



بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات هیدرولوژی حوضه آبریز حبله رود

پرستو باغبانان^{۱*}، علی احمدآبادی^۲، آیت کریمی^۳

^۱دکتری مخاطرات آب و هوایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران،

^۲استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۳کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۹

چکیده

تغییرات دما و بارش و به تناسب آن تغییرات اقلیمی همراه با وقوع مخاطراتی همچون خشکسالی و سیل تاثیرات بسیار زیادی بر وضعیت هیدرولوژی حوضه‌های آبریز دارند. بنابراین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژی حوضه آبریز حبله‌رود پرداخته شد. تغییرات دما و بارش با استفاده از داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش از سال ۱۹۹۶-۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفت و با به کارگیری مدل LARS-WG تغییر اقلیم حوضه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل HadGEM2-ES و سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ شبیه‌سازی گردید. سپس با مدل هیدرولوژیکی SWAT و وضعیت هیدرولوژیکی رواناب حوضه شبیه‌سازی شد. نتایج مدل LARS در دوره پایه نشان‌دهنده تطابق کامل این دوره با اختلاف ناچیز با داده‌های مدل‌سازی بود. همچنین مشخص گردید که در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ دما و بارش تقریباً در تمامی ماه‌ها روند افزایشی داشته است. نتایج به دست آمده مدل SWAT نیز نشان داد همبستگی مناسب و قابل قبولی بین داده‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی حوضه حبله‌رود وجود دارد. علاوه بر این مبین گردید افزایش بارش در حوضه آبریز منجر به افزایش میزان رواناب سطحی در سطح حوضه مورد مطالعه در دوره پیش بینی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ شده است. در نهایت یافته‌های این تحقیق نشان داد مدل LARS در بررسی تغییرات اقلیمی حوضه و مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه توانمندی بالایی دارند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه آبریز، حبله‌رود، مدل LARS-WG، مدل هیدرولوژیکی SWAT

مقدمه

است. تغییر در میزان و الگوی بارش و افزایش دما آغازگر تغییراتی می‌شود که صدمات مختلفی را در بخش‌های مختلف ایجاد می‌کند. در دو دهه گذشته، فراوانی دوره‌های با کاهش بارش، رو به فزونی گذاشته است. علاوه بر این، افزایش دما نیز مشهود بوده است (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۶) همچنین طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲، تغییر اقلیم باعث تغییرات هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۴). در

افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و افزایش دمای ناشی از آن، سبب برهم خوردن تعادل سیستم اقلیمی کره زمین شده و تغییرات اقلیمی گسترده‌ای را در اغلب نواحی کره زمین به وجود آورده است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶). تغییرات آب و هوا و اثرات آن بر بخش‌های مختلف کره زمین، امروزه به یکی از اولویت‌های بزرگ دنیا تبدیل شده و زندگی انسان را به طور جدی تحت تاثیر قرار داده

مهمترین نقطه قوت این مدل‌ها ارزان بودن، سرعت بالا و امکان استفاده از آنها بدون نیاز به ابر رایانه‌ها و یا رایانه‌های بسیار سریع می‌باشد (سیمونو و بارو، ۱۹۹۸). حفظ همبستگی متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش در فرایند کاهش مقیاس برای ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم ضروری است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶). ارزیابی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر فرایندهای چرخه هیدرولوژی حوضه آبخیز کمک فراوانی به چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب در دوره‌های آتی می‌کند (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶). شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در زمینه فهم بهتر چرخه آب در محیط و پیش‌بینی رواناب و دبی حوضه بسیار موثر خواهد بود. ارزیابی قابلیت‌ها و کارایی مدل‌های هیدرولوژیک برای مناطقی با شرایط متنوع جغرافیایی و زمین‌شناسی در مقیاس‌های مکانی متفاوت به منظور استفاده از این مدل‌ها به عنوان ابزاری برای مدیریت حوضه آبریز ضروری است. چنانچه قابلیت و کارایی این مدل‌ها برای مناطقی با شرایط متنوع خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و ... مورد تایید قرار گیرد می‌توان از این مدل‌ها برای مدیریت منابع آب و خاک استفاده نمود (گوژا و همکاران، ۲۰۱۰). در نیم قرن گذشته تعداد زیادی از مدل‌های آماری اقلیمی و هیدرولوژیک برای بررسی تغییر اقلیم هیدرولوژیک با ماهیت و پیچیدگی‌های مختلفی شکل گرفتند، مدل SWAT^۹ نیز از جمله کاربردی‌ترین مدل‌های هیدرولوژیک برای شبیه‌سازی رواناب و دبی حوضه‌های آبریز محسوب می‌گردد که مدلی یکپارچه، نیمه فیزیکی و نیمه تجربی در مقیاس حوضه‌ای است که توسط دپارتمان کشاورزی ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است.

امروزه بررسی تغییر اقلیم و تاثیرات آن بر روی مقدار دبی رودخانه‌ها از مباحث مهم علمی جهان

سال‌های اخیر تغییر اقلیم و گرمایش جهانی باعث وقوع پدیده‌های شدید آب و هوایی مثل خشکسالی‌های متعدد و سیلاب‌های سهمگین در ایران شده است که این امر خطری جدی برای منابع آب محسوب می‌شود (ثانی خانی و همکاران، ۱۳۹۲). به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع مختلف در دوره‌های آتی، مدل‌های شبیه‌سازی گردش عمومی جو توسعه یافته‌اند که قادرند پارامترهای اقلیمی را برای یک دوره طولانی مدت با استفاده از سناریوهای تایید شده هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم مدل‌سازی نمایند (دیدیک و کولیبافی، ۲۰۰۵؛ کلیسی و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیک یا مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای عامل ارتباطی بین متغیرها در مقیاس بزرگ یعنی مدل‌های گردش عمومی یا مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای با دیگر متغیرها که نمایانگر مقیاس خیلی کوچک نظیر حوضه‌های آبریز هستند، می‌باشند. این روش‌ها به طور کلی به دو دسته‌ی دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند. از مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی استفاده می‌شوند می‌توان به MM5^۱، Regcm3^۲ و PRECIS^۳ اشاره کرد. انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری نیز عبارتند از: CLIGEN^۴، LARS-WG^۵، ASD^۶ و SDSM^۷. روش‌های آماری ریزمقیاس کردن در مقایسه با روش‌های دینامیکی، به ویژه در مواقعی که هزینه‌ی کمتر و ارزیابی سریع‌تر عوامل موثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۶). مدل LARS-WG از جمله این مدل‌های اقلیمی آماری با کاربرد فراوان می‌باشد (استریکانتان و مک ماهون، ۲۰۰۱). این مدل با استفاده از خروجی مدل‌های GCM^۸ و به‌کارگیری سناریوی خاص مدل تولیدکننده داده‌های آب و هوایی، داده‌های گردش عمومی در مقیاس بزرگ را به مقیاس‌های ریزتر تبدیل می‌کنند.

5. Long Ashton research station weather generator (LARS-WG)
6. Automated statistical downscaling (ASD)
7. Statistical downscaling model (SDSM)
8. General circulation model (GCM)
9. Soil and water assessment tool (SWAT)

1. Mesoscale model (MM)
2. Regional climate model (REGCM)
3. Providing regional climate for impact studies (Precis)
4. Climate data generator (CLIMGEN)

دی اکسید کربن موجود در اتمسفر در این حوضه به طور قابل توجهی تغییر کرده است. نتایج مدل CLM4^۴ نشان دهنده روند کاهش رواناب از سال ۱۹۶۰ به بعد بود به طوریکه تغییر بارش، تابش، دمای هوا و سرعت باد به ترتیب ۵۶، ۱۴، ۱۳ و ۵ درصد و سایر پدیده‌ها در مجموع ۱۲ درصد در روند کاهش رواناب اثر گذاشته‌اند. همچنین کاهش قابل توجهی در رواناب در بخش جنوبی و شمال شرقی منطقه به کاهش بارش نسبت داده شده و کاهش تابش و افزایش دما از عوامل عمده افزایش رواناب در بخش شمالی بوده است. ردی و همکاران (۲۰۱۴)، اثرات تغییر اقلیم را با استفاده از مدل LARS-WG در منطقه آندرا پرادش هند ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که تا سال ۲۰۳۰ حداکثر افزایش متوسط بارش سالانه ۵/۱۶ درصد است و تا سال ۲۰۶۰ این افزایش ۹/۵ درصد خواهد شد. حداکثر دما تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۱/۵۳ در صد خواهد بود و تا سال ۲۰۶۰ به میزان ۲/۵ درصد افزایش خواهد داشت ولی برای حداقل دما، کاهش ۴ تا ۱۰ درصدی تا سال ۲۰۳۰ و کاهش ۶ تا ۱۲ درصدی تا سال ۲۰۶۰ را نشان می‌دهد. عثمان و همکاران (۲۰۱۴)، مدل LARS-WG را برای پیش-بینی‌های دوره‌های بارش آینده در مرکز عراق به کار بردند. نتایج افزایش روند بارش در دوره ماهانه دسامبر-فوریه و سپتامبر-نوامبر و کاهش روند بارش در ماه‌های مارس، آوریل و می را نشان می‌دهد.

لو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل SWAT، بیلان آبی را در یک حوضه آبریز کوهستانی در شمال غرب چین شبیه سازی کردند. نتایج تحقیق نشان داد خروجی‌های مدل برای مدیریت منابع آب در چنین حوضه‌هایی یک مرجع مناسب و قابل اطمینان است. گودرزی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل LARS-WG به شبیه سازی متغیرهای اقلیمی حوضه آبخیز رودخانه هرات پرداختند و متوجه شدند دما در سال‌های آتی افزایش می‌یابد و بارندگی نیز بسته به شرایط جوی افزایش و کاهش نشان می‌دهد. محمدی

محسوب می‌شود. تحقیقات و فعالیت‌های زیادی برای بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی به منظور تشخیص تغییر اقلیم در ایران و جهان انجام شده است. مینویل و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از ۵ مدل GCM تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کانادا را بررسی کردند و نتایج تحقیقات آنها بیانگر افزایش ۱ تا ۱۴ درجه‌ای دما و ۹ تا ۵۵ درصدی افزایش بارش فصلی بود که مقدار رواناب حوضه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. عبود و همکارانش (۲۰۰۹) از مدل HadCM3^۱ برای ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه گیلجلابی در اتیوپی استفاده کردند. یافته‌های آنها نشان داد حجم رواناب در دوره زمانی ۲۰۷۱-۲۰۹۹ تحت سناریوهای A₂، B₂ به ترتیب ۱۱/۶ و ۱۰/۱ درصد کاهش خواهد یافت. فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹) اجزای بیلان آب در کل ایران را در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از مدل SWAT شبیه سازی کردند و ارتباط آن با تولید گندم را با در نظر گرفتن عملکرد سدها و آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند. آنها در پژوهش خود با توجه به دقت بالای مدل در شبیه سازی دبی و عملکرد، این مدل را برای حوضه‌های آبریز تحت آبیاری پیشنهاد نمودند. لیو و کولیبافی (۲۰۱۱)، توانایی سه مدل مبتنی بر داده ریزمقیاس آماری، شبکه عصبی پی‌شخوری تاخیری و رگرسیون چندگانه تکاملی را در ریزمقیاس کردن دما و بارش روزانه در دو ایستگاه شمال کانادا بررسی کردند و خروجی بهترین مدل را به منظور بهبود پیش بینی دوهفته‌ای متغیرهای هیدرولوژیکی به دو مدل HBV^۲ و BNN^۳ وارد کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد استفاده از داده‌های ریزمقیاس، پیش بینی دبی متوسط و دبی پیک جریان را به ترتیب ۱۸ و ۲۶ درصد بهبود داده است. لی و همکارانش (۲۰۱۴)، تاثیرات تغییر اقلیم و پوشش گیاهی بر رواناب در منطقه کوهستانی حوضه رودخانه هایه در شمال چین در ۵ دهه گذشته را مطالعه کردند و متوجه شدند که آب و هوا و غلظت

3. Bayesian natural network (BNN)

4. Community land model (CLM)

1. Hadley center coupled model (HADCM)

2. Hydrological Byrans Vattenbalansavdelning (HBV)

مارس و آوریل به ماه‌های ژانویه و مارس را نشان می‌دهد. بابائیان و همکاران (۱۳۸۸)، با ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با استفاده از ریزمقیاس نمایی LARS WG و مدل گردش عمومی ECHO-G^۲ و سناریوی A_۱ نشان دادند که در این دوره کاهش ۹ درصدی بارش در کل کشور به ویژه در مناطقی مانند کرمان، یزد، خراسان جنوبی و رضوی رخ خواهد داد. کمال و مساح بوانی (۱۳۸۹)، تاثیر نوسانات اقلیمی بر رواناب زیر حوضه قره سو در بخش شمال غربی حوضه کرخه را با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی IHACRES^۳ و SIMHYD^۴ ارزیابی نموده و نشان داده‌اند که دمای ماهانه بین ۰/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد، افزایش یافته، بارش سالانه ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر کاهش یافته و حجم رواناب در فصل پاییز کم شده است و در سایر فصول افزایش نشان می‌دهد. نتایج تحقیق شایگان و همکاران (۱۳۹۰)، جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیک از مدل نیمه توزیعی-فیزیکی SWAT در حوضه طالقان بیانگر آن است که مدل SWAT قابلیت بالایی برای پیش‌بینی دبی جریان ماهانه حوضه طالقان دارد. ضرغامی و همکاران (۱۳۹۱)، در بررسی تغییر اقلیم استان آذربایجان شرقی به کمک ۶ مدل مختلف گردش عمومی جو در سه سناریوی انتشار (A_۱B, A_۲ و B_۱) نشان دادند که در سه دهه آتی، افزایش دمای استان تا ۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش میانگین سالانه تا ۶۰ میلی‌متر (در سناریوی A_۲ و مدل HadCM3) کاملاً مشهود است. عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲)، جهت برآورد دبی متوسط روزانه و غلظت رسوب از مدل SWAT در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان استفاده کردند. نتایج حاکی از این است که مدل SWAT مدل مدیریتی است که در حوضه مورد نظر کارایی مقبولی داشته است. کهریزی و روحانی (۱۳۹۵)، عملکرد سناریوهای SRES^۵ و RCP در پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های آرازکوسه و نوده، واقع در استان گلستان با استفاده از مدل‌های

و همکاران (۲۰۱۸)، با بررسی ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم و آلودگی هوا بر روی خدمات‌رسانی فوریت‌های پزشکی درمانی با استفاده از مدل LARS-WG و مدل شبکه عصبی مصنوعی به همراه بررسی سناریوهای RCP^۱ 2.6 و 8.5 در استان تهران به این نتیجه رسیدند که تحت شرایط RCP 8.5 خدمات رسانی پزشکی افزایش بسیاری پیدا کرده است. عثمان و همکاران (۲۰۱۹)، تاثیر تغییر اقلیم را بر منابع آبی زاب بزرگ در شمال عراق به کمک مدل LARS-WG بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی می‌شود حوضه آبریز در آینده دور، کاهش چشمگیری در جریان سالانه دارد که این جریانات با افت شدیدتر در حدود ۶۵-۲۵ درصدی در بهار و زمستان رخ می‌دهد. بقانام و همکاران (۲۰۲۰)، در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شمال غرب ایران با استفاده از مدل‌های LARS-WG، SDSM و مدل شبکه عصبی مصنوعی با سناریوهای RCP متوجه شدند که افزایش ۱/۳-۰/۱، ۱/۳-۰/۳ و ۲/۱-۰/۵ درجه سانتی‌گرادی و کاهش ۱۰-۳۰ درصدی در بارندگی طبق سه مدل نامبرده تحت شرایط سناریوی RCP 8.5 برای سال‌های آینده رخ می‌دهد.

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب در ایران با استفاده از مدل‌های منطقه‌ای و آماری در مقیاس‌های گوناگون، افزایش چشمگیری داشته است که این مسئله نشان‌دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد. سیدقاسمی و همکاران (۱۳۸۵)، آثار تغییر اقلیم ناشی از گازهای گلخانه‌ای را در جریان زاینده‌رود در دهه‌های آتی مورد ارزیابی قرار دادند. اجزای هیدرولوژیک مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از نتایج به دست آمده از ریزمقیاس کردن خروجی‌های مدل GCM که به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیک SWAT مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در هر دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۷۱-۲۰۷۰ کاهش جریان در ماه‌های آوریل و می، انتقال پیک جریان از ماه‌های

3. Identification of unit hydrograph and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data (IHACRES)

4. Simple hydrology (SIMHYD)

5. Special report on emission scenarios (SRES)

1. Representative concentration pathways (RCP)

2. ECHO-G (ECHAM4+HOPE-G) Atmosphere-Ocean Coupled Circulation Model deployed on Meteorological Institute of the University of Bonn (Germany) computer.

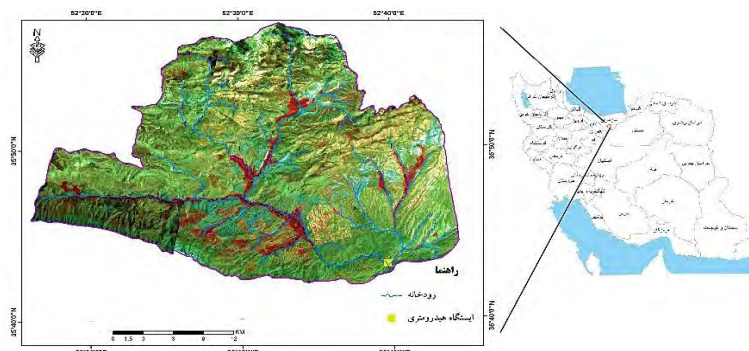
اثرات تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG و شبیه‌سازی رواناب و دبی حوضه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل SWAT است. در این مطالعه تلاش شده است که تاثیر سناریوهای متفاوت تغییر اقلیم بر تغییرات برخی متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) و متاثر از آن تغییرات دبی و جریان رواناب حوضه آبریز حبله‌رود با توجه به حساسیت اکولوژیکی و موقعیت خاص سیاسی این منطقه (مجاورت با پایتخت کشور) بررسی شود.

داده‌ها و روش‌ها

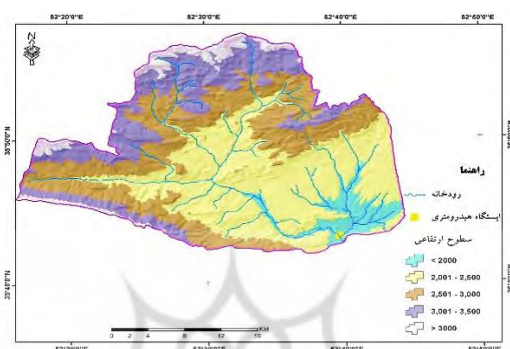
حوضه آبخیز حبله‌رود از نظر تقسیمات سیاسی جزء استان‌های تهران (شهرستان فیروزکوه و قسمتی از دماوند) و نیز سمنان (قسمت‌هایی از شهرستان گرمسار و ایوانکی) بوده و از لحاظ موقعیت جغرافیایی در طول ۵۱/۴۰ تا ۵۳/۱۰ و عرض ۳۴/۳۵ تا ۳۵/۵۸ درجه شمالی قرار گرفته که مساحت کل آن ۱۲۶۶۱/۵ کیلومتر مربع است. حداقل ارتفاع حوضه ۷۳ متر، حداکثر ارتفاع ۳۸۷۸ متر و ارتفاع متوسط آن ۲۳۰۱ متر است. شیب متوسط وزنی حوضه ۸/۵ در صد و جهت شیب جنوبی نیز با فراوانی ۲۶/۹ درصد دارای بیشترین مساحت در این حوضه است (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۶). این حوضه با دبی متوسط ۲۵۰ تا ۲۷۰ متر مکعب در حاشیه جنوبی البرز مرکزی واقع شده است. حبله‌رود از دامنه کوه‌های سایو و شاه محمد قله‌ها در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان فیروزکوه در استان تهران سرچشمه می‌گیرد و به نام رودخانه گور سفید به سوی دامنه شمالی کوه ماراب جاری می‌شود (حبیبی و پیروان، ۱۳۹۸). در نهایت پس از دریافت شاخه‌های نمرد، دره‌ده و دلیچای و عبور این رودخانه از روستای بنکوه وارد دشت گرمسار می‌شود (صالح پور و همکاران، ۱۳۹۷). تصویر منطقه مورد مطالعه و حوضه آبریز در شکل ۱ و سطوح ارتفاعی و موقعیت ایستگاه هیدرومتری در شکل ۲ ارائه شده است.

LARS-WG و SDSM بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در بین سناریوهای انتشار قدیم A1B و در بین سناریوهای جدید RCP 8.5 بیشترین افزایش دما را برای هر دو دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ برای هر دو ایستگاه شبیه‌سازی شده است. قاله‌ری و همکاران (۱۳۹۸)، به ارزیابی تغییر اقلیم ایستگاه بجنورد طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۵۰ با استفاده از مدل‌های LARS-WG و SDSM و سناریوهای A و B و سناریوهای RCP پرداختند و متوجه شدند در مدل SDSM بارش افزایش می‌یابد و این افزایش در سناریوهای A₂ و B₁ بیشتر از سناریوهای RCP است. در مدل LARS-WG دمای کمینه در هر دو حالت روند افزایشی دارد و بیشترین افزایش دمای کمینه مربوط به سناریوی A₂ است. زمانی و همکاران (۱۳۹۸)، با بررسی احتمالاتی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با تحلیل عدم قطعیت در حوضه رود زرد در جنوب‌غربی ایران، تحت دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 در دوره (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب، روش ترکیبی ضریب تغییرات و مدل LARS-WG به ریزمقیاس‌هایی پرداختند. نتایج حاکی از افزایش میانگین دمای سالانه به مقدار ۱/۶۴-۲/۰۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP 4.5 و افزایش ۱/۸۵-۲/۴ تحت سناریوی RCP 8.5 می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم در حالت کلی حاکی از کاهش میانگین رواناب شبیه‌سازی شده برای دوره آینده نسبت به دوره پایه می‌باشد.

بررسی و مطالعه روند تغییرات اقلیمی در کشور ایران که قسمت بزرگی از آن دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است اهمیت زیادی دارد. کاهش آبدهی رودخانه حبله‌رود به عنوان اصلی‌ترین منبع تامین آب در حوضه حبله‌رود و دشت گرمسار، توسعه برداشت از آب‌های سطحی، رقابت بر سر آب بین بخش‌های مختلف و تاثیر آن بر سیستم‌های آبی حوضه، افزایش شوری و املاح و کاهش کیفیت آب رودخانه حبله‌رود ضرورت جامع‌نگری در مدیریت منابع آبی این منطقه را نشان می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و موقعیت حوضه آبریز حبله‌رود



شکل ۲: سطوح ارتفاعی حوضه آبریز حبله‌رود

رقومی ارتفاعی $ASTERGDEM^2$ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است. در تحلیل وضعیت خاک از نقشه خاک بر اساس نقشه فائو که دربرگیرنده اطلاعات تعداد زیادی از پارامترهای خاک برای ۵۰۰۰ نوع خاک در سطح جهان بوده استفاده شده و کاربری اراضی حوضه از داده‌های سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور استخراج شده است. در بحث دبی نیز آمار ماهانه آبدهی در ایستگاه هیدرومتری بنکوه در خروجی حوضه نیز به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شده است.

یافته‌های تحقیق

نتایج بررسی تغییر اقلیم: به منظور تایید روند ریزمقیاس نمایی نمودارهای میانگین مشاهداتی و شبیه سازی شده بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در مقیاس ماهانه برای ایستگاه فیروزکوه در اشکال ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند. با توجه به این نمودارها می‌توان ذکر نمود که ریزمقیاس نمایی با دقت مناسبی انجام گرفته

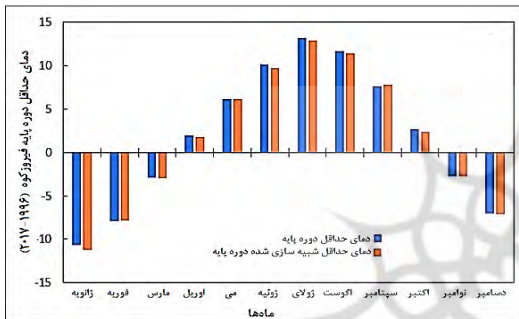
در این پژوهش جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز حبله‌رود از داده‌های هواشناسی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تعداد ساعات آفتابی دو ایستگاه گرمسار در استان سمنان و فیروزکوه در استان تهران از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده به صورت روزانه از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. پس از آن بازسازی داده‌ها برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG انجام گرفت. در این تحقیق از مدل گردش عمومی $HadGEM2-ES^1$ بر اساس گزارش پنجم IPCC و سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده گردید. این دوره آماری با توجه به دوره آماری در دسترس ایستگاه‌ها و لزوم هم پایه بودن زمانی با سایر داده‌های ورودی به مدل SWAT انتخاب شده است. دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نیز به عنوان دوره شبیه سازی و پیش‌بینی مدنظر قرار دارد. همچنین برای ساخت مدل SWAT و استخراج حوضه آبریز، شبکه زهکشی و زیرحوضه‌ها از مدل

2. Aster global digital elevation model (ASTERGDEM)

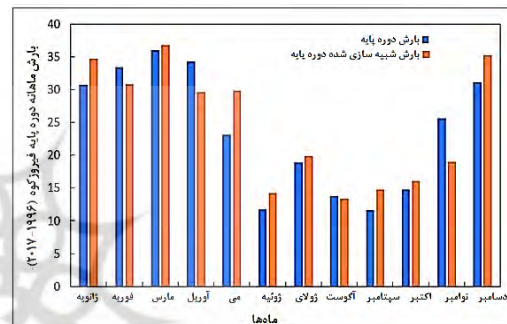
1. Haddly generation model-earth system component (HADGEM-ES)

بیانگر انطباق بسیار بالای مدل می‌باشد. بیشترین اختلاف در ماه ژانویه ۰/۵۸ درجه سانتی‌گراد و کمترین اختلاف در ماه نوامبر ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد بوده است. شبیه‌سازی دمای بیشینه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۵ نیز نشان‌دهنده همپوشانی کامل مقادیر با یکدیگر در تمامی ماه‌های می‌باشد. در خصوص تغییرات و اختلافات مقادیر نیز می‌توان عنوان نمود بیشترین اختلاف در ماه ژانویه ۰/۶۷ و کمترین آن در ماه‌های مارس و دسامبر ۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

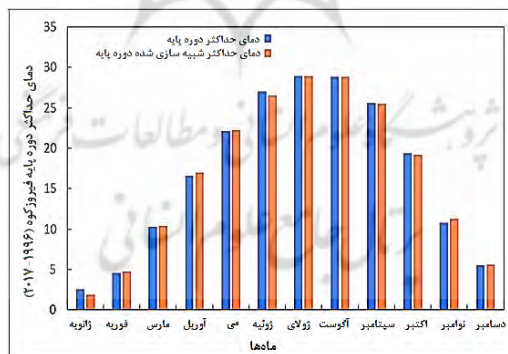
است و نتایج قابل قبول هستند. با توجه به شکل ۳ مقادیر میانگین بارش شبیه‌سازی شده تقریباً اختلاف کمی با مقادیر مشاهداتی دارند. لیکن در ماه‌های فوریه، آوریل، آگوست و نوامبر مقادیر پیش بینی شده تقریباً کمی پایین‌تر از مقادیر مشاهداتی قرار دارند ولی در سایر ماه‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر از مشاهداتی برآورد شده است. بیشترین مقدار افزایش بارش در ماه می ۶/۷۵ میلی‌متر و کمترین مقدار در ماه آگوست ۰/۴۲ میلی‌متر مشاهده شده است. شبیه‌سازی دمای کمینه ایستگاه فیروزکوه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۴



شکل ۴: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دمای حداقل دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه فیروزکوه



شکل ۳: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بارش دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه فیروزکوه



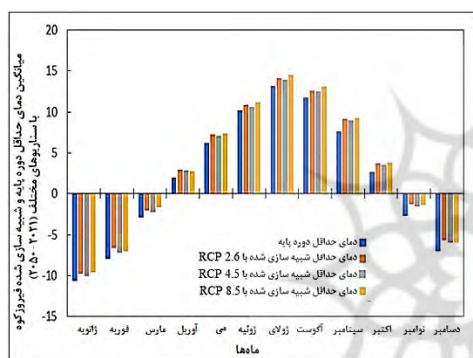
شکل ۵: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دمای حداکثر دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه فیروزکوه

۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ تقریباً در تمامی سناریوها در همه ماه‌ها روند افزایشی دارد. بیشترین اختلاف نیز مربوط به ماه‌های دسامبر، ژانویه و مارس است. علاوه بر این می‌توان گفت در داده‌های شبیه‌سازی RCP2.6 اختلاف بیشتر و در داده‌های شبیه‌سازی RCP8.5 اختلاف

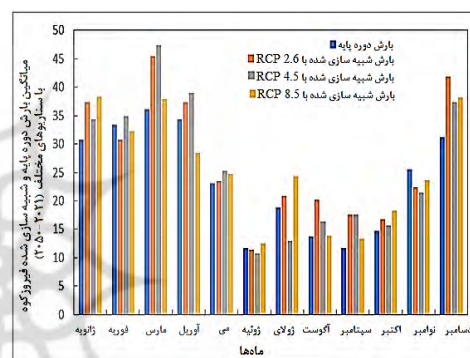
نمودارهای میانگین ماهانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه در تمامی ماه‌های سال به همراه داده‌های شبیه‌سازی تحت سناریوهای RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 ارائه شده است. همانگونه که نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد مقادیر شبیه‌سازی شده بارش برای دوره

RCP4.5 شبیه سازی متعادل تری نسبت به دوره پایه نشان داده و انطباق بیشتری با داده‌های مشاهداتی داشته است. نتایج حاصل از شکل ۸ حاکی از این است که مقادیر دمای بیشینه دوره پایه نسبت به دوره شبیه‌سازی در تمامی سناریوها در سال‌های آتی افزایش داشته است که بیشترین مقدار این روند افزایشی در ماه سپتامبر با نزدیک حدود ۱/۷۶ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار در ماه ژانویه با ۰/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دما پیش بینی شده است. اما همانند دمای کمینه مقادیر برآورد شده سناریوی RCP4.5 بسیار بیشتر از سایر سناریوها است. نتایج سناریو RCP4.5 تطابق بیشتری با دوره پایه دارد.

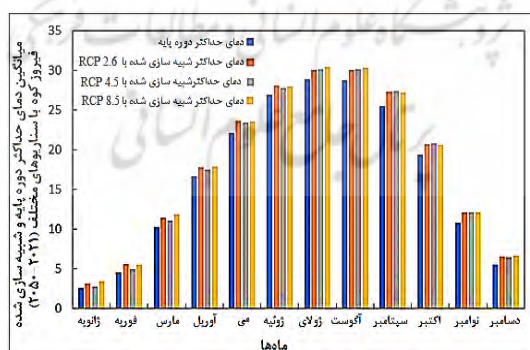
کمتری با دوره پایه مشاهده می‌گردد. ولی بهترین تطابق و همخوانی داده پایه با شبیه سازی شده متعلق به سناریوی RCP4.5 است. نتایج صحت سنجی دمای کمینه دوره پایه با شبیه‌سازی ایستگاه فیروزکوه در شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار دمای کمینه برای ماه ژولای در تابستان و کمترین مقدار آن نیز مربوط به ماه ژانویه در زمستان برآورد شده است. همچنین نمودار روند ماهانه نیز نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها دمای کمینه در همه ماه‌ها افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقادیر اختلاف در سناریوی RCP8.5 مشاهده شده است. همانند نمودار بارش نیز می‌توان ذکر نمود در دمای کمینه هم سناریوی



شکل ۷: میانگین دمای حداقل ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه فیروزکوه



شکل ۶: میانگین بارش ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه فیروزکوه



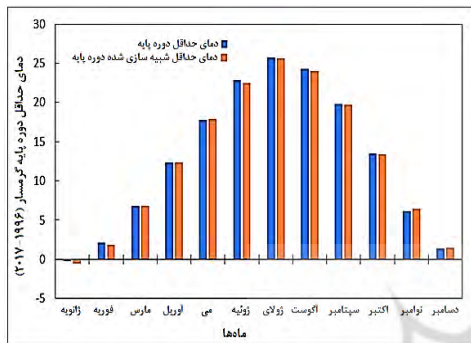
شکل ۸: میانگین دمای حداکثر ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه فیروزکوه

شبیه‌سازی شده در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن آگوست بیشتر از مقادیر پایه و در سایر ماه‌ها مقادیر کمتر برآورد شده است که بیشترین مقدار اختلاف در

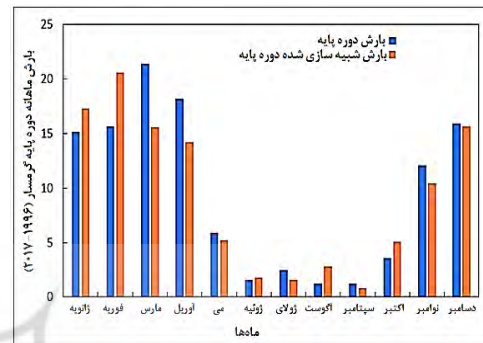
نمودار مقایسه متوسط بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه گرمسار در شکل ۹ رسم گردید. همانگونه که در تصویر ملاحظه می‌گردد مقادیر

بیشینه در سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۷ در ایستگاه هواشناسی گرمسار در شکل ۱۱ نشان از تطابق نسبتاً خوب داده‌ها با یکدیگر دارد. به طوری که اختلاف بسیار ناچیزی در هر دو سری زمانی مشاهده می‌گردد و مقادیر این اختلاف حتی کمتر از ۰/۰۲ درجه می‌باشد. از این رو توانایی مدل در شبیه‌سازی مورد تایید قرار می‌گیرد.

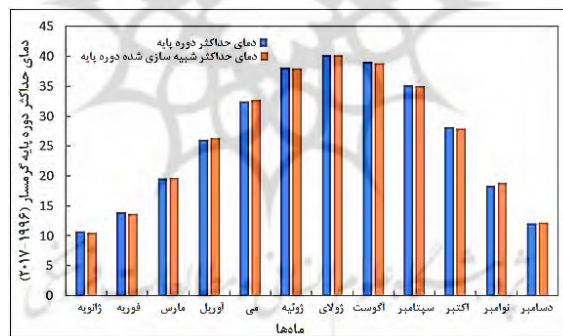
ماه مارس حدود ۵/۸۲ میلی‌متر و کمترین آن در دسامبر ۰/۲۸ میلی‌متر می‌باشد. با مقایسه مقادیر مشاهداتی و تخمینی دمای کمینه توسط مدل در شکل ۱۰ می‌توان گفت ریزمقیاس‌نمایی با دقت خوبی انجام گرفته است و نتایج مناسبی را ارائه داده است. به طوریکه کمترین اختلاف در ماه مارس حدود ۰/۰۱ و بیشترین اختلاف در ماه ژوئن ۰/۳۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای



شکل ۱۰: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دمای حداقل دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه گرمسار



شکل ۹: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بارش دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه گرمسار



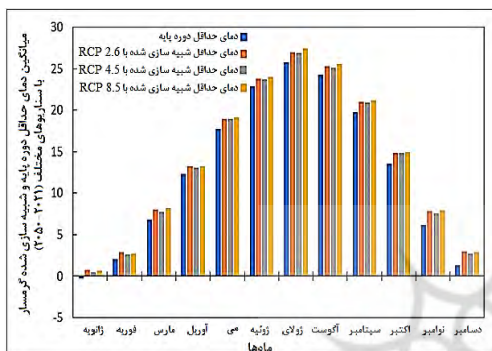
شکل ۱۱: نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دمای حداکثر دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) ایستگاه گرمسار

سناریوی RCP2.6 حدود ۳/۱۲ میلی‌متر در ماه دسامبر و کمترین مقدار کاهش بارش در ماه مارس تحت سناریوی RCP8.5 بوده است. با توجه به نتایج در کل می‌توان گفت مقادیر شبیه‌سازی سناریوی RCP4.5 تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی داشته است. در شکل ۱۳ تغییرات دمای کمینه ماهانه به ازای سناریوهای مختلف در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل بیشترین اختلاف مربوط به RCP8.5 می‌باشد و به‌طور کلی در

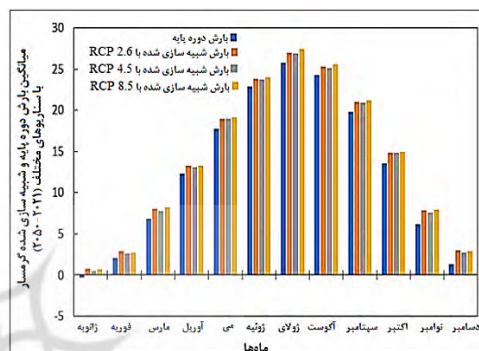
نمودار متوسط بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سه سناریو در دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۷) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) در شکل ۱۲ ترسیم گردید. در اکثر ماه‌ها داده‌های سناریوی RCP2.6 بیشتر از سایر سناریوها روند افزایشی داشته است. بر اساس نتایج در ماه‌های ژانویه، ژولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر و دسامبر در تمامی سناریوها بارش افزایش یافته و در سایر ماه‌ها روند کاهش‌ی اندکی مشاهده شده است. بیشترین افزایش بارش تحت

ماه‌های ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر در فصل گرم سال بوده و بیشترین کاهش دمای بیشینه نیز در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه مشاهده می‌شود. بالاترین مقدار افزایش دمای بیشینه نیز در سناریوی RCP8.5 پیش‌بینی شده است. ولی همانند بارش و دمای کمینه در این بخش باید ذکر نمود که داده‌های باز سازی شده برای آینده توسط سناریوی RCP4.5 انطباق بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد و از این رو مورد قبول می‌باشد.

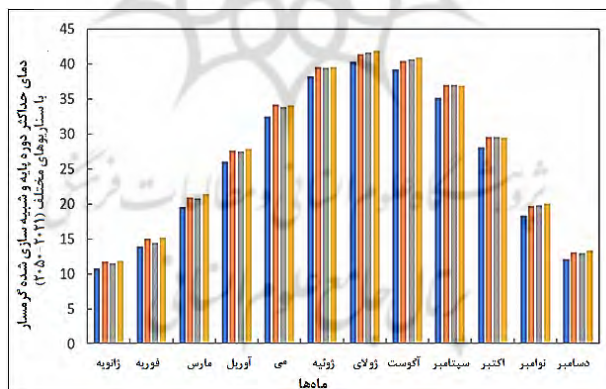
هر سه سناریو پیش‌بینی می‌شود که در افق ۲۰۲۱-۲۰۵۰ دمای کمینه نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. اما همچنان می‌توان گفت داده‌های شبیه‌سازی شده سناریوی RCP4.5 دارای تطابق بیشتری با دمای کمینه دوره پایه است. بر اساس نمودار شکل ۱۴ دمای بیشینه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف مورد مطالعه می‌توان ذکر نمود در هر سه سناریو شاهد افزایش دمای بیشینه نسبت به دوره پایه هستیم. طبق نمودار بیشترین افزایش دمای بیشینه در



شکل ۱۳: میانگین دمای حداقل ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه گرمسار



شکل ۱۴: میانگین بارش ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه گرمسار



شکل ۱۴: میانگین دمای حداکثر ماهانه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ازای سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه گرمسار

و ۰/۵۸ در دوره واسنجی، ۰/۴۶ و ۰/۴۹ در دوره اعتبارسنجی برآورد شده است. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای تعیین شده برای واسنجی، حداقل، حداکثر و بهینه مقادیر حوضه حبلرود ارائه شده است.

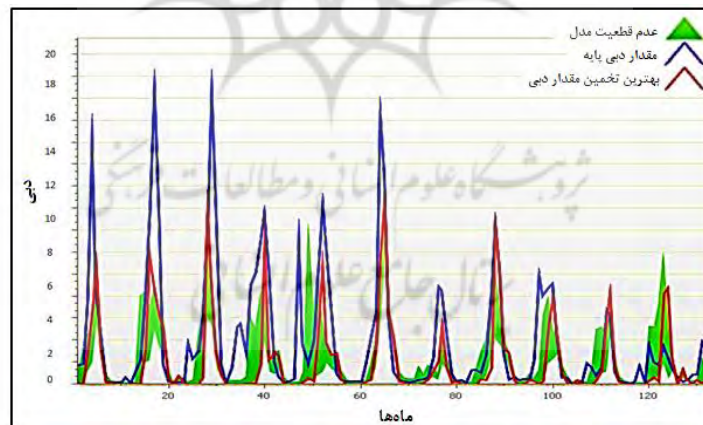
نتایج مدل SWAT: بر اساس نتایج ارزیابی کارایی مدل، مقادیر ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2)، نشان‌دهنده توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه است. مقدار ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب ۰/۵۲

جدول ۱: مقادیر پارامترهای تعیین شده برای واسنجی، حداقل، حداکثر و بهینه مقادیر حوضه حبله رود

مقدار بهینه	پارامتر	رده بندی حساسیت
۰.۲۹۱	R_CN2.mgt	۱
۰.۰۲۳	R_SOL_K(..).sol	۲
۰.۵۶۷	R_SOL_BD(..).sol	۳
۰.۴۶۶	R_SOL_AWC(..).so	۴
۳۶۲۶	V_GWQMN.gw	۵
۰.۰۵۶	V_GW_REVAP.gw	۶
۰.۵۷۹	V_ALPHA_BF.gw	۷
۳۲۹	V_GW_DELAY.gw	۸
۱۶۷.۸	V_REVAPMN.gw	۹
۰.۴۶۰	V_RCHRG_DP.gw	۱۰
۰.۷۵۴	V_ESCO.hru	۱۱
۰.۹۴۰	V_EPCO.hru	۱۲
۰.۱۴۸	V_CH_N2.rte	۱۳
۵۳.۴	V_CH_K2.rte	۱۴
۱۱.۲	V_SFTMP.bsn	۱۵

تبخیر و تعرق برای دوره دوره پیش‌بینی شده نسبت به مشاهداتی تغییرات قابل توجهی را داشته و به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است.

نتایج نشان می‌دهد (شکل ۱۵) با توجه افزایش بارش، میزان رواناب سطحی در سطح حوضه مورد مطالعه در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بیشتر از دوره مشاهداتی موجود است و این در حالیست که میزان



شکل ۱۵: نتایج هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی بر پایه زمانی ماهانه

در برخی از ماه‌های مورد بررسی، مقدار تخمین کمتر از مقدار واقعی داده‌های دبی را نشان می‌دهد که شاید علت آن ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف باشد.

نتایج واسنجی مدل نشان از همبستگی مناسب و قابل قبول داده‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی حوضه حبله رود در ایستگاه بنکوه دارد و انطباق خوبی در بیشتر نقاط هیدروگراف مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا بررسی اثر تغییر اقلیم با استفاده از داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ایستگاه‌های فیروزکوه و گرمسار با به کارگیری مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG تحلیل شد. ابتدا برای سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ یک شبیه‌سازی انجام گرفت. سپس اثر تغییر اقلیم حوضه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل HadGEM2-ES و سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ شبیه‌سازی شد. همچنین از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب حوضه بهره گرفته شد. ابتدا برای تایید روند ریزمقیاس‌نمایی نمودارهای میانگین مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در مقیاس ماهانه برای هر دو ایستگاه فیروزکوه و گرمسار برای دوره پایه ۱۹۹۶-۲۰۱۷ تهیه شدند که نتایج آن نشان داد ریزمقیاس‌نمایی با دقت مناسبی انجام گرفته است و نتایج قابل قبول هستند. سپس میانگین ماهانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه به همراه داده‌های شبیه‌سازی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مقادیر شبیه‌سازی شده بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر برای هر دو ایستگاه فیروزکوه و گرمسار برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ تقریباً در تمامی سناریوها در همه ماه‌ها روند افزایشی دارند. علاوه بر این می‌توان گفت در داده‌های شبیه‌سازی RCP2.6 اختلاف بیشتر و در داده‌های شبیه‌سازی RCP8.5 اختلاف کمتری با دوره پایه مشاهده می‌گردد. ولی بهترین تطابق و همخوانی داده پایه با شبیه‌سازی شده متعلق به سناریوی RCP4.5 است. بر اساس نتایج مدل SWAT نیز می‌توان گفت بررسی نشان دادند که مقدار ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۵۸ در دوره واسنجی، ۰/۴۶ و ۰/۴۹ در دوره اعتبار سنجی می‌باشد. همچنین نتایج واسنجی مدل نیز همبستگی قابل قبول بین داده‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی حوضه آبریز را تایید می‌نماید. در بعضی ماه‌های مورد مطالعه، مقدار

تخمین کمتر از مقدار واقعی داده‌های دبی شبیه‌سازی شده است که شاید علت آن ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف باشد. مطابق نتایج مدل SWAT افزایش بارندگی در حوضه آبریز حبله‌رود منجر به افزایش میزان رواناب سطحی حوضه مورد مطالعه در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ می‌شود.

نتایج این مطالعه در بخش شبیه‌سازی اقلیمی و هیدرولوژیکی با یافته‌های پژوهش‌های انجام گرفته در جهان مانند مینوئل و همکاران (۲۰۰۸)، عبدو و همکاران (۲۰۰۹)، و پژوهش‌های صورت گرفته در ایران توسط سید قاسمی و همکاران (۱۳۸۵)، شایگان و همکاران (۱۳۹۰)، زرغامی و همکاران (۱۳۹۱) را با سطح اطمینان بیشتری با تایید روند افزایشی در دماهای حداقل، دمای حداکثر و بارش و متعاقب آن افزایش دبی در سال‌های آینده را به همراه کارایی مدل‌های مذکور در زمینه شبیه‌سازی را تایید می‌نماید. همانگونه که مطرح شد تحلیل‌های مرتبط با شبیه‌سازی‌های هیدرولوژی و اثر تغییر اقلیم بر حوضه‌های آبریز در جهان و ایران بیشتر با استفاده از مدل‌های قدیمی و استفاده از سناریوهای نوع A و B انجام گرفته است. در ارتباط با بررسی اثر تغییر اقلیم بر حوضه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای نوع RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مطالعه‌ای انجام نشده است. در واقع می‌توان گفت وجه تمایز این مطالعه نسبت به سایر مطالعات انجام گرفته شناسایی روند تغییرات اقلیمی بلندمدت و اثرات آن بر حوضه آبریز حبله‌رود به صورت همزمان با سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و تشخیص تفاوت اثر این سه سناریو بر شرایط حوضه آبریز حبله رود می‌باشد. لازم به ذکر است عنوان نمود این پژوهش فقط جهت بررسی سناریوهای مختلف و تاثیر آنها بر تغییرات هیدرولوژیکی حوضه آبریز مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج به دست آمده در این پژوهش لزوم بررسی راهکارهای مناسب جهت مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی و یا کاهش اثرات احتمالی آن با توجه به حساسیت اکولوژیکی و موقعیت خاص سیاسی این

منطقه (مجاورت با پایتخت کشور) ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

۱. احمدوند کهریزی، مریم، روحانی، حامد. ۱۳۹۵. تاثیرات حفاظتی تغییر اقلیم بر اساس ریزمقیاس‌سازی دمای پیش‌بینی شده در قرن ۲۱ (مطالعه موردی دو ایستگاه ارازکوسه و نوده در استان گلستان)، اکوهیدرولوژی، شماره ۴، ۵۹۷-۶۰۹.
۲. باثیان، ایمان، نجفی نیک، زهرا. ۱۳۸۶. مدل‌های اقلیمی در ایران در طول دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹، پروژه موسسه اقلیم‌شناسی، ۵-۱۳.
۳. بابائیان، ایمان، نجفی نیک، زهرا. زابل عباسی، فاطمه. حبیبی نوخندان، مجید. ادب، حامد. ملبوسی، شراره. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۶، ۱۳۵-۱۵۲.
۴. دهقانی، نوید. قاسمیه، هدی. ساداتی نژاد، جواد. قربانی، خلیل. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بازفت صمصامی)، اکوهیدرولوژی، شماره ۱، ۸۹-۱۰۲.
۵. زمانی، رضا. آخوند علی، علی محمد. روزبهبانی، عباس. ۱۳۹۸. بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب تحت سطوح احتمالاتی مختلف با رویکرد عدم قطعیت (مطالعه موردی: حوضه رود زرد)، علوم و مهندسی آبیاری، DOI: 10.22055/JISE.2018.17237.1250
۶. سید قاسمی، سمانه. ابریشم چی، احمد. تجربی، مسعود. ۱۳۸۵. ارزیابی اثرات تغییرات جریان رودخانه زاینده‌رود بر اثر تغییر اقلیم، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، https://www.civilica.com/Paper-WRM02-WRM02_186.html
۷. شایگان، مهران. علی محمدی، عباس. روحانی، حامد. ۱۳۹۰. مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه طالقان در محیط GIS با استفاده از مدل SWAT، سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۲ (پیاپی ۱۰)، ۱-۱۸.
۸. زرغامی، مهدی. بابائیان، ایمان. حسن زاده، یوسف. کنعانی، رضا. ۱۳۹۱. مطالعه تغییر اقلیم و اثرات آن بر خشکی (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)، علوم و مهندسی آبخیزداری، شماره ۱۸، ۶۱.
۹. ضیایی، نوید. اونق، مجید. آسگری، حمیدرضا. مساح بوانی، علیرضا. سلمان ماهینی. عبدالرسول. ۱۳۹۶. مقایسه اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر شدت خطر و ریسک بیابان‌زایی حوضه حبله‌رود، استان تهران، مهندسی اکوسیستم آب، شماره ۱۶، ۱۰۵-۱۸۸.
۱۰. عارفی اصل، اکرم. نجفی نژاد، علی. کیانی، فرشاد. سلمان ماهینی، عبدالرسول. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در آبخیز چهل‌چای استان گلستان، مرتع و آبخیزداری، شماره ۶۶، ۴۳۳-۴۴۶.
۱۱. فلاح قاهری، غلامعباس. یوسفی، حسین. حسین زاده، احمد. علیمرادی، محمد رضا. ریحانی، الیاس. ۱۳۹۸. ارزیابی تغییر اقلیم ایستگاه بجنورد طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۵۰ با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و SDSM، اکوهیدرولوژی، شماره ۱، ۹۹-۱۰۹.
۱۲. کمال، علیرضا. مساح بوانی، علیرضا. ۱۳۸۹. تاثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوضه با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی، آب و خاک، شماره ۵، ۹۳۱-۹۲۰.
۱۳. گودرزی، مسعود. حسینی، اسعد. مسگری، ابراهیم. ۱۳۹۵. مدل‌های آب و هواشناسی، نشر آذر کلک، تهران.
14. Abdo, K.S., Fiseha, B.M., Rientjes, T., Gieske, A.S.M., and Haile, A.T. 2009. Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana Basin, Ethiopia, Hydrological Processes, 23(26): 3661-3669.
15. Dibike, Y.B., and Coulibaly, P. 2005. "Hydrologic Impact of Climate Change in the Saguenay Watershed: Comparison of Downscaling Methods and Hydrologic Models, Journal of Hydrology, 307(1-4): 145-163.
16. Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., and Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran, Hydrological Processes, 23(3): 486-501.
17. Goodarzi, E., Dastorani, M.T., Massah Bavani, A., and Talebi, A. 2015. Evaluation of the Change-Factor and LARS-WG

- Methods of Downscaling for Simulation of Climatic Variables in the Future (Case study: Herat Azam Watershed, Yazd - Iran), *ECOPERSIA*, 3(1): 833-846.
18. Guzha, A.C., and Hardy, T.B. 2010. Application of the Distributed Hydrological Model, TOPNET, to the big darby Creek watershed, Ohio, USA, *Water Resour Manage*, 24: 979-100.
19. Hosseini Baghanam, A., Eslahi, M., and Jedary Seifi, A. 2020. Assessment the impact of climate change over the northwest of Iran: an overview of statistical downscaling methods, *Theoretical and Applied Climatology*, 141: 1135-1150.
20. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
21. Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A., and Wilby, R.L. 2007. "A Daily Weather Generator for Use in Climate Change Studies, *Environmental Modelling and Software*, 22(12): 1705-1719.
22. Lei, H., Yang, D., and Huang, M. 2014. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the Haihe River basin in the past five decades, *Journal of Hydrology*, (511): 786-79.
23. Lu, Z., Zou, S., Xiao, H., Zheng, C., Yin, Z., and Wang, W. 2015. Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 79: 76-85.
24. Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed, *Journal of Hydrology*, 358 (1-2): 70– 83.
25. Mohammadi, H., Ardalan, A., Massah Bavani, A., Naddafi, K., and Talebian, M.T. 2018. Simulation of climate change impact on emergency medical services client S caused by air pollution, *International Quality Journal*, 7(2): 1-9.
26. Osman, Y., Al-Ansari, N., Abdellatif, M., Aljawad, S.B., and Knutsson, S. 2014. Expected Future Precipitation in Central Iraq using LARSWG Stochastic Weather Generator, *Engineering*, 6(12): 948-959.
27. Osman, Y., Al-Ansari, N., and Abdellatif, M. 2019. Climate change model as a decision support tool for water resources managemet in northern Iraq: a case study of Greater Zab river, *Journal of Water and climte change*, 10(1): 197-209.
28. Reddy, K.S., Kumar, M., Maruthi, V., Umesha, B., Vijayalaxmi, M., and Barikar, U. 2014. Climate change analysis in southern Telangana region, Andhra Pradesh using LARS-WG model, *Current Science*, 107(1): 54-62.
29. Semenov, M.A., and Barrow, E.M. 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version3.0.
30. Srikanthan, R., and McMahon, T.A. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: a review. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 5(4): 653-670.