



ارزیابی شرایط آب - هواشناختی حوضه آبریز گرگان رود تحت اثر تغییر اقلیم با استفاده از

مدل MIROC-ESM

علیرضا دنبائی^۱، امیرپویا صراف^{۲*}

۱- دکتری مهندسی عمران، کارشناس حفاظت و بهره‌برداری، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط اقلیمی حوضه آبریز گرگان رود در استان گلستان بوده که در آن مدل SWAT توسط الگوریتم SUFI-2 با هدف بهبود نتایج شبیه‌سازی دبی حوضه، مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. مدل MIROC-ESM از سری مدل‌های گزارش پنجم هیأت بین دول تغییر اقلیم جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آب- هواشناسی حوضه و تحت چهار سناریوی انتشار به نام‌های ۲/۶، ۴/۵، ۶/۰ و ۸/۵ و در سه بازه‌ی زمانی آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰)، میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) مورد استفاده قرار گرفت؛ همچنین روند تغییرات حوضه با استفاده از آزمون من- کندال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات دما تحت سناریوی RCP4.5 در دوره‌ی زمانی آینده نزدیک و میانی و تحت سناریوی RCP6.0 و آینده‌ی میانی و دور از یک روند معنی‌دار افزایشی تبعیت کرده؛ به طوری که مؤلفه‌ی بارش در تمامی سناریوها از تغییرات کاهش‌ی غیرمعنی‌داری پیروی می‌کند. همچنین، تغییرات رواناب تحت سناریوی RCP4.5 و در دوره‌های زمانی آینده‌ی میانی و دور و تحت سناریوی RCP8.5 و در آینده دور از روند معنی‌دار کاهش‌ی تبعیت می‌نماید؛ به طوری که، مقادیر دما در یک مسیر افزایشی پیش می‌رود، در حالی که مقادیر بارش و رواناب یک روند کاهش‌ی را تا انتهای قرن ۲۱ در حوضه دنبال می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: آزمون من- کندال، تغییر اقلیم، سناریوی انتشار، گزارش پنجم هیأت بین‌الدول، مدل ارزیابی آب و خاک، گرگان رود، استان گلستان

۱- مقدمه

گزارش پنجم هیأت بین دول تغییر اقلیم^۱ نشان می‌دهد که گرمایش زمین به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای باعث تغییر در چرخه آب شده است. از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم می‌توان به تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش، نوع آن، جریانهای سطحی، تبخیر، افزایش سطح دریاها و خشکسالی و افزایش احتمال وقوع رخدادهای حدی اقلیمی مانند سیلاب و افزایش فراوانی و شدت آن در بعضی از مناطق کره زمین اشاره نمود (گودرزی و همکاران، ۲۰۱۹).

دو پارامتر مهم در هیدرولوژی و منابع آب، دما و بارش هستند. تأثیر تغییر اقلیم بر روی این دو پارامتر موضوع بسیاری از مطالعات در حوضه منابع آب بوده است (جهانبخش اصل و همکاران، ۲۰۱۶). دیرینه‌شناسی اقلیمی حاکی از وقوع تغییرات اقلیمی در طول تاریخ تکوین کره زمین می‌باشد؛ بطوری که این تغییرات در چند دهه گذشته، از دو جنبه نسبت به تغییرات اقلیمی باستانی متمایز است. نخست فعالیت‌های انسانی است که بیشترین نقش را در وقوع تغییرات اقلیمی فعلی، داشته و دوم آن که سرعت تغییرات اقلیمی اخیر نیز افزایش یافته است؛ به طوری که در بازه زمانی کوتاه، تغییرات زیادی در شرایط جوی کره زمین به وقوع می‌پیوندد (تلمر و همکاران، ۲۰۰۴).

میانگین دمای سطح کره زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای در حال افزایش بوده؛ به طوری که سناریوهای اخیر هیأت بین دول تغییر اقلیم افزایش جهانی دما را به میزان ۱/۱ درجه سانتی‌گراد در قرن حاضر پیش‌بینی می‌کنند. علاوه بر تغییر در میانگین متغیرهای اقلیمی، تغییر در مقادیر حدی بارش نیز نسبت به مقادیر گذشته آن از دیگر پیامدهایی خواهد بود که به معنای افزایش سال‌های خشک یا مرطوب می‌باشد (IPCC, 2007). به گونه‌ای که افزایش گازهای گلخانه‌ای ضمن گرمایش جهانی تأثیرات چشمگیری در میزان بارش و فرآیندهای رواناب و منابع آبی داشته است (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰ a).

برخی از مطالعات در رابطه با بررسی تغییرات اقلیمی بر روی حوضه‌های آبریز ایران و تأثیرات آن بر روی مؤلفه‌های آب‌شناختی در این مناطق در دوره‌های اخیر و آتی بر اساس مدل‌های ارزیابی گزارش چهارم هیأت بین دول تغییر اقلیم (AR4)^۳ انجام پذیرفته است که دارای قدرت تفکیک‌پذیری پایین و از سناریوهای انتشار قدیمی‌تر نسبت به مدل‌های ارزیابی گزارش پنجم هیأت مذکور استفاده می‌نماید (قربانی و همکاران، ۲۰۱۵).

1- Intergovernmental Panel of Climate Change; IPCC

3- Fourth assessment report; AR4

2- Telmer

بنابراین به نظر می‌رسد که مطالعات تغییر اقلیم در حوضه‌های آبریز ایران توسط مدل‌های اقلیمی با وضوح بالا و به‌ویژه، توسط مدل‌های ارزیابی گزارش پنجم و تحت سناریوهای جدید انتشار امری ضروری به نظر می‌رسد؛ به‌گونه‌ای که تحقیقات (افشار و همکاران، ۲۰۱۷) در رابطه با ارزیابی سالیانه مؤلفه‌های اقلیمی در حوضه آبریز کشف‌رود در دوره‌های آتی و با استفاده از گزارش پنجم هیأت بین دول تغییر اقلیم^۱ نشان داد که مؤلفه بارش از روند تغییرات کاهشی و افزایشی چشمگیری برخوردار بوده و مؤلفه دمای متوسط حوضه نیز روند افزایشی قابل توجهی با سطح اعتمادپذیری بیش از ۹۰ درصد از خود نشان می‌دهد؛ به‌علاوه، نتایج تمامی مدل‌ها و سناریوهای آن‌ها تا انتهای قرن ۲۱، حاکی از افزایش دمای حوضه بین ۰/۵۶ الی ۳/۳ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش به میزان ۱۰/۷ درصد در مقایسه با دوره‌ی تاریخی بود.

به‌علاوه مطالعه اثرات تغییر اقلیم در مناطق جنگلی شمال آمریکا با استفاده از پنج مدل CMIP5 و تحت دو سناریوی انتشار نتایج نشان داد که نه‌تنها میانگین سالانه دما نسبت به میانگین دوره‌ی مبناء در تمامی پنج مدل و تحت سناریوهای RCP از ۳/۲ تا ۸/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، بلکه میانگین بارش سالانه نیز روند افزایشی دارد (شانلی و همکاران^۲، ۲۰۱۵).

همچنین بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر پهنه‌های آبی نظیر دریاچه ویکتوریا در شرق آفریقا در قرن ۲۱ با استفاده از خروجی‌های مدل‌های گزارش پنجم حاکی از کاهش بیش از ۲۰ درصد بارش سالانه بود (آکورت و همکاران^۳، ۲۰۱۴).

از سوی دیگر مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آب‌شناختی شامل رواناب، تبخیر و تعرق در حوضه‌های براهامپورتا، گانگز و مقنا واقع در کشور بنگلادش به کمک پنج مدل گزارش پنجم و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 در سه دوره‌ی زمانی گذشته (۲۰۰۳-۱۹۷۹)، آینده‌ی نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۵) و آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۷۵) نشان داد که تا انتهای قرن ۲۱ در کل این سه حوضه دما تا حدود ۴/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (مسعود و همکاران، ۲۰۱۵).

استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI-2 و بررسی عملکرد آن در شبیه‌سازی آب‌شناختی در حوضه‌ی آبریز نیشابور نتایج نشان داد که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی دقیقی از جریان‌های کم نمی‌باشد (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۳).

به علاوه در پژوهشی مشابه ارزیابی عملکرد مدل SWAT جهت شبیه سازی جریان روزانه برای حوضه ی آبریز رودان (به عنوان یک حوضه ی آبریز نیمه خشک) نشان داد که عملکرد مدل SWAT قابل قبول بوده، اما این مدل تمایل دارد که جریانات اوج را هر دو دوره ی واسنجی و اعتبارسنجی کم برآورد نماید (جاجرمی زاده و همکاران، ۲۰۱۲).

همچنین استفاده از مدل اقلیمی CANESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و در سه بازه ی زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ و از مدل SDSM4.2 برای ریزمقیاس سازی داده های اقلیمی حوضه ی آبریز رودخانه گرگان رود نشان داد که تمامی سناریوها حداکثر افزایش دمای متوسط ماهانه را برای دمای حداکثر و حداقل به میزان ۰/۶ تا ۳/۲ درجه سانتی گراد در سه دوره ی پیش بینی نمودند. به علاوه بیشترین اختلاف دمای سالانه در دوره ی سوم پیش بینی یعنی ۲۰۷۱-۲۰۹۹ مشاهده شد. بررسی تغییرات بارش متوسط ماهانه بیانگر کاهش نرخ نزولات جوی در هر سه دوره ی پیش بینی بوده است (دنیائی و همکاران، ۲۰۱۹).

استفاده از مدل آماری LARS-WG و مدل مفهومی هیدرولوژیکی SWAT و همچنین بررسی قابلیت عملکرد شبکه بیزین و مدل ترکیبی موجک - شبکه عصبی تخمین میزان دبی جریان رودخانه برای حوضه آبریز لار در راستای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دما، بارندگی و رواناب در دوره های آتی نشان داد که بیشترین افزایش دما در دوره ی انتهایی و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 در فصل بهار و زمستان رخ خواهد داد (سلیمانی پور و همکاران، ۲۰۲۱).

در پژوهش حاضر اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای آب - هواشناسی حوضه ی آبریز گرگان رود در شهرستان گنبد و شبیه سازی آب شناختی منطقه با استفاده از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT)^۱ و بر اساس خروجی ریزمقیاس نمائی شده با استفاده از روش جداسازی فضائی تصحیح اریبی (BCSD)^۲ مدل تغییر اقلیم MIROC-ESM و تجزیه و تحلیل خروجی این مدل با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش پیش بینی های آتی در سه بازه ی زمانی آینده ی نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۵)، میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۵) در مقایسه با دوره ی تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۱) صورت پذیرفت. نوآوری این مقاله، کاربرد مدل گردش عمومی مندرج در گزارش ارزیابی پنجم هیأت بین دول تغییر اقلیم در دوره ی مطالعاتی و نیز در

1- Soil and Water Assessment Tool

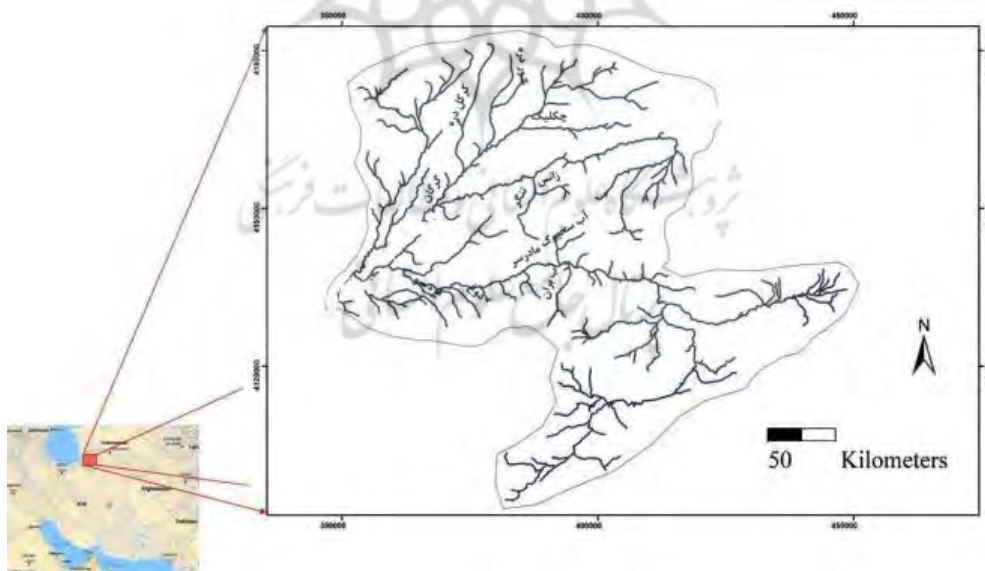
2- Bias correction spatial disaggregation

دوره‌های آبی با استفاده از ریزمقیاس نمائی BCSD مدل تغییر اقلیم MIROC-ESM می‌باشد که در پژوهش‌های قبلی از آن استفاده نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خصوصیات منطقه‌ی مطالعاتی

حوضه آبریز گرگان رود در قسمت جنوب شرقی دریای خزر قرار داشته و در مقیاس کلان بخشی از حوضه آبریز دریای خزر تلقی می‌گردد. حوضه آبریز گرگان رود در محدوده‌ی طول جغرافیایی $54^{\circ}00'$ تا $56^{\circ}29'$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ}36'$ تا $37^{\circ}47'$ شمالی واقع شده و از شمال و شرق به حوضه اترک، از جنوب به حوضه کویر نمک و از جنوب غربی به حوضه نکارود متصل است. مساحت حوضه 12935 کیلومتر مربع بوده که بیش از نیمی از آن را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد گرگان رود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌ی حوضه آبریز دریای خزر بوده از منتهالیه غرب کوه‌های خراسان سرچشمه گرفته و وارد منطقه کلانگه شده و نهایتاً پس از عبور از ترکمن صحرا و شمال گرگان وارد خلیج گرگان می‌شود. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه را مشخص نموده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه
Fig. (1): Geographical location of the study area

از جمله شاخه‌های مهم گرگان‌رود می‌توان به رودخانه‌های زاو، دوغ، اوغان، قلی‌تپه، چهل‌چای، نرماب، خرمالو، قره‌چای، سیاه‌جوی، سرمه‌رود، زرینگل، کبودوال، محمدآباد و جعفرآباد اشاره کرد. گرگان‌رود، رودخانه‌ای دائمی بوده در حدود ۶۰ رودخانه را در طول مسیر به خود ملحق می‌کند. در حال حاضر، سه سد مخزنی به ترتیب از بالادست به نام‌های بوستان، گلستان و وشمگیر بر روی گرگان‌رود ساخته شده‌اند. میانگین سالانه‌ی دما در این حوضه از حدود ۱۷ درجه سانتی‌گراد در نواحی کم ارتفاع تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات جنوبی متغیر می‌باشد (دنیائی و همکاران، 2020b). با عنایت به پتانسیل خاک‌های مرغوب، این منطقه، سهم قابل ملاحظه‌ای در تولیدات کشاورزی در کشور دارد. آورد رودخانه یگرگان‌رود بستگی تام به بارش منطقه داشته که غالباً در فصول زمستان و بهار به وقوع می‌پیوندد. متوسط بارندگی این حوضه بالغ بر ۲۲۳ میلی‌متر در سال بوده به‌طوری‌که این مهم خود بر تنوع گونه‌های گیاهی و جانوری مؤثر بوده است.

۲-۲- شبیه‌سازی آب‌شناختی با مدل SWAT

شبیه‌سازی آب‌شناختی در مدل SWAT به دو فاز اصلی تقسیم‌بندی می‌شود: ابتدا، فاز زمین که کنترل‌کننده‌ی میان ورودی آب، رسوب، عناصر غذایی و آلودگی‌های شیمیایی به کانال اصلی در هر زیرحوضه می‌باشد و سپس فاز آب یا فاز روندیابی که کنترل‌کننده‌ی حرکت آب، رسوب و عناصر غذایی و شیمیایی درون شبکه آبراهه‌ی اصلی هر زیرحوضه تا خروجی هر زیرحوضه است. هر زیرحوضه در مدل به زیرمجموعه‌هایی به نام واحد پاسخ آب‌شناختی تقسیم‌بندی می‌شود که در واقع، واحدهای همگن از لحاظ متغیرهای خاک، کاربری اراضی و شیب می‌باشد (معماریان و همکاران، ۲۰۱۴).

در این پژوهش، رواناب سطحی با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)^۱ محاسبه گردید (USDA-SCS, 1986) و از معادله مانینگ جهت محاسبه‌ی نرخ و سرعت جریان و از روش ماساکینگام نیز جهت روندیابی استفاده شد. نهایتاً، پایگاه داده crop در مدل SWAT جهت بهینه‌سازی متغیرهای رشد گیاه متناسب با منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT

در این پژوهش، از الگوریتم عدم‌قطعیتی SUFI-2 (عباسپور، 2007) جهت بررسی آنالیز حساسیت، واسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT استفاده گردید. علت انتخاب الگوریتم SUFI-2، توانایی این برنامه در مدیریت

1- Soil Conservation Service; SCS

تعداد زیاد متغیرها، هم‌زمانی آنالیزهای حساسیت و عدم قطعیت، واسنجی و اعتبارسنجی است. الگوریتم فوق برای هر یک از متغیرهای ورودی مدل یک مقدار t-Stat ارائه داده و سپس متغیرهای حساس را مشخص می‌کند. این الگوریتم حساسیت نسبی را بر پایه تقریب‌های خطی ارائه می‌دهد؛ از این رو، تنها اطلاعاتی جزئی درباره حساسیت تابع هدف نسبت به متغیرهای مدل را فراهم می‌کند. مقادیر قدر مطلق t-Stat میزان حساسیت هر متغیر را نشان می‌دهد و متغیرهای با مقدار t-Stat بیشتر دارای حساسیت نسبی بیشتری می‌باشند. از طرف دیگر، این الگوریتم یک مقدار p-value را برای هر متغیر به منظور تعیین میزان معنی‌داری حساسیت نسبی آن‌ها ارائه می‌کند که هر چه مقدار آن به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده معنی‌داری بیشتر حساسیت متغیر می‌باشد (معماریان و همکاران، ۲۰۱۴). در این الگوریتم عدم قطعیت متغیرها دربرگیرنده‌ی تمام منابع عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی و متغیرهای موجود در مدل‌سازی می‌باشد (عباسپور، ۲۰۰۷). محدوده‌ی عدم قطعیت در الگوریتم فوق می‌تواند با شناسایی یک محدوده از متغیرها که عدم قطعیت کل داده‌های خروجی را کاهش می‌دهد، محدود گردد. جهت پیاده‌سازی متغیرهای بهینه، الگوریتم SUFI-2 آنالیز واسنجی و عدم قطعیت را با کم‌ترین تعداد تکرار و کوچک‌ترین پهنای باند عدم قطعیت احتمالی ترکیب می‌نماید (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵) و یک مجموعه از محدوده متغیرها برای تمامی منابع عدم قطعیت (شامل متغیرها، مدل مفهومی، داده‌های ورودی و ...) ترسیم می‌نماید. در مدل SWAT متغیرها، عدم قطعیت‌ها و تجزیه و تحلیل آماری از طریق یک تابع سازگاری مناسب محاسبه می‌گردد. در این پژوهش از تابع سازگاری نش - ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف جهت واسنجی الگوریتم SUFI-2 استفاده گردید (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰).

مقدار ایده‌آل این ضریب زمانی حاصل می‌گردد که مقدار آن $0/75$ تا یک باشد و زمانی که این ضریب بیشتر از $0/36$ باشد، نتایج ممکن است رضایت‌بخش باشند (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷). درجه عدم قطعیت توسط دو فاکتور به نام‌های r-factor و P-factor محاسبه می‌گردد. P-factor عبارت است از درصد داده‌های مشاهده‌ای که در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد در سطوح $2/5$ و $97/5$ درصد از تابع توزیع تجمعی متغیر خروجی محاسبه می‌گردد (معماریان و همکاران، ۲۰۱۴). r-factor از تقسیم میانگین باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد بر انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای حاصل می‌گردد. الگوریتم SUFI-2 به دنبال طیفی از متغیرها می‌باشد که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در پهنای باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شوند. زمانی که صد درصد داده‌های مشاهداتی در پهنای باند عدم

قطعیت ۹۵ درصد قرار گیرند، بیشترین مقدار P-factor برابر عدد یک حاصل می‌شود. کمترین مقدار r-factor نیز نشانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد (عباسپور و همکاران، 2015). جهت اعتبارسنجی، محدوده‌های متغیرهای واسنجی شده بدون هیچ‌گونه تغییراتی و تنها با یک مرحله تکرار و با همان تعداد شبیه‌سازی به کار گرفته شده در مرحله‌ی واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۴- مدل و سناریوهای واداشت تابشی در گزارش پنجم

ارزیابی تغییر اقلیم برخلاف سناریوهای انتشار استفاده شده در مدل‌های گزارش ارزیابی چهارم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (AR4)، در گزارش ارزیابی پنجم (AR5) از نماینده‌ی خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای^۱ (RCP) استفاده می‌گردد، سناریوهای جدید انتشار بر اساس سطح واداشت تابشی نور خورشید تا سال ۲۱۰۰ میلادی بنا نهاده شده‌اند. از بین جدیدترین مدل‌های مستخرج از گزارش پنجم، مدل MIROC-ESM جهت بررسی تغییرات اقلیم آبی پژوهش حاضر، انتخاب گردید؛ زیرا این مدل بر اساس معیارهای ارزیابی بیش‌ترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی حوضه از خود نشان داد که نتایج مطالعات (افشار و همکاران، ۲۰۱۷) این نتایج را پشتیبانی و تأیید می‌کند. این مدل شامل چهار سناریوی واداشت تابشی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشند (فورن فان و همکاران^۲، 2011)؛ به‌گونه‌ای که RCP2.6، کم‌ترین میزان انتشار را دار بوده و کل واداشت تابشی تا سال ۲۰۵۰ میلادی به اوج خود یعنی ۳ وات بر مترمربع خواهد رسید و بعد از آن روند کاهشی را دنبال خواهد کرد. سناریوی RCP4.5 یک سناریوی ثابت با افزایش نیروی واداشت تابشی کل تا سال ۲۰۷۰ میلادی و با غلظت‌های پایدار بعد از سال ۲۰۷۰ میلادی می‌باشد؛ همچنین سناریوی RCP8.5 به‌طور مداوم در حال افزایش نیروی واداشت تابشی تا انتهای قرن ۲۱ بوده و تقریباً برابر ۸/۵ وات بر مترمربع می‌باشد (چونگ‌های و همکاران^۳، ۲۰۱۲).

مدل‌های گردش عمومی جو یک فرصت مناسب را جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده و تحت خطوط سیر مختلف یا سناریوهای واداشت تابشی فراهم می‌آورد. این مدل‌ها دارای وضوح نسبتاً پائین بوده و برای مطالعات در سطح منطقه‌ای و محلی مناسب نمی‌باشند؛ بنابراین خروجی این مدل‌ها به منظور استفاده در مقیاس منطقه‌ای بایستی ریزمقیاس شوند (میرزایی و همکاران، 2021). ریزمقیاس‌نمائی به منظور تجزیه و تحلیل روند آب‌شناختی منطقه‌ای، به دو رویکرد دینامیکی و آماری تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از روش

1- Representative Concentration Pathway; RCP

2- Vuuren Van

3- Chong-Hai

ریزمقیاس‌نمائی آماری تحت عنوان روش جداسازی فضایی تصحیح‌آریبی (BCSD) استفاده گردید (احمد و همکاران، ۲۰۱۳).

روش BCSD در سه مرحله انجام می‌پذیرد. در مرحله اول اصلاح انحراف آماری شبیه‌سازی‌های مؤلفه‌های بارش و دما در مقیاس شبکه مدل‌های گردش عمومی جو و در گام زمانی ماهانه محاسبه می‌گردد. در مرحله دوم، ریزمقیاس‌نمائی فضایی از شبکه مدل‌های گردش عمومی به شبکه مورد نظر (محلی یا منطقه‌ای) انجام می‌پذیرد و در مرحله سوم خروجی‌ها با مقیاس‌های ماهانه به مقیاس زمانی روزانه جداسازی می‌گردند (افشار و همکاران، ۲۰۱۷؛ برک و همکاران، ۲۰۱۳).

در این پژوهش، تمامی خروجی‌های مدل MIROC-ESM به شبکه‌هایی با قدرت تفکیک‌پذیری ۰/۵ درجه جهت مقایسه‌ی دقیق بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی، ریزمقیاس گردیدند. پس از ریزمقیاس‌نمائی داده‌های اقلیمی، با توجه به مختصات ایستگاه مشاهداتی گنبد داده‌های تاریخی چهار ایستگاه در مجاورت ایستگاه مرجع با فواصل نیم درجه استخراج گردید. در گام دوم، اطلاعات تاریخی ایستگاه مرجع و با در اختیار داشتن اطلاعات چهار ایستگاه اطراف آن‌ها به کمک روش فاصله وزنی معکوس^۳ (IDW)، حاصل گردید و در گام نهایی، با استفاده از میانگین‌گیری به روش چندضلعی تیسن و به‌صورت وزن‌دهی مکانی- مساحتی، داده‌ها استخراج گردیدند. اعتبارسنجی مدل با استفاده از ضرایب ناش- ساتکلیف (NS)، درصد ضریب اریبی (PBIAS)، نسبت جذر ریشه مربعات خطا به انحراف معیار استاندارد داده‌های مشاهداتی (RSR) و ضریب تعیین (R^۲) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند (معظمی‌گودرزی و همکاران، ۲۰۲۰).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - Q_{s,t})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{s,t} - Q_{m,t})}{\sum_{t=1}^T Q_{m,t}} \times 100 \quad (2)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - Q_{s,t})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \bar{Q}_m)^2}} \quad (3)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \bar{Q}_m) \times (Q_{s,t} - \bar{Q}_s)}{\left[\sum_{t=1}^T (Q_{m,t} - \bar{Q}_m)^2 \right]^{0.5} \times \left[\sum_{t=1}^T (Q_{s,t} - \bar{Q}_s)^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (4)$$

در روابط فوق $Q_{m,t}, \bar{Q}_m, Q_{s,t}, \bar{Q}_s$ و T به ترتیب دبی‌مشاهداتی، دبی شبیه‌سازی‌شده، متوسط دبی‌مشاهداتی، متوسط دبی شبیه‌سازی‌شده و کل دوره زمانی می‌باشند.

۲-۵- تحلیل روند سری‌های زمانی داده‌های اقلیمی

از آنجاکه هدف پژوهش حاضر تجزیه و تحلیل روند تغییرات بارش و دما در مدل گزارش ارزیابی پنجم (MIROC-ESM) و اثرات آن بر رواناب می‌باشد؛ لذا از آزمون غیر پارامتری من-کندال استفاده گردید. آزمون فوق یک روش آماری است که به‌طور گسترده‌ای برای تشخیص روند تغییرات در متغیرهای آب‌شناختی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون من-کندال به‌عنوان یک آزمون غیر پارامتری برای تشخیص روند توسط Mann (1945) و به‌عنوان یک آزمون توزیع آماری برای بررسی روند غیرخطی و نقطه عطف توسط Kendall (1975) فرموله گردید. در این آزمون آماره S به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (افشار و همکاران، 2017):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, & (X_j - X_i) > 0 \\ 0, & (X_j - X_i) = 0 \\ -1, & (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

در روابط فوق X_i و X_j داده‌های مربوط به نقطه‌ی i ام و j ام می‌باشند. مقادیر افزایشی یا کاهش‌ی برای آزمون آماری Z_c نشان‌دهنده‌ی یک روند رو به بالا یا رو به پایین می‌باشد و اگر Z_c از آماره توزیع نرمال استاندارد بیشتر باشد روند تغییرات قابل ملاحظه و معنی‌دار می‌باشد (افشار و همکاران، ۲۰۱۷).

۲-۵- تحلیل حساسیت متغیرهای مدل

جهت تجزیه و تحلیل حساسیت مدل از الگوریتم SUFI-2 که در قالب نرم افزار SWAT_CUP به مدل SWAT لینک می شود، استفاده گردید. پس از ۵۰۰ مرحله اجرا الگوریتم در نهایت، ۱۷ متغیر در تولید رواناب حوضه مطالعاتی به عنوان متغیرهای مؤثر شناخته شدند.

۲-۶- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

با هدف بهبود نتایج شبیه سازی دبی حوضه گرگان رود، مدل SWAT با توجه به اطلاعات ایستگاه آب شناسی ورودی سد وشمگیر و در مقیاس ماهانه با استفاده از الگوریتم SUFI-2 واسنجی و اعتبارسنجی گردید. فرآیند واسنجی با استفاده از آمار ۲۰ ساله دبی ماهانه (۲۰۱۵-۱۹۹۵) و اعتبارسنجی آن با استفاده از آمار ۳ ساله دبی ماهانه (۲۰۱۹-۲۰۱۶) انجام پذیرفت. شایان ذکر است که در اکثر ایستگاه های مشاهداتی کشور، داده ها و اطلاعات ناقص بوده که از عوامل مختلفی (نظیر خطاهای انسانی، خطاهایی دستگاه اندازه گیری و ...) حاصل می گردد که خود باعث خطا و عدم قطعیت می گردد. از طرف دیگر در پژوهش حاضر ۲/۶ درصد داده ها و اطلاعات حاصله از ایستگاه مشاهداتی ناقص و مفقود و احیاناً داده های پرت بوده که به نسبت کل داده های موجود قابل صرف نظر کردن می باشد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب R^2 و NS بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی صورت پذیرفت (روابط (۱) و (۴)).

۳- یافته ها و بحث

پس از اجرای مدل SWAT، در مجموع، ۵۴۲ واحد پاسخ آب شناسی^۱ (HRU) در ۲۵ زیرحوضه استخراج گردید. نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی و همچنین تحلیل عدم قطعیت مدل در بخش های زیر آورده شده است.

در جدول ۱ مقادیر t-stat و p-value برای متغیرهای مختلف مؤثر در رواناب خروجی حوضه نشان داده شده است. بررسی و مقایسه ی مقادیر t-stat بدست آمده برای هر متغیر نشان می دهد که متغیرهای SOL_BD، CN و SOL_K از بیشترین میزان حساسیت نسبی و متغیرهای CH_K، SMFMX و SOL_AWC از کمترین میزان حساسیت نسبی برخوردار می باشند که نتایج مطالعات معماریان و همکاران (۲۰۱۴) نیز تأییدکننده ی این نتایج می باشد.

1- Hydrologic Response Unit; HRU

جدول (۱): متغیرهای وارد شده به مدل SWAT-CUP و نتایج p-value و t-stat پس از تحلیل حساسیت
Table (1): SWAT-CUP model entered parameters with P-Value / T-Stat values after sensitivity analysis

t-stat	p-value	Abbreviation	علامت اختصاری	Parameters	متغیرها
۲۴/۱۲	۰	CN		Curve Number	شماره ی منحنی
۱/۰۴	۰/۱۳	ALPHA_BF		ضریب عکس العمل جریان آب زیرزمینی	
				Groundwater Flow Reaction Coefficient	
-۱/۱	۱/۰۴	GW_DELAY		Groundwater Flow Delay	زمان تأخیر جریان آب زیرزمینی
-۱/۱۸	۰/۲۶	ESCO		Soil Evaporation Compensation Factor	فاکتور جبران تبخیر از خاک
-۲۱	۰/۵۸	EPCO		Plant Water Compensation Factor	فاکتور جبران برداشت آب گیاه
۴/۱۹	۰	SOL_K		Soil Saturated E.C.	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع
-۰/۱۶	۰/۶۴	SOL_AWC		Soil Available Water Capacity	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک
۴/۷۳	۰	SOL_BD		Soil Bulk Density	چگالی توده خاک
-۱/۴۲	۰/۳	SLSUBBSN		Sub-Basin Slope Length	متوسط طول شیب
۱/۱۵	۰/۳	OV_N		Brae Manning Coefficient	ضریب زبری دامنه
۰/۸۴	۰/۳۲	SFTMP		Snowfall temperature	دمای ریزش برف
۰/۰۸	۰/۹۶	SMFMX		Snowmelt temperature	دمای ذوب برف
-۰/۱۶۴	۰/۵۶	SMFMN		Snowmelt Temperature	دمای ذوب برف
-۰/۱۸۵	۰/۳۳	TIMP		Snow Mass Temperature Delay	ضریب تأخیر دمای توده برف
-۱,۰۱	۰/۳۲	SURLAG		Surface Runoff lag Time	ضریب تأخیر جریان سطحی
۱/۸۵	۰/۰۷	CH_N		Main Channel Manning Coefficient	ضریب مانینگ در کانال اصلی
-۰/۰۲	۰/۹۸	CH_K		Main Channel E.C.	هدایت هیدرولیکی در کانال اصلی

بر اساس نتایج، مقادیر ضرایب R^2 و NS برای مؤلفه ی رواناب در مرحله ی واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۷۷ و در مرحله ی اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۴ و ۰/۷۱ برآورد گردید. مقایسه ی این شاخص ها در مرحله ی واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل در مرحله ی اعتبارسنجی، ضعیف تر عمل نموده است (جدول (۲)). نتایج مدل با توجه به اینکه مقادیر ضریب NS در مرحله ی اعتبارسنجی بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ می باشد، قابل قبول بوده، ولی در مجموع رضایت بخش نمی باشد. به طوریکه نتایج حاصل از این بخش با نتایج حاصل از پژوهش

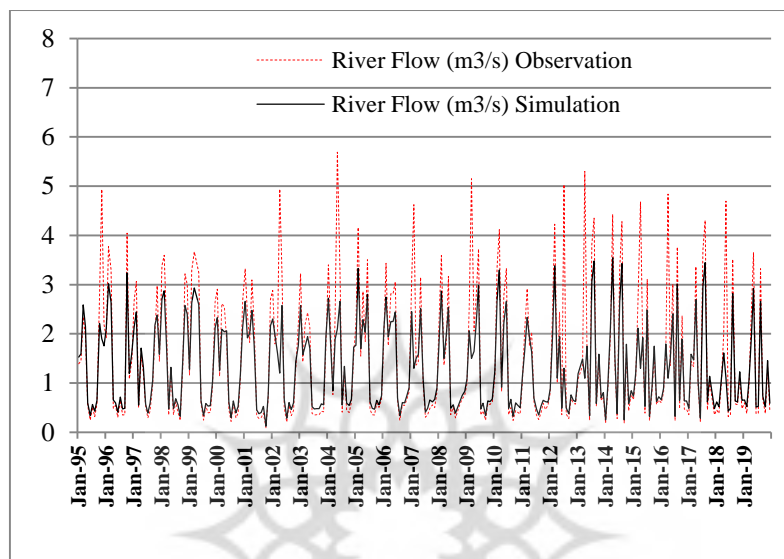
موتوویلوف و همکاران^۱ (۱۹۹۹) کاملاً منطبق می‌باشد. مع الوصف دلیل عملکرد نه‌چندان رضایت‌بخش مدل را می‌توان به موارد زیر مرتبط دانست:

- ۱- وجود خطا در آمار مشاهداتی ایستگاه آب‌سنجی و باران‌سنجی؛
- ۲- عدم در دسترس بودن آمار و اطلاعات پیرامون میزان آب برداشت‌شده از رودخانه توسط باغات و چاه‌های بالادست حوضه؛
- ۳- عدم در دسترس بودن آمار دقیق از آبدهی چشمه‌های دره‌ای و تماسی موجود در ستیغ حوضه؛

جدول (۲): مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی
Table (2): Values of model evaluation indices in the calibration and validation stage

Validation اعتبارسنجی	Calibration واسنجی	Model Evaluation شاخص‌های ارزیابی
۰/۷۴	۰/۷۹	R ²
۰/۷۱	۰/۷۷	NS
۰/۷۰	۰/۷۵	P-factor
۰/۴۲	۰/۳۴	r-factor

شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی کارایی مدل در شبیه‌سازی دبی پایه و دبی اوج و همچنین انطباق زمانی آن‌ها با داده‌های مشاهداتی در طی فرآیندهای واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل مقادیر دبی اوج را کمتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است، که متوسط دبی ماهانه شبیه‌سازی‌شده در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نیز مؤید این مطلب می‌باشد؛ همچنین متوسط دبی ماهانه شبیه‌سازی‌شده در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۱/۳۳ و ۱/۲ مترمکعب در ثانیه می‌باشد؛ درحالی‌که این مقادیر برای داده‌های مشاهداتی در این دو دوره به ترتیب برابر ۱/۵۵ و ۱/۳۷ مترمکعب در ثانیه می‌باشند.



شکل (۲): مقایسه مقادیر ماهانه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پس از مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

Fig. (2): Comparison of monthly values of observed and simulated runoff after calibration and validation Steps

علت منطبق نبودن مقادیر شبیه‌سازی مدل در دبی اوج با مقادیر مشاهداتی را می‌توان به کاربرد روش تبخیر تعرق گیاهی که سبب کاهش بیش از حد رواناب برای جریانات اوج می‌گردد، نسبت داد؛ علاوه بر این، استفاده از روش شماره منحنی (SCS) جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه در مدل SWAT، باعث می‌گردد که مدت‌زمان و شدت بارندگی در نظر گرفته نشود. این محدودیت برای حوضه‌های آبخیز که در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند، قابل توجه می‌باشد. این مهم در سال ۲۰۱۲ توسط جاجرمی‌زاده و همکاران نیز به صراحت اعلام شده بود و لذا با نتایج حاصل از پژوهش ایشان کاملاً منطبق است.

از دیگر سو، ضعف مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب برای برخی ماه‌ها را احتمالاً به دلیل ضعف ویژگی‌های فرآیند ذوب برف در مناطق کوهستانی حوضه، عدم وجود داده‌های دبی مناسب و کافی و همچنین، عدم اطلاعات ورودی جهت شبیه‌سازی دبی تخلیه آب زیرزمینی و اندرکنش بین رودخانه و آب زیرزمینی دانست (رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸).

درجه‌ی عدم قطعیت توسط دو فاکتورهای r-factor و P-factor محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بیش از ۵۰ درصد داده‌های مشاهداتی در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی درون باند تخمین عدم قطعیت ۹۵

درصد قرار می‌گیرند و از آنجایی که مقادیر ضریب r-factor بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و میزان مطلوب آن کمتر از یک است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده انطباق بیشتر مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است، نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده عدم قطعیت نسبتاً قابل قبول شبیه‌سازی است (عباسپور و همکاران، ۲۰۱۵).

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی تغییر اقلیم و تجزیه و تحلیل روند تغییرات

متغیرهای دما و بارش با استفاده از روش BCSD برای ۴ سناریوی انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP6 و RCP8.5 و برای ۳ دوره زمانی آینده‌های نزدیک، میانی و دور ریزمقیاس‌نمایی شدند (افشار و همکاران، 2017). با در نظر گرفتن مؤلفه بارش به‌عنوان مهم‌ترین عامل در بررسی موضوعات اقلیمی، از بین جدیدترین مدل‌های مستخرج در گزارش ارزیابی پنجم، مدل MIROC-ESM که بیشترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی از خود نشان داد، انتخاب گردید (جدول ۳). خروجی‌های ریزمقیاس‌نمایی شده مدل (مؤلفه‌های بارش و دمای حداقل و حداکثر در دوره‌های زمانی آینده) در ابتدا وارد مدل SWAT گردید سپس رواناب پیش‌بینی‌شده برای دوره‌های زمانی آینده استخراج گردید (معظمی‌گودرزی و همکاران، 2020). تجزیه و تحلیل روند سالانه مدل MIROC-ESM تحت چهار سناریوی انتشار و در سه دوره‌ی زمانی آینده در مقایسه با دوره‌ی مشاهداتی برای مؤلفه‌های آب - هواشناسی در جداول ۴ تا ۷ ارائه شده است.

جدول (۳): نتایج معیارهای ارزیابی مدل و اعتبارسنجی

Table (3): Results of MIROC-ESM evaluation indices

شاخص‌های ارزیابی مدل				مدل منتخب
Model evaluation Indices				Selected Model
RSR	R ²	PBIAS	NS	
۰/۳۱	۰/۹۶	-۲/۵۶	۰/۹۴	MIROC-ESM

جدول (۴): تجزیه و تحلیل روند تغییرات متغیرهای آب - هواشناسی تحت سناریوی انتشار RCP2.6

Table (4): Variation analysis in hydro-climatic parameters under RCP2.6 scenario

روند تغییرات	Zc	P-Value	دوره‌ی زمانی	مؤلفه‌های اقلیمی
Variation Trend			Time Period	Climatic Component
کاهشی Decreasing	-۰/۰۵۳	۰/۳۸۲	Near Future آینده نزدیک	بارش Rainfall
کاهشی Decreasing	۰/۰۰۸	۰/۷۲۵	Mid Future آینده میانی	
کاهشی Decreasing	۰/۰۵۴	۰/۱۹۶	Far Future آینده دور	
افزایشی Increasing	۰/۰۳۷	۰/۰۶۵	Near Future آینده نزدیک	دما Temperature
افزایشی Increasing	۰/۰۲۵	۰/۰۸۹۲	Mid Future آینده میانی	
افزایشی Increasing	۰/۰۳۶*	۰/۰۳۹	Far Future آینده دور	

Decreasing	کاهشی	-۰/۰۵۱	۰/۳۳۷	Near Future	آینده نزدیک	رواناب Runoff
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۲۲	۰/۷۶۵	Mid Future	آینده میانی	
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۶۷	۰/۰۱۳۷	Far Future	آینده دور	

جدول (۵): تجزیه و تحلیل روند تغییرات متغیرهای آب - هواشناسی تحت سناریوی انتشار RCP4.5

Table (5): Variation analysis in hydro-climatic parameters under RCP4.5 scenario

روند تغییرات Variation Trend	Zc	P-Value	دوره ی زمانی Time Period	مؤلفه های اقلیمی Climatic Component		
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۴۴	۰/۳۳۲	Near Future	آینده ی نزدیک	بارش Rainfall
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۵۹	۰/۱۲۳	Mid Future	آینده ی میانی	
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۶۷	۰/۲۹۱	Far Future	آینده ی دور	
Increasing	افزایشی	۰/۰۳۵*	۰/۰۱۷	Near Future	آینده ی نزدیک	دما Temperature
Increasing	افزایشی	۰/۰۲۳*	۰/۰۱۹	Mid Future	آینده ی میانی	
Increasing	افزایشی	۰/۰۲۷	۰/۴۵	Far Future	آینده ی دور	
Decreasing	کاهشی	۰/۰۴۸	۰/۲۵۸	Near Future	آینده ی نزدیک	رواناب Runoff
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۸۴*	۰/۰۴۳	Mid Future	آینده ی میانی	
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۸۸*	۰/۰۵۶	Far Future	آینده ی دور	

* نشان دهنده ی معنی دار بودن روند تغییرات در سطح ۵ درصد می باشد.

جدول (۶): تجزیه و تحلیل روند تغییرات متغیرهای آب - هواشناسی تحت سناریوی انتشار RCP6.0

Table (6): Variation analysis in hydro-climatic parameters under RCP6.0 scenario

روند تغییرات Variation Trend	Zc	P-Value	دوره ی زمانی Time Period	مؤلفه های اقلیمی Climatic Component		
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۲۶	۰/۵۹۹	Near Future	آینده ی نزدیک	بارش Rainfall
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۳۶	۰/۳۹۵	Mid Future	آینده ی میانی	
Decreasing	کاهشی	-۰/۰۰۴	۰/۸۹۵	Far Future	آینده ی دور	
Increasing	افزایشی	۰/۰۰۸	۰/۹۸	Near Future	آینده ی نزدیک	دما Temperature
Increasing	افزایشی	۰/۰۳۵*	۰/۰۱۵	Mid Future	آینده ی میانی	

Increasing افزایشی	۰/۰۷۶*	۰/۰۰۰۲	آینده‌ی دور Far Future	
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۲۲	۰/۵۵۳	آینده‌ی نزدیک Near Future	
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۵۵	۰/۱۵۲	آینده‌ی میانی Mid Future	رواناب Runoff
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۰۷	۰/۸۵۲	آینده‌ی دور Far Future	

* نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن روند تغییرات در سطح ۵ درصد می‌باشد.

جدول (۷): تجزیه و تحلیل روند تغییرات متغیرهای آب - هواشناسی تحت سناریوی انتشار RCP8.5

Table (7): Variation analysis in hydro-climatic parameters under RCP8.5 scenario

روند تغییرات Variation Trend	Zc	P-Value	دوره‌ی زمانی Time Period	مؤلفه‌های اقلیمی Climatic Component
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۴۲	۰/۲۱۳	آینده‌ی نزدیک Near Future	بارش Rainfall
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۴۵	۰/۴۸۸	آینده‌ی میانی Mid Future	
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۴۹	۰/۲۲۶	آینده‌ی دور Far Future	
Increasing افزایشی	۰/۰۴۲	۰/۹۹	آینده‌ی نزدیک Near Future	دما Temperature
Increasing افزایشی	۰/۰۶۶*	۰/۰۰۱	آینده‌ی میانی Mid Future	
Increasing افزایشی	۰/۰۵۱	۰/۰۰۱	آینده‌ی دور Far Future	
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۸۶	۰/۰۳۹	آینده‌ی نزدیک Near Future	رواناب Runoff
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۲۳	۰/۱۳۴	آینده‌ی میانی Mid Future	
Decreasing کاهش‌ی	-۰/۰۵۹	۰/۰۳۴	آینده‌ی دور Far Future	

* نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن روند تغییرات در سطح ۵ درصد می‌باشد.

نتایج آزمون من-کندال و ضریب P-value نشان داد علیرغم این مطلب که تغییرات بارش در تمامی سناریوها روند کاهش‌ی داشته، اما به لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌داری قرار نمی‌گیرد. مطابق جداول ۶ تا ۹ تغییرات دمای متوسط در برخی دوره‌های زمانی و تحت سناریوهای مختلف از روند معنی‌داری قابل توجهی پیروی می‌کند. در دوره زمانی آینده نزدیک و میانی تحت سناریوی RCP2.6 تغییرات افزایشی در هیچ یک از مؤلفه‌های اقلیمی در سطح معنی‌داری ۵٪ قرار نمی‌گیرد. دما در آینده دور یک روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۵٪ و تحت سناریوی RCP2.6 نشان می‌دهد؛ در حالی که، در همین دوره زمانی و تحت سناریوی RCP4.5 تغییرات افزایشی دما حاکی از یک روند غیرمعنی‌داری است. در آینده‌های میانی و دور و تحت سناریوی RCP6.0 دما از یک روند افزایشی معنی‌دار تبعیت می‌کند. در آینده میانی و تحت سناریوی RCP8.5 نیز این روند افزایشی معنی‌دار برای

مؤلفه اقلیمی دما مشاهده می‌گردد؛ درحالی‌که در دوره‌های زمانی آینده نزدیک و دور تغییرات آن از روند غیر معنی‌دار پیروی می‌کند. بطوریکه نتایج حاصل از پژوهش دنیائی و همکاران (۲۰۲۱) مؤید این نتایج می‌باشد.

تجزیه و تحلیل روند سالانه متغیرها نشان داد که میزان بارش تحت گرمایش در دوره‌های زمانی آینده تا پایان قرن ۲۱ در این حوضه، کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات کاهشی در مؤلفه بارش و بیشترین روند افزایشی در مؤلفه‌های دمای تحت بیشترین سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP8.5) حاصل می‌گردد؛ علاوه بر این، در دوره‌های زمانی آینده نزدیک، میانی و دور و تحت سناریوی RCP2.6 تغییرات رواناب کاهشی بوده و روند آن به لحاظ آماری غیرمعنی‌دار می‌باشد. در دوره‌های زمانی آینده میانی و دور و تحت سناریوی RCP4.5 بارش روند کاهشی معنی‌داری را نشان می‌دهد، درحالی‌که تغییرات کاهشی در آینده نزدیک در سطح ۵٪ معنی‌دار قرار نمی‌گیرد. اگرچه در دوره‌های زمانی آینده نزدیک، میانی و دور تحت سناریوی RCP6.0 تغییرات رواناب کاهشی بوده، اما روند آن به لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌داری قرار نداشته به طوری‌که در آینده‌ی دور و تحت سناریوی RCP8.5 روند کاهشی آن معنی‌دار می‌باشد. این در حالی است که در آینده نزدیک و میانی تغییرات رواناب کاهشی اما روند آن به لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. به طوریکه مطالعات دنیائی و همکاران (2020) نیز نتایج حاصل از این پژوهش را تأیید می‌نمایند.

کاهش بارش و همچنین افزایش دما در حوضه سبب کاهش میزان رواناب حوضه در دوره‌های آتی خواهد شد؛ به گونه‌ای که امنیت ساکنین منطقه به شدت تحت تأثیر آن قرار خواهد گرفت. نتایج مطالعات صورت گرفته توسط (دنیائی و همکاران (2020c)، افشار و همکاران (2017)، جوان و همکاران (2013)، گبره و همکاران (2015))، نیز نتایج این مطالعه را تأیید و پشتیبانی می‌نمایند.

۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی کارایی مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب حوضه گرگان‌رود در استان گلستان با استفاده از ضرایب R^2 و NS صورت پذیرفت. مقادیر ضرایب فوق در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۷۷ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۴ و ۰/۷۱ برآورد شدند؛ به طوری‌که، نتایج به دست آمده نشان داد که کارایی مدل SWAT (در مرحله اعتبارسنجی) در شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه رضایت‌بخش نبوده، ولی در مرز قابل قبولی قرار دارد. سپس مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب بر اساس مقادیر ریزمقیاس‌نمایی شده (به روش

جداسازی فضائی تصحیح اریبی، BCSD) مؤلفه‌های بارش و دما مدل MIROC-ESM که بیش‌ترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی حوضه از خود نشان داد به کار گرفته شد.

شبیه‌سازی تغییر اقلیم حوضه نشان داد که بارش در تمامی دوره‌های زمانی دارای تغییرات کاهشی بوده؛ به‌طوری‌که روند آماری آن در سطح ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد و مؤلفه دما در تمامی سناریوهای انتشار از یک روند معنی‌دار افزایشی پیروی می‌کند. تحت سناریوی انتشار RCP4.5 در آینده‌های نزدیک و میانی و تحت سناریوی انتشار RCP6.0 در آینده‌های نزدیک، میانی و دور روند افزایشی دما به لحاظ آماری دارای سطح معنی‌دار ۵٪ می‌باشد.

تغییرات رواناب تحت سناریوی انتشار RCP4.5 و در آینده‌های میانی و دور و تحت سناریوی انتشار RCP8.5 و در آینده دور از روند معنی‌دار کاهشی تبعیت می‌کند. رواناب در دوره زمانی آینده نزدیک در سناریوی انتشار RCP4.5 و در آینده‌های نزدیک و میانی تحت سناریوی انتشار RCP8.5 دارای تغییرات کاهشی بوده اما روند آن به لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. به‌طور کلی این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر دما، بارش و رواناب تا انتهای قرن ۲۱ در حوضه گرگان رود به ترتیب روند تغییرات افزایشی، کاهشی و کاهشی را شاهد خواهند بود. روند افزایش متغیرهای اقلیمی دما و به‌خصوص دمای حداقل می‌تواند بر روی میزان تبخیر و تعرق و همچنین بارش برف در آینده در منطقه تأثیرگذار باشد. بنابراین، میزان رواناب نیز دستخوش تغییر و کاهش خواهد شد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر در واقع چشم‌انداز مناسبی از شرایط آب‌شناختی و اقلیمی حوضه مطالعاتی در دوره‌های زمانی آینده به لحاظ مؤلفه‌های بارش، دما و رواناب، فراهم می‌نمایند که می‌تواند دید بهتری از آینده حوضه برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب ایجاد نماید. پیشنهاد می‌گردد که در این حوضه اثرات تغییر اقلیم بر میزان سطح آبخوان‌ها، کاربری اراضی و پوشش خاک منطقه جهت تحقیقات بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد.

۵- منابع

- Abbaspour, K. C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 93.*
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S. R. I. N. I. V. A. S. A. N. B., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology, 524, 733-752.*
- Afshar, A. A., Hasanzadeh, Y., Besalatpour, A. A., & Pourreza-Bilondi, M. (2017). Climate change forecasting in a mountainous data scarce watershed using CMIP5 models under representative concentration pathways. *Theoretical and Applied Climatology, 129(1-2), 683-699.*
- Ahmed, K. F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A. M., Allen, J. M., Horton, R., & Anyah, R. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the US northeast. *Global and Planetary Change, 100, 320-332.*
- Akurut, M., Willems, P. & Niwagaba CB. 2014. Potential Impacts of Climate Change on Precipitation over Lake Victoria, East Africa, in the 21st Century, *Journal of Water, , 6 (9), 2634-2659.*
- Brekke, L., Thrasher, B. L., Maurer, E. P., & Pruitt, T. (2013). Downscaled CMIP3 and CMIP5 climate projections: release of downscaled CMIP5 climate projections, comparison with preceding information, and summary of user needs. *Technical Service Center, Bureau of Reclamation, US Department of the Interior, Denver, CO, 1.*
- Chong-Hai, X. U., & Ying, X. (2012). The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5(6), 527-533.*
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Donyaii, A., & Sarraf, A. (2020). Optimization of Reservoir Operation using a Bioinspired Metaheuristic Based on the COVID-19 Propagation Model. *Numerical Methods in Civil Engineering Journal, 5 (1) :15-28.*
- Donyaii A., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2020a). A Novel Approach to Supply the Water Reservoir Demand Based on a Hybrid Whale Optimization Algorithm. *Shock and Vibration, <https://doi.org/10.1155/2020/8833866>.*

- Donyaii A., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2021). Comparison of meta-heuristic algorithms in optimum operation of a single-reservoir dam system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00065>.
- Donyaii, A., & Sarraf, A. (2019). Analysis of future climatic parameters in Gorganrood catchment area with a new approach to the latest changes in the IPCC report, proc. 4th Int. Conf. on Applied Research in Science and Engineering, vrije universiteit Brussel, Belgium.
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020b). Application of a new approach in optimizing the operation of the multi-objective reservoir. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(3), 1-20. doi: 10.22055/jhs.2020.34556.1145.
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020c). Water reservoir Multi-objective optimal operation using Grey Wolf optimizer. *Shock and Vibration*, <https://doi.org/10.1155/2020/8870464>.
- Gebre, S. L., & Ludwig, F. (2015). Hydrological response to climate change of the upper Blue Nile River Basin: based on IPCC fifth assessment report (AR5). *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 3(01), 1-15.
- Ghorbani, M. A., Hosseini, S. H., H Kashan, M., & Abbasi, H. (2015). Evaluation of Alavian Reservoir Operation Performance under the Condition of Future Climate Change. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(79), 59-72.
- Goodarzi, M. & Fatehifar, A. 2019. Statistical Distributions Analysis for Estimating of Climate Change Effects on Future Floods (Case Study: Azarshahrchay Basin). *Hydrogeomorphology*, 6(20), 57-78.
- Jahanbakhsh Asl, S., Khorshiddoust, A., Alinejad, M. & Poursaghr, F. (2016). Impact of Climate Change on Precipitation and Temperature by Taking the Uncertainty of Models and Climate Scenarios (Case Study: Shahrchay Basin in Urmia). *Hydrogeomorphology*, 3(7), 107-122.
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., Ghahraman, B., & Mokhtari, M. H. (2012). Modeling daily stream flow using plant evapotranspiration method. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 4(6), 218-226.
- Javan, K., Saleh, F. N., & Shahraiyini, H. T. (2013). The influences of climate change on the runoff of Gharehsoo River Watershed. *American Journal of Climate Change*, 2013.
- Kendall, M. (1975). Rank correlation methods (4th edn.) charles griffin. *San Francisco, CA*, 8.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Masood, M., Yeh, P.J.F., Hanasaki, N. & Takeuchi, K. 2015. Model study of the impacts of future climate change on the hydrology of Ganges–Brahmaputra–Meghna basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19 (2), 747-770.

- Memarian, H., Balasundram, S. K., Abbaspour, K. C., Talib, J. B., Boon Sung, C. T., & Sood, A. M. (2014). SWAT-based hydrological modelling of tropical land-use scenarios. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), 1808-1829.
- Mirzaee, N., & Sarraf, A. (2021). Application of Data Fusion Models in River Flow Simulation Using Signals of Large-Scale Climate (Case Study: Jiroft Dam Basin), *Journal of Watershed Engineering and Management*, <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.343547.1816>.
- Moazami Goudarzi, F., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2020). Assessment of SM2RAIN-ASCAT and CMORPH Satellite Precipitation Products Over Maharlu Lake Basin in Iran, *Water Supply*, (2020) 20 (5): 1799-1806.
- Moazami Goudarzi, F., Sarraf, A. & Ahmadi, H. (2020). Prediction of Runoff Within Maharlu Basin for Future 60 Years Using RCP Scenarios, *Arabian Journal of Geosciences*, (2020) 13: 605, 1-17.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. C. (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.
- Shafiei, M., Ansari, H., Davari, K., & Ghahraman, B. (2013). Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model in a semi-arid region, case study: Nishabour watershed. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 17(64), 137-149.
- Shanley, C. S., Pyare, S., Goldstein, M. I., Alaback, P. B., Albert, D. M., Beier, C. M., ... & McPhee, M. V. (2015). Climate change implications in the northern coastal temperate rainforest of North America. *Climatic Change*, 130(2), 155-170.
- Soleimanipour M, Sarraf A. P. (2021). Evaluating the effects of climate change on Lar Basin Water Resources Using SWAT Model and comparing its results with Bayesian Networks and Hybrid Intelligent Models. *Journal of Natural Geography*, 13 (50), 61-79.
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., & Qin, D. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University press.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Alexander, L. V. (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I

Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers; Changements climatiques 2013. Les elements scientifiques. Contribution du groupe de travail I au cinquieme rapport d'evaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'evolution du CLIMAT-Resume a l'intention des decideurs.

- Telmer, K., Bonham-Carter, G. F., Kliza, D. A., & Hall, G. E. (2004). The atmospheric transport and deposition of smelter emissions: Evidence from the multi-element geochemistry of snow, Quebec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(14), 2961-2980.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., & Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5.

