

## تغییرات رژیم جریان رودخانه گاماسیاب تحت سناریوهای تغییر اقلیم

شهاب‌الدین زارع‌زاده مهریزی<sup>۱</sup>، اسداله خورانی<sup>۲\*</sup>، جواد بذرافشان<sup>۳</sup>، ام‌البین بذرافشان<sup>۴</sup>

shahabazar13@gmail.com

khoorani@hormozgan.ac.ir

jbazr@ut.ac.ir

bazrafshan1361@gmail.com

۱. دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

۲. دانشیار، گروه علوم جغرافیایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳. دانشیار، گروه کشاورزی و آبیاری، دانشگاه تهران، تهران

۴. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

### چکیده

در حوضه رودخانه‌ها، رژیم طبیعی جریان در حفظ تنوع زیستی، بومی و یکپارچگی اکوسیستم نقش مهمی دارد. از این رو مطالعات هیدرولوژیک هر حوضه تحت شرایط تغییر اقلیم، به منظور ساماندهی و مدیریت آن ضروری است. این پژوهش در حوضه رودخانه گاماسیاب، به عنوان یکی از سرشاخه‌های اصلی رود کرخه انجام شده است. در پژوهش حاضر از خروجی‌های مدل CSIRO-Mk از سری مدل‌های CMIP5 و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای آینده نزدیک (۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ میلادی) و آینده دور (۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ میلادی) استفاده شده است. در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان استفاده شده است. از شاخص‌های حداقل دبی هفت روزه، حداکثر دبی هفت روزه، تداوم سیلاب، ضریب تغییرات و میانگین دبی برای بررسی تغییرات جریان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد رژیم جریان رودخانه تحت سناریوهای مختلف در دوره آتی تغییر خواهد کرد. شدت این تغییرات در آینده نزدیک کم و هرچه به سمت پایان قرن حاضر پیش رویم بیشتر خواهد شد. تحت سناریو RCP2.6 ضمن افزایش آب در دسترس از شدت سیلاب‌ها و وقوع سیلاب‌های ناگهانی کاسته می‌شود. از طرفی تحت سناریو RCP8.5 با کاهش آب در دسترس احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی و خطرات ناشی از آن افزایش می‌یابد.

### کلیدواژه

گاماسیاب، رژیم جریان رودخانه، مدل SWAT، مدل‌های CMIP5.

### سرآغاز

هیدرولوژی در مناطق مختلف انجام شده است (Lettenmaier et al., 1999; Stone et al., 2001; Gosain et al., 2006; Xu et al., 2015). امروزه با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای مختلف به بررسی آثار تغییر اقلیم در زمینه‌های گوناگون پرداخته می‌شود. با توجه به بزرگ مقیاس بودن مدل‌های گردش عمومی جو، با روش‌های مختلف ریزگردانی داده‌های مورد نیاز از مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس منطقه‌ای استخراج می‌شود. با انتشار سری پنجم مدل‌های گردش عمومی جو توسط IPCC در پژوهش‌های جدید محققان

بررسی محققان نشان می‌دهد تغییر اقلیم بر طیف وسیعی از پدیده‌های اقلیمی، چرخه هیدرولوژیکی، کشاورزی، اکوسیستم گیاهی و جانوری و مسائل اجتماعی اثر می‌گذارد. پدیده تغییر اقلیم و آثار آن، از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در مدیریت منابع آب شناخته شده است (IPCC, 2007). با توجه به اهمیت پیش‌بینی آثار تغییرات آب و هوایی بر هیدرولوژی و فرایندهای اکولوژیکی برای مدیران حوضه‌های آبخیز، مطالعات متعددی برای بررسی آثار تغییر اقلیم بر دما، بارش و

حوضه‌هایی که میانگین دبی تغییر زیادی نداشته باشد مقدار دبی حداقل کاهش یافته و باعث افزایش روزهای خشک می‌شود (Papadimitriou et al., 2016). همچنین در پژوهشی دیگر با استفاده از سناریوهای مدل‌های سری CMIP5 و روش ریزگردانی BC به بررسی آثار تغییر اقلیم بر میزان و فراوانی دبی حداقل و حداکثر پرداخته شد. نتایج نشان داد افزایش دبی حداقل باعث افزایش آب در دسترس در دوره‌های خشک و همچنین نمک‌زدایی اراضی پایین دست رودخانه می‌شود ولی از طرفی افزایش دبی حداکثر خطر سیل‌ها را افزایش می‌دهد (Hoang et al., 2016).

در ایران زارع‌زاده و همکاران (الف ۱۳۹۶) با ریزگردانی چهار مدل گردش عمومی جو از سری CMIP5 و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به بررسی آثار تغییر اقلیم در حوضه رودخانه گاماسیاب پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد مقدار بارندگی سالانه حوضه در پنج ایستگاه مورد بررسی با توجه به سناریوهای مدنظر و دوره‌های زمانی مختلف بین ۵۲/۸ تا ۳۱/۶- درصد تغییر خواهد کرد میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه در ایستگاه کرمانشاه به ترتیب حداکثر تا ۲/۷۵C° و ۲/۱۵C° و در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳C° و ۴/۲۶C° با توجه به سناریوهای مختلف افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات ۱۷/۸ تا ۴۲/۳- درصدی در میزان رواناب تحت سناریوهای مختلف در آینده رخ خواهد داد.

با توجه به توانایی‌های مدل SWAT مطالعات بسیاری در زمینه‌های گوناگون انجام شده است. از این مدل برای شبیه‌سازی رژیم جریان رودخانه و پیش‌بینی رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم، تعادل مواد شیمیایی، شبیه‌سازی انتقال رسوب و اعمال سناریوهای مدیریتی نظیر مطالعه تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه استفاده می‌شود. با توجه به پایه فیزیکی مدل SWAT باید داده‌های ورودی و بازه تغییرات آن‌ها با واقعیت همخوانی و دقت بالایی داشته باشد (Arnold et al., 2012). از

برای بررسی آثار تغییر اقلیم به ریزگردانی آماری مدل‌های سری پنجم (CMIP5) و استفاده از نتایج آن‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی پرداختند. داده‌های ریزگردانی شده مدل‌های CMIP5 کمک شایانی به محققان و سیاست‌گذاران در زمینه بررسی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب و محیط‌زیست می‌کند.

استفاده از مدل‌های سری پنجم و اجرای مدل هیدرولوژیکی، حاکی از تغییرات ملموس جریان تحت اثر تغییر اقلیم است (Meehl et al., 2014). سناریوهای مختلف تغییر اقلیمی آثار متفاوتی را بر هیدرولوژی و رژیم جریان رودخانه دارند بررسی تغییرات جریان در مقیاس جهانی تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل سری CMIP5 دلالت بر کاهش میزان آب در دسترس در صورت ادامه یافتن حد بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت (Aikama et al., 2013). با توجه به بررسی انجام شده در حوضه رودخانه بیجیانگ<sup>۳</sup> مشخص شد که بیشترین تغییر در میزان سیلاب‌های بزرگ تحت RCP2.6<sup>۴</sup> و کمترین میزان تغییرات تحت RCP4.5 رخ می‌دهد (Wu et al., 2015). برای انجام مطالعه جهانی اثر تغییرات اقلیم را روی سه بخش اقلیم، کشاورزی و هیدرولوژی به ترتیب با شاخص بارش، رطوبت خاک و رواناب از ۱۰ مدل از سری CMIP5 و دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج حاکی از افزایش فراوانی دوره‌های خشکی و افزایش کمی در سیلاب‌ها تحت RCP4.5 است. اما تحت RCP8.5 بیشتر رواناب رودخانه‌ها به سمت سیلابی شدن و رطوبت خاک به سمت خشک شدن پیش می‌رود و این وضعیت به صورت معناداری در سراسر دنیا دیده می‌شود (Dirmeyer et al., 2014). در رابطه تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداقل و حداکثر مطالعات متعددی انجام شده است در این مورد نتایج آثار تغییر اقلیم بر دبی میانگین در پنج حوضه آبخیز مهم در اروپا با استفاده از سناریو RCP8.5 و روش ریزگردانی BC<sup>۵</sup> نشان داد که چرخه آب تحت این سناریو به مرز هشدار می‌رسد. حتی در

آثار تغییر اقلیم بر رژیم جریان رودخانه در حوضه دریاچه چامپلین<sup>۷</sup> در آمریکا با استفاده از سری مدل‌های CMIP5 انجام شد، نتایج حاکی از افزایش ۳۰ درصدی جریان حداکثر ۷ روزه، افزایش روزهای سیلابی و افزایش سه برابری شاخص جریان پایه است (Mohammed et al., 2015). امروزه پیش‌بینی آثار تغییر اقلیم بر فرایندهای محیطی مورد تأیید پژوهشگران قرار گرفته است. بنابراین توجه به وضعیت هیدرولوژیکی، اکوسیستم و حتی شرایط سیاسی در ارتباط با آثار تغییر اقلیم بیشتر شده است (Stager & Thill, 2010).

رودخانه گاماسیاب یکی از پنج شاخه اصلی رودخانه کرخه است و نقش اساسی در حفظ حیات و زیست بوم منطقه دارد، در نتیجه حفظ کیفیت و کمیت آب این رودخانه دارای اهمیت فراوان است. ارزیابی آثار تغییرات آب و هوایی بر هیدرولوژی این منطقه، تا حد زیادی به مدیران، سیاست‌گذاران و دیگر ذینفعان در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار آن کمک می‌کند. مطالعات کمی در زمینه آثار تغییر اقلیم بر رژیم جریان رودخانه در کشور ما صورت گرفته است و عموماً این مطالعات با استفاده از سری پیشین مدل‌های گردش عمومی انجام شده است. در پژوهش‌های جدید استفاده از مدل‌های سری CMIP5 با توجه به دقت بالای آن‌ها و کمبود کارهای پژوهشی با این مدل‌ها در کشور ما، ضروری است. در پژوهش حاضر با ریزگردانی آماری خروجی‌های مدل CSIRO-Mk از سری CMIP5 و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به بررسی تغییرات دما و بارش برای آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۹ میلادی) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۰۹۹ میلادی) پرداخته شد. همچنین از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان استفاده شد و در ادامه با استفاده از داده‌های ریزگردانی شده مدل اقلیمی، رژیم جریان رودخانه در دوره‌های آتی پیش‌بینی شد. نتایج تحقیق حاضر به اتخاذ تدابیر لازم برای سازگاری با آثار تغییر اقلیم و مدیریت حوضه گاماسیاب کمک می‌کند.

ضعف‌های مدل SWAT عدم شبیه‌سازی مناسب دبی‌های اوج است (Chu et al., 2002; Spruill et al., 2000). زارعزاده و همکاران (ب ۱۳۹۶) به ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب پرداختند. نتایج حاکی از توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه گاماسیاب دارد و پژوهشگران می‌توانند از این مدل برای اعمال سناریوهای مدیریتی در زمان کوتاه و هزینه کم برای تصمیم‌گیری بهتر استفاده کنند.

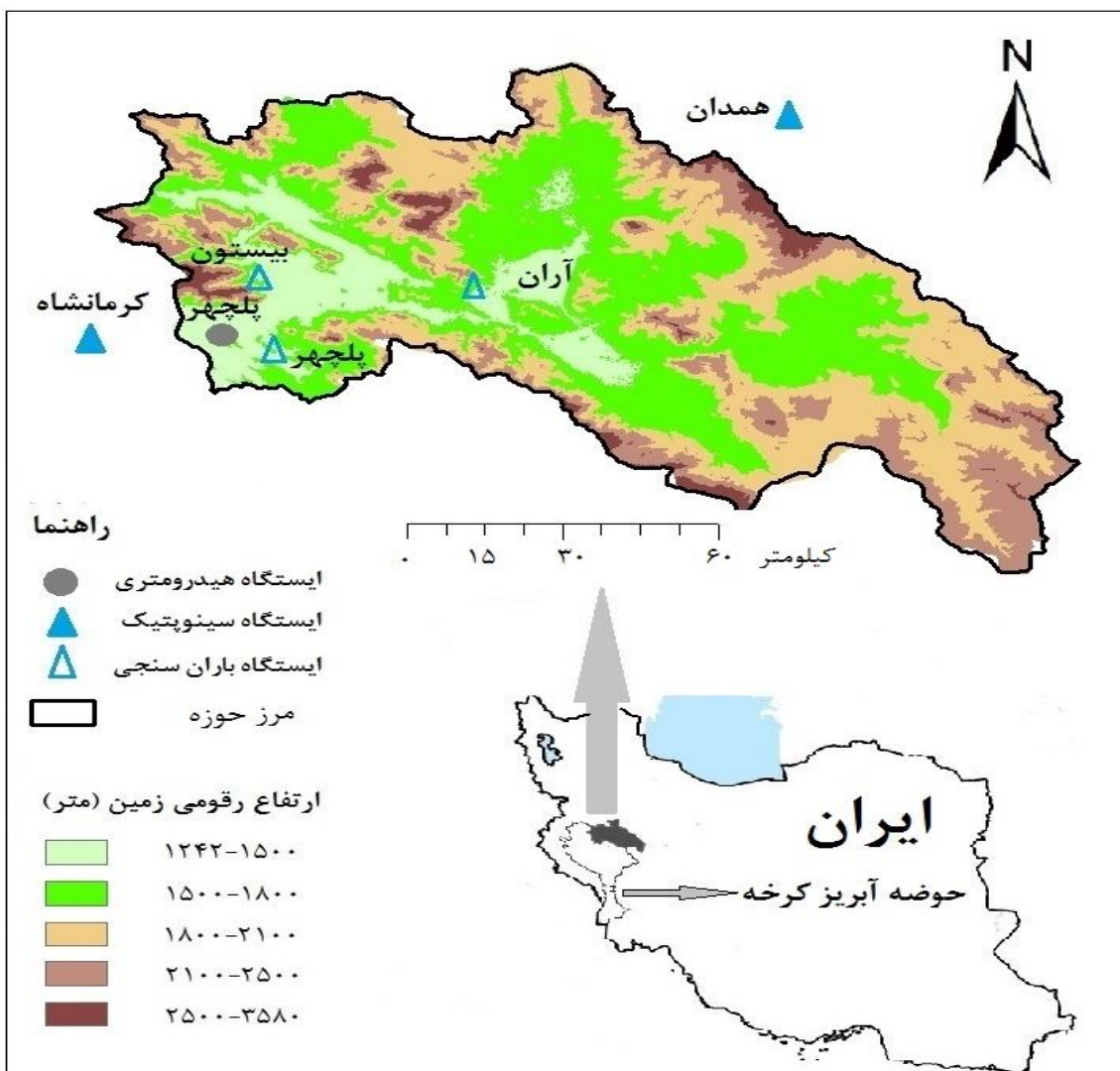
نخستین تأثیرات تغییر اقلیم بر دما و بارش قابل مشاهده است، تغییر این متغیرها باعث بر هم خوردن نظم کنونی چرخه هیدرولوژیکی می‌شود. وضعیت جدید چرخه هیدرولوژیکی باعث تغییر در رژیم جریان رودخانه می‌شود. رژیم طبیعی جریان رودخانه نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی و بومی و یکپارچگی اکوسیستم، در حوضه رودخانه‌ها را دارد (Poff et al., 1997). تغییر در رژیم جریان رودخانه می‌تواند بر اکوسیستم آبی، حرکت بار رسوبی و فعل و انفعالات دشت‌های سیلابی اثر بگذارد (Gibson et al., 2005). مطالعات انجام شده در شمال شرق آمریکا با استفاده از داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد تغییرات رژیم جریان رودخانه با یک جابجایی زمانی به اوایل بهار، رخ داده است (جریان در ماه مارس افزایش و در ماه می کاهش می‌یابد). (Hodgkins & Dudley, 2006; Hodgkins et al., 2005; Campbell et al., 2011) همچنین Hodgkins و Dudley (۲۰۱۱)، در مطالعه خود در نیوانگلند<sup>۸</sup> نشان دادند میزان آب پایه به‌عنوان یکی از شاخص‌های رژیم جریان رودخانه در فصل تابستان در نیمه دوم قرن حاضر افزایش یافته است.

خصوصیات رژیم جریان رودخانه و تغییرات آن با شاخص‌هایی نظیر بزرگی، فراوانی، تداوم، زمان و درصد تغییرات جریان مشخص می‌شود (Puckridge et al., 1997; Poff et al., 1998). این شاخص‌های جریان، ابزار مفیدی برای شناخت وضعیت رودخانه و در پی آن آگاهی از وضعیت اکوسیستم رودخانه هستند. در این زمینه بررسی

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گاماسیاب در غرب کشور بین طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۸۵ دقیقه شمالی، در محدوده استان‌های همدان، کرمانشاه و لرستان واقع شده است. مساحت حوضه در حدود ۱۱۶۹۰ کیلومترمربع است که ۵۱۵۸۱۶ هکتار آن اراضی کشاورزی، ۶۱۹۵۸۳ هکتار مرتع، ۴۹۳۸ هکتار شهر و ۲۸۶۶۳ هکتار اراضی متفرقه است. رودخانه گاماسیاب از ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهر نهاوند سرچشمه می‌گیرد. در مسیر این رودخانه در بیستون، شاخه فرعی دینور آب

به آن پیوسته و به نام گاماسیاب ادامه مسیر می‌دهد در نزدیکی فرامان به رودخانه قره‌سو متصل شده و پس از آن با نام سیمره وارد خاک لرستان می‌شود و در نهایت پس از دریافت شاخه‌ای به نام کشکان در استان خوزستان، کرخه نامیده می‌شود. ارتفاع از سطح دریا در این حوضه بین ۱۲۴۲ تا ۳۵۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه حوضه، ۴۸۹ میلی‌متر بوده که بخش اعظم بارندگی‌ها در ماه‌های سرد سال صورت می‌گیرد. میانگین دمای حداکثر بلند مدت، حداقل و میانگین به ترتیب برابر با ۱۹، ۳ و ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد است (وزارت کشاورزی، ۱۳۷۵). شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز گاماسیاب را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز گاماسیاب در غرب کشور، ارتفاع رقومی زمین و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

با استفاده از الگوریتم  $SUFI2^{14}$  در برنامه SWAT-CUP انجام شد. در برنامه  $SUFI2$  دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام واسنجی سعی می‌شود پارامترها در این محدوده قرار گیرند که به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU)<sup>۱۵</sup> می‌گویند (Abbaspour, 2011; Rouholahnejad et al., 2012). برای کمی کردن میزان دقت واسنجی یا عدم قطعیت دو شاخص R و P استفاده می‌شود. R-factor برابر است با ضخامت باند 95PPU تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب‌تر است. مقادیر R کوچک‌تر از ۱/۵ بسته به شرایط قابل قبول است (Abbaspour et al., 2004; Abbaspour, 2007). P-factor نشان‌دهنده این است که چه مقدار از داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت (95PPU) قرار گرفته‌اند و نزدیک بودن مقدار P به یک نشان‌دهنده نتیجه بهتری است. مقادیر P بزرگ‌تر از ۰/۷۰ یا ۰/۷۵ قابل قبول است (Abbaspour, 2007; Abbaspour et al., 2015).

ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی دبی با شاخص‌های مختلفی قابل سنجش است. در اینجا از ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS)<sup>۱۶</sup>، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و PBIAS استفاده شد. ضریب NS، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد مقدار این ضریب بین یک تا منفی بینهایت متغیر است. بهترین مقدار آن یک است (Donizete et al., 2016). مقادیر ۰/۷۵  $NS >$  یعنی نتایج شبیه‌سازی خوب، بین ۰/۳۶-۰/۷۵ یعنی نتایج رضایت‌بخش و پذیرفتنی بودن نتایج است (Kepner, 2008). ضریب تعیین  $R^2$  نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است، چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند مقدار  $R^2$  برابر با یک است. بنابراین مقادیر  $R^2$  نزدیک به یک، حاکی از عملکرد خوب مدل است (Guzha & Hardy, 2010). شاخص PBIAS درصد تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی جریان استفاده شد. مدل SWAT، مدلی فیزیکی، نیمه توزیعی است که برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه ارائه شده است. SWAT2012 به‌عنوان افزونه<sup>۸</sup> در محیط ArcMap کار می‌کند (Abbaspour, 2007). مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان به سه نقشه رقمی ارتفاع، خاک و کاربری اراضی نیاز دارد.

از نقشه رقمی ارتفاع (DEM)<sup>۹</sup> با دقت سلولی ۵۰ متر در ۵۰ متر سازمان نقشه‌برداری کشور برای مشخص کردن مرز حوضه، زیر حوضه‌ها و مسیر جریان در حوضه، توسط مدل استفاده شد. از لایه‌های اطلاعاتی نقشه کاربری اراضی با دقت مکانی ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر تهیه شده توسط USGS<sup>۱۰</sup> و همچنین از نقشه خاک با دقت مکانی ۱۰۰۰۰ متر در ۱۰۰۰۰ متر تهیه شده توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO)<sup>۱۱</sup> استفاده شد. مدل SWAT با استفاده از نقشه رقمی خاک، کاربری اراضی و کلاسه‌بندی شیب، زیر حوضه‌ها را به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU)<sup>۱۲</sup>، تقسیم می‌کند. هر HRU واحد اصلی شبیه‌سازی در مدل SWAT است که منطقه‌ای همگن کاربری اراضی، خاک و شیب است (Neitsch et al., 2002). داده‌های بارش روزانه از سه ایستگاه باران‌سنجی آران، پل‌چهر، بیستون و دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه برای دوره زمانی ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی تهیه شد. برای همین دوره زمانی داده‌های دمایی شامل دمای حداکثر و حداقل روزانه، از دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه به دست آمد. برای واسنجی<sup>۱۳</sup> مدل و همچنین مقایسه تغییرات رژیم جریان رودخانه تحت شرایط تغییر اقلیم از داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل‌چهر در طول سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده در شکل ۱ آمده است.

بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT

(al. 1996).

$$\Delta Ti = (\bar{T}_{GCM,fut,i} - \bar{T}_{GCM,bas,i}) \quad (1)$$

$$\Delta Pi = \left( \frac{\bar{P}_{GCM,fut,i}}{\bar{P}_{GCM,bas,i}} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق  $\Delta Ti$  و  $\Delta Pi$  به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین بلند مدت برای هر ماه  $(1 \leq i \leq 12)$ ،  $\bar{T}_{GCM,fut,i}$  و  $\bar{P}_{GCM,fut,i}$  به ترتیب میانگین بلند مدت دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های CMIP5 در دوره آتی برای هر ماه،  $\bar{T}_{GCM,bas,i}$  و  $\bar{P}_{GCM,bas,i}$  به ترتیب میانگین بلند مدت دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های CMIP5 در دوره مشاهداتی برای هر ماه است. بعد از محاسبه  $\Delta Ti$  و  $\Delta Pi$  از روش عامل تغییر برای تولید سری زمانی سناریوهای اقلیمی استفاده می‌شود. در این روش، سناریوهای تغییر اقلیم با رابطه‌های ۳ و ۴ به مقادیر مشاهداتی اضافه می‌شود (Ho et al. 2012).

$$T = \Delta T + T_{obs} \quad (3)$$

$$P = \Delta P \times P_{obs} \quad (4)$$

در رابطه‌های (۳) و (۴)  $T_{obs}$  و  $P_{obs}$  به ترتیب بیانگر سری زمانی دما و بارش مشاهداتی در دوره پایه،  $T$  و  $P$  سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما و بارش در دوره آتی،  $\Delta T$  و  $\Delta P$  سناریوی تغییر اقلیم ریزگردانی شده هستند.

در این پژوهش رژیم جریان رودخانه و تغییرات آن، تحت شرایط تغییر اقلیم برای توزیع دبی‌های بالا<sup>۲۲</sup> و توزیع دبی‌های پایین<sup>۲۳</sup> بررسی شد. توزیع دبی‌های بالا را با استفاده از سه شاخص دبی حداکثر هفت روزه (7QMAX)<sup>۲۴</sup>، شاخص توزیع دبی بالا (Q1.67) و تداوم سیل (FLDDUR)<sup>۲۵</sup> بررسی شد. برای بررسی توزیع دبی‌های پایین از پارامتر دبی حداقل هفت روزه (7QMIN)<sup>۲۶</sup>، استفاده شد. از شاخص ضریب تغییرات<sup>۲۷</sup> دبی روزانه نیز برای نشان دادن تغییرات کلی جریان بدون در نظر گرفتن سری زمانی استفاده شد.

دبی حداکثر هفت روزه، میانگین دبی‌های حداکثر در

شده و مشاهداتی است که در واقع تخمینی از میزان انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. مقادیر PBIAS نزدیک به صفر نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است (Kepner et al., 2008). مقادیر PBIAS مابین ۲۵+ درصد تا ۲۵- درصد رضایت‌بخش در نظر گرفته می‌شود (Moriassi et al., 2007; Motovilov et al., 1999).

دوره زمانی ۱۹۷۷-۱۹۹۵ و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ میلادی بر اساس گام زمانی روزانه به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای متعادل شدن مدل با شرایط محیطی دو سال نخست نیز برای گرم کردن<sup>۱۷</sup> مدل اختصاص یافت.

مشکل اصلی در استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو در پژوهش‌های منطقه‌ای، بزرگ مقیاس بودن آن‌ها است. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای مدل‌های گردش عمومی جو وجود دارد که به آن ریز مقیاس کردن<sup>۱۸</sup> یا ریزگردانی می‌گویند (Wilby & Harris, 2006). مدل‌های آماری و دینامیکی متنوعی برای ریزگردانی وجود دارد ولی به علت عدم به‌روزرسانی برای مدل‌های CMIP5، نمی‌توان از آن‌ها در ریزگردانی استفاده کرد. امروزه استفاده از روش‌های آماری تجربی<sup>۱۹</sup> برای ریزگردانی مدل‌های CMIP5 رو به افزایش است (Wang et al., 2016). بسته به نحوه عمل روش‌های آماری تجربی به دو دسته CF<sup>۲۰</sup> یا تغییر عامل و BC تقسیم می‌شوند (Ho, 2012). با توجه به نتایج رضایت‌بخش روش تغییر عامل بر پایه‌ی میانگین<sup>۲۱</sup> (Wang et al., 2016)، در این تحقیق از این روش برای ریزگردانی مدل‌های CMIP5 استفاده شد. در روش تغییر عامل، نخست سناریوهای تغییر دما و بارش بر اساس میانگین بلند مدت محاسبه می‌شوند. این سناریوها برای دما «اختلاف» و برای بارش «نسبت» است (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹). سناریوهای تغییر دما و بارش برای هر ماه مطابق با رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود (Jones et

حداقل و حداکثر یک متغیر توزیع مقادیر حدی نامیده می‌شود. در بررسی حاضر از توزیع لوگ‌نرمال دو پارامتری برای محاسبه Q1.67 استفاده شد. تابع چگالی توزیع لوگ‌نرمال به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x \sigma \sqrt{2\pi}} \quad [5]$$

که  $X$  دبی حداکثر لحظه‌ای،  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار لگاریتم  $X$  هستند.

### نتایج

مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل چهر برای کل حوضه واسنجی شد برای انجام آنالیز حساسیت و ارزیابی مدل نیز از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. طول دوره آماری داده‌ها از سال ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی بود، ۲ سال نخست برای گرم کردن مدل، از سال ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۵ میلادی برای واسنجی و از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ میلادی برای اعتبارسنجی استفاده شد.

نتایج تحلیل‌های آماری انجام شده در خصوص میزان انطباق بین مقادیر دبی روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و ارزیابی کارایی مدل در جدول شماره ۱ آمده است. نتایج دلالت بر توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه دارد. بنابراین کارایی مدل برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر اساس شاخص کیفی ارائه شده در تحقیقات پیشین خوب است (Abbaspour, 2007.; Neitsch et al., 2002).

طول هفت روز در هر سال است. برای این منظور میانگین متحرک هفت روزه دبی روزانه ایستگاه‌ها محاسبه شده و برای هر سال حداکثر آن انتخاب می‌گردد که حداکثر دبی هفت روزه سالانه نامیده می‌شود (Caruso, 2000). بنا به تعریف Leopold and Dunne (1978) دبی لبالب<sup>۲۸</sup> با انتقال رسوب، جابجایی رسوبات انباشته شده در مسیر جریان و تغییرات در پیچ و خم کانال رودخانه، در شکل‌دهی شرایط متوسط مورفولوژی رودخانه مؤثرترین نقش را دارد. دبی با دوره بازگشت ۱/۶۷ سال را به‌عنوان دبی لبالب معرفی کردند (Chinnayi et al. 2011). شاخص Q1.67 به صورت جریانی بیش از دبی با دوره بازگشت ۱/۶۷ سال تعریف می‌شود (Leopold, 1978 Dunne and). تداوم سیل (FLDDUR) نیز میانگین تعداد روزهایی از سال که دبی برابر یا بیش از Q1.67 است دبی حداقل هفت روزه، میانگین دبی‌های حداقل در طول هفت روز در هر سال است (Mohammed et al., 2015). شاخص ضریب تغییرات دبی روزانه حاصل نسبت انحراف معیار استاندارد بر میانگین دبی است (Jones et al. 1996).

برای انجام آنالیز فراوانی دبی‌های حداکثر هفت روزه نخست باید حداکثر جریان‌های هفت روز سالانه استخراج شد. برای این منظور میانگین متحرک هفت روزه دبی روزانه ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود و برای هر سال حداکثر آن انتخاب می‌شود که به آن حداکثر دبی هفت روزه سالانه گفته می‌شود. به روشی مشابه حداقل دبی هفت روزه محاسبه می‌شود (Caruso, 2000). توزیع احتمالاتی مقادیر

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه پل چهر

محدوده قابل قبول	اعتبارسنجی	واسنجی	معیار
$R^2 > 0/5$	0/۶۱	0/۷۳	$R^2$
$NS > 0/5$	0/۵۷	0/۷۱	نش - ساتکلیف
$P > 0/7$	0/۷۱	0/۷۹	P-factor
$R < 1/5$	۱/۳۴	۱/۳۶	R-factor

RCP2.6 در آینده نزدیک و دور به ترتیب ۱۲۶ و ۱۲۹ درصد محاسبه شد. همچنین تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک و دور ضریب تغییرات به ترتیب ۱۴۵ و ۱۴۲ درصد محاسبه شد. نتایج ضریب تغییرات نشان می‌دهد تحت سناریوی RCP2.6 نرخ تغییرات جریان و سیلاب‌های ناگهانی به صورت معناداری کاهش می‌یابد. این کاهش در آینده دور بیشتر خواهد بود. مقادیر ضریب تغییرات تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک و دور نشان می‌دهد مقدار نرخ تغییرات جریان نسبت به دوره مشاهداتی کم‌تر است ولی در آینده دور نرخ تغییرات جریان نسبت به آینده نزدیک بیشتر می‌شود.

نتایج حداکثر دبی هفت روزه و حداقل دبی هفت روزه در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است. تغییرات حداکثر دبی هفت روزه تحت سناریو RCP2.6 در آینده نزدیک و دور روند یکسانی را نشان می‌دهد. میانگین حداکثر دبی هفت روزه در دوره مشاهداتی ۲۰۹ مترمکعب بر ثانیه است. تحت سناریو RCP2.6 میانگین حداکثر دبی هفت روزه در آینده نزدیک به ۱۵۴/۴ مترمکعب بر ثانیه و در آینده دور به ۱۸۳/۷ مترمکعب بر ثانیه خواهد رسید. حداکثر دبی هفت روزه تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک و دور کاهش می‌یابد. میانگین حداکثر دبی هفت روزه در آینده نزدیک به ۱۴۶/۶ مترمکعب بر ثانیه و در آینده دور به ۹۶/۸ متر مکعب بر ثانیه خواهد رسید.

برای بررسی تغییرات رژیم جریان رودخانه تحت سناریوی‌های RCP2.6 و RCP8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ (آینده نزدیک) و ۲۰۵۰-۲۰۹۹ (آینده دور) میلادی، مدل SWAT واسنجی شده برای حوضه گاماسیاب، با استفاده از داده‌های دمای حداقل و حداکثر و بارش حاصل از ریزگردانی مدل CSIRO-Mk3-6-0 اجرا شد.

تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی بر پارامترهای رژیم جریان رودخانه در جدول ۲ آمده است. نتایج شبیه‌سازی جریان آینده رودخانه گاماسیاب نشان می‌دهد. میانگین دبی تحت سناریو RCP2.6 در آینده نزدیک ۳۳/۶ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که اندکی بیش از دبی دوره مشاهداتی (۳۳/۱ مترمکعب بر ثانیه) است. ادامه این سناریو تا آینده دور باعث افزایش ۱۷/۸ درصدی میانگین دبی و رسیدن به دبی ۴۰/۴ مترمکعب بر ثانیه می‌شود. میانگین دبی تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک با کاهشی جزئی به ۳۰/۶ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد و ادامه سناریو RCP8.5 در آینده دور باعث کاهش بسیار شدید میانگین دبی و رسیدن به ۱۹/۱ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. ضریب تغییرات، جریان کلی را بدون در نظر گرفتن توالی زمانی تغییرات جریان توضیح می‌دهد. ضریب تغییرات برای دوره مشاهداتی ۱۵۴ درصد محاسبه شد که نشان دهنده نرخ بالای تغییرات جریان و وقوع سیلاب‌های ناگهانی در رودخانه گاماسیاب است. ضریب تغییرات تحت سناریوی

جدول ۲. تغییرات پارامترهای رژیم جریان رودخانه تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

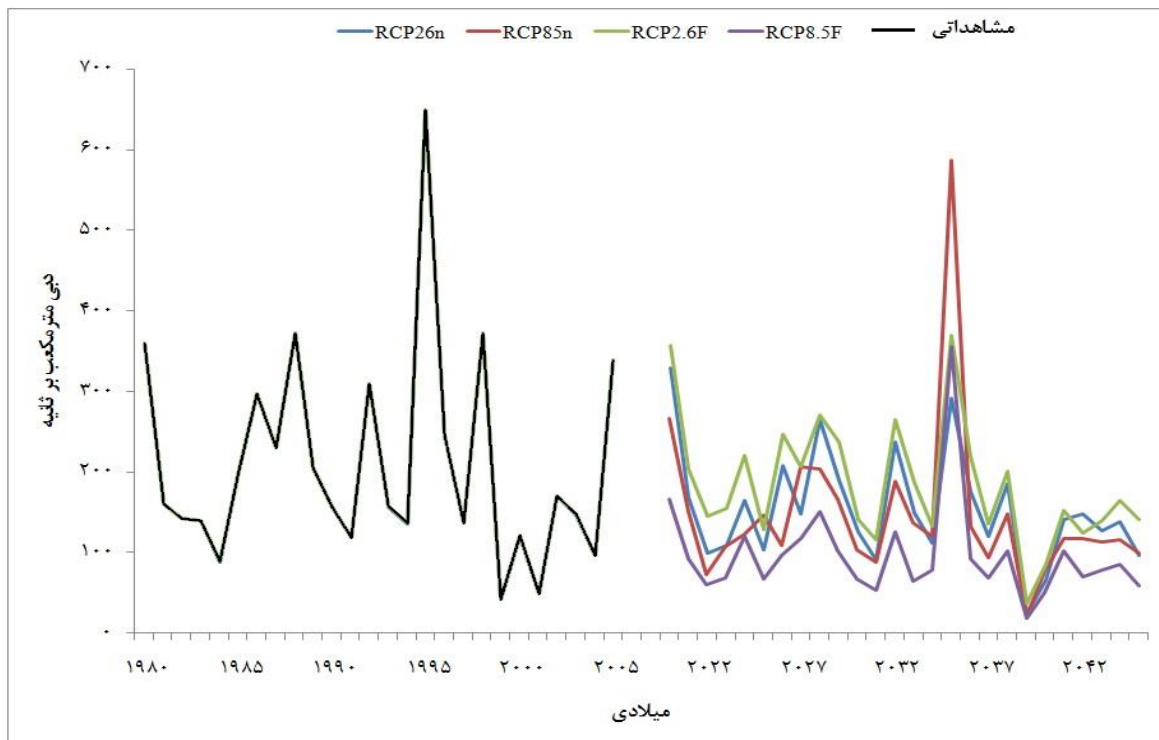
سناریوی RCP8.5		سناریوی RCP2.6		دوره مشاهداتی	دوره زمانی	پارامترها
۲۰۹۹-۲۰۵۰	۲۰۴۹-۲۰۲۰	۲۰۹۹-۲۰۵۰	۲۰۴۹-۲۰۲۰	۲۰۰۵-۱۹۷۷		
میلادی	میلادی	میلادی	میلادی	میلادی		میانگین دبی
$19/1 M^3$	$30/6 M^3$	$40/4 M^3$	$33/6 M^3$	$33/1 M^3$		ضریب تغییرات درصد
۱۴۵	۱۴۲	۱۲۶	۱۲۹	۱۵۴		میانگین حداکثر دبی هفت روزه
$96/8 M^3$	$146/6 M^3$	$183/7 M^3$	$154/4 M^3$	$209 M^3$		میانگین حداقل دبی هفت روزه
$0/48 M^3$	$0/9 M^3$	$1/6 M^3$	$1/2 M^3$	$2 M^3$		



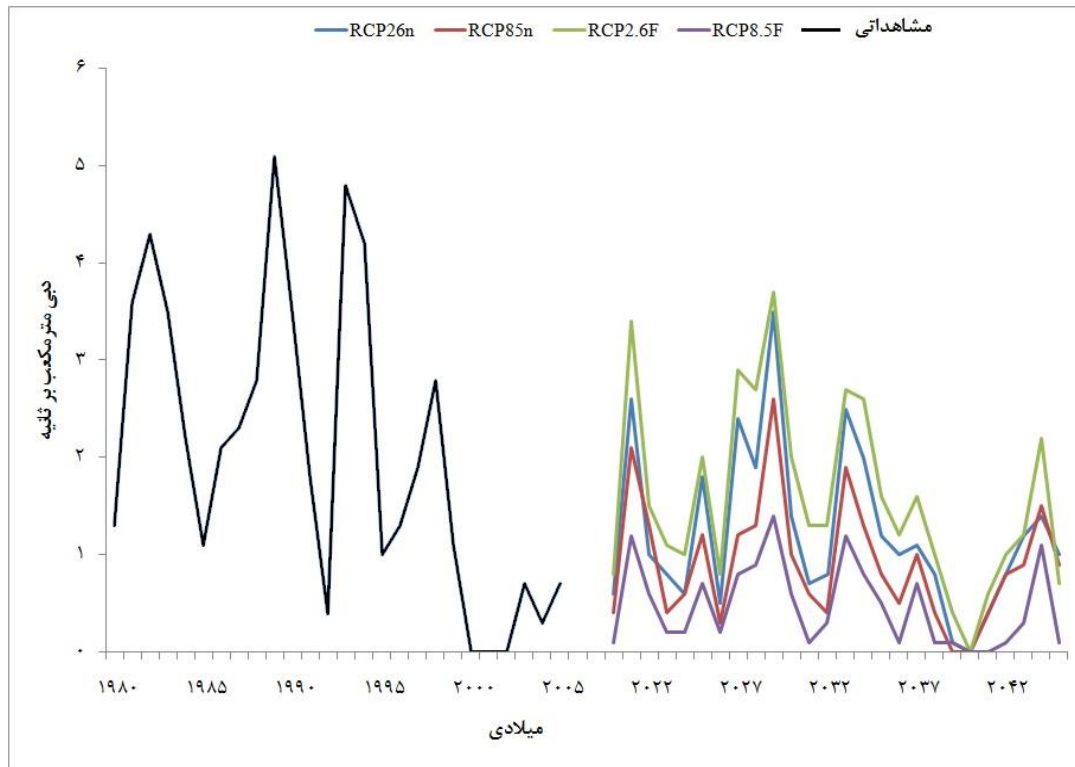
۱/۶۷ سال محاسبه شد. بدین ترتیب مقدار  $Q_{1.67}$  برابر با ۲۱۱/۹ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد. برای محاسبه روزهای سیلابی در هر سال (تداوم سیل)، تعداد روزهایی که دبی آن مساوی یا بیش از  $Q_{1.67}$  بود شمارش شد. شکل ۴ نمودار چگالی احتمالی کرنل<sup>۲۹</sup> مدت زمان سیل را برای داده‌های مشاهداتی و سناریوهای مختلف نشان می‌دهد (به علت دو رخداد سیل تحت سناریو RCP8.5 در آینده دور برای این سناریو نمودار چگالی احتمال کرنال قابل رسم نیست). در آمار، تخمین احتمال کرنال (KDE)<sup>۳۰</sup> روشی غیر پارامتری برای تخمین تابع چگالی احتمال متغیری تصادفی است. با توجه به نمودار چگالی کرنل مشخص می‌شود در دوره مشاهداتی و سناریوهای انتخابی، رخداد سیل با تداوم ۵ روزه بیشترین احتمال وقوع را دارند. همچنین تحت RCP2.6 در آینده نزدیک و دور احتمال وقوع سیلاب با مدت زمانی بزرگ‌تر از سیلاب‌های دوره مشاهداتی بیشتر خواهد شد.

نتایج حداقل دبی هفت روزه تحت سناریو RCP2.6 در دوره‌های زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و ۲۰۵۰-۲۰۹۹ میلادی، نشان می‌دهد مقدار حداقل دبی هفت روزه در آینده نزدیک و دور نسبت به دوره مشاهداتی تغییرات اندکی خواهد داشت. میانگین حداقل دبی هفت روزه در دوره مشاهداتی ۲ مترمکعب بر ثانیه است و این میانگین تحت سناریو RCP2.6 برای آینده نزدیک و دور به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. تحت سناریو RCP8.5 حداقل دبی هفت روزه کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت به طوری که در آینده نزدیک میانگین آن به ۰/۹ مترمکعب بر ثانیه و در آینده دور به ۰/۴۸ مترمکعب بر ثانیه خواهد رسید. مدیان حداقل دبی هفت روزه در همه سناریوها کاهش می‌یابد. خلاصه نتایج در جدول ۲ آمده است.

با برازش توزیع لوگ‌نرمال دو پارامتری روی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای مشاهداتی مقدار دبی با دوره بازگشت



شکل ۲. نمودار حداکثر دبی هفت روزه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف



شکل ۳. نمودار حداقل دبی هفت روزه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف

### بحث

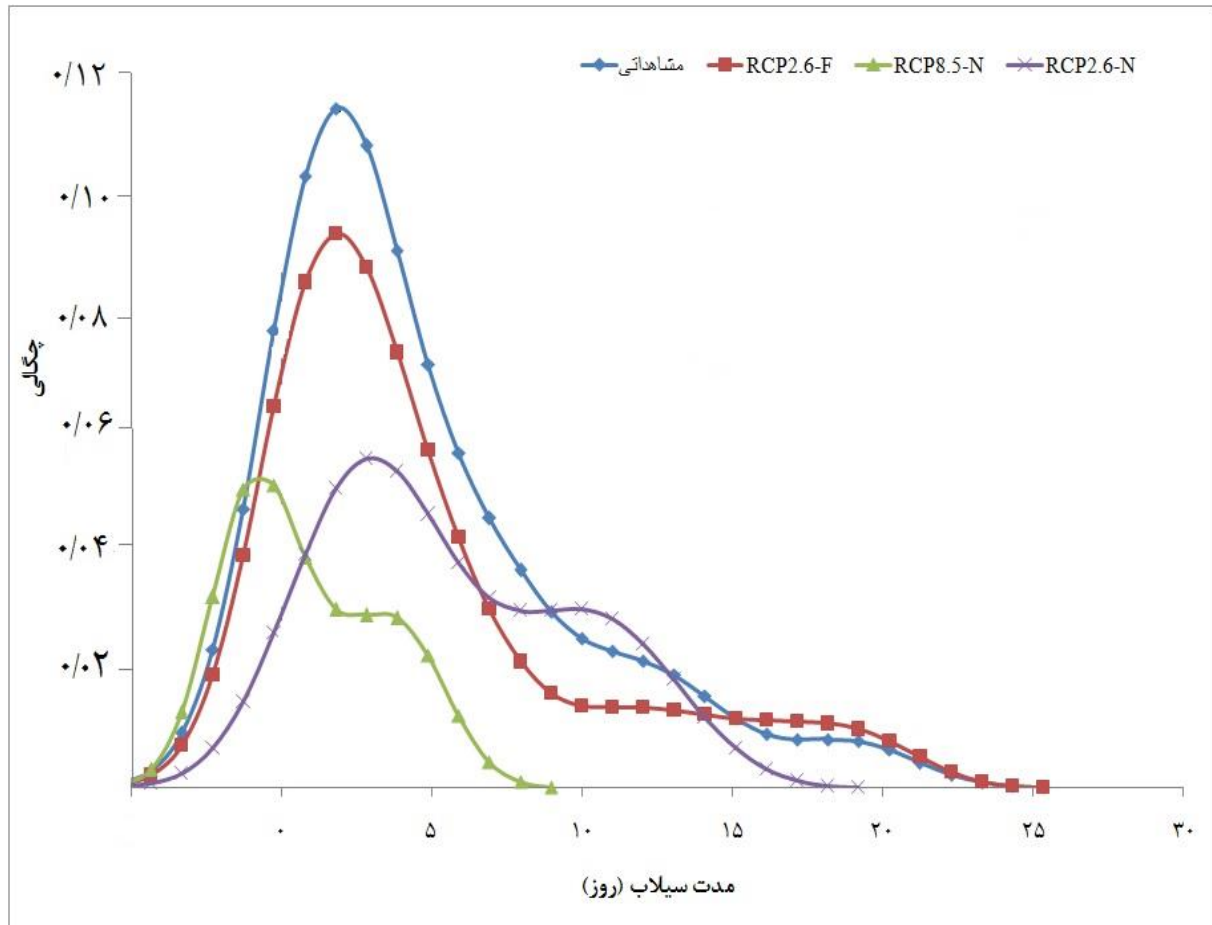
معیارهای مورد نظر برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی بارش- رواناب با مدل SWAT در جدول ۲ آمده است. این معیارها برای دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی محاسبه شد. مقادیر ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) مقادیر P-factor و R-factor همگی در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشخص است کیفیت برازش مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی کاهش یافته است. علت را می‌توان در شرایط دوره واسنجی و اعتبارسنجی یافت میانگین دبی کل دوره مشاهداتی حدود ۳۴ مترمکعب بر ثانیه است در حالی که میانگین دبی مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۳۹/۹ و ۲۱/۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است که نشان می‌دهد مدل SWAT در شرایط پر آبی واسنجی و در شرایط کم آبی اعتبارسنجی شده است.

در این مطالعه برای بررسی تغییرات رژیم جریان رودخانه در آینده، بازخورد بین متغیرهای اقلیمی با پوشش

گیاهی و همچنین تغییرات کاربری اراضی در نظر گرفته شده است. تأثیرات پیچیده‌تر و درعین حال غیرقابل بررسی تغییرات آب و هوایی بر گیاهان، سلامت اکوسیستم و ترکیب گونه‌ها وجود دارد که موجب تغییرات در تقاضای آب و در نهایت تغییر در جریان می‌شود. این بررسی فقط شامل آثار تغییرات بارش و دما ناشی از تغییرات اقلیمی بر رژیم جریان رودخانه است و دیگر آثار پیچیده و بعضاً غیرقابل محاسبه تغییر اقلیم (آثار تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی و اکوسیستم) که ممکن است بر رژیم جریان رودخانه اثر بگذارد را شامل نمی‌شود. این بررسی نشان می‌دهد رودخانه گاماسیاب رودخانه‌ای سیلابی با نرخ بالای تغییرات جریان و سیلاب‌های ناگهانی است. ضریب تغییرات این رودخانه در دوره مشاهداتی ۱۵۴ درصد محاسبه شد. تحت سناریو RCP2.6 که یک سناریو خوش‌بینانه با حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای است ضریب تغییرات کاهش معناداری پیدا خواهد کرد. تحت این سناریو همراه با کاهش میزان ضریب تغییرات در آینده

می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر افزایش میانگین دبی تحت RCP2.6 از سیلابی بودن رودخانه و سیلاب‌های ناگهانی آن کاسته می‌شود.

نزدیک و دور، میانگین دبی جریان در آینده نزدیک اندکی بیش از میانگین دبی جریان در دوره مشاهداتی است و در آینده دور افزایش چشمگیری خواهد داشت. از این‌رو



شکل ۴. نمودار چگالی احتمال کرنال مدت زمان سیل برای داده‌های مشاهداتی و سناریوهای منتخب

مشاهده می‌شود ضریب تغییرات سناریوهای مختلف در آینده نسبت به دوره مشاهداتی کمتر است علت آن را می‌توان در ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب‌های بزرگ دانست که تخمینی کمتر از مقدار واقعی سیلاب‌های بزرگ ارائه می‌کند در نتیجه مقادیر سیلاب‌های بزرگ پیش‌بینی شده برای سناریوهای آینده به میانگین نزدیک‌تر بوده و در نتیجه ضرایب تغییر کمتری به دست می‌آید. مطالعه Alkama (۲۰۱۳) و Dirmeyer (۲۰۱۴) نیز سیلابی شدن جریان تحت سناریو RCP8.5 پیش‌بینی می‌کند. شاخص حداکثر دبی هفت روزه و حداقل دبی

هرچه به سمت پایان قرن حاضر پیش رویم از این لحاظ شرایط بهتری را پیش روی داریم. در این زمینه Wu (۲۰۱۵) به نتایج مشابهی دست یافت. از طرفی تحت سناریوی RCP8.5 ضریب تغییرات نسبت به دوره مشاهداتی کمی کاهش می‌یابد (در آینده نزدیک ۱۴۲، آینده دور ۱۴۵ و دوره مشاهداتی ۱۵۴ درصد) ولی میانگین جریان کاهش قابل توجهی خواهد یافت که این امر حاکی از کاهش آب در دسترس و همچنین سیلابی بودن و نرخ بالای ضریب تغییرات جریان رودخانه گاماسیاب به‌ویژه در آینده دور تحت سناریوی RCP8.5 است. همان‌طور که

RCP2.6 مدت زمان تداوم سیل در مقایسه با دوره مشاهداتی افزوده می‌شود و هرچه به پایان قرن حاضر پیش رویم این مدت زمان افزایش بیشتری می‌یابد. در این زمینه Mohammed (۲۰۱۵) افزایش روزهای سیلابی را پیش‌بینی کرد. تحت سناریوی RCP8.5 در آینده نزدیک سیل با تداوم حداکثر ۳ روز بیشترین احتمال وقوع را دارد. حداکثر تداوم سیل تحت این سناریو ۱۰ روز است. در آینده دور تحت RCP8.5 فقط دو رخداد سیل با دبی مساوی یا بیش از Q1.67 (۲۱۱/۹ مترمکعب بر ثانیه) رخ خواهد داد. نتایج تحت سناریوی RCP8.5 نشان می‌دهد تداوم سیل در آینده نزدیک به کاهش چشم‌گیری خواهد داشت و در انتهای قرن حاضر فراوانی سیلاب با دبی مساوی یا بیش از Q1.67 به شدت کاهش پیدا خواهد کرد.

### نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر درصدد بررسی آثار ناشی از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر رژیم جریان رودخانه حوضه آبخیز گاماسیاب، با استفاده از سری جدید مدل‌های گردش عمومی جو (CMIP5) بود. بدین منظور از شاخص‌های حداقل دبی هفت روزه، حداکثر دبی هفت روزه، تداوم سیلاب، ضریب تغییرات و میانگین دبی استفاده شد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد رژیم جریان رودخانه تحت سناریوهای مختلف در دوره آتی تغییر خواهد کرد. شدت این تغییرات در آینده نزدیک کم و هرچه به سمت پایان قرن حاضر پیش برویم بیشتر خواهد شد. میانگین دبی رودخانه تحت سناریو RCP2.6 در آینده نزدیک کمی افزایش می‌یابد ولی در آینده دور افزایش چشمگیری خواهد یافت. تحت سناریو RCP8.5 میانگین دبی در آینده نزدیک کمی کاهش می‌یابد و در آینده دور به شدت کاهش می‌یابد. حداقل دبی هفت روزه تحت سناریو RCP2.6 در آینده نزدیک و دور کاهش می‌یابد که شدت کاهش در آینده نزدیک بیشتر از آینده دور است. در مقایسه با سناریو RCP2.6 حداقل دبی هفت روزه تحت سناریو RCP8.5

هفت روزه تحت همه سناریوها نسبت به دوره مشاهداتی کاهش می‌یابد در هر دو شاخص کمترین میزان کاهش تحت RCP2.6 در آینده دور و بیشترین کاهش تحت RCP8.5 در آینده دور رخ خواهد داد. نتایج Papadimitriou (۲۰۱۶) نیز کاهش دبی‌های حداقل را نشان می‌دهد ولی نتایج Mohammed (۲۰۱۵) حاکی از افزایش حداکثر دبی هفت روزه و افزایش دبی حداقل است. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ تقریباً روند یکسانی از تغییرات جریان حداقل و حداکثر هفت روزه در مقایسه با دوره مشاهداتی مشاهده می‌شود علت این امر را می‌توان سه مورد دانست. نخست اینکه متغیرهایی که برای شبیه‌سازی جریان آینده استفاده شدند فقط بارش و دما هستند و دیگر موارد نظیر تغییر کاربری اراضی و احداث سازه‌ها روی رودخانه و نحوه استفاده از منابع آب در آینده لحاظ نشده است؛ دوم تغییرات بارش و دمای پیش‌بینی شده تحت شرایط تغییر اقلیم از نظر کمی اختلاف فاحشی نسبت به داده‌های مشاهداتی ندارند و سوم اینکه با توجه به استفاده از روش تغییر عامل برای ریزگردانی مدل گردش عمومی جو، در این روش مقدار بزرگی و کوچکی داده‌های بارش و دمای مشاهداتی به نحو مؤثر و مستقیمی در پیش‌بینی بارش و دما در آینده نقش دارند.

نمودار کرنل نشان می‌دهد در دوره مشاهداتی سیل با تداوم حداکثر ۵ روز بیشترین احتمال وقوع را دارد. تحت RCP2.6 در آینده نزدیک نیز سیل با تداوم حداکثر ۵ روز بیشترین احتمال وقوع را دارد ولی نسبت به دوره مشاهداتی احتمال آن کم‌تر است در عوض احتمال وقوع سیل با تداوم ۱۰ تا ۱۵ روزه نسبت به دوره مشاهداتی بیشتر خواهد بود. در آینده دور تحت RCP2.6 مانند دوره مشاهداتی سیل با تداوم حداکثر ۵ روز بیشترین احتمال وقوع را دارد. احتمال وقوع سیل با تداوم ۱۰ تا ۱۵ روزه نسبت به دوره مشاهداتی کمتر و احتمال وقوع سیل با تداوم ۱۵ تا ۲۵ روزه نسبت به دوره مشاهداتی بیشتر خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تحت سناریو

حداکثر هفت روزه مربوط به این سناریو در آینده نزدیک به میزان ۶۴۶/۷ مترمکعب بر ثانیه است) و ادامه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده دور باعث کاهش بسیار شدید میانگین دبی و در نتیجه کاهش آب در دسترس می‌شود.

نتایج ذکر شده نشان می‌دهد تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک نیاز به انطباق با افزایش خطر سیل و افزایش ضریب تغییرات جریان، مداخلات به روزرسانی دشت‌های سیلابی و برنامه‌ریزی برای شرایط کم‌آبی است و در آینده دور مدیریت حوضه باید بر پایه مواجهه با کاهش بسیار زیاد آب قابل در دسترس باشد. در مقایسه با سناریو RCP8.5 با ادامه سناریو RCP2.6 شرایط بهتری در حوضه گاماسیاب قابل تصور است. در آینده نزدیک جریان رودخانه نسبت به دوره مشاهداتی با تغییرات کم ولی مثبت روبه‌رو خواهد شد و در آینده دور ضمن کاهش خطر جریان‌های سیلابی میانگین دبی و آب در دسترس افزایش چشمگیری می‌یابد.

### یادداشت‌ها

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Coupled Model Intercomparison Project
3. Beijing
4. Representative Concentration Pathway
5. Bias Correction
6. New England
7. Champlain lake
8. Extension
9. Digital Elevation Model
10. <http://edcsns17.cr.usgs.gov/glcc/glcc.html>
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations
12. Hydrologic Response Unit
13. Calibration
14. Sequential uncertainty fitting ver. 2
15. 95% Prediction Uncertainty

کاهش بیشتری پیدا خواهد کرد که در آینده دور میزان کاهش به حداکثر خود خواهد رسید. حداکثر دبی هفت روزه تحت همه سناریوها کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش مربوط به سناریو RCP8.5 در آینده دور و کمترین کاهش مربوط به سناریو RCP2.6 در آینده دور است. احتمال رخ دادن سیلاب با مدت زمان بیشتر نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریو RCP2.6 قابل انتظار است. تحت سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک تداوم سیل کاهش چشمگیری خواهد یافت. از طرفی در آینده دور فراوانی رخداد سیل به شدت کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رسیدن به سناریوی RCP2.6 در آینده نزدیک تغییرات قابل توجهی در میزان دبی و آب در دسترس ندارد ولی ادامه این روند در آینده دور باعث افزایش میانگین دبی همراه با کاهش خطر سیلاب‌های بزرگ است که نشان دهنده وضعیت مطلوب آینده در صورت استمرار این روند است. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رفتن به سوی سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک علاوه بر کاهش دبی میانگین، خطر وقوع سیلاب‌های بزرگ را افزایش می‌دهد (بزرگ‌ترین دبی

16. Nash Sutcliff coefficient
17. Warm up
18. Downscaling
19. Empirical statistical downscaling
20. change factor
21. Change Factor Mean-based method
22. High flow disturbance
23. Low flow disturbance
24. seven-day maximum flow
25. flood Duration
26. seven-day minimum flow
27. Coefficient of variation
28. Bank full
29. Kernel density
30. Kernel density Estimation

### منابع

ذهبیون، ب.، گودرزی، م. ر. و مساح بوانی، ع. ر. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوزه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. ۱ (۳ و ۴)

- زارع‌زاده، ش.، خورانی، ا.، بذرافشان، ج. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۶ الف. ارزیابی تغییرات جریان آینده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب. مجله اکوهیدرولوژی. ۷۸۹-۷۷۷: (۳)۵.
- زارع‌زاده، ش.، خورانی، ا.، بذرافشان، ج. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۶ ب. ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب. مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران. ۸۹۳-۸۸۱: (۴)۷۰.
- وزارت کشاورزی. ۱۳۷۵. طرح جامع برای بازیابی و توسعه کشاورزی و منابع طبیعی در حوضه رودخانه کرخه و دز. جلد ۱، آب سطحی، معاونت برنامه ریزی و پشتیبانی، تهران.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and Van Genuchten, M. Th. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone*, 3: 1340-1352.
- Abbaspour, K. 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol. Du'bendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K.C. 2011. Swat-Cup2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Manual Version 2, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Klove, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733-752
- Alkama, R., Marchand, L., Ribes, A. and Decharme, B. 2013. Detection of global runoff changes: results from observations and CMIP5 experiments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17: 2967-2979
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M., Srinivasan, J., Santhi, R.C. and et al. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation - UNL Digital Commons.
- Campbell, J.L., Driscoll, C.T., Pourmokhtarian, A., Hayhoe, K. 2011. Streamflow responses to past and projected future changes in climate at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, United States. *Water Resour. Res.* 47, W02514, <http://dx.doi.org/10.1029/2010wr009438>.
- Caruso, B. 2000. Evaluation of low flow frequency analysis methods. *Journal of Hydrology (NZ)* 39(1):19-47.
- Chinnay, K.J., Hawkins, C.P., Tarboton, D.G. and Hill, R.A.. 2011. Natural flow regime, temperature and the composition and richness of invertebrate assemblages in streams of the western United States. *Freshwater Biol.* 56, 1248-1265, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02560.x>.
- Chu, T., Shirmohammadi, A., Montas, H. and Sohrabi, T. 2002. Modeling watershed nonpoint source pollution on piedmont physiographic region using SWAT. ASAE Meeting paper No: 022040.
- Dirmeyer, P., Fang, Z., Wang, P. and Milton, A. 2014. Climate change and sectors of the surface water cycle In CMIP5 projections. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18: 5317-5329.
- Donizete dos, R., Pereira, Mauro, A., Martinezb, Fernando, F., Pruskib, D. and da Silvaba, I. 2016. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *Journal of Hydrology: Regional Studies.*, 7: 14-37
- Dunne, T. and Leopold, L.B. 1978. *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company, New York, 818 pp.
- Gibson, C.A., Meyer, J.L., Poff, N.L., Hay, L.E., Georgakakos, A. 2005. Flow regime alterations under changing climate in two river basins: implications for freshwater ecosystems. *River Res. Appl.* 21, 849-864, <http://dx.doi.org/10.1002/rra.855>.
- Gosain, A., Rao, S. and Basuray, D. 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science.*, 90(3): 346-353.
- Guzha, A.C. and Hardy, T.B. 2010. Application of the distributed hydrological model, TOPNET, to the big darby Creek watershed, Ohio, USA. *Water Resource Management.*, 24: 979-1003.
- Ho, C., Stephenson, D., Collins, M., Ferro, CAT. and Brown, S. 2012. Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93(1): 21-26.

- Hodgkins, G.A., Dudley, R.W. and Huntington, T.G. 2005. Summer low flows in New England during the 20th century. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 41, 403–411, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03744.x>.
- Hodgkins, G.A. and Dudley, R.W. 2006. Changes in the timing of winter-spring streamflows in eastern North America, 1913–2002. *Geophys. Res. Lett.* 33, L06402, <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL025593>.
- Hodgkins, G.A. and Dudley, R.W. 2011. Historical summer base flow and storm flow trends for New England rivers. *Water Resour. Res.* 47, W07528, <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR009109>.
- Hoang, L., Lauri, H., Kumm, M., Koponen, J., Michelle, T., Vliet, H and et al. 2016. Mekong River flow and hydrological extremes under climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20: 3027–3041.
- IPCC expert meeting report. 2007. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies., 19–21. September, 2007 Noordwijkerhout, the Netherlands.
- Jones, P. and Hulme, M. 1996. Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International journal of climatology.*, 16: 361-377
- Kepner, W.G., Hernandez, M., Semmens, D.J. and Goodrich, D.C. 2008. The use of scenario analysis to assess future landscape change on watershed condition in the pacific northwest (USA). *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security.*, 237-261.
- Lettenmaier, D. 1999. Water resources implications of global warming: A U.S. Regional Perspective. *Climatic Change.* 43(3): 537-579.
- Meehl, G.A., Moss, R., Taylor, K.E., Eyring, V., Stouffer, R.J., Bony, S. and Stevens, B. 2014. Climate model intercomparisons: preparing for the next phase. *EOS Trans. AGU* 95, 77–78, <http://dx.doi.org/10.1002/2014EO090001>
- Mohammed, I.N., Bombliès, A. and Wemple, B. 2015. The use of CMIP5 data to simulate climate change impacts on flow regime within the Lake Champlain Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3:160–186
- Moriasi, D., Arnold, J.G., Van Liew, M., W. Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASAE.*, 50(3): 885-900
- Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K. and Rodhe, A. 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agric. For. Meteorol.* 98-99, 257–277.
- Neitsch S, Arnold L, Kiniry G, Williams J. 2002. Soil and Water Assessment Tool, User's Manual, Version 2000
- Papadimitriou, L., Koutroulis, L., Grillakis, M., Tsanis, I. 2016. High-end climate change impact on European runoff and low flows – exploring the effects of forcing biases. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20: 1785–1808.
- Puckridge, J.T., Sheldon, F., Walker, K.F., Boulton, A.J. 1998. Flow variability and the ecology of large rivers. *Mar. Freshwater Res.* 49, 55–72, <http://dx.doi.org/10.1071/MF94161>.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C. 1997. The natural flow regime. *BioScience* 47, 769–784, <http://dx.doi.org/10.2307/1313099>.
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R., and Lehmann, A. 2012. Parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environ. Modell. Software* 31, 28–36.
- Spruill, C.A., Workman, S.R. and Taraba, J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans. ASAE.*, 43(6): 1431-1439.
- Stager, C., Thill, M.K. 2010. Climate Change in the Champlain Basin: What Natural Resource Managers can Expect and Do. *Nature Conservancy LCBP Rep.*, Montpelier, VT.
- Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G. 2001. Impacts of climate change on Missouri River Basin water yield. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37, 1119–1129, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03626.x>.
- Wang, L., Ranasinghe, S.M., Van, P., Gelder, J. and Vrijling, K. 2016. Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. *International journal of climatology Int. J. Climatol.*, 36: 145–164
- Wilby, R. and Harris, I. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research.*, 42

Wu, C., Huang, G. and Yu, H. 2015. Prediction of extreme floods based on CMIP5 climate models: a case study in the Beijiang River basin South China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19: 1385–1399.

Xu, H. and Luo, Y. 2015. Climate change and its impacts on river discharge in two climate regions in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19:4609–4618.