.

- The Effect of Climate Change on the Hydrological and Agricultural Drought Characteristics in Zarinehrud Basin Using SRI and SSWI Indices and SWAT Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(5), 11451157. (In Farsi).
24. Salehpourjam, A., Mohseni Saravi, M., and Khalighi, Sh., 2015. Investigation of Climate Change Effect on Drought Characteristics in the Future Period using the HadCM3 model (Case Study: Northwest of Iran). *Journal of Range and Watershed Management*. 67 (4), 537-548 (in Farsi).
 25. Satoh, Y., Yoshimura, K., Pokhrel, Y., Kim, H., Shiogama, H., Yokohata, T., Hanasaki, N., Wada, Y., Burek, P., Byers, E., Schmied, H.M., Gerten, D., Ostberg, S., Gosling, S.N., Boulange, J. E. S., and Oki, T., 2022. The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. *Nature Communications*, 13(1), 3287.
 26. Shokrikocheh, S., and Behnia, A., 2013. Drought Monitoring and Prediction of Khuzestan Province, Iran Drought Using SPI drought Index and Markov Chain, *Journal of Irrigation Science and Engineering*, No. 3, pp. 1-12 (in Farsi).
 27. Shukla, S.H., and Wood A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35: 1-7.
 28. Vaghefi, S.A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, h., and Abbaspor, K.C., 2019. The future of extreme climate in Iran. *Sci Rep* 9, 1464.
 29. Valeh, S., Motamedvairi, B., Kiadaliri, H., and Ahmadi, H., 2021. Hydrological simulation of Ammameh basin by artificial neural network and SWAT models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123, 103014.
 30. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., and López-Moreno, J.I. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23:1696–1718.
 31. Vu, M.T., Raghavan, V.S., and Liong, S.Y., 2015. Ensemble climate projection for hydrometeorological drought over a river basin in Central Highland, Vietnam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(2), 427-433.
 32. Wilhite, D.A., and Glantz, M.H., 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int* 10(3):111–120.
 33. Yu, Y., Liu, J., Yang, Z., Cao, Y., Chang, J., and Mei, C., 2018. Effect of climate change on water resources in the Yuanshui River Basin: a SWAT model assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11): 270-270.
 34. Zhao, L., Lyu, A., Wu, J., Hayes, M., Tang, Z., He, B., Liu, J., and Liu, M., 2014. Impact of meteorological drought on streamflow drought in Jinghe River Basin of China. *Chin Geogr Sci* 24:694–705.

Investigating Meteorological and Hydrological Drought in Zarrineh River Basin

Maliheh Rahvareh¹, Baharak Motamedvaziri^{2*}, Alireza Moghaddamnia³, and Ali Moridi⁴

Received: 06/01/2023

Accepted: 16/02/2023

Extended Abstract

Introduction: Affecting the hydrologic cycle, climate change may increase the chances of natural hazards occurrence, including drought, which is considered as one of the most destructive types of such hazards. On the other hand, considering the increasing trend of global temperature and its impact on local climates, climate change is predicted to alter the frequency and intensity of extreme events such as drought. Meanwhile, General Circulation Models (GCMs) have been used in recent decades to predict future climate changes under different emission scenarios, and various drought monitoring indicators have been developed to assess drought.

1. Ph.D Student of Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran

2. Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; bmvaziri@gmail.com

3. Associate Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, karaj.

4. Assistant professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

DOI: 10.22052/deej.2023.248790.1005

Zarrineh River basin is regarded as one of the main sub-basins supplying the inflow of water to Lake Urmia, which is threatened by numerous long-term droughts. Therefore, as the drying of the lake may bring about a wide range of economic, social, and environmental consequences for the region, monitoring drought and implementing water resources management programs play pivotal roles in preventing the lake to get dried.

Material and methods: Located northwest of Iran, Zarrineh River basin covers an area of 12512 km², being bounded by Iranian West and East Azerbaijan provinces and the Kurdistan province. This study used the meteorological data, including precipitation rate, and minimum and maximum daily temperature collected from four synoptic stations during the 1990-2018 period to simulate runoff. Also, the monthly runoff rate was collected from five hydrometric stations during the 1996-2017 period to calibrate and validate the SWAT model. Moreover, the data obtained from the general circulation model (HADGEM2-ES) and statistical downscaling methods (CCT) were used to simulate precipitation and temperature under RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios for the future period (2025-2049). Finally, the SPI was applied to evaluate the meteorological drought in the base and the future periods, and the SRI obtained from the outputs of the SWAT model was used to evaluate the hydrological drought.

Results: The data collected from five hydrometric stations were parameterized and calibrated on discontinuous stream networks. Accordingly, it was found that the R^2 values varied from 0.52 and 0.70 for calibration and from 0.44 to 0.73 for validation. However, the NSE values varied from 0.52 to 0.64 for calibration and from 0.42 to 0.64 for the validation stage. Moreover, the model's outputs were found to be satisfactory for most hydrometric stations, indicating the applicability of the SWAT model to the ZRB.

On the other hand, based on the CCT model under the RCP8.5, the results of temperature and precipitation variations throughout the 2025-2049 period indicated that compared to the observation period, annual precipitation would decrease by 2.9% in the future period, and the annual minimum and maximum temperature rates would increase by 2.4°C and 3.6°C, respectively. Furthermore, the analysis of the annual temperature and precipitation changes under the RCP2.6 revealed that compared to the observation period, the precipitation rate would increase by 3.6%, and the annual minimum and maximum temperature would increase by 1.8°C and 3°C, respectively.

Moreover, the results of the SPI analysis for the future period under the RCP8.5 indicated the occurrence of the extreme drought event. However, while the frequency of severe drought did not change significantly for the future period under both scenarios, the frequency of moderate drought decreased for the future period compared to the base period. On the other hand, the most extreme hydrological drought in terms of the SRI was observed in basin 9 during the base period (equal to -3.02). It was also found that the most hydrological drought occurred in basins 10 and 2 throughout the base period. Furthermore, the most extreme hydrological drought for the future period was found as -4.13 in sub-basin 8 under the RCP8.5, which is greater than that of the base period.

Discussion and conclusion: The results suggested the satisfactory applicability of the SWAT model for simulating runoff in Zarrineh River basin, as the model considers almost all the physical conditions of the basin for the simulation process, possessing a wide variety of inputs to do so. The results of the analysis of temperature changes for the future period showed that the average minimum and maximum annual temperature would increase in the basin.

Moreover, the results of the analysis of annual temperature and precipitation changes under the RCP2.6 revealed that compared to the observation period, the precipitation rate would increase by 3.6%, and the annual minimum and maximum temperature rate would increase by 1.8°C and 3°C in future, respectively. On the other hand, according to the results of SPI and SRI analysis for the future period, it was found that the intensity of meteorological and hydrological drought would increase on average in the basin under both scenarios (RCP2.6 and RCP8.5). Also, the results of the RCP8.5 suggested the possibility of a more severe drought compared to the RCP8.5.

Considering an increase in minimum and maximum temperature found for the future period, we can expect an increase in the evaporation rate, probably leading to an increase in the severity of drought and a decrease in water resources of the Zarrineh River basin, which, in turn, will reduce the discharge of the basin's water flow to the Urmia Lake.

Keywords: Climate Change, Drought, Zarrineh River Basin, SPI, SRI, SWAT.