

بررسی نقش ریزمقیاس سازی و روش محاسبه‌ی تبخیر- تعرق مرجع در تحلیل اثر تغییر اقلیم بر منابع آب

علی غلامپور^۱، افشین اشرفزاده^{۲*}، نادر پیرمردیان^۳، سیدعلی موسوی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۱)

چکیده

تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر منابع آبهای سطحی و زیرزمینی داشته باشد. از این رو لازم است این تأثیر با استفاده از مدل‌های مناسب مورد شبیه‌سازی قرار گیرد. در این مطالعه، خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 تحت چهار سناریوی انتشار، با استفاده از مدل‌های آماری LARS-WG و SDSM، در حوضه‌ی حبله‌رود برای دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۷ میلادی ریزمقیاس شد. مدل SWAT در این حوضه واسنجی شد و برای شبیه‌سازی آبدهی حوضه، تغذیه‌ی آب زیرزمینی و رطوبت خاک در دوره‌ی ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت. در مدل SWAT، از سه روش متفاوت شامل هارگریوز، پنمن-مانتیث و پریستلی-تیلور برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع استفاده شد. ترکیب‌های متفاوتی از عوامل مؤثر بر عدم قطعیت نتایج شامل مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده در ریزمقیاس‌کردن خروجی مدل گردش عمومی جو، بیشترین تأثیر را بر عدم قطعیت خروجی مدل SWAT دارد. همچنین مشاهده شد که ترکیب‌های مختلف در شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی، داده‌های پرت بیشتری نسبت به شبیه‌سازی آبدهی و رطوبت خاک تولید می‌کنند. میان‌ه‌ی آبدهی سالانه‌ی شبیه‌سازی شده در تمامی ترکیب‌های مورد بررسی، برابر با ۱۳/۳۲ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. نتایج نشان داد ترکیب‌هایی از عوامل مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع که میان‌ه‌ی آبدهی سالانه‌ی حوضه را کمتر از این مقدار پیش‌بینی می‌کنند، نسبت به سایر ترکیب‌ها عدم قطعیت بیشتری دارند. این موضوع در مورد متغیرهای تغذیه‌ی آب زیرزمینی (با میان‌ه‌ی ۲/۰۷ میلی‌متر در سال) و رطوبت خاک (با میان‌ه‌ی ۱۱۲/۴ میلی‌متر) نیز مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: سناریوهای انتشار، عدم قطعیت، مدل SWAT

مقدمه

است که این خروجی‌ها قبل از ارائه به مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژیک، با استفاده از یک روش مناسب ریزمقیاس شوند که در مطالعات مختلف، معمولاً از روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری استفاده می‌شود (Najafi et al., 2011). در مطالعه‌ی به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده در ایران، Abbaspour et al., (2009) از مدل گردش عمومی جو CGCM 3.1 استفاده کرده و خروجی این مدل را با استفاده از یک روش آماری تحت عنوان فاکتور تغییر (Change Factor) ریزمقیاس کردند. نتایج نشان داد در مناطقی با اقلیم خشک، دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت‌تر خواهد بود. در مطالعه‌ی انجام شده توسط Faramarzi et al., (2013) در سراسر قاره‌ی آفریقا، اثر تغییر اقلیم بر منابع آب شیرین در دوره‌ی زمانی ۲۰۴۰-۲۰۰۰، با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. این محققین دریافتند میانگین آب در دسترس در این قاره افزایش خواهد

ارزیابی‌های هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) بیان می‌کند که اثرات منفی تغییر اقلیم در سراسر جهان بیشتر از اثرات مثبت آن است (IPCC, 2013). مطالعات متعددی در سراسر جهان در زمینه‌ی بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه‌ها با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (General Circulation Models - GCMs) و مدل‌های شبیه‌ساز چرخه‌ی هیدرولوژی مانند SWAT انجام شده است. مدل هیدرولوژیک SWAT یا Soil and Water Assessment Tool یک شبیه‌ساز کارآمد است که برای بررسی تغییرات کمی و کیفی منابع آب و پیش‌بینی فرسایش در حوضه‌ها توسعه داده شده است. به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، لازم

* نویسنده‌ی مسئول: ashrafzadeh@guilan.ac.ir

موجود در نتایج مطالعات نیز به نوعی مورد تحلیل قرار گیرد. از این رو در مطالعه‌ی حاضر در نظر است نقش روش مورد استفاده در ریزمقیاس کردن خروجی مدل گردش عمومی جو، نقش سناریوی انتخابی و همچنین نقش روش مورد استفاده در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل SWAT، در تحلیل نتایج حاصل از بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌ها

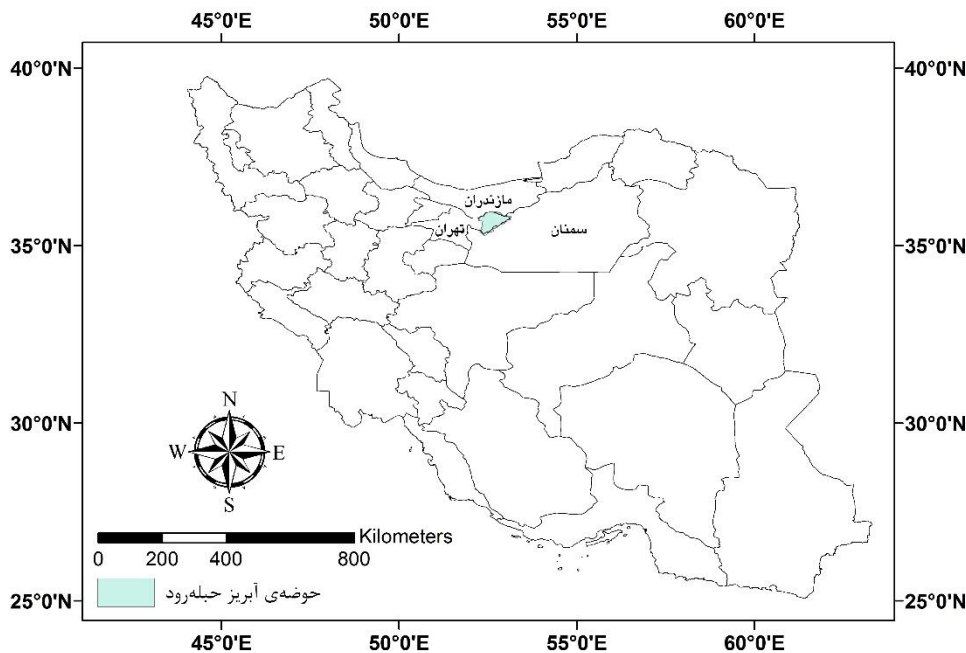
حوضه‌ی آبریز حبله‌رود در بخش شرقی استان تهران واقع شده و از شمال به مرز استان‌های تهران و مازندران و از شرق و جنوب به مرز استان‌های تهران و سمنان محدود است. از نقطه‌نظر تقسیمات هیدرولوژیک کشوری، حوضه‌ی آبریز حبله‌رود بخشی از حوضه‌ی آبریز کویر مرکزی محسوب می‌شود. حبله‌رود که رودخانه‌ی اصلی حوضه به شمار می‌رود در جهت عمومی شمال شرق به جنوب غرب جریان دارد. این رودخانه از تلاقی سرشاخه‌های گورسفید و فیروزکوه در شهرستان فیروزکوه تشکیل می‌شود و در ابتدای مسیر، رودخانه‌ی فیروزکوه نامیده می‌شود. پس از پیوستن رودخانه‌های نم‌رود، دره‌ده و دلیچای به حبله‌رود و عبور این رودخانه از روستای بنکوه، حبله‌رود وارد دشت گرمسار می‌شود. موقعیت مکانی حوضه‌ی آبریز حبله‌رود در ایران و استان تهران در شکل (۱) نمایش داده شده است.

به‌منظور دستیابی به داده‌های هواشناسی موردنیاز برای اجرای مدل‌ها، در حوضه‌ی آبریز حبله‌رود، ۱۰ ایستگاه هم‌دید، ۱۵ ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی، متعلق به سازمان هواشناسی و همچنین ۲۴ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی، متعلق به وزارت نیرو مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت با توجه موقعیت ایستگاه‌ها و کمیت و کیفیت آمار موجود مشخص شد که داده‌های مربوط به متغیرهای هواشناسی در سه ایستگاه هم‌دید (متعلق به سازمان هواشناسی) و داده‌های بارش در نه ایستگاه باران‌سنجی و دو ایستگاه تبخیرسنجی (هر ۱۱ ایستگاه متعلق به وزارت نیرو) قابل کاربرد است. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، آمار ماهانه‌ی دبی در ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام پردازش‌های مقدماتی لازم بر روی کلیه داده‌های موجود، آمار تمامی ایستگاه‌های مورد استفاده، برای سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ میلادی هم‌پایه شد که از سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶ به‌منظور واسنجی و از سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ به‌منظور اعتبارسنجی استفاده شد. موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده در این

یافت. با استفاده از مدل واسنجی‌شده‌ی SWAT و خروجی سه مدل گردش عمومی جو، (Palazzoli et al., 2015) عملکرد برنج، ذرت و گندم را برای دوره‌های ۲۰۵۴-۲۰۴۵ و ۲۰۹۴-۲۰۸۵ شبیه‌سازی کردند. در مطالعه‌ای دیگر در نپال، Devkota and Gyawali (2015) با استفاده از دو مدل PRECIS-HADCM3Q0 و PRECIS-ECHAM05 تحت سناریوی A1B و به کمک مدل SWAT، اثر تغییر اقلیم بر آینده‌ی یک حوضه آبریز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی به احتمال بسیار کم تهدیدی برای آب قابل‌دسترس در حوضه است و انتظار می‌رود جریان رودخانه با گذشت زمان، افزایش نیز یابد. رضایی‌زمان و افروزی (۱۳۹۴) خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 را با استفاده از Statistical DownScaling Model (SDSM) ریزمقیاس کرده و این داده‌ها را به عنوان ورودی به مدل SWAT معرفی کرده و عملکرد محصولات مختلف را در حوضه‌ی سیمینه‌رود برآورد کردند. نتایج نشان داد که مقدار تنش آبی در سناریوهای انتشار A2 و B2 به ترتیب ۱۷۴ و ۱۵۵ درصد افزایش خواهد یافت و بنابراین، این محققین الگوی کشت گندم و جو را به‌جای یونجه و چغندر قند پیشنهاد دادند. به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر آینده‌ی روزانه‌ی حوضه‌ای در میشیگان، Xu et al., (2017) حوضه را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کرده و بر مبنای نتایج حاصل از مدل، خطر سیلاب را ارزیابی کردند.

نکته‌ی قابل ذکر در مطالعات بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب این است که علی‌رغم اثبات وجود اثرات عمدتاً نامطلوب تغییر اقلیم بر توزیع مکانی و زمانی منابع آب، تصمیم‌سازان و مدیران منابع آب به‌ندرت نتایج حاصل از ارزیابی تغییر اقلیم را در نوع مدیریت و برنامه‌ریزی خود مورد استفاده قرار می‌دهند که این امر به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در نتایجی است که از ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حاصل می‌شود (Bae et al., 2011). به عنوان نمونه، Bastola et al., (2011) و Bosshard et al., (2013) نقش نوع مدل هیدرولوژیک مورداستفاده در شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب را در تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر آینده‌ی رودخانه مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که عدم قطعیت حاصل از انتخاب مدل، قابل صرف‌نظر کردن نیست. همچنین Bae et al., (2011) به بررسی نقش نوع مدل گردش عمومی جو و نوع روش مورد استفاده در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل‌های شبیه‌ساز بارش- رواناب پرداختند و عدم قطعیت حاصل را بسیار قابل‌ملاحظه گزارش کردند. بنابراین لازم است که موضوع عدم قطعیت نتایج یا به عبارت دیگر دامنه‌ی تغییرات احتمالاتی

تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است. میانگین سالانه بارش، دما و تبخیر- تعرق مرجع در ۱۴ ایستگاه هواشناسی و اطلاعات آبدهی در ایستگاه هیدرومتری، به ترتیب در جدول‌های (۱ و ۲) ارائه شده است.



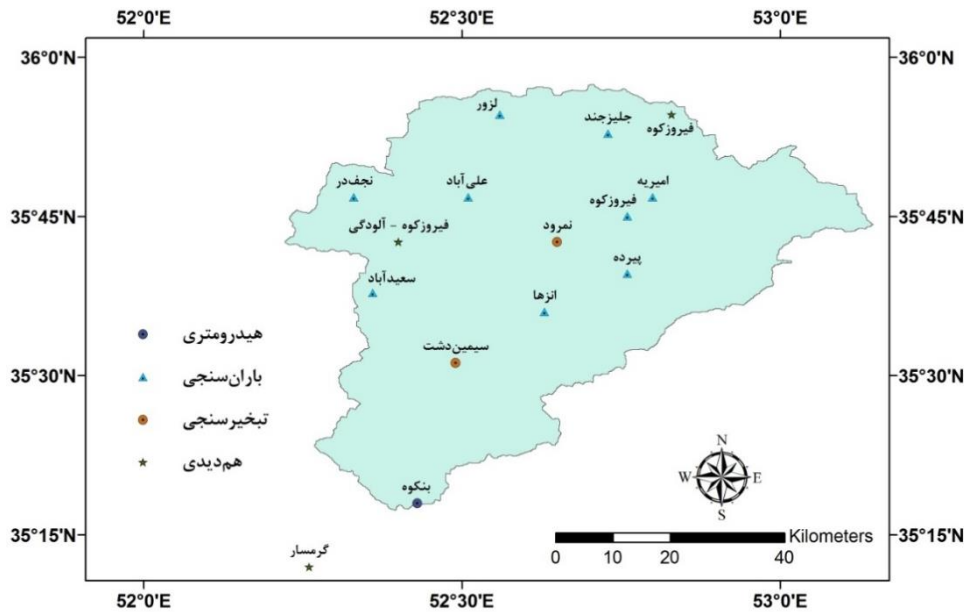
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز حبله‌رود در ایران و استان تهران

جدول ۱. میانگین سالانه‌ی بارش، دما و تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده‌ی طرح

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)	میانگین سالانه‌ی دما (°C)	تبخیر- تعرق مرجع (میلی‌متر در سال)
فیروزکوه	هم‌دید	۵۲/۸۳	۳۵/۹۲	۱۹۷۵	۳۶۰/۲	۸/۸	۱۳۱۴
فیروزکوه - آلودگی	هم‌دید	۵۲/۴۰	۳۵/۷۲	۲۹۸۶	۴۱۲/۹	۵/۰	۱۰۹۵
گرمسار	هم‌دید	۵۲/۳۵	۳۵/۲۳	۸۹۹	۱۲۶/۷	۱۸/۷	۱۷۱۶
فیروزکوه	باران‌سنجی	۵۲/۷۷	۳۵/۷۶	۱۹۵۰	۲۷۹/۵	۱۰/۲	۱۲۷۸
نمرود	تبخیرسنجی	۵۲/۶۶	۳۵/۷۲	۱۸۲۰	۳۲۱/۶	۶/۹	۱۲۷۸
انزها	باران‌سنجی	۵۲/۶۳	۳۵/۵۹	۱۶۶۵	۲۶۱/۵	۱۲/۰	۱۴۲۴
جلیزجند	باران‌سنجی	۵۲/۷۵	۳۵/۸۴	۲۱۶۰	۳۴۵/۱	۸/۹	۱۳۱۴
سیمین‌دشت	تبخیرسنجی	۵۲/۵۰	۳۵/۵۳	۱۴۹۵	۲۵۸/۰	۱۳/۳	۱۴۲۴
لژور	باران‌سنجی	۵۲/۵۶	۳۵/۸۷	۲۴۲۴	۴۴۳/۹	۷/۱	۱۰۵۹
نجف‌در	باران‌سنجی	۵۲/۳۸	۳۵/۷۹	۲۴۲۰	۴۴۴/۶	۷/۱	۱۰۵۹
علی‌آباد	باران‌سنجی	۵۲/۵۰	۳۵/۷۷	۲۱۵۰	۳۶۲/۷	۸/۹	۱۲۷۸
پیرده	باران‌سنجی	۵۲/۷۹	۳۵/۶۶	۲۲۵۰	۱۹۱/۴	۸/۳	۱۳۱۴
امیریه	باران‌سنجی	۵۲/۸۰	۳۵/۷۸	۱۹۹۵	۲۶۶/۸	۹/۹	۱۲۷۸
سعیدآباد	باران‌سنجی	۵۲/۳۸	۳۵/۶۴	۲۱۰۰	۳۲۷/۲	۹/۳	۱۳۱۴

جدول ۲. آبدهی سالانه و مشخصات مرتبط با آن در محل ایستگاه هیدرومتری بنکوه

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۱۳/۴۰	مساحت بالادست (کیلومتر مربع)	۳۲۶۱/۲	حداکثر آبدهی سالانه (مترمکعب در ثانیه)
۲/۷۲	میانگین درازمدت آبدهی سالانه (مترمکعب در ثانیه)	۷/۷۳	انحراف معیار (مترمکعب در ثانیه)
۰/۳۵	میانگین درازمدت آبدهی سالانه (میلیون مترمکعب)	۲۴۳/۸	ضریب تغییرات
۰/۳۰	آبدهی ویژه (لیتر دز ثانیه در کیلومتر مربع)	۲/۳۷	ضریب چولگی



شکل ۲. موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده

بزرگ‌مقیاس و پیش‌بینی‌شونده‌های ریزمقیاس است (Mahmood and Babel, 2014). در SDSM، ریزمقیاس‌سازی آماری متغیرهای هواشناسی طی مراحل کنترل کیفی و نرمال‌سازی داده‌ها، انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها، واسنجی توابع تجربی و تولید سری‌های زمانی ساختگی به انجام می‌رسد.

مدل هیدرولوژیک SWAT

مدل SWAT بر اساس تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌ها و تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها به بخش‌هایی یکپارچه تحت عنوان واحد پاسخ هیدرولوژیک (Hydrologic Response Unit - HRU) طراحی شده است. بخش‌هایی از زیرحوضه‌ها که دارای کاربری اراضی و نوع خاک مشابه بوده و تحت مدیریتی یکسان هستند به‌عنوان یک HRU در نظر گرفته می‌شوند. در مدل SWAT، چرخه‌ی هیدرولوژیک حوضه بر اساس معادله‌ی بیلان آب در واحدهای پاسخ هیدرولوژیک مدل‌سازی می‌شود. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

در این معادله، SW_t رطوبت خاک در روز t (میلی‌متر)، SW_0 رطوبت اولیه‌ی خاک (میلی‌متر)، t زمان (روز) و R_{day} ، Q_{gw} ، E_a ، Q_{surf} و W_{seep} (همگی بر حسب میلی‌متر) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق واقعی، جریان‌دهنده‌ی ریشه به منطقه‌ی غیراشباع وارد می‌شود و جریان پایه در روز i می‌باشند. اجزای معادله‌ی بیلان برای هر HRU و سپس برای هر زیرحوضه و در نهایت برای کل حوضه

اطلاعات مکانی مورد نیاز مدل SWAT که شامل مدل رقمی ارتفاعی (Digital Elevation Model - DEM)، نقشه‌ی کاربری اراضی و نقشه‌ی نوع خاک می‌باشند نیز تهیه شد. در این تحقیق از DEM با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. همچنین نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه از وزارت نیرو تهیه شد. نوع خاک یکی از تأثیرگذارترین عوامل در مدل‌سازی بارش-رواناب است و اطلاعات دقیق در این زمینه می‌تواند در دست‌یابی به شبیه‌سازی واقعی کمک شایانی نماید. با این وجود به دلیل تنوع نوع خاک در حوضه‌های آبریز بزرگ، معمولاً اطلاعات دقیقی در مورد این پارامتر در اختیار نیست. در مطالعه‌ی حاضر، نقشه‌ی جهانی خاک FAO/UNESCO که به‌سادگی در دسترس است مورد استفاده قرار گرفت و سعی شد تا با استفاده از این اطلاعات، مدل‌سازی قابل‌قبولی صورت گیرد.

مدل‌های آماری LARS-WG و SDSM

LARS-WG یک شبیه‌ساز متغیرهای هواشناسی است که مبتنی بر برآورد توزیع ناپارامتری و نیمه‌تجربی حاکم بر متغیرهاست (Semenov *et al.*, 1998). این مدل آماری که می‌توان از آن برای شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌شده و یا داده‌های آتی استفاده کرد، سری‌هایی ساختگی از متغیرهای تصادفی هواشناسی تولید می‌کند که ویژگی‌های آماری مشابهی با سری‌های زمانی مشاهده‌شده دارند. نسخه‌ی پنج از این مدل، مشتمل بر خروجی ۱۵ مدل گردش عمومی جو و سناریوهای گزارش ارزیابی چهارم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC 4AR) است. مدل آماری SDSM، ترکیبی از شبیه‌سازی آماری سری‌های زمانی و توابعی تجربی بین پیش‌بینی‌کننده‌های

مشخص کرد. در صورتی که اختلاف t -stat با صفر معنی‌دار باشد می‌توان گفت پارامتر موردنظر، تأثیری معنی‌دار بر خروجی مدل دارد. به عبارت دیگر، با انجام آزمون آماری t و بر مبنای p -value به دست آمده، مشخص می‌شود که نقش پارامتر موردنظر در بهبود نتایج مدل در چه حدی است. پارامترهایی که قدر مطلق t -stat بیشتر و p -value کمتری داشته باشند، به عنوان مهم‌ترین پارامترها انتخاب شده و در مرحله‌ی واسنجی مدل از آنها استفاده خواهد شد. مقادیر کم p -value به این معنی است که احتمال انتخاب نادرست یک پارامتر به عنوان پارامتر حساس، کمتر است. پس از انتخاب حساس‌ترین پارامترها، واسنجی مدل با هدف کوچک کردن بازه‌های ممکن برای هر پارامتر و یافتن بازه‌های بهینه (و نه یک مقدار قطعی بهینه برای هر پارامتر) انجام می‌شود. در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، با توجه به معیارهای آماری خطا می‌توان عملکرد مدل را مورد ارزیابی قرار داد. در این مطالعه از ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) استفاده شده است که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این معادلات، M_i و S_i به ترتیب دبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خروجی حوضه و n تعداد مشاهدات است. ضریب نش-ساتکلیف (NS) می‌تواند مقادیری بین منهای بی‌نهایت تا یک داشته باشد. مقدار بهینه این آماره یک است و مقادیر منفی آن بیان می‌کنند که استفاده از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، بهتر از استفاده از مدل و شبیه‌سازی متغیر موردنظر است. برای برآورد عدم قطعیت خروجی SWAT، Yang *et al.*, (2008) و Abbaspour *et al.*, (2007) مقادیر p -factor و d -factor را پیشنهاد کرده‌اند. این دو فاکتور، بر اساس باند عدم قطعیت خروجی مدل (95PPU) یا فاصله‌ی میان صدک ۲/۵ تا صدک ۹۷/۵ خروجی مدل تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است با توجه به این‌که پس از واسنجی، برای هر کدام از پارامترهای SWAT یک بازه‌ی بهینه (و نه یک مقدار قطعی

محاسبه می‌شوند. مبانی نظری و جزئیات مربوط به برآورد هر کدام از اجزای معادله‌ی بیلان، توسط Arnold *et al.*, (1998) ارائه شده است. برای اجرای ساده‌تر مدل، یک الحاقیه تحت عنوان ArcSWAT که به نرم‌افزار ArcGIS افزوده می‌شود نیز ارائه شده است که بدین ترتیب می‌توان برای مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز، از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره برد. در مطالعه‌ی حاضر، از ArcSWAT 10.3 و 2012.10.19 ArcGIS استفاده شده است.

مدل هیدرولوژیک SWAT از پارامترهای متعدد مرتبط با خاک حوضه، ویژگی‌های فیزیکی و کاربری اراضی حوضه، گیاه و جریان آب زیرسطحی برای برآورد اجزای معادله‌ی بیلان آب و نهایتاً برآورد رواناب خروجی از حوضه استفاده می‌کند. به منظور کاهش زمان واسنجی مدل، لازم است که حساسیت خروجی مدل نسبت به این پارامترها تحلیل شده و تنها مهم‌ترین پارامترها برای مرحله‌ی واسنجی انتخاب شوند. به عبارت دیگر، تحلیل حساسیت یکی از مراحل واسنجی مدل SWAT است. روش مورد استفاده برای انجام تحلیل حساسیت در این تحقیق مطابق با روش ارائه شده توسط Abbaspour *et al.*, (2007) است. در این روش، تحلیل حساسیت به این صورت انجام می‌شود که برای هر کدام از پارامترهای مدل، یک بازه از مقادیر ممکن تعیین می‌شود و با این فرض که مقادیر موجود در این بازه از یک تابع چگالی احتمال یکنواخت پیروی می‌کنند، برای هر پارامتر یک مقدار تصادفی از بازه انتخاب می‌شود. مدل با مقادیری که برای پارامترها انتخاب شده اجرا می‌شود و خطای آن محاسبه می‌شود (در مقاله‌ی حاضر، خطای مدل بر مبنای آبدهی شبیه‌سازی شده توسط مدل و آبدهی مشاهده شده در خروجی حوضه محاسبه شده است). با تغییر مقدار در نظر گرفته شده برای پارامتر و محاسبه‌ی مجدد خطای مدل، می‌توان یک معادله‌ی رگرسیونی چندمتغیره میان پارامترهای مدل به عنوان متغیرهای مستقل و خطای مدل به عنوان متغیر وابسته تشکیل داد. با توجه به تعدد پارامترهای مورد استفاده در SWAT، تعداد این متغیرهای مستقل می‌تواند بیش از ۵۰ عدد باشد. برای تغییر مقدار پارامترها، از دو روش تحت عناوین Replace و Multiple استفاده می‌شود. در روش Replace، مقدار اولیه‌ی پارامتر مورد نظر با مقدار جدید جایگزین می‌شود اما در روش Multiple، مقدار اولیه‌ی پارامتر در یک ضریب تعدیل ضرب می‌گردد. در معادله‌ی رگرسیونی چندمتغیره، برای هر پارامتر با تقسیم کردن ضریب پارامتر به انحراف معیار خطای مدل، مقداری تحت عنوان t -stat محاسبه می‌شود که می‌توان معنی‌دار بودن اختلاف آن با صفر را با استفاده از آزمون t

نتایج و بحث

مدل SWAT

همان‌گونه که ذکر شد، انتخاب حساس‌ترین (مهم‌ترین) پارامترها که اولین گام در واسنجی SWAT است بر مبنای t-stat و p-value هر پارامتر انجام می‌شود. در جدول (۳)، p-value و t-stat مربوط به مهم‌ترین پارامترها ارائه شده است. از میان تمامی پارامترهای مدل، پارامترهای ارائه شده در جدول (۳) پارامترهایی هستند که بیشترین تأثیر را بر دبی خروجی از حوضه‌ی حبله‌رود دارند. در این جدول، حرف r نشان‌دهنده‌ی روش Replace و حرف V نشان‌دهنده‌ی روش Multiple واسنجی است. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، ۱۰ پارامتر از میان پارامترهای مدل، به عنوان پارامترهایی که مورد واسنجی قرار خواهند گرفت انتخاب شده‌اند.

پس از واسنجی مدل و یافتن بازه‌های بهینه برای ۱۰ پارامتر ارائه شده در جدول (۱)، آماره‌های حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی SWAT، با استفاده از داده‌های مشاهده‌شده از آبدهی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه به دست آمد که نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است. در شکل (۳) نیز آبدهی مشاهده‌شده در خروجی حوضه و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT (بهترین شبیه‌سازی) در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی با یکدیگر مقایسه شده است.

بهینه) به دست می‌آید، خروجی مدل نیز نه یک مقدار قطعی بلکه بازه‌ای از مقادیر ممکن (95PPU) است. اولین فاکتور توصیف‌کننده‌ی عدم‌قطعیت (p-factor)، درصدی از n مقدار شبیه‌سازی‌شده است که در این دامنه قرار می‌گیرند و مقدار مطلوب آن ۱۰۰ درصد است. فاکتور دوم نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d\text{-factor} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{U,i} - S_{L,i})}{M_{sd}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

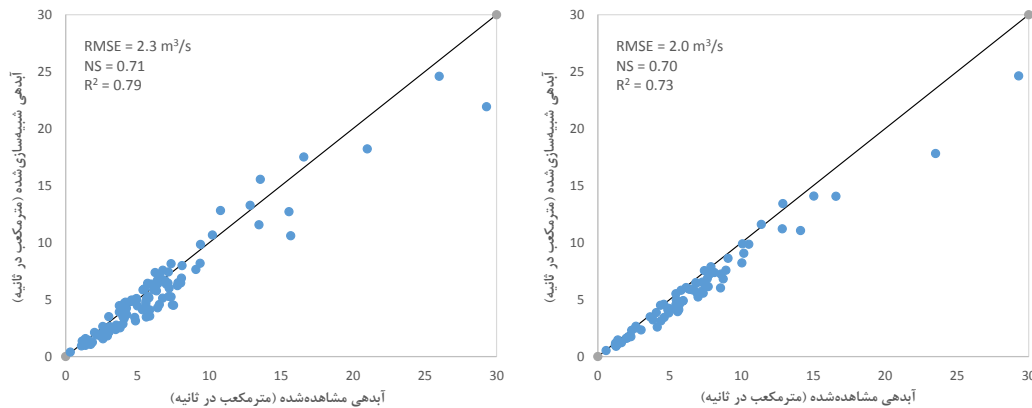
در این معادله، $S_{U,i}$ و $S_{L,i}$ به ترتیب صدک ۲/۵ و صدک ۹۷/۵ برای خروجی نام مدل و M_{sd} انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. نزدیک‌بودن d-factor به صفر، نشان‌دهنده‌ی عدم‌قطعیت کمتر در خروجی مدل است و بنابراین می‌توان نتایج حاصل از مدل را با اطمینان بیشتری به کار برد. لازم به ذکر است با نزدیک‌شدن d-factor به صفر، p-factor نیز کاهش می‌یابد و از مقدار مطلوب خود (۱۰۰ درصد) فاصله می‌گیرد. بنابراین در عمل بایستی بین p-factor و d-factor تعادلی مناسب برقرار کرد و به مقادیری بهینه دست یافت. در تحقیق حاضر، تحلیل حساسیت پارامترها، واسنجی SWAT و برآورد عدم‌قطعیت خروجی آن، با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP 5.1.6.2 و الگوریتم SUFI2 انجام شده است (Abbaspour et al., 2007).

جدول ۳. حساسیت پارامترهای استفاده‌شده برای واسنجی

ترتیب اهمیت	نام پارامتر در مدل	توصیف پارامتر و واحد آن	p-value	t-stat
۱	r_CN2.mgt	شماره‌ی منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط	۰/۰۰۰۱۲	-۴/۰۱
۲	r_SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر ساعت)	۰/۰۲۹	۲/۲۱
۳	V_ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک	۰/۲۴	-۱/۱۵
۴	V_ALPHA_BNK.rte	فاکتور آلفا (ضریب کاهش)، مربوط به جریان پایه (روز)	۰/۴۹	۰/۶۳
۵	V_SOL_BD.sol	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۵۶	۰/۵۷
۶	V_CH_K(2).rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبرفت آبراهه‌ی اصلی (میلی‌متر بر ساعت)	۰/۵۹	۰/۵۳
۷	r_SOL_AWC.sol	ظرفیت آب قابل‌دسترس در لایه‌ی خاک (میلی‌متر در میلی‌متر خاک)	۰/۶۳	-۰/۴۷
۸	V_CH_N(2).rte	ضریب زبری مانینگ برای آبراهه‌ی اصلی	۰/۶۵	-۰/۴۵
۹	V_GW_REVAP.gw	ضریب مربوط به حرکت آب از سفره‌ی کم‌عمق به لایه‌ی غیراشباع	۰/۶۶	-۰/۴۳
۱۰	V_SFTMP.bsn	دمای هوا در هنگام بارش برف (درجه سانتی‌گراد)	۰/۶۹	۰/۴

جدول ۴. نتایج مربوط به دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

مرحله	طول دوره‌ی آماری	R^2	NS (بدون بعد)	p-factor (بدون بعد)	d-factor (بدون بعد)	RMSE (m^3/s)
واسنجی	۱۰۸	۰/۷۹	۰/۷۱	۰/۴۴	۰/۴۹	۲/۳
اعتبارسنجی	۷۲	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۳۲	۰/۴۷	۲/۰



شکل ۳. مقایسه‌ی آبدهی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT در مراحل واسنجی (چپ) و اعتبارسنجی (راست)

کم‌بودن d-factor در این مطالعه، تا حد زیادی مقدار محاسبه‌شده برای p-factor را توجیه می‌کند و بنابراین در مجموع می‌توان گفت مدل هم در مرحله‌ی واسنجی و هم در مرحله‌ی اعتبارسنجی، از عدم قطعیت قابل‌قبولی برخوردار است. برای d-factor در مطالعه‌ی *Abbaspour et al.*, (2007) مقادیری بین ۰/۴۶ تا ۱/۵۰، در مطالعه‌ی *Rostamian et al.*, (2008) مقادیری بین ۰/۳۰ تا ۲/۰۴ و در مطالعه‌ی *Faramarzi et al.*, (2009) مقادیری بین ۰/۷۱ تا ۱/۴۰ گزارش شده است.

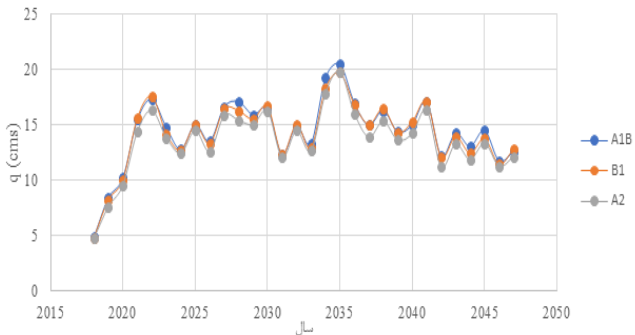
عدم قطعیت در شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر آبدهی حوضه
 با در اختیار داشتن مدل واسنجی‌شده‌ی SWAT در حوضه‌ی آبریز حبله‌رود، اثر تغییر اقلیم بر آبدهی حوضه، با استفاده از نتایج مدل گردش عمومی جو HADCM3 در دوره‌ی ۲۰۴۷-۲۰۱۸ مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجا که هدف، ارزیابی عدم قطعیت نتایج بوده است و نه ارائه‌ی یک نتیجه‌ی قطعی، دو مدل آماری ریزمقیاس‌ساز (LARS-WG و SDSM)، چهار سناریوی انتشار (A1B، A2، B1 و B2) و سه روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مدل SWAT (هارگریوز، پنمن-مانتیت، پریستلی-تیلور)، به عنوان عوامل تولیدکننده‌ی عدم قطعیت در نظر گرفته شدند و نتایج حاصل از ترکیب‌های مختلف از این عوامل (در مجموع ۱۵ ترکیب متفاوت) به دست آمد. یک نمونه از نتایج حاصل که مربوط به سه ترکیب مختلف است در شکل (۴) ارائه شده است.

شکل (۴) آبدهی شبیه‌سازی شده‌ی حوضه در دوره‌ی ۲۰۴۷-۲۰۱۸ را تحت سه سناریوی A1B، B1 و A2، در حالی که از مدل ریزمقیاس‌ساز LARS-WG و روش پریستلی-تیلور در برآورد تبخیر- تعرق مرجع استفاده شود نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، انتخاب سناریو، نوع مدل ریزمقیاس‌ساز و روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع می‌تواند بر

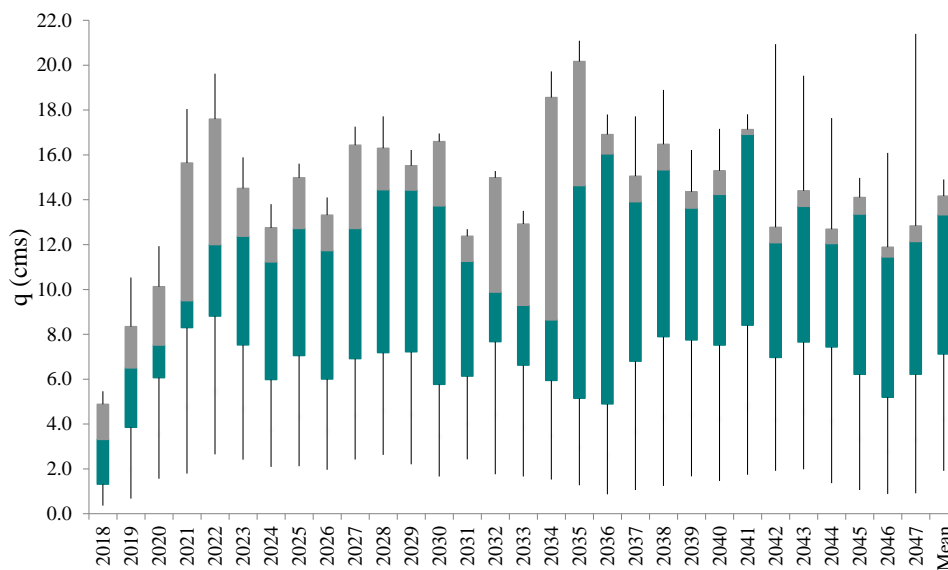
با توجه به مقادیر ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) در مرحله‌ی واسنجی و همچنین نمودار پراکنش نقاط نسبت به خط یک به یک (شکل ۳)، مشاهده می‌شود که مدل به خوبی واسنجی شده است. نزدیک‌بودن معیارهای آماری در هر دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی نیز حاکی از آن است که مدل به خوبی توانسته است فرآیندهای حاکم بر تبدیل بارش به رواناب در حوضه‌ی آبریز حبله‌رود را شبیه‌سازی نماید. کاهش مقدار MSE در مرحله‌ی اعتبارسنجی می‌تواند به دلیل کم‌تر بودن ماه‌های مورد استفاده در مرحله‌ی واسنجی باشد (۹ سال واسنجی و ۶ سال اعتبارسنجی). محققین در مطالعات پیشین، ضریب نش- ساتکلیف (NS) بیشتر از ۰/۷۵ را خوب، بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ را قابل‌قبول و مقادیر کمتر از ۰/۳۶ را غیرقابل‌پذیرش تفسیر می‌کنند. مقادیر ارائه‌شده برای ضریب نش- ساتکلیف در هر دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی، نشان‌دهنده‌ی عملکرد قابل‌قبول و نزدیک به خوب SWAT در حوضه‌ی آبریز حبله‌رود بوده است.

همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقادیر p-factor در مطالعه‌ی حاضر در دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب برابر با ۰/۴۴ و ۰/۳۲ به دست آمده‌اند. در مطالعات مشابه، *Abbaspour et al.*, (2007) مقادیر ۰/۷۲ تا ۰/۹۱، *Rostamian et al.*, (2008) مقادیر ۰/۳۱ تا ۰/۸۶ و *Faramarzi et al.*, (2009) نیز مقادیر ۰/۴۰ تا ۰/۸۸ را برای p-factor گزارش کرده‌اند. مشاهده می‌شود که مقدار محاسبه‌شده برای این ضریب بستگی زیادی به منطقه‌ی مطالعه‌شده دارد. نکته‌ی دیگری که بایستی در خصوص کم‌بودن مقدار p-factor در مرحله‌ی اعتبارسنجی به آن توجه نمود، کم‌بودن همزمان d-factor است که مقدار آن برابر با ۰/۴۷ به دست آمده است.

چارک اول و حداقل " و "یک و نیم برابر IQR" و داده‌های پرت (مقادیر بزرگ‌تر از $Q_3 + 1.5 \times IQR$ و یا کوچک‌تر از $Q_1 - 1.5 \times IQR$) نمایش داده می‌شوند (IQR دامنه‌ی میان‌چارکی یا تفاضل میان چارک سوم و چارک اول است). این نوع ترسیم داده‌ها، توزیع تجربی داده‌ها را به خوبی نمایش می‌دهد و اطلاعات مربوط به پراکندگی داده‌ها را به خوبی به صورت کیفی آشکار می‌سازد.



شکل ۴. شبیه‌سازی آبدهی حوضه در سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۷ (مدل LARS-WG و روش پرستلی-تیلور)



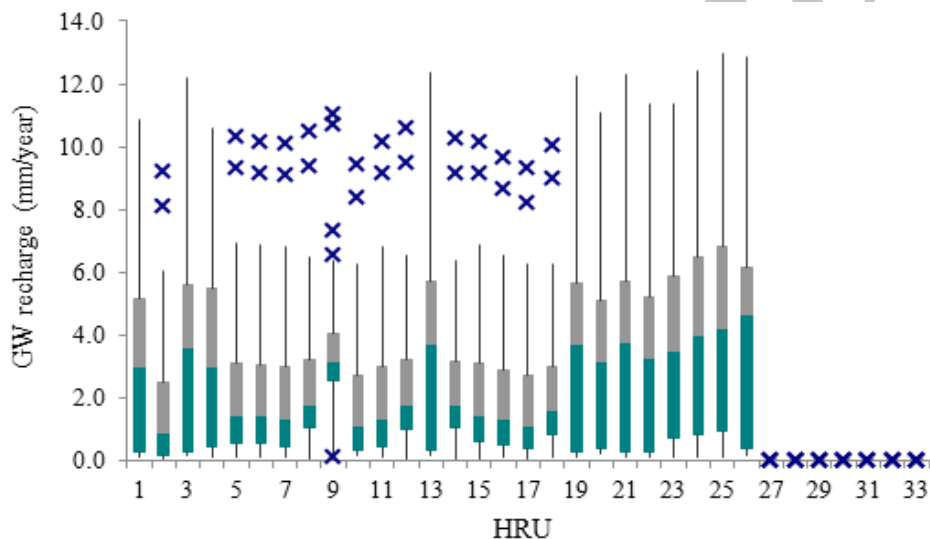
شکل ۵. عدم قطعیت در شبیه‌سازی آبدهی حوضه، تحت اثر تغییر اقلیم

دارند. مقایسه‌ی طول whiskerهای بالا و پایین نیز تأییدکننده‌ی این مطلب است. میانه‌ی آبدهی سالانه در تمامی ۱۵ ترکیب مورد بررسی، برابر با $13/32$ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد. بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که ترکیب‌هایی از عوامل مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع که میانه‌ی آبدهی سالانه‌ی حوضه را کمتر از این مقدار پیش‌بینی می‌کنند، نسبت به سایر ترکیب‌ها، عدم قطعیت بیشتری دارند.

آبدهی شبیه‌سازی‌شده تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر، به جای دراختیارداشتن یک مقدار قطعی برای آبدهی هر سال، بازه‌ای از نتایج ممکن را در اختیار خواهیم داشت. این بازه در برخی سال‌ها بزرگ و در برخی سال‌ها کوچک و قابل اغماض است. شکل (۴)، نتایج سه حالت از پانزده حالت مورد بررسی در این مقاله را نمایش می‌دهد و به منظور رعایت اختصار، نتایج سیزده حالت دیگر بدین شکل ارائه نشده‌اند. بدیهی است در صورتی که یک مدل ریزمقیاس‌ساز دیگر و یا روشی دیگر برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع به کار رود، نتایج دیگری حاصل خواهد شد که با توجه به ترکیب‌های مورد استفاده از مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش محاسبه‌ی تبخیر-تعرق مرجع، برای هر کدام از سال‌های دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۷، مقدار آبدهی شبیه‌سازی‌شده از آبدهی سالانه در اختیار بوده است که در شکل (۵) این مقادیر برای توصیف کیفی عدم قطعیت نتایج، به صورت box and whisker plot نمایش داده شده‌اند. در این نوع ترسیم داده‌ها، مقادیر چارک اول، میانه، چارک سوم، whisker بالا (حداقل مقدار میان "تفاضل حداکثر و چارک سوم" و "یک و نیم برابر IQR"، whisker پایین (حداقل مقدار میان "تفاضل

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در اغلب سال‌های دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۷ و همچنین در میانگین این دوره، توزیع مقادیر شبیه‌سازی‌شده دارای چولگی به سمت مقادیر کمتر از میانه است به‌نحوی که فاصله‌ی میان چارک اول و میانه، بیشتر از فاصله‌ی میان چارک سوم و میانه است. این بدان معنی است که بیشترین تفاوت در مقادیر شبیه‌سازی‌شده، در بخشی از داده‌ها که از میانه کوچک‌تر هستند وجود دارد و مقادیر بزرگ‌تر از میانه، سهم کمتری در ایجاد عدم قطعیت

به تفکیک هر کدام از واحدهای هیدرولوژیک ارائه شده است. این شکل بدین صورت ترسیم شده که برای هر کدام از واحدهای هیدرولوژیک، ۳۰ مقدار شبیه‌سازی شده (یک مقدار به عنوان میانگین سالانه برای هر کدام از سال‌های آماری در دوره‌ی ۲۰۴۷-۲۰۱۸) در اختیار بوده است که این ۳۰ مقدار به صورت box and whisker plot نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه واحدهای هیدرولوژیک ۲۷ تا ۳۳ در انتهای حوضه و در مجاورت کویر قرار می‌گیرند و میزان تبخیر-تعرق در آنها بالا و میزان بارندگی بسیار کم است، میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی در همه‌ی سال‌ها صفر و یا بسیار نزدیک به صفر شبیه‌سازی شده است.



شکل ۶. شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی در سال‌های ۲۰۴۷-۲۰۱۸ (مدل LARS-WG، روش پنمن-مانتیت، سناریوی B1)

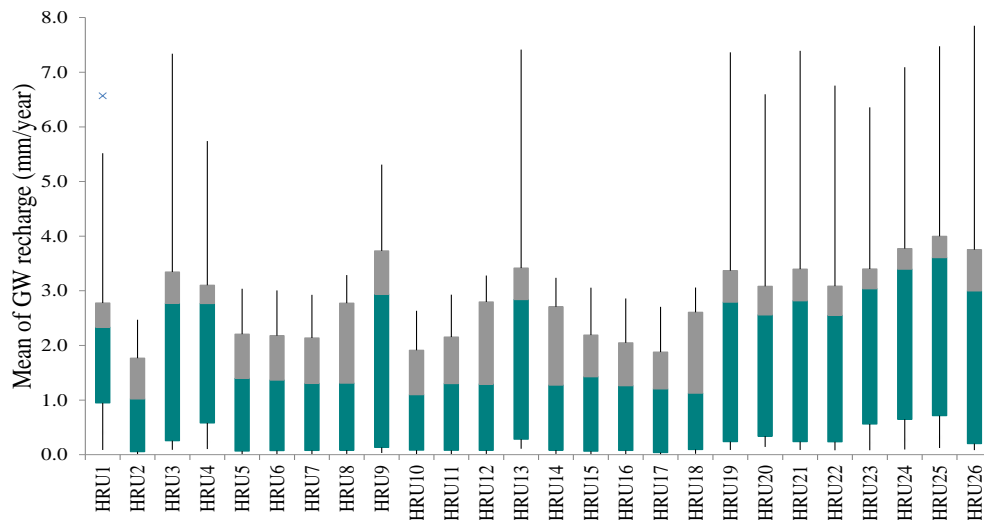
از مدل ریزمقیاس‌سازی، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مدل SWAT، ۱۵ مقدار مختلف برای هر واحد هیدرولوژیک دست آمد. مقادیر حاصل برای تمامی واحدهای هیدرولوژیک، به صورت box and whisker plot در شکل (۷) ترسیم شده‌اند.

با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت در تمامی واحدهای هیدرولوژیک، چولگی داده‌ها یا به سمت مقادیر کمتر از میانه بوده (به عنوان مثال واحدهای ۱۹ تا ۲۶) و یا داده‌ها فاقد چولگی بوده‌اند (به عنوان مثال واحدهای پنج تا هشت). میانه‌ی داده‌ها در شکل (۸) نمایش داده شده است. ترکیب‌هایی از عوامل مدل ریزمقیاس‌سازی، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع که میانه‌ی تغذیه‌ی آب زیرزمینی را در واحدهای دارای چولگی، بیشتر از میانه شبیه‌سازی می‌کنند، نسبت به سایر ترکیب‌ها عدم قطعیت کمتری دارند و در سایر واحدها، عدم قطعیت خروجی تمامی ترکیب‌ها را می‌توان یکسان در نظر گرفت.

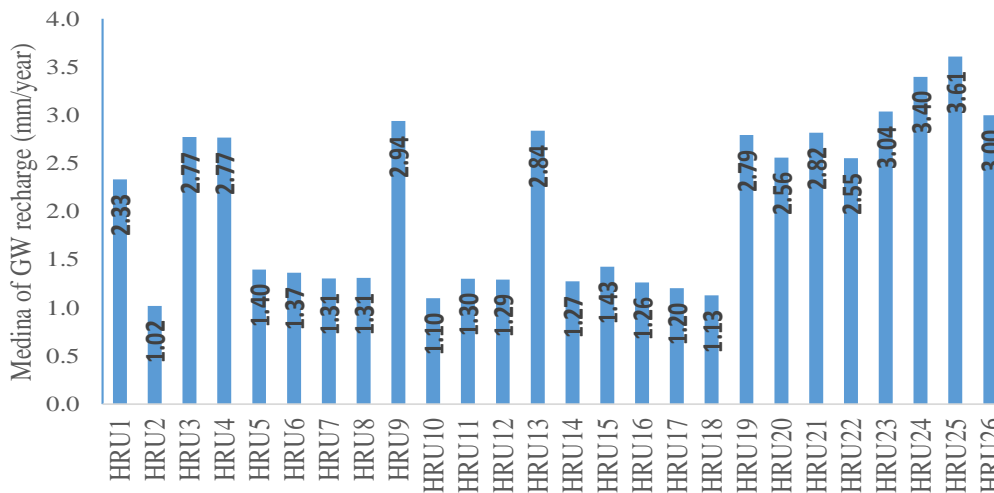
عدم قطعیت در شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر تغذیه‌ی آب زیرزمینی

در مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل SWAT، حوضه به ۳۳ واحد هیدرولوژیک تقسیم‌بندی شد. میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی در هر کدام از این واحدها، با استفاده از خروجی مدل HADCM3، دو مدل آماری ریزمقیاس‌سازی، چهار سناریوی انتشار و سه روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مدل SWAT، در دوره‌ی آتی ۲۰۴۷-۲۰۱۸ شبیه‌سازی شد. مشابه با شبیه‌سازی آبدهی، در مجموع ۱۵ ترکیب متفاوت از عوامل تولیدکننده‌ی عدم قطعیت در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از یکی از این ترکیب‌ها در شکل (۶) و

بر مبنای نتایج حاصل از تمامی ترکیب‌ها (به منظور رعایت اختصار، نتایج حاصل از ۱۴ ترکیب دیگر ارائه نشده و تنها به ارائه‌ی شکل (۶) اکتفا شده است) مشاهده شد در شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی، مدل ریزمقیاس‌سازی بیشترین تأثیر را بر نتایج دارد و سناریو و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مراحل بعدی قرار می‌گیرند. همچنین مشاهده شد در واحدهایی با میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی بیشتر، داده‌های پرت (outlier) کمتری وجود دارد. به عبارت دیگر، در واحد دو و واحدهای پنج تا ۱۸ که در مناطق مرتفع‌تر حوضه قرار دارند و به دلیل شیب زیاد، میزان نفوذ در آنها کم و میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی ناچیز است، سال‌هایی با تغذیه‌ی بیشتر از ۳ میلی‌متر، به دلیل خارج شدن از محدوده‌ی $Q_3 + 1.5 \times IQR$ ، به عنوان داده‌ی پرت در نظر گرفته شده و با علامت \times در نمودار نمایش داده شده‌اند. از ۳۰ مقدار به دست آمده برای هر کدام از واحدهای هیدرولوژیک میانگین‌گیری شد و متناظر با ۱۵ ترکیب مختلف



شکل ۷. عدم قطعیت در شبیه‌سازی میانگین تغذیه‌ی آب زیرزمینی در تمامی واحدهای هیدرولوژیک، تحت اثر تغییر اقلیم



شکل ۸. میانه‌ی تغذیه‌ی آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در تمامی واحدهای هیدرولوژیک

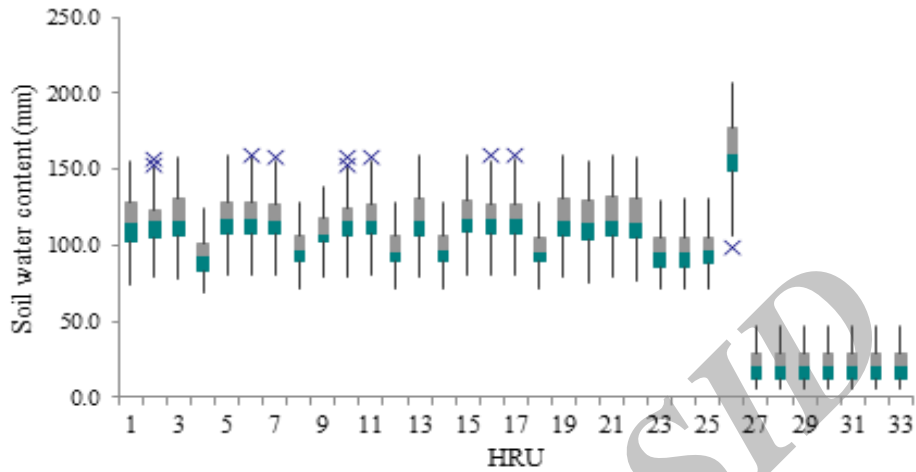
تغییر اقلیم بر رطوبت خاک در حوضه، کمتر از عدم قطعیت شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی بوده است. علاوه بر این، بر خلاف شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی رطوبت خاک در سال‌های مختلف، در تمامی واحدهای هیدرولوژیک، بیشتر از توزیع نرمال پیروی می‌کردند و فاقد چولگی بودند. لازم به ذکر است به منظور رعایت اختصار، از میان ۱۵ ترکیب مختلف، تنها نتایج مربوط به یکی از ترکیب‌ها (شکل ۹) ارائه شده است. در مورد رطوبت خاک نیز از ۳۰ مقدار به‌دست‌آمده برای هر کدام از واحدهای هیدرولوژیک میانگین‌گیری شد و متناظر با ۱۵ ترکیب مختلف از مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مدل SWAT، ۱۵ مقدار مختلف برای هر واحد هیدرولوژیک دست آمد. مقادیر حاصل برای تمامی واحدهای هیدرولوژیک، به‌صورت box and whisker plot در شکل (۱۰) ترسیم شده‌اند.

عدم قطعیت در شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر رطوبت خاک
 مشابه با نتایج مربوط به تغذیه‌ی آب زیرزمینی، رطوبت خاک نیز در هر کدام از ۳۳ واحد هیدرولوژیک با استفاده از خروجی مدل HADCM3، دو مدل آماری ریزمقیاس‌ساز، چهار سناریوی انتشار و سه روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع، در دوره‌ی آتی ۲۰۱۸-۲۰۴۷ شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از یکی از این ترکیب‌ها در شکل (۹) ارائه شده است. این شکل نیز همانند شکل (۶)، بر مبنای ۳۰ مقدار شبیه‌سازی شده در دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۷ ترسیم شده است.

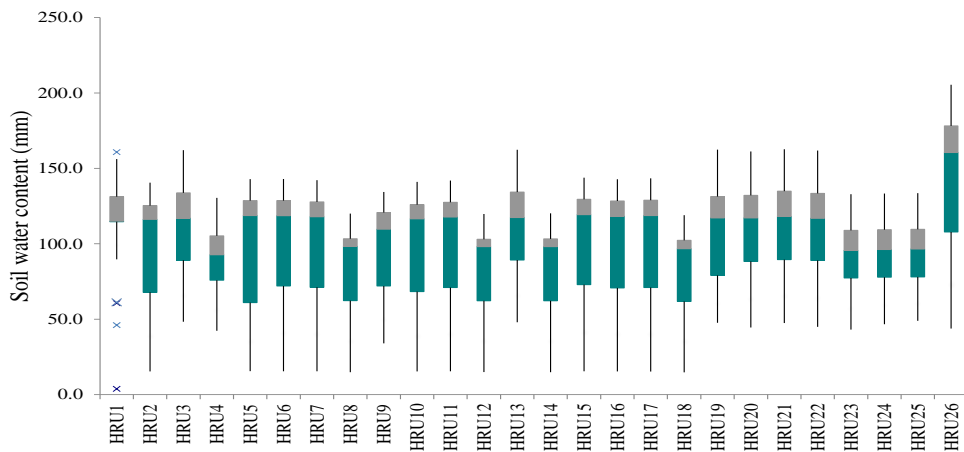
نتایج حاصل از تمامی ترکیب‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی رطوبت خاک نشان داد که تأثیر مدل ریزمقیاس‌ساز بر این متغیر، کمتر از تأثیر آن بر مقادیر شبیه‌سازی شده از تغذیه‌ی آب زیرزمینی است. همچنین مشاهده شد که در شبیه‌سازی رطوبت خاک، داده‌های پرت (outlier) بسیار کمتری تولید شده است. به عبارت دیگر، عدم قطعیت در شبیه‌سازی اثر

سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر- تفرق مرجع که میانه‌ی رطوبت خاک را بیشتر از میانه شبیه‌سازی می‌کنند، نسبت به سایر ترکیب‌ها عدم قطعیت کمتری دارند

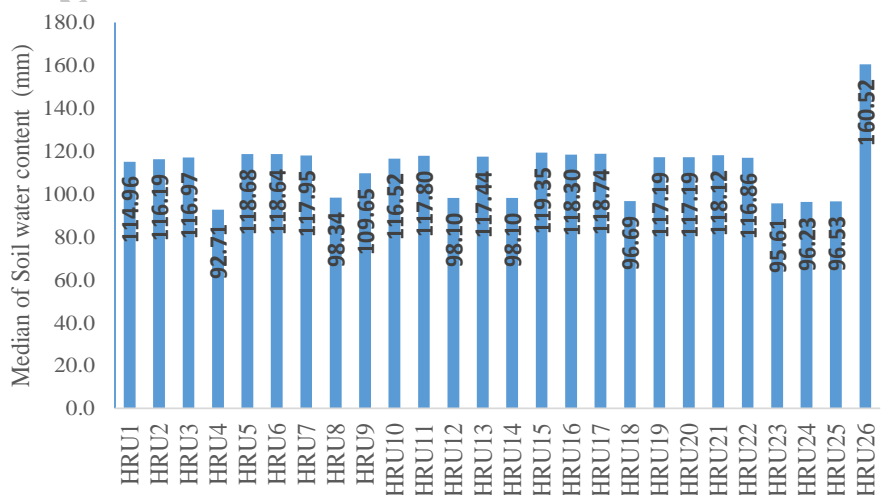
با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در بیشتر واحدهای هیدرولوژیک، چولگی داده‌ها به سمت مقادیر کمتر از میانه بوده است. میانه‌ی داده‌ها در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. می‌توان گفت ترکیب‌هایی از عوامل مدل ریزمقیاس‌سازی،



شکل ۹. شبیه‌سازی رطوبت خاک در سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۷ (مدل LARS-WG، روش هارگریوز، سناریوی B1)



شکل ۱۰. عدم قطعیت در شبیه‌سازی میانگین رطوبت خاک در تمامی واحدهای هیدرولوژیک، تحت اثر تغییر اقلیم



شکل ۱۱. میانه‌ی رطوبت خاک شبیه‌سازی شده در تمامی واحدهای هیدرولوژیک

نتیجه‌گیری کلی

قابل‌قبولی واسنجی شد و نتایج حاصل از آن در شبیه‌سازی آبدهی، تغذیه‌ی آب زیرزمینی و رطوبت خاک در سال‌های آتی مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۱۵ ترکیب مختلف از مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوی انتشار و روش برآورد تبخیر-تعرق در مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد نوع مدل ریزمقیاس‌ساز مورد استفاده، بیشترین تأثیر را بر شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم در منطقه‌ی مورد مطالعه دارد. همچنین در شبیه‌سازی تغذیه‌ی آب زیرزمینی، نسبت به دو متغیر آبدهی و رطوبت خاک، عدم‌قطعیت بسیار بیشتری مشاهده شد. با توجه به توزیع مقادیر حاصل از ۱۵ ترکیب مختلف، در مجموع مشخص شد ترکیب‌هایی که مقادیری کمتر از میانه برای متغیرهای موردنظر (آبدهی، تغذیه‌ی آب زیرزمینی و رطوبت خاک) شبیه‌سازی می‌کنند از عدم‌قطعیت بیشتری نسبت به سایر ترکیب‌ها برخوردار هستند.

علی‌رغم تحقیقات متعددی که در زمینه‌ی بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب انجام شده است، عدم‌قطعیت نتایج کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این نوع تحقیقات معمولاً یک مدل گردش عمومی جو و یا یک روش ریزمقیاس‌ساز، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل و یا روش معرفی می‌شوند اما بایستی توجه داشت که به دلیل ماهیت کاملاً تصادفی عوامل دخیل در تغییر اقلیم، نمی‌توان با قطعیت در مورد برتری یک مدل یا روش خاص اظهارنظر کرد. در مطالعه‌ی حاضر سعی شد تا نقش برخی عوامل تولیدکننده‌ی عدم‌قطعیت شامل مدل ریزمقیاس‌ساز، سناریوهای انتشار و ساختار مدل هیدرولوژیک مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله‌ی اول، اقدام به واسنجی مدل هیدرولوژیک SWAT در حوضه‌ی آبریز حبله‌رود شد. علی‌رغم نواقص موجود در آمار مشاهده‌شده از متغیرهای هواشناسی و آبدهی در حوضه، مدل هیدرولوژیک SWAT در حد

REFERENCES

- 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*. 1-16, 45.
- 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*. 413-430, 333.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 73-89, 34(a1).
- Bae, D. H., Jung, I. W. and Lettenmaier, D. (2011). Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*. 90-105, 401.
- Bastola, S., Murphy, C. and Sweeney, J. (2011). The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. *Water Resources Research*. 562-576, 34.
- Bosshard, T., Carambia, M., Goergen, K., Kotlarski, S., Krahe, P., Zappa, M. and Schar, C. (2013). Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Water Resources Research*. 1523-1536, 49.
- Devkota, L. P. and Gyawali, D. R. (2015). Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. *Journal of Hydrology*. 502-515, 4.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009). Modeling blue and green water availability in Iran. *Hydrological Processes*. 486-501, 23(3).
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Farzaneh, M. R., Zehnder, A. J. B. and Yang, H. (2013). Modelling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology*. 1-14, 250.
- IPCC. (2013). Summary for policymakers. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen and J. Boschung (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Mahmood, R. and Babel M. S. (2014). Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. *Weather and Climate Extremes*. 56-66, 5-6.
- Najafi, M. R., Moradkhani, H. and Wherry, S. A. (2011). Statistical downscaling of precipitation using machine learning with optimal predictor selection. *Journal of Hydrologic Engineering*. 650-664, 16(8).
- Palazzoli, I., Maskey, S., Uhlenbrook, S., Nana, E. and Bocchiola, D. (2015). Impact of prospective climate change on water resources and crop yields in the Indrawati basin, Nepal. *Agricultural Systems*. 143-157, 133.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A. and Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 977-988, 53(5).
- Xu, X., Wang, Y. C., Kalcic, M., Muenich, R. L., Yang, Y. C. E. and Scavia, D. (2017). Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-used watershed. *Environmental Modelling & Software*. In Press.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., Xia, J. and Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohu Basin in China. *Journal of Hydrology*. 1-23, 358.