

ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز گرگانرود

محمود آذری^۱ - حمیدرضا مرادی^{۲*} - بهرام ثقفیان^۳ - منیره فرامرزی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱/۲۴

چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهمترین چالش‌هایی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان را در روی زمین تحت تاثیر قرار داده است. شرایط اقلیمی گرمتر باعث تشدید چرخه آب، تغییر بارش و تغییر در مقدار و زمان ظهور رواناب می‌گردد. شمال ایران با توجه به شرایط خاص اقلیمی و اهمیت کشاورزی، یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق به تغییر اقلیم می‌باشد از این رو تحقیق حاضر به دنبال ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه گرگانرود با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی می‌باشد. بدین منظور مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه و الگوریتم SUFI-2 در نرم-افزار SWAT-CUP برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. سناریوهای تغییر اقلیم از خروجی‌های سه مدل چرخش عمومی جو (CGCM1)، HadCM3 و SCIRO) برای حد پایین و بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای (A1F1 و B1) تعریف شد. نتایج مطالعه ضمن تایید کارایی مدل، نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مقدار بارندگی سالانه حوضه به میزان ۳/۲ تا ۶/۷ درصد کاهش خواهد یافت. نتیجه تغییرات اقلیمی در بخش آب، کاهش مقدار رواناب سطحی به میزان ۰/۴ تا ۷/۷ درصد، کاهش آب خاک به میزان ۵/۲ تا ۱۳ درصد، افزایش آب‌دهی حوضه به میزان ۵/۳ تا ۱۰/۲ درصد و افزایش تبخیر و تعرق بین ۳/۶-۱/۶ درصد خواهد بود. نتایج تحقیق ضمن بیان اهمیت تاثیرات تغییر اقلیم کاربرد آنها را در اتخاذ تدابیر لازم در جهت سازگاری با تغییر اقلیم در سیاست‌های آبی مدیریت حوضه گرگانرود تاکید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی، SWAT، گرگانرود

مقدمه

را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تمام مدل‌های AOGCMs^۶ افزایش دما در سطح زمین و افزایش شدت بارش و مقدار آن بر اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را در قرن حاضر پیش‌بینی می‌کنند (۱۲). هوای گرم قادر به نگهداری رطوبت بیشتر می‌باشد که افزایش تبخیر از سطوح مرطوب را به همراه دارد. با افزایش رطوبت در اتمسفر، رخدادهای بارش باران و برف شدیدتر شده و پتانسیل وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه مقدار رطوبت در خاک برای تبخیر کم و یا ناچیز می‌باشد میزان بازتابش خورشیدی از سطح خاک بیشتر شده که این نیز به شدت و مدت گرم شدن می‌افزاید. بنابراین تغییر در اقلیم مقدار رطوبت خاک، تغذیه آب‌های زیرزمینی، فراوانی سیلاب و وقوع خشکسالی در مناطق مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهد (۷). مطالعات مختلفی که با استفاده از الگوهای فعلی بارش انجام شده نیز نشان داده که بالاتر رفتن دما منجر به افزایش میزان تبخیر، کاهش جریان رودخانه و افزایش فراوانی وقوع خشکسالی می‌گردد (۸).

6- Atmosphere-Ocean Global Circulation Model

گرم شدن زمین و تاثیر آن بر چرخه آب مسئله‌ای است که امروزه تمام دانشمندان علوم جوی بر روی آن اتفاق نظر دارند. هیئت بین‌دولت تغییر اقلیم (IPCC^۵) با قطعیت بالا (احتمال ۹۹ درصد) گزارش کرده است که دمای سطح خشکی و آب در کره زمین از قرن ۱۹ تاکنون به میزان ۰/۴ تا ۰/۷۸ درجه سانتیگراد افزایش داشته است. همچنین در مقیاس جهانی از سال ۱۹۹۰ تاکنون شاهد ۱۰ سال گرم بوده‌ایم که از سال ۱۸۶۰ تاکنون بی سابقه بوده است (۲۲). افزایش دمای سطح زمین و تغییرات در الگوهای بارندگی پدیده‌های قالب در تغییر اقلیم می‌باشد که این دو تقریباً تمام بخش‌های دیگر چرخه آب

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
(*) نویسنده مسئول: (Email: hrmoradi@modares.ac.ir)

۳- استاد مرکز پژوهشی حفاظت آب و خاک (آبخیزداری)، تهران

۴- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

5- Intergovernmental Panel on Climate Change

بدین منظور از داده‌های اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۰ و ۲۰۷۰-۲۱۰۰ مدل کانادایی CGCM3.1 استفاده شد. نتایج مطالعه افزایش شدت بارندگی روزانه و فراوانی سیلاب‌های شدید در مناطق مرطوب ایران و خشکسالی‌های طولانی‌تر در مناطق خشک را نشان می‌دهد. چانگ و یانگ (۵) میزان رواناب سالانه، فصلی و مقادیر کمینه و بیشینه رواناب و عدم قطعیت آن را در ۲۱۸ زیرحوضه رودخانه Willamette ایالت اورگان بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که تغییرات فصلی رواناب به صورت افزایش در جریان زمستانه و کاهش در جریان تابستانه می‌باشد و تغییرات زمانی و مکانی رواناب نیز ممکن است در آینده دچار تغییر شود که مقدار و جهت آن به خصوصیات زیر حوضه بستگی دارد. در آذربایجان ایران ضرغامی و همکاران (۲۹) برای پیش‌بینی تاثیر تغییر اقلیم بر اساس خروجی‌های مدل HadCM3 از مدل LARS-WG استفاده کردند. نتایج مطالعه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بیانگر کاهش جریان رودخانه‌های استان بوده است.

مطالعات ذکر شده نشان می‌دهد که فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه تا چه حد می‌تواند به تغییرات بارندگی و دما حساس باشد و مهمتر اینکه این حساسیت به طور قابل توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت می‌باشد. در مجموع با توجه به شرایط خاص آب و هوایی شمال ایران و حوضه گرگانود تاکنون مطالعات کمی در خصوص پتانسیل تاثیر تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه گرگانود انجام نشده است. از این روتحقیق در خصوص تاثیر تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه در درک و پیش‌بینی جریان رودخانه حائز اهمیت بوده و نقش مهمی در مدیریت منابع آب حوضه دارا می‌باشد. همچنین استفاده از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم برای تعیین دامنه تغییرات رواناب، در تعیین میزان عدم قطعیت منابع مختلف کارا می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از مدل SWAT، اثرات بالقوه تغییر اقلیم پیش‌بینی شده با سه مدل GCM، برای دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ در حوضه رودخانه گرگانود در استان گلستان ارزیابی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل^۱ SWAT

مدل SWAT یک مدل فیزیکی، نیمه توزیعی و پیوسته زمانی است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه ارایه شده است (۳). در این مدل حوضه بر اساس نوع خاک، کاربری اراضی و کلاس‌های شیب به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU^۲)

نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت می‌باشد (۲). به عنوان مثال تغییر در خصوصیات جریان که ناشی از تغییر اقلیم است به ویژگی‌های هر آبخیز مرتبط می‌باشد به طور خاص، زمین شناسی و ارتفاع حوضه اولین عوامل کنترل کننده زمان و مقدار رواناب در مواجهه با تغییر اقلیم می‌باشند (۱۰). همچنین در حوضه‌هایی که بخش قابل توجهی از جریان رودخانه از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود حساسیت کمتری به تغییرات اقلیم دارند (۴).

مطالعات متعددی روی تاثیرات بالقوه تغییر اقلیم بر منابع آب شامل تاثیر روی کمیت آب، هیدرولوژی و تقاضای آب انجام شده است. با استفاده از داده‌های جهانی موجود در قرن گذشته مشخص شده است که اگر دمای کره زمین به میزان ۱ درجه افزایش یابد رواناب در مقیاس جهانی ۴ درصد افزایش می‌یابد (۱۳). در مطالعه‌ای لتنمیر و همکاران (۱۵) در رودخانه میزوری آمریکا مشخص شد که تغییر اقلیم موجب کاهش جریان رودخانه به میزان ۶ تا ۳۴ درصد خواهد شد. کامگا (۱۸) گزارش داد که افزایش دما به میزان ۱ و ۳ درجه و تغییر در مقدار بارش به میزان ۴ و ۱۳ درصد منجر به تغییراتی در جریان سالانه رودخانه به ترتیب به میزان ۳ و ۱۸ درصد در منطقه ساحلی کامرون می‌گردد. در مطالعه‌ای دیگر لگسه و همکاران کاهش ۳۰ درصدی در مقدار رواناب را بر اثر کاهش ۱۰ درصد در مقدار بارش پیش‌بینی کردند. در حالی که افزایش ۱/۵ درصد ما کاهش رواناب به میزان کمتر و ۱۵ درصد را به همراه داشته است (۱۴). گوسین و همکاران (۹) تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر دبی جریان در ۱۲ حوضه رودخانه‌های هند را برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۴۱ مورد مطالعه قرار دادند نتایج مطالعه آنها دلالت بر کاهش جریان و افزایش شدت سیلاب و خشکسالی دارد. پروسکی و نیرینگ (۲۴) با استفاده از خروجی‌های بارندگی ماهانه مدل HadCM3 اثر تغییر در رژیم بارندگی بر رواناب در هشت منطقه در ایالات متحده آمریکا را بررسی کردند. آنها گزارش کردند که تغییرات در بارندگی سالانه از ۹/۶- درصد تا ۱۰/۶ درصد و تغییر در میزان رواناب از ۲۴/۵- درصد تا ۴۱ درصد متغیر می‌باشد. موتیه و وربز (۲۰) برای شبیه‌سازی اثرات روند تغییرات اقلیمی گذشته در حوضه سن جاکینتو تگزاس از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که افزایش جریان رودخانه می‌تواند سیلابی شدن بیشتر را به همراه داشته باشد این در حالی است که فراوانی جریان‌های نرمال و جریان‌های کمینه کاهش یافته است. رزنبرگ و همکاران (۲۵) به منظور شبیه‌سازی تاثیرات تغییر اقلیم پیش‌بینی شده با مدل HadCM2 بر هیدرولوژی ۱۸ منطقه مهم در آمریکا از مدل SWAT و مدل HUMUS استفاده نمودند. پیش‌بینی شد که آینده در مقایسه با دوره پایه به میزان ۱۱- تا ۱۵۳ درصد و ۲۸ تا ۳۴۲ درصد در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۹۵ تغییر داشته باشد. مدل SWAT برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر میزان دسترسی به منابع آب در ایران توسط عباسپور و همکاران (۲) بکار گرفته شد.

1- Soil and Water Assessment Tool
2- Hydrologic Response Units

موسسه تحقیقات خاک و آب و موسسه پژوهش‌های اقتصاد کشاورزی بدست آمده شامل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می باشد. منطقه تحقیق و زیرحوضه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM^۲) با دقت مکانی ۹۰ متر تفکیک گردید. داده های اقلیمی شامل بارندگی و دمای روزانه برای ۷ ایستگاه باران سنجی و ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی از سازمان هواشناسی کشور و شرکت منابع آب ایران تهیه گردید. همچنین دبی روزانه و ماهانه ۸ ایستگاه هیدرومتری منتخب از شرکت منابع آب ایران اخذ شد. برای تعریف زیرحوضه، آستانه ۵۰۰۰ هکتار انتخاب شد و مرز حوضه و زیرحوضه‌ها تعریف گردید. در ادامه نقشه شیب حوزه در ۵ کلاس شیب شامل ۰-۵، ۵-۱۲، ۱۲-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۳۰ درصد برای مدل آماده شد. در بخش هیدرولوژی برای محاسبه رواناب از روش عدد منحنی، برای تبخیر و تفرق روش هارگریوز و در روندیابی کانال از روش ماسکینگام به استفاده شد.

واسنجی مدل

بهبودسازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2^۳ در برنامه SWAT-CUP^۴ انجام شد (۱). در این الگوریتم تمام عدم قطعیت‌ها (پارامتر، مفهوم سازی مدل، ورودی ها) در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. فرآیند کار به گونه‌ای است که تلاش می‌شود بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در دامنه ۹۵ درصد عدم قطعیت قرار گیرد. برای کمی کردن میزان دقت واسنجی یا عدم قطعیت دو شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. عامل P که عبارت است از درصد داده‌های پیش‌بینی قرار گرفته در بازه ۹۵ درصد عدم قطعیت و عامل R که میانگین نسبت عرض بازه به انحراف معیار متغیر مشاهده‌ای می باشد. ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی دبی با ضریب کارایی نش-ساتکلیف (E_{NS}) و ضریب تعیین (R^2) انجام شد (رابطه‌های ۱ و ۲). ضریب نش-ساتکلیف از بی‌نهایت تا واحد تغییر می‌کند و مقدار واحد به معنی انطباق کامل پیش‌بینی مدل با مقادیر مشاهده‌ای می باشد (۲۱).

$$E_{NS} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i,stm} - P_{i,obs})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{i,obs} - P_{i,obs})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_{i,obs} - P_{i,obs})(P_{i,stm} - P_{i,stm}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_{i,obs} - P_{i,obs})^2 \sum_{i=1}^n (P_{i,stm} - P_{i,stm})^2} \quad (2)$$

تفکیک می‌شود که امکان شبیه‌سازی در مقیاس مکانی بالا را ارایه می‌کند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، هواشناسی، فرسایش خاک، مواد مغذی، دمای خاک، رشد گیاه، آفت‌کش‌ها، مدیریت کشاورزی و روند جریان رودخانه می‌باشد. مدل، هیدرولوژی هر HRU را با استفاده از رابطه بیلان آبی که شامل بارش روزانه، رواناب، تبخیر و تفرق، نفوذ و جریان برگشتی بوده پیش‌بینی می‌کند. رواناب سطحی در این مدل با دو روش عدد منحنی سرویس حفاظت منابع طبیعی و روش گرین و امپت محاسبه می‌شود. میزان تبخیر و تفرق با استفاده از سه روش پریستلی-تیلورو پنمن-مانیت و هارگریوز محاسبه می‌شود. روندیابی جریان نیز در رودخانه با استفاده از روش ضریب ذخیره متغیر^۱ و روش ماسکینگام انجام می‌شود. کاربرد وسیع مدل SWAT^۵ موید این موضوع است که مدل برای شرایط مختلف انعطاف‌پذیر بوده و ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی اقدامات مختلف در سطح حوضه آبخیز می‌باشد. از این رو در این مطالعه با توجه به توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان در مقیاس حوضه و در جهت دستیابی به نتایج معتبر مورد استفاده قرار گرفت.

منطقه تحقیق

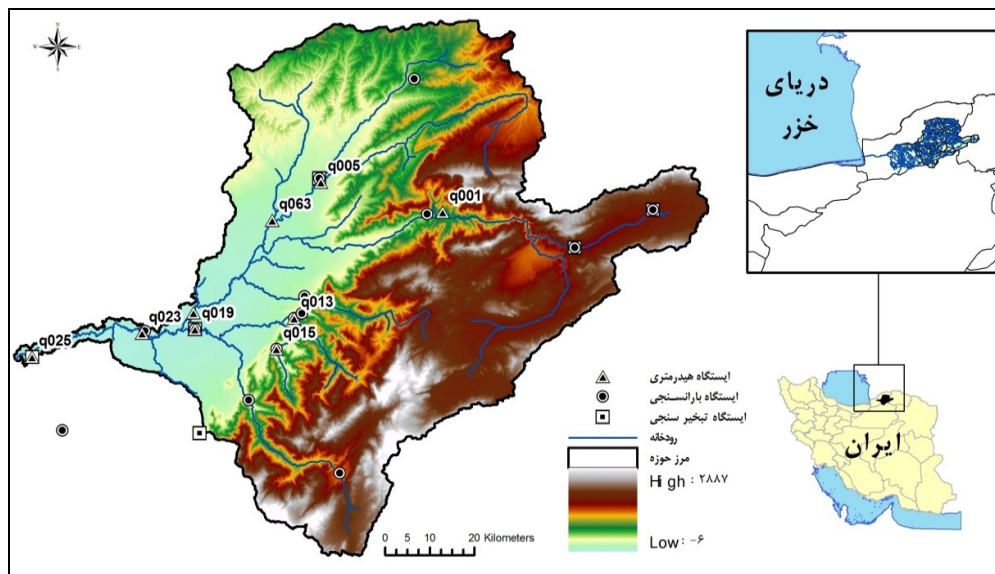
حوضه آبخیز گرگانود تا ورودی سد وشمگیر وسعتی معادل ۷۱۳۸ کیلومتر مربع دارد که در شمال ایران در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل کاربری اصلی حوضه می‌باشند. اقلیم حوضه بر اساس روش دمارتن از نیمه خشک در شرق تا مرطوب در بخش‌های غربی حوضه متغیر می‌باشد. بارش سالانه حوضه از ۲۳۱ میلی‌متر تا ۸۴۸ میلی‌متر تغییر می‌کند. طول رودخانه اصلی حوضه نیز ۳۳۳ کیلومتر می‌باشد. همچنین میانگین کمینه و بیشینه دمایی حوضه به ترتیب ۱۱ و ۱۸/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. وقوع بارش‌های شدید به همراه تشکیلات زمین‌شناس حساس به فرسایش و تغییر شدید کاربری اراضی از جنگل به اراضی دیم، سبب فراهم آمدن پتانسیل لازم برای تشکیل رواناب و در نتیجه فرسایش خاک و رسوب در حوضه شده است (۳۱).

داده‌های مورد نیاز و آماده سازی مدل

به منظور آماده‌سازی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT نقشه کاربری اراضی با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست و استفاده از اطلاعات میدانی در هفت کلاس مختلف تهیه شد. نقشه خاک‌شناسی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ از تلفیق نقشه‌های خاکشناسی

2- Digital Elevation Model
3- Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2)
4- SWAT Calibration and Uncertainty Programs

1- Variable Storage Coefficient



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز گرگانرود در ایران و استان گلستان

۲۱۰۰) میزان انتشار دی‌اکسیدکربن انتخاب شد که در مطالعات متعددی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است. در سناریوی A1F1 فرض بر این است که آینده جهان همراه با رشد سریع اقتصادی بوده و اوج جمعیت جهان در نیمه قرن و پس از آن کاهش می‌یابد همچنین معرفی تکنولوژی‌های نوین و کارا تسریع می‌یابد. در سناریوی B1 وضعیت جمعیت مشابه سناریو A1 می‌باشد با این تفاوت که تأکید در این سناریو بیشتر در استفاده از انرژی‌های پاک و حفظ محیط زیست می‌باشد. در این خانواده از سناریوها بر پایداری اقتصادی، محیط زیست و اقتصاد در سطح جهانی تأکید شده است.

دوره زمانی تاریخی مدل به منظور مقایسه خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل با مقادیر مشاهده‌ای بارندگی و دما، سال‌های ۱۹۷۱-۲۰۰۰ می‌باشد. برای تبدیل مقادیر هر سناریو در شبکه ۰/۵ درجه به مقادیر ایستگاه مورد نظر، اقدام به درونیابی مکانی با استفاده از روش عکس مجذور فاصله (IDW) با میانگین‌گیری از ۴ نقطه همسایه گردید.

$$S_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{d_{i,k}^2} \left(\sum_{j=1}^K \frac{1}{d_{j,k}^2} \right)^{-1} \right]} P_{k,i} \quad (3)$$

در این رابطه S_i مقدار ریزمقیاس شده GCM پیش‌بینی شده در ایستگاه $P_{k,i}$ پیش‌بینی GCM در سلول K ، $d_{i,k}$ فاصله بین نقطه i و مرکز سلول K و مقدار m نیز برابر ۳ می‌باشد (۱۶). سپس روش عامل تغییر (CF^3) برای اصلاح داده‌های GCM و تولید سناریوهای

در روابط بالا n تعداد داده مشاهده‌ای یا شبیه‌سازی، نیز به ترتیب داده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در هر گام زمانی i (روزانه یا ماهانه) $Y_{obs,i}$ و $Y_{sim,i}$ نیز میانگین مقادیر برای داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد. $Y_{sim,i}$ نمایانگر این است که مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی مدل بر روی خط ۱:۱ چقدر به همدیگر نزدیک می‌باشند. در این مطالعه دوره زمانی ۱۹۹۴ - ۱۹۷۹ و ۱۹۷۸ - ۱۹۷۲ به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. سه سال اول نیز به عنوان دوره گرم کردن^۱ مدل اختصاص یافت.

داده‌های اقلیمی آینده

در این مطالعه از داده‌های اقلیمی آینده ریزمقیاس شده توسط واحد تحقیقات اقلیمی (CRU^۲) دانشگاه East Anglia در شبکه ۰/۵ درجه منطقه مورد مطالعه استفاده گردید (۱۷). بدین منظور از داده‌های مربوط به پیشینه و کمینه دمای ماهانه و بارندگی برای دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ برای مدل‌های CGCM2 از مرکز مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اقلیم کانادا، مدل HadCM3 از مرکز پیش‌بینی و تحقیقات اقلیمی هادلی انگلستان و SCIRO2 از سازمان تحقیقات علمی و صنعتی استرالیا استفاده شد. سناریوهای با بیشترین A1F1 - ۹۷۰ppm در سال ۲۱۰۰ و کمترین (B1 - ۵۵۰ppm) در سال

- 1- Warm Up
- 2- Climatic Research Unit

3- Change Factor

نشان داده است. همچنین در شکل ۳ پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل بر روی خط ۱:۱ نشان داده شده است مطابق شکل ۲ و ۳ رواناب ماهانه پیش‌بینی مدل و مقادیر مشاهده‌ای در ایستگاه قزاقلی انطباق مناسبی را برای بیشتر ماه‌های دوره واسنجی نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل‌های آماری انجام شده در خصوص میزان انطباق بین مقادیر دبی ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی و مقایسه ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه‌های مختلف، معیارهای آماری شامل ضریب نش-ساتکلیف، R^2 ، عامل P و عامل R در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس مقدار ۰/۷۷ ضریب نش-ساتکلیف و ۰/۷۸ ضریب تبیین رواناب ماهانه در ایستگاه اصلی (قزاقلی) دلالت بر توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی حوضه دارد. بنابراین کارایی مدل برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر اساس شاخص کیفی ارائه شده توسط موریاوسی (۱۹) خوب می‌باشد.

تاثیر تغییر اقلیم بر دما و بارندگی

بر اساس نتایج پژوهش حاضر میانگین بارش سالانه برای ایستگاه‌های هواشناسی منطقه تحقیق برای دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۰) به میزان ۵۵۳/۱ میلی‌متر بوده است. همچنین کمینه و بیشینه بارش سالانه به ترتیب ۳۲۰/۶ و ۸۵۶ میلی‌متر و میانگین دمای کمینه و بیشینه به ترتیب ۸/۵ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. در شکل ۴ میانگین بارش ماهانه برای سناریوهای مختلف با دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشتر تغییرات در فصل بهار در ماه‌های آوریل تا ژوئن مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به پیش‌بینی دمای ماهانه نیز نشان می‌دهد که دمای بیشینه از ۳/۶ درجه تا ۹/۸ و دمای کمینه نیز بین ۲/۳ تا ۹/۳ درجه در سناریوهای مختلف تغییر داشته است.

اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ مورد استفاده قرار گرفت (۴). روش عامل تغییر شامل تنظیم مقادیر دمای روزانه ($T_{obs,d}$) با اضافه کردن اختلاف بین مقادیر ماهانه دمای پیش‌بینی شده مدل GCM بین افق آینده و دوره مرجع ($T_{CM,fut,m} - T_{CM,ref,m}$) به منظور دستیابی به داده‌های دمایی روزانه در دوره آینده ($T_{adj,fut,d}$) می‌باشد. تنظیم بارندگی روزانه برای دوره آتی نیز ($P_{adj,fut,d}$) با حاصل ضرب نسبت بارندگی ماهانه دوره آینده به دوره مرجع ($P_{CM,fut,m} / P_{CM,ref,m}$) در بارندگی روزانه ($P_{obs,d}$) صورت می‌گیرد (رابطه‌های ۴ و ۵).

$$T_{adj,fut,d} = T_{obs,d} + (T_{CM,fut,m} - T_{CM,ref,m}) \quad (4)$$

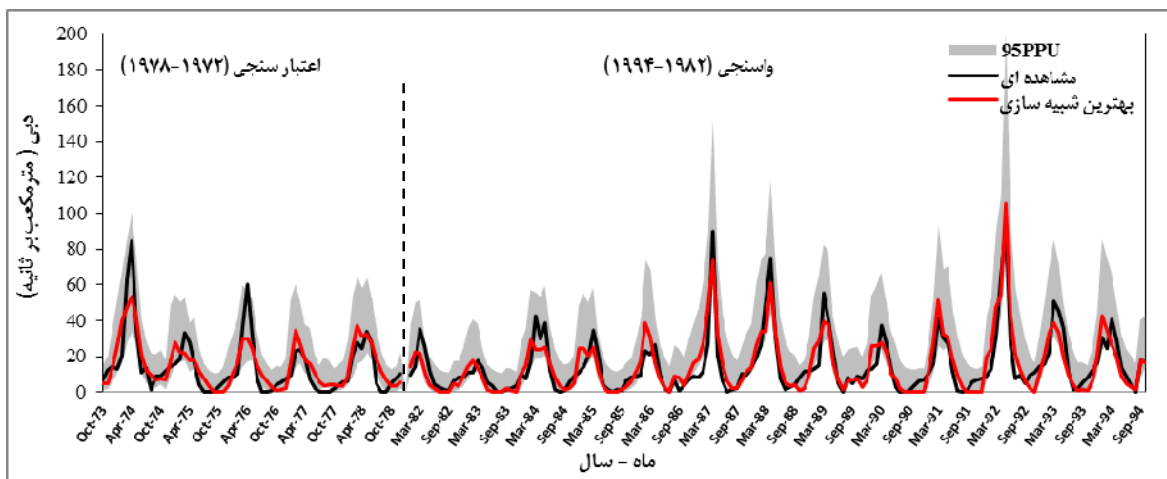
$$P_{adj,fut,d} = P_{obs,d} + (P_{CM,fut,m} / P_{CM,ref,m}) \quad (5)$$

داده‌های روزانه پیش‌بینی شده GCM ها پس از اصلاح به روش ذکر شده، برای سناریوهای مختلف انتشار به عنوان ورودی برای مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت تا تغییرات اجزای هیدرولوژیکی حوضه در دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ مورد بررسی قرار گیرد.

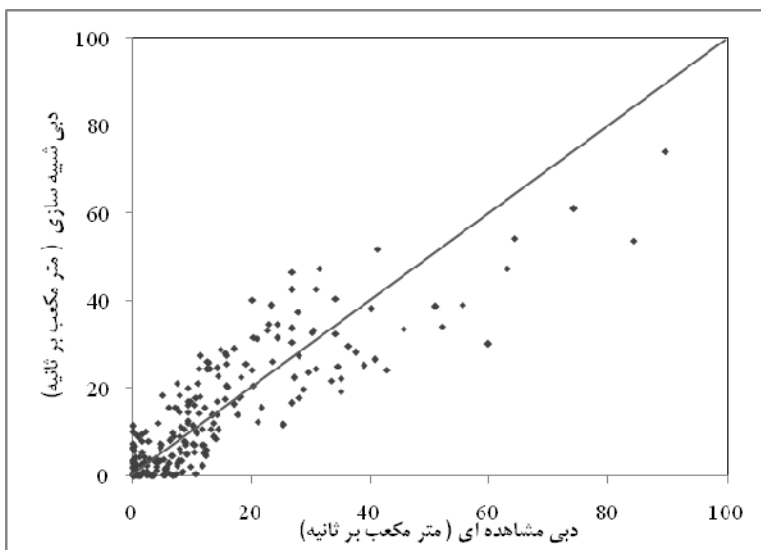
نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی روزانه در ۸ ایستگاه هیدرومتری در سطح حوضه و خروجی اصلی واسنجی شد. بدین منظور پس از آنالیز حساسیت با استفاده از SWAT-CUP اقدام به واسنجی مدل با آمار دبی تمام ایستگاه‌ها با هدف نمایش تغییرات مکانی و زمانی حوضه گردید. نتایج اولیه نشان داد که واسنجی همزمان تمام ایستگاه‌ها از کارایی لازم برخوردار نمی‌باشد. لذا مدل برای تک‌تک ایستگاه‌ها به طور مستقل و از بالادست به پایین واسنجی گردید. شکل ۲ مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل به همراه بازه عدم قطعیت برای دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل را به صورت گرافیکی در ایستگاه قزاقلی در خروجی حوضه به عنوان نمونه



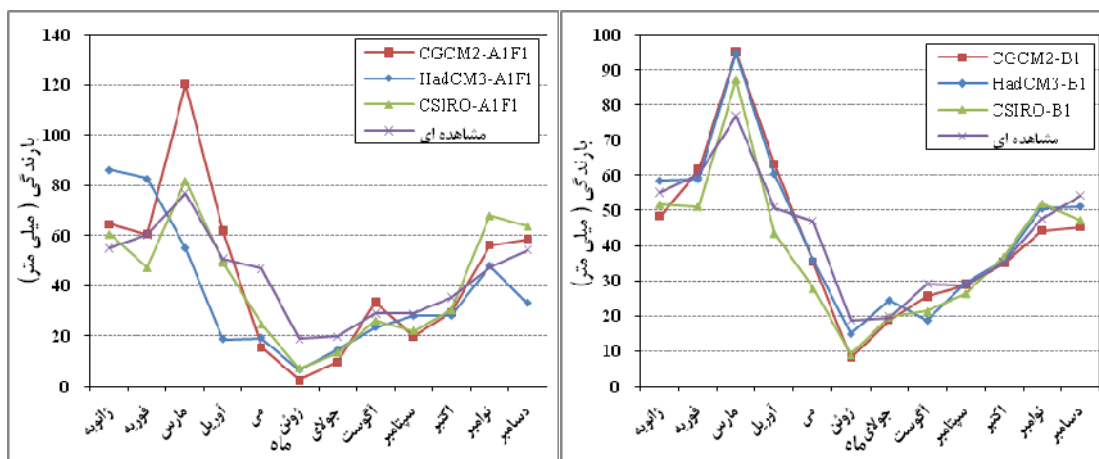
شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای، پیش‌بینی مدل و بازه عدم قطعیت دبی ماهانه در ایستگاه قزاقلی در خروجی حوضه



شکل ۳- پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل بر روی خط ۱:۱ در ایستگاه قزاقلی

جدول ۱- نتایج آماره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه‌های حوضه

اعتبارسنجی				واسنجی				ایستگاه	کد نقشه
NS	R ²	r-factor	p-factor	NS	R ²	r-factor	p-factor		
0/44	0/49	1/12	0/67	0/49	0/55	1/31	0/63	تمر	q005
0/44	0/46	1/3	0/52	0/57	0/58	0/89	0/6	تنگراه	q001
0/58	0/59	0/98	0/73	0/66	0/73	1/37	0/82	گنبد	q011
0/7	0/71	1/17	0/76	0/77	0/78	1/17	0/77	قزاقلی	q023
0/65	0/65	0/85	0/7	0/77	0/77	1/23	0/71	ارازکوسه	q019
0/37	0/38	0/67	0/56	0/5	0/5	0/73	0/58	گالیکش	q007
0/49	0/5	0/7	0/7	0/52	0/58	0/5	0/55	لزوره	q013
0/54	0/55	0/6	0/58	0/69	0/7	0/79	0/71	پس پشته	q015



شکل ۴- مقایسه نتایج بارندگی مشاهده‌ای در دوره پایه با مقادیر پیش‌بینی سه GCM تحت سناریوی A1F1 و سناریوی B1

ژوئن و برای دمای کمینه در ماه آگوست به وقوع پیوسته است.

این در حالی است که بیشترین تغییر برای دمای بیشینه در ماه

می‌دهد. توزیع ماهانه تغییرات نیز نشان می‌دهد که به جز ماه‌های ژانویه، مارس، آگوست و نوامبر، در بقیه ماه‌ها رواناب کاهش می‌یابد. این در حالی است که حداکثر تغییر در ماه‌های می و ژانویه که به ترتیب کاهشی و افزایش می‌باشد مشاهده شده‌است. در سناریوی B1 اختلاف رواناب پیش‌بینی شده سالانه با مقدار دوره پایه ناچیز می‌باشد در این سناریو نیز میانگین ماهانه سناریوهای مختلف بیانگر کاهش رواناب در بیشتر ماه‌ها بوده که اوج آن در ماه می به میزان ۲/۸ میلی-متر می‌باشد. نتایج مربوط به کاهش رواناب سالانه با نتایج ویز و تنگ (۲۶)، زرنبرگو همکاران (۲۵) در آمریکا و ذهبیون و همکاران (۳۰) در حوضه سد کرخه هم سو می‌باشد الگوی تغییرات ماهانه مشاهده‌ای که بیانگر کاهش رواناب تابستانه و افزایش رواناب در زمستان می‌باشد نیز در مطالعات وو و همکاران (۲۷)، جانگ و چنگ (۱۱) و فانو همکاران (۲۳) در مناطق مختلف مشاهده شده‌است. در سناریوی A1F1 بیشترین پیش‌بینی در ماه مارس با تغییر نسبی از ۵۴/۶- درصد برای مدل HadCM3 تا ۸۱/۶ درصد برای CGCM2 می‌باشد. تغییر در میانگین سالانه نیز برای CGCM2، HadCM3 و SCIRO به ترتیب ۱۰/۲-، ۲۸/۸- و ۲۰/۸- درصد برای سناریوی A1F1 و ۹/۸-، ۱- و ۲۲- درصد برای سناریوی B1 پیش‌بینی شده‌است.

تغییر مقدار آبدهی از ۴۵/۷- درصد تا ۹۵/۸ برای مدل‌های مختلف متغیر می‌باشد. در سناریوی A1F1 بیشترین تغییر برای فصل بهار و ماه‌های مارس تا آوریل پیش‌بینی شده‌است. بیشترین آبدهی (۲۵/۵ میلی‌متر) در مدل CGCM2 در ماه مارس به میزان ۹۵/۸ درصد بیشتر از دوره پایه و کمترین مقدار آبدهی (۱/۵۸ میلی‌متر) در مدل HadCM3 در ماه ژوئن بوده که ۵۵/۷ درصد کمتر از مقدار دوره پایه بوده‌است (جدول ۲). برای سناریوی A1F1 مقدار آبدهی در زمستان و پاییز افزایش داشته‌است (ژانویه تا آوریل و نوامبر و دسامبر) اما در تابستان کاهش داشته‌است (می تا اکتبر). استثنائاتی نیز در این میان قابل مشاهده‌است. کاهش اندک در ماه آگوست در مدل CGCM2 از آن جمله می‌باشد. میانگین آبدهی با پیش‌بینی مدل CGCM2 به میزان ۷/۷ درصد افزایش داشته در حالی که برای مدل‌های HadCM3 و SCIRO به میزان ۱۷/۴ و ۱ درصد کاهش داشته‌است (جدول ۲). به هر حال افزایش مقدار اوج آبدهی و کاهش مقدار کمینه آن بیانگر تغییر پذیری بالا نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد که می‌تواند موید وقوع سیلاب‌ها و خشکسالی‌های شدیدتر در آینده باشد. روند و جهت تغییرات میانگین سالانه آبدهی با استفاده از پیش-بینی سه GCM برای سناریوی B1 مشابه سناریوی A1F1 می‌باشد با این تفاوت که در این مورد تغییرات خفیف‌تر می‌باشد.

به دلیل افزایش بارندگی و دمای پیش‌بینی شده توسط مدل‌های اقلیمی، میزان تبخیر و تعرق واقعی برای سناریوی A1F1 در ماه‌های ژانویه تا آوریل بیش از مقدار دوره پایه بوده‌است. درحالی که برای ماه‌های می تا اکتبر کاهش یافته‌است.

افزایش دما با افزایش تبخیر و تعرق و تاثیرگذاری روی ذوب برف می‌تواند پیامدهای متعددی در بیان آبی حوضه داشته باشد. در مجموع اثر تغییر اقلیم بر بارندگی ماهانه حوضه به صورت افزایش بارش در ماه‌های پر باران و کاهش در ماه‌های خشک می‌باشد که این امر می‌تواند پیامدهای مهمی روی هیدرولوژی حوضه داشته باشد.

نتایج مربوط به روزهای مرطوب (بارندگی بیشتر مساوی ۲، ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر) برای سناریوهای مختلف نیز بیانگر این موضوع است که در سناریوی A1F1 تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۵ و ۱۰ میلی‌متر کاهش خواهد یافت که این کاهش بیشتر در ماه‌های آوریل تا جولای یعنی فصل خشک روی خواهد داد که می‌تواند در وقوع دوره‌های خشکی و تشدید کم آبی حوضه موثر باشد. این در حالی است که تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۵۰ میلی‌متر برای این سناریو افزایش خواهد یافت و این افزایش در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و نوامبر مشاهده می‌گردد. تشدید بارش‌های سنگین در این فصل می‌تواند وقوع سیلاب‌های شدید را در حوضه به همراه داشته باشد. که نتایج تحقیق عباسپور و همکاران (۲) نیز دلالت بر وقوع سیلاب‌های شدیدتر در اثر تغییر اقلیم در مناطق شمالی کشور دارد. با این وجود در فصل بهار و ماه‌های می و ژوئن تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۵۰ میلی‌متر کاهش خواهد یافت.

برای سناریوی B1 روند کلی، افزایش تعداد روزهای با بارندگی ۵ و ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. هر چند الگوی متفاوتی دارد به گونه‌ای که بارندگی بیش از ۵ میلی‌متر در ماه‌های فوریه، می و ژوئن بیش از بقیه ماه‌ها افزایش خواهد داشت و تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر در تمام ماه‌ها به جز نوامبر و دسامبر افزایش داشته‌است. در خصوص روزهای با بارندگی بیش از ۵۰ میلی‌متر نیز بیشترین تغییرات به صورت کاهش در ماه‌های نوامبر و دسامبر و افزایش در ماه فوریه و آوریل بوده‌است. در این سناریو، مدل CSIRO کاهش و دو مدل GCM دیگر روند افزایشی را نشان می‌دهند.

اثر تغییر اقلیم بر چرخه آب

در این مطالعه تاثیرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم با لحاظ تغییرات ایجاد شده در بارندگی و دما پیش‌بینی شده سه مدل GCM و دو سناریوی حدی انتشار گازهای گلخانه‌ای برای دوره زمانی ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. در جدول‌های ۲ و ۳ درصد تغییر نسبی مقادیر متوسط ماهانه و سالانه رواناب سطحی، آبدهی^۱، تبخیر و تعرق واقعی و مقدار آب خاک به عنوان مولفه‌های اصلی چرخه آب حوضه برای سناریوهای A1F1 و B1 ارایه شده‌است.

در سناریوی A1F1 به طور کلی میانگین GCM‌های مختلف، کاهش میزان رواناب سطحی ماهانه به میزان ۶/۳ میلی‌متر را نشان

جدول ۲- درصد تغییر نسبی پیش‌بینی شده ماهانه و سالانه برای متغیرهای هیدرولوژیکی حوضه گرگانرود برای سناریوی AIF1

GCMs	متغیر*	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین
CGCM2	SURQ	8/9	-22/8	81/6	17/9	-91/5	-98/9	-62/0	91/0	-39/9	-30/1	21/5	1/8	-10/2
	SW	-5/1	-13/7	-10/0	-28/5	-80/2	-66/9	34/1	28/2	-19/5	-25/0	-6/9	-9/3	-16/9
	ET	4/2	12/7	32/7	34/8	-23/4	-48/8	-45/9	-17/4	-12/2	-6/8	12/8	16/7	-3/4
	YIELD	36/1	12/6	95/8	47/4	-29/8	-26/9	-41/4	18/2	-28/9	-24/0	17/9	15/2	7/7
HadCM3	SURQ	76/4	34/2	-54/6	-87/7	-90/2	-94/0	-22/4	1/1	3/1	-34/3	-9/6	-67/7	-28/8
	SW	-4/1	-9/9	-26/2	-62/0	-75/6	-61/3	58/2	5/9	1/1	-23/4	-7/5	-20/3	-18/7
	ET	14/2	20/5	9/2	-18/5	-24/1	-26/7	-30/8	-28/8	-1/5	-8/1	0/6	0/3	-7/8
	YIELD	72/5	57/2	-19/9	-45/7	-64/1	-55/7	-43/2	-25/6	-9/4	-23/2	-6/0	-45/5	-17/4
CSIRO	SURQ	-8/3	-49/8	-4/1	-42/4	-79/6	-92/4	-37/6	22/4	-32/8	-24/1	76/9	25/9	-20/5
	SW	-4/9	-16/7	-13/5	-27/2	-66/2	-55/6	41/5	11/4	-11/7	-19/3	6/6	-4/0	-13/3
	ET	6/0	9/8	15/1	14/4	-8/4	-23/3	-25/6	-25/4	-10/4	-7/4	4/8	10/9	-3/3
	YIELD	32/8	-11/1	12/6	4/0	-39/9	-34/1	-37/1	-10/3	-26/2	-18/0	73/4	41/5	-1/0
*SURQ: رواناب سطحی SW: آب خاک ET: تبخیر و تعرق واقعی YIELD: آبدهی														

جدول ۳- درصد تغییر نسبی پیش‌بینی شده ماهانه و سالانه برای متغیرهای هیدرولوژیکی حوضه گرگانرود برای سناریوی B1

GCMs	متغیر*	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین
CGCM2	SURQ	-7/5	5/3	12/0	44/0	-40/2	-89/5	-61/5	55/1	-13/0	-19/6	8/5	-0/4	-8/9
	SW	-1/7	-6/0	-3/7	3/6	-39/8	-54/4	0/5	22/4	0/3	-14/5	-3/5	-3/2	-8/3
	ET	1/4	7/0	5/8	10/3	3/0	-23/0	-14/5	-12/6	-2/7	-7/2	3/6	2/7	-2/2
	YIELD	7/8	23/4	29/0	45/7	-5/8	-10/7	-29/5	12/5	-7/5	-10/2	11/5	6/7	6/1
HadCM3	SURQ	32/1	-2/2	8/3	25/7	-41/7	-60/6	-2/4	-18/6	-17/5	-18/1	48/2	23/9	-1/9
	SW	-0/2	-6/8	-5/3	2/7	-40/9	-32/0	32/3	-0/8	-7/5	-15/3	3/8	-0/3	-5/9
	ET	8/8	8/1	6/5	7/6	3/6	-2/1	0/5	-20/6	-7/0	-6/7	2/5	3/5	0/4
	YIELD	48/1	28/7	32/0	39/8	-6/9	-5/4	-6/9	-14/1	-13/4	-9/8	44/3	33/2	14/3
CSIRO	SURQ	0/1	-29/7	-15/8	-50/4	-73/7	-90/4	-39/2	19/1	-39/3	-10/6	60/9	5/0	-22/0
	SW	-3/0	-11/6	-10/6	-31/7	-60/5	-50/9	38/9	10/4	-15/2	-15/1	5/2	-3/8	-12/3
	ET	4/7	7/9	6/3	-0/6	-10/8	-21/8	-21/7	-21/9	-13/1	-6/0	0/8	7/1	-5/8
	YIELD	22/4	-3/7	-0/9	-22/3	-46/3	-40/8	-40/8	-14/7	-30/7	-9/6	53/5	17/8	-9/7
*SURQ: رواناب سطحی SW: آب خاک ET: تبخیر و تعرق واقعی YIELD: آبدهی														

تغییرات در مقدار آب خاک در ماه‌های آوریل تا سپتامبر با تغییرات نسبی از ۶۲ درصد (HadCM3) تا ۲۷/۲ درصد (CSIRO) مشاهده گردید (جدول ۳). این کمبود رطوبت در خاک ممکن است دوره‌های خشک شدیدی را در تابستان (ژوئن تا اگوست) که مصادف با فصل رویش محصولات است به همراه داشته باشد. در مقایسه با AIF1 میانگین سالانه تبخیر و تعرق در سناریوی B1 کاهش ۲/۲ درصد و ۵/۸ درصدی را برای مدل‌های CSIRO و CGCM2 نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژی حوزه آبخیز گرگانرود در شمال کشور انجام شد بدین منظور از پیش‌بینی‌های سه مدل GCM و دو سناریوی حدی برای

بیشترین افزایش تبخیر و تعرق به میزان ۳۴/۸ درصد در ماه آوریل بیشترین کاهش هم در ماه ژوئن به میزان ۴۸/۸ درصد روی داده است (جدول ۳). این الگوی تغییرات برای سناریوی B1 هم با تغییرات کمتر روی داده است به گونه‌ای که برای سناریوی AIF1 میانگین کاهش سالانه تبخیر و تعرق ۴/۸ درصد و برای B1 ۲/۵ درصد بوده است. کاهش تبخیر و تعرق کل در اثر تغییر اقلیم در تحقیقات یوو وانگ (۲۸)، دهارو مازومدار (۷) و فیکلین و همکاران (۸) نیز عنوان شده است هر چند الگوی ماهانه متناسب با منطقه متفاوت می‌باشد.

مقدار آب خاک نیز بجز در ماه‌های جولای و اگوست عموماً کمتر از دوره پایه بوده است. بیشترین دما در ماه ژوئن میزان آب خاک رابه کمترین میزان کاهش داده است. از این رو تغییرات در میزان آب خاک و تبخیر و تعرق ایجاد شده از ترکیب تاثیرات افزایش دما و تغییرات بارندگی در طول سال متفاوت می‌باشد. بیشترین

خاک نیز به میزان ۵/۲ تا ۱۳ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین آبدهی ۵/۳ تا ۱۰/۲ درصد افزایش و میزان تبخیر و تعرق بین ۳/۶- ۱/۶ درصد افزایش خواهد داشت. نتایج بدست آمده صرف نظر از جهت تغییرات هر یک از مولفه‌های هیدرولوژیکی، دلالت بر اهمیت الگوی زمانی تغییرات در طول سال دارد که نقش موثری در مدیریت منابع آب حوضه دارا می‌باشد. پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت اثرات بالقوه تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوضه لزوم توجه به بحث تغییر اقلیم و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب حوضه گرگانرود را متذکر می‌گردد.

لحاظ حداکثر دامنه عدم قطعیت استفاده گردید. مدل SWAT با توجه به کاربرد وسیع و موفقیت آمیز آن در ایران و جهان به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه انتخاب، واسنجی و اعتبارسنجی گردید. نتایج مطالعه نشان داد که میانگین بارندگی سالانه برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ به میزان ۳/۲ تا ۶/۷ درصد کاهش خواهد یافت همچنین بیشینه دمای سالانه برای مدل‌های مختلف از ۳ تا ۵/۷ و کمینه دمای سالانه ۲/۸ تا ۵/۲ درجه افزایش خواهد یافت. با استفاده از مدل SWAT تغییرات اقلیمی ذکر شده در وضعیت هیدرولوژی حوضه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این تغییرات اقلیمی در بخش آب، کاهش مقدار رواناب سطحی به میزان ۰/۴ تا ۷/۷ درصد را به همراه خواهد داشت. آب

منابع

- ۱- ذهبیون ب.، گودرزی م. و مساح بوانی ع. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین روانابحوضه در دوره های آبی تحت تاثیر تغییر اقلیم. نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، ۳(۳-۴): ۴۳-۵۸.
- ۲- مهندسین مشاور لار، مطالعه سیل و جریان های واریزه ای در استان گلستان، ۲۰۰۷، شرکت آب منطقه ای گلستان. ۴۲۵ ص.
- 3- Abbaspour K.C. 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol., Dübendorf, Switzerland.
- 4- 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): p. W10434.
- 5- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development I. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): p. 73-89.
- 6- Chang H. and Jung I.W. 2010. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon. *Journal of Hydrology*,. 388(3-4): p. 186-207.
- 7- Chen H., Xu C.Y., and Guo S. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*. 434-435(0): p. 36-45.
- 8- Chen J., F.P. Brissette, and R. Leconte, Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 2011. 401(3-4): p. 190-202.
- 9- Dhar S., and Mazumdar A. 2009. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case study in India. *Hydrological Processes*. 23(16): p. 2394-2406.
- 10- Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E. and Zhang, M. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374(1-2): p. 16-29.
- 11- Gosain A., Rao S., and Basuray D. 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science*, 90(3): p. 346-353.
- 12- Hamlet, A.F. and Lettenmaier D.P. 2007. Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western U.S. *Water Resour. Res.*, 43(6): p. W06427.
- 13- Jung I.W. and Chang H. 2011. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Willamette River Basin, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, 25(2): p. 258-277.
- 14- Kaini P., Nicklow J.W., and Schoof J.T. 2010. Impact of Climate Change Projections and Best Management Practices on River Flows and Sediment Load. Vol. 371.: ASCE. 234-234.
- 15- Labat D., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27(6): p. 631-642.
- 16- Legesse D., Vallet-Coulomb C., and Gasse F. 2003. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study south central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 275(1-2): p. 67-85.
- 17- Lettenmaier D., 1999. Water Resources Implications of Global Warming: A U.S. Regional Perspective. *Climatic Change*, 43(3): p. 537-579.
- 18- Liu D. and Zuo H. 2012. Statistical downscaling of daily climate variables for climate change impact assessment over New South Wales, Australia. *Climatic Change*, 115(3-4): p. 629-666.

- 19- Mitchell T.D., et al., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100), Tyndall Centre Working Paper.
- 20- Mkankam Kanga F. 2001. Impact of greenhouse gas induced climate change on the runoff of the Upper Benue River (Cameroon). *Journal of Hydrology*, 252(1–4): p. 145-156.
- 21- Moriasi D., et al., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASAE*, 50(3): p. 885-900.
- 22- Muttiyah R.S. and Wurbs R.A. 2002. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 27(3): p. 407-419.
- 23- Nash J.E. and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): p. 282-290.
- 24- Nearing M.A., et al., 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *CATENA*, 61(2-3): p. 131-154.
- 25- Phan D., Wu C., and Hsieh S. 2011. Impact of climate change on stream discharge and sediment yield in Northern Viet Nam. *Water Resources*, 38(6): p. 827-836.
- 26- Pruski F.F. and Nearing M.A. 2002. Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: A computer simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(1): p. 7-16.
- 27- Rosenberg N.J., Brown, R.A., Izaurralde, R.C. and Thomson, A.M. 2003. Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 117(1–2): p. 73-96.
- 28- Vaze J. and Teng J. 2011. Future climate and runoff projections across New South Wales, Australia: results and practical applications. *Hydrological Processes*, 25(1): p. 18-35.
- 29- Wu Y., Liu S., and Abdul-Aziz O. 2012. Hydrological effects of the increased CO2 and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT. *Climatic Change*, 110(3-4): p. 977-1003.
- 30- Yu P.S. and Wang Y.C. 2009. Impact of climate change on hydrological processes over a basin scale in northern Taiwan. *Hydrological Processes*, 23(25): p. 3556-3568.
- 31- Zarghami M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y. and Kanani, R. 2011. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3–4): p. 137-146.



Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gourganroud River Basin

M. Azari¹ - H.R.Moradi^{2*} - B. Saghafian³ - M. Faramarzi⁴

Received: 17-11-2012

Accepted: 13-04-2013

Abstract

Climate change is one of the most significant challenges that all living matters on the Earth needs to face. A warmer climate will accelerate the hydrologic cycle, altering rainfall, magnitude and timing of runoff. Iran might become one of the most vulnerable areas in the world regarding climate change. To study the effects of climatic variations, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was implemented to simulate the hydrologic regime on Gorganroud basin. The SUFI-2 algorithm in the SWAT-CUP program was used for parameter optimization using the monthly river discharge. The climate change scenarios were constructed using outcomes of three General Circulation Models (CGCM2, HadCM3 and SCIRO) for low and high levels of greenhouse gas emission scenarios (A1F1 and B1). The calibration and validation results of the SWAT model agreed well with the observed data. The study result showed that Compared with the present climate, the climate models predicted a -3.2% to -6.5% changes in annual precipitation, 3 to 5.7°C rises in maximum temperature, and 2.8 to 5.2°C rises in minimum temperature. SWAT predicted a -0.4% to -7.7% change for runoff, -5.2% to -13% change for soil water content, 5.3% to 10.2% change for water yield, and -1.6% to -3.6% decrease for evapotranspiration during 2010-2039 under all climate scenarios. These results highlight the strong impact of climate change in regional water resources and reflect the importance of incorporating these analysis into adaptive management in the future watershed management strategies.

Keywords: Climate Change, Hydrological Impacts Assessment, SWAT, Gourganroud

1,2- PhD Student and Associate Professor Department of Watershed Management Engineering, College of Natural Resources, Tarbiat Modares University (TMU)

(*-Corresponding Author Email: hrmoradi@modares.ac.ir)

3 - Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology