

## شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم تحت سناریوهای RCP بر منابع آبی حوضه‌ی آبریز سد سلمان فارسی

دل آرام هوشمند<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup>، علیرضا فرید حسینی<sup>۳</sup>، سید حسین ثنائی نژاد<sup>۴</sup>، داور خلیلی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۶

### چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی اثرات بالقوه‌ی تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه‌ی آبریز سد سلمان فارسی با استفاده از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) انجام شد. داده‌های اقلیمی از سه مدل گردش عمومی GCM تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره‌ی زمانی آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) بعد از واسنجی مدل SWAT به آن وارد و تغییرات رواناب، آب آبی، جریان آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز شبیه‌سازی شد و سپس با دوره‌ی پایه‌ی (۲۰۰۸-۱۹۷۸) مورد مقایسه قرار گرفت. کارایی مدل در شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه توسط معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در ایستگاه آب‌سنجی تنگ کارزین به عنوان خروجی حوضه، در دوره‌ی واسنجی (مقادیر NSE و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۸۰) و صحت‌سنجی (مقادیر NSE و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۵۷ و ۰/۶۷) تأیید می‌شود. نتایج پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی حاکی از افزایش تکرار بارش‌های شدیدتر و کاهش وقایع بارش با شدت کم در دوره‌ی آینده نسبت به گذشته و همچنین افزایش دمای حداقل و حداکثر در حوضه می‌باشد. این تغییرات منجر به افزایش سالانه‌ی رواناب و آب آبی ناشی از افزایش وقایع حدی و پتانسیل سیل‌خیزی حوضه و همچنین افزایش جریان آب سبز ناشی از افزایش دما و بارش در دوره‌ی آینده می‌شود. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای مدیران و سیاستگذاران منابع آب جهت ارائه‌ی برنامه‌ها و راهکارهای مدیریتی در مواجهه با تغییرات اقلیمی مفید باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آب آبی، آب سبز، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل گردش عمومی جو، مدل SWAT

### مقدمه

سناریوی جدید انتشار گازهای گلخانه‌ای با عنوان سناریوهای نماینده‌ی خط سیر غلظت (RCPs) 2.6، 4.5، 6.0 و 8.5 برای شبیه‌سازی آب و هوایی در دوره‌ی آینده معرفی شده‌اند که متوسط افزایش جهانی دمای سطح زمین را در انتهای این قرن نسبت به دوره‌ی سی ساله گذشته بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کرده‌اند. (van Vuuren et al., 2011).

درک پاسخ‌های مکانی و زمانی منابع آب به تغییر شرایط آب و هوایی برای شناسایی رفتار هیدرولوژیکی منطقه، منابع آب در دسترس در آینده و پیش‌بینی برنامه‌های مدیریت پایدار، حیاتی است. از این رو بسیاری از مطالعات مربوط به اثرات هیدرولوژیکی تغییرات آب و هوا در سالان اخیر با استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای RCP به عنوان سناریوهای آب و هوایی در دوره‌ی آینده انجام شده‌است (Ho et al., 2016; Kim et al., 2013; Kwak et al., 2015; Ouyang et al., 2015; Tan et al., 2017; Vaighan et al., 2017). برای مثال اوپانگ و همکاران، با استفاده از خروجی شش مدل GCM تحت سه سناریوی RCP و مدل هیدرولوژیکی SWAT به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه گوانگجو در چین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به احتمال زیاد در آینده جریان در

تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر فرایندهای هیدرولوژیکی موضوعی است که در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌است (Ashraf Vaghefi et al., 2014; Ouyang et al., 2015). مؤسسه‌ی بین‌المللی تغییرات اقلیمی IPCC، در گزارش پنجم خود نسبت به افزایش ریسک مخاطرات طبیعی مربوط به آب (مانند خشکسالی و سیلاب) که ممکن است به علت تغییرات بارش و درجه حرارت در منطقه ایجاد شود، هشدار داده‌است. در این گزارش بر اساس محدوده‌ی مقادیر واداشت‌های تابشی (وات بر متر مربع) در انتهای قرن حاضر نسبت به مقادیر قبل از صنعتی شدن، چهار

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵- استاد بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

(Email: esmaili@um.ac.ir

)\*- نویسنده مسئول:

حوضه‌ی آبریز مند علیرغم اینکه یکی از حوضه‌های آبریز مهم کشور است در مطالعات هیدرولوژیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. توزیع زمانی بارش و مورفولوژی رودخانه منجر به افزایش پتانسیل سیل‌خیزی و اثرات مخرب آن در این حوضه و پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی شده‌است. در پیشینه پژوهش تا کنون مطالعه‌ای که به ارزیابی تغییرات آب و هوایی آینده و اثرات آن بر مؤلفه‌های منابع آبی در این حوضه با استفاده از گزارش پنجم (CMIP5) مدل‌های گردش عمومی جو انجام نگرفته‌است. نتایج این مطالعه می‌تواند برای مدیران بخش آب جهت توسعه برنامه‌های مدیریتی جامع منابع آب در حوضه مفید باشد. علاوه بر آن مؤلفه‌های آبی پیش‌بینی شده می‌تواند به عنوان داده‌های ورودی برای کاربردهای دیگر مانند برنامه‌های مدیریت مخزن، مدیریت گیاه و مدل‌سازی تغییرات زیست محیطی مفید باشد. لذا هدف اصلی این مطالعه ارزیابی تغییرات منابع آبی (آب آبی، ذخیره آب سبز و جریان آب سبز) در حوضه آبریز مند در بالادست سد سلمان فارسی در استان فارس تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی با استفاده از مجموعه‌ای شامل سه مدل GCM (-HadGem2، ES، CM5A-LR IPSL و NorESM1-M) و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از مدل SWAT می‌باشد. از جنبه‌های قابل توجه این مطالعه می‌توان به ارزیابی قابلیت مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز و مشخص کردن تغییرات بارش و درجه حرارت در دوره‌ی زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) نسبت به دوره زمانی پایه (۱۹۷۸-۲۰۰۸) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 اشاره کرد.

## روش انجام کار و مطالعه موردی

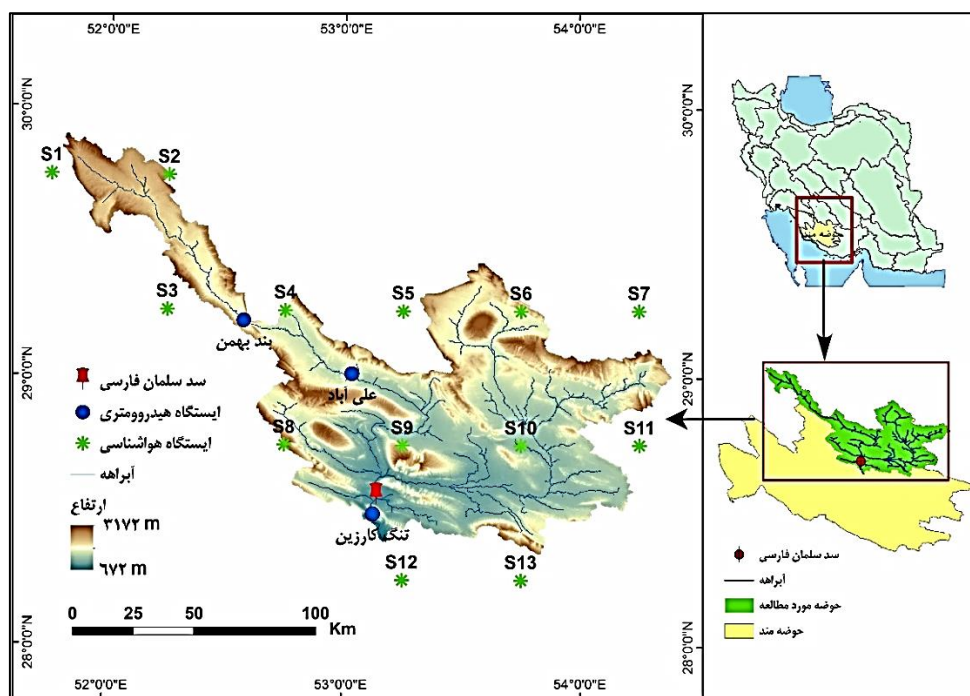
### منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه قسمتی از حوضه آبریز اصلی مند، شامل زیر حوضه‌های رودخانه قره‌آقاج و شور چهارم واقع در بالادست سد سلمان فارسی در استان فارس می‌باشد. این حوضه با مساحت ۱۳ هزار کیلومتر مربع در محدوده‌ی جغرافیایی ۲۶' ۲۸° تا ۴۷' ۲۹° طول شمالی و ۵۵' ۵۱° تا ۱۹' ۵۴° عرض شرقی قرار گرفته‌است. محدوده‌ی ارتفاعی منطقه بین ۳۱۰۰ متر در قسمت‌های شمالی تا ۶۷۰ متر در قسمت‌های جنوبی حوضه، بالاتر از سطح دریا گسترده شده‌است. رودخانه‌ی اصلی حوضه، قره‌آقاج با دبی متوسط سالانه ۱۸ مترمکعب در ثانیه می‌باشد که از دامنه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد. متوسط بارش سالانه در سطح حوضه متغیر که کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال در قسمت‌های مرکزی و جنوبی تا بیشتر از ۷۵۰ میلی‌متر در سال در قسمت‌های شمالی می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه‌ی مورد مطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

این حوضه به علت افزایش تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد (Ouyang et al., 2015). تان و همکاران، به بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییرات اقلیمی در حوضه رودخانه جوهور در مالزی با استفاده از گروهی متشکل از شش مدل گردش عمومی و سه سناریوی RCP در دوره آینده پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش میانگین دما و بارش سالانه و به تبع آن افزایش جریان در حوضه می‌باشد. همچنین در این پژوهش عنوان شد که برای ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی استفاده از چندین مدل و سناریوی تغییرات اقلیمی حائز اهمیت می‌باشد (Tan et al., 2017). پیش‌بینی چندین مدل GCM از گروه‌های مختلف نسبت به یک مدل GCM به تنهایی، امکان ارزیابی بهتر اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی را فراهم می‌کند (Pierce et al., 2009). در ایران نیز در مطالعات هم‌راستا وایقان و همکاران، به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر جریان، کیفیت آب و رسوبات معلق در حوضه رودخانه کر پرداختند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده افزایش جریان رودخانه تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده می‌باشد (Vaighan et al., 2017).

مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) به عنوان یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی در سالیان اخیر به طور گسترده برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آبی بکار برده شده‌است (اخوان و همکاران، ۱۳۸۹؛ Ashraf Vaghefi et al., 2014; Gassman et al., 2007; ) (Vaighan et al., 2017). به طور ویژه، کمی‌سازی مؤلفه‌های آبی شامل آب آبی<sup>۱</sup> و آب سبز<sup>۲</sup> با استفاده از این مدل در نقاط مختلف دنیا مانند آفریقا و ایران مورد توجه قرار گرفته‌است (Ashraf Vaghefi et al., 2014; Cuceloglu et al., 2017; Faramarzi et al., 2009). آب آبی، آبی است که می‌تواند به طور مستقیم برای تأمین نیازهایی از قبیل کشاورزی، شهری و صنعتی استفاده شود و بر حسب تعریف منابع آبی موجود در رودخانه‌ها و آبخوان را شامل می‌شود. آب سبز توسط فالکنمارک و روکسترام به جریان آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز تقسیم‌بندی شده‌است. جریان آب سبز شامل تبخیر و تعرق و ذخیره‌ی آب سبز شامل محتوای آب خاک می‌باشد که منبع کشاورزی دیم به شمار می‌آید. بیشتر مطالعات هیدرولوژیکی مربوط به روند تغییرات جریان می‌باشد که برگرفته از یک دیدگاه سنتی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی بوده که در آن تأکید بیشتر بر منابع آب جاری و یا آب آبی است. در صورتی که اشکال دیگر منابع آبی مانند ذخیره‌ی آب سبز و جریان آب سبز نیز به همان اندازه حائز اهمیت بوده و در مطالعات ارزیابی جامع منابع آبی بایستی به آن‌ها توجه شود (Falkenmark and Rockström, 2006).

1- Blue Water  
2- Green Water



شکل ۱- موقعیت مکانی حوضه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی

آب زیرزمینی در ارتباط با جریان سطحی در روز نام همگی بر حسب میلی‌متر،  $t$  طول دوره‌ی شبه‌سازی بر حسب روز،  $i$  مرحله‌ی زمانی شبه‌سازی بر حسب روز می‌باشند (Neitsch et al., 2011). ورودی‌های این مدل شامل اطلاعات اقلیمی، هواشناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک منطقه می‌باشد. شرح اطلاعات ورودی به مدل و منابع آن‌ها در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

#### تنظیم مدل، واسنجی و صحت‌سنجی

در این مطالعه از ArcSWAT2012، رابط مدل SWAT نسخه‌ی ۲۰۱۲ در نرم افزار ArcGIS10.2، برای اجرای مدل SWAT در حوضه‌ی آبریز استفاده شد. حوضه با استفاده از ادغام نقشه‌ی رستری شبکه رودخانه‌ای و نقشه‌ی رقومی ارتفاع DEM در مدل به ۱۸۴ زیرحوضه تقسیم شد. این زیرحوضه‌ها در ادامه با در نظر گرفتن آستانه‌ی ۵ درصد برای کاربری اراضی و ۱۰ درصد برای خاک که توسط وینچل و همکاران توصیه شده است، به ۱۱۱۵ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم شدند (Winchell et al., 2013). این مقادیر حد آستانه با نادیده گرفتن تغییرات جزئی خاک و کاربری اراضی می‌تواند باعث کنترل تعداد HRU ها و کاهش خطا در مدل شوند (Tan et al., 2015).

#### شبه‌سازی هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی فیزیکی، نیمه توزیعی و پیوسته از نظر زمانی می‌باشد که برای تجزیه و تحلیل اثرات برنامه‌ریزی‌های مدیریت زمین بر کمیت و کیفیت منابع آبی در حوضه‌های آبریز توسعه داده شده است. اساس اجرایی مدل، تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌هاست. در ادامه هر زیرحوضه به یک سری از واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌شود که از نظر ترکیب خاک و کاربری اراضی یکسان باشند. شبه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژیکی در مدل SWAT در فاز زمین بر اساس معادله تعادل آبی که برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی به طور جداگانه محاسبه می‌شود، انجام می‌شود. با تجمیع رواناب حاصل از هر HRU مقدار آب ورودی به کانال اصلی در هر زیرحوضه بدست می‌آید. تعادل آبی در مدل SWAT بر اساس رابطه‌ی بیلان آبی به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R - Q_{surf} - E - W - Q_{gw})_i \quad (1)$$

$SW_t$  محتوای آب خاک در پایان دوره‌ی زمانی شبه‌سازی،  $SW_0$  محتوای اولیه‌ی آب خاک که در اختیار گیاه برای جذب قرار دارد،  $R$  مقدار بارندگی در روز نام،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی در روز نام،  $E$  مقدار تبخیر و تعرق در روز نام،  $W$  مقدار آب ورودی به پروفیل خاک (منطقه غیر اشباع) در روز نام،  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی یا جریان

جدول ۱- شرح و منبع داده‌های ورودی مدل SWAT

منبع	اطلاعات ورودی
The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM by NASA(90 m) (Jarvis et al., 2008)	نقشه ارتفاعی رقمی (DEM)
نقشه خاک جهانی از سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (فائو)	نقشه خاک
Satellite images (IRS-P6 LISS-IV and IRS-P5-Pan satellite images, ETM+ 2001 Landsat) (Schuol et al., 2008)	نقشه‌ی کاربری اراضی
سازمان هواشناسی، وزارت نیرو	اطلاعات هواشناسی
داده‌های (WFDEI_CRU) (Weedon et al., 2011)	اطلاعات هیدرومتری
سازمان آب منطقه‌ای استان فارس	نقشه‌ی شبکه‌ی رودخانه و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های
وزارت نیرو	هیدرومتری و سد
سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، وزارت نیرو	

2007). در این مطالعه علاوه بر این دو شاخص از پنج شاخص آماری معرفی شده در جدول ۲ موجود در نرم‌افزار SWAT-CUP جهت ارزیابی عملکرد نتایج مدل استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی بهترین شبیه‌سازی در فرایند واسنجی و صحت‌سنجی از طبقه‌بندی کیفی ارائه شده در مطالعات پیشین برای سنجش نتایج شبیه‌سازی مدل استفاده شد (Kouchi et al., 2017; Moriasi et al., 2007).

#### مدل‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم

داده‌های اقلیمی مورد نظر در این مطالعه در دوره آینده شامل بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه می‌باشند که برای سه مدل اقلیمی NorESM1-M و IPSL-CM5A-LR، HadGem2-ES، تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP2.6 از پروژه ISI-Fast Track MIP در ۱۳ گرید با فاصله مکانی نیم درجه واقع در محدوده‌ی مطالعاتی از پایگاه اینترنتی ESGF به نشانی <https://www.earthsystemcog.org> داندلود شدند. فایل‌های اولیه استخراج شده به فرمت NetCDF، توسط نرم‌افزار متلب به فایل‌های متنی با فرمت ACSII تبدیل و به شکل قابل استفاده مدل SWAT مرتب شدند.

پروژه ISI-MIP اولین بار توسط مؤسسه تحقیقات آب و هوایی پوتسدام PIK و مؤسسه‌ی بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی IIASA آغاز شد و تاکنون به بیش از ۱۰۰ گروه مدل‌سازی از سراسر جهان ارتقا یافته است (Warszawski et al., 2014). اولین دوره‌ی شبیه‌سازی ISI-MIP با عنوان پروژه ISI-MIP Fast Track از ابتدای سال ۲۰۱۲ تا میانه‌ی سال ۲۰۱۳ با تأکید بر ارائه‌ی اثرات چند بخشی از سطوح مختلف گرمایش جهانی در قرن بیست و یکم به هدف کمی‌سازی عدم قطعیت در سناریوهای آب و هوایی، مدل‌های آب و هوایی و تأثیرات تغییر اقلیم بر آب، زیست بوم و کشاورزی اجرا شد (Hagemann et al., 2013). مدل‌های اقلیمی این پروژه بر اساس گستردگی مکانی از تغییرات متوسط دمای جهانی ( $\Delta$ GMT) و

نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های مشاهداتی در سه ایستگاه هیدرومتری (شکل ۱) در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SUFI-2 واسنجی (۲۰۰۸-۱۹۹۰) و صحت‌سنجی (۱۹۷۸-۱۹۸۹) شد. با توجه به داده‌های اقلیمی موجود روش هارگریوز، برای محاسبه تخبیر و تعرق انتخاب شد (Ashraf Vaghefi et al., 2014; Faramarzi et al., 2009). رواناب سطحی و جریان رودخانه با استفاده از روش شماره‌ی منحنی و تغییرات ذخیره روندیابی شدند. آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از الگوریتم SUFI-2 در نرم افزار SWAT-CUP انجام گرفت. الگوریتم SUFI-2 یک روش بهینه‌سازی معکوس مبتنی بر چارچوب بیزی است که در آن تمام منابع عدم قطعیت شامل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها، متغیرهای ورودی مثل بارندگی، مفهوم‌سازی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در دامنه معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. محدوده اولیه پارامترها بعد از هر تکرار به وسیله محدوده جدید پارامترهای بدست آمده توسط مدل جایگزین شده و یک دامنه عدم قطعیت محدودتری از پارامترها بدست می‌آید. این روند تا زمانی که دو شاخص کمی‌سازی عدم قطعیت (P-Factor و R-Factor) به حد مطلوب برسد ادامه پیدا می‌کند (Abbaspour et al., 2004). P-Factor به عنوان درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده که در محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها  $95\text{PPU}$  قرار می‌گیرند، تعریف شده‌است. دامنه  $95\text{PPU}$  بر اساس سطح  $2/5\%$  و  $97/5\%$  تابع توزیع تجمعی از متغیرهای خروجی تعریف می‌شود. درحالی‌که R-Factor متوسط ضخامت باند  $95\text{PPU}$  مشتق شده از انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده‌است. از نظر تئوری مقدار P-Factor برابر با یک ( $100\%$ ) و R-Factor نزدیک به صفر، نشان‌دهنده‌ی تطابق کامل نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای است (Abbaspour et al.,

چهار سناریوی RCP می‌باشند. در این مطالعه از برونداد سه مدلی که بیشترین مطابقت را از نظر آماری در دوره تاریخی با داده‌های مشاهداتی در منطقه داشتند، استفاده شد. همچنین برای در نظر گرفتن حد بالا و پایین تغییرات اقلیمی از دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شد.

تغییرات نسبی بارندگی به بهترین شکل ممکن با توجه به محدودیت داده‌های موجود CMIP5 در زمان اجرای پروژه (مارچ ۲۰۱۲) انتخاب شدند (McSweeney and Jones, 2016). این مدل‌ها شامل پنج مدل (IPSL, HadGem2-ES, GFDL-ESM2M) GCM (NorESM1-M, MIROC-ESM-CHEM, CM5A-LR) تحت

جدول ۲- شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل و روابط آن‌ها

شاخص آماری	رابطه شاخص آماری
شاخص نش- ساتکلیف	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2}$
ضریب تعیین اصلاح‌شده	$bR^2 = \begin{cases}  b .R^2 & \text{for } b \leq 1 \\  b ^{-1}.R & \text{for } b > 1 \end{cases}$
ضریب تعیین	$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)(Q_{i,s} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 \sum_i (Q_{i,s} - \bar{Q}_s)^2}$
نسبت انحراف معیار مشاهدات به ریشه میانگین مربعات خطا	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_o} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_m)^2}}$
درصد اریبی	$PBIAS = 100 * \left  \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})}{\sum_{i=1}^n Q_{i,o}} \right $

نسبت بین شبیه‌سازی‌های اقلیم آبی به اقلیم حاضر یک مدل گردش کلی استوار است، ضریب اصلاحی دما و بارش به ترتیب مطابق روابط (۲) و (۳) بدست می‌آیند.

$$T_{corrected_{ij}} = T_{GCM_{ij}} + (\bar{T}_{reference_{jk}} - \bar{T}_{GCM_{jk}}) \quad (2)$$

$$P_{corrected_{ij}} = P_{GCM_{ij}} * \frac{\bar{P}_{reference_{jk}}}{\bar{P}_{GCM_{jk}}} \quad (3)$$

که در این روابط T و P به ترتیب نمایشگر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و بارش بر حسب میلی‌متر بر روز، و i و j به ترتیب شماره روز، ماه و سال هستند (Ashraf Vaghefi et al., 2017; Jones and Hulme, 1996).

برای بررسی ثبات و انسجام سال به سال رویدادهای بارش با شدت‌های مختلف در دوره‌ی آینده و مقایسه‌ی آن با دوره‌ی گذشته از شاخص ضریب تغییرات (CV) استفاده شد. ضریب تغییرات شاخصی برای بررسی پراکندگی داده‌های آماری است که از نسبت انحراف معیار داده‌ها بر میانگین بدست می‌آید. در این مورد هر چه شاخص ضریب تغییرات کوچکتر باشد نشان دهنده اطمینان‌پذیری بیشتر به رخداد وقایع بارش با خصوصیات ذکر شده در هر سال می‌باشد.

## نتایج و بحث

### واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل عدم قطعیت

آنالیز حساسیت منجر به شناسایی ۱۸ پارامتر که بیشترین تأثیر را

متغیرهای آب و هوایی شبیه‌سازی‌های شده توسط مدل‌های اقلیمی در دوره‌های گذشته اغلب با انحرافات از داده‌های مشاهداتی همراه می‌باشند. برای تصحیح این انحراف سیستماتیک داده‌های تاریخی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها از داده‌های مشاهداتی تاریخی در مطالعات آب و هوایی، اغلب از روش‌های آماری تصحیح اریبی<sup>۱</sup> اغلب استفاده می‌شود. پروژه ISI-MIP برای این منظور به توسعه یک الگوریتم تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی با رویکرد حفظ تغییرات مطلق دما و نسبی بارش پرداخته است که در آن با در نظر گرفتن دوره چهل ساله از متغیرهای اقلیمی روزانه در گذشته (۱۹۶۰-۱۹۹۹) در یک شبکه نیم درجه حاصل از پایگاه داده‌کاوای WATCH Forcing Data به عنوان داده‌های مشاهداتی دوره تاریخی، داده‌های مدل‌های اقلیمی در دوره گذشته تصحیح می‌شوند (Hempel et al., 2013). یکی از ضعف‌های مدل‌های اقلیمی بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. لذا این متغیرها برای مطالعات هیدرولوژی و منابع آب از دقت کافی برخوردار نیستند. روش‌های مختلفی جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های GCM وجود دارد که به این روش‌ها ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود. در پروژه‌ی ISI-MIP از روش عامل تغییر یا دلتا برای ریز مقیاس‌نمایی داده‌ها استفاده شده است. در این روش که بر پایه‌ی

از ایستگاه‌های آب‌سنجی به طور جداگانه واسنجی شد. در این روش به جای اینکه پارامتر CN2 که پارامتر بسیار حساسی در تغییرات دبی جریان بود، برای کل حوضه به یک نسبت تغییر داده شود، برای زیر حوضه‌های مختلف به علت گستردگی مکانی حوضه و همچنین تفاوت در مولفه‌های موثر بر این پارامتر حساس (نوع خاک، نوع پوشش گیاهی، شیب و ...) با نسبت‌های متفاوت تغییر خواهد کرد. پارامتری کردن CN2 نسبت به مساحت تحت تأثیر هر ایستگاه آب‌سنجی منجر به دستیابی محدوده (و مقدار بهینه) متفاوت برای این پارامتر شده‌است (جدول ۳).

در شبیه‌سازی دبی حوضه‌ی آبریز سد سلمان داشتند، گردید (جدول ۳). نتایج حساسیت‌سنجی پارامترها نشان داد که پارامترهای شماره منحنی (CN2)، چگالی ظاهری خاک در لایه‌ی سطحی (SOL\_BD) و هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی (SOL\_K) در حوضه‌ی بالادست سد سلمان از حساسیت بیشتری برخوردار هستند. اکثر پارامترهای حساس، پارامترهای کنترل‌کننده رواناب بوده و مدل به پارامترهای تبخیر و تعرق در شبیه‌سازی رواناب حساسیت کمتری نشان داده‌است. برای در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی پارامتر CN2 به علت حساسیت شدید مدل به این پارامتر در شبیه‌سازی جریان رودخانه، مقدار این پارامتر برای حوضه‌های بالادست هر یک

جدول ۳- خصوصیات پارامترهای واسنجی شده توسط الگوریتم SUFI-2

پارامتر	شرح	درجه حساسیت		محدوده اولیه		محدوده نهایی		مقدار بهینه
		Max	Min	Max	Min			
r-CN2.mgt (B. Bahman)	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه بندبهم	۰/۲	-۰/۲	۰/۲۶	-۰/۰۵	۰/۱۴		
r-CN2.mgt (Ali-Abad)	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه علی‌آباد	۰/۲	-۰/۲	۰/۰۹	-۰/۱۸	-۰/۰۲		
r-CN2.mgt (Barak)	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه برک	۰/۲	-۰/۲	۰/۰۸	-۰/۲۴	-۰/۱۷		
r-CN2.mgt (T. Karzin)	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه تنگ‌کارزین	۰/۲	-۰/۲	-۰/۱	-۰/۳۶	-۰/۱۰		
v-ESCO.hru	ضریب جبران تبخیر خاک	۱	۰/۷	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۷۰		
v_ALPHA_BNK.rte	ضریب آلفای جریان پایه	۱	۰	۰/۶۵	۰/۱۹	۰/۲۲		
r-SOL_BD.sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی	۰/۵	-۰/۵	۰/۱۸	-۰/۰۵	۰/۰۴		
v-GW_DELAY.gw	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی (روز)	۴۵۰	۳۰	۴۲۹/۸	۲۹۹/۶	۳۶۴/۷۱		
v-SMFMX.bsn	حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال	۱۰	۰	۸/۴۷	۲/۷۷	۵/۶۲		
v-CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	۱۳۰	۵	۴۱/۷۰	۱۰/۴۱	۲۶/۰۵		
v-CH_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰/۳	۰	۰/۱۲	-۰/۰۱	۰/۰۵		
r-SOL_AWC.sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی	۰/۴	-۰/۴	۰/۳۳	-۰/۱۲	۰/۰۵		
r-SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی	۰/۸	-۰/۸	۲/۰۹	۱/۰۸	۱/۵۹		
v-ALPHA_BF.gw	ضریب آلفای جریان پایه	۰/۳	۰	۰/۱۸	-۰/۰۳	۰/۰۶		
v-SFTMP.bsn	دمای بارش برف	۵	-۵	۸/۱۳	۰/۹۵	۴/۵۴		
v-SMTMP.bsn	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف	۵	-۵	-۰/۰۳	-۴/۵۷	-۲/۳۰		
v-SMFMN.bsn	فاکتور ذوب برف برای روز ۲۱ ماه سپتامبر	۱۰	۰	۵/۰۶	۱/۸۱	۳/۴۳		
v-TIMP.bsn	ضریب تأخیر دمای انباشت برف	۱	۰	۰/۰۶	-۰/۲۷	-۰/۱۱		

این ایستگاه بیانگر شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی کل حوضه بوده که با توجه به معیارهای ارزیابی عملکرد به مقادیر مطلوبی دست یافته است. با این حال، مقادیر منفی شاخص اریبی نشانگر بیش‌برآورد جریان در هر دو دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در خروجی حوضه می‌باشند. علت امر می‌تواند به برداشت‌هایی نسبت داده شود که پیش از رسیدن جریان به خروجی به منظور مصارف مختلف و یا اقدامات

آنالیز آماری نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان دهنده‌ی عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به داده‌های مشاهداتی بر اساس حدود آستانه‌ی معرفی شده در مطالعات پیشین (Kouchi et al., 2017; Moriasi et al., 2007) می‌باشد (جدول ۴). از آنجایی که ایستگاه هیدرومتری تنگ‌کارزین در فاصله‌ی کمی از خروجی حوضه واقع شده‌است، می‌توان گفت عملکرد مدل در

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل، محدوده‌ی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها (شاخص‌های P-Factor و R-Factor) مدل در شبیه‌سازی جریان در این حوضه، عملکرد قابل قبولی داشته و می‌توان از نتایج آن برای پیش‌بینی اثرات تغییر آب و هوایی استفاده کرد.

مدیریتی از جریان رودخانه انجام شده اما در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده‌است. مدل‌سازی جریان در نواحی خشک و نیمه خشک به علت عدم پیوستگی جریان در طول سال و مقدارهای کم دبی جریان نسبت به مناطق مرطوب کاری مشکل و طاقت فرساست (Walker and Thoms, 1993). با این وجود در مجموع می‌توان گفت بر اساس

جدول ۴- مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT برای دوره واسنجی (صحت‌سنجی) در ایستگاه‌های آب‌سنجی

ایستگاه	P-Factor	R-Factor	NSE	bR <sup>2</sup>	RSR	R <sup>2</sup>	PBIAS
بندبهنم	۰/۸۵ (۰/۸۶)	۱/۱۰ (۰/۰۶)	۰/۶۶ (۰/۵۳)	۰/۵۶ (۰/۴۶)	۰/۵۸ (۰/۶۹)	۰/۶۷ (۰/۵۸)	۹/۷ (۱۸/۹)
علی‌آباد	۰/۷۴ (۰/۶۲)	۱/۰۷ (۰/۹۵)	۰/۷۳ (۰/۰۷)	۰/۷۱ (۰/۴۷)	۰/۵۲ (۰/۵۵)	۰/۷۵ (۰/۷۰)	۳ (۱۲/۱)
تنگ‌کارزین	۰/۹۶ (۰/۷۸)	۱/۵۵ (۱/۶۵)	۰/۷۷ (۰/۵۷)	۰/۷۳ (۰/۵۷)	۰/۴۸ (۰/۶۶)	۰/۸۰ (۰/۶۷)	-۱۴ (-۵)

### شبیه‌سازی مؤلفه‌های آبی

ماحصل فرآیند واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی محدوده‌ای از پارامترها می‌باشد که منجر به محدوده‌ای از شبیه‌سازی‌های بهینه توسط مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌شوند. لذا نتایج مدل‌سازی نیز بایستی به صورت محدوده‌ی عدم قطعیت در نظر گرفته شود (Abbaspour et al., 2015; Kouchi et al., 2017). مقادیر توزیع ماهانه و سالانه‌ی محدوده‌ی عدم قطعیت و بهترین شبیه‌سازی از متوسط طولانی‌مدت آب آبی، آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز در دوره‌ی گذشته در جدول ۵ آورده شده است. توزیع زمانی مقادیر ماهانه رواناب و آب آبی منطبق بر توزیع زمانی بارش ماهانه در حوضه می‌باشد. سهم رواناب و آب آبی در حوضه از بارش سالانه به ترتیب ۸/۶ و ۱۳/۹ درصد است. بیشترین مقدار عدم قطعیت در برآورد رواناب و آب آبی در ماه‌های پر بارش دیده می‌شود. رواناب سطحی در ماه‌های سرد و پر بارش در بالاترین مقدار خود است. مقدار رواناب سطحی در ماه‌های گرم و فصل تابستان به علت کاهش بارش در این فصل از سال در منطقه به حداقل رسیده و بسیار ناچیز است. محدوده‌ی عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی رواناب و آب آبی به علت حساسیت این مؤلفه‌ها به تعداد پارامترهای بیشتری در واسنجی مدل وسیع‌تر می‌باشد (جدول ۵).

مدل به علت حساسیت این مؤلفه به پارامترهای کمتری در فرآیند واسنجی، به طور کلی کمتر از عدم قطعیت آب آبی و یا ذخیره‌ی آب سبز می‌باشد (جدول ۵). محققین دیگر نیز در مطالعات خود به محدوده‌ی عدم قطعیت کمتری برای تبخیر و تعرق و رطوبت خاک نسبت به آبدهی ویژه در شبیه‌سازی حوضه‌های هیدرولوژیکی مورد مطالعه خود رسیدند (Schuol and Abbaspour, 2007) (اخوان و همکاران ۱۳۸۹).

مقدار آب خاک یا ذخیره آب سبز در ماه‌های ژانویه و فوریه به علت بارندگی بالا و تا حدی کاهش تبخیر و تعرق به حداکثر خود می‌رسد و در ماه‌های گرم سال به علت فقدان بارندگی و دمای بالای هوا به کمترین مقدار خود و در حد صفر رسیده است (جدول ۵).

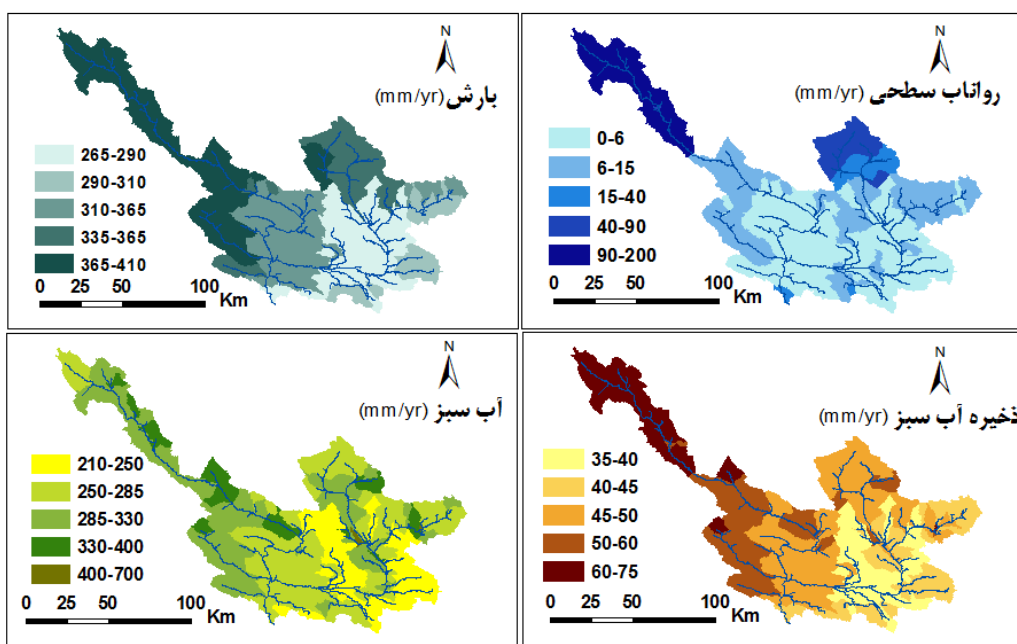
مدل در شبیه‌سازی مکانی مؤلفه‌های آبی در دوره‌ی گذشته (۲۰۰۸-۱۹۷۸) نسبت به توزیع بارندگی عملکرد مناسبی داشته‌است (شکل ۲). به طوری که توزیع مکانی رواناب، آب سبز و ذخیره‌ی آب سبز منطبق بر توزیع مکانی بارندگی در حوضه بوده است. به عنوان مثال شاخه‌ی شمالی و شمال غربی حوضه که بارش بیشتری را نسبت به مناطق دیگر دریافت می‌کند، مقادیر بیشتری از رواناب، آب سبز و ذخیره آب سبز نشان داده‌است.

توزیع مکانی متوسط رواناب سالانه در دوره‌ی گذشته حاکی از اختلاف فاحش میان سهم مناطق مختلف حوضه در تولید رواناب می‌باشد. علت را می‌توان به توزیع بارش روی حوضه، شیب و ارتفاع بیشتر حوضه در مناطق شمالی نسبت به مناطق مرکزی و جنوبی و خصوصیات حوضه نسبت داد. متوسط سالانه‌ی آب سبز شبیه‌سازی شده در مناطق با پوشش گیاهی متراکم‌تر (جنگل‌ها و مراتع) بیشتر است. همچنین مدل حداکثر مقدار آب سبز سالانه را به زیرحوضه‌های با درصد بیشتر اراضی کشاورزی نسبت داده است. قسمت‌های شمالی و شمال غربی حوضه نسبت به قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی سهم بیشتری از ذخیره آب سبز دارند. این مناطق به علت دریافت بارش سالانه‌ی بیشتر و ذخیره‌ی آب سبز بالاتر مقبولیت بیشتری برای دیم‌کاری در حوضه دارند.

روند تغییرات ماهانه آب سبز اندکی متفاوت از بارش ماهانه در حوضه می‌باشد، اما همچنان ماه‌های پر بارش نسبت به ماه‌های کم بارش مقدار بیشتری از آب سبز سالانه را به خود اختصاص داده‌اند. سهم آب سبز از بارش سالانه ۸۶/۵ درصد می‌باشد. بیشترین مقدار آب سبز شبیه‌سازی شده در حوضه مربوط به ماه آوریل است. در این ماه علاوه بر وجود بارش، افزایش دمای هوا منجر به افزایش نرخ تبخیر شده و همچنین تعرق بیشتر توسط گیاهان به علت رشد و نمو گیاهی در این ماه در مناطق مرعی، جنگل و همچنین کشاورزی در حوضه، باعث افزایش مقدار آب سبز شده است. در ماه جولای مقدار آب سبز به علت پایان یافتن فصل رشد گیاهان و کاهش بارندگی کاهش پیدا کرده است. عدم قطعیت آب سبز تخمین زده شده توسط

جدول ۵- محدوده‌ی عدم قطعیت و بهترین شبیه‌سازی (اعداد داخل پرانتز) از متوسط ماهانه و سالانه‌ی مؤلفه‌های آبی در دوره‌ی گذشته

ماه	رواناب (میلی‌متر)	آب آبی (میلی‌متر)	آب سبز (میلی‌متر)	ذخیره آب سبز (میلی‌متر)
ژانویه	۲/۱-۱۶/۷ (۵/۳)	۵/۵-۲۲/۵ (۸/۸)	۲۲-۲۹/۳ (۲۴/۵)	۵۴/۹-۷۵/۱ (۶۶)
فوریه	۱/۴-۱۳/۱ (۵/۹)	۴/۷-۱۸/۴ (۹/۳)	۲۵/۶-۳۵ (۲۷/۴)	۵۰/۸-۸۴/۱ (۷۲/۱)
مارس	۰/۸-۱۱/۹ (۴/۶)	۴-۱۹ (۷/۹)	۳۵/۱-۴۹/۲ (۳۸/۳)	۴۵/۸-۸۵/۸ (۷۰/۴)
آوریل	۰/۲-۸/۳ (۱/۹)	۲/۲-۱۱/۵ (۳/۹)	۵۰/۸-۶۵/۲ (۵۵/۸)	۲۶/۹-۶۵/۳ (۴۷/۳)
می	۰/۱-۵/۳ (۱/۴)	۱/۴-۷/۴ (۲/۷)	۴۶/۷-۵۸/۱ (۵۰/۴)	۵/۱-۲۷/۹ (۱۵/۷)
ژوئن	۰/۴-۳/۷ (۰/۷)	۱/۱-۴/۹ (۱/۴)	۲۶/۲-۳۶/۶ (۳۱/۳)	۰/۴-۲/۳ (۱/۵)
جولای	۰-۱/۶ (۰/۳)	۰/۵-۲/۴ (۰/۸)	۱۰/۶-۱۸/۶ (۱۶)	۰/۴-۰/۷ (۰/۸)
آگوست	۰/۳-۱/۷ (۰/۵)	۰/۸-۲/۵ (۱)	۷-۱۱/۷ (۹/۳)	۱/۵-۲/۷ (۲/۳)
سپتامبر	۰/۱-۱/۳ (۰/۲)	۰/۶-۲ (۰/۷)	۳/۱-۴/۴ (۴/۶)	۱/۸-۳/۵ (۳/۳)
اکتبر	۰-۲ (۰/۲)	۰/۵-۲/۹ (۰/۹)	۴/۱-۵/۹ (۵/۴)	۳/۳-۶/۳ (۵/۵)
نوامبر	۰/۲-۴/۷ (۰/۹)	۱/۱-۶/۳ (۱/۹)	۶/۴-۹/۱ (۸/۲)	۸-۱۵ (۱۲/۹)
دسامبر	۱/۲-۱۲/۴ (۴/۳)	۳/۸-۱۸/۸ (۷)	۱۳/۵-۲۵/۸ (۱۶/۴)	۲۸-۴۹/۲ (۴۱/۱)
سالانه	۶/۷-۸۲/۷ (۲۶/۲)	۲۶/۱-۱۱۸/۴ (۴۶/۳)	۲۴۰/۱-۳۴۰/۹ (۲۸۷/۶)	۲۸-۴۹/۲ (۴۱/۱)



شکل ۲- توزیع مکانی متوسط طولانی‌مدت سالانه بارش، رواناب سطحی، آب سبز و ذخیره آب سبز شبیه‌سازی شده در دوره‌ی گذشته

### پیش‌بینی مؤلفه‌های اقلیمی

نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی سه مدل GCM تحت دو سناریوی مختلف RCP حاکی از افزایش متوسط سالانه دماهای حدی (دمای حداقل و حداکثر) در هر دو سناریو تحت هر سه مدل مورد بررسی در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی گذشته در منطقه است (جدول ۶). انتظار می‌رود این افزایش برای دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر بیشتر باشد. بیشترین افزایش دمای حداقل و حداکثر

توسط مدل HadGem2-ES تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب به میزان ۲/۳۷ و ۱/۸۵ درجه سانتی‌گراد (۰/۷۹ و ۰/۶۷ درجه سانتی‌گراد در ده سال) و کمترین مقدار تغییر توسط مدل NorESM1-M تحت سناریوی RCP2.6 به ترتیب به مقدار ۱/۰۴ و ۰/۳۹ درجه سانتی‌گراد (۰/۳۵ و ۰/۱۳ درجه سانتی‌گراد در ده سال) پیش‌بینی شده است (جدول ۶). نتایج مطالعات دیگر نیز تایید کننده نتایج حاصل است. برای مثال عینی نرگسه و همکاران (۱۳۹۴) نشان دادند که میانگین



متوسط طولانی مدت دما را به ترتیب تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه رودخانه کر در استان فارس گزارش کردند (Vaighan et al., 2017).

دما در استان فارس تحت سناریوهای گزارش چهارم روند افزایشی داشته و در پهنه استان متوسط دما در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ با ده درصد افزایش از ۱۸/۳۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۰/۲۷ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. وایقان و همکاران نیز افزایش ۰/۵۲ و ۰/۶۳ درجه سانتی‌گرادی

جدول ۶- محدوده تغییرات میانگین دمای حداکثر و حداقل سالانه حاصل از سه مدل GCM تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی گذشته

NorESM1-M		IPSL-CM5A-LR		HadGem2-ES	
RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6
۱/۶۱	۱/۰۴	۲/۰۲	۱/۵۲	۲/۳۷	۲/۰۸
۰/۹۸	۰/۳۹	۱/۸۳	۱/۲۶	۱/۸۵	۱/۵۳

تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 افزایش قابل توجه بارش را در اواخر پاییز و زمستان پیش‌بینی کردند (Vaighan et al., 2017). همچنین روشن و همکاران (۱۳۹۱)، افزایش بارش به میزان ۱۰ تا ۱۸ درصد را با توجه به نتایج یک مدل-سناریوی ترکیبی برای سال ۲۰۲۵ برای مناطق جنوبی و جنوب غربی ایران (شامل منطقه مورد مطالعاتی این تحقیق) و افزایش ۳۵ تا ۴۲ درصدی برای سال ۲۰۵۰ را در این مناطق پیش‌بینی کردند.

برخلاف دمای حداکثر و حداکثر، مدل‌های مختلف در پیش‌بینی بارش در دوره‌ی آینده تحت سناریوی RCP2.6 با یکدیگر توافق نداشته‌اند. به طوری که مدل IPSL-CM5A-LR تحت این سناریو کاهش ۱/۳ درصدی بارش را برای دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه پیش‌بینی می‌کند و دو مدل دیگر در حوضه برای دوره‌ی مشابه افزایش بارش را پیش‌بینی کرده‌اند (جدول ۷). در مورد سناریوی RCP8.5 نتایج خروجی‌های هر سه مدل حاکی از افزایش بارش در حوضه می‌باشد. وایقان و همکاران نیز در حوضه‌ی کر استان فارس

جدول ۷- تغییرات متوسط درازمدت سالانه بارش در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی گذشته در حوضه

RCP8.5		RCP2.6		مدل اقلیمی
درصد تغییرات (%)	میانگین سالانه (میلیمتر)	درصد تغییرات (%)	سالانه (میلیمتر) میانگین	
۲۴/۴	۴۱۳/۴	۲۰/۲	۳۹۹/۴	HadGem2-ES
۱۶/۷	۳۸۷/۹	-۱/۳	۳۲۸/۱	IPSL-CM5A-LR
۱۱	۳۶۸/۸	۷/۵	۳۵۷/۴	NorESM1-M

برای قسمت‌های جنوب غربی کشور شامل منطقه‌ی مورد مطالعاتی این تحقیق نیز گزارش شده‌است (Abbaspour et al., 2009). وایقان و همکاران، افزایش ۱۷۰ درصدی جریان رودخانه کر در استان فارس در ماه دسامبر را تحت داده‌های اقلیمی مدل CCSM4.0-AR5 و سناریوی RCP8.5 برای دوره‌ی زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ گزارش کردند (Vaighan et al., 2017).

در تمامی مدل‌هایی که افزایش بارش را برای دوره‌ی آینده پیش‌بینی کرده‌اند، تغییرات اقلیمی به علت افزایش بارندگی و دما منجر به افزایش آب آبی و آب سبز در پهنه‌ی حوضه شده است. هرچند تأثیر اثرات اقلیمی بر رواناب و آب آبی نسبت به آب سبز بیشتر است. نتایج مدل‌های اقلیمی مختلف از تغییرات ذخیره‌ی آب سبز بستگی به توزیع زمانی ماهانه‌ی بارش‌های پیش‌بینی شده دارد. چرا که مدل SWAT محتوای آب خاک در پایان گام زمانی شبه‌سازی را به عنوان ذخیره‌ی آب سبز معرفی می‌کند. بنابراین ذخیره‌ی آب سبز

### اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آبی (آب آبی، جریان آب سبز، ذخیره آب سبز)

مقدار متوسط سالانه و درصد تغییرات مؤلفه‌های منابع آبی شامل رواناب سطحی، آب آبی، آب سبز و ذخیره آب سبز تحت مدل-سناریوهای مختلف در جدول ۸ آورده شده است. در دوره‌ی آینده، متوسط سالانه رواناب و آب آبی در حوضه نسبت به دوره‌ی پایه افزایش نشان می‌دهد. بالاترین مقدار افزایش رواناب توسط داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده مدل IPSL-CM5A-LR تحت سناریوی RCP8.5 و با نرخ ۴/۱ درصد در سال و کمترین مقدار آن توسط مدل NorESM1-M تحت سناریوی RCP2.6 با نرخ ۱ درصد در سال گزارش شده است. نتایج مطالعات دیگر تأییدکننده‌ی نتایج حاصل از این تحقیق می‌باشند. برای مثال عباسپور و همکاران، نشان دادند که با توجه به تنوع مکانی تغییرات آب و هوایی در ایران، ممکن است منابع آبی در آینده در بسیاری از نقاط افزایش پیدا کند. این افزایش

اقلیمی کاهش متوسط سالانه‌ی بارش را در حوضه پیش‌بینی کرده است (مدل IPSL-CM5A-LR تحت سناریوی RCP2.6)، می‌باشد (جدول ۸).

سالانه وابسته به میزان بارش در ماه آخر سال (دسامبر) بوده و تغییر توزیع بارش این مقدار را دستخوش تغییر خواهد کرد. نکته‌ی قابل توجهی که در نتایج وجود دارد، پیش‌بینی افزایش رواناب توسط تمامی مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی در حوضه، حتی در موردی که مدل

جدول ۸- تغییرات مولفه‌های آبی تحت مدل سناریوهای مختلف اقلیمی

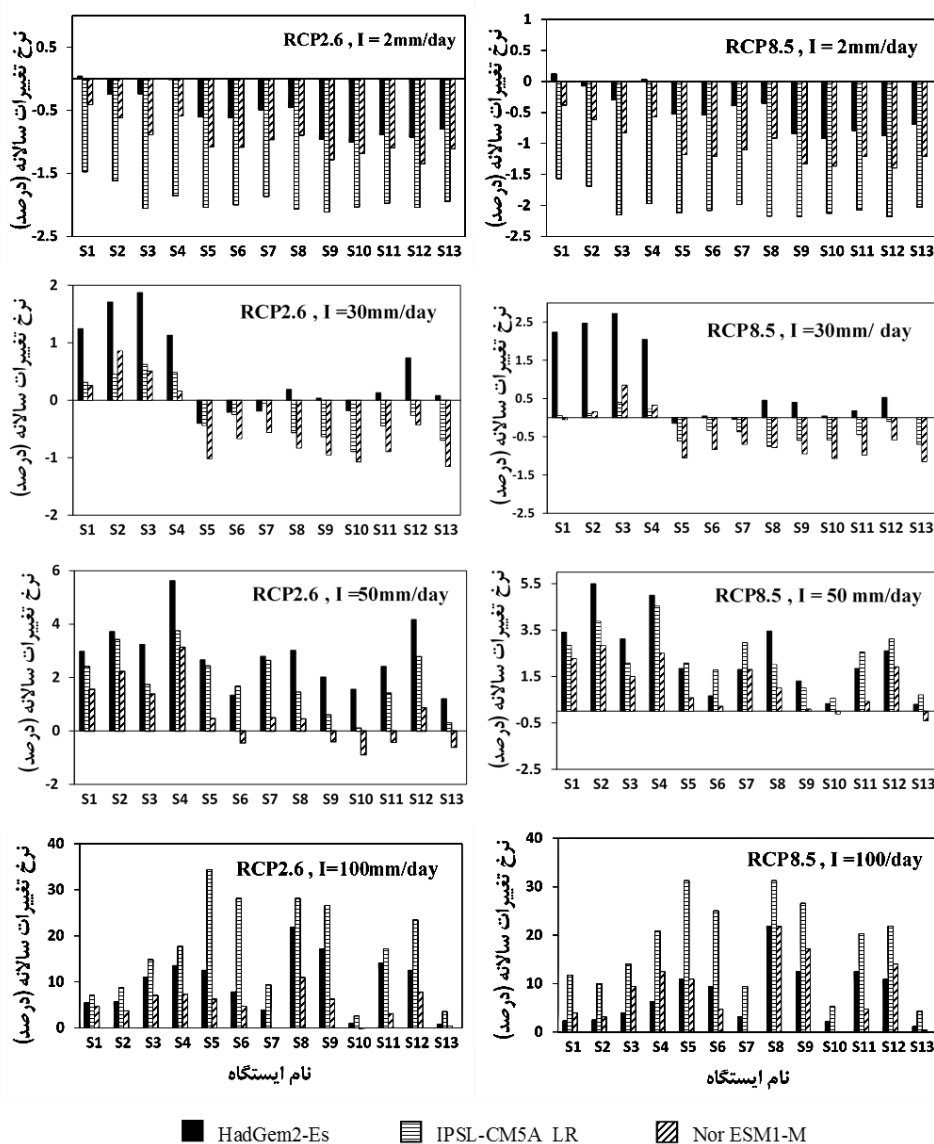
سناریو	مدل اقلیمی	رواناب		آب آبی		آب سبز		ذخیره آب سبز	
		متوسط سالانه (میلیمتر)	درصد تغییر	متوسط سالانه (میلیمتر)	درصد تغییر	متوسط سالانه (میلیمتر)	درصد تغییر	متوسط سالانه (میلیمتر)	درصد تغییر
-	Historic	۲۶/۲	-	۴۶/۳	-	۲۸۷/۲	-	۴۱/۱	-
RCP2.6	HadGem2-ES	۴۲/۵	۶۲/۲	۷۴/۱	۶۰/۰	۳۲۶/۷	۱۳/۸	۳۹/۸	-۳/۲
	IPSL-CM5A-LR	۵۲/۸	۱۰۱/۵	۸۰/۷	۷۴/۳	۲۵۰/۱	-۱۲/۹	۲۲/۱	-۴۶/۲
	NorESM1-M	۳۴/۹	۳۳/۲	۶۱/۷	۳۳/۳	۳۰۶/۳	۶/۷	۴۰/۷	-۱/۰
RCP8.5	HadGem2-ES	۴۵/۸	۷۴/۸	۷۶/۱	۶۴/۴	۳۳۹/۱	۱۸/۱	۴۸/۸	۱۸/۷
	IPSL-CM5A-LR	۶۰/۶	۱۳۱/۳	۸۸/۲	۹۰/۵	۳۰۱/۹	۵/۱	۲۳/۱	-۴۳/۸
	NorESM1-M	۴۵/۷	۷۴/۴	۷۱/۰	۵۳/۳	۲۹۵/۷	۳/۰	۴۶/۳	۱۲/۷

میلی‌متر در روز در ایستگاه‌های حوضه را نسبت به گذشته بیشتر پیش‌بینی کرده‌اند (شکل ۳). نکته‌ی قابل توجه نرخ بالای تغییرات بارش‌های با شدت حداقل ۱۰۰ میلی‌متر در روز توسط مدل IPSL-CM5A-LR نسبت به دو مدل دیگر است. با توجه به این که تعداد کل بارش‌ها (بارش‌های با شدت حداقل ۲ میلی‌متر در روز) توسط این مدل به نسبت دو مدل دیگر کاهش بیشتری را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که مدل IPSL-CM5A-LR نسبت به دو مدل دیگر رخداد بارش‌های حادی را بیشتر پیش‌بینی کرده‌است. نتایج مؤید این موضوع است که هر چند در مواردی مانند مدل IPSL-CM5A-LR تحت سناریوی RCP2.6 متوسط بارش دراز مدت سالانه نسبت به مقدار مشابه در دوره‌ی تاریخی کاهش نشان می‌دهد، اما تعداد وقایع حادی افزایش یافته‌است و این افزایش بارش‌های شدید که قابلیت تولید رواناب بیشتری را دارند، منجر به افزایش متوسط سالانه رواناب حوضه در دوره‌ی آینده نسبت به گذشته شده‌است (شکل ۳).

مدرس و همکاران نیز در مطالعه‌ی خود عنوان کردند که سیلاب‌های بزرگ در اکثر حوضه‌های هیدرولوژیکی ایران (شامل حوضه مورد مطالعه در این تحقیق) طی سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۵۰ روند معنی‌دار افزایشی داشته‌اند (Modarres et al., 2016). همچنین وایقان و همکاران افزایش قابل توجه جریان رودخانه کر در استان فارس را تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در ماه‌های اکتبر تا فوریه و افزایش کمتر در ماه‌های مارس تا سپتامبر را پیش‌بینی کردند (Vaighan et al., 2017).

برای یافتن علت این موضوع، به بررسی وقایع بارش در دوره‌ی گذشته و آینده در حوضه پرداخته شد. بر این اساس تعداد رخداد وقایع بارش در دوره‌ی گذشته و پیش‌بینی‌شده توسط نتایج مدل - سناریوهای اقلیمی در دوره‌ی آینده تحت چهار شدت مختلف (حداقل ۲ میلی‌متر در روز، حداقل ۳۰ میلی‌متر در روز، حداقل ۵۰ میلی‌متر در روز و حداقل ۱۰۰ میلی‌متر در روز) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند (شکل ۳).

نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی افزایش فرکانس بارش‌های شدیدتر و کاهش وقایع بارش با شدت کم در دوره‌ی آینده نسبت به گذشته در حوضه‌ی تحت هر دو سناریو می‌باشند (شکل ۳). بطوریکه تعداد وقایع بارش با شدت حداقل ۲ میلی‌متر در روز پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل - سناریوهای مختلف در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی گذشته در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی حوضه با کاهش چشمگیر مواجه خواهد شد. نرخ تغییرات بارش با شدت حداقل سی میلی‌متر در روز در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی گذشته در بعضی از ایستگاه‌ها روند کاهشی و در بعضی دیگر روند افزایشی را نشان می‌دهند. بیشتر ایستگاه‌هایی که روند افزایشی نرخ تغییر بارش با شدت حداقل ۳۰ میلی‌متر در روز در آن‌ها مشاهده شده در شاخه شمال غربی حوضه واقع می‌باشند که عموماً در دوره‌ی تاریخی نیز ایستگاه‌هایی با میانگین بارش سالانه بیشتر در حوضه بوده‌اند و موقعیت کوهستانی و شیب شدید این مناطق نسبت به دیگر نقاط حوضه امکان تولید رواناب از بارش را در این مناطق افزایش می‌دهد. تمام مدل‌های اقلیمی تحت هر دو سناریو تعداد بارش‌های با شدت حداقل ۱۰۰



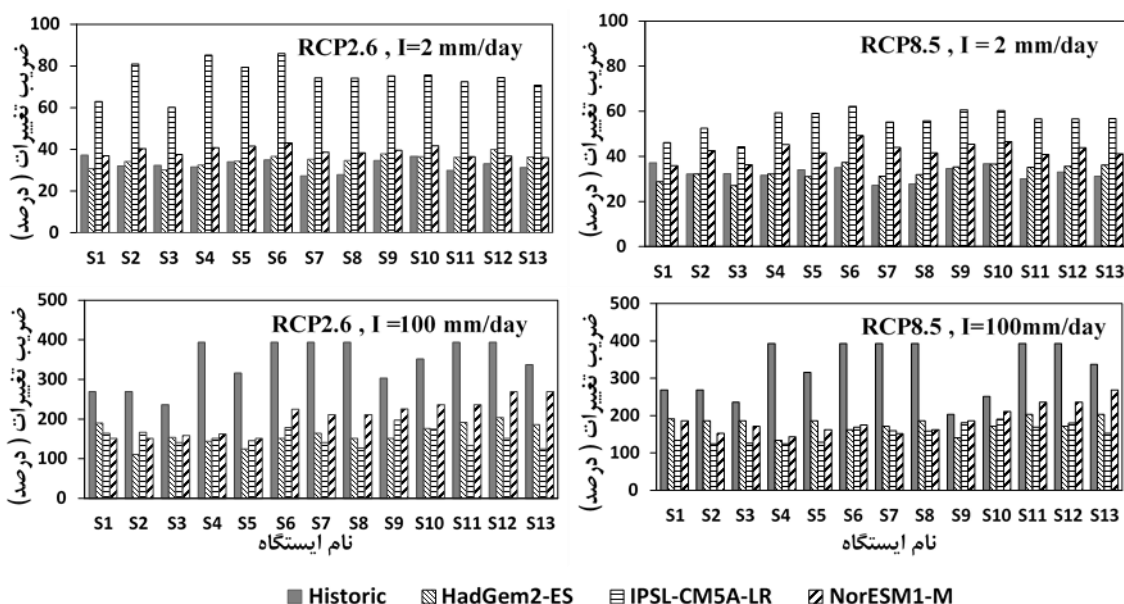
شکل ۳- نرخ تغییرات سالانه بارش با شدت‌های حداقل ۲، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر در روز تحت مدل- سناریوهای مختلف اقلیمی در دوره آینده نسبت به دوره گذشته

توجه، رفتار مدل IPSL-CM5A-LR در پیش‌بینی‌ها بوده است که در هر دو سناریو نسبت به مدل‌های دیگر کمترین مقدار CV را نشان می‌دهد. این نتیجه صحت نتایج قبلی در پیش‌بینی کاهش تعداد بارندگی‌ها و در مقابل افزایش بارش‌های شدید توسط این مدل را تایید می‌کند. در نهایت با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت بر اساس پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی تحت هر دو سناریوی RCP دوره‌ی آینده از تعداد وقایع بارش با شدت‌های کم کاسته شده و وقایع حادی با شدت‌های زیاد افزایش پیدا خواهد کرد. این وقایع عامل افزایش متوسط رواناب سالانه در حوضه حتی در مدل‌هایی هستند که

مقایسه‌ی روند افزایشی ضریب تغییرات تعداد بارش‌های با شدت حداقل دو میلی‌متر در دوره آینده نسبت به گذشته نشان‌دهنده اطمینان‌پذیری کمتر به پراکندگی رخدادهای بارش در هر سال نسبت به دوره گذشته می‌باشد. هر چند مقدار این افزایش به مدل اقلیمی و سناریوی RCP بستگی دارد. برای بارش‌های با شدت زیاد (حداقل ۱۰۰ میلی‌متر در روز) مدل‌ها تحت هر دو سناریو مقدار ضریب تغییرات کمتری نسبت به دوره‌ی گذشته داشتند که نشان‌دهنده‌ی اطمینان‌پذیری بیشتر به پراکندگی رخداد وقایع بارش شدید در هر سال نسبت به دوره‌ی گذشته می‌باشد. در این رابطه نکته‌ی قابل

نشان‌دهنده‌ی امکان بیشتر رخداد این وقایع در هر سال می‌باشد.

متوسط سالانه‌ی بارش در حوضه را نسبت به دوره‌ی گذشته کمتر پیش‌بینی کرده‌اند. ضریب تغییرات کمتر وقایع حدی در دوره‌ی آینده



شکل ۴- ضریب تغییرات رخداد وقایع بارش با شدت حداقل ۲ و ۱۰۰ میلی‌متر در روز در دوره‌ی گذشته و آینده

## جمع بندی

حوضه به علت تأثیرپذیری از پارامترهای بیشتری در فرایند واسنجی می‌باشد. مقادیر متوسط سالانه برای مؤلفه‌های رواناب، آب آبی، آب سبز و ذخیره آب سبز به ترتیب برابر ۲۶/۲، ۴۶/۳، ۲۸۷/۵ و ۴۱/۱ میلی‌متر توسط مدل تخمین زده شد.

نتایج حاصل از ریزمقیاس‌سازی مؤلفه‌های اقلیمی بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه از سه مدل GCM تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 حاکی از افزایش دمای حداقل و حداکثر در هر دو سناریو تحت هر سه مدل مورد بررسی در دوره‌ی آینده در منطقه است. محدوده‌ی عدم قطعیت پیش‌بینی بارش از ۱/۳ درصد کاهش تا ۲۰/۲ درصد افزایش تحت سناریوی RCP2.6 و از ۱۱ تا ۲۴/۴ درصد افزایش تحت سناریوی RCP8.5 متفاوت است. انتظار می‌رود مقدار بارش برای بارش‌های با شدت بیشتر افزایش پیدا کرده و برای رویدادهای بارش با شدت کم کاهش یابد. مدل‌های اقلیمی برای آینده حوضه افزایش متوسط سالانه رواناب و آب آبی را پیش‌بینی کرده‌اند که ناشی از افزایش وقایع حدی در حوضه می‌باشد. در واقع هر سه مدل تحت هر دو سناریو برای دوره آینده افزایش پتانسیل سیل‌خیزی را با توجه به کاهش تعداد بارش‌های با شدت کم (حداقل ۲ میلی‌متر در روز) و افزایش شدت بارش‌های با شدت زیاد (حداقل با شدت ۱۰۰ میلی‌متر در روز) و هم‌چنین افزایش اعتمادپذیری رخداد سال به سال این وقایع با توجه به کاهش ضریب تغییرات پیش‌بینی

در مطالعه‌ی حاضر، اثر تغییرات اقلیمی در منطقه‌ی بالادست سد سلمان در حوضه‌ی آبریز مند، در دوره‌ی گذشته (۲۰۰۸-۱۹۷۸) و آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۰) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT بر مؤلفه‌های رواناب، آب آبی، آب سبز و ذخیره آب سبز مورد بررسی قرار گرفت. اثرات بالقوه تغییرات اقلیمی در آینده‌ی نزدیک با در نظر گرفتن عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی، با استفاده از داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده حاصل از سه مدل گردش عمومی جو (HadGem2-ES، IPSL-CM5A-LR و NorESM1-M) و دو سناریوی نماینده خط سیر غلظت گزارش ارزیابی پنجم (RCP2.6 و RCP8.5) ارزیابی شد. آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی SWAT نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به پارامترهای کنترل‌کننده‌ی رواناب در حوضه دارد. تمام شاخص‌های ارزیابی عملکرد در هر سه ایستگاه به نتایج قابل قبولی از شبیه‌سازی جریان در حوضه دست یافته‌اند؛ لذا می‌توان عنوان کرد که مدل SWAT خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌است و توانایی شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان در آینده را دارد. شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی (رواناب، آب آبی، آب سبز و ذخیره آب سبز) در حوضه نشان‌دهنده‌ی عدم قطعیت بالاتر در شبیه‌سازی رواناب و آب آبی نسبت به آب سبز و ذخیره آب سبز در

- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and Van Genuchten, M.T. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*. 3.4:1340-1352.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Kløve, 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.
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 333.2-4:413-430.
- Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, N., Kamali, B. and Abbaspour, K.C. 2017. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling & Software*. 96.181-198.
- Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S.J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R. and Yang, H. 2014. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *Hydrological Processes*. 28.4:2018-2032.
- Cuceloglu, G., Abbaspour, K. and Ozturk, I. 2017. Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model. *Water*. 9.10:814.
- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2006. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132.3:129-132.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R. and Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*. 23.3:486-501.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.
- Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F. and Wiltshire, A.J. 2013. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth Syst. Dynam.* 4.1:129-144.
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. and Piontek, F. 2013. A trend-preserving bias correction کرده‌اند. تغییرات اقلیمی در اکثر مدل- سناریوها افزایش جریان آب سبز در حوضه را به علت افزایش دما و هم‌چنین افزایش بارش پیش‌بینی کرده‌اند. اما این افزایش متعادل‌تر از افزایش مقدار آب آبی و رواناب بوده است. این پژوهش نخستین کوشش برای آشکارسازی اثرات بالقوه‌ی تغییرات اقلیمی در آینده‌ی نزدیک با استفاده از مدل‌های CMIP5 در حوضه‌ی آبریز بالادست سد سلمان فارسی می‌باشد. نتایج حاصل جهت درک اثرات بالقوه‌ی تغییر اقلیم بر منابع هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه مفید هستند. این نتایج می‌تواند اطلاعات کارآمدی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی و همچنین حفاظت آب و خاک در منطقه مورد مطالعه فراهم کند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به ارائه‌ی راهکارهای سازگار در جهت کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و جهت‌دهی اثرات مثبت آن‌ها در حوضه کارا باشد. علاوه بر آن با تحت پوشش قرار دادن حوضه بالادست سد سلمان فارسی به عنوان یکی از سدهای بزرگ استان فارس، نتایج حاصل امکان برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر مخزن سد در شرایط تحت مطالعه را ممکن می‌سازد. از این رو پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و روش‌های کاهش آن و همچنین مقایسه روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی نتایج حاصل مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند.
- منابع**
- اخوان، س.، عابدی کوپایی، ج.، موسوی، س.ف.، عباس پور، ک.، افیونی، م.، و اسلامیان، س.س. ۱۳۸۹. تخمین «آب آبی» و «آب سبز» با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان، بهار. *علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*. ۱۴: ۵۳-۹-۲۳.
- روشن، غ.، اخلاق، ف.خ.، و عزیز، ق. ۱۳۹۱. آزمون مدل مناسب گردش عمومی جو برای پیش‌یابی مقادیر دما و بارش ایران، تحت شرایط گرمایش جهانی. فصلنامه جغرافیا و توسعه، ۱۰: ۲۷-۱۹-۳۶.
- عینی نرگسه، ح.، دیهیم فرد، ر.، صوفی‌زاده، س.، حقیقت، م.، و نوری، ا. ۱۳۹۴. پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی استان فارس با استفاده از مدل APSIM. *مجله تولید گیاهان زراعی*. ۸: ۴-۲۲۴-۲۰۳.
- Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*. 45.10:n/a-n/a.

- Huangnizhuang catchment. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 29.7:1781-1795.
- Pierce, D.W., Barnett, T.P., Santer, B.D. and Gleckler, P.J. 2009. Selecting global climate models for regional climate change studies. Proceedings of the National Academy of Sciences. 106.21:8441-8446.
- Schuol, J. and Abbaspour, K.C. 2007. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. Ecological Modelling. 201.3-4:301-311.
- Schuol, J., Abbaspour, K.C., Yang, H., Srinivasan, R. and Zehnder, A.J.B. 2008. Modeling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research. 44.7:n/a-n/a.
- Tan, M.L., Ficklin, D.L., Dixon, B., Ibrahim, A.L., Yusop, Z. and Chaplot, V. 2015. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. Applied Geography. 63.357-368.
- Tan, M.L., Ibrahim, A.L., Yusop, Z., Chua, V.P. and Chan, N.W. 2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. Atmospheric Research. 189.Supplement C:1-10.
- Vaighan, A.A., Talebbeydokhti, N. and Bavani, A.M. 2017. Assessing the impacts of climate and land use change on streamflow, water quality and suspended sediment in the Kor River Basin, Southwest of Iran. Environmental Earth Sciences. 76.15:543.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. and Rose, S.K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change. 109.1:5.
- Walker, K.F. and Thoms, M.C. 1993. Environmental effects of flow regulation on the lower river Murray, Australia. Regulated Rivers: Research & Management. 8.1-2:103-119.
- Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O. and Schewe, J., 2014. The intersectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. Proceedings of the National Academy of Sciences. 111.9:3228-3232.
- Weedon, G.P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O. and Best, M. 2011. Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century. *Journal of Hydrometeorology*. 12.5:823-848.
- &ndash; the ISI-MIP approach. Earth Syst. Dynam. 4.2:219-236.
- Ho, J.T., Thompson, J.R. and Brierley, C. 2016. Projections of hydrology in the Tocantins-Araguaia Basin, Brazil: uncertainty assessment using the CMIP5 ensemble. Hydrological Sciences Journal. 61.3:551-567.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A. and Guevara, E. 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. (<http://srtm.csi.cgiar.org>.)
- Jones, P. and Hulme, M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. International Journal of Climatology. 16.4:361-377.
- Kim, J., Choi, J., Choi, C. and Park, S. 2013. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. Science of the Total Environment. 452-453.181-195.
- Kouchi, D.H., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S.H., Khalili, D. and Abbaspour, K.C. 2017. Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms. Water. 9.6:384.
- Kwak, J., Kim, S., Singh, V.P., Kim, H.S., Kim, D., Hong, S. and Lee, K. 2015. Impact of climate change on hydrological droughts in the upper Namhan River basin, Korea. KSCE Journal of Civil Engineering. 19.2:376-384.
- McSweeney, C.F. and Jones, R.G. 2016. How representative is the spread of climate projections from the 5 CMIP5 GCMs used in ISI-MIP? Climate Services. 1.24-29.
- Modarres, R., Sarhadi, A. and Burn, D.H. 2016. Changes of extreme drought and flood events in Iran. Global and Planetary Change. 144.Supplement C:67-81.
- Moriasi, D.N., 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. Trans. Asabe. 50.3:885-900.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Ouyang, F., Zhu, Y., Fu, G., Lü, H., Zhang, A., Yu, Z. and Chen, X. 2015. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the

Laboratory, Agricultural Research Service, and Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station: Temple, Texas, p. 495.

Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J. 2013. ArcSwat Interface for SWAT 2012. User's Guide. Grassland, Soil and Water Research

## Simulation of Climate Change Impacts Using Fifth Assessment Report Models under RCP Scenarios on Water Resources in the Upper Basin of Salman Farsi Dam

D. Houshmand Kouchi<sup>1</sup>, K. Esmaili<sup>2\*</sup>, A. Faridhosseini<sup>3</sup>, S. H. Sanaei Nejad<sup>4</sup>, D. Khalili<sup>5</sup>

Received: Feb.06, 2018

Accepted: Feb.25, 2018

### Abstract

This research aims to assess the potential impacts of climate change on water resource in the headwater basin of Salman Farsi dam in Fars province using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Climate projections from three Global Circulation Models (GCMs) under two Representative Concentration Pathways (RCP2.6 and RCP8.5) during future period (2020-2050) were incorporated into the calibrated SWAT model and changes in simulated runoff, blue water, green water flow, and green water storage were compared to the baseline period (1978-2008). SWAT model efficiency in simulating hydrological response of the basin was confirmed by performance evaluation indices in Tang-e-Karzin hydrometric station which is located at the outlet of basin in the calibration (NSE=0.77, R<sup>2</sup>=0.80) and validation (NSE=0.57, R<sup>2</sup>=0.67) periods. The GCMs projections indicate increasing the frequency of severe precipitation events and reducing precipitation events with low intensity in the future as compared to the baseline period, and also increasing the minimum and maximum temperature in the basin. These changes lead to an annual increase in runoff and blue water due to increase in extreme events and flood producing potential of the basin, as well as an annual increase in green water flow due to increase in temperature and precipitation over future. The findings of this research can be helpful for water resource managers and policymakers to provide management plans and strategies to encountering climate change.

**Keywords:** Blue water, General Circulation Model, Green Water, Hydrological simulation, SWAT

---

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage , Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2,3,4- Associate Professor , Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

5- Professor , Water Engineering Department, Shiraz University

(\*- Corresponding Author: Email: esmaili@um.ac.ir)