

گزارش فنی

بررسی اثر تغییر اقلیم بر آبدهی حوزه آبخیز حبله رود

جابر صالح پور^۱، افشین اشرف زاده^{۲*} و سید علی موسوی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان و ^{۲،۳} استادیار، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۹

چکیده

در تحقیق حاضر، با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3، مدل ریزمقیاس ساز LARS-WG و مدل هیدرولوژیک SWAT، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر آبدهی حوزه آبخیز حبله رود پرداخته شده است. ابتدا به کمک مدل LARS-WG، خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ ریزمقیاس شد و داده‌های هواشناسی لازم برای مدل SWAT تهیه شد. نتایج ریزمقیاس سازی نشان داد که بارش در دوره آتی، اختلاف معنی داری با بارش در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۵) ندارد. همچنین، مشاهده شد که در سناریوهای انتشار A2، B1 و A1B، میانگین دمای کمینه، به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۴۷ و ۰/۴۳ و میانگین دمای بیشینه، به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۳۹ و ۰/۳۵ درجه سلسیوس افزایش خواهند یافت. در مرحله بعد، مدل SWAT با استفاده از داده‌های آبدهی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. مقادیر ضریب تبیین و نش-ساتکلیف در دوره اعتبارسنجی، به ترتیب برابر با ۰/۸۰ و ۰/۷۱ به دست آمدند. با معرفی بارش و دمای ریزمقیاس شده به مدل SWAT، تغییرات رواناب خروجی از حوضه طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ شبیه سازی شد. نتایج نشان از افزایش ۱۰/۶۶، ۱۷/۷۲ و ۱۷/۵۲ درصدی آبدهی سالانه در سه سناریوی مورد بررسی، نسبت به دوره پایه داشت.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هیدرومتری بنکوه، تحلیل حساسیت، ریزمقیاس سازی، مدل گردش عمومی جو، مدل SWAT-CUP

مقدمه

سیل، تغییر توزیع مکانی و زمانی بارندگی و تغییر در نوع و رژیم بارش در حوضه‌ها می‌باشد. تغییر اقلیم باعث برهم خوردن تعادل هیدرولوژی در حوضه‌ها شده و به طور مستقیم بر منابع آبی حوضه اثر می‌گذارد (Pachauri و همکاران، ۲۰۱۴). شدت و نوع این تاثیرات از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است، به گونه‌ای که در برخی مناطق، مقادیر بارندگی و دما افزایش و در برخی مناطق، همچون مناطقی با اقلیم مدیترانه‌ای، مقدار بارندگی کاهش و دما افزایش می‌یابد. تغییر در بارش و درجه حرارت، در نهایت منجر

تغییر معنی‌دار در مقادیر مشاهده شده از متغیرهای هواشناسی در یک دوره زمانی معین و در یک مکان یا ناحیه خاص، تغییر اقلیم نامیده می‌شود (Mahdizadeh و همکاران، ۲۰۱۱). افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات متغیرهای اقلیمی، اثرات منفی گسترده‌ای را تقریباً در تمامی مناطق کره زمین بر منابع آب، محیط زیست، کشاورزی، صنعت و بهداشت گذاشته است. بارزترین اثرات تغییر اقلیم، افزایش متوسط دمای کره زمین، وقوع بیشتر خشکسالی و

کاهش مقیاس را مبتنی بر سابقه آماری پیش‌گوهای بزرگ مقیاس و پیش‌بینی شونده‌های موضعی پایه‌ریزی می‌کند. برتری اصلی این مدل و دلیل انتخاب آن در این پژوهش، اقتصادی بودن، سادگی و سرعت بالای آن در فرایند ریزمقیاس سازی است. مدل LARS-WG امکان استفاده از خروجی چندین مدل گردش عمومی جو را فراهم کرده است که در این مطالعه از مدل HADCM3 استفاده شده است. مدل‌های GCM موجود، به سه نوع گردش عمومی جو (Atmospheric GCM-AGCM)، گردش عمومی اقیانوس (Oceanic GCM-OGCM) و گردش عمومی جو-اقیانوس (AOGCM) تقسیم‌بندی می‌شوند. در حال حاضر مدل‌های سه‌بعدی AOGCM یکی از معتبرترین ابزارها برای تولید سناریوهای اقلیمی هستند (Salahi و همکاران، ۲۰۱۶). مدل HadCM3 یکی از پرکاربردترین و مقبول‌ترین مدل‌های AOGCM به‌خصوص در ایران است که دقت بالای آن در پیش‌بینی‌های اقلیمی، مورد تأیید بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته (Rezaei و همکاران، ۲۰۱۴؛ Naderi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tavangar و همکاران، ۲۰۱۶؛ Taei Semiromi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ghermezcheshmeh و همکاران، ۲۰۱۴؛ Bahri و همکاران، ۲۰۱۵)، لذا، در این تحقیق نیز از این مدل استفاده شده است. قابلیت مدل LARS-WG در ریزمقیاس سازی متغیرهای دما و بارش به‌وسیله پژوهشگران مختلف ارزیابی شده که به‌عنوان نمونه می‌توان به این موارد اشاره کرد. Tramblay و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های رگبارها در مراکش پرداختند. ریزمقیاس سازی با استفاده از مدل LARS-WG نشان داد که در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰، ارتفاع بارش به‌طور میانگین ۱۲ درصد کاهش خواهد یافت. Ashraf و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ریزمقیاس سازی خروجی مدل HADCM3 با مدل LARS-WG، به تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی طبق سه سناریوی A1B، A2 و B1 در استان خراسان رضوی پرداختند. نتایج نشان داد که شرایط اقلیمی استان در طی ۲۰ سال آتی تفاوت محسوسی با شرایط فعلی خواهد داشت. Semenov (۲۰۰۸) در تحقیقی با استفاده از آمار و اطلاعات ۲۰ ایستگاه در

به تغییر در رواناب و موجودیت آب در حوضه‌ها می‌شود.

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم روش‌های مختلفی وجود دارد که معتبرترین آن‌ها استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (General Circulation Models-GCMs) است. مدل‌های GCM برای ارزیابی تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند و همه عوامل اقلیمی شایان توجه در آن‌ها منظور شده است. این مدل‌ها مبتنی بر قوانین اساسی فیزیکی حاکم بر جو و اقیانوس هستند و رفتار فیزیکی سامانه زمین-جو-اقیانوس را به شکل ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند. یکی از ضعف‌های مدل‌های گردش عمومی جو، پایین بودن دقت مکانی این مدل‌ها است. بنابراین، بایستی با استفاده از روش‌های ریزمقیاس سازی، دقت خروجی این مدل‌ها را بالا برد و خروجی‌های مناسب در مقیاس حوزه آبخیز را به‌دست آورد (Graham و همکاران، ۲۰۰۷). از جمله روش‌هایی که برای ریزمقیاس سازی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو استفاده می‌شود، می‌توان به روش‌های آماری و دینامیک اشاره کرد. روش‌های دینامیک، روش‌هایی پیچیده و پرهزینه هستند و ریزمقیاس سازی با آن‌ها مستلزم در اختیار داشتن سامانه‌های پردازشی پرسرعت و صرف وقت زیاد است (Hadinia و همکاران، ۲۰۱۶). به‌طور مثال، مدل‌سازی یک دوره ده ساله در محدوده ایران با رایانه‌های معمولی، حدود سه ماه زمان نیاز دارد. از این‌رو، امکان دسترسی و استفاده آسان از روش‌های دینامیک برای همه پژوهشگران وجود ندارد. استفاده از روش‌های آماری به سبب اقتصادی بودن، سادگی و سرعت بالا در ریزمقیاس سازی ناحیه‌ای، به‌خصوص زمانی که نیاز به ارزیابی سریع و با هزینه کمتر مدنظر است، نسبت به روش‌های دینامیک ارجح بوده، این روش‌ها کارایی بهتری دارند (Salahi و همکاران، ۲۰۱۶). معتبرترین ابزار برای ریزمقیاس سازی داده‌های خروجی یک مدل گردش عمومی جو در ایران، استفاده از روش‌های ریزمقیاس سازی آماری است که بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است (Goudarzi و همکاران، ۲۰۱۵).

مدل LARS-WG که یک مدل آماری است،

نقاط گوناگون دنیا با اقلیم‌های متفاوت، توانایی مدل LARS-WG را برای شبیه‌سازی رویدادهای جوی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که میانگین دمای بیشینه سالانه و مقادیر دوره بازگشت بارندگی‌های روزانه، در درون فواصل اطمینان ۹۵ درصد داده‌های مشاهداتی قرار گرفته‌اند، اما داده‌های دمای بیشینه روزانه با دقت کمتری تولید می‌شوند. Alison و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب در انگلستان با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و سناریوی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با توجه به کاهش میانگین سالانه بارش در بیشتر حوضه‌ها، تناوب سیلاب افزایش خواهد یافت.

از مهمترین اثرات تغییر اقلیم می‌توان به تغییرات آبدهی رودخانه‌ها اشاره کرد. مدل‌های گردش عمومی جو قادرند متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش را برای آینده، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی شبیه‌سازی کنند. اما برای شبیه‌سازی آبدهی رودخانه‌ها می‌بایست از مدل‌های بارش-رواناب استفاده کرد که در این پژوهش از مدل هیدرولوژیک SWAT استفاده شده است. مدل SWAT یا ابزار ارزیابی آب و خاک، یک مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی با پایه فیزیکی است که برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری اراضی، تغییر اقلیم و تغییر مدیریت، بر آبدهی و وضعیت کیفی رودخانه‌های حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده ارائه شده است. مطالعات متعددی در سراسر جهان قابلیت بالای این مدل را به اثبات رسانده است. Havrylenko و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل SWAT به مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک در حوضه‌ای در آرژانتین پرداختند. آماره‌های ارزیابی نشان دادند که SWAT، ابزاری مناسب برای تخمین مقدار آب موجود در خاک در مناطقی با اطلاعات و داده‌های ناکافی است. Vaghefi و همکاران (۲۰۱۵) برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت بر تولیدات کشاورزی، از ترکیب دو مدل SWAT و MODSIM استفاده کردند. نتایج نشان داد که تغییر الگوی کشت می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری مؤثر به‌منظور مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. Vilaysane و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از SWAT، به مدل‌سازی جریان خروجی از حوضه‌ای در کشور لائوس پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل، ابزاری مناسب و قابل اعتماد برای بررسی اثر تغییر در کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر کیفیت آب و رسوب حوضه است. Abbaspour و همکاران (۲۰۰۹) برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر کمیت منابع آب ایران از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها افزایش شدت بارش روزانه و فراوانی سیلاب‌های شدید در مناطق مرطوب ایران و خشکسالی‌های طولانی‌تر در مناطق خشک را نشان داد. Ficklin و همکاران (۲۰۰۹) از مدل SWAT برای مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم در حوضه‌هایی با کاربری اراضی عمدتاً کشاورزی در کالیفرنیا استفاده کردند. آماره‌های ارزیابی گزارش شده، نشان‌دهنده توانایی بالای مدل SWAT بود. نتایج این پژوهش نشان داد که چرخه هیدرولوژی در این منطقه به تغییرات اقلیم بسیار حساس بوده، تغییر در مقدار بارش، درجه حرارت و CO₂، اثرات قابل توجهی بر تبخیر، مصرف آب، آبدهی رودخانه و کارایی مصرف آب دارد. Zare Garizi و همکاران (۲۰۱۷) به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوضه قره‌سو در استان گلستان و شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب از مدل SWAT استفاده کردند. Hosseini و Mokarian (۲۰۱۶) SWAT را به‌منظور شبیه‌سازی بیلان آب و برآورد میزان جریان زیرزمینی در حوضه گل‌گل در استان ایلام مورد استفاده قرار دادند. Erfanian و همکاران (۲۰۱۵) نیز به‌منظور شبیه‌سازی آبدهی ماهانه و رسوب در حوزه آبخیز نازلوچای واقع در غرب دریاچه ارومیه و شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی تولید رسوب، از مدل SWAT استفاده کردند.

در مطالعه حاضر، تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای دما، بارش و رواناب در حوضه حبله‌رود واقع در شرق استان تهران شبیه‌سازی شده است. بدین منظور، خروجی مدل HadCM3 تحت سه سناریوی A1، A2، B1 و A1B، برای دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس شد و سپس جریان رودخانه اصلی حوضه با استفاده از مدل هیدرولوژیک SWAT شبیه‌سازی شد و اثر تغییر اقلیم بر آن بررسی شد.

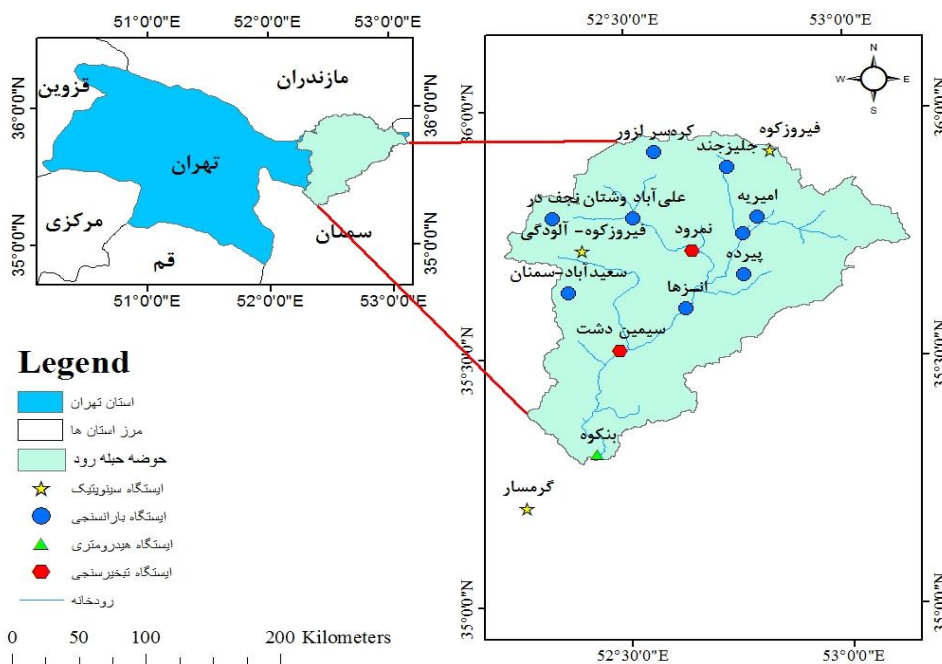
نقاط گوناگون دنیا با اقلیم‌های متفاوت، توانایی مدل LARS-WG را برای شبیه‌سازی رویدادهای جوی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که میانگین دمای بیشینه سالانه و مقادیر دوره بازگشت بارندگی‌های روزانه، در درون فواصل اطمینان ۹۵ درصد داده‌های مشاهداتی قرار گرفته‌اند، اما داده‌های دمای بیشینه روزانه با دقت کمتری تولید می‌شوند. Alison و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب در انگلستان با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و سناریوی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با توجه به کاهش میانگین سالانه بارش در بیشتر حوضه‌ها، تناوب سیلاب افزایش خواهد یافت.

از مهمترین اثرات تغییر اقلیم می‌توان به تغییرات آبدهی رودخانه‌ها اشاره کرد. مدل‌های گردش عمومی جو قادرند متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش را برای آینده، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی شبیه‌سازی کنند. اما برای شبیه‌سازی آبدهی رودخانه‌ها می‌بایست از مدل‌های بارش-رواناب استفاده کرد که در این پژوهش از مدل هیدرولوژیک SWAT استفاده شده است. مدل SWAT یا ابزار ارزیابی آب و خاک، یک مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی با پایه فیزیکی است که برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری اراضی، تغییر اقلیم و تغییر مدیریت، بر آبدهی و وضعیت کیفی رودخانه‌های حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده ارائه شده است. مطالعات متعددی در سراسر جهان قابلیت بالای این مدل را به اثبات رسانده است. Havrylenko و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل SWAT به مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک در حوضه‌ای در آرژانتین پرداختند. آماره‌های ارزیابی نشان دادند که SWAT، ابزاری مناسب برای تخمین مقدار آب موجود در خاک در مناطقی با اطلاعات و داده‌های ناکافی است. Vaghefi و همکاران (۲۰۱۵) برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت بر تولیدات کشاورزی، از ترکیب دو مدل SWAT و MODSIM استفاده کردند. نتایج نشان داد که تغییر الگوی کشت می‌تواند به‌عنوان راه‌کاری مؤثر به‌منظور مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. Vilaysane و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از SWAT، به مدل‌سازی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز حبله‌رود به‌عنوان بخشی از حوزه آبخیز کویر مرکزی ایران، با مساحت ۳۲۶۱/۹ کیلومتر مربع و با کمینه ارتفاع ۹۸۵ متر و بیشینه ارتفاع ۴۰۵۷ متر از سطح دریا، 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. این حوزه در محدوده جغرافیایی ۲۰' ۵۲° تا ۱۰' ۵۳° طول شرقی و ۱۷' ۳۵° تا ۵۹' ۳۵° عرض شمالی واقع شده است.

حبله‌رود رودخانه اصلی این حوزه آبخیز است که از ارتفاعات شمالی حوضه سرچشمه می‌گیرد و در جهت عمومی شمال شرق به جنوب غرب جریان دارد. این رودخانه از طریق به‌هم پیوستن دو شاخه گورسفید و فیروزکوه در بالادست حوضه، در شهرستان فیروزکوه شکل گرفته و در نهایت، پس از دریافت شاخه‌های نمرود، درده و دلیچای و عبور این رودخانه از روستای بنکوه، وارد دشت گرمسار می‌شود. موقعیت جغرافیایی حوضه، مسیر رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



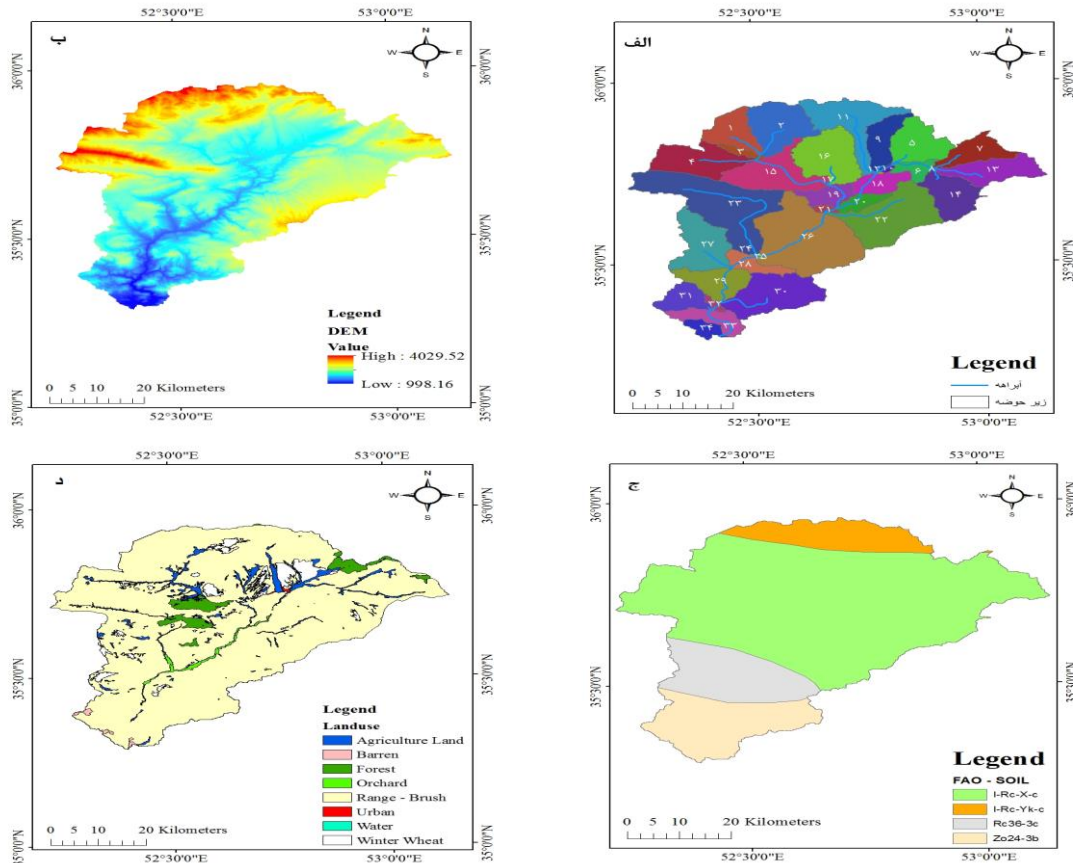
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز حبله‌رود و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده

همچنین، با توجه به اطلاعات مورد نیاز مدل SWAT، در این تحقیق برای تولید شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها (شکل ۲- الف) از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه سلولی ۳۰ متر (شکل ۲- ب) و برای تقسیم‌بندی حوضه به مناطق همگن از نقشه خاک (شکل ۲- ج) و نقشه کاربری اراضی (شکل ۲- د) استفاده شد (جدول ۱ و شکل ۲). آمار ماهانه آبدی در ایستگاه هیدرومتری بنکوه در خروجی حوضه در دوره آماری ۲۰۱۲-۱۹۹۸ نیز به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد.

داده‌های مورد نیاز: در این مطالعه از داده‌های بارش روزانه دو ایستگاه تخیرسنجی و نه ایستگاه باران‌سنجی و نیز از مقادیر روزانه داده‌های بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی سه ایستگاه سینوتیک فیروزکوه، فیروزکوه- آلودگی و گرمسار، در دوره آماری ۲۰۱۲-۱۹۹۵ استفاده شد. این دوره آماری با توجه به سال افتتاح ایستگاه‌ها و آخرین اطلاعات آماری در دسترس و لزوم هم‌پایه بودن زمانی کلیه داده‌های ورودی به مدل SWAT انتخاب شده است. دوره آماری ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نیز به‌عنوان دوره آتی شبیه‌سازی مدنظر قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات انواع خاک‌های موجود در نقشه خاک حوضه

نام خاک در مدل SWAT	نوع خاک	گروه هیدرولوژیکی	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	مساحت (درصد)
I-Rc-X-c-3119	LOAM	D	۴۰	۳۶	۲۴	۸/۲۸
Rc36-3c-3256	LOAM	D	۲۹	۴۶	۲۵	۶۷/۳۱
I-Rc-Yk-c-3509	LOAM	D	۳۵	۳۹	۲۶	۱۱/۷۰
Zo24-3b-3629	CLAY	D	۲۰	۳۹	۴۱	۱۲/۷۱



شکل ۲- (الف) نقشه زیرحوضه‌ها، (ب) نقشه DEM، (ج) نقشه خاک، (د) نقشه کاربری اراضی در مدل SWAT

می‌شوند. در مدل HadCM3، قدرت تفکیک جوی، شبکه‌ای با ابعاد ۲/۷۵ درجه عرض و ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی و قدرت تفکیک اقیانوسی، ۱/۲۵ درجه طول جغرافیایی است. مدل LARS-WG که با استفاده از آن می‌توان خروجی HadCM3 را ریزمقیاس کرد، یک مولد داده‌های اقلیمی است که برای تولید سری‌های زمانی روزانه از دمای کمینه و بیشینه، بارندگی، تابش خورشید و تبخیر-تعرق مرجع در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. اولین نسخه از مدل LARS-WG در بوداپست مجارستان در سال ۱۹۹۰ برای ارزیابی ریسک کشاورزی توسعه یافت و سپس در سال ۱۹۹۸ بازنگری

پیش‌بینی داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای تغییر اقلیم: مدل گردش عمومی جو HadCM3 به‌وسیله مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیمی Hadley در بریتانیا طراحی شده و یک مدل جو-اقیانوسی (AOGCM) است که از دو بخش جوی و اقیانوسی به نام‌های HadAM3 (مدل جوی) و HadOM3 (مدل اقیانوسی) تشکیل شده است (Bahri و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های GCM، جو و اقیانوس را به شبکه‌ای از عناصر حجمی تقسیم می‌کنند. اندازه این عناصر حجمی، قدرت تفکیک مدل را مشخص می‌کند. در هر یک از این احجام، معادلات تبادل انرژی و تکانه (Momentum) و معادلات بقای جرم و بخار آب حل

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (4)$$

که در آن‌ها، Q نشان‌دهنده متغیر اقلیمی، زیرنویس m نشان‌دهنده مقدار مشاهده شده، زیرنویس s نشان‌دهنده مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. در ادامه، برای ارزیابی نوسانات اقلیمی در حوضه حبله‌رود، مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌سازی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و تولید داده‌های مصنوعی با استفاده از سناریوهای A1B، A2 و B1 اجرا شد و بدین ترتیب مقادیر روزانه متغیرهای مورد نظر برای دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) تولید شدند.

شبیه‌سازی آبدی به‌وسیله مدل SWAT: پس از وارد کردن اطلاعات ارتفاعی، خاک و کاربری اراضی حوضه، زیرحوضه‌ها و مسیر جریان در SWAT مشخص می‌شود (شکل ۲). برای معرفی شیب حوضه از طبقه شیب پیشنهادی در روش SCS استفاده شد. مدل بر اساس خصوصیات هیدرولوژیک، حوضه را به بخش‌هایی تحت عنوان واحدهای پاسخ هیدرولوژیک^۳ (HRU) تقسیم‌بندی می‌کند. هر زیرحوضه از تعدادی HRU تشکیل شده است که دارای ویژگی‌های کاربری اراضی، مدیریت و خاک منحصر به فرد هستند. در SWAT با استفاده از دو روش می‌توان رواناب سطحی را برای هر HRU شبیه‌سازی کرد. روش اول، روش شماره منحنی اصلاح‌شده و روش دوم، روش نفوذ گرین-امپت است که در این پژوهش، از روش اول استفاده شده است.

در این پژوهش، برای واسنجی مدل SWAT از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. SWAT-CUP یک برنامه رایانه‌ای برای انجام تحلیل حساسیت و واسنجی خودکار مدل SWAT است که در سال ۲۰۰۹ توسعه پیدا کرده است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۹). این برنامه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی

و تعدیل شد. سناریوهای تغییر اقلیم مورد استفاده در مدل LARS-WG از سری سناریوهای SRES^۱ هستند. SRES گزارش ویژه‌ای است که به‌وسیله هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۲ (IPCC) در سال ۲۰۰۰ میلادی منتشر شده است. سناریوهای این گزارش، تصویری از جهان پس از وقوع تغییر اقلیم ارائه می‌کنند. مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی و تولید داده‌های اقلیمی از سه سناریوی A1B، A2 و B1. به‌ترتیب به‌عنوان نماینده دیدگاه بدبینانه، متوسط و خوش‌بینانه استفاده می‌کند. A1B توصیفی است از جهانی با رشد سریع اقتصادی و فناوری‌های نوین که بیشینه رشد جمعیت در آن، در نیمه قرن به‌وقوع می‌پیوندد. سناریوی A2 توصیفی از جهانی بسیار ناهمگن است که در آن، به‌طور مداوم با رشد سریع جمعیت، اقتصادی ناهمگن و هم‌سو با شرایط منطقه‌ای در سراسر جهان ایجاد خواهد شد. سناریوی B1 نیز توصیفی از هم‌گرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصادی، کاهش مواد آلاینده و معرفی فناوری پاک است (Hadinia و همکاران، ۲۰۱۶). در مدل LARS-WG فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی در سه بخش کلی انجام می‌گیرد، ۱- واسنجی مدل، ۲- ارزیابی مدل و ۳- تولید و شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های آینده. بر این اساس، برای اجرای مدل در تحقیق حاضر، پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۵) اجرا شد. در این مرحله به‌منظور ارزیابی دقت مدل در تولید متغیرهای اقلیمی، از چهار شاخص ضریب تبیین (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین اربیبی (MBE) استفاده شد که به‌ترتیب به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})}{n} \quad (2)$$

¹ Special Report on Emission Scenarios

² Intergovernmental Panel on Climate Change

³ Hydrologic Response Unit

SWAT واسنجی شده معرفی شده و با اجرای مجدد مدل، آبدهی حوضه تحت اثر تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

نتایج مدل LARS-WG در شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌سازی دما و بارندگی حوضه: بر اساس نتایج حاصل از مدل LARS-WG در مرحله ارزیابی، شبیه‌سازی دمای کمینه و بیشینه در هر سه ایستگاه با ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین (R^2) بیشتر از ۰/۹۵ انجام شده و می‌توان گفت در دوره آماری ۱۵ ساله مورد بررسی (۲۰۱۰-۱۹۹۵)، تطابق بسیار خوبی بین خروجی مدل و داده‌های مشاهداتی از دما وجود دارد. این نتیجه، مطابق با نتایج تحقیقات Meshkatee و همکاران (۲۰۱۳)، و همکاران (۲۰۱۰) و Hadinia و همکاران (۲۰۱۶) است. در مورد متغیر بارندگی نیز اگر چه در نتایج شبیه‌سازی بعضی از ماه‌ها ضعف اندکی مشاهده شد اما در مجموع، مقدار ضرایب NS و R^2 در هر سه ایستگاه برابر با ۰/۹۹ به‌دست آمد، که نشان‌دهنده شبیه‌سازی بسیار خوب بارندگی با مدل است.

به‌طور کلی بارندگی نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی با دقت پایین‌تری به‌وسیله مدل LARS-WG شبیه‌سازی می‌شود (Meshkatee و همکاران، ۲۰۱۳). اما با توجه به نتایج این تحقیق، آماره‌های مربوط به بارش بهتر از دما هستند که با نتایج تحقیقات Meshkatee و همکاران (۲۰۱۰) و Salajegheh و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. Meshkatee و همکاران (۲۰۱۰) به این نتیجه رسیدند که مدل LARS-WG بارش را در منطقه گلستان بهتر از سایر متغیرها شبیه‌سازی می‌کند. همچنین، نتایج پژوهش Salajegheh و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی کارایی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی نشان داد که مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش عملکرد بهتری نسبت به دمای کمینه و بیشینه دارد. در مجموع نتایج ریزمقیاس‌سازی شده داده‌های بارش در مدل LARS-WG روند نامشخصی داشته، تحقیق Salehnia و همکاران (۲۰۱۵) و نیز Hadinia و همکاران (۲۰۱۶)، غیر قابل پیش‌بینی بودن نتایج این مدل در مورد بارش را تأیید

مدل متصل می‌کند و قادر به انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT نیز می‌باشد.

با توجه به این که مدل SWAT از پارامترهای فراوانی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند، استفاده از همه این پارامترها در واسنجی بسیار وقت‌گیر و عملاً غیر ضروری است. بنابراین، تحلیل حساسیت برای کاهش تعداد این پارامترها ضروری است و پارامترهایی که خروجی مدل به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد انتخاب و در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تشخیص پارامترهای حساس، در نرم‌افزار SWAT-CUP مقادیر t-student (t-stat) و درصد معنی‌داری (p-value) برای هر یک از پارامترها تعیین می‌شود. پارامترهایی که قدرمطلق t-stat بیشتر و p-value نزدیک به صفر داشته باشند، تأثیر بیشتری بر خروجی مدل دارند و در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در الگوریتم Sequential Uncertainly Fitting Ver. 2 یا به اختصار SUFI-2، دو معیار r-factor و p-factor برای ارزیابی عدم قطعیت محاسبه می‌شود. p-factor عبارت است از درصد داده‌های مشاهده‌ای که در نوار ۹۵ درصد خروجی مدل (95PPU) قرار می‌گیرند. r-factor نیز از تقسیم میانگین ضخامت نوار 95PPU بر انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای به‌دست می‌آید.

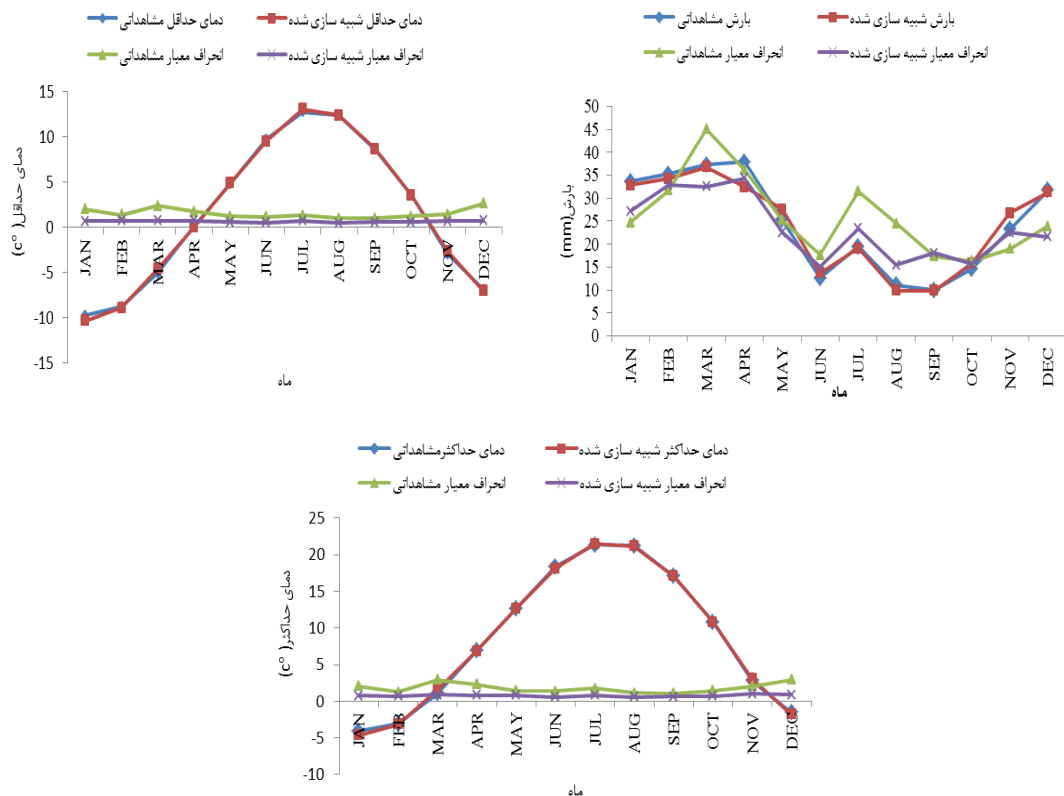
مقدار نظری p-factor بین صفر تا ۱۰۰ درصد و r-factor بین صفر تا بی‌نهایت است. نزدیک بودن p-factor به یک و r-factor به صفر نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر مدل است. در حالی که مدل، کمترین عرض نوار را داشته باشد (r-factor به سمت صفر) به‌صورت ایده‌آل اگر بیشترین تعداد از داده‌های مشاهده شده، در نوار 95PPU قرار گیرند، بهترین نتیجه حاصل خواهد شد (p-factor به سمت ۱). در این تحقیق، از مقادیر مشاهده‌ای آبدهی جریان در ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه در مقیاس ماهانه، برای واسنجی مدل طی دوره ۲۰۰۸-۱۹۹۸ و اعتبارسنجی مدل طی دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۹ استفاده شد.

در نهایت داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره زمانی ۳۰ ساله آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، به مدل

می‌کنند. نتایج برای هر سه متغیر دمای کمینه و بیشینه و بارش در جدول ۲ و به‌عنوان نمونه، به تفکیک ماه برای ایستگاه فیروزکوه در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج عملکرد مدل LARS-WG در مرحله واسنجی

آماره‌های ارزیابی	دمای کمینه (°C)			دمای بیشینه (°C)			بارش (mm)	
	فیروزکوه	آلودگی	گرمسار	فیروزکوه	آلودگی	گرمسار	آلودگی	گرمسار
R ²	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
MBE	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۵۲	۰/۱	۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲۸	۰/۰۶
RMSE	۲/۱	۲/۶۹	۱/۱	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۲
NS	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹



شکل ۳- نتایج ارزیابی مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی در مرحله واسنجی (ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه)

در گام بعدی برای ارزیابی نوسانات اقلیمی در حوضه حبله‌رود، مدل LARS-WG برای ریزمقیاس سازی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 و تولید سری زمانی داده‌های روزانه دما و بارش در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، با استفاده از سه سناریوی A1B، A2 و B1 اجرا شد و بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای پیش‌گفته تولید شد. این داده‌ها برای شبیه‌سازی رواناب روزانه دوره آتی به مدل SWAT معرفی می‌شوند. نتایج تغییرات سالانه متغیرهای اقلیمی (جدول ۳) نشان داد، در هر سه ایستگاه

به‌منظور ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در مرحله واسنجی و ارزیابی، از آزمون آماری X^2 نیز استفاده شد. مقدار p-value در این آزمون نشان می‌دهد که در سطح یک درصد، تفاوت معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای وجود ندارد و مدل LARS-WG توانمندی لازم برای شبیه‌سازی متغیرهای بارندگی و دمای ایستگاه‌های منتخب را دارد که با نتایج پژوهش Tavangar و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. پس از مراحل واسنجی و اعتبارسنجی،

میزان ۰/۴۷، ۰/۵۵ و ۰/۵۲ درجه سلسیوس، به ترتیب در ایستگاه‌های فیروزکوه، فیروزکوه-آلودگی و گرمسار مشاهده شد. در مورد دمای کمینه نیز بیشترین افزایش دما مربوط به سناریوی A2 و به ترتیب در سه ایستگاه مورد بررسی، معادل با ۰/۵۶، ۰/۵۶ و ۰/۶۶ درجه سلسیوس مشاهده شد.

سینوپتیک فیروزکوه، فیروزکوه-آلودگی و گرمسار و در هر سه سناریو، نوسانات بارش در دوره آتی اختلاف معنی‌داری با بارش در دوره پایه ندارد. همچنین، مشاهده شد که تغییرات دمای کمینه و بیشینه دارای روند مشابهی هستند و افزایش میانگین دما برای دوره آتی پیش‌بینی می‌شود. بیشترین میزان افزایش دمای بیشینه در هر سه ایستگاه، در سناریوی A2 و به

جدول ۳- تغییرات سالانه متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 نسبت به دوره پایه

سناریوها	دمای کمینه (°C)		دمای بیشینه (°C)		بارش (mm)	
	فیروزکوه	آلودگی	گرمسار	آلودگی	گرمسار	آلودگی
A1B	۰/۴	۰/۴	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۰۵	-۰/۰۴۵
A2	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۰۴	-۰/۰۰۶
B1	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۰۵	-۰/۰۴۸

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه در مدل SWAT: پس از انجام تحلیل حساسیت مدل، مرحله واسنجی مدل با استفاده از آمار آبدی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه در دوره ۲۰۰۸-۱۹۹۸ انجام شد و محدوده بهینه هر کدام از ۱۶ پارامتر مشخص شده در جدول ۴ به دست آمد. سپس مدل برای دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲ - ۲۰۰۹) اجرا شد و خروجی مدل، به صورت نوار 95PPU حاصل شد. شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۵ و مقایسه آبدی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. Donigian (۲۰۰۰) مقادیر کمتر از ۰/۶ و ۰/۷-۰/۶، ۰/۷-۰/۸ و بزرگ‌تر از ۰/۸ برای ضریب تبیین را به ترتیب معادل با شبیه‌سازی ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب طبقه‌بندی می‌کند. Moriasi و همکاران (۲۰۰۷) نیز مقادیر ۰/۵-۰/۶۵، ۰/۵-۰/۷۵ و بیشتر از ۰/۷۵ برای ضریب نش-ساتکلیف را به ترتیب به عنوان شبیه‌سازی نامناسب، رضایت‌بخش، خوب و بسیار خوب در نظر می‌گیرند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ می‌توان گفت عملکرد مدل در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، در طبقه‌بندی بسیار خوب یا خوب قرار می‌گیرد. Havrylenko و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود در دوره واسنجی مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۷۵ را به ترتیب برای ضرایب R^2 و نش-ساتکلیف در شبیه‌سازی دبی حوضه گزارش کردند. Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) نیز در مطالعه خود بر روی حوضه‌ای در کشور سوئیس برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای مؤثر بر بیلان آب، رسوب و چرخه عناصر، مقدار شاخص NS را برای شبیه‌سازی

نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT: قبل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، ابتدا با انجام تحلیل حساسیت با استفاده از نرم افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2، پارامترهای مؤثر بر آبدی حوضه انتخاب شدند. با توجه به مطالعات گذشته، ۳۲ پارامتری که بر رواناب تأثیر داشتند، به عنوان پارامترهای اولیه در نظر گرفته شدند. پس از تحلیل حساسیت، ۱۶ پارامتری که تأثیر بیشتری بر آبدی خروجی از حوضه داشتند، بر اساس مقادیر دو شاخص p-value و t-stat و به ترتیب اولویت مشخص شدند (جدول ۴). در جدول ۴، علامت اختصاری r نشان‌دهنده روش Multiple و v نشان‌دهنده روش Replace در واسنجی می‌باشد. این روش‌ها برای سهولت در تغییر مقدار پارامترها در واسنجی ابداع شده‌اند. در روش Replace، مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با مقدار جدید جایگزین می‌شود اما در روش Multiple، مقدار اولیه پارامتر در (+۱ مقدار بهینه) ضرب می‌شود (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷). با توجه به نتایج تحلیل حساسیت انجام شده، پارامترهای ظرفیت آب قابل دسترس (SOL_AWC)، وزن مخصوص ظاهری خاک در لایه سطحی (SOL_BD)، متوسط طول شیب (SLSUBBSN) و عامل جبران جذب آب به وسیله گیاه (EPCO)، با مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۱، به ترتیب بیشترین حساسیت را در شبیه‌سازی جریان حوضه داشتند.

به دبی‌های اوج است. با توجه به این که در مطالعات گذشته مقادیری بین ۰/۳۱ تا ۰/۹۱ برای p-factor گزارش شده است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷؛ Rostamian و همکاران، ۲۰۰۸؛ Faramarzi و همکاران، ۲۰۰۹) می‌توان گفت مقدار محاسبه شده برای این ضریب بستگی زیادی به منطقه مطالعه شده دارد. نکته دیگری که بایستی در خصوص کم بودن مقدار p-factor در مرحله اعتبارسنجی به آن توجه کرد، کم بودن هم‌زمان r-factor است که مقدار آن برابر با ۰/۳۷ به دست آمده است. کم بودن r-factor در این مطالعه، تا حد زیادی مقدار محاسبه شده برای p-factor را توجیه می‌کند و بنابراین، در مجموع می‌توان گفت مدل هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله اعتبارسنجی، از عدم قطعیت قابل قبولی برخوردار است.

رواناب، برابر با ۰/۷۱ گزارش کردند. بررسی شکل ظاهری هیدروگراف دبی مشاهده شده و بهترین شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به‌طور کلی، مدل دچار تخمین کمتر از واقعیت است، اما بزرگ بودن ضریب R^2 بیانگر این است که همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای نسبتاً زیاد است. همچنین، با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که مدل نقاط اوج را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند اما در شبیه‌سازی نقاط فرود عملکرد خوبی ندارد. مقدار شاخص p-factor در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای آبدهی ماهانه نشان می‌دهد که در این مراحل، به ترتیب ۴۲ و ۲۵ درصد از داده‌های مشاهداتی در نوار 95PPU قرار می‌گیرند. همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین عرض نوار عدم قطعیت مربوط

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترها

رتبه حساسیت	پارامتر	علامت اختصاری	p-value	t-stat
۱	ظرفیت آب قابل دسترس	r_SOL_AWC.sol	۰/۰۰۰۰	۲۴/۴
۲	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (گرم در سانتی‌متر مکعب)	r_SOL_BD.sol	۰/۰۰۰۰	۱۱/۴۱
۳	متوسط طول شیب	v_SLSUBBSN.hru	۰/۰۰۰۲	-۳/۷۳۷
۴	عامل جبران جذب آب به‌وسیله گیاه	v_EPCO.hru	۰/۰۰۱۳	۳/۲۲۸
۵	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق یا غیر محصور	v_RCHRГ_DP.gw	۰/۰۳۸	-۲/۰۷۲
۶	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	r_CN2.mgt	۰/۱۰۷	۱/۶۱۲
۷	ضریب پاسخ جریان پایه (روز)	v_ALPHA_BF.gw	۰/۲۰۵	۱/۲۶۷
۸	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (میلی‌متر بر ساعت)	r_SOL_K.sol	۰/۲۱۱	۱/۲۵۲
۹	بازتابش خاک مرطوب	r_SOL_ALB.sol	۰/۲۹	۱/۰۵۷
۱۰	ضریب جریان تبخیر خاک	v_ESCO.hru	۰/۲۹۷	۱/۰۴۳
۱۱	ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی	v_GW_REVAP.gw	۰/۴۷۱	۰/۷۲۱
۱۲	کمینه مقدار ذخیره آب در سفره کم عمق (میلی‌متر آب)	v_REVAPMN.gw	۰/۶۳۸	۰/۴۷
۱۳	مدت زمان زهکشی لایه های خاک بالای سطح ایستابی (روز)	v_GW_DELAY.gw	۰/۷۶۵	-۰/۲۹۸
۱۴	عمق اولیه آب در آبخوان کم عمق (میلی‌متر آب)	v_SHALLST.gw	۰/۷۶۵	۰/۲۹۸
۱۵	ضریب تاخیر جریان سطحی (روز)	v_SURLAG.bsn	۰/۹۵۵	-۰/۰۵۶
۱۶	کمینه ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی (میلی‌متر)	v_GWQMN.gw	۰/۹۸۹	۰/۰۱۳

جدول ۵- شاخص‌های ارزیابی مدل SWAT در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

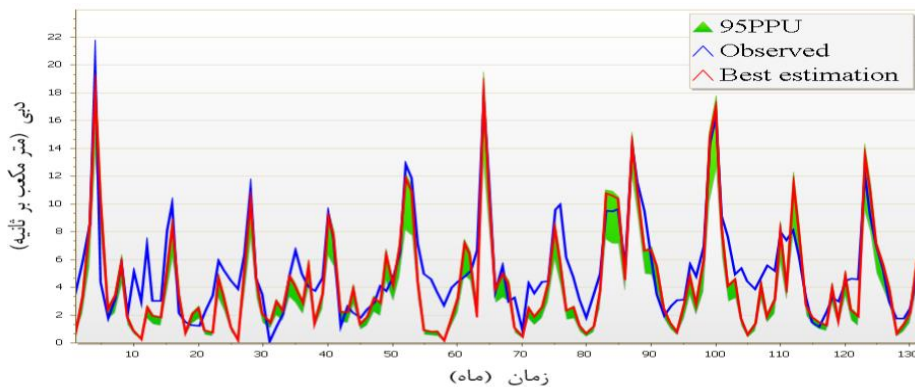
مرحله	طول دوره	R^2	NS	RMSE	r-factor	p-factor	MBE
واسنجی	۱۹۹۸-۲۰۰۸	۰/۸۰	۰/۷۱	۱/۹۴	۰/۴۲	۰/۴۲	۱۴/۳
اعتبارسنجی	۲۰۰۹-۲۰۱۲	۰/۸۱	۰/۷۱	۱/۸۱	۰/۳۷	۰/۲۵	۱۸/۱

ریزمقیاس شده به‌وسیله مدل LARS-WG، تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 به مدل واسنجی شده

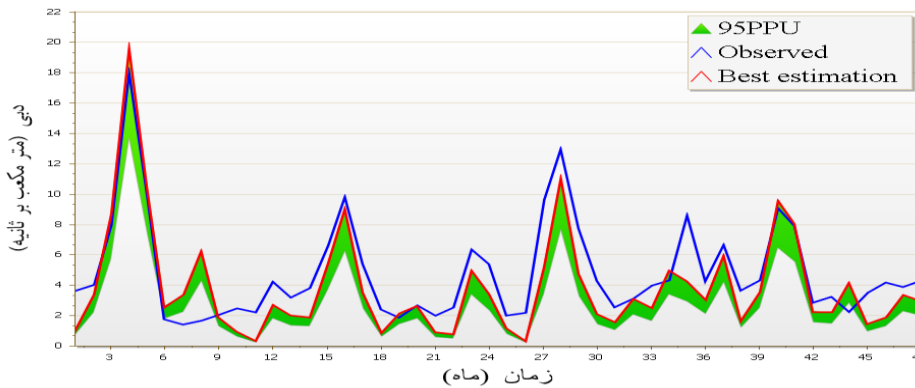
شبیه‌سازی رواناب در دوره‌های اقلیمی آتی: در ادامه با معرفی سری‌های زمانی روزانه دما و بارش

افزایش ۵/۲ تا ۱۳ درصدی آبدهی گزارش شده است، اما Sanikhani و همکاران (۲۰۱۶)، کاهش ۱۴ تا ۴۳ درصد را برای رودخانه قره‌چای پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، Goudarzi و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، کاهش ۵/۴ تا ۶۵/۴ درصدی در آبدهی بلندمدت سالانه را برای رودخانه‌های این حوزه پیش‌بینی کردند. در مطالعات انجام‌شده در سایر نقاط جهان نیز هم افزایش آبدهی (Labat و همکاران، ۲۰۰۴) و هم کاهش آبدهی (Milliman و همکاران، ۲۰۰۷؛ Dai و همکاران، ۲۰۰۹) رودخانه‌ها در اثر تغییر اقلیم گزارش شده است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد، اثر تغییر اقلیم بر آبدهی یک رودخانه، به شدت وابسته به منطقه مورد مطالعه است و نمی‌توان بدون انجام بررسی دقیق و مناسب، در خصوص افزایش یا کاهش آبدهی اظهار نظر قطعی کرد.

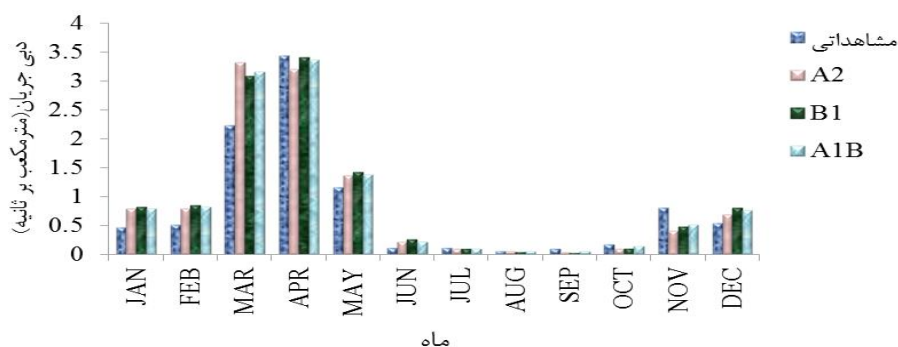
SWAT، آبدهی در حوزه آبخیز حبله‌رود در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) شبیه‌سازی شد. سپس آبدهی درازمدت ماهانه در دوره آتی با آبدهی ماهانه مشاهده‌ای در هر سه سناریو مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که به‌طور کلی در سه سناریوی A2، B1 و A1B نسبت به دوره پایه، در ماه آوریل و ماه‌های ژوئیه تا نوامبر، رواناب کاهش و در سایر ماه‌ها رواناب افزایش یافته است. بررسی آبدهی درازمدت سالانه حوزه در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ نشان می‌دهد که در سناریوهای A1B، A2 و B1، آبدهی سالانه حوزه به میزان ۱۷/۵۲، ۱۰/۶۶ و ۱۷/۷۲ درصد نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۰) افزایش خواهد یافت. شکل ۴، تغییرات آبدهی درازمدت ماهانه شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل را در دوره آتی نسبت به دوره مشاهده‌ای نشان می‌دهد. در تحقیق انجام شده به‌وسیله Azari و همکاران (۲۰۱۳) در خصوص بررسی اثر تغییر اقلیم بر آبدهی رودخانه گرگان‌رود،



شکل ۴- نتایج واسنجی مدل در دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۰۸



شکل ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل در دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۱۲



شکل ۶- آبدهی درازمدت ماهانه طی دوره پایه و دوره آبی تحت سناریوهای تغییر اقلیم (A1B و B1, A2).

نتیجه‌گیری

درجه سلسیوس افزایش خواهند یافت. در مرحله بعد برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب حوضه از مدل SWAT استفاده شد. بدین منظور، ابتدا مدل SWAT با استفاده از آمار ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه، در دوره ۲۰۱۲ - ۱۹۹۵ واسنجی و اعتبارسنجی شد که مقادیر ضریب R^2 و NS به ترتیب ۰/۸ و ۰/۷۱ به دست آمد. در ادامه، متغیرهای تولید شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره آبی، به عنوان ورودی به مدل SWAT داده شد و بدین ترتیب رواناب حوضه برای دوره آبی و تحت سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان از افزایش ۱۰/۶۶، ۱۷/۷۲ و ۱۷/۵۲ درصدی آبدهی سالانه در سه سناریوی مورد بررسی، نسبت به دوره پایه داشت. با توجه به نتایج، مشخص شد که هر چند آبدهی دراز مدت سالانه حوضه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت اما در ماه‌های فصل تابستان و اوایل پاییز، تغییر اقلیم اثر خود را به صورت کاهش در آبدهی رودخانه اصلی حوضه نشان خواهد داد. این امر می‌تواند مشکلات فعلی ناشی از کمبود آب در حوضه را به مراتب عمیق‌تر کند. بنابراین، لازم است که در بخش‌های کشاورزی، منابع آب، محیط زیست، صنعت و اقتصاد، راه‌کارهای لازم برای کاهش پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم و سازگاری بیشتر با شرایط آب و هوایی جدید اتخاذ شود.

بررسی شرایط و وضعیت فعلی منابع آب در حوضه حبله‌رود نشان می‌دهد که طی دهه‌های گذشته و به دلایل مختلف، مناطق وابسته به این رودخانه با بحران کمبود آب مواجه شده‌اند. تحقیق حاضر به منظور بررسی اثرات ناشی از تغییر اقلیم روی دما، بارندگی و رواناب حوضه آبخیز حبله‌رود با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سه سناریوی A2، B1 و A1B برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۰ با کمک مدل آماری LARS-WG و مدل هیدرولوژیک SWAT انجام گرفت. در مرحله اول، به منظور تولید داده‌های هواشناسی دوره آبی در حوضه، مدل LARS-WG مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج شاخص‌های آماری نشان داد مدل LARS-WG دقت بالایی در شبیه‌سازی متغیرهای دمای و بارش دارد. پس از ارزیابی کارایی مدل LARS-WG در ریزمقیاس سازی متغیرهای بارش و دما در سه ایستگاه سینوپتیک، نوسانات این متغیرها با دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۰) مقایسه شد. نتایج ریزمقیاس سازی نشان داد که بارش در دوره آبی، اختلاف معنی‌داری با بارش در دوره پایه (۲۰۱۰-) ۱۹۹۵ ندارد. همچنین، مشاهده شد که در سناریوهای انتشار A2، B1 و A1B، میانگین دمای کمینه، به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۴۷ و ۰/۴۳ درجه سلسیوس و میانگین دمای بیشینه، به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۳۹ و ۰/۳۵

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-Alpine/Alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
2. Abbaspour, K.C., M. Faramarzi, S.S. Ghasemi and H. Yang. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10): W10434.
3. Alison, L.K., G.L. Richard and S.R. Nicholas. 2004. RCM rainfall for UK flood frequency estimation:

- Climate change results. *Journal of Hydrology*, 318(1): 163-172.
4. Ashraf, B., B. Mousavi, G.A. Kamali and K. Davari. 2011. Prediction of seasonal variations of climatological parameters over next 20 years using statistical downscaling method of HadCM3 data, case study: Khorasan Razavi Province. *Journal of Water and Soil*, 25(4): 945-957 (in Persian).
 5. Azari, M., H.R. Moradi, B. Saghafian and M. Faramarzi. 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gourganroud River Basin. *Journal of Water and Soil*, 27(3): 537-547 (in Persian).
 6. Bahri, M., M. Dastorani and M. Goodarzi. 2015. Assessment of future drought under climate change status, case study: Eskandari Basin, Isfahan Province. *Watershed Engineering and Management*, 7(2): 157-171 (in Persian).
 7. Dai, A., T. Qian, K.E. Trenberth and J.D. Milliman. 2009. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, 22: 2773-2792.
 8. Donigian, Jr.A.S. 2000. HSPF training workshop handbook and CD: lecture 19, calibration and verification issues. Washington DC: US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, 30 pages.
 9. Erfanian, M., M. Bayazi, H. Abghari and A. Esmali Ouri. 2015. Monthly simulation of streamflow and sediment using the SWAT in Nazlochai and prioritization of critical regions. *Watershed Engineering and Management*, 7(4): 552-562 (in Persian).
 10. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modeling blue and green water availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23(3): 486-501.
 11. Ficklin, D.L., Y. Luo, E. Luedeling and M. Zhang. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374(1): 16-29.
 12. Ghermezcheshmeh, B., A. Rasuli, M. Rezaei Banafsheh, A. Massah Bovani and A. Khorshiddust. 2014. Impact assessment of morpho-climatic parameters in accuracy of SDSM. *Watershed Engineering and Management*, 6(2): 155-164 (in Persian).
 13. Goudarzi, M., B. Salahi and A. Hoseini. 2015. Study on effects of climate changes on surface runoff changes case study: Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(2): 175-189 (in Persian).
 14. Graham, L.P., S. Hagemann, S. Juan and M. Beniston. 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Climatic Change*, 1(81): 97-122.
 15. Hadinia, H., N. Pirmoradian and A. Ashrafzadeh. 2016. Effect of changing climate on rice water requirement in Guilan, north of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 8(3): 177-190.
 16. Havrylenko, S.B., J.M. Bodoque, R. Srinivasan, G.V. Zucarelli and P. Mercuri. 2016. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *Catena*, 137: 298-309.
 17. Hosseini, M. and Z. Mokarian. 2016. Estimation of groundwater runoff by SWAT model in Golgol Catchment. *Watershed Engineering and Management*, 8(1): 80-92 (in Persian).
 18. Khaliliaqdam, N., A. Mosaedi, A. Soltani and B. Kamkar. 2013. Evaluation of ability of LARS-WG model for simulating some weather parameters in Sanandaj. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(4): 85-122 (in Persian).
 19. Labat, D., Y. Godd eris, J.L. Probst and J.L. Guyot. 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27: 631-642.
 20. Mahdizadeh, S., M. Meftahhalghi, S. Seyyed Ghasemi and A. Mosaedi. 2011. Study of precipitation variation due to climate change, case study: Golestan Dam Basin. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(3): 117-132 (in Persian).
 21. Meshkatee, A., M. Kordjazi and I. Babaeian. 2010. Evaluation of LARS-WG model in simulation of some observed meteorological parameters in Golestan Province (1993-2007). *Journal of Geographical Sciences and Applied Research*, 16(19): 81-98 (in Persian).
 22. Milliman, J.D., K.L. Farnsworth, P.D. Jones, K.H. Xu and L.C. Smith. 2008. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Global and Planetary Change*, 62: 187-194.
 23. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
 24. Naderi, S., M. Goodarzi and M. Ghadami Dehno. 2018. Effects of climate change on climate parameters in Seymare Basin. *Watershed Management Science and Engineering*, 11(39): 69 -76 (in Persian).
 25. Pachauri, R.K., M.R. Allen, V.R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ and N.K. Dubash. 2014. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 151 pages.
 26. Rezaei, M., M. Nohtani, A. Abkar, M. Rezaei and M. Mirkazehi Rigi. 2014. Performance evaluation of statistical downscaling model (SDSM) in forecasting temperature indexes in two arid and hyper arid regions, case study: Kerman and Bam. *Journal of Watershed Management Research*, 5(10):

- 117-131.
27. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S.F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K.C. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5): 977-988.
 28. Salahi, B., M. Goudarzi and S. Hosseini. 2016. Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. *Watershed Engineering and Management*, 8(4): 425-438 (in Persian).
 29. Salajegheh, A., E. Rafiei Sardooi, A. Moghaddamnia, A. Malekian, S. Araghinejad, S. Khalighi Sigarodi and A. Saleh Pourjam. 2017. Performance assessment of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulation of precipitation and temperature. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(2): 253-262 (in Persian).
 30. Salehnia, N., S. Alizadeh and N. Sayari. 2015. Comparison of two downscaling models LARS-WG and ASD in prediction of temperature and precipitation under climate change and in different climate conditions. *Journal of Irrigation and Drainage*, 8(2): 233-242 (in Persian).
 31. Sanikhani, H., M.R. Gohardoust and M. Sadeghi. 2016. The impacts of climate change on runoff of Ghareh-Chay Basin in Markazi Province, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 13(7): 12-22 (in Persian).
 32. Semenov, M.A. 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 35(3): 203-212.
 33. Taei Semiromi, S., H. Moradi and M. Khodaghohi. 2015. Predicted changes in some of climate variables using downscale model LARS-WG and output of HadCM3 model under different scenarios. *Watershed Engineering and Management*, 7(2): 145-156 (in Persian).
 34. Tavangar, S., H. Moradi, A. Massah Bavani and M. Azari. 2016. Forecasting climate change impact on rainfall erosivity factor in the southern coast of Caspian Sea. *Watershed Engineering and Management*, 8(4): 414-424 (in Persian).
 35. Trambly, Y., W. Badi, F. Driouech, S.E. Adlouni, S. Neppel and E. Servat. 2012. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*, 82: 104-114.
 36. Vaghefi, S.A., S.J. Mousavi, K.C. Abbaspour, R. Srinivasan and J.R. Arnold. 2015. Integration of hydrologic and water allocation models in basin scale water resources management considering crop pattern and climate change: Karkheh River Basin in Iran. *Regional Environmental Change*, 15(3): 475-484.
 37. Vilaysane, B., K. Takara, P. Luo, I. Akkharath and W. Duan. 2015. Hydrological stream flow modeling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28: 380-390.
 38. Zare Garizi, A., A. Talebi and M. Faramarzi. 2017. Identification and prioritization of critical areas of soil erosion and sediment using SWAT model. *Watershed Engineering and Management*, 8(4): 350-361 (in Persian).