

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره یازدهم، شماره چهل و دوم، زمستان ۱۳۹۹

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹

صص ۴۳-۵۷

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب تحت سناریوی RCP با استفاده از مدل SWAT (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی رودخانه‌ی میناب)

فرشاد جوادی‌زاده، دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی-دانشگاه آزاد اسلامی تهران

پرویز کردوانی،* استاد گروه جغرافیا-دانشگاه آزاد اسلامی تهران

بهلول علیجانی، استاد آب و هواشناسی-دانشگاه خوارزمی تهران

فریده اسدیان، استادیار گروه جغرافیا-دانشگاه آزاد اسلامی تهران

چکیده

اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب به‌عنوان موضوعی چالش‌برانگیز در بسیاری از مناطق خشک دنیا مطرح بوده و تداوم این پدیده در مناطق خشک با مخاطراتی در چرخه‌ی آبی و بی‌نظمی جریان رودخانه‌ها همراه بوده است. نتایج خروجی‌های ۶ مدل اقلیمی سری مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP با استفاده از روش آماری و نرم‌افزار CCT بر اساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم نشان می‌دهد که دمای بیشینه و کمینه در آینده و تا سال ۲۰۹۹ در تمام مدل‌های اقلیمی به‌طور مداوم روند افزایشی دارد، اما افزایش دمای کمینه، بیش‌تر از افزایش دمای بیشینه خواهد بود. در مورد بارش، پیچیدگی‌ها زیاد و عدم قطعیت را بیان می‌کند، اما بیش‌تر مدل‌های اقلیمی کاهش بارندگی را در حوضه تخمین می‌زنند. شبیه‌سازی رواناب با ابزار ارزیابی آب‌وخاک (SWAT) انجام شد و برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 استفاده شد. نتایج مقایسه‌ی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی و شاخص‌های آماری ارزیابی، بیانگر کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی دبی حوضه است. میانگین رواناب آینده‌ی حوضه‌ی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 روند کاهشی داشته و نسبت به دوره‌ی مشاهداتی آن به ترتیب ۳۹/۱، ۴۰/۳ و ۴۰/۴ درصد افت آبدهی خواهد داشت؛ بنابراین با کاهش دبی حوضه، احتمال رخداد فراوانی خشک‌سالی در آینده قابل‌انتظار است.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، سناریوهای RCP، هیدرولوژی، مدل SWAT، حوضه‌ی رودخانه‌ی میناب هرمزگان.

* Email: Kardavani @srbiau.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری به کشف ارتباط و اثرات بالقوه‌ی اقلیم آینده بر روی چرخه‌ی آب انجام شده است (Guo et al., 2018: 2045; Wang and Kalin, 2018: 107). تغییر آب‌وهوا، چالش‌های منابع آب را در بسیاری از حوضه‌های رودخانه‌ای در سراسر جهان به وجود آورده و اثرات عمیقی بر روی هیدرولوژی حوضه، کمیت و دسترسی به آب حوضه داشته است (Aryal et al., 2018: 1; Ercan et al., 2020: 53). سناریوهای اقلیمی هم در مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)^۱ و هم در مدل‌های مشابه اغلب به بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر هیدرولوژی منطبق شده‌اند (Fereidoon and Koch, 2018: 502). تقریباً ۲ هزار مورد خشک‌سالی و سیلاب بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ در پایگاه داده‌های بلایای اضطراری به آدرس http://www.emdat.be/disaster_profiles/index.html گزارش شده است و این حوادث بیش از ۱/۲ میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داده و باعث مرگ ۸۲ هزار نفر و خساراتی معادل ۴/۳ میلیارد دلار شده است (Tan et al., 2017: 1). رژیم‌های هیدرولوژیکی منطقه در برابر تغییرات آب و هوایی به‌ویژه بارندگی و دما آسیب‌پذیر هستند (Bajracharya et al., 2018: 837). طبق خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده‌ی مدل‌های اقلیمی، دماهای بالا احتمالاً به افزایش تبخیر-تعرق، تغییر در الگوهای بارندگی در مقیاس وسیع و فراوانی وقایع حدی منجر می‌شود (Buytaert et al., 2010: 32).

به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب، مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی با به‌کارگیری اطلاعات مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) توسعه یافتند. مدل گردش عمومی جو (GCM) نمونه‌ای از مدل‌های اقلیمی است که به‌صورت ریاضی، گردش عمومی جو و اقیانوس را بیان می‌کند. GCM می‌تواند اطلاعات خیلی معتبری را با توجه به اقلیم‌های گذشته، حال و آینده فراهم نماید. مدل‌های جفت‌شده‌ی جوی-اقیانوسی گردش عمومی فاز ۵ (CMIP5)^۲ که بر اساس سناریوهای جدید تغییر اقلیم که اصطلاحاً سناریوی واداشت تابشی (RCP)^۳ نامیده می‌شود، استوار است و می‌تواند تنوع وسیعی از سناریوها را برای اقلیم آینده در برگیرد. اعتماد به نتایج مدل‌ها تا حد زیادی متفاوت است و به‌طور عمده به روش‌ها و ساختار سناریو اقلیمی و مدل هیدرولوژیکی بستگی دارد (Duan et al., 2019: 612; Gonzalez et al., 2010: 755; Zhou et al., 2015: 1193). مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) به علت تفکیک فضایی خیلی بزرگ نمی‌توانند با مدل‌های هیدرولوژیکی که به صورت ریزش‌بکه یا مقیاس حوضه‌ای با وسعت کم هستند، شبیه‌سازی شوند و برای رفع چالش تفکیک مکانی بین مدل‌های گردش عمومی و مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری که پلی بین دو مقیاس مختلف‌اند، توسعه یافتند. درواقع، این دسته از مدل‌ها در قالب واسطه‌های بین مدل‌های گردش عمومی و متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی در سطح محدود‌دهی موردبررسی قرار می‌گیرند (Ndhlovu and Woyessa, 2020: 1; Tuo et al., 2016: 66).

یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی معروف، ابزار ارزیابی آب‌و خاک (SWAT)^۴ است. این مدل قادر به شبیه‌سازی اقلیم، رواناب سطحی و غیره در حوضه‌های آبخیز است. به‌طورکلی عملکرد مدل SWAT دامنه‌ی رضایت‌بخش مناسبی دارد و محدودیت‌های این مدل به صحت داده‌های هواشناسی و مدت‌زمان مورداستفاده در اعتبارسنجی بستگی دارد (Marin et al., 2020: 1). مدل‌های بارش-رواناب برای فهم فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌ی رودخانه‌ای و حمایت از مدیریت منابع آب مشخص می‌شوند (Du et al., 2019: 1872; Tuo et al., 2016: 66). بارندگی و دمای هوا دو متغیر جوی ضروری جهت ورودی‌های مدل هیدرولوژیکی هستند (Laiti et al., 2018: 1999). تغییرات اقلیمی به‌ویژه بارش

- 1- General Circulation Models (GCM)
- 2- Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)
- 3- Representative Concentration Pathways (RCP)
- 4- Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

پارامترهای مؤثر در سامانه‌های هیدرولوژیکی مانند جریان رودخانه، رطوبت خاک، ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی و تأمین آب را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و پیامدهای آن بر روی رژیم‌های هیدرولوژیکی مهم هستند (Mishra et al., 2018: 1; Kløve et al., 2014: 250; López-Moreno et al., 2010: 2561).

اهمیت موضوع تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب موجب شده تا پژوهشگران مختلف توجه ویژه‌ای به این موضوع داشته و دامنه‌ی مطالعات در این زمینه، افزایش قابل توجهی داشته باشد. یافته‌های مطالعه بهتاً^۱ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای RCP نشان می‌دهد جریان رودخانه‌ی هیمالیان در نپال، تحت تأثیر تغییر اقلیم تا ۸/۵ درصد در طول قرن بیست‌ویکم کاهش داشته؛ اما تأثیر اقلیم در رودخانه‌ی یانهه چین بیش‌تر بوده و این افت ۴۶ تا ۶۰ درصد خواهد بود (Wu et al., 2017: 328). نتایج بررسی تان^۲ و همکاران (۲۰۱۷) در رودخانه‌ی کلانتان مالزی و خروجی‌های پژوهش نیلاور و ویکار^۳ (۲۰۱۹) در رودخانه‌ی پورنا هند با مدل SWAT حاکی از افزایش دما و بارندگی سالانه و مطابق آن، رواناب رودخانه نیز افزایش خواهد داشت. گل‌محمدی و همکاران (۲۰۱۷) در پیش‌بینی تغییرپذیری زمانی جریان رودخانه‌ی گالی‌گریک در انتاریو کانادا نشان دادند که دبی جریان شبیه‌سازی شده نسبت به دوره‌ی مشاهداتی بیش‌ازحد برآورد شده است. ونکاتارمن^۴ و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی خشک‌سالی تگزاس در قرن ۲۱ بر اساس مدل‌های سری CMIP5 تحت سناریوهای RCP دریافتند که دما، افزایش و بارندگی، کاهش خواهد یافت و کاهش بارندگی منجر به کاهش جریان رودخانه و آب‌های زیرزمینی در این منطقه خواهد شد. در پیش‌بینی رواناب حوضه‌ی دریاچه‌ای چم‌پلین، شبیه‌سازی متغیرهای بارندگی سالانه ناموفق بوده و نتیجه‌ی قابل‌اطمینانی از رواناب حاصل نشده است (محمد و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۶۰). نتایج مطالعه ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۶) در برآورد جریان رودخانه‌ی Xin چین نشان می‌دهد که دما به‌طور مداوم افزایش می‌یابد، اما روند بارندگی پیچیده است و اختلاف معنی‌داری در میان انواع سناریوها وجود دارد. نتایج یافته‌های آپورو^۶ (۲۰۱۵) در تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر روی سیلاب حوضه‌ی براهماپوترا حاکی از آن است که با افزایش تعداد دوره‌های بارندگی و مدت‌زمان طولانی‌تر، سیلاب‌های پیک و مجموع حجم سیلاب بیش‌تر می‌شود.

هدف این مطالعه، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب آینده‌ی حوضه‌ی میناب است. انجام این پژوهش از این لحاظ حائز اهمیت است که رودخانه‌ی میناب، تنها منبع تأمین آب شرب جمعیت ۶۰۰ هزارنفری شهر بندرعباس بوده و منبع تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی بسیاری از چاه‌های کشاورزی شهرستان میناب است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز میناب است که در عرض ۲۶ درجه و ۵۷ دقیقه و ۱۴ ثانیه تا ۲۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۴ ثانیه شمالی و طول ۵۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۹ ثانیه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد و پرآب‌ترین و مهم‌ترین حوضه‌ی آبریز استان هرمزگان است که در مجاورت تنگه‌ی هرمز و دریای عمان واقع شده است. این حوضه با مساحتی در حدود ۱۰۶۰۵ کیلومترمربع در شمال شهرستان میناب گسترش داشته و مهم‌ترین سد استان (سد استقلال) بر روی این رودخانه در سال ۱۳۶۲ ساخته شده است. حوضه‌ی میناب دارای دو زیرحوضه به نام‌های حوضه‌ی رودان به مساحت ۵۷۶۰ کیلومترمربع و حوضه‌ی جغین به مساحت ۳۲۲۵ کیلومترمربع است. در این حوضه، ۳ ایستگاه آب‌سنجی برنطین میناب-رودخانه‌ی میناب، آبنما-رودخانه‌ی رودان و برنطین جغین-رودخانه‌ی جغین تأسیس شده است (شکل ۱).

5- Bhatta

6- Tan

7- Ndhlovu and Woyessa

8- Venkataraman

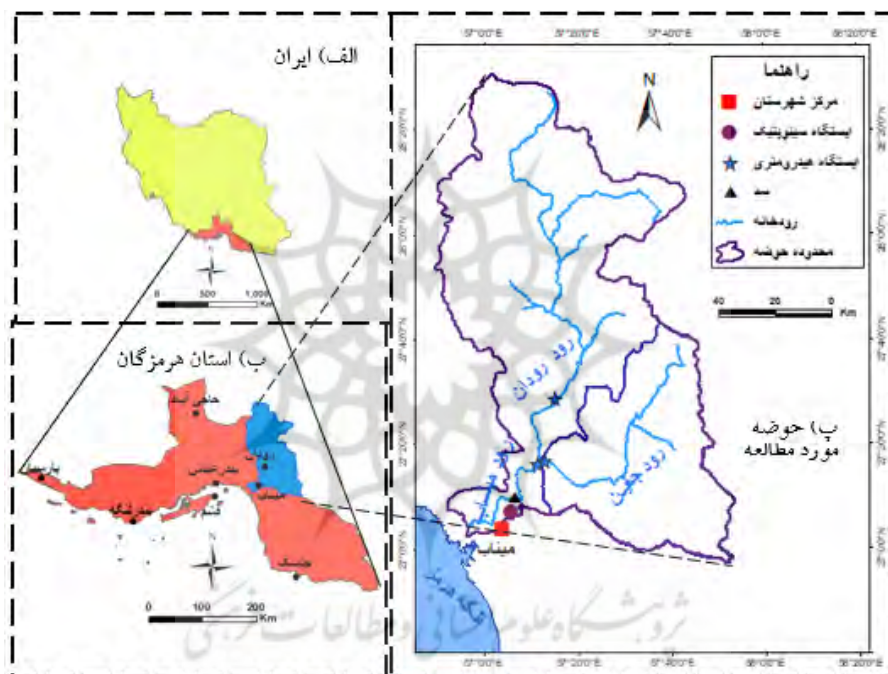
9- Zhang

10- Apurv

میانگین دمای سالانه‌ی حوضه ۲۷/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد، دمای بیشینه و کمینه به ترتیب ۳۳/۱ و ۱۹/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه برابر ۱۸۴/۷ میلی‌متر است. دامنه‌ی تغییرات بارش سالانه در گستره‌ی حوضه، بین ۳۰/۳ تا ۳۹۹/۶ میلی‌متر متغیر است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی دمارتن گسترش‌یافته، حوضه دارای اقلیم خشک بیابانی گرم است (شکل ۲).

۳- داده و روش‌ها

در این مطالعه، داده‌های هواشناسی روزانه در بازه‌ی زمانی ۳۳ ساله و از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ شامل حداکثر دما و حداقل دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)، بارندگی (میلی‌متر)، رطوبت نسبی (درصد) از ۸ ایستگاه منتخب در منطقه‌ی مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO)^{۱۱} شامل بندرعباس، میناب، جاسک، جیرفت، حاجی‌آباد، قشم، کهنوج و بافت تهیه شده است (شکل ۳) و داده‌های دبی ایستگاه آب‌سنجی برنطین میناب واقع در خروجی حوضه به‌عنوان ایستگاه مبنا از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ از وزارت نیرو تهیه گردید.

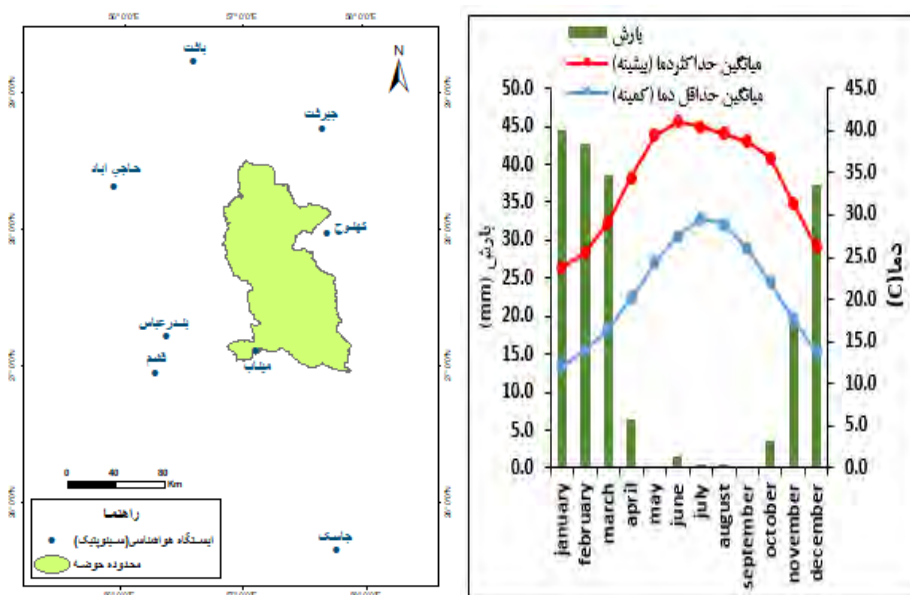


شکل ۱: موقعیت حوضه‌ی آبریز میناب

داده‌های مکانی شامل داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM)^{۱۲}، اطلاعات شبکه‌ی رواناب، نوع خاک و کاربری اراضی هستند. تفکیک مکانی برای DEM ابعاد ۳۰ × ۳۰ متر در قالب داده‌های یاخته‌ای بوده و از مرکز داده‌های علمی و فنی سازمان نقشه‌برداری ایران سایت (www.ncc.org.ir) استخراج گردیده است. داده‌های DEM برای استخراج مسیر و تراکم جریان، ایجاد جریان و محاسبه‌ی پارامترهای زیرحوضه به کار می‌رود. داده‌های کاربری اراضی در مقیاس $\frac{1}{250000}$ از سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور و داده‌های خاک با مقیاس $\frac{1}{250000}$ استان هرمزگان از مؤسسه‌ی تحقیقات آب‌و خاک کشور بارگیری شده است.

11- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization(IRIMO)

12- Digital elevation model(DEM)



شکل ۲: میانگین بارش (mm) و دمای سالانه (C°) ایستگاه میناب شکل ۳: موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

داده‌های واکاوی روزانه‌ی اقلیمی برای مدل‌سازی اقلیم آینده از دو پایگاه GCM (www.2w2e.com) و (www.canada.ca) (NCEP/NCAR^{۱۳}) دانلود شده است. آرشیو داده‌های واکاوی GCM از سال‌های ۲۰۹۹-۱۹۵۰ را دربر می‌گیرد که داده‌های روزانه‌ی مشاهداتی آن که در مدل استفاده می‌شود، بین سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۷۰ قرار دارند، اما داده‌های NCEP از سال ۱۹۶۱ تا ۲۱۰۰ از NCEP/NCAR (مرکز ملی پیش‌بینی محیطی/مرکز ملی تحقیقات جوی) (کلانی و همکاران، ۱۹۹۶) اقتباس شده است. این داده‌ها معمولاً با توجه به متغیرهای جوی بزرگ‌مقیاس مانند ارتفاع ژئوپتانسیل، باد افقی، فشار، رطوبت ویژه، رطوبت نسبی و سایر پارامترها با تفکیک ۲/۵ درجه طول و ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی را دربر می‌گیرد.

در حال حاضر بیش‌تر ارزیابی‌های تغییر اقلیم بر اساس مدل‌های سری CMIP5 که در گزارش پنجم (۲۰۱۳) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^{۱۴} منتشر شده، انجام می‌شود. این هیئت بر اساس مستندات و گزارش کارگروه‌ها، ۴۰ مدل اقلیمی را منتشر کرده‌اند. سری مدل‌های CMIP5 سه گروه بزرگ از مدل‌های اقلیمی شامل مدل گردش عمومی جوی-اقیانوسی جفت‌شده (AOGCMs)، مدل سیستم زمین (ESMs) که اندرکنش جو-اقیانوس-سطح زمین را در نظر می‌گیرند، مدل شیمی جو شامل مدل شیمی جوی-اقیانوسی (ChemAO) و مدل شیمی سیستم زمین (ChemESM) را دربر می‌گیرد (Venkataraman et al., 2016: 300).

در بررسی سناریوهای آینده‌ی حوضه‌ی مورد مطالعه، از نرم‌افزارهای اقلیمی متفاوتی از جمله بسته‌ی نرم‌افزاری تغییر اقلیم (CCT)^{۱۵}، نرم‌افزار SDSM استفاده شده است. در این پژوهش از ۶ مدل اقلیمی مختلف تحت سناریوهای RCP استفاده شده که در ۵ مدل اقلیمی IPSL-، MIROC-ESM، HadGEM2-ESM، GFDL-ESM2M، NorESM1-ME، CM5A-MR برای سناریوسازی و پیش‌بینی اقلیم آینده‌ی حوضه از بسته‌ی نرم‌افزاری تغییر اقلیم CCT و برای مدل اقلیمی CanESM2 که در بسته‌ی نرم‌افزاری فوق وجود نداشته، از داده‌های پایگاه NCEP و برای ریزمقیاس‌نمایی آماری مدل از نرم‌افزار SDSM^{۱۶} استفاده شده است. سناریوهای انتشار خط سیر توازن واداشت

13-NCEP/NCAR: National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)

14- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

15- Climate Change Toolkit (CCT)

16- Statistical Downscaling Model (SDSM)

تابشی^{۷۷} یا RCP (RCP scenario data) مستنداتی از انتشار، تمرکز و تغییر پوشش زمین که اصطلاحاً RCP نامیده می‌شود، فراهم می‌نماید (Moss et al., 2008). این سناریوها پیش‌بینی اقلیم آینده را بر اساس خط سیر توازن واداشت تابشی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای برحسب وات بر مترمربع تحت سناریوهای RCP2.6, RCP6.0, RCP4.5 و RCP8.5 که به ترتیب نماینده‌ی خط سیر توازن واداشت تابشی خیلی پایین (RCP2.6)، پایداری ملایم (RCP4.5, RCP6.0) و انتشار خیلی زیاد (RCP8.5) هستند، در نظر می‌گیرند. سناریوی RCP6.0 همانند سناریوی RCP4.5 یک سناریوی حد واسط است و معمولاً در مطالعات پیش‌بینی اقلیمی از این سناریو صرف‌نظر می‌شود.

در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ی میناب از افزونه‌ی ArcSWAT2012 برای اجرای مدل SWAT استفاده شده است. مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی و فیزیکی است (Arnold et al., 1998:73) که اغلب برای ارزیابی تصمیمات مدیریتی و تغییرپذیری اقلیمی بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی مداوم طولانی‌مدت به کار می‌رود (Strauch et al., 2012:413). این مدل قادر به شبیه‌سازی اقلیم، رواناب سطحی، جریان آب زیرزمینی، ذخیره‌ی مخزن، تبخیر و تعرق، روندیابی کانال اصلی در حوضه‌های آبی است. در مدل SWAT هر حوضه به چند زیرحوضه و هر زیرحوضه به چند «واحد واکنش هیدرولوژیکی» (HRU)^{۷۸} تقسیم می‌شود. برحسب تعریف HRU کوچک‌ترین واحد هیدرولوژیکی در مدل SWAT است که از نظر کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و طبقات شیب همگن هستند. تقسیم حوضه این امکان را می‌دهد تا تفسیر بهتری از فرآیندهای رخ داده در حوضه‌ی آبخیز داشته باشیم (شکل ۴).

ورودی‌های اصلی مدل SWAT شامل لایه‌های اطلاعاتی مدل رقمی ارتفاع (DEM)، لایه‌ی شیب، لایه‌ی خاک و لایه‌ی کاربری اراضی است (شکل ۵). متغیرهای هیدروکلیماتولوژی و عددی ورودی مدل SWAT شامل مقادیر روزانه‌ی بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به ایستگاه‌های داخل و خارج حوضه و متوسط رواناب روزانه‌ی خروجی حوضه به همراه موقعیت‌های جغرافیایی آن‌هاست که بر اساس فرمت مدل تنظیم گردید؛ بنابراین پس از ورود داده‌های مکانی و اقلیمی در مدل، فایل خروجی مدل SWAT استخراج می‌گردد. پارامترهای تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی با ابزار SWAT-CUP اجرا گردید (<http://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>). روش‌های تجزیه و تحلیل حساسیت جهانی به‌منظور ارزیابی مهم‌ترین پارامترها برای شبیه‌سازی جریان ماهانه‌ی رودخانه‌ی میناب استفاده شد. با استفاده از برنامه‌ی SUFI2 به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار SWAT-CUP، تعیین و میزان حساسیت و عدم قطعیت آن‌ها با استفاده از این برنامه برآورد شد.

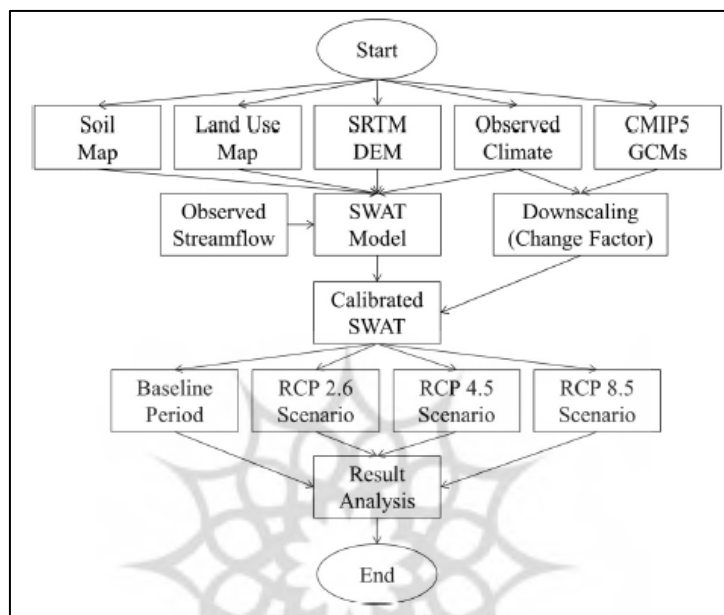
برای ارزیابی خروجی‌های بارندگی، دمای بیشینه و دمای کمینه‌ی شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهداتی از ۴ شاخص آماری ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R^2) و ضریب اریبی (BIAS) استفاده گردید. در تحلیل و رواناب حوضه برای نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، P-factor و R-factor در نظر گرفته شده است.

ضریب تعیین (R^2) میزان ارتباط و همبستگی بین پارامترهای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را بیان می‌کند. نمایه‌ی عددی ۱ بالاترین ضریب است و نشان‌دهنده‌ی همبستگی قوی و کامل بین متغیرهای مورد مطالعه است. هرچه مقدار R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، درجه‌ی همبستگی خطی بین دو متغیر بیش‌تر خواهد شد. R^2 معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر ۱ $\bar{+}$ است؛ جایی که $Q_{s,i}$ و $Q_{m,i}$ دبی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در هر مرحله از زمان را نشان می‌دهند. $Q_{s,avg}$ و $Q_{m,avg}$ میانگین رواناب اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در هر مرحله از زمان n تعداد مراحل زمان و NSE از $-\infty$ تا ۱ و R^2 از صفر تا ۱ است. اگر NSE و R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد بهتر مدل SWAT است.

17- Radiative Forcing (RF)

18- Hydrological Response Unit (HRU)

مطابق نظر (Moriassi et al 2015: 281) در اجرای شبیه‌سازی مدل، ضریب ساتکلیف (NSE) بیش‌تر از ۰/۵ و بایاس بین ± ۰.۲۵ مناسب است. تابع اریبی ($Bias$) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) ابزار و معیاری برای نشان دادن میزان نزدیکی پارامتر جامعه به برآوردگر آن پارامتر است و هر قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد بهتر مدل است. در تابع اریبی اگر مقدار برآوردگرهای حاصل با پارامتر واقعی جامعه تقریباً برابر شود؛ در این حالت، میزان اریبی برآوردگر (فاصله‌ی آن از مقدار واقعی پارامتر) مقداری برابر صفر خواهد بود. چنین برآوردگری را یک برآوردگر "نااریب" ($Unbiased$) می‌گویند (جدول ۱).

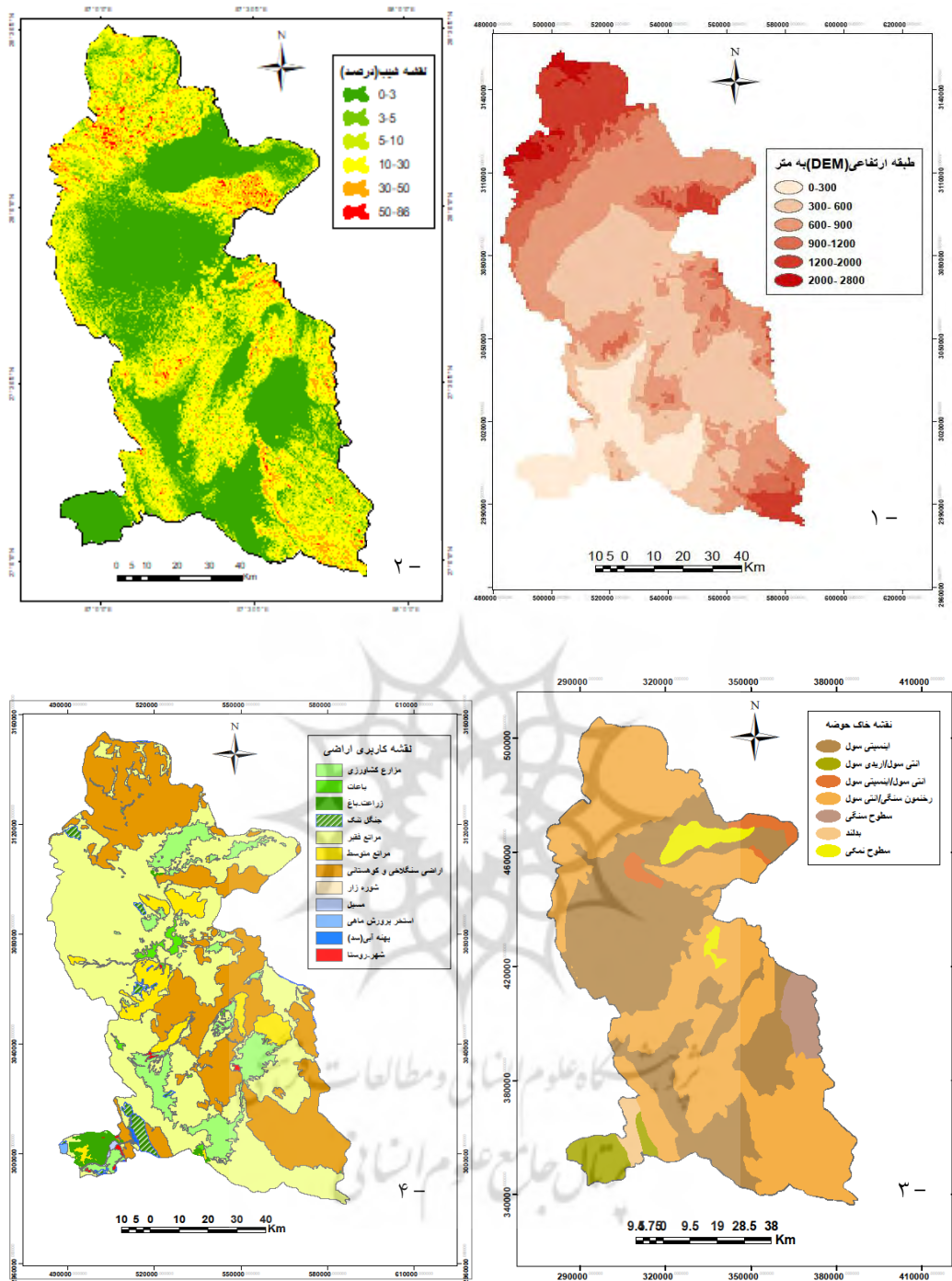


شکل ۴: دیاگرام شماتیک این مطالعه منبع: (Tan et al., 2017: 3)

جدول ۱: روابط شاخص‌های آماری مورد استفاده

ردیف	شاخص آماری	معادله
۱	ضریب ساتکلیف (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i} - Q_{m,avg})^2}$
۲	ضریب تعیین (R^2)	$R^2 = \frac{\{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i} - Q_{m,avg})(Q_{s,i} - Q_{s,avg})\}^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i} - Q_{m,avg}) \sum_{i=1}^N (Q_{s,i} - Q_{s,avg})^2}$
۳	تابع اریبی ($Bias$)	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s,i} - Q_{m,i})}{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i})} \times 100$
۴	ریشه‌ی میانگین مربعات خطا ($RMSE$)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{N}}$

منبع: (Moriassi et al., 2015: 281)



شکل ۵: لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز در مدل (۱-۵) مدل رقومی ارتفاع (DEM)، (۲-۵) شیب (۳-۵) خاک و (۴-۵) کاربری اراضی

۴- بحث و نتایج

نتایج این مطالعه به سه بخش بررسی روند تغییرات اقلیمی، نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیک مدل SWAT و اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب قابل‌دسترس حوضه می‌ناب پرداخته می‌شود. مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش، اقلیم آینده را تا سال ۲۰۹۹ پیش‌بینی می‌کنند و بر همین اساس، سه دوره‌ی زمانی پیش‌بینی شامل دوره‌ی آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰)، دوره‌ی زمانی آینده‌ی میانی (۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰) و دوره‌ی زمانی آینده‌ی دور (۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹) متصور است. نتایج خروجی‌ها و ارزیابی‌های ۶ مدل اقلیمی-GFDL و در هر سه سناریوی RCP2.6, RCP4.5

و RCP8.5 برای پیش‌بینی دما و بارش آینده‌ی حوضه‌ی میناب گویای این است که دما به‌طور مداوم در حوضه در حال افزایش است و این افزایش در دوره‌ی زمانی آینده (۲۰۷۱-۲۰۹۹) چشم‌گیرتر است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که دمای بیشینه‌ی شبیه‌سازی‌شده‌ی دوره‌ی آتی (۲۰۲۰-۲۰۹۹) نسبت به میانگین دمای مشاهداتی در تمام مدل‌ها تحت هر سه سناریوی RCP بیشتر خواهد شد و افزایش دما تغییراتی بین ۰/۱ تا ۳/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای کمینه، دامنه‌ای بین ۰/۶ تا ۴/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به میانگین دمای مشاهداتی خواهد داشت. در مجموع استنباط می‌شود در تمام مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی، دمای حوضه‌ی میناب در حال افزایش است و میزان افزایش دمای کمینه، بیش‌تر از افزایش دمای بیشینه در آینده رخ خواهد داد؛ اما در مورد بارش، پیش‌بینی‌ها پیچیده و عدم قطعیت را بیان می‌کنند و بسته به سناریوها و مدل‌های اقلیمی در بعضی مدل‌ها افزایش و در برخی نیز کاهش را نشان خواهند داد. در مجموع بیش‌تر مدل‌ها، مقدار بارندگی پیش‌بینی‌شده را کم‌تر از مقدار مشاهداتی تخمین زده‌اند. در بررسی بارندگی در سناریوی RCP4.5 که یک سناریوی حد واسط است، بارندگی دامنه‌ی تغییراتی بین ۶۹/۱+ تا ۹۱/۴- میلی‌متر در آینده خواهد داشت (جدول ۲ و شکل ۶).

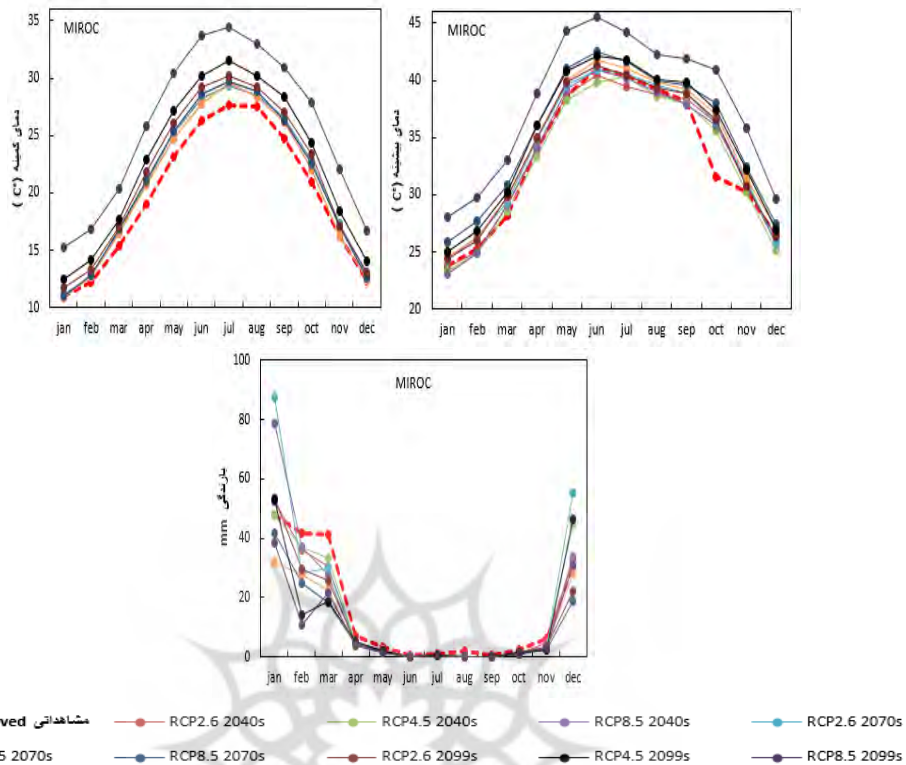
جدول ۲: نتایج میزان افزایش یا کاهش پارامترهای دما و بارندگی آینده نسبت به دوره‌ی پایه تحت سناریوی RCP4.5 (۲۰۲۰-۲۰۹۹)

دمای بیشینه‌ی دوره‌ی مشاهداتی: $33/1^{\circ}C$ دمای کمینه‌ی دوره‌ی مشاهداتی: $19/7^{\circ}C$ بارش مشاهداتی: $184/7\text{ mm}$

دوره	شاخص	مدل‌های اقلیمی											
		GFDL-ESM2M	میزان افزایش / کاهش	HadGEM2-ES	میزان افزایش / کاهش	IPSL-CM5A-LR	میزان افزایش / کاهش	MIROC	میزان افزایش / کاهش	NoerESM1-M	میزان افزایش / کاهش	CanESM2	میزان افزایش / کاهش
RCP2.6													
۲۰۲۰- ۲۰۹۹	بیشینه	۳۳/۰	-۰/۱	۳۴/۱	۱/۰	۳۳/۸	۰/۷	۳۳/۸	-۰/۷	۳۳/۲	۰/۱	۳۵/۱	۲/۰
	کمینه	۲۰/۴	۰/۷	۲۱/۸	۲/۱	۲۱/۷	۲/۰	۲۱/۴	۱/۷	۲۰/۹	۱/۲	۲۰/۳	۰/۶
	بارش	۲۱۰/۶	۲۵/۹	۲۴۸/۱	۶۳/۴	۱۳۱/۲	-۵۳/۵	۱۷۳/۷	-۱۱/۰	۲۵۳/۸	۶۹/۱	۹۷/۴	-۸۷/۳
RCP4.5													
۲۰۲۰- ۲۰۹۹	بیشینه	۳۳/۶	۰/۵	۳۴/۷	۱/۶	۳۴/۵	۱/۴	۳۴/۱	۱/۰	۳۳/۷	۰/۶	۳۵/۶	۲/۵
	کمینه	۲۱/۰	۱/۳	۲۲/۴	۲/۷	۲۲/۳	۲/۶	۲۱/۷	۲/۰	۲۱/۳	۱/۶	۲۰/۶	۰/۹
	بارش	۲۰۷/۱	۲۲/۴	۲۲۳/۶	۳۸/۹	۹۶/۵	-۸۸/۲	۱۴۸/۷	-۳۶/۰	۱۸۱/۴	-۳/۳	۹۳/۳	-۹۱/۴
RCP8.5													
۲۰۲۰- ۲۰۹۹	بیشینه	۳۴/۵	۱/۴	۳۵/۹	۲/۸	۳۵/۷	۲/۶	۳۵/۳	۲/۲	۳۴/۵	۱/۴	۳۶/۷	۳/۶
	کمینه	۲۲/۰	۲/۳	۲۳/۸	۴/۱	۲۳/۷	۴/۰	۲۱/۱	۱/۴	۲۲/۳	۲/۶	۲۱/۵	۱/۸
	بارش	۱۷۱/۹	-۱۲/۸	۲۲۷/۷	۴۳/۰	۱۱۱/۱	-۷۳/۶	۱۱۴/۴	-۷۰/۳	۲۳۶/۳	۵۱/۶	۹۵/۸	-۸۸/۹

در ارزیابی مدل‌های اقلیمی، خروجی بارندگی، دمای بیشینه و کمینه ۶ مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای RCP با داده‌های مشاهداتی حوضه بر اساس معیارهای خطا شامل ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب اریبی (BIAS) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس معیار ارزیابی و شاخص‌های آماری از میان ۶ مدل اقلیمی، مدل MIROC بیش‌ترین همبستگی و همگنی را نسبت به داده‌های مشاهداتی داشته‌اند و در این مدل در سناریوی RCP4.5 افزایش دمای بیشینه ۱/۰ و افزایش دمای کمینه برابر ۲/۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است و افزایش دمای کمینه، بیش‌تر از افزایش دمای بیشینه خواهد بود؛ اما در مورد مؤلفه‌ی بارش در هر سه سناریوی RCP کاهش بارندگی را نسبت به داده‌های مشاهداتی

تخمین زده است؛ به طوری که برای دوره‌ی زمانی آینده (۲۰۲۰-۲۰۹۹) تحت سناریوی RCP4.5, RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱۱/۰-، ۳۶/۰- و ۷۰/۳- میلی‌متر کم‌تر از دوره‌ی مشاهداتی برآورد نموده است (جدول ۳).



شکل ۶: مقایسه‌ی دمای بیشینه، کمینه و بارندگی ماهانه‌ی داده‌های مشاهداتی (۱۹۷۰-۲۰۰۵) و پیش‌بینی‌شده‌ی اقلیمی سه دوره‌ی آینده تحت سناریوهای RCP (۲۰۲۰-۲۰۹۹) حوضه‌ی میناب

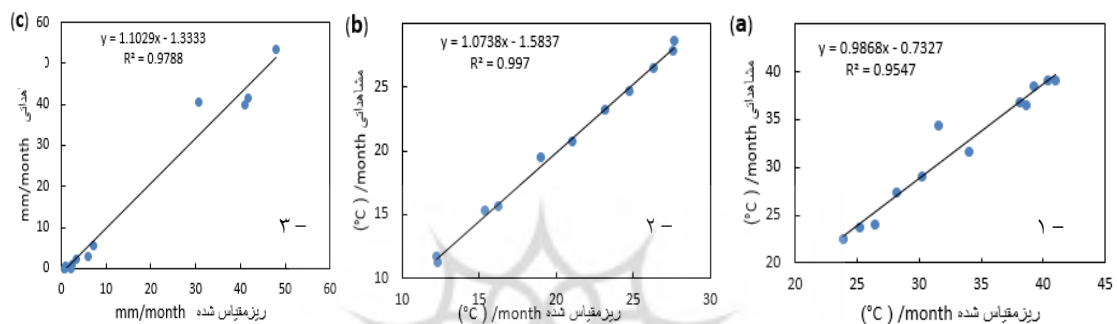
جدول ۳: نتایج عملکرد معیارهای ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مؤلفه‌ی دما و بارش (۱۹۷۰-۲۰۰۵)

شاخص آماری	دمای بیشینه (°C)			دمای کمینه (°C)				بارش (mm)		
	نش-ساناکلیف	ریشه میانگین	مربعات خطا	ضریب تعیین	درصد آرینی	خطا	ریشه میانگین	نش-ساناکلیف	درصد آرینی	ضریب تعیین
GFDL-ESM2M	۱/۰	۱/۹	-۳/۹	۱/۰	۱/۳	۰/۶	۱/۰	۰/۹۸	۱۲/۳	۰/۹۶
HadGEM2-ES	۱/۰	۱/۸	-۳/۵	۱/۰	۰/۸	۰/۶	۱/۰	۱/۰	۶/۴	۰/۹۷
IPSL-CM5A-LR	۱/۰	۱/۷	-۳/۴	۱/۰	۰/۸	۰/۵	۱/۰	۷۹/۰	۱۴/۳	۰/۵۱
MIROC	۱/۰	۱/۸	-۳/۵	۱/۰	۰/۸	۰/۶	۱/۰	۱/۰	۳/۵	۰/۹۸
NoerESM1-M	۱/۰	۱/۸	-۳/۵	۱/۰	۰/۸	۰/۶	۱/۰	۱/۰	۴/۴	۰/۹۷
CanESM2	۱/۰	۱/۴	-۲/۴	۱/۰	-۳/۶	۱/۴	۱/۰	۰/۳۴	۱۸/۶	۰/۹۴

در شکل (۷) ارزیابی عملکرد داده‌های مشاهداتی بارش (a)، دمای بیشینه (b) و دمای کمینه (c) حوضه‌ی میناب (۱۹۷۰-۲۰۰۵) بر اساس مقدار R^2 با داده‌های ریزمقیاس‌شده نشان داده شده است. مدلی که بهترین همبستگی را با

داده‌های مشاهداتی داشته، مدل Miroc بوده است. در این اشکال محور افقی، داده‌های ریزمقیاس‌شده‌ی مدل و محور عمودی، داده‌های مشاهداتی است.

مقدار ضریب همبستگی (R^2) و معادله‌ی برازش بین نقاط به صورت معادله‌ی $y = ax + b$ تعریف شده است. بالا بودن ضریب همبستگی، نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن مقادیر تخمین‌شده به مقادیر مشاهداتی است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که بین داده‌های مشاهداتی و ریزمقیاس‌شده همبستگی قوی وجود دارد که برای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارندگی به ترتیب مقادیری برابر ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۰/۹۸ به دست آمده است. نتایج ارزیابی پیش‌بینی ماهانه بیانگر این است که بر اساس سناریوهای RCP برای ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس در فصل زمستان، روند افزایش دما و به عبارتی، زمستان گرم‌تر نسبت به زمان حال پیش‌بینی شده است. سایر فصول نیز از روند افزایش دما برخوردار خواهند بود.



شکل ۷: داده‌های ماهانه‌ی دمای بیشینه (۷-۱)، دمای کمینه (۷-۲) و بارش (۷-۳) مشاهداتی و ریزمقیاس‌شده‌ی حوضه‌ی میناب (۲۰۰۵-۱۹۷۰)

نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه، بر اساس خروجی‌های مدل SWAT حاصل شد. در تحلیل رواناب حوضه‌ی تحت تأثیر تغییر اقلیم، مدل SWAT یکی از پرکاربردترین مدل‌های بارش-رواناب است که به پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی رواناب حوضه می‌پردازد. بر اساس این مدل، حوضه‌ی میناب به ۴۱ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) که از نظر خصوصیات خاک، کاربری اراضی و شیب همگن بودند، دسته‌بندی شد. مقادیر آستانه HRU کاربری اراضی، خاک و شیب به ترتیب ۲۰، ۱۰ و ۲۰ درصد تعریف شده که توسط وینچل و همکاران (۲۰۱۳) توصیه شده است. طول دوره‌ی آماری داده‌ها از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ انتخاب گردید. دوره‌ی ۳ سال نخست برای متعادل کردن مدل، از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۲ میلادی برای واسنجی و از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸ میلادی برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

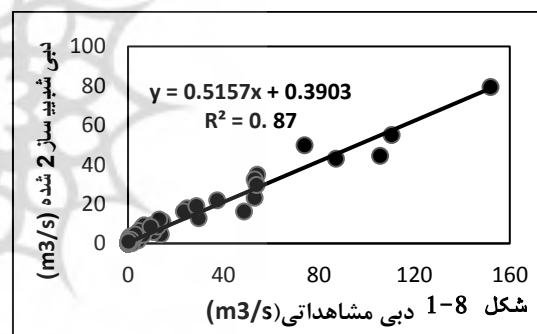
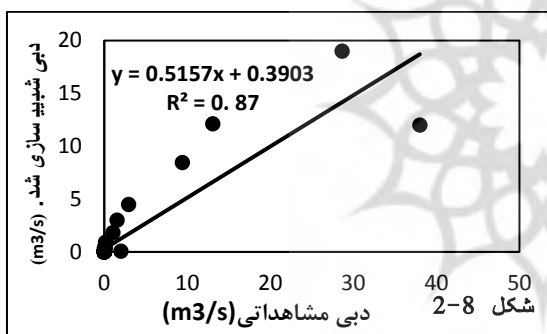
طبق مطالعات Im et al (2017: 1561) دوسوم از داده‌های موجود (آمار دبی مشاهداتی) برای واسنجی و یک‌سوم برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج آماری و گرافیکی شبیه‌سازی جریان آب در دوره‌ی زمانی واسنجی و اعتبارسنجی، نشان‌دهنده‌ی موردقبول بودن نتایج مدل در این مرحله است. نتایج تحلیل آماری در خصوص میزان انطباق بین مقادیر دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و ارزیابی کارایی مدل بر اساس ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین (R^2)، مقادیر P-factor و R-factor انجام شده که همگی در محدوده‌ی قابل‌قبول قرار گرفته است و نتایج، دلالت بر توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه دارد (جدول ۴ و شکل ۸). نتایج دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی بر اساس خروجی‌های مدل SWAT در مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی گویای همبستگی مناسب بین آن‌هاست (شکل ۹).

برای بررسی تغییرات اقلیمی بر رژیم جریان رودخانه‌ی میناب تحت سناریوهای RCP در دوره‌های زمانی آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۹۹) با توجه به پیش‌بینی داده‌های بارش آینده و بر اساس مدل Miroc اجرا شد. نتایج گویای آن است که دوره‌ی زمانی آینده و تا سال ۲۰۹۹ میانگین دبی رودخانه تحت سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به

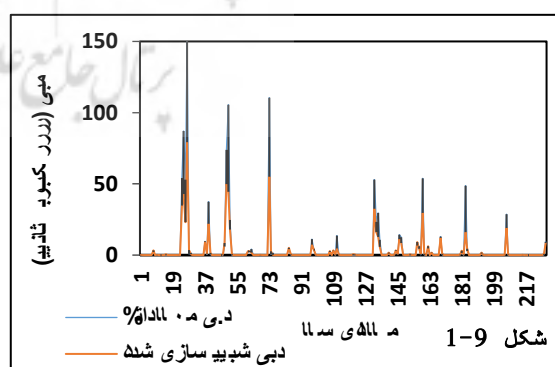
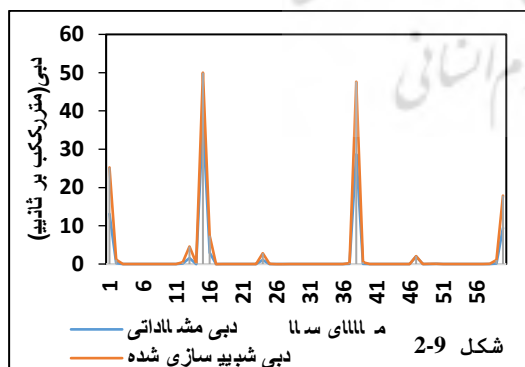
ترتیب برابر ۵/۲، ۵/۰۸ و ۵/۰۷ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی مشاهداتی (۸/۵ مترمکعب بر ثانیه) خواهد بود و بر همین اساس دبی آینده نسبت به دوره‌ی پایه به ترتیب برابر ۳۹/۱، ۴۰/۳ و ۴۰/۴ درصد افت آبدهی خواهد داشت. در بررسی دبی رودخانه، از یک‌طرف افزایش دما، افزایش خشکی و اثرات منفی بر تشدید تبخیر آب را به همراه خواهد داشت و از طرف دیگر، کاهش بارندگی نیز کاهش دبی رودخانه را به دنبال داشته و درنهایت، افزایش دما و کاهش بارندگی حوضه، از کم‌وکیف منابع آب منطقه خواهد کاست. مقایسه‌ی دبی ماهانه‌ی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ی مدل‌ها در طی دوره‌ی آینده (۲۰۲۰-۲۰۹۹) گویای آن است که در تمام ماه‌ها، دبی آینده نسبت به دبی مشاهداتی کاهش خواهد داشت و بیش‌ترین تغییرات در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل خواهد بود. با توجه به مقادیر رواناب آینده‌ی حوضه، به نظر می‌رسد رودخانه‌ی میناب در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت و دبی آن تا ۴۰ درصد افت خواهد کرد (شکل ۱۰).

جدول ۴: نتایج ضرایب آماری در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در واسنجی و اعتبارسنجی مدل

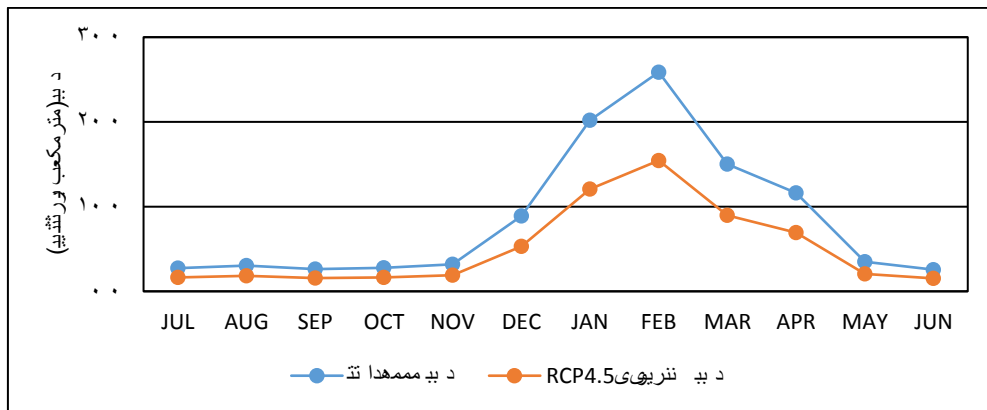
شاخص آماری	واسنجی	اعتبارسنجی	محدوده‌ی قابل قبول
R ²	۰/۸۷	۰/۸۱	R ² > ۰/۵
NS	۰/۸۹	۰/۷۲	NS > ۰/۵
P-factor	۰/۸۵	۰/۷۶	P > ۰/۷
R-factor	۱/۳۶	۱/۳۱	R < ۱/۵



شکل ۸: همبستگی بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ی حوضه‌ی میناب در مرحله‌ی واسنجی (۸-۱) و اعتبارسنجی (۸-۲)



شکل ۹: مقادیر بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ی حوضه‌ی میناب در مرحله‌ی واسنجی (۹-۱) و اعتبارسنجی (۹-۲)



شکل ۱۰: مقایسه‌ی میانگین دبی ماهانه رودخانه‌ی میناب با دبی دوره‌ی آینده (۲۰۹۹-۲۰۲۰) تحت سناریوی اقلیمی حد واسط (RCP4.5)

۵- نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی ۶ مدل اقلیمی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد که دمای بیشینه و کمینه در آینده و تا سال ۲۰۹۹ نسبت به دوره‌ی مشاهداتی در تمام مدل‌های اقلیمی به‌طور مداوم روند افزایشی خواهد داشت، اما افزایش دمای کمینه، بیش‌تر از افزایش دمای بیشینه است؛ به‌طوری‌که بر اساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوی RCP8.5 دمای بیشینه تا ۲/۸ و دمای کمینه تا ۴/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد تا پایان قرن ۲۱ افزایش خواهد داشت، اما در مورد بارش، پیچیدگی‌ها زیاد و عدم قطعیت را بیان می‌کند و از کاهش ۹۱/۴ میلی‌متر بارندگی در مدل CanESM2 و سناریوی RCP4.5 تا افزایش ۶۹/۱ میلی‌متر در مدل NoerESM1-M و سناریوی RCP2.6 متغیر است، اما مقادیر کاهش بارندگی بیش‌تر از افزایش بارندگی نسبت به مقادیر مشاهداتی است.

نتایج ارزیابی بر اساس شاخص‌های آماری RMSE، NSE، R^2 و BIAS مؤید این است که از میان ۶ مدل اقلیمی مدل MIROC بیش‌ترین همبستگی و همگنی را نسبت به داده‌های مشاهداتی داشته است و بر اساس این مدل، افزایش دمای بیشینه تا ۱/۰ و افزایش دمای کمینه تا ۲/۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در آینده متصور است و افزایش دمای کمینه، بیش‌تر از دمای بیشینه خواهد بود. در مورد مؤلفه‌ی بارش در هر سه سناریوی RCP کاهش بارندگی نسبت به داده‌های مشاهداتی در آینده متصور است و از کاهش بارندگی ۱۱/۰- تا ۷۰/۳- میلی‌متر برای دوره‌ی زمانی آینده (۲۰۹۹-۲۰۲۰) متغیر است.

مدل SWAT با توجه به کاربرد وسیع و موفقیت‌آمیز آن در ایران و جهان به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ی میناب بر اساس مدل SWAT تحت سناریوهای اقلیمی RCP ایستگاه هیدرومتری برنطین میناب انتخاب شد. مقایسه‌ی هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی و همچنین شاخص عددی ارزیابی کارایی مدل، بیانگر کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ی میناب است. نتایج نشان می‌دهد میانگین رواناب آینده حوضه‌ی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 روند کاهشی داشته که نسبت به دوره‌ی مشاهداتی (۸/۵ مترمکعب) به ترتیب برابر ۵/۱۹، ۵/۰۸ و ۵/۰۷ مترمکعب برآورد شده که به ترتیب ۳۹/۱، ۴۰/۳ و ۴۰/۴ درصد افت آبدی خواهد داشت. با توجه به مقادیر رواناب آینده‌ی حوضه، به نظر می‌رسد رودخانه‌ی میناب در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت و دبی آن در حدود ۴۰ درصد افت خواهد کرد و احتمال رخداد فراوانی خشک‌سالی با مدت‌زمان بیش‌تر نسبت به دوره‌ی مشاهداتی قابل‌انتظار است؛ بنابراین در آینده مدیریت حوضه باید بر پایه‌ی مواجهه با کاهش بسیار زیاد آب قابل‌دسترس استوار باشد و در تعریف پروژه‌های منابع آب، برنامه‌ریزی دقیق‌تری باید صورت گیرد.

۶- منابع

- 1- Apurv, T., Mehrotra, R., Sharma, A., Goyal, M. K., & Dutta, S. (2015). Impact of climate change on floods in the Brahmaputra basin using CMIP5 decadal predictions. *Journal of hydrology*, 527, 281-291.
- 2- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- 3- Aryal, A., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2018). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1-2), 193-209.
- 4- Bajracharya, A. R., Bajracharya, S. R., Shrestha, A. B., & Maharjan, S. B. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837-848.
- 5- Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., & Talchabhadel, R. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *Catena*, 181, 104082.
- 6- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Célleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1247.
- 7- Du, X., Shrestha, N. K., & Wang, J. (2019). Assessing climate change impacts on stream temperature in the Athabasca River Basin using SWAT equilibrium temperature model and its potential impacts on stream ecosystem. *Science of the Total Environment*, 650, 1872-1881.
- 8- Duan, Z., Tuo, Y., Liu, J., Gao, H., Song, X., Zhang, Z., . . . Mekonnen, D. F. (2019). Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *Journal of hydrology*, 569, 612-626.
- 9- Ercan, M. B., Maghami, I., Bowes, B. D., Morsy, M. M., & Goodall, J. L. (2020). Estimating Potential Climate Change Effects on the Upper Neuse Watershed Water Balance Using the SWAT Model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(1), 53-67.
- 10- Fereidoon, M., & Koch, M. (2018). SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change. *Science of the Total Environment*, 630, 502-516.
- 11- Golmohammadi, G., Rudra, R., Dickinson, T., Goel, P., & Veliz, M. (2017). Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. *Journal of hydrology*, 547, 375-386.
- 12- Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., & Drapek, R. J. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755-768.
- 13- Guo, T., Mehan, S., Gitau, M. W., Wang, Q., Kuczek, T., & Flanagan, D. C. (2018). Impact of number of realizations on the suitability of simulated weather data for hydrologic and environmental applications. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(8), 2405-2421.
- 14- Im, S., Brannan, K. M., Mostaghimi, S., & Kim, S. M. (2007). Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(11), 1561-1570.
- 15- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., . . . Woollen, J. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-472.
- 16- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., . . . Rossi, P. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of hydrology*, 518, 250-266.
- 17- Laiti, L., Mallucci, S., Piccolroaz, S., Bellin, A., Zardi, D., Fiori, A., . . . Majone, B. (2018). Testing the hydrological coherence of high- resolution gridded precipitation and temperature data sets. *Water Resources Research*, 54(3), 1999-2016.
- 18- López-Moreno, J., Vicente-Serrano, S., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., & García-Ruiz, J. (2010). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 7(2), 2561-2681.
- 19- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., . . . Căcovean, H. (2020). Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*, 109330.

- 20- Mishra, Y., Nakamura, T., Babel, M. S., Ninsawat, S., & Ochi, S. (2018). Impact of climate change on water resources of the Bheri River Basin, Nepal. *Water*, 10(2), 220.
- 21- Mohammed, I. N., Bomblies, A., & Wemple, B. C. (2015). The use of CMIP5 data to simulate climate change impacts on flow regime within the Lake Champlain Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 160-186.
- 22- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L.(2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *J. Amer. Soc. Agric. Biol. Engin.* 50: 3. 885-900.
- 23- Moss, R., Babiker, W., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., . . . Hibbard, K. (2008). Towards new scenarios for the analysis of emissions: Climate change, impacts and response strategies: Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat IPCC).
- 24- Ndhlovu, G., & Woyessa, Y. (2020). Modelling impact of climate change on catchment water balance, Kabompo River in Zambezi River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100650.
- 25- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of the Total Environment*, 650, 2685-2696.
- 26- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., & Makeschin, F. (2012). Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 414, 413-424.
- 27- Tan, M. L., Yusop, Z., Chua, V. P., & Chan, N. W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189, 1-10.
- 28- Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., & Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of the Total Environment*, 573, 66-82.
- 29- Venkataraman, K., Tummuri, S., Medina, A., & Perry, J. (2016). 21st century drought outlook for major climate divisions of Texas based on CMIP5 multimodel ensemble: Implications for water resource management. *Journal of hydrology*, 534, 300-316.
- 30- Wang, R., & Kalin, L. (2018). Combined and synergistic effects of climate change and urbanization on water quality in the Wolf Bay watershed, southern Alabama. *Journal of Environmental Sciences*, 64, 107-121.
- 31- WINCHEL, M. (2013). ARCSWAT Interface for SWAT2012. User's guide. Blackland Research and Extension Center, Texas Agrilife Research, 720 East Blackland Road, Temple, Texas 76502. Grassland. Soil And Water Research Laboratory Usda Agricultural Research Service 808 East Blackland Road-Temple, Texas, 76502.
- 32- Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., & Duan, Q. (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, 586, 328-337.
- 33- Zhang, Y., You, Q., Chen, C., & Ge, J. (2016). Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China. *Atmospheric Research*, 178, 521-534.
- 34- Zhou, J., He, D., Xie, Y., Liu, Y., Yang, Y., Sheng, H., Zou, R. (2015). Integrated SWAT model and statistical downscaling for estimating streamflow response to climate change in the Lake Dianchi watershed, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(4), 1193-1210.