

## ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی و پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه نکا طی دوره‌های آتی

علی باب‌الحکمی<sup>۱</sup>، محمدعلی غلامی سفیدکوهی<sup>۲\*</sup>، علیرضا عمادی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۲/۱۹)

## چکیده

مطالعات متعدد نشان داده‌اند تغییرات آب‌وهوایی تأثیرات شدیدی بر منابع آب موجود در سراسر جهان خواهد گذاشت. با توجه به تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر وقوع خشکسالی‌ها و جریان رودخانه، ضروری است که وقوع خشکسالی و وضعیت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم بررسی شود. در پژوهش حاضر به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شاخص خشکسالی SPI و رواناب حوضه رودخانه نکا در استان مازندران پرداخته شد. به این منظور، از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی بارکلا، پجیم، سفیدچاه، گلورد و تیرتاش استفاده شد. داده‌های تاریخی آبدهی رودخانه نکا نیز در محل سد گلورد از ایستگاه هیدرومتری گلورد به دست آمد. سپس، پارامترهای اقلیمی دما و بارش طی دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۸۱، تحت سه سناریوی اقلیمی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 برای حوضه رودخانه نکا شبیه‌سازی شد. برای تعیین مقادیر میانگین پارامترهای اقلیمی بارش و دما، از روش خطوط هم‌باران و برای شبیه‌سازی رواناب از مدل IHACRES استفاده شد. نتایج نشان داد وقایع خشکسالی طی دوره‌های آتی در هر سه سناریوی اقلیمی نسبت به دوره پایه افزایش یافته و دوره‌های مرطوب و نرمال نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. براساس یافته‌ها، طی دوره‌های آتی میانگین آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، میانگین آورد سالانه رودخانه نکا در محل سد گلورد از ۹۵ میلیون مترمکعب طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۴، به ۵۴ تا ۸۱ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت. بر این اساس، باید با برنامه‌ریزی دقیق‌تر ضمن کاهش آثار منفی دوره‌های خشکسالی و کاهش جریان رودخانه نکا، از تنش‌های اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی و فرهنگی جلوگیری شود.

کلیدواژگان: سد گلورد، شاخص خشکسالی، SPI، IPCC5، IHACRES

## مقدمه

مطالعات متعدد نشان داده‌اند تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند تأثیرات سوء بر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، اقتصاد و زندگی انسان‌ها در سراسر جهان داشته باشد [۱]. برای سازگاری با تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی باید شناخت مناسبی از وضعیت تغییرات آب‌وهوایی و تأثیر آن بر وقایع خشکسالی و منابع آب داشته باشیم. از این‌رو، باید تأثیر تغییرات اقلیمی بر خشکسالی و رواناب بررسی شود تا بتوان برای آینده برنامه‌ریزی کرد.

خشکسالی پرهزینه‌ترین فاجعه طبیعی است، که می‌تواند تأثیراتی سوء بر کشاورزی، محیط زیست، اقتصاد و زندگی انسان‌ها بگذارد [۱]. بنابراین، باید تأثیر تغییرات اقلیمی بر پارامترهای هواشناسی و خشکسالی بررسی شود. پژوهش‌های متعددی به منظور بررسی تأثیرات وقوع خشکسالی در جهان و ایران انجام شد. طی پژوهشی هانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی شدت، مدت و گسترش خشکسالی در حوضه رودخانه لانگات مالزی پرداختند. در پژوهش یادشده شاخص‌های RDI و SPI نشان‌دهنده روند صعودی خشکسالی‌ها در این منطقه است [۲]. علی‌پور و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه رودخانه ویلامیت در شمال غرب آمریکا را بررسی کردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد شدت و مدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در حوضه یادشده افزایش خواهد یافت [۳]. لی و همکاران (۲۰۱۷) طی پژوهشی در چین، تغییرات در ویژگی‌های خشکسالی (فراوانی وقوع خشکسالی، مدت و شدت) برای سناریوی اقلیمی RCP8.5 طی سال‌های آتی (۲۰۱۰-۲۰۹۹) را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تحت سناریوی RCP8.5 برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۹۹ شدت، مدت و تعداد خشکسالی‌ها افزایش خواهد یافت [۴]. گل‌محمدی و مساح‌بوانی (۲۰۱۱) طی پژوهشی در حوضه قره‌سو نشان دادند طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شدت خشکسالی‌ها نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد [۵]. خاشعی و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی توانایی مدل SVM در ریزمقیاس‌نمایی بارش در ایستگاه هواشناسی بیرجند نتیجه گرفتند که مدل SVM توانایی خوبی در شبیه‌سازی بارش روزانه و ماهانه در این ایستگاه دارد. همچنین، مقدار شاخص‌های ارزیابی  $R^2$  و RMSE برای بارش روزانه در این ایستگاه در بهترین حالت ۰/۴۸ و

۱/۵ میلی‌متر در روز به دست آمد [۶]. پژوهش هاشمی‌عنا و همکاران (۲۰۱۷) نشان‌دهنده افزایش ۲۰ درصدی طول دوره خشک در جنوب غربی ایران تا سال ۲۰۵۰ است [۷]. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب و منابع آب اهمیتی زیادی دارد. در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی برای بررسی اثر تغییرات آب‌وهوایی بر جریان سطحی صورت گرفته است. در پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر جریان سطحی حوضه دریاچه ارومیه بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد جریان سطحی در این حوضه تحت سناریوی A2، ۲۴/۶ درصد و تحت سناریوی B2 به میزان ۴/۶ درصد کاهش خواهد یافت [۸]. سادات موسوی و معروفی (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای پاسخ هیدرولوژیکی جریان رودخانه حوضه آبریز سد دز به تغییر اقلیم را بررسی کردند. آنها گفتند که بررسی جریان دهه‌های گذشته حوضه آبریز سد دز تغییرات شدید جریان را به صورت تدریجی و ناگهانی نشان می‌دهد، که این تغییرات بیشتر در جهت کاهش پتانسیل رواناب حوضه است. همچنین، بررسی جریان آینده نیز با سناریوهای مختلف، کاهش جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به این شواهد به نظر می‌رسد این حوضه در آینده با کم شدن آورد روبه‌رو خواهد شد [۹]. ثانی‌خانی و همکاران (۲۰۱۶) طی پژوهشی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبخیز قره‌چای استان مرکزی پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد مقدار حداکثر دبی جریان در اقیانوس‌های ۱۴۰۰، ۱۴۳۵ و ۱۴۷۰ به ترتیب به میزان ۱۴، ۲۷ و ۴۳ درصد در مقایسه داده‌های تاریخی کاهش خواهد یافت [۱۰]. صادقی و همکاران (۲۰۱۵) با ارزیابی کارایی مدل IHACRES در مناطق مرطوب (حوضه ناورود، گیلان) گفتند که مدل IHACRES در این حوضه با NSE، ۰/۵۷ و BIAS، ۸/۵۳ میلی‌متر در سال طی دوره واسنجی و با NSE، ۰/۴۸ و BIAS، ۱۴/۹ میلی‌متر در سال طی دوره اعتبارسنجی توانایی تقریباً مناسبی در پیش‌بینی رواناب در این حوضه دارد [۱۱]. چن و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی و رواناب در چین را بررسی کردند. آنها گفتند که میزان دما بین سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ میلادی ۰/۷۱-۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همچنین، بارش ۳/۲-۴ درصد به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد طی دوره مد نظر در حوضه‌های شرق چین شاهد افزایش رواناب خواهیم بود [۱۲].

حداقل مشاهداتی ۲۰/۳۱ میلیون مترمکعب (سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۸۱) و حداکثر مشاهداتی ۲۰۰/۷ میلیون مترمکعب (سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱). میانگین سالانه تبخیر از سطح مخزن و بارندگی در محل مخزن سد گلورد به ترتیب ۱۰۱۴ و ۹۰۴ میلی‌متر است.

#### داده‌های دوره تاریخی

در پژوهش حاضر از داده‌های تاریخی بارش ماهانه و میانگین دمای ماهانه طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و آبدهی ماهانه رودخانه در محل سد گلورد از ایستگاه هیدرومتری گلورد طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۴ استفاده شد. همچنین، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی بارکلا، پچیم، سفیدچاه، گلورد و تیرتاش استفاده شد. داده‌های اقلیمی مورد نیاز به روش درون‌یابی هم‌باران محاسبه شد. برای محاسبه بارش به روش هم‌باران، ابتدا خطوط هم‌باران بین ایستگاه‌های هواشناسی رسم شده و مساحت بین خطوط هم‌باران حساب شد. سپس، متوسط میانگین بارندگی از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

$P_i$  متوسط بارندگی روی هر یک از مساحت‌های  $A_i$  (میانگین بارندگی دو خط هم‌باران مجاور)،  $A_i$  مساحت محصور بین دو خط هم‌باران مجاور و  $\sum A_i$  کل مساحت حوضه است. شکل ۱ منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد.

#### مدل گردش عمومی و سناریوهای اقلیمی

ارزیابی تغییرات اقلیمی توسط مدل گردش عمومی  $Can^1$  EMS2 انجام شد. این مدل توسط مرکز تحلیل و مدل‌سازی اقلیمی محیط زیست کانادا<sup>۲</sup> (CCCMA) توسعه یافته است. ابعاد شبکه‌بندی کره زمین در این مدل  $۶۴ \times ۱۲۸$  سلول و هر سلول  $۲/۸۱۲۵^*۲/۸۱۲۵$  درجه است. داده‌های NCEP<sup>۳</sup> و تاریخی این مدل از سال ۱۹۶۱-۲۰۰۵ و داده‌های سناریوهای اقلیمی از سال ۲۰۰۶-۲۱۰۰ است. این مدل از سه سناریوی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) گزارش پنجم شامل سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6)، سناریوی حد واسطه (RCP4.5) و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) استفاده می‌کند [۱۵ و ۱۶].

کوموزپ و چانگ (۲۰۱۴) تأثیرات تغییر اقلیم بر رواناب و شاخص خشکسالی حوضه گنومهو در کره جنوبی را بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد رواناب تا حدود ۹ درصد در دوره آبی افزایش خواهد یافت. همچنین، تا سال ۲۰۶۰ شاهد افزایش وقایع خشکسالی خواهیم بود [۱۳]. طی پژوهشی در استرالیا روی حوضه رودخانه هاروی، تأثیر تغییرات اقلیم بر رواناب رودخانه تحت شرایط تغییرات آب‌وهوایی ارزیابی شد. به این منظور، با استفاده از سناریوهای گزارش پنجم شامل سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 جریان رودخانه بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد جریان سالانه تحت هر سه سناریو تا نیمه قرن کاهش خواهد یافت و این کاهش در سناریوی RCP4.5 بیشتر خواهد بود و در انتهای قرن این کاهش جریان در سناریوهای مختلف تشدید می‌شود، به طوری که تا نیمه قرن، ۱۷-۲۷ درصد و تا انتهای قرن، ۲۳-۵۲ درصد جریان سالانه رودخانه کاهش خواهد یافت [۱۴].

با توجه به تغییرات آب‌وهوایی و اهمیت ارزیابی دقیق از وقوع خشکسالی و جریان آب سطحی و حجم آب مخازن برای برنامه‌ریزی منابع آب، در پژوهش حاضر اثر تغییرات آب‌وهوایی بر خشکسالی و رواناب حوضه رودخانه نکا بررسی شد.

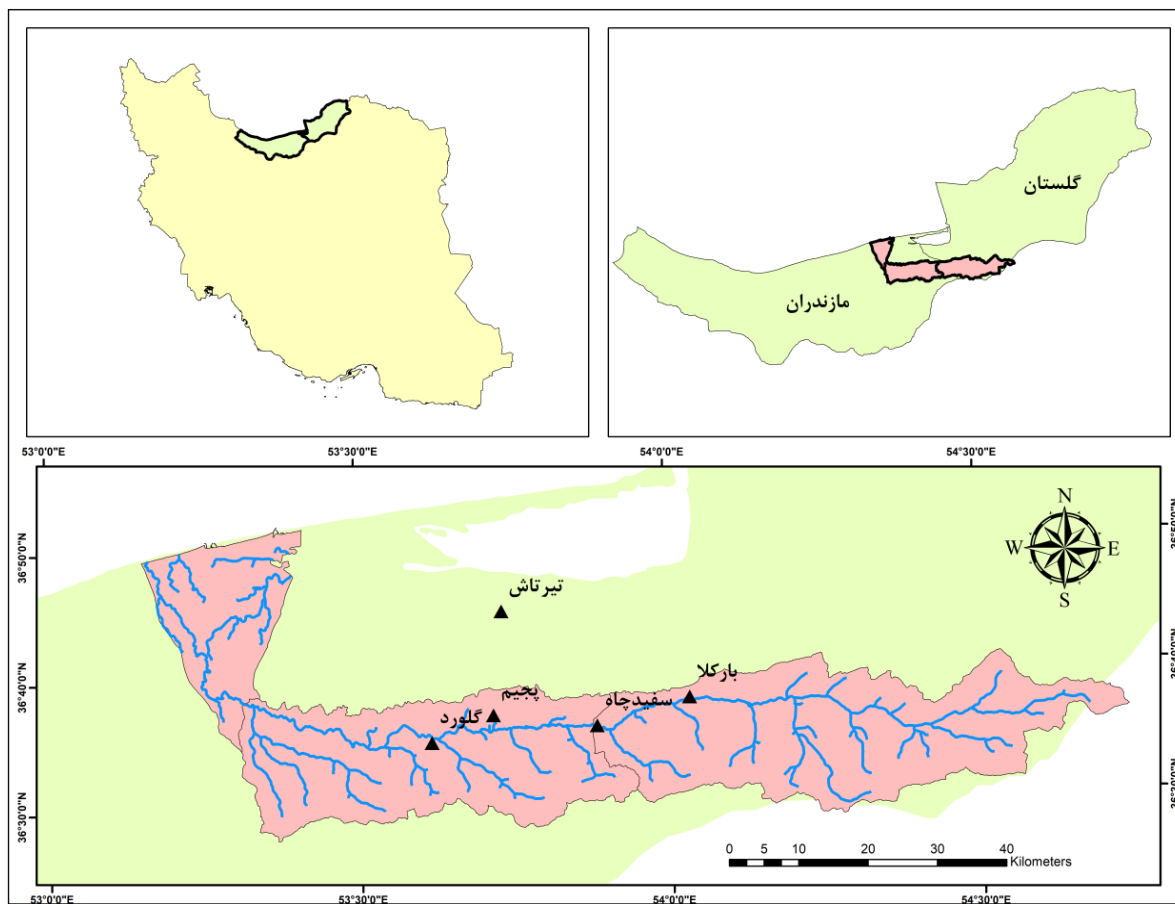
#### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در حوضه رودخانه نکا انجام شد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر تغییرات آب‌وهوایی بر شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و رواناب حوضه رودخانه نکا در محل سد گلورد انجام شد. حوضه رودخانه نکا در شرق استان مازندران بین طول جغرافیایی ۲۳ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۲۴ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی واقع شده است. رودخانه نکا از ارتفاعات شاه‌کوه در جنوب گرگان سرچشمه گرفته و بعد از دریافت شاخه‌های فرعی دیگری پس از گذر از مرکز شهر نکا، در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. سد گلورد در منطقه گلورد شهرستان نکا برای ذخیره آب این رودخانه احداث شده است. مساحت حوضه آبریز تا محل سد گلورد ۱۴۸۰ کیلومترمربع، میانگین ارتفاعی حوضه آبریز ۱۹۳۰ متر از سطح دریا، میانگین بارندگی سالانه حوضه آبریز ۵۵۰ میلی‌متر، میانگین آورد سالانه به داخل مخزن سد گلورد (طی دوره آماری ۱۳۴۸-۱۳۴۹ تا ۱۳۸۵-۱۳۸۶)، ۱۱۲ میلیون مترمکعب،

1. Canadian Earth System Model

2. Canadian Center for Climate Modeling and Analysis Canada

3. National Centers for Environmental Prediction



شکل ۱. منطقه مطالعه شده

#### ریزمقیاس‌نمایی

ماشین بردار پشتیبان (SVM<sup>۱</sup>) نخستین بار توسط وپنیک و کوتز در سال ۱۹۹۵ معرفی شد. در این روش به خلاف الگوریتم‌های شبیه‌سازی هوشمند کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی که معمولاً قدرمطلق خطا یا مجموع مربعات خطای داده‌های آموزشی را حداقل می‌کنند، ماشین بردار پشتیبان خطای ساختاری را حداقل‌سازی می‌کند. در مدل‌های کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار شبکه قبل از آموزش مشخص است و عملاً بهینه نمی‌شود، ولی در مدل‌های SVM ساختار شبکه نیز به همراه وزن‌ها، بهینه می‌شود [۱۷]. با استفاده از روش SVM، مدل‌های گردش عمومی ایستگاه‌های هواشناسی مد نظر ریزمقیاس شدند. به این منظور، ابتدا با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، خروجی مدل Can EMS2 برای دوره پایه ریزمقیاس شد. برای انجام ریزمقیاس‌نمایی از متغیرهای

NCEP، شامل ۲۶ متغیر اتمسفری که توسط مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی کانادا ارائه شده است، استفاده شد. متغیرهای NCEP از طریق سایت <http://climate-scenarios.canada.ca/?page=downscaling> قابل دسترسی است. برای ریزمقیاس‌نمایی، ابتدا همبستگی متغیرهای NCEP و داده‌های مشاهداتی بررسی شد و متغیرهایی که همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی داشتند، انتخاب شدند. سپس، توانایی مدل SVM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره پایه ارزیابی شد. بعد از ارزیابی توانایی مدل SVM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دوره پایه، از متغیرهای RCP به عنوان متغیر مستقل (پیش‌بینی‌کننده) استفاده شد و مقادیر پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل گردش عمومی Can EMS2، تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، برای دوره‌های آتی شامل ۳ دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ برآورد شد.

1. Support Vector Machines

هیدروگراف است. ابتدا در مدول غیرخطی، بارندگی  $r_k$  و  $t_k$  در هر گام زمانی  $k$  به بارندگی مؤثر  $u_k$  تبدیل می‌شود و سپس، به وسیله مدول خطی، هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود [۱۹]. داده‌های ورودی مورد نیاز برای مدل سری زمانی بارش، دمای میانگین یا تبخیر و جریان سطحی است. گام‌های زمانی می‌تواند از یک دقیقه تا ماهانه در نظر گرفته شود. گام‌های زمانی در نظر گرفته‌شده پارامترهای ورودی و جریان سطحی باید مشابه باشند. ساختار کلی مدل IHACRES در شکل ۲ آمده است. برای واسنجی و اعتبارسنجی این مدل از داده‌های تاریخی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۴ میلادی استفاده شد، که ۶۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل IHACRES و ۴۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل IHACRES استفاده شد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES، با استفاده از داده‌های اقلیمی تولیدشده برای دوره آتی، رواناب تولیدی در این حوضه طی دوره‌های آتی محاسبه و ارزیابی شد.

### شاخص‌های آماری

برای ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای کل (BIAS)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شده است. ضریب تعیین (رابطه ۳)، یک شاخص بدون بعد است که بهترین مقدار آن یک است. شاخص RMSE (رابطه ۴)، به عنوان معیاری در نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده به کار می‌رود. این معیار هرچه قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. شاخص BIAS (رابطه ۵)، نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی‌شده توسط مدل بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده بوده است. معیار NSE (رابطه ۶) یک شاخص بدون بعد است که هرچه قدر به یک نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد تناسب بین داده‌های مشاهداتی بیشتر است. اگر مقدار شاخص NSE بیش از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی مدل خوب و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی مدل رضایت‌بخش است. شاخص MAE (رابطه ۷)، برای مقایسه خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده به کار می‌رود که

### نمایه بارندگی استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPI)

نمایه بارندگی استاندارد شده یکی از شاخص‌های خشکسالی پرکاربرد است که توسط مکی و همکاران [۱۸] ارائه شد. رابطه ۲ نمایه بارندگی استاندارد (SPI) را نشان می‌دهد. در این شاخص از تابع چگالی گاما و گاهی از تابع پیرسون برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده می‌شود. سپس، براساس منحنی احتمال نرمال مقادیر آن محاسبه می‌شود. در این شاخص فقط از پارامتر اقلیمی بارش استفاده می‌شود. این شاخص را می‌توان در گام‌های زمانی مختلف از یک ماه تا ۴۸ ماه محاسبه کرد. پژوهش حاضر از گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده شده است. SPI شش‌ماهه، جزء نمایه SPI کوتاه‌مدت است. نمایه SPI کوتاه‌مدت حساسیت بیشتری به تغییرات شرایط رطوبتی دارد، که برای پایش شرایط رطوبتی و تغییرات کوتاه‌مدت (خشکسالی کشاورزی)، مناسب است. SPI ۱۲ ماهه، الگوی بارندگی‌های بلندمدت سالانه را منعکس می‌کند. SPI ۲۴ ماهه، نیز یک نمایه SPI بلندمدت است. SPI در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت نوسان‌های زیادی دارد و در مقیاس زمانی بلندمدت این نوسان‌ها کاهش می‌یابد و نشان می‌دهد SPI کوتاه‌مدت نسبت به شرایط رطوبتی بسیار حساس است و به کوچک‌ترین تغییر در بارندگی ماهانه پاسخ می‌دهد، اما تداوم خشکسالی‌های کوتاه‌مدت کم است و در مقیاس SPI بلندمدت تعداد خشکسالی‌ها کم، ولی مدت تداوم خشکسالی‌ها طولانی‌تر است.

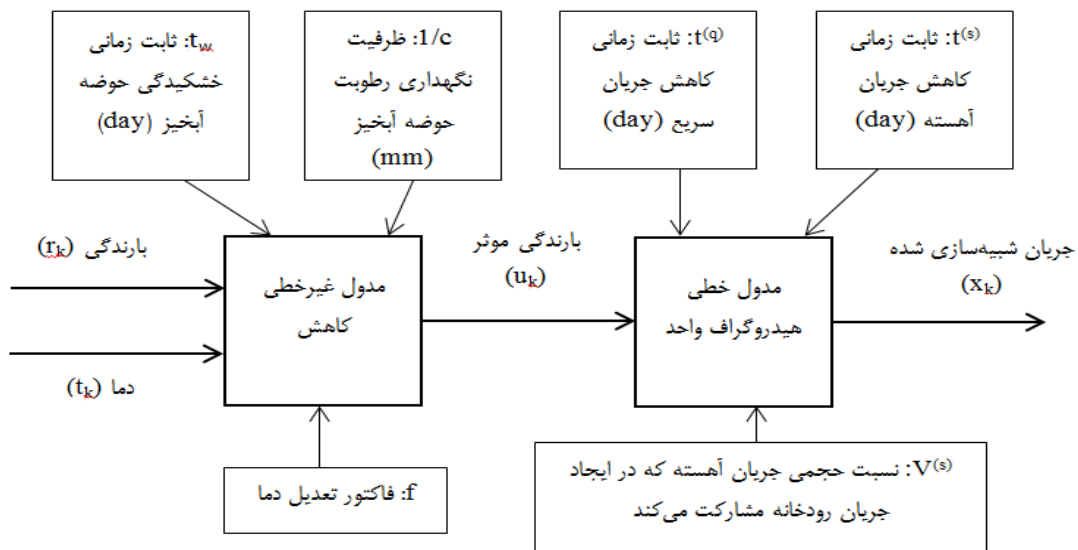
$$SPI_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (2)$$

$P_i$ ، مقدار بارش در زمان مد نظر،  $\bar{P}$ ، متوسط بارندگی در دوره مد نظر،  $\sigma$ ، انحراف استاندارد بارندگی در دوره مد نظر است.

### مدل بارش-رواناب IHACRES

مدل بارش-رواناب IHACRES نوعی مدل یکپارچه مفهومی-متریک است که توسط دانشگاه ملی استرالیا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی انگلستان توسعه یافته است. این مدل براساس دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی

1. Standardized Precipitation Index



شکل ۲. ساختار کلی مدل بارش - رواناب IHACRES [۲۰]

و شبیه‌سازی شده در حوضه رودخانه نکا را طی دوره پایه نشان می‌دهد. مقایسه آماری داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل SVM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی است، که با نتایج خاشعی و همکاران [۶] همخوانی دارد.

جدول ۱. آماره‌های مقایسه‌ای مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده ماهانه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه برای حوضه رودخانه نکا

| R    | NSE  | BIAS  | MAE   | RMSE  | R <sup>2</sup> |         |
|------|------|-------|-------|-------|----------------|---------|
| ۰/۹۹ | ۱/۰  | -۰/۱۴ | ۰/۸۷  | ۱/۱   | ۱/۰            | دما     |
|      |      |       |       |       |                | میانگین |
| ۰/۸۱ | ۰/۸۶ | ۲/۷۳  | ۱۴/۲۰ | ۱۹/۸۶ | ۰/۹۶           | بارش    |

### خشکسالی

در پژوهش حاضر شاخص خشکسالی SPI طی دوره پایه و دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ بررسی شد. فراوانی وقایع خشکسالی SPI در مقیاس‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای دوره پایه و آتی در حوضه رودخانه نکا در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، درصد فراوانی شاخص خشکسالی SPI و مقادیر شاخص خشکسالی SPI به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

### دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹

در دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ بیشترین فراوانی شاخص خشکسالی SPI برای هر سه حالت میانگین متحرک ۶، ۱۲ و

هرچقدر به صفر نزدیک‌تر باشد، مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به هم نزدیک‌ترند. ضریب همبستگی (رابطه ۸) ارتباط خطی بین متغیرها را اندازه‌گیری می‌کند که هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد، نتایج شبیه‌سازی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i \cdot S_i}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n O_i^2 + \sum_{i=1}^n S_i^2)}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{\sum (O_i - S_i)}{n} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2)}} \quad (8)$$

در این معادلات  $O_i$  مقادیر مشاهده شده،  $S_i$  مقادیر برآورد شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{S}$  و  $n$  تعداد داده‌های میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده است.

### یافته‌ها

#### شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی

جدول ۱ شاخص‌های آماری بارش ماهانه اندازه‌گیری شده

طی دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. وقایع ترسالی نیز طی دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد وقایع ترسالی بسیار شدید طی دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. مقادیر شدت شاخص ترسالی طی دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ بین ۲/۰۴ تا ۲/۵۶ متغیر است. همچنین، در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5، شاخص ترسالی SPI ۲۴ ماهه اتفاق نخواهد افتاد.

#### دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱

بررسی نتایج نشان می‌دهد همانند دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۶۰، بیشترین فراوانی وقایع شاخص خشکسالی SPI در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۱ مربوط به حالت نرمال است. وقایع خشکسالی طی دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱ افزایش خواهد یافت و درصد فراوانی خشکسالی در دوره آتی بین ۱۳ تا ۲۱ درصد متغیر است. شدت خشکسالی بسیار شدید در این دوره بین ۲/۰۳ تا ۲/۳۶ متغیر است. وقایع ترسالی در دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱ افزایش می‌یابد، اما وقایع خشکسالی بسیار شدید کاهش خواهد یافت. درصد فراوانی شاخص ترسالی طی دوره آتی بین ۱۳ تا ۲۱ درصد متغیر است. مقادیر شدت ترسالی بسیار شدید بین ۲/۰۸ تا ۲/۴۸ متغیر خواهد بود.

#### رواناب

##### واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES از داده‌های تاریخی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴ استفاده شد، به طوری که ۶۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۴۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده شد. شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی جریان توسط مدل IHACRES و مقادیر جریان اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. با توجه به شاخص‌های آماری (جدول ۵)، مدل IHACRES در دوره واسنجی و اعتبارسنجی توانایی رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی جریان حوضه سد گلورد داشته است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش صادقی و همکاران [۱۱]، همخوانی دارد.

۲۴ ماهه در دوره پایه و آتی مربوط به حالت نرمال است. بررسی نتایج نشان می‌دهد وقایع خشکسالی هواشناسی SPI در دوره ۲۰۱۹-۲۰۳۹ نسبت به دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ افزایش خواهد یافت. درصد فراوانی وقایع خشکسالی متحرک ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دوره پایه ۴ تا ۸ درصد و در دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۱۴ تا ۱۷ درصد متغیر خواهد بود. با توجه به جدول ۴ شدت خشکسالی بسیار شدید در دوره ۲۰۱۹-۲۰۳۹ تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، بین ۲/۱۷ تا ۲/۲۲ متغیر خواهد بود. همچنین، بررسی ترسالی در این دوره نشان می‌دهد دوره‌های تقریباً تر و ترسالی شدید نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت و وقایع ترسالی بسیار شدید در دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در دوره پایه درصد فراوانی وقایع ترسالی ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه بین ۸ تا ۱۵ درصد و در دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۱۵ تا ۲۱ درصد متغیر است. بیشترین کاهش تعداد وقایع ترسالی بسیار شدید مربوط به شاخص خشکسالی SPI ۱۲ ماهه است که فقط در این دوره یک واقعه ترسالی خیلی شدید اتفاق افتاد است. مقادیر میانگین شاخص ترسالی بسیار شدید در دوره آتی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۲/۰۴ تا ۲/۴۸ متغیر است. مقادیر میانگین شدت ترسالی بسیار شدید در دوره پایه بین ۲/۹۵ تا ۳/۳۴ متغیر بوده است.

#### دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰

در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰، شاخص خشکسالی نرمال بیشترین فراوانی را دارد. شاخص خشکسالی SPI در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. بررسی وقایع خشکسالی نشان می‌دهد درصد فراوانی خشکسالی SPI شش‌ماهه در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۱۳ تا ۱۷ درصد، شاخص خشکسالی SPI ۱۲ ماهه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۱۲ تا ۱۵ درصد و شاخص خشکسالی SPI ۲۴ ماهه بین ۱۲ تا ۱۸ درصد متغیر خواهد بود. مقادیر شاخص خشکسالی بسیار شدید تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۲/۰۱ تا ۲/۵۸ متغیر است. وقایع ترسالی نیز

جدول ۲. فراوانی شاخص خشکسالی SPI در مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۶ و ۲۴ ماهه برای دوره پایه و آتی در حوضه رودخانه نکا

| SPI     | رخداد              | RCP2.6    |           |           | RCP4.5    |           |           | RCP8.5    |           |           | دوره پایه |
|---------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|         |                    | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۵۵-۱۹۸۵ |
| ۶ ماهه  | خشکسالی بسیار شدید | ۳         | ۷         | ۳         | ۵         | ۲         | ۷         | ۴         | ۶         | ۳         | ۰         |
|         | خشکسالی شدید       | ۱۱        | ۱۰        | ۱۳        | ۱۱        | ۱۱        | ۱۳        | ۱۴        | ۱۰        | ۱۳        | ۴         |
|         | خشکسالی ملایم      | ۲۸        | ۲۲        | ۱۷        | ۲۶        | ۲۹        | ۱۵        | ۱۷        | ۱۵        | ۲۵        | ۱۱        |
|         | نزدیک به نرمال     | ۱۵۶       | ۱۶۳       | ۱۶۸       | ۱۵۴       | ۱۵۷       | ۱۷۲       | ۱۶۶       | ۱۷۱       | ۱۵۴       | ۱۳۴       |
|         | تقریباً تر         | ۳۰        | ۳۴        | ۲۵        | ۳۷        | ۲۹        | ۲۵        | ۲۶        | ۲۶        | ۳۰        | ۱۰        |
|         | ترسالی شدید        | ۱۵        | ۱۰        | ۱۴        | ۱۰        | ۱۵        | ۹         | ۱۵        | ۹         | ۲۰        | ۸         |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۴         | ۱         | ۷         | ۴         | ۴         | ۶         | ۵         | ۱۰        | ۲         | ۸         |
| ۱۲ ماهه | خشکسالی بسیار شدید | ۷         | ۱۰        | ۷         | ۲         | ۱         | ۳         | ۳         | ۱۱        | ۲         | ۰         |
|         | خشکسالی شدید       | ۷         | ۷         | ۱۳        | ۱۲        | ۱۰        | ۱۳        | ۱۱        | ۵         | ۱۵        | ۰         |
|         | خشکسالی ملایم      | ۲۴        | ۱۵        | ۱۳        | ۳۴        | ۲۴        | ۲۱        | ۳۴        | ۱۳        | ۲۵        | ۱۱        |
|         | نزدیک به نرمال     | ۱۶۶       | ۱۶۸       | ۱۷۰       | ۱۵۰       | ۱۶۲       | ۱۶۵       | ۱۴۹       | ۱۶۸       | ۱۴۹       | ۱۴۵       |
|         | تقریباً تر         | ۲۰        | ۲۹        | ۲۵        | ۲۵        | ۲۳        | ۱۷        | ۲۷        | ۲۵        | ۳۶        | ۱         |
|         | ترسالی شدید        | ۱۰        | ۱۱        | ۶         | ۱۳        | ۱۷        | ۱۲        | ۱۶        | ۱۶        | ۱۲        | ۰         |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۷         | ۱         | ۷         | ۵         | ۴         | ۱۰        | ۱         | ۳         | ۲         | ۱۲        |
| ۲۴ ماهه | خشکسالی بسیار شدید | ۳         | ۱۰        | ۸         | ۰         | ۱         | ۲         | ۴         | ۱۳        | ۱         | ۰         |
|         | خشکسالی شدید       | ۹         | ۹         | ۸         | ۹         | ۹         | ۱۰        | ۱۳        | ۶         | ۱۷        | ۰         |
|         | خشکسالی ملایم      | ۲۰        | ۱۱        | ۱۵        | ۲۱        | ۳۱        | ۲۱        | ۲۱        | ۸         | ۳۰        | ۶         |
|         | نزدیک به نرمال     | ۱۵۷       | ۱۵۲       | ۱۶۸       | ۱۶۰       | ۱۵۰       | ۱۴۷       | ۱۴۴       | ۱۶۷       | ۱۴۲       | ۱۳۷       |
|         | تقریباً تر         | ۹         | ۳۷        | ۱۵        | ۱۸        | ۱۶        | ۲۳        | ۳۳        | ۲۹        | ۲۲        | ۰         |
|         | ترسالی شدید        | ۲۵        | ۱۰        | ۷         | ۶         | ۱۰        | ۲۱        | ۹         | ۶         | ۱۵        | ۰         |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۶         | ۰         | ۸         | ۱۵        | ۱۲        | ۵         | ۵         | ۰         | ۲         | ۱۴        |

جدول ۳. درصد فراوانی وقایع خشکسالی، ترسالی و شرایط نرمال در حوضه رودخانه نکا

| SPI     | رخداد   | RCP2.6    |           |           | RCP4.5    |           |           | RCP8.5    |           |           | دوره پایه |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|         |         | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۱۶۰۱-۲۰۶۱ | ۲۰۵۵-۱۹۸۵ |
| ۶ ماهه  | خشکسالی | ۰/۱۷      | ۰/۱۶      | ۰/۱۳      | ۰/۱۷      | ۰/۱۷      | ۰/۱۴      | ۰/۱۴      | ۰/۱۳      | ۰/۱۷      | ۰/۰۸      |
|         | نرمال   | ۰/۶۳      | ۰/۶۶      | ۰/۶۸      | ۰/۶۲      | ۰/۶۴      | ۰/۷۰      | ۰/۶۷      | ۰/۶۹      | ۰/۶۲      | ۰/۷۷      |
|         | ترسالی  | ۰/۲۰      | ۰/۱۸      | ۰/۱۹      | ۰/۲۱      | ۰/۱۹      | ۰/۱۶      | ۰/۱۹      | ۰/۱۸      | ۰/۲۱      | ۰/۱۵      |
| ۱۲ ماهه | خشکسالی | ۰/۱۶      | ۰/۱۳      | ۰/۱۴      | ۰/۲۰      | ۰/۱۵      | ۰/۱۵      | ۰/۲۰      | ۰/۱۲      | ۰/۱۷      | ۰/۰۶      |
|         | نرمال   | ۰/۶۹      | ۰/۷۰      | ۰/۷۰      | ۰/۶۲      | ۰/۶۷      | ۰/۶۹      | ۰/۶۲      | ۰/۷۰      | ۰/۶۲      | ۰/۸۶      |
|         | ترسالی  | ۰/۱۵      | ۰/۱۷      | ۰/۱۶      | ۰/۱۸      | ۰/۱۸      | ۰/۱۶      | ۰/۱۸      | ۰/۱۸      | ۰/۲۱      | ۰/۰۸      |
| ۲۴ ماهه | خشکسالی | ۰/۱۴      | ۰/۱۳      | ۰/۱۴      | ۰/۱۳      | ۰/۱۸      | ۰/۱۵      | ۰/۱۷      | ۰/۱۲      | ۰/۲۱      | ۰/۰۴      |
|         | نرمال   | ۰/۶۹      | ۰/۶۶      | ۰/۷۳      | ۰/۷۰      | ۰/۶۵      | ۰/۶۴      | ۰/۶۳      | ۰/۷۳      | ۰/۶۲      | ۰/۸۷      |
|         | ترسالی  | ۰/۱۷      | ۰/۲۱      | ۰/۱۳      | ۰/۱۷      | ۰/۱۷      | ۰/۲۱      | ۰/۲۰      | ۰/۱۵      | ۰/۱۷      | ۰/۰۹      |

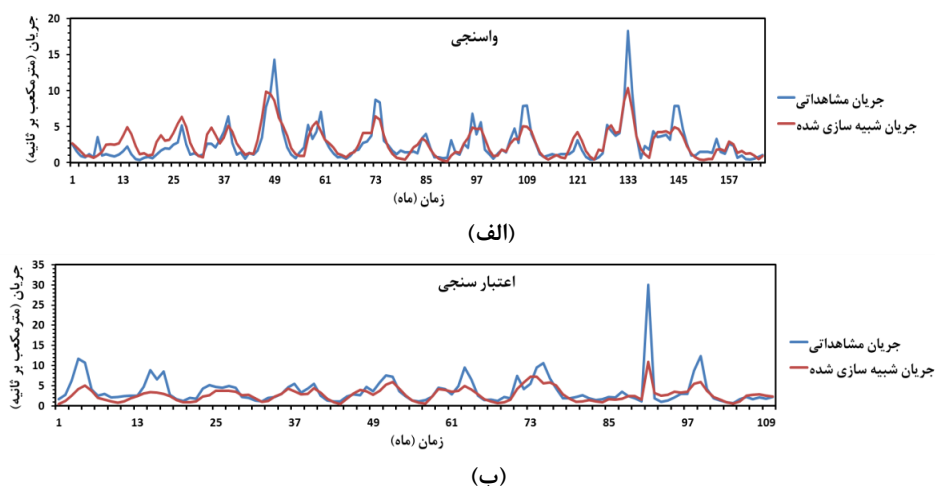


جدول ۴. مقادیر میانگین شاخص خشکسالی SPI در مقیاس‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای دوره پایه و آتی در حوضه رودخانه نکا

| SPI     | رخداد              | RCP2.6    |           |           | RCP4.5    |           |           | RCP8.5    |           |           | دوره پایه |
|---------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|         |                    | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۲۰۸۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۲۰۸۱-۲۰۶۱ | ۲۰۳۹-۲۰۱۹ | ۲۰۶۰-۲۰۴۰ | ۲۰۸۱-۲۰۶۱ | ۲۰۵۵-۱۹۸۵ |
| ۶ ماهه  | خشکسالی بسیار شدید | -۲/۱۷     | -۲/۴۴     | -۲/۳۶     | -۲/۱۹     | -۲/۳۵     | -۲/۱۶     | -۲/۳۳     | -۲/۵۰     | -۲/۱۹     | -         |
|         | خشکسالی شدید       | -۱/۶۹     | -۱/۸۱     | -۱/۷۹     | -۱/۷۲     | -۱/۷۵     | ۱/۷۳      | -۱/۶۹     | -۱/۶۸     | -۱/۶۹     | -۱/۷۷     |
|         | خشکسالی ملایم      | -۱/۲۳     | -۱/۲۲     | -۱/۱۸     | -۱/۲۱     | -۱/۲۱     | -۱/۲۸     | -۱/۲۲     | -۱/۲۸     | -۱/۱۹     | -۱/۱۸     |
|         | نزدیک به نرمال     | ۰/۰۳      | ۰/۱۱      | -۰/۰۲     | ۰/۰۴      | ۰/۰۳      | ۰/۰۷      | ۰/۰۱      | -۰/۰۱     | ۰/۰۱      | -۰/۱۵     |
|         | تقریباً تر         | ۱/۲۱      | ۱/۲۳      | ۱/۲۴      | ۱/۲۴      | ۱/۲۴      | ۱/۲۵      | ۱/۲۴      | ۱/۲۰      | ۱/۲۳      | ۱/۲۳      |
|         | ترسالی شدید        | ۱/۷۶      | ۱/۷۱      | ۱/۶۹      | ۱/۶۹      | ۱/۷۳      | ۱/۷۱      | ۱/۷۱      | ۱/۷۷      | ۱/۶۵      | ۱/۷۱      |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۲/۲۰      | ۲/۰۴      | ۲/۳۰      | ۲/۱۵      | ۲/۱۶      | ۲/۴۲      | ۲/۱۷      | ۲/۲۵      | ۲/۱۳      | ۳/۰۴      |
| ۱۲ ماهه | خشکسالی بسیار شدید | -۲/۲۲     | -۲/۵۸     | -۲/۳۴     | -۲/۰۹     | -۲/۰۱     | -۲/۰۶     | -۲/۲۴     | -۲/۴۳     | -۲/۳۶     | -         |
|         | خشکسالی شدید       | -۱/۷۸     | -۱/۷۱     | -۱/۶۵     | -۱/۶۶     | -۱/۷۳     | -۱/۷۶     | -۱/۶۵     | -۱/۶۹     | -۱/۷۱     | -         |
|         | خشکسالی ملایم      | -۱/۲۲     | -۱/۲۲     | -۱/۳۰     | -۱/۲۵     | -۱/۲۵     | -۱/۲۴     | -۱/۲۳     | -۱/۱۲     | -۱/۲۳     | -۱/۱۰     |
|         | نزدیک به نرمال     | ۰/۱۰      | ۰/۱۰      | -۰/۰۹     | ۰/۱۳      | -۰/۰۲     | -۰/۰۵     | ۰/۱۴      | -۰/۰۲     | ۰/۰۶      | -۰/۱۴     |
|         | تقریباً تر         | ۱/۲۶      | ۱/۳۴      | ۱/۱۹      | ۱/۲۱      | ۱/۲۶      | ۱/۲۷      | ۱/۲۴      | ۱/۲۲      | ۱/۲۸      | ۱/۱۳      |
|         | ترسالی شدید        | ۱/۷۳      | ۱/۶۸      | ۱/۷۲      | ۱/۷۷      | ۱/۷۲      | ۱/۶۸      | ۱/۷۲      | ۱/۶۸      | ۱/۶۴      | -         |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۲/۱۴      | ۲/۳۹      | ۲/۴۴      | ۲/۲۲      | ۲/۵۶      | ۲/۲۳      | ۲/۰۹      | ۲/۲۰      | ۲/۰۶      | ۳/۳۴      |
| ۲۴ ماهه | خشکسالی بسیار شدید | -۲/۱۳     | -۲/۳۳     | -۲/۳۴     | -         | -۲/۰۰     | -۲/۱۸     | -۲/۱۰     | -۲/۴۳     | -۲/۰۳     | -         |
|         | خشکسالی شدید       | -۱/۶۱     | -۱/۶۹     | -۱/۷۳     | -۱/۷۳     | -۱/۶۹     | -۱/۶۹     | -۱/۷۰     | -۱/۸۰     | -۱/۷۱     | -         |
|         | خشکسالی ملایم      | -۱/۲۶     | -۱/۲۲     | -۱/۲۱     | -۱/۲۴     | -۱/۲۰     | ۱/۲۰      | -۱/۲۳     | -۱/۲۰     | -۱/۲۳     | -۱/۱۶     |
|         | نزدیک به نرمال     | -۰/۰۳     | ۰/۰۴      | -۰/۰۹     | -۰/۰۶     | ۰/۰۵      | -۰/۱۰     | ۰/۰۳      | -۰/۱۳     | ۰/۱۹      | -۰/۱۸     |
|         | تقریباً تر         | ۱/۳۶      | ۱/۲۵      | ۱/۳۱      | ۱/۱۶      | ۱/۲۲      | ۱/۲۵      | ۱/۲۷      | ۱/۲۶      | ۱/۲۴      | -         |
|         | ترسالی شدید        | ۱/۶۸      | ۱/۶۸      | ۱/۷۴      | ۱/۷۸      | ۱/۷۷      | -۱/۵۳     | ۱/۷۰      | ۱/۶۲      | ۱/۷۲      | -         |
|         | ترسالی بسیار شدید  | ۲/۱۸      | -         | ۲/۴۸      | ۲/۳۶      | ۲/۲۰      | ۲/۱۲      | ۲/۱۷      | -         | ۲/۰۸      | ۲/۹۵      |

جدول ۵. شاخص‌های آماری مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده جریان ماهانه رودخانه نکا در دوره تاریخی ۱۹۹۲-۲۰۱۴

| R    | NSE  | BIAS  | MAE  | RMSE | R <sup>2</sup> |            |
|------|------|-------|------|------|----------------|------------|
| ۰/۸۸ | ۰/۷۷ | -۰/۱۹ | ۰/۹۱ | ۱/۲۴ | ۰/۹۴           | واسنجی     |
| ۰/۸۶ | ۰/۵۸ | ۰/۸۰  | ۱/۲۲ | ۲/۳۲ | ۰/۹۳           | اعتبارسنجی |

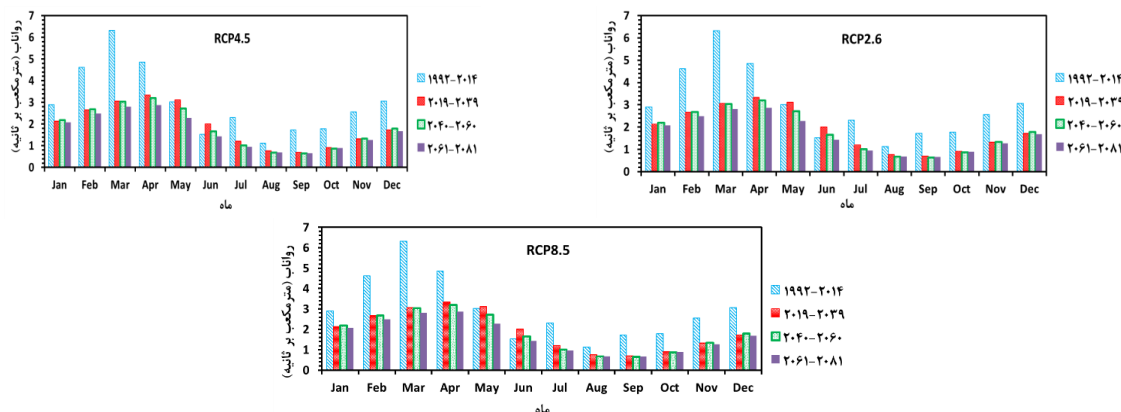


شکل ۳. نمودارهای دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ میانگین آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۲/۵۵، ۱/۹۱ و ۱/۸۹ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که نسبت به دوره تاریخی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۵، ۳۶ و ۳۷ درصد کاهش خواهد یافت. طی دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ میانگین جریان سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۹۸، ۱/۹۰ و ۱/۸۳ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که نسبت به دوره تاریخی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۳۴ تا ۳۹ درصد کاهش خواهد یافت. در دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱، میزان رواناب تحت سناریوهای مختلف اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۱/۹۵، ۱/۸۳ و ۱/۶۵ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که نسبت به دوره تاریخی بین ۳۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های ثانی‌خانی و همکاران [۱۰]، سادات موسوی و معروفی، [۹] و الصافی و همکاران [۱۴] همخوانی دارد.

میانگین حجم آورد سالانه رودخانه نکا در محل ایستگاه هیدرومتری گلورد طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۴، برابر با ۹۵ میلیون مترمکعب بوده است. میانگین حجم آب پشت سد گلورد تحت سناریوی RCP2.6، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۸۱، ۶۳ و ۶۱ میلیون مترمکعب، تحت سناریوی RCP4.5، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۶۰، ۶۰ و ۵۸ میلیون مترمکعب و تحت سناریوی RCP8.5، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۶۰، ۵۸ و ۵۴ میلیون مترمکعب خواهد بود.

شکل ۴ آورد ماهانه رودخانه نکا طی دوره تاریخی و آتی تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در دوره آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، بیشترین افزایش آورد رودخانه نکا در ماه ژوئن اتفاق خواهد افتاد. مقدار آورد رودخانه در این ماه تحت سناریوهای مختلف بین ۱/۷۴ تا ۲/۰۳ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که نسبت به دوره تاریخی بین ۱۳ تا ۱۸ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، بیشترین کاهش جریان رودخانه طی دوره آتی در ماه ژوئیه اتفاق خواهد افتاد که تحت سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵۴، ۵۶ و ۵۳ درصد کاهش خواهد یافت و به ۰/۸۷ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. بیشترین آورد رودخانه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در ماه‌های فوریه، مارس و آوریل بین ۳/۱ تا ۴/۴۷ مترمکعب بر ثانیه است. در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۰، بیشترین افزایش جریان رودخانه تحت سناریوهای مختلف بین ۵ تا ۱۰ درصد در ماه ژوئن اتفاق می‌افتاد. بیشترین کاهش جریان نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای مختلف در ماه سپتامبر بین ۶۴ تا ۶۶ درصد خواهد بود. در دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱، بیشترین افزایش آورد رودخانه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در ماه ژوئن بین ۱ تا ۹ درصد متغیر خواهد بود و بیشترین کاهش دبی بین ۶۴ تا ۶۷ درصد در ماه سپتامبر اتفاق خواهد افتاد. تغییرات اقلیمی سبب کاهش ۲۰ درصدی بارش در ماه سپتامبر خواهد شد که این مسئله سبب کاهش رواناب رودخانه نکا می‌شود. همچنین، کم شدن دبی پایه رودخانه نکا در انتهای تابستان رواناب رودخانه نکا را در سپتامبر کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد میانگین جریان سالانه در دوره تاریخی ۳ مترمکعب بر ثانیه بوده است. طی



شکل ۴. مقادیر رواناب در دوره تاریخی و آتی تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5

## بحث و نتیجه‌گیری

در محل سد گلورد تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۵۸ تا ۶۳ میلیون مترمکعب و در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۱ میانگین آورد رودخانه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۵۴ تا ۶۱ میلیون مترمکعب متغیر خواهد بود. بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان کاهش جریان رودخانه تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 نسبت به بقیه سناریوها بیشتر است، دلیل این مسئله کاهش بیشتر بارش‌ها و افزایش دما تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 در حوضه رودخانه نکا است. کاهش بارش و افزایش دما در حوضه رودخانه نکا در دوره آتی ۲۰۶۱-۲۰۸۱ نسبت به دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۶۰ بیشتر است که سبب کاهش بیشتر رواناب در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۱ نسبت به دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹ و ۲۰۴۰-۲۰۶۰ شده است. نتایج نشان می‌دهد میانگین حجم آورد آب پشت سد گلورد در سال‌های آتی بسیار کمتر از مقدار حجم مخزن این سد (۱۱۴ میلیون مترمکعب) خواهد بود. با توجه به نتایج، طی دوره‌های آتی افزایش وقایع خشکسالی و کاهش آورد رودخانه نکا رخ خواهد داد. بنابراین، باید با برنامه‌ریزی دقیق‌تر ضمن کاهش تأثیرات منفی دوره‌های خشکسالی، انتظارات از سد گلورد برای تأمین پایدار آب مورد بازبینی قرار گیرد تا در آینده از تنش‌های اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی و فرهنگی جلوگیری شود.

## تقدیر و تشکر

از جناب آقای مهندس وحید شکری به دلیل همکاری و راهنمایی در انجام پژوهش حاضر سپاسگزارم.

## منابع

- [1]. Waseem M, Park DH, Kim TW. Comprehensive Climatological Drought Projection over South Korea under Climate Change. *Procedia engineering*. 2016; 154: 284-290.
- [2]. Huang YF, Ang JT, Tiong YJ, Mirzaei M, Amin MZ. Drought Forecasting Using SPI and EDI under RCP-8.5 Climate Change Scenarios for Langat River Basin, Malaysia. *Procedia Engineering*. 2016; 154: 710-717.
- [3]. Alipour A, Moradkhani H, Demirel MC. A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature. *Journal of Hydrology*. 2017; 553: 785-797.

تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر خشکسالی و آورد رودخانه‌ها می‌تواند سبب تأثیرات سوء بر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، اقتصاد و زندگی انسان‌ها شود. بنابراین، بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی و آورد رودخانه بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر به بررسی تغییرات آب‌وهوایی بر خشکسالی و آورد رودخانه نکا در محل سد گلورد پرداخته شد. نتایج بررسی خشکسالی در حوضه رودخانه نکا نشان داد طی دوره‌های ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ تحت سناریوهای RCP2.6، به ترتیب ۳۲، ۳۰ و ۳۱، تحت سناریوی RCP4.5، به ترتیب ۳۰، ۴۱، ۳۳ و تحت سناریوی RCP8.5، ۲۷، ۴۸ و ۴۸ واقعه خشکسالی متوسط تا بسیار شدید اتفاق خواهد افتاد. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که در سناریوی RCP8.5، به عنوان بدبینانه‌ترین حالت ممکن، حوضه رودخانه نکا طی سال‌های آینده شاهد افزایش دوره‌های خشک و کاهش دوره‌های تر خواهد بود. به دلیل تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر پارامترهای اقلیمی و وقایع حدی مشاهده می‌شود که در بعضی از دوره‌ها، وقایع ترسالی بسیار شدید رخ نخواهد داد و شدت ترسالی‌های بسیار شدید نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت، همچنین، وقایع خشکسالی شدید و بسیار شدید در حوضه رودخانه نکا اتفاق خواهد افتاد که در دوره پایه رخ نداده است. براساس نتایج پژوهش حاضر طی دوره‌های آتی شاهد کاهش آورد رودخانه نکا خواهیم بود، به طوری که آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوی RCP2.6، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۱۵، ۳۴ و ۳۵ درصد کاهش خواهد یافت. میزان جریان رودخانه نکا تحت سناریوی RCP4.5، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۳۶، ۳۷ و ۳۹ درصد نسبت به دوره تاریخی کاهش خواهد داشت. همچنین، آورد رودخانه نکا تحت سناریوی RCP8.5، طی دوره‌های آتی ۲۰۱۹-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۱ به ترتیب ۳۷، ۳۹ و ۴۳ درصد نسبت به میانگین بلندمدت کاهش می‌یابد. میانگین آورد سالانه رودخانه در محل سد گلورد در دوره ۲۰۱۹-۲۰۳۹، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بین ۶۰ تا ۸۱ میلیون مترمکعب خواهد بود، در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۰، میانگین آورد سالانه رودخانه

- [4].Li X, Ju H, Garré S, Yan C, Liu Q. Spatiotemporal variation of drought characteristics in the Huang-Huai-Hai Plain, China under the climate change scenario. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017; 16(10): 2308-2322.
- [5].Golmohammadi M, Massah Bavani A. The Perusal of Climate Change Impact on Drought Intensity and Duration. *Journal of water and soil*. 2011; 25(2): 326-315. (Persian)
- [6].Khashei A, Shahidi A, Pourrezabilondi M, Amirabadizadeh M, jafarzadeh A. Performance Assessment of ANN and SVR for downscaling of daily rainfall in dry regions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2018; 49(4): 781-793. (Persian)
- [7].Hashemi-Ana SK, Khosravi M, Tavousi T, Nazaripour H. Validation of AOGCMs capabilities for simulation length of dry spells under the climate change and uncertainty in Iran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data*. 2017; 26(103): 43-58.
- [8].Mirdashtovan M, Malekian A, Mohseni Saravi M. Stream flow simulation using statistical downscaling of climatic data: Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Eco hydrology*. 2018; 5 (2): 419-431. (Persian).
- [9].Sadat Mousavi R, Marofi S. Investigation of the hydrologic response of river flow to climate change (Case study: Dez Dam Basin). *Journal of Water and soil conservation*. 2017; 23(6): 333-348. (Persian)
- [10].Sanikhani H, Gohardoust MR, Sadeghi M. The Impacts of Climate Change on Runoff of Ghareh-Chay Basin in Markazi Province, Iran. *Journal of Watershed Management Research*. 2016; 13(7), 12-22. (Persian)
- [11].Sadeghi SH, Ghasemieh H, Sadatinegad SJ. Performance Evaluation of the IHACRES Hydrological Model in Wet Areas (Case Study: Navrud Basin, Gillan). *Journal of Water and Soil Science*. *Journal of Hydrology and Soil Science*. 2015; 19(73): 73-82. (Persian)
- [12].Chen J, Xia J, Zhao C, Zhang Sh, Fu G, Ning L. The mechanism and scenarios of how mean annual runoff varies with climate change in Asian monsoon areas. *Journal of Hydrology*. 2014; 517: 595-606.
- [13].Nkomozepe T, Chung SO. The effects of climate change on the water resources of the Geumho River Basin, Republic of Korea. *Journal of Hydro-environment Research*. 2014; 8(4): 358-366.
- [14].Al-Safi HIJ, Sarukkalige PR. The application of conceptual modelling to assess the impacts of future climate change on the hydrological response of the Harvey River catchment. *Journal of Hydro-environment Research*. 2020; 28(1): 22-33.
- [15].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.
- [16].IPCC. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth. 2014.
- [17].Huang HL, Chang FL. ESVM: Evolutionary support vector machine for automatic feature selection and classification of microarray data, *Bio systems*. 2007; 90(2): 516-528.
- [18].McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, MA: American Meteorological Society. 1993; 17( 22): 179-183.
- [19].Goodarzi M, Motamed Vaziri B, Mirhosseini M. Assessment of IHACRES Model in Surface Run-off Simulation in Climate Change Status (Case Study: Kan Basin). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 2017; 38(11): 83-94. (Persian)
- [20].Littlewood IG, Clarke RT, Collischonn W, Croke BF. Predicting daily stream flow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling & Software*. 2007; 22(9): 1229-1239.