

بررسی اثر تغییر اقلیم بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبخیز اراز کوسه بر اساس نمایه‌های رواناب

مرجان بهلکه^۱، حامد روحانی^{۲*}، ابوالحسن فتح‌آبادی^۲، سیدمرتضی سیدیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲۱

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس

۲-استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rouhani.hamed@gonbad.ac.ir

چکیده

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز اراز کوسه با مدل هیدرولوژیکی HBV و نمایه‌های رواناب بررسی شده است. بدین منظور، بارش و دمای پیش‌بینی شده تحت سه سناریوی اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده اول (۲۰۳۱-۲۰۵۱) و دوره آینده دوم (۲۰۷۱-۲۰۵۱) در مدل واسنجی شده HBV استفاده شد. پارامترهای مدل HBV که ورودی‌های آن بارش، پتانسیل تبخیر و تعرق و دما در مقیاس روزانه می‌باشند، با الگوریتم بهینه‌سازی DDS واسنجی شدند. داده‌های جریان روزانه در دوره زمانی ۱۹۸۶-۱۹۹۹ برای واسنجی و در دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۶ برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. مقادیر تبخیر و تعرق در دو دوره آتی با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان شبیه‌سازی شد. با توجه به مقایسه رواناب دوره پایه و دو دوره آتی با استفاده از نمایه‌های رواناب مبتنی بر منحنی تداوم جریان، در دوره اول و دوم آتی در بیشتر ماه‌های سال روند کاهشی رواناب در سطح حوضه آبخیز ارازکوسه انتظار می‌رود. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر دبی‌های اوج و کم‌آبی دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه به ترتیب تا ۶۰٪ و تا ۲۵٪ کاهش خواهد یافت. مقادیر دبی‌های متوسط آتی نسبت به پایه به غیر از کاهش جزئی در سناریوی RCP8.5 در دو سناریوی دیگر در دو دوره آتی تا ۲۵٪ افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: ارازکوسه، تغییر اقلیم، دبی بیشینه، دبی کمینه، مدل بارش-رواناب

Investigation of Climate Change Impact on Hydrological Behavior of Arazkoose Watershed based on Runoff Indices

M Bahleke¹, H Rouhani*, AH Fathabadi², SM Seyedian²

Received: November 2017, 2017 Accepted: October 13, 2019

¹ Former M.Sc Student, Dept. of Range and Watershed Management, University of Gonbad, Iran

² Assist. Prof., Dept. of Range and Watershed Management, University of Gonbad, Iran

*Corresponding Author, Email: rouhani.hamedi@gonbad.ac.ir

Abstract

In this study the HBV hydrological model and runoff indices have been applied to investigate the impacts of climate change on runoff in the ArazKoose watershed. Therefore, the projected future temperature and precipitation under the three representative concentration pathways (RCPs) 2.5, 4.5 and 8.5 scenarios for the first future epoch (2031-2051) and the second future epoch (2051-2071) were incorporated into the calibrated HBV model. The Dynamic Dimension Selection (DDS) optimization technique was used to calibrate the HBV model's input data of precipitation, potential evapotranspiration and temperature in daily scale. Daily flow data from 1986 to 1999 and from 2006 to 2009 were used to calibrate and validate the model, respectively. The Support Vector Machine (SVM) model projected the evapotranspiration in two future epochs. Future runoff simulations compared to the base period with respect to hydrological indices of flow duration curves indicating a decreasing trend in monthly runoff of ArazKoose watershed. Furthermore, projected extreme events resulted in decreasing high flow and low flow by 60% and 25%, respectively, in the future when compared to the baseline period. While, the annual mean flow projected to increase by 25% than that of historical period in two scenarios except in RCP8.5.

Keywords: Arazkoose, Climate change, High flow, Low flow, Rainfall-runoff model

مقدمه

افزایش یک پارامتر اقلیمی در یک نقطه و کاهش آن در نقطه دیگر شود. این تغییر در پارامترهای اقلیمی با کمی تأخیر، تأثیر خود را بر روی پارامترهای هیدرولوژیکی و منابع آب می‌گذارند. چنانچه روند کنونی در تولید گازهای گلخانه‌ای ادامه پیدا کند، انتظار می‌رود که این تأثیر تغییرات اقلیم در آینده بیشتر شده و باعث تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سیکل هیدرولوژی شود (آشقیق و همکاران ۲۰۱۰).

به‌منظور بررسی رابطه بین متغیرهای مختلف سیکل هیدرولوژی با رواناب خروجی، ناگزیر باید از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده شود. مدل‌های بارش-رواناب برای توصیف فرآیندهای هیدرولوژیکی غیرخطی،

دگرگونی اقلیم یک پدیده طبیعی است که در مقیاس زمانی بلند مدت به‌وقوع می‌پیوندد (رضائی و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به نتایج گرفته شده از مطالعات داخل و خارج از کشور، داده‌های هواشناسی و یافته‌های مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که میانگین دمای هوا روندی افزایشی دارد (خوش روش و رضائی ۲۰۱۶). چنین تغییرات در میانگین دما باعث ناهنجاری‌هایی در جوامع انسانی و محیط طبیعی می‌شود. این تغییرات دما بر روی سایر پارامترهای اقلیمی مانند بارش تأثیر گذاشته و باعث تغییر آن‌ها در سطح جهان می‌شود. بسته به موقعیت و شرایط اقلیمی مناطق مختلف این تغییر در پارامترهای اقلیمی متفاوت بوده و تغییر اقلیم در یک منطقه ممکن است منجر به

رواناب) در حوضه‌های آبخیز پرداخته شود. هدف از این مطالعه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه آبخیز اراز کوسه استان گلستان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی یکپارچه HBV است. بنابراین، برای دوره‌های زمانی حال و آینده منحنی تداوم جریان که انعکاسی از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه است، محاسبه شده و در نهایت با استفاده از نمایه‌های جریان شرایط هیدرولوژیکی حوضه در دوره پایه و آینده مقایسه می‌شود. نتایج این پژوهش نقش مهمی در بخش مدیریت بهتر منابع آب حوضه و کشاورزی خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبخیز اراز کوسه واقع در شرق حوضه آبخیز گرگان‌رود، به مساحت (km^2) ۱۵۶۵ برای بررسی تغییرات رواناب حوضه آبخیز انتخاب شد. دامنه ارتفاعی این حوضه از ۲۸۸۹ متر در مناطق کوهستانی تا ۲۸ متر در مناطق دشتی متغیر است. کاربری اراضی غالب در این حوضه کاربری‌های جنگل‌های مخلوط سوزنی برگ - پهن برگ و مرتع-بوته‌زار به ترتیب ۵۰/۱۴ و ۳۲/۷۲ درصد حوضه را پوشش می‌دهند. به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب، داده‌های متوسط دما، بارش و دبی با گام زمانی روزانه در ایستگاه اراز کوسه در یک دوره ۲۵ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۰۹) از سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان اخذ گردید. در دوره آماری مورد بررسی متوسط بارش متوسط سالیانه در ایستگاه اراز کوسه (mm) ۴۵۲ و متوسط درجه حرارت سالیانه $(^{\circ}C)$ ۱۷/۵ است.

مدل هیدرولوژیکی HBV^۲

مدل HBV یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی یکپارچه است که توسط برگستروم در سال ۱۹۹۲ ارائه شد. این مدل برای شبیه‌سازی جریان خروجی حوضه نیاز به

پیش‌گویی وقایع حدی و ارزیابی اثرات بالقوه تغییرات اقلیم در آینده و یا تغییرات حاصل از کاربری اراضی استفاده می‌شوند. در تحقیقات مرتبط با بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه، پس از واسنجی مدل در دوره پایه، مدل برای دوره آینده اجرا شده و در نهایت، مقادیر دبی در دوره آینده و دوره پایه مقایسه می‌شوند. در این مطالعات اغلب مقایسه بصورت کیفی بوده یا برخی نمایه‌های آماری مثل میانگین دبی در دوره‌های زمانی مختلف مقایسه می‌شوند. این در حالی است که استفاده از این نمایه‌های آماری نمی‌تواند توصیف مناسبی از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه ارائه دهد و سبب ایجاد خطا و اریبی در مقایسه می‌شوند. منحنی تداوم جریان (FDC^۱) یکی از نمایه‌های مهم نشان دهنده پاسخ حوضه و خصوصیات حوضه می‌باشد. FDS بازگوکننده توانایی حوضه در تولید مقادیر دبی با بزرگی‌های مختلف است (ایلماز و همکاران ۲۰۰۸). شیب تند FDS نشان دهنده پاسخ تند حوضه به بارش ورودی و پخ‌تر بودن FDS نیز نشان دهنده پاسخ کند حوضه به بارش ورودی می‌باشد (یداو و همکاران ۲۰۰۷). جهت مقایسه منحنی‌های تداوم جریان برخی نمایه‌های جریان توسط ایلماز و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شدند. در مقایسه شرایط قبل و بعد از تغییر اقلیم این نمایه‌ها تاثیر خطاهای ناشی از واسنجی مدل و اریبی داده‌های ورودی در نظر گرفته نمی‌شود؛ درواقع این نمایه‌ها منعکس‌کننده پاسخ دینامیکی حوضه بوده و در حوضه‌های مختلف متفاوت هستند (یداو و همکاران ۲۰۰۷). این نمایه‌ها در تحقیقات (ایلماز و همکاران ۲۰۰۸، آشیق و همکاران ۲۰۱۰، شفیع و تولسون ۲۰۱۵، توتچباین و همکاران ۲۰۱۵ و آکانگبو و همکاران ۲۰۱۷) جهت ارزیابی مدل و بررسی اثرات تغییر اقلیم استفاده شده است. با توجه به آثار تغییر اقلیم بر رواناب، ضروری است به‌دقت به مطالعه تغییرات واکنش‌های هیدرولوژیکی (آب پایه، واکنش‌ها، تغییرات

² Hydrologiska Byrans Vattenavdelning

¹ Flow duration curve

تکرار فرآیند باعث بهبود تابع هدف نشده و یا الگوریتم به تعداد تکرار خاص برسد. در جدول ۲ پارامترهای بهینه شده و دامنه در نظر گرفته شده برای هر پارامتر ارائه شده است.

پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی آینده

به‌منظور پیش‌بینی بارش و دمای آینده از داده‌های NCEP و مدل گردش عمومی جهانی CanESM2 با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 از لینک (<http://ccds-dscc.ec.gc.ca>) بر اساس طول و عرض جغرافیایی ایستگاه اراکوسه استفاده شد. مدل SDSM^۲ یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی تابع انتقالی آماری که در سال ۲۰۰۲ توسط ویلی و همکاران ارائه شده است. این مدل با استفاده از ترکیب دو روش احتمالاتی و رگرسیونی چند متغیره پارامترهای اقلیمی چون بارش و دما را در درازمدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی (متغیرهای NCEP) پیش‌بینی می‌کند (ویلی و داوسون ۲۰۱۳). بنابراین، در مطالعه فعلی ابتدا با استفاده از مدل SDSM داده‌های بارش و دمای آینده ریز مقیاس شدند. همچنین برای پیش‌بینی مقادیر تبخیرپتانسیل دوره آتی از ماشین بردار پشتیبان با در نظر گرفتن مقادیر دما به عنوان ورودی مدل استفاده شد. بدین منظور در دوره پایه مقادیر دمای مشاهداتی و مقادیر دمای شبیه‌سازی شده آینده با استفاده از مدل گردش عمومی جو به‌عنوان ورودی مدل معرفی و مقادیر تبخیر پتانسیل در دو دوره آتی محاسبه شد. برای اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان، پارامترهای مدل شامل c، e و پارامترهای تابع کرنل بهینه شدند. با توجه به کارایی تابع پایه شعاعی (بائوفنگ و همکاران ۲۰۰۸)، در این مطالعه از این تابع استفاده شد. همچنین مقادیر پارامترهای ماشین بردار پشتیبان به روش سعی و خطا به‌صورت جستجوی شبکه‌ای (به توصیه چن و یو ۲۰۰۷)، تعیین شد. قابل ذکر است الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی شبکه بسیار کند عمل می‌کند و

داده‌های بارش و تبخیرپتانسیل دارد (برگستروم ۱۹۹۵). مدل HBV به دلیل اطلاعات ورودی کم و قابل دسترس، بار محاسباتی کم و علاوه بر آن قابلیت استفاده در شرایط آب‌وهوایی متفاوت در این مطالعه استفاده شد. مدل شامل زیر بخش‌هایی برای انباشت و ذوب برف، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و تولید رواناب است که در نهایت به کمک تابع وزنی ساده مثلثی، رواناب ایجاد شده را روندیابی می‌کند (سیبرت و ویس ۲۰۱۲).

جهت واسنجی مدل HBV در دوره پایه از روش DDS^۱ (تولسون و شوماکر ۲۰۰۷) استفاده شد. در این روش پس از تعیین راه حل اولیه و محدوده پارامترها در ابتدا جستجو در یک بعد بالا شروع شده و با پیشرفت فرآیند بهینه‌سازی جستجو به‌صورت موضعی ادامه پیدا می‌کند. در ابتدا مجموعه مقادیر پارامترهای بهینه همان پارامترهای اولیه هستند که در ادامه برای هر یک از پارامترها احتمال جهش محاسبه می‌شود و با تولید اعداد تصادفی و در نظر گرفتن احتمال جهش مشخص می‌شود آیا پارامتر مورد نظر جهش پیدا کند یا خیر؟ چنانچه پارامتر مورد نظر برای جهش انتخاب شد، مقادیر آن پارامتر با مقادیر تصادفی به‌دست آمده از توزیع نرمال استاندارد که در دامنه تغییر هر پارامتر ضرب شده جمع می‌شود تا مقادیر جدید برای پارامتر موردنظر بدست آید. مقادیر مجموعه پارامترهای جدید در مدل قرار داده و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. چنانچه تابع هدف محاسبه شده کمتر از مقدار تابع هدف محاسبه شده برای مجموعه پارامترها بهینه باشد، مجموعه پارامترها جدید به عنوان مجموعه پارامترهای بهینه انتخاب می‌شوند. در ادامه با پیشرفت فرآیند بهینه‌سازی احتمال جهش که متناسب با تعداد تکرار بهینه‌سازی است، کاهش پیدا می‌کند. فرآیند جهش در پارامترها و ارزیابی مدل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که

² Statistical Downscaling Model

¹ Dynamically dimensioned search algorithm

دوره‌های زمانی حال و آینده با استفاده از نمایه‌های رواناب (ایلماز و همکاران ۲۰۰۸) مقایسه گردید. برای محاسبه این نمایه‌ها بعد از استخراج مقادیر رواناب مربوط به دوره پایه و آینده، در برنامه متلب FDC برای سری‌های زمانی مختلف رواناب بدست آمد. سپس FDC به بخش‌های مختلف تقسیم شد و احتمال تجاوز وقوع ۰ تا ۱ برای سری‌های مختلف بدست آمد. FDC دارای سه بخش اصلی می‌باشد: ۱- بخش جریان بالا (احتمال تجاوز جریان ۰/۲ تا ۰) که مشخص کننده پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به وقایع بارندگی حدی است ۲- بخش میانی جریان (احتمال تجاوز جریان ۰/۲ تا ۰/۷) که مشخص کننده جریان مربوط به وقایع بارندگی با اندازه متوسط و همچنین مربوط به پاسخ آهسته جریان پایه اولیه و ثانویه میان مدت می‌باشد و ۳- بخش جریان کم (احتمال تجاوز جریان ۰/۷ تا ۱) که مربوط به جریان پایدار و درازمدت می‌باشد که مشخص کننده جریان مربوط به وقایع بارش‌هایی با شدت کم و مدت طولانی و همچنین تأثیر عکس‌العمل جریان پایه در طول دوره‌های خشک‌سالی طولانی مدت است. FDC در حوضه‌هایی که پاسخ شدید و ناگهانی دارند (به علت ظرفیت ذخیره خاک کم و درصد بالاتر جریان سطحی)، دارای شیب بیشتری است، در حالی که شیب‌های ملایم‌تر مربوط به حوضه‌هایی است که جریان آب زیرزمینی آهسته تر و پایدارتری دارند و بیانگر احتمال رخ دادن، بارش‌هایی با شدت کم و طولانی مدت و همچنین دبی پایه در شرایط کم آبی است (ایلماز و همکاران ۲۰۰۸). علاوه بر نمایه‌های جریان (جدول ۱)، شاخص دبی متوسط، شاخص دبی میانه، شاخص چولگی جریان و شاخص ضریب تغییرات دبی، نیز در مقایسه مقادیر رواناب قبل و بعد از تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر مثبت نمایه‌ها، احتمال افزایش رخداد در دوره‌های آبی و مقادیر منفی نمایه‌ها به معنای احتمال کاهش رخداد در دوره‌های آبی می‌باشد.

زمان محاسباتی زیادی را به خود اختصاص می‌دهد (مو و ناندی ۲۰۰۷). برای حل این مشکل از برنامه الگوریتم جستجوی شبکه‌ای دو مرحله‌ای استفاده گردید. در اولین گام، جستجوی مقادیر پارامترها در دامنه بزرگ‌تر اما دقت کمتری انجام می‌شود. در دومین مرحله، جستجو به صورت جزئی‌تر و با استفاده از نتایج بهتر مرحله قبل، صورت گرفت. برای اجرای رگرسیون ماشین بردار از پکیج e1071 نرم افزار R استفاده گردید.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی نتایج از دو معیار آماری متداول شامل ضریب ناش-ساتکلیف (E) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) استفاده شد. این آماره‌ها به صورت زیر محاسبه شدند:

[1]

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2}$$

[2]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2)}{n}}$$

که در آن، Q_{sim} جریان شبیه‌سازی شده، Q_{obs} جریان مشاهده شده، Q_{obs} میانگین جریان مشاهده شده، i گام‌های زمانی و n تعداد کل گام‌های زمانی استفاده شده در طی واسنجی می‌باشد. تغییرات E از $-\infty$ تا $+1$ بوده و هر چه شبیه‌سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به یک نزدیکتر است. $RMSE$ برای انطباق کامل بین مقادیر دبی شبیه سازی شده و مشاهده شده، به مقدار صفر تمایل دارد.

نمایه‌های رواناب

پس از برآورد مقادیر دبی در دوره پایه و آینده با مدل واسنجی شده HBV، اقدام به ترسیم منحنی تداوم جریان شد. سپس منحنی‌های تداوم جریان در

جدول ۱- نمایه‌های رواناب (ایلماز و همکاران ۲۰۰۸) تأثیر تغییر اقلیم بر رفتار هیدرولوژیکی.

فرمول	نمایه	شرح
$BiasRR = \frac{mean(FDC\ 1) - mean(FDC\ 2)}{mean(FDC\ 2)}$	انحراف رواناب	۱
$BiasFDCmidslope = \frac{(\log(FDC_{2,0.2}) - \log(FDC_{2,0.7})) - (\log(FDC_{1,0.2}) - \log(FDC_{1,0.7}))}{(\log(FDC_{1,0.2}) - \log(FDC_{1,0.7}))} \times 100$	درصد اریب شیب قطاع میانی	۲
$BiasFHV = \frac{\int_0^{0.02} FDC_{2,p} dp - \int_0^{0.02} FDC_{1,p} dp}{\int_0^{0.02} FDC_{1,p} dp} \times 100$	درصد اریب مقادیر جریان در بخش بالا (اریب جریان بالا)	۳
$BiasFLV = \frac{\int_{0.7}^1 (\log(FDC_{2,p}) - \log(Q_{min})) dp - \int_{0.7}^1 (\log(FDC_{1,p}) - \log(Q_{min})) dp}{\int_{0.7}^1 (\log(FDC_{1,p}) - \log(Q_{min})) dp} \times 100$	درصد اریب مقادیر جریان در بخش پایین (اریب جریان پایین)	۴
$BiasFMM = \frac{SF\ Med(FDC_2) - SF\ Med(FDC_1)}{SF\ Med(FDC_1)} \times 100$	درصد اریب بخش میانی سطوح جریان (میانه جریان)	۵

در این روابط Q_i : رواناب ماهانه در زمان i ; $FDC_{i,p}$: رواناب با احتمال تجاوز p از شماره i منحنی تداوم جریان؛ Q_{min} : مقدار حداقل جریان تمامی مقادیر منحنی تداوم جریان شماره i

نتایج و بحث

ارزیابی مدل هیدرولوژیکی HBV

برای شبیه‌سازی دبی خروجی در مقیاس روزانه، ورودی‌های این مدل شامل داده‌های بارش، تبخیر پتانسیل و ارتفاع رواناب می‌باشد. به منظور واسنجی مدل، الگوریتم فراکاوشی DDS به تعداد ۱۰۰۰ مرتبه اجرا گردید به طوری که پارامترهای مدل به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شدند. حدود تغییرات متغیرهای تصمیم، مطابق جدول ۲ تعریف شدند. با توجه به مقادیر بهینه پارامترها در جدول ۲، شبیه

سازی مقادیر دبی روزانه توسط مدل HBV در دوره واسنجی ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۹ انجام شد. برای تأیید کارایی مدل از آمار سه سال آبی مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ میلادی استفاده شد. مدل در دوره واسنجی دارای ضریب ناش-سانتکیف (E) برابر با ۰/۴ و در دوره اعتبارسنجی مقدار E برابر با ۰/۵ بدست آمد. با توجه به معیار E ، مدل کارایی تقریباً مناسبی در شبیه سازی فرآیند بارش رواناب با استفاده از پارامترهای بهینه شده برخوردار است.

جدول ۲ مقادیر محدوده بالا و پایین پارامترهای مدل HBV (سیبرت و ویس ۲۰۱۲) و مقادیر بهینه مدل HBV با الگوریتم DDS در حوضه آبخیز ارازکوسه.

پارامتر	واحد	توضیح	محدوده	مقدار بهینه پارامتر
Ts	°C	آستانه دما	-۳ -۳	۳
CFMAX	mm°C ⁻¹ d ⁻¹	فاکتور درجه روز، نرخ ذوب برف	۲۰-۰	۰/۲۵

۱	۱-۰	ضریب انجماد مجدد	-	CFR
۰/۸	۰/۸-۰	ظرفیت ذخیره آب	-	CWH
۰/۵۱	۷-۰	ضریب ذخیره و نفوذ عمقی خاک	-	BETA
۰/۴۹	۱-۰/۳	آستانه کاهش تبخیر	-	LP
۶۰۵/۳	۲۰۰۰-۱	بیشینه ذخیره در خاک	mm	FC
۷۹/۴۳	۱۰۰-۰	جریان بیشینه از لایه بالایی به پایین	mmd ⁻¹	PERC
۰/۸۴	۱-۰/۰۱	ضریب فروکش (بالای مخزن)	d ⁻¹	K0
۰/۱۲	۰/۱۰-۰/۰۵	ضریب فروکش (پایین مخزن)	d ⁻¹	K1
۰/۰۵	۲-۰/۰۵	ضریب فروکش (بالایی)	d ⁻¹	K2
۱۹/۶۶	۱۰۰-۰	آستانه خروجی از مخزن پایین	mm	UZL
۱/۲۶	۶-۱	روندیابی، طول تابع وزنی	d	MAXBAS

برآورد تبخیر پتانسیل آینده

با توجه به آن که یکی از ورودی‌های مدل HBV تبخیر پتانسیل است؛ بنابراین، با استفاده از مقادیر دمای پیش‌گویی شده در دو دوره آینده مورد بررسی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار R، پیش‌گویی شد. بدین منظور ابتدا مدل با استفاده از مقادیر تبخیر و دمای دوره زمانی ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۹ آموزش داده شد و با استفاده از داده‌های دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ ارزیابی گردید. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از آماره‌های $RMSE$ و E به ترتیب ۲/۲۴ و ۰/۶۷ به دست آمد. سپس با توجه کارایی مدل، با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای مدل تبخیر پتانسیل دو دوره آینده مورد بررسی پیش‌گویی شد و به عنوان ورودی مدل HBV استفاده شد.

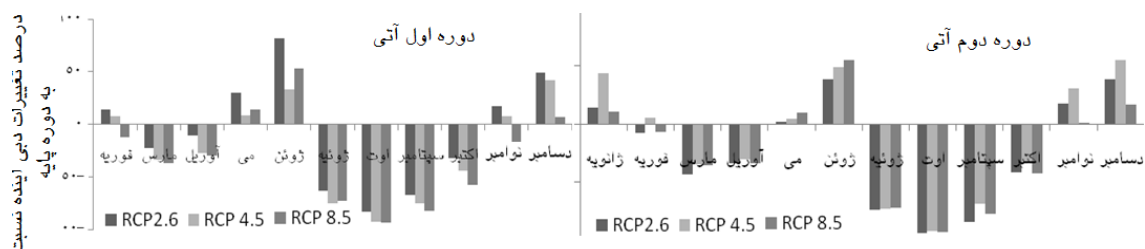
اثر تغییر اقلیم بر رواناب

پس از واسنجی مدل هیدرولوژیکی، سری زمانی رواناب حوضه در دوره آتی اول (۲۰۵۱-۲۰۳۱) و دوره دوم آتی (۲۰۷۱-۲۰۵۱) براساس مقادیر دما و بارش پیش‌گویی شده با مدل SDSM تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 و تبخیر پتانسیل پیش‌گویی شده با مدل SVM برآورد شد. درصد تغییرات میانگین

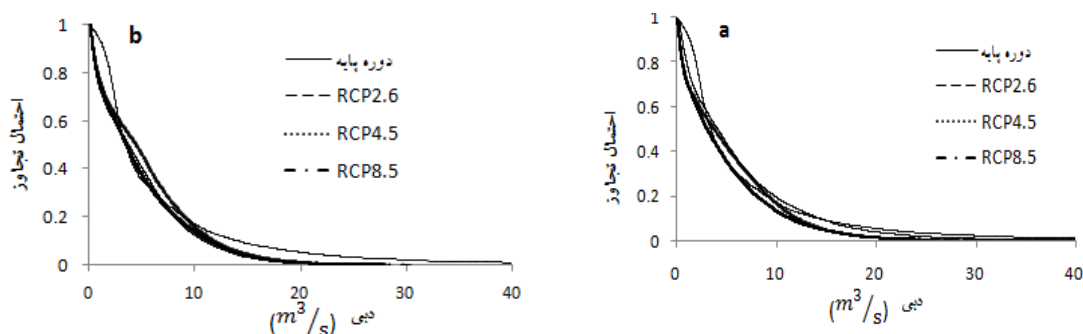
ماهانه رواناب شبیه‌سازی شده در دوره اول آتی و دوره دوم آتی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف در مقایسه با میانگین مقادیر مشاهداتی در دوره پایه در شکل ۱ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱، میزان تغییرات دبی در دوره اول آتی نسبت به دوره پایه در ماه‌های ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر در تمامی سناریوها روند کاهشی را نشان می‌دهد. در صورتی که در دوره اول آتی، دبی در ماه‌های می، ژوئن و دسامبر افزایش خواهد یافت. تغییرات دبی در دوره دوم آتی در ماه‌های ژوئن، نوامبر و دسامبر بیشتر از ماه‌های دیگر بوده است و بیشترین مقدار مربوط به ماه ژوئن در سناریوی RCP8.5 است. در ماه‌های دیگر در تمامی سناریوها احتمالاً دبی روند کاهشی خواهد داشت. به‌طور کلی، نتایج بیانگر کاهش رواناب در دوره‌های آتی خواهد بود که با نتایج ثانی خانی و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه آبریز آجی‌چای، کریمی (۲۰۱۴) در حوضه آبخیز زاینده‌رود، پورمحمدی و همکاران (۲۰۱۷) در تویسرکان همدان که با سناریوهای گزارش چهارم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم بررسی شده‌اند، همخوانی دارد.

مقادیر کم احتمال تجاوز بالاتری خواهند داشت. با افزایش دبی، احتمال تجاوز کاهش می‌یابد. با مقایسه منحنی تداوم جریان در دوره پایه و آینده مشاهده می‌شود در دوره پایه نسبت به دوره آینده مقادیر دبی کمینه و بیشینه احتمال وقوع بیشتری دارند.

منحنی تداوم جریان نشان دهنده توانایی حوضه در تولید مقادیر دبی با بزرگی‌های مختلف می‌باشد. در شکل ۲ منحنی‌های تداوم جریان برای دوره پایه و دوره زمانی آینده اول برای سناریوی RCP2.6 ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود دبی‌ها با



شکل ۱- هیستوگرام درصد تغییرات میانگین ماهانه رواناب شبیه‌سازی شده در دوره آتی نسبت به دوره پایه



شکل ۲- منحنی تداوم جریان دوره پایه و دوره آتی اول (a) و دوره آتی دوم (b)

جریان و تغییرات جریان^۱ نشان‌دهنده این است که در دوره آینده اول تغییرات نسبت به دوره پایه زیاد شده است.

در دوره دوم آینده تغییرات دبی میانه در سناریو RCP2.6 و RCP8.5 بیشتر از سایر سناریوها و تغییرات رواناب میانه روند افزایشی را نشان داده است و با توجه به نمایه چولگی جریان و تغییرات جریان، تغییرات در سناریوهای دوره‌های آتی دوم نسبت به دوره اول بیشتر خواهد بود و در دوره آتی دوم بیشترین تغییرات در سناریو RCP4.5 و RCP8.5 بوده است. به‌طور کلی به

مقایسه رواناب دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه با استفاده از نمایه‌های جریان

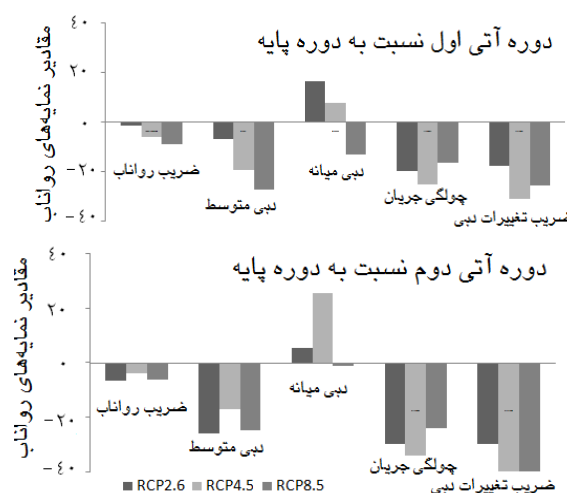
نمایه‌های محاسبه شده برای مقایسه مقادیر رواناب برای دو دوره آتی در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳، در دوره آتی اول نمایه ضریب رواناب به‌ترتیب در سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش خواهد یافت. نمایه دبی متوسط نسبت به دوره پایه نیز روند کاهشی دارد، که در سناریو RCP 8.5 مقدار کاهشی بیشتری نسبت به سایر سناریوها نشان داده است. مقادیر دبی میانه در سناریو RCP8.5 نسبت به سایر سناریوها بیشتر است. تغییرات در نمایه چولگی

¹ Streamflow variability

مقادیر شاخص BiasRR (اختلاف میانگین رواناب آینده نسبت به دوره پایه) در دوره دوم آینده در سناریو RCP2.6 به دوره مشاهداتی نزدیکتر شده (۰/۲۵-) ولی در دو سناریو دیگر اختلاف نسبت به دوره پایه بیشتر شده است. به عبارت دیگر، تغییرات نسبت به دوره پایه در دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در دوره دوم آتی بیشتر نمایان است. به دلیل اختلاف بیشتر مقادیر میانگین رواناب در دوره آینده دوم و دوره پایه تأثیرات تغییر اقلیم اهمیت خود را بیشتر نشان خواهد داد، زیرا اختلاف زیاد نشان‌دهنده دوری از اقلیم دوره مشاهداتی می‌باشد. رواناب میانه در هر سه سناریو در دوره دوم آتی، افزایش خواهد یافت و به نوعی مقادیر دبی میانه در دوره آینده دوم نسبت به دوره پایه بزرگتر می‌باشد. احتمال رخ دادن دبی‌های بیشینه به دلیل اختلاف کاهشی زیاد نمایه BiasFHV با دوره پایه، همانند دوره آتی قبلی، بسیار کم است و در سناریو RCP2.6 احتمال رخ دادن BiasFHV، کمترین مقدار را نشان داده است. مقادیر شاخص BiasFMM در سناریو RCP4.5 به نسبت سایر سناریوها بیشتر و در سناریو RCP8.5 کمترین مقدار (۱/۰۴-) را داراست. نمایه BiasFLV که مربوط به دبی‌های کم آبی و پایه است در سناریوی RCP2.6، نسبت به دوره پایه تغییری نداشته، در سناریو RCP4.5 مقادیر آن افزایش یافته و در سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه کمترین مقدار (۲۷/۶۰-) را نشان داده است. با توجه به نتایج بدست آمده به نوعی می‌توان گفت در منطقه مورد مطالعه مقادیر دبی‌های کم آبی و اوج نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت و فقط مقادیر دبی‌ها میانه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. یک دلیل این مسئله را می‌توان در کاهش مقادیر بارش‌های پیش‌بینی شده آینده که منجر به کاهش دبی‌های اوج می‌شود و همچنین افزایش مقدار دما در دوره آتی که منجر به کاهش ذخایر برفی و افزایش تبخیر-تعرق و در نتیجه کاهش ذخیره آب حوضه برای فصول کم آبی می‌شود، دانست. در مطالعه آشفته و مساح‌بوانی

غیر از نمایه دبی میانه مقادیر سایر نمایه‌ها در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابند (شکل ۳).

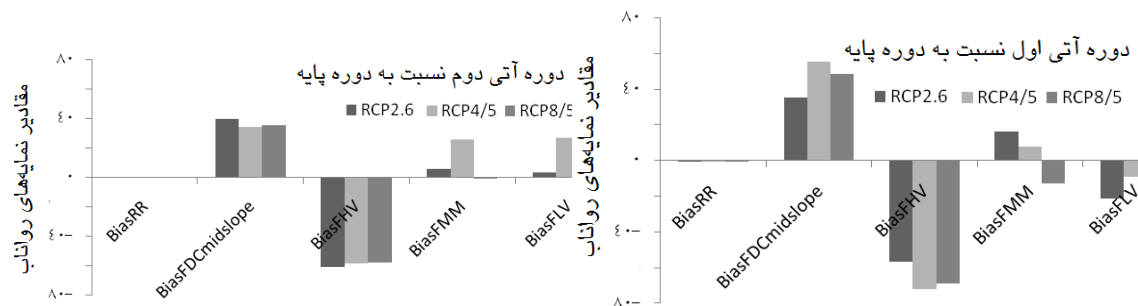
تغییرات نمایه‌های منحنی تداوم جریان در سه سناریوی تغییر اقلیم مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، بیشترین تغییرات دوره آتی اول نسبت به دوره پایه، در هر سه سناریوی مورد بررسی، مربوط به نمایه BiasFHV (مقادیر دبی بیشینه) است؛ به طوری که در هر سه سناریوی مورد مطالعه منفی شده است. این بدان معناست که احتمال وقوع دبی‌های بیشینه در این حوضه در آینده کمتر خواهد بود. مقادیر نمایه BiasFMM (مقدار دبی میانه) در دوره آتی اول در دو سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 افزایش و در سناریو RCP8.5 کاهش خواهد یافت. شاخص BiasFLV بیان‌گر مقادیر دبی‌ها کم آبی می‌باشد که در هر سه سناریو در آینده (به ویژه در سناریو RCP8.5) کاهش خواهند یافت. با توجه به شکل ۴ که سیر نزولی (منفی) این شاخص را نشان داده است، می‌توان نتیجه گرفت، در دوره‌های آینده در فصول خشک و کم آبی مقدار رواناب کاهش زیادی نسبت به زمان حال خواهد داشت.



شکل ۳- تغییرات نمایه‌های رواناب در دو دوره آتی نسبت به دوره پایه

واز و تنگ (۲۰۱۱)، رزنبرگ و همکاران (۲۰۰۳) در آمریکا و روحانی و جعفرزاده (۲۰۱۷) در حوضه آبخیز گرگانرود مطابقت دارد. الگوی تغییرات ماهانه مشاهده‌ای که بیانگر کاهش رواناب در اکثر ماه‌های سال می‌باشد، در مطالعات وو و همکاران (۲۰۱۲) و جانگ و چنگ (۲۰۱۲) در مناطق مختلف مشاهده شده است.

(۲۰۱۰) مشاهده کردند احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود. این در حالی است که عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند در اثر تغییر اقلیم در مناطق شمالی کشور احتمال وقوع سیلاب‌های شدید در آینده بیشتر خواهد شد. نتایج این تحقیق با یافته‌های مینو و همکاران (۲۰۱۲) و شرستا و همکاران (۲۰۱۳) که افزایش بارش و رواناب را در آینده پیش‌بینی کردند، هم‌خوانی ندارد. نتایج مربوط به کاهش رواناب سالانه با نتایج ذهبیون و همکاران (۲۰۱۰) در حوضه سد کرخه،



شکل ۴- تغییرات نمایه‌های منحنی تداوم جریان در سناریوهای مختلف

اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل HBV پرداخته شد. بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر مدل مفهومی HBV با استفاده از الگوریتم DDS انجام گرفت. با توجه به اینکه یکی از ورودی‌های مدل HBV تخریر پتانسیل می‌باشد؛ بنابراین، با استفاده از مقادیر دمای پیش‌گویی شده آینده با روش ماشین بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار R، مقادیر آن پیش‌گویی شد.

پس از محاسبه مقادیر دبی در دوره پایه و آینده اقدام به ترسیم FDS و سپس مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب خروجی از حوضه با استفاده از نمایه‌های جریان گردید. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب در ایستگاه آرازکوسه، با استفاده از مدل HBV و نمایه‌های رواناب نشان داده است که رواناب حوضه در دوره آتی اول و دوم در اکثر ماه‌های سال کاهش خواهد یافت. با توجه به نمایه‌های رواناب دبی‌های

نتیجه‌گیری کلی

جمعیت رو به رشد در منطقه مورد مطالعه و سیستم‌های کشاورزی آسیب‌پذیر منطقه به منابع آب محدود در حوضه مورد مطالعه وابسته هستند. در این شرایط هر گونه تغییر در پارامترها اقلیمی می‌تواند تأثیر محسوسی در منابع آب منطقه و زندگی مردم بگذارد. به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیم مدل گردش عمومی CanESM2 و برای ریزمقیاس‌سازی داده‌ها از نتایج مدل SDSM استفاده شد. پس از اطمینان از عملکرد مدل SDSM اقدام به شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما با استفاده از داده‌های NCEP و سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دو دوره زمانی آینده اول (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دوره آینده دوم (۲۰۵۱-۲۰۷۰) در ایستگاه آرازکوسه شد. در نهایت به بررسی تأثیر تغییر

هزینه‌هایی به مراتب بیشتر را در آینده نه چندان دور به دلیل نداشتن سیاست‌ها و برنامه‌ریزی مشخص در مقابله با اثرات منفی پدیده تغییر اقلیم بردارد. نتایج این مطالعه می‌تواند رهیافتی برای مدیران محلی برای ارائه استراتژی‌های پاسخ سازگار با تغییر اقلیم در خصوص برنامه ریزی برای امنیت غذایی در آینده و توسعه کشاورزی و اقتصادی با هدف کاهش اثرات سوء بهره‌برداری نامتوازن و مهاجرت‌های اقلیمی باشد.

متوسط در دوره آتی اول و دوم در هر سه سناریو افزایش یافته است. کمترین رخداد نیز مربوط به دبی‌های با مقادیر اوج در هر دو دوره آتی، به‌ویژه در دوره آتی اول خواهد بود. همچنین مقایسه FDS در دوره پایه و آینده نشان داد که در دوره آینده نسبت به دوره پایه مقادیر دبی‌های کمینه و کم آبی کوچک‌تر شده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع تغییر اقلیم، ضروری است که توجه بیشتری به این امر مهم شود. زیرا که عدم توجه به آن موجب خواهد شد که کشور

منابع مورد استفاده

- Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS and Yang H, 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45: 1-16.
- Ashiq M, Zhao C, Ni J and Akhtar M, 2010. GIS-Based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain-plain areas of Upper Pakistan for regional climate change impact studies. *Theoretical and Applied Climatology* 99 (3): 239-253.
- Ashofteh P and Massah Bouani AR, 2010. Impact of climate change on maximum discharges: Case Study of Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan. *Journal of Water and Soil Science* 14 (53): 28-38. (In Persian)
- Baofeng G, Gunn SR, Damper RI, and Nelson JDB, 2008. Customizing Kernel functions for SVM-Based hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Image Processing* 17: 4: 622-629.
- Bergstrom S, 1995. The HBV model, *Computer Models of Watershed Hydrology*, edited by: Singh, V, Water Resources Publications 443-476.
- Chen ST and Yu PS, 2007. Real-time probabilistic forecasting of flood stages. *Journal of Hydrology* 340: 63-77.
- Jung W and Chang H, 2012. Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the Willamet the River Basin. Oregon. USA. *Theoretical and Applied Climatology* 108: 355- 371.
- Karimi Sh, 2014. Assessment of the impact of climate change on hydrological drought in ZayandehRood. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 2 (8): 366-376. (In Persian)
- Khoshravesh M and Baoj-Rezaee Z. 2016. The Effect of Climate Change on Flood Frequency of Kelardasht Basin using K-nn and HadCM3 Model. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 26 (3): 211-221. (In Persian)
- Meenu R, Rehana S and Mujumdar PP, 2012. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga- Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Processes* 27 (11):1572-1589.
- Mu T, and Nandi AK, 2007. Breast cancer detection from FNA using SVM with different parameter tuning systems and SOM-RBF classifier. *Journal of the Franklin Institute* 344 (3-4): 285- 311.
- Pourmohamadi S, Dastorani MT, Godarzi M, Mesah Bavani A, Jafari H and Rahimiyan MH, 2017. Effects of climate change on river runoff and provide solutions to adaptations effects (Case Study: Basin Tuyserkan Hamedan). *Journal of Watershed Management Science* 11 (37):1-12. (In Persian)
- Rosenberg NJ, Brown RA, Izaurralde RC and Thomson AM, 2003. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agricultural and Forest Meteorology* 117:73-96.
- Rezaei M, Nahtni M, Moghafddamnia AR, Abkar A and Rezaei M, 2016. Long-term precipitation prediction using statistical downscaling model. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 26 (2-1): 115-127. (In Persian)
- Rouhani H and Jafarzadeh MS, 2017. Assessing the climate change impact on hydrological response in the

- Gorganrood river basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change* DOI: 10.2166/wcc.2017.207
- Sanikhani H, Dinpashoh Y, Pouryosef S, Gavidel S and Solati B, 2014. The Impacts of climate change on runoff in watersheds (Case Study: Ajichay watershed in East Azerbaijan Province, Iran. *Journal of Water and Soil* 27 (6): 1225-1234. (In Persian)
- Shafii M and Tolson BA, 2015. Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives. *Water Resource Research* 51 (5): 3796-3814.
- Shrestha B, Babel MS, Maskey S, van Griensven A, Uhlenbrook S, Green A and Akkharath I, 2013. Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River basin: a case study of the Nam Ou basin, Lao PDR. *Hydrology Earth System Science* 17: 1-21.
- Siebert J and Vis MJP, 2012. Teaching hydrological modeling with a user friendly catchment runoff-model software package. *Earth System Science* 16: 3315-3325.
- Teutschbein C, Grabs T, Karlsen RH, Laudon H and Bishop K, 2015. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region. *Water Resource Research* 51: 9425-9446.
- Tolson BA, Shoemaker CA, 2007. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resource Research* 43 (1): W01413.
- Vaze J and Teng J, 2011. Future climate and runoff projections across New South Wales, Australia: results and practical applications. *Hydrological Processes* 25 (1): 18-35.
- Wilby RL and Dawson CW, 2013. The statistical down scaling model: Insights from one decade of application. *International Journal of Climatology* 33: 1707-1719.
- Wu Y, Liu S and Abdul-Aziz O, 2012. Hydrological effects of the increased CO₂ and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT. *Climatic Change* 110 (3-4): 977-1003.
- Yadav M, Wagener T and Gupta H, 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources* 30 (8): 1756-1774.
- Yilmaz KK, Gupta HV and Wagener T, 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resource Research* 44 (9): W09417.
- Zahibion B, Godarzi M and Mesah Bavani A, 2010. Application of SWAT model in runoff prediction in future under climate change. *Journal of Climate Research* 1 (3-4): 43-58. (In Persian)