



Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years

S. Dowlatabadi¹, M. Amirabadizadeh^{2*}, M. Zarei³

Received: 04-09-2022

Revised: 22-09-2022

Accepted: 19-10-2022

Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:

Dowlatabadi, S., Amirabadizadeh, M., & Zarei, M. (2022). Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years. *Journal of Water and Soil* 36(5): 629-644. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.78598.1199](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.78598.1199)

Introduction

The sustainable availability of water resources and the qualitative and quantitative status of these resources are threatened by many natural and anthropogenic factors, among which climate change plays an important role. Climate change can have profound effects on the hydrological cycle through changes in the amount and intensity of precipitation, evapotranspiration, soil moisture, and increasing temperature. On the other hand, the distribution of rainfall in different parts of the world will be uneven. So that some parts of the world may face a significant decrease in the amount and intensity of precipitation, as well as major changes in the timing of wet and dry seasons. Therefore, sufficient knowledge about the effects of climate change on hydrological processes and water resources will be of particular importance. In this research, as the first comprehensive study, the effect of future climate change on the water resources components of Neyshabur-Rookh watershed was investigated by a set of one hydrological model and six General Circulation Models under the RCP4.5 scenario.

Materials and Methods

The Neyshabur-Rookh watershed with an area of 9449 square kilometers is a sub-basin of Kavir-e Markazi-e Iran and a part of the Kalshoor Neyshabur watershed, which is located between of 58 degrees and 13 minutes and 59 degrees and 30 minutes and east longitude and 35 degrees and 40 minutes and 36 degrees and 39 minutes north latitude. The study area with an average altitude of 1549.6 m above sea level and average annual precipitation of 246.83 mm, a mean annual temperature of 13.3 Celsius has an arid to semi-arid climate. For hydrological simulation of the watershed using WetSpass-M model, maps of Digital Elevation Model (DEM), land-use, soil texture, slope, and distribution map of groundwater depth, Leaf Area Index (LAI), and climate data (rainfall, mean temperature, potential evapotranspiration, wind speed and the number of rainy days) per month in 1991-2017 period were used. Then the prepared model was calibrated and validated. The climatic data of six General Circulation Models (GCMs) under the RCP4.5 scenario (Representative Concentration Pathways) were downscaled using the Quantile Mapping Bias-Corrected method. The downscaled GCM models were ranked and weighted in each station according to results of the Leave one out cross validation method and utilized as an ensemble for projecting the near-future climatic conditions of the water resources components of the watershed. By importing the monthly maps of precipitation, average temperature and evapotranspiration in the period of 2026-2052 into the calibrated hydrological model, the hydrological response of watershed to near future climate change was determined and evaluated.

1- Ph.D. Candidate in Water Science and Engineering, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran & Member of Drought and Climate Change Research Group

(*- Corresponding Author Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

3- Assistant Professor, Research Center of Geographical Sciences & Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Results and Discussion

WetSpass-M was calibrated by changing the calibration parameters in five hydrometric stations and the compared measured and simulated streamflow. The values of four evaluation criteria NS, R2, MB, and RMSE indicated the good performance of the model during the calibration and validation process. By predicting climatic parameters in near future and preparing and importing maps of monthly precipitation, mean temperature, and evapotranspiration to WetSpass-M, the hydrologic simulation of the watershed was done in the 2026-2052 period. The results indicated that the mean annual temperature and precipitation would be respectively increased by 4.66% and 1.21°C under RCP4.5 in the near-future period compared to the baseline period. The average temperature will increase in all months so that the most changes will occur in September and the least changes will occur in March. The rainfall of the watershed will increase in March, April, May, October, and December and will decrease in the rest of the months. The highest and lowest rainfall changes will happen in April and August, respectively. The analysis of the components of water resources in the near future shows that annual total runoff, groundwater recharge, and actual evapotranspiration will increase by 5.9%, 14.85%, and 1.42% compared to the base period, and annual direct runoff and interception will decrease by 15.15% and 3.54%, respectively.

Conclusion

Considering the importance and major role of the Neyshabur watershed in the economy of agricultural products of Razavi Khorasan province, the results of this research will be of great help to the managers and policymakers of the country's water resources management in order to make appropriate decisions with the aim of reducing the effects of climate change on the water resources of the Neyshabur-Rookh Basin.

Keywords: Climate change, Neyshabur, Recharge groundwater, Runoff, WetSpass-M model

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۶۴۴-۶۲۹

ارزیابی مدل WetSpa-M در برآورد پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییر اقلیم
سال‌های آتیسپیده دولت آبادی^۱ - مهدی امیرآبادی زاده^{۲*} - مهدی زارعی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر، آشکار شدن اثرات تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب سبب شده مشکلات ناشی از آن به یکی از بحران‌های اساسی مدیریت منابع آب کشور تبدیل شود. بنابراین کسب دانش کافی در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی ضرورت دارد. این تحقیق، به مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های منابع آب حوضه نیشابور-رخ می‌پردازد. در این راستا، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۷ با استفاده از مدل WetSpa-M انجام شد. در گام بعد، پارامترهای اقلیمی شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 در دوره پایه توسط روش اصلاح ارببی چارک‌ها ریزمقیاس و با روش اعتبارسنجی متقابل leave one out واسنجی و اعتبارسنجی گردید. با انجام رتبه‌بندی و وزن‌دهی شش مدل اقلیمی انتخاب شده و جهت ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به تغییر اقلیم بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۲، خروجی‌های شش مدل گزارش پنجم گردش کلی تحت سناریو انتشار RCP4.5 و ریزمقیاس شده توسط روش اصلاح ارببی چارک‌ها به صورت گروهی به مدل WetSpa-M وارد و پیش‌نگری در آینده نزدیک انجام گرفت. نتایج نشان داد بارش و متوسط دمای سالانه حوضه در آینده نزدیک به ترتیب ۴/۶۶ درصد و ۱/۲۱ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. تحلیل مؤلفه‌های منابع آب در آینده نزدیک نشان می‌دهد رواناب کل، تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر-تعرق واقعی سالانه به ترتیب ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصد نسبت به دوره پایه افزایش و رواناب مستقیم و برگاب سالانه به ترتیب ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهند داشت. با توجه به اهمیت و نقش عمده حوضه نیشابور در اقتصاد محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی، نتایج پژوهش حاضر کمک شایان توجهی به مدیران و سیاست‌گذاران مدیریت منابع آب کشور در جهت اتخاذ تصمیمات مناسب با هدف تقلیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه نیشابور-رخ خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، رواناب، مدل WetSpa-M، نیشابور

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

۳- استادیار مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

مقدمه

آسیب‌پذیری آینده، از این مدل‌ها استفاده می‌شود (Shrestha et al., 2016).

با ایجاد مدل هیدرولوژیکی ایران در مدل SWAT و استفاده از مدل CGCM3.1 برای سناریوهای A1B، B1 و A2، تأثیر اقلیم آینده بر منابع آب کشور در بازه‌های زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ توسط عباسپور و همکاران (Abbaspour et al., 2009) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که به طور کلی برای سناریوهای آینده، مناطق مرطوب کشور نسبت به مناطق خشک بارش بیشتری را دریافت خواهند کرد. تحلیل شدت‌های بارش روزانه، سیلاب‌های مکرر با شدت بیشتر را در مناطق مرطوب و خشکسالی‌های طولانی‌مدت را در مناطق خشک نشان داد. سناریوهای اقلیمی در سطح زیرحوضه نتایج کاملاً متفاوتی را در مناطق خشک ارائه دادند، اگرچه نتایج در مناطق مرطوب کم‌وبیش مشابه بودند.

هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2015) با بکارگیری روش مدل‌سازی یکپارچه به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی حوضه قره‌بایگان پرداختند. در این راستا داده‌های اقلیمی آینده در بازه‌های زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۰ و ۲۰۵۰-۲۰۳۰ از مدل CGCM3.1 برای سناریوهای A1B، A2 و B1 دریافت و با کاربرد روش فاکتور دلتا برای منطقه ریزمقیاس گردید. مدل مفهومی بارش-رواناب Q-box جهت شبیه‌سازی رواناب سطحی و MODFLOW به منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تعداد سیل‌ها در منطقه، تحت سناریوی B1 اندکی افزایش یافته و تغذیه آب زیرزمینی حال و آینده در همه سناریوها تفاوت معنی‌داری نخواهد داشت. در ادامه، تدوین سناریوهای مدیریتی نشان داد که سناریوهای برداشت تأثیر قابل توجهی بر سطح آب زیرزمینی داشته به طوری که ادامه روند پمپاژ فعلی منجر به ۱۸ متر افت در سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۵۰ خواهد شد.

در تحقیقی وانگ و همکاران (Wang et al., 2015)، الگوی زمانی- مکانی منابع آب بالادست رودخانه یانگ تسه چین را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی (WetSpas) تحت سناریوهای A2 و B2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج افزایش متوسط درجه حرارت را در هر دو سناریو، کاهش بارندگی در کل منطقه، کاهش رواناب در بیشتر رودخانه‌ها مخصوصاً در فصل مرطوب را نشان داد. افزایش درجه حرارت و کاهش بارندگی، منجر به افزایش تبخیرتقرق و کاهش آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی خواهد شد و به طور کلی آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی در سناریو A2 نسبت به B2 سریعتر کاهش خواهد یافت. بارندگی، تولید آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی الگوهای زمانی- مکانی یکسانی داشتند.

قرارگیری کشور ایران در محدوده مناطق کم‌آب به معنای واقعی کلمه، گسترش و توسعه روزافزون فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و مصارف شهری با وجود کمبودها و محدودیت‌های کمی و کیفی منابع موجود، فشارهای مضاعفی را بر منابع آب کشور تحمیل نموده است. از طرف دیگر، دسترسی پایدار به منابع آب و وضعیت کیفی و کمی منابع مذکور توسط عوامل طبیعی و انسانی زیادی تهدید می‌شود که در بین فاکتورهای طبیعی، تغییر اقلیم نقش مهمی دارد. شواهد علمی نشان می‌دهد که ما در یک دوره تغییر اقلیم قرار داریم که موجب افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌شود. ادامه این پدیده ممکن است به طور قابل توجهی ویژگی‌های اقلیمی جهانی و محلی از جمله دما و بارش را تغییر دهد (Kahsay et al., 2018). لذا مشهود است که تغییر آب و هوای زمین بر روی بخش‌های مختلف از جمله منابع آب در همه مناطق جهان تأثیر می‌گذارد. تغییر اقلیم از طریق تغییر در مقدار و شدت بارش، تبخیرتقرق، رطوبت خاک و افزایش دما می‌تواند اثرات عمیقی بر چرخه هیدرولوژی داشته باشد. از طرفی توزیع بارندگی در نقاط مختلف جهان بصورت غیریکنواخت خواهد بود. به طوری که برخی از نقاط جهان ممکن است با کاهش قابل توجهی در میزان و شدت بارش و همچنین تغییرات عمده در زمان بندی فصول مرطوب و خشک مواجه شوند. بنابراین دانش کافی در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود (Kahsay et al., 2018). مطالعات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که افزایش دو درجه سانتیگراد در مقدار دما باعث کاهش ۱۲-۵٪ در میزان دبی رودخانه می‌گردد (Zhang et al., 2009). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ اظهار می‌دارد که میزان رواناب در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب به تغییر اقلیم حساس‌تر می‌باشد. زیرا میزان تغییر الگوی بارندگی در این مناطق نسبت به مناطق مرطوب بیشتر خواهد بود. مطالعات بر روی آبخوان‌های مختلف نیز شواهد فراوانی مبنی بر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر تغییر اقلیم ارائه داده‌اند که عواقب گسترده اجتماعی و اقتصادی را در پی خواهند داشت (Shrestha et al., 2016). در این راستا، سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است که این امر نیاز به فهم دقیق پیش‌بینی‌های محلی تغییر اقلیم و تأثیرات آن‌ها بر منابع آب دارد (Dakhlouli et al., 2017). علی‌رغم وجود برخی عدم قطعیت‌ها، مدل‌های گردش کلی^۲ تقریب خوبی را از آب و هوای گذشته و حال ارائه می‌دهند که هنوز برای تخمین شرایط آب و هوایی آینده مفید بوده، لذا برای پیش‌بینی و ارزیابی متغیرهای اقلیمی، تغییرپذیری و

1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

2- General Circulation Model (GCM)

درجه سانتیگراد افزایش خواهند یافت. به طور مشابه، تغییرات جریان پایه تحت سناریوهای A1B و B1 به ترتیب ۱۴ و ۸ درصد، تغییرات تغذیه به ترتیب ۵ و ۲ درصد و تبخیرتغرق ۱۵ و ۱۸ درصد مثبت خواهد بود. اگرچه رواناب سطحی به ترتیب ۱۳ و ۱۴ درصد کاهش خواهد یافت. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که تغییرات در کلیه مؤلفه‌های بیلان آب به استثنای رواناب مثبت خواهد بود.

اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه بالادست رودخانه نیل آبی با استفاده از مدل‌های اقلیمی RCM، CCLM به کمک مدل هیدرولوژیکی SWAT توسط منگیستو و همکاران (Mengistu et al., 2020) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پیش‌نگری‌های تغییر اقلیم، افزایش متوسط دمای سالانه، کاهش بارندگی سالانه، افزایش تبخیرتغرق و رواناب سالانه و کاهش جریان پایه را نشان می‌دهد.

اواگهی و همکاران (Ougahi et al., 2022) مدل SWAT را با بکارگیری پیش‌بینی‌های بارش و دما ریزمقیاس شده پنج مدل گردش کلی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در بازه‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ در زیرحوضه‌های حوضه اینداس جهت بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب مورد استفاده قرار دادند. پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهد، دما در بازه ۲۱۰۰-۲۰۷۰ نسبت به دوره پایه ۶ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت، بارش تابستانه تحت سناریو RCP8.5، ۳۶٪ درصد افزایش درحالی که بارش زمستانه تحت این سناریو ۱۶/۹ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به تاثیرگذاری بالای تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های مختلف منابع آب از یک سو و اهمیت و نقش عمده حوضه نیشابور در اقتصاد محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی از سوی دیگر، پژوهش حاضر با هدف کسب دانش مناسب از اثر تغییر اقلیم آینده بر مؤلفه‌های منابع آبی حوضه نیشابور، مجموعه‌ای از مدل هیدرولوژیکی WetSpa-M و شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 را به کار می‌گیرد. نتایج این تحقیق، کمک شایان توجهی به مدیران و تصمیم‌گیران مدیریت منابع آب کشور در جهت اتخاذ تصمیمات مناسب با هدف کاهش اثرات مولفه‌های اقلیمی بر منابع آب حوضه نیشابور-رخ خواهد نمود. لازم به ذکر است تحقیق حاضر اولین پژوهش جامع با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز نیشابور با وسعت ۹۴۴۹ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های مستعد استان خراسان رضوی در کشاورزی، بخشی از

با استفاده از شرایط اقلیمی آینده ۵ مدل گردش کلی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و بکارگیری مدل‌های WetSpa و MODFLOW، شرسستا و همکاران (Shrestha et al., 2016) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دلتای مکونگ در جنوب ویتنام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که متوسط درجه حرارت در انتهای قرن ۲۱ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۵ و ۴/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. با افزایش بارندگی سالانه، مقادیر تمام مؤلفه‌های بیلان آب به استثنای تغذیه آب زیرزمینی افزایش خواهند یافت. کاهش تغذیه آب زیرزمینی، کاهش سطح آب زیرزمینی و ذخیره را در آینده در پی خواهد داشت.

انصاری و همکاران (Ansari et al., 2016) با هدف بررسی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی سفیددشت از مدل HadCM3 تحت سناریوهای B1 و A2 برای پیش‌نگری بارش و درجه حرارت در دوره آتی استفاده کردند. مدل‌های IHACRES و GMS به ترتیب رواناب سطحی و سطح آب زیرزمینی را در دو حالت ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی نمودند. نتایج، افزایش ۲۶ و ۳۸ درصدی بارندگی در دوره آتی به ترتیب تحت سناریوهای B1 و A2 را نشان داد. همچنین در انتهای دوره آتی میزان تغذیه تجمعی آب زیرزمینی در سناریو A2 نسبت به B1، ۱۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت.

تاثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه حوضه آبخیز همدان-بهار توسط صفری شاد و همکاران (Safari Shad et al., 2017) مورد مطالعه قرار گرفت. برآورد رواناب به کمک WetSpa و پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی در بازه ۲۰۴۳-۲۰۱۴ با LARS-WG انجام و مدل HadCM3 با بیشترین ضریب وزنی و کمترین خطا بیشترین کارایی را در پیش‌بینی بارش و دما نشان داد. در دوره آتی میانگین حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۱/۲۲ و ۰/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش ۸ درصد کاهش خواهد یافت. تغییر اقلیم سبب خواهد شد حجم رواناب در هر سه زیرحوضه تحت سناریوی A2 کاهش و در سناریوی B1 زیرحوضه ۱ و ۲ کاهش و در زیرحوضه ۳ افزایش خواهد یافت. مجموع رواناب ورودی به دشت تحت سناریوی A2، ۳۶ درصد کاهش و تحت سناریوی B1، ۸ درصد افزایش می‌یابد.

گبرمسکل و کید (Gebremeskel and Kebede, 2018) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه وری در اتیوپی با استفاده از مدل اقلیمی (SDSM) و مدل هیدرولوژیکی (WetSpa) پرداختند. نتایج حاصل شده از این مدل‌ها نشان داد که بارش تحت سناریوهای A1B و B1 به ترتیب ۲۴ و ۲۵/۳ درصد، حداکثر درجه حرارت نیز ۰/۱۷ و ۰/۰۷ درجه سانتیگراد و حداقل درجه حرارت ۰/۱۶ و ۰/۰۹

آب مستقل بخش‌های پوشش گیاهی، خاک لخت، سطوح آب آزاد و سطح غیرقابل نفوذ یک سلول رستری به دست آمده و بیلان آب منطقه مورد مطالعه با جمع بستن بیلان آب محاسبه شده برای هر سلول رستری حاصل خواهد شد (Abdollahi et al., 2012). نقطه شروع محاسبه بیلان آب در یک سلول رستری، بارندگی است و بقیه فرآیندها (برگاب، رواناب، تبخیر/تعرق، تغذیه) به صورت منظم دنبال می‌شوند.

تهیه و آماده‌سازی اطلاعات ورودی مدل

جهت شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه، نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع^۷، شیب منطقه، کاربری اراضی، بافت خاک حوضه و نقشه‌های توزیعی عمق آب زیرزمینی، شاخص سطح برگ^۸، داده‌های اقلیمی (بارش، تبخیر از سطح تشت، تعداد روزهای بارانی، سرعت باد، دما) در هر ماه از بازه زمانی مورد مطالعه از ورودی‌های اساسی مدل می‌باشند. نقشه مدل رقومی ارتفاع سنجنده^۹ SRTM^{۱۱} از سایت زمین‌شناسی آمریکا^{۱۲} با دقت ۳۰ متر تهیه و نقشه شیب حوضه با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع و در نرم افزار ArcGIS تولید شد. براساس نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک گرفته شده از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، منطقه مورد مطالعه دارای ۱۴ کلاس کاربری اراضی بوده و کاربری مراتع کم‌تراکم کاربری غالب منطقه است. خاک حوضه براساس طبقه بندی فائو در ۴۳ کلاس و ۶ کلاس بافت قرار می‌گیرد و بافت لوم بافت خاک غالب محدوده می‌باشد. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.

داده‌های روزانه اقلیمی شامل بارش، متوسط، حداکثر و حداقل دما، تبخیر از سطح تشت، سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی، باران سنجی، تبخیرسنجی داخل و خارج از حوضه در بازه زمانی ۲۷ ساله (۱۹۹۱-۲۰۱۷) از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو دریافت گردید. پس از بررسی داده‌های دریافتی، در نهایت به ترتیب ۴۸، ۱۹، ۱۷ و ۱ ایستگاه جهت تولید نقشه‌های توزیعی ماهانه بارش، متوسط دما، تبخیر و سرعت باد در بازه زمانی مورد مطالعه انتخاب شدند. اطلاعات ماهانه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در کلیه چاه‌های مشاهداتی حوضه در بازه ۲۷ ساله از آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی دریافت و در نهایت ۲۹ حلقه چاه جهت تولید نقشه‌های توزیعی ماهانه سطح آب زیرزمینی مدنظر قرار گرفتند.

حوضه آبریز کویر مرکزی ایران و جزئی از حوضه آبریز کالشور نیشابور است که در محدوده ۵۸° ۱۳' تا ۵۹° ۳۰' طول شرقی و ۳۵° ۴۰' تا ۳۶° ۳۹' عرض شمالی واقع شده است. بررسی منابع آب سطحی، شرایط حوضه و گزارش‌ها نشان می‌دهد که حوضه رخ (واقع شده در جنوب حوضه نیشابور) بر منابع آب سطحی حوضه تاثیرگذار بوده لذا در تحقیق حاضر، محدوده حوضه رخ جزئی از حوضه نیشابور در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوضه را در کشور و نسبت به حوضه‌های آبریز استان ارائه می‌نماید. ۴۷ درصد از مساحت حوضه را ارتفاعات و ۵۳ درصد را دشت تشکیل می‌دهد. ارتفاع متوسط محدوده ۱۵۴۹/۶ متر و بلندترین نقطه ارتفاعی ۳۳۰۹ متر در ارتفاعات بینالود و پایین‌ترین نقطه در محل خروجی دشت (حسین آباد جنگل) با ارتفاع ۱۰۵۶ متر می‌باشد. حوضه آبریز نیشابور-رخ به ترتیب با متوسط بارندگی و تبخیر درازمدت سالانه ۲۴۶/۸۳ و ۲۳۵۷/۲۳ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد از اقلیمی نیمه‌خشک تا خشک بهره می‌برد.

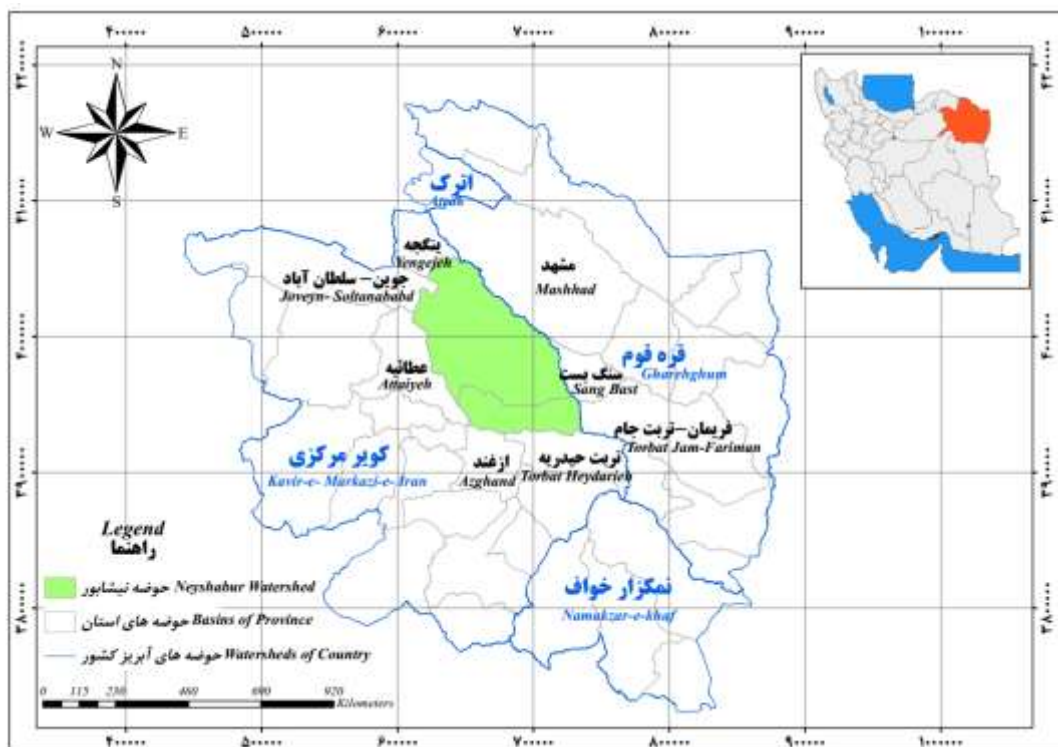
مدل WetSpas-M

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی بیلان آب ماهانه (WetSpas-M) استفاده شده است. مدل WetSpas یک مدل بیلان آب توزیعی مکانی شبه پایدار است که اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط باتلن^۱ و دی اسمیت^۲ در سازمان مهندسی هیدرولوژیک و هیدرولیک دانشگاه بروکسل جهت پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی در گام زمانی فصلی و سالانه ارائه شد. نسخه جدید مدل، با عنوان WetSpas-M توسط کتابخانه برنامه‌نویسی هیدرولیک و هیدرولوژی^۳ تحت برنامه پایتون^۴ و مستقل از نرم افزار Arc view ارائه و امکان شبیه‌سازی اجزای بیلان آب (برگاب، رواناب سطحی، تبخیر/تعرق و تغذیه آب زیرزمینی) در مقیاس ماهانه را فراهم می‌نماید (Abdollahi et al., 2012).

WetSpas-M، یک مدل بیلان آب رستری است که برای هر سلول بارش را به برگاب، رواناب سطحی، تبخیر/تعرق و تغذیه آب زیرزمینی تفکیک نموده و با هدف در نظر گرفتن ناهمگنی کاربری اراضی در هر سلول، برای هر کلاس کاربری اراضی تعریف شده در هر سلول چهار زیرسلول بصورت پوشش گیاهی^۵، خاک لخت^۶، آب آزاد^۷ و سطح غیرقابل نفوذ^۸ تعریف شده است (Abdollahi et al., 2017). بیلان آب یک رستر منحصر به فرد با جمع بستن بیلان‌های

- 7- Open Water
- 8- Impervious Surface
- 9- Digital Elevation Method (DEM)
- 10- Leaf Area Index (LAI)
- 11- Shuttle Radar Topography Mission
- 12- United States Geological Survey (USGS)

- 1- Batelaan
- 2- De-Smedt
- 3 - Hydrology and Hydraulic Programming Library (H2PL)
- 4- Python
- 5- Vegetated Cover
- 6- Bare Soil



شکل ۱- موقعیت حوضه نیشابور-رخ در کشور و نسبت به حوضه های مجاور آن در استان خراسان رضوی
 Figure 1- The location of Neyshabur-Rokh watershed in the country and in relation to its neighboring basins in Razavi Khorasan province

الدول تغییر اقلیم تحت سناریو انتشار RCP 4.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات مدل‌های گردش کلی به کار رفته در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. در این راستا داده‌های بارش و دما شش مدل، در دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۲) از وب سایت اقلیمی^۳ دریافت شد.

گرچه این مدل‌ها منابع معمول برای پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده هستند اما ابعاد سلول‌های محاسباتی مدل‌های GCM خام برای مطالعه محلی و منطقه‌ای مطالعات اقلیمی بسیار بزرگ هستند، بنابراین قبل از استفاده در مطالعات هیدرولوژیکی بایستی ریزمقیاس شوند (Tan et al., 2017). دو روش متمایز ریزمقیاس نمایی خروجی‌های GCM عبارتند از:

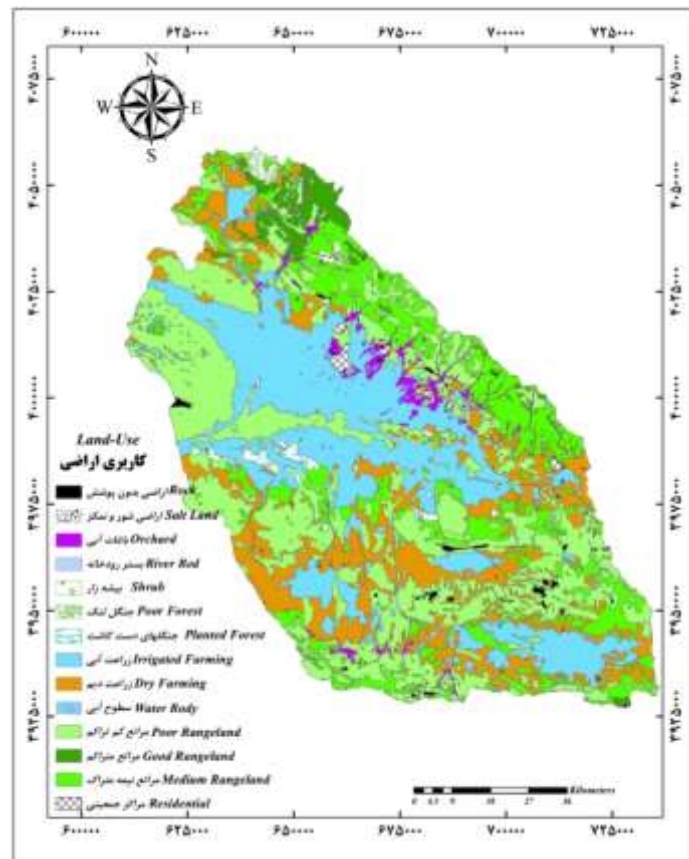
لازم به ذکر است نواقص اطلاعات کلیه ایستگاه‌ها و چاه‌های مشاهداتی انتخابی با استفاده از روش‌های آماری روابط رگرسیونی تک متغیره و چندمتغیره، درون‌یابی و نسبت‌ها تکمیل و با روش باکس-پلات از منظر وجود داده پرت مورد آزمون قرار گرفته و اصلاحات لازم انجام شد. نقشه شاخص سطح برگ برای هر ماه از بازه زمانی مورد مطالعه از سنجنده^۱ MODIS دریافت گردید. همه ورودی‌های مدل به جز تعداد روزهای بارانی هر ماه به صورت نقشه رستری با فرمت ASCII با اندازه سلول ۳۰×۳۰ متر و در ۴۲۰ ستون و ۴۴۰ ردیف تهیه و به مدل معرفی شدند. در نهایت با تولید و معرفی تعداد ۱۹۴۸ نقشه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱، مدل جهت شروع شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه در مقیاس ماهانه آماده گردید.

تغییر اقلیم و مدل‌های اقلیمی به کار رفته

اثرات تغییر اقلیم آینده بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه، با بکارگیری گروهی^۲ شش مدل گردش کلی گزارش پنجم هیئت بین

3 - Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections (DCHP) (https://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/dcpInterface.html)

1 - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)
 2- Ensemble



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه
Figure 2- Land use map of the studied area

جدول ۱- مشخصات مدل‌های گردش کلی جو CMIP5 به کار رفته در تحقیق (Flato et al., 2013; Chapter 9 of IPCC)

Table 1- Characteristics of CMIP5 atmospheric General Circulation Models used in the research (Flato et al. 2013; Chapter 9 of IPCC)

مدل Model	مؤسسه Institution	کشور Country	دقت مکانی (درجه) Grid resolution (degree)
HadGEM2-ES	UK Met Office Hadley Centre	انگلستان United Kingdom	1.875°×1.25°
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	کانادا Canada	2.8125°×2.7906°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology	آلمان Germany	1.875°×1.8653°
MIROC-ESM-CHEM	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	ژاپن Japan	2.8125°×2.8125°
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	چین China	2.8125°×2.7906°
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies USA	آمریکا United States of America	2°×2.5°



شکل ۳- طرح کلی روش اعتبارسنجی متقابل leave one out
Figure 3- The scheme of leave one out cross validation

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$$

لازم به ذکر است که پس از تعیین تغییرات آینده بارش و دما، تبخیرتعرق آینده با استفاده از متوسط، حداکثر و حداقل دمای آینده و روش هارگریوز محاسبه شد (Hargreaves and Samani, 1985).

نتایج و بحث

مدل WetSpss-M با دریافت ورودی‌های تهیه شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱ (دوره پایه) و مقیاس ماهانه اجرا گردید. خروجی‌های مدل شامل رواناب مستقیم، تغذیه آب زیرزمینی، تبخیرتعرق و برگاب بوده که مقادیر هر کدام از مؤلفه‌ها در هر ماه از دوره شبیه‌سازی به همراه نقشه‌های توزیعی آن‌ها در هر ماه با فرمت ASCII توسط مدل ارائه می‌گردد.

از آنجایی که واسنجی مدل براساس مقایسه رواناب مستقیم و تغذیه آب زیرزمینی (جریان پایه) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل انجام می‌گیرد لذا نیاز خواهد بود ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه از نظر طول دوره آماری در دسترس، داده گمشده، آزمون داده پرت مورد بررسی قرار گیرند. در نهایت ۵ ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مدل انتخاب و جهت تفکیک جریان پایه از دبی مشاهداتی روش‌های مختلف آنالیز هیدروگراف اعم از حداقل محلی^۳، فیلتر دیجیتال یک پارامتره^۴، فیلتر دیجیتال بازگشتی^۵، شاخص جریان پایه^۶ و مدل PART بررسی و مناسب‌ترین روش در هر ایستگاه انتخاب گردید. جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی به همراه روش مناسب تفکیک جریان پایه در هر ایستگاه را ارائه می‌نماید.

ریزمقیاس نمایی دینامیکی و روش ریزمقیاس نمایی آماری. در مطالعه حاضر، جهت استحصال داده‌های حوضه مورد مطالعه و اصلاح اریبی، روش ریزمقیاس نمایی آماری اصلاح اریبی چارک‌ها^۱ (Fereidoon and Koch, 2018) در محیط نرم‌افزار R (Gudmundsson et al, 2012) استفاده گردید. معمولاً ارزیابی روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری توسط روش اعتبارسنجی متقابل^۲ انجام می‌گیرد (Hastie et al., 2008; Gudmundsson et al., 2012; Wang et al., 2017). لذا در این پژوهش جهت واسنجی و اعتبارسنجی نتایج روش ریزمقیاس نمایی اصلاح اریبی چارک‌ها، روش اعتبارسنجی متقابل leave one out بکار گرفته شد. طرح کلی روش اعتبارسنجی متقابل leave one out در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج روش leave one out متوسط، حداکثر، حداقل دما و بارش ماهانه در هر ایستگاه با معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، درصد خطا (PBIAS) ارزیابی و رتبه‌بندی شش مدل جهت استفاده گروهی، براساس مقادیر سه معیار ارزیابی اشاره شده انجام گرفت. در ادامه روابط ریاضی معیارهای ارزیابی ارائه می‌شود. در این روابط P مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش کلی، O مقادیر اندازه‌گیری متغیر اقلیمی مدنظر در ایستگاه، n تعداد داده‌ها و i ردیف داده‌های مورد استفاده می‌باشد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2$$

- 4- One Parameter Filter Digital
- 5- Recursive Digital Filter
- 6- Base Flow Index (BFI)

- 1- Quantile-Mapping (QM) Bias-Corrected
- 2- Cross-Validation
- 3- Local minimum

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی به همراه روش مناسب تفکیک جریان پایه در هر ایستگاه

Table 2- Characteristics of selected hydrometric stations along with suitable method for baseflow separation in each station

نام ایستگاه هیدرومتری	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	روش مناسب تفکیک جریان پایه
Name of hydrometric station	Latitude	Longitude	Elevation(meters)	Suitable method for baseflow separation
اریه چهار باغ Eriyeh Chaharbagh	35°-27'-50"	58°-42'-43"	1563	فیلتر دیجیتال بازگشتی (a=0.975) Recursive Digital Filter
دیزبادعلیا Dizbad Olya	36°-55'-37"	59°-17'-11"	1861	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.95) One Parameter Filter Digital
عیش آباد Eyshabad	36°-19'-23"	58°-51'-28"	1462	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.975) One Parameter Filter Digital
خرو مجموع Kharv Majmo	36°-93'-98"	59°-24'-98"	1452	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.975) One Parameter Filter Digital
زرنده-اندرآب Zarandeh Andarab	36°-28'-42"	58°-29'-46"	1402	فیلتر دیجیتال بازگشتی (a=0.975) Recursive Digital Filter

جدول ۳- دامنه مجاز و مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی مدل WetSpss-M

Table 3- The allowed range and optimal values of calibration parameters of WetSpss-M model

پارامتر	مقدار بهینه	دامنه مجاز
Parameter	Optimal value	Allowed range
A	0.3	0.3-6.5
A	4	0.3-6.5
LP	1.22	0.4-5.5
X	0.635	0-1
B	0.47	0-1

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب کل ماهانه

Table 4- The values of statistical indicators for evaluating the performance of the model in simulation of monthly total runoff

نام ایستگاه هیدرومتری	بازه زمانی	NS	R ²	MB	RMSE
Name of hydrometric station	Time period				
اریه چهار باغ Eriyeh Chaharbagh	1991-2010	0.55	0.59	0.15	0.55
دیزبادعلیا Dizbad Olya	1992-2001	0.50	0.60	0.036	0.14
زرنده-اندرآب Zarandeh Andarab	1991-1996	0.50	0.59	0.5	0.48
عیش آباد Eyshabad	1993-2004	0.54	0.63	-0.09	0.9
خرو مجموع Kharv Majmo	1992-2003	0.51	0.63	0.45	0.50

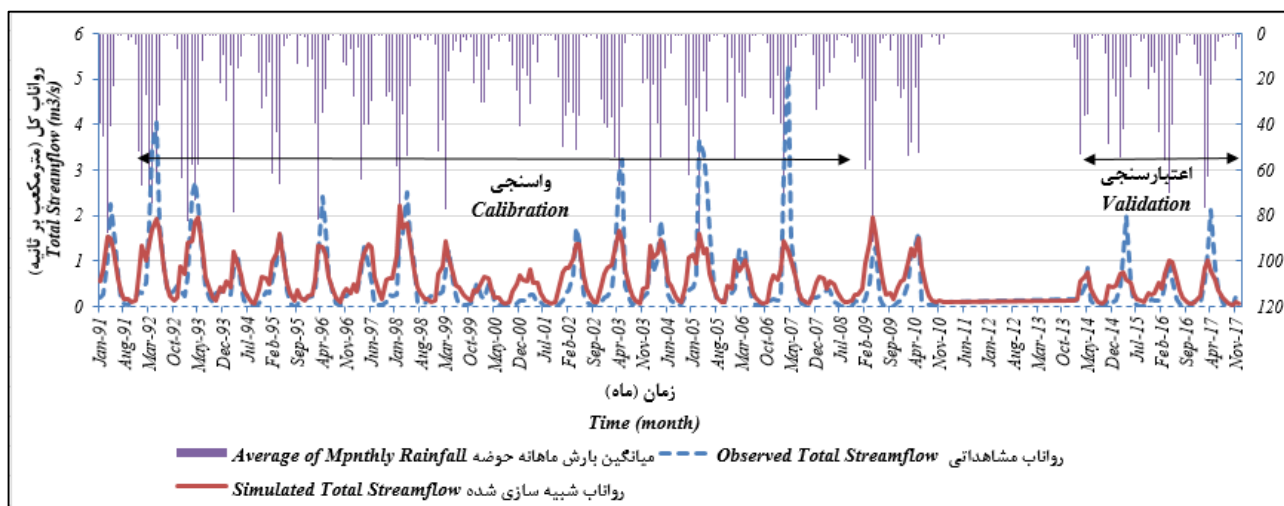
کرد، لذا جهت تسریع روند کار، سرویس محاسبات سنگین دانشگاه بیرجند به کار گرفته شد. مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب کل ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری انتخاب شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جهت اطمینان به مدل واسنجی شده، لازم است مدل واسنجی شده مورد اعتبارسنجی قرار گیرد. بنابراین از آنجایی که ایستگاه هیدرومتری اریه چهارباغ وسیع‌ترین زیرحوضه منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد لذا به عنوان نماینده‌ای مناسب از حوضه، جهت ارزیابی اعتبارسنجی انتخاب شد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی NS، R²، MB و RMSE در دوره اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۰/۵، ۰/۶۴،

در ادامه، واسنجی مدل به صورت دستی با استفاده از روش آزمون و خطا با تغییر پارامترهای: برگاب (a)، ضریب تبخیر تعرق (α)، رواناب سطحی (LP)، فاکتور تاخیر در رواناب سطحی (x)، جریان پایه (β) و در نظر گرفتن ضرایب نش- ساتکلیف (NS)، تعیین (R²)، انحراف مدل در بیلان آب (MB)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان توابع هدف و معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی به همراه دامنه مجاز آن‌ها در جدول ۳ ارائه می‌گردد. از آنجایی که واسنجی و صحت‌سنجی دستی مدل در مقیاس ماهانه و بازه ۲۷ ساله مورد مطالعه توسط رایانه‌های معمولی زمان زیادی را صرف خواهد

جهت پیش‌نگری اقلیم آینده منطقه، ابتدا داده‌های شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 شامل متوسط، حداکثر و حداقل دما و بارش به ترتیب در ۱۱ و ۸ ایستگاه اندازه‌گیری بارش و دما در دوره پایه توسط روش اصلاح اریبی چارک‌ها ریزمقیاس و با روش leave one out ارزیابی شدند. در گام بعدی با هدف در نظر گرفتن گروهی مدل‌ها وزن‌دهی و رتبه‌بندی آن‌ها براساس نتایج روش leave one out انجام شد. برای پیش‌نگری شرایط اقلیمی حوضه در آینده نزدیک، روش اصلاح اریبی چارک‌ها در بازه زمانی ۲۰۵۲-۲۰۲۶ اجرا و وزن‌های تعیین شده برای هر مدل در دوره پایه، در نتایج روش اصلاح اریبی چارک‌ها دوره آینده نزدیک اعمال گردید. **جدول ۵**، وزن مدل‌های اقلیمی برای متغیرهای بارش و متوسط دما در ایستگاه سینوپتیک نیشابور را ارائه می‌دهد. براساس **جدول ۵**، برای متغیر بارش مدل HadGEM2-ES و برای متوسط دما مدل‌های BCC-CSM1.1 و HadGEM2-ES بیشترین وزن را در ایستگاه سینوپتیک نیشابور به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت با در نظر گرفتن گروهی شش مدل گردش کلی، امکان پیش‌نگری متوسط دما و بارش در آینده نزدیک فراهم شد. نتایج نشان داد که حوضه در آینده نزدیک به ترتیب افزایش ۴/۶۶ درصدی و ۱/۲۱ درجه سانتی‌گراد در بارش و متوسط دمای سالانه را تجربه خواهد نمود. **شکل‌های ۵-الف** و **۵-ب** به ترتیب تغییرات متوسط بارش ماهانه و متوسط دمای میانگین حوضه را در دوره پایه و آینده نزدیک ارائه می‌دهند.

۰/۱۷ و ۰/۳۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمدند. موریا سی و همکاران (Moriasi et al., 2007) پیشنهاد می‌دهند در مطالعات هیدرولوژیکی و همچنین فرآیندهای انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه، مقادیر نش-سانکلیف بایستی از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول قلمداد نمود و معمولاً همین معیار برای ضریب تعیین نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق **جدول ۴** در کلیه ایستگاه‌ها مقادیر NS و R² بالاتر از ۰/۵ بوده که بیانگر عملکرد رضایت‌بخش مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. مقادیر مناسب RMSE و MB، به عنوان معیارهای خطای مدل در شبیه‌سازی در کلیه ایستگاه‌ها، بیانگر کارایی خوب مدل در شبیه‌سازی، خطای پایین و دقت قابل قبول مدل است. مقادیر مناسب شاخص‌های آماری دوره واسنجی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب و همچنین مقادیر آن‌ها در دوره اعتبارسنجی ایستگاه اریه چهارباغ گویای دقت بالای مدل بهینه شده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. **شکل ۴** هیدروگراف رواناب کل شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷-۲۰۱۴) را با رواناب کل مشاهداتی در ایستگاه اریه چهارباغ به همراه میانگین بارش کل حوضه مقایسه می‌نماید. بررسی **شکل ۴** نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات، مقادیر رواناب کل، زمان وقوع و مقادیر دبی‌های پیک و حداقل که نقشی کلیدی در مدیریت حوضه جهت مقابله با سیلاب‌ها و خشکسالی‌های آتی حوضه دارند، در دوره واسنجی و اعتبارسنجی بسیار موفق عمل نموده و تغییرات آن‌ها از الگوی بارندگی حوضه نیز تبعیت می‌نماید.



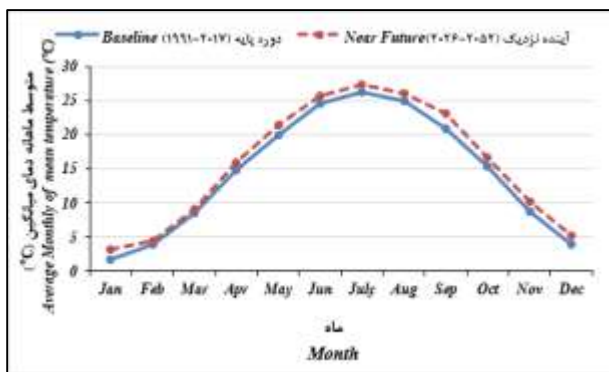
شکل ۴- مقایسه رواناب کل شبیه‌سازی شده مدل و مشاهده شده در ایستگاه اریه چهارباغ در دوره واسنجی (۱۹۹۱-۲۰۱۰) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷-۲۰۱۴) به همراه میانگین بارش ماهانه حوضه

Figure 4- Comparison between the observed and simulated total streamflow in Eriyeh Chaharbagh station in the calibration (1991-2010) and validation (2014-2017) periods along with the average of monthly rainfall in the basin

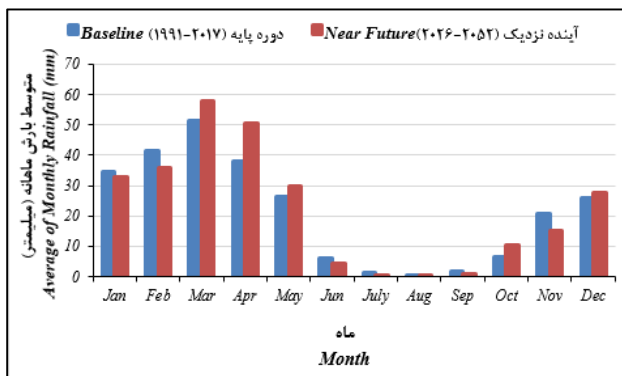
جدول ۵- وزن مدل‌های گردش عمومی برای متغیرهای بارش و متوسط دما در ایستگاه سینوپتیک نیشابور

Table 5- The weight of General Circulation Models for the variables of precipitation and average temperature in Neyshabur synoptic station

مدل Model	وزن مدل برای بارش Weight for Precipitation	وزن مدل برای متوسط دما Weight for Average Temperature
HadGEM2-ES	0.33	0.28
MPI-ESM-LR	0.27	0.12
GISS-E2-R	0.20	0.18
MIROC-ESM-CHEM	0.11	0.06
BCC-CSM1.1	0.07	0.28
CanESM2	0.02	0.08



b (ب)



a (الف)

شکل ۵- (الف) مقایسه تغییرات توزیع میانگین بارندگی ماهانه حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک و (ب) مقایسه تغییرات متوسط ماهانه دمای میانگین حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

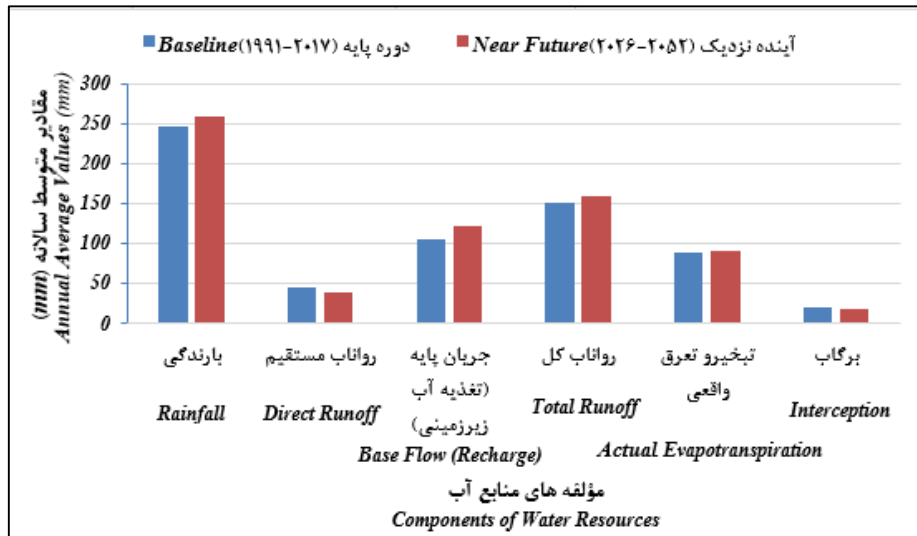
Figure 5- (a) The Comparison of changes in the average of monthly rainfall distribution of the basin in the baseline and the near future period and (b) The Comparison of average monthly changes in mean temperature of the basin in the baseline and the near future period

برگاب سالانه خواهد شد. در مقیاس زمانی سالانه، رواناب مستقیم و تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب در رتبه اول و دوم بیشترین درصد تغییرات و تبخیرتغرق واقعی کمترین درصد تغییرات را نسبت به تغییرات آینه نزدیک نشان می‌دهد. افزایش بارندگی سالانه حوضه در آینه نزدیک، افزایش رواناب کل (مجموعی از رواناب مستقیم و جریان پایه) را در پی خواهد داشت و کاهش رواناب مستقیم به عنوان جزئی از رواناب کل در حوضه سبب افزایش جریان پایه می‌گردد. شکل ۶ مقادیر متوسط سالانه مهم‌ترین مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی حوضه را در دوره پایه و آینه نزدیک نشان می‌دهد. شکل ۷ متوسط تغییرات ماهانه رواناب کل حوضه را در دوره پایه و آینه نزدیک مقایسه می‌نماید. با نگاهی به شکل ۷ می‌توان دریافت که متوسط ماهانه رواناب کل آینه نزدیک حوضه، در ماه‌های مارس، آوریل، می، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌های سال کاهش می‌یابد به طوری که رواناب کل بین ۵۷/۲۶ تا ۹۸/۵۴- درصد تغییر خواهد داشت. مقایسه شکل ۵-الف و ۷ نشان‌دهنده انطباق بالای تغییرات ماهانه بارندگی و رواناب کل حوضه می‌باشد. چگونگی تغییرات متوسط ماهانه تبخیرتغرق واقعی حوضه در دوره پایه و آینه نزدیک در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد

براساس این اشکال در آینه نزدیک، متوسط دما در تمامی ماه‌ها افزایش خواهد یافت به طوری که بیشترین تغییرات در ماه سپتامبر و کمترین تغییرات دما در ماه مارس رخ خواهد داد و بارندگی حوضه در ماه‌های مارس، آوریل، می، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌ها کاهش خواهد یافت. بیشترین و کمترین تغییرات بارش به ترتیب در ماه‌های آوریل و اگوست اتفاق خواهد افتاد. تغییرات افزایشی یا کاهش ماهانه متوسط دما در آینه نزدیک بین ۲/۱۴ تا ۰/۴۳- درجه سانتی‌گراد و بارندگی بین ۱۲/۳۴ تا ۵/۶۵- میلی‌متر خواهد بود. مطالعات گذشته نشان می‌دهند، تغییرات آینه در شرایط بارش و دما بر روی اجزای مختلف بیلان تاثیر خواهد گذاشت. لذا جهت بررسی این امر، نقشه‌های توزیعی بارش، متوسط دما و تبخیرتغرق ماهانه در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۲ تهیه و با فرمت ASCII به مدل WetSpas-M واسنجی شده معرفی گردید. مدل جهت ارزیابی اثر تغییرات بر اجزای مختلف بیلان در آینه نزدیک اجرا شد. مقایسه خروجی‌های مدل در دوره پایه و آینه نزدیک نشان داد، تغییرات آینه نزدیک، سبب افزایش ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصدی به ترتیب رواناب کل، جریان پایه (تغذیه آب زیرزمینی)، تبخیرتغرق واقعی سالانه و کاهش ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصدی به ترتیب رواناب مستقیم و

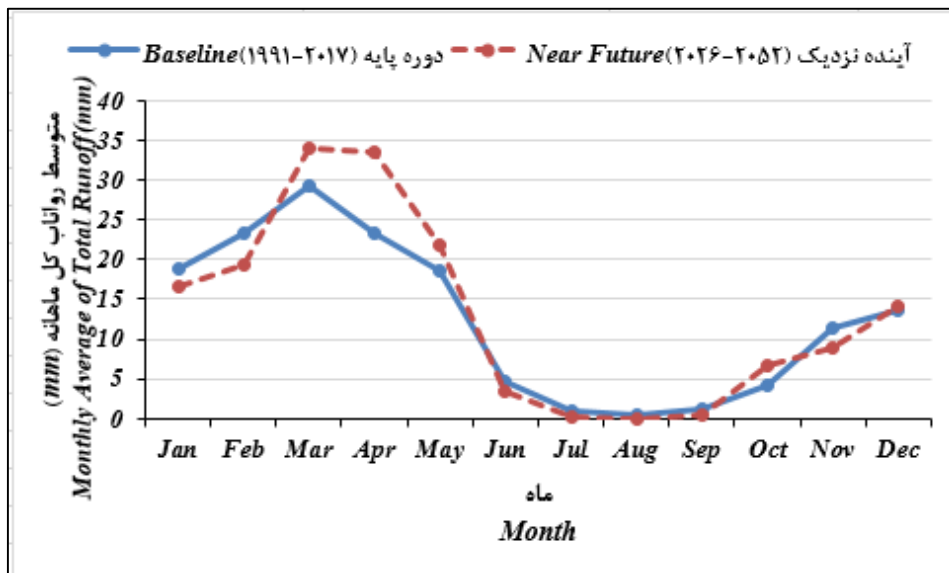
می‌نماید. لذا جهت تقلیل یا غلبه بر مشکلات آبی ناشی از تغییر اقلیم و جلوگیری از بروز پیامدهای اجتماعی و اقتصادی ناشی از این پدیده، لازم است مدیران و سیاست‌گذاران و دستگاه‌های اجرایی متولی منابع آبی کشور برنامه‌های مدیریتی کوتاه مدت و درازمدت را تدوین و اجرا نمایند. عدم توجه به این موضوع سبب خواهد شد کشور هزینه‌های بالایی را بخاطر عدم اتخاذ استراتژی‌های مناسب مدیریتی جهت مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم، بپردازد.

افزایش متوسط دما و تغییرات مقدار و الگوی بارندگی آینده، کلبه اجزای بیلان آب حوضه نیشابور-رخ را تحت تاثیر قرار خواهد داد و با بیشترین اثرگذاری بر رواناب مستقیم، خطر وقوع وقایعی چون سیل و خشکسالی را بالا خواهد برد. گرچه جهت اتخاذ تصمیمات مناسب مدیریتی لازم است علاوه بر سناریو میانه، سناریوهای بدبینانه تا خوشبینانه نیز لحاظ گردد، لیکن نتایج استفاده از سناریو میانه (RCP4.5) در پژوهش حاضر، لزوم توجه به مسئله تاثیرگذاری تغییر اقلیم بر کلبه اجزای بیلان آب حوضه مورد مطالعه را مشخص



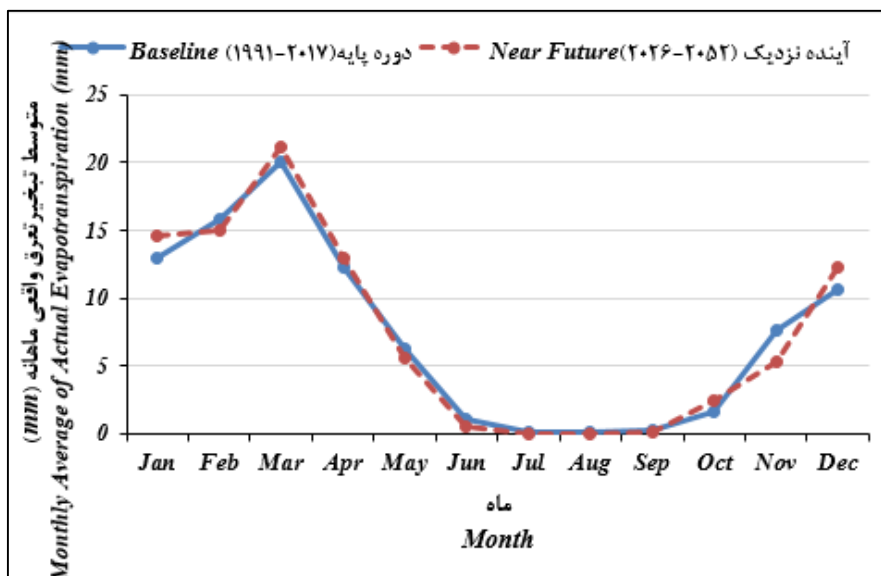
شکل ۶- مقادیر متوسط سالانه مهم‌ترین مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی حوضه در دوره‌های پایه و آینده نزدیک

Figure 6- The annual average values of the most important components of the hydrologic balance of the basin in the baseline and near future periods



شکل ۷- مقایسه تغییرات متوسط ماهانه رواناب کل حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

Figure 7- The Comparison of changes in monthly average of total runoff of the basin in the baseline and the near future periods



شکل ۸- مقایسه تغییرات متوسط ماهانه تبخیر تعرق واقعی حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

Figure 8- The Comparison of changes in monthly average of actual evapotranspiration of the basin in the baseline and the near future periods

نتایج این تحقیق با نتایج انصاری و همکاران در دشت سفیددشت (Ansari et al., 2016)، الماسی و همکاران در حوضه آبخیز بازفت (Almasi et al., 2017) و شرافتی و همکاران در شهر نیشابور (Sharafati et al., 2021) همخوانی کامل داشته و در بخش‌هایی با نتایج وانگ و همکاران (Wang et al., 2015)، شرسستا و همکاران (Shrestha et al., 2016)، گبرمسکل و کبد (Gebremeskel and Kebede, 2018) و منگیستو و همکاران (Mengistu et al., 2020) متفاوت می‌باشد.

نتایج این تحقیق با نتایج انصاری و همکاران در دشت سفیددشت (Ansari et al., 2016)، الماسی و همکاران در حوضه آبخیز بازفت (Almasi et al., 2017) و شرافتی و همکاران در شهر نیشابور (Sharafati et al., 2021) همخوانی کامل داشته و در بخش‌هایی با نتایج وانگ و همکاران (Wang et al., 2015)، شرسستا و همکاران (Shrestha et al., 2016)، گبرمسکل و کبد (Gebremeskel and Kebede, 2018) و منگیستو و همکاران (Mengistu et al., 2020) متفاوت می‌باشد.

نتایج افزایش دمای متوسط در کلیه ماه‌ها و افزایش ۱/۲۱ درجه سانتیگراد متوسط دمای سالانه را نشان می‌دهد. بارندگی ماهانه در آینده نزدیک بین ۱۲/۳۴ تا ۵/۶۵ میلی‌متر تغییرات خواهد کرد و افزایش ۴/۶۶ درصدی بارش سالانه را در پی خواهد داشت. تغییرات بارندگی و دما در آینده نزدیک، باعث افزایش ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصدی به ترتیب رواناب کل، جریان پایه (تغذیه آب زیرزمینی)، تبخیر تعرق واقعی سالانه و کاهش ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصدی به ترتیب رواناب مستقیم و برگاب سالانه خواهد شد. نتایج این تحقیق درک عمیق‌تری را از اثر تغییرات اقلیم بر اجزای بیلان هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ مهیا نموده و لزوم اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب با بکارگیری طیفی از سناریوهای بدبینانه تا خوشبینانه، جهت تقلیل تاثیرپذیری حوضه از تغییرات اقلیم آینده را مشخص می‌نماید.

نتایج این تحقیق با نتایج انصاری و همکاران در دشت سفیددشت (Ansari et al., 2016)، الماسی و همکاران در حوضه آبخیز بازفت (Almasi et al., 2017) و شرافتی و همکاران در شهر نیشابور (Sharafati et al., 2021) همخوانی کامل داشته و در بخش‌هایی با نتایج وانگ و همکاران (Wang et al., 2015)، شرسستا و همکاران (Shrestha et al., 2016)، گبرمسکل و کبد (Gebremeskel and Kebede, 2018) و منگیستو و همکاران (Mengistu et al., 2020) متفاوت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

موقعیت جغرافیایی کشور ایران و توزیع غیریکنواخت بارندگی در آن در کنار تغییرات اقلیم، باعث تحمیل فشارهای مضاعف بر منابع آب کشور گردیده به طوری که دسترسی پایدار به این منابع را با خطری جدی مواجه نموده است. لذا در این پژوهش با رویکرد کسب دانش مناسب از اثر تغییرات اقلیم آینده بر مؤلفه‌های منابع آبی حوضه نیشابور-رخ به عنوان یک حوضه استراتژیک در تامین امنیت غذایی استان خراسان رضوی، مجموعه‌ای از یک مدل هیدرولوژیکی و شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا مدل هیدرولوژیکی حوضه در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۷ در مدل

1. Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Seyed Ghasemi, S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>.
2. Abdollahi, K., Bashir, I., & Batelaan, O. (2012). *WetSpa Graphical User Interface*. Brussels: Vrije Universiteit Brussels Department of Hydrology and Hydraulic Engineering.
3. Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2017). A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin, *Environmental Earth Sciences* 76(198): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6512-1>.
4. Almasi, P., Soltani, S., Goodarzi, M., & Modarres, R. (2017). Assessment the Impacts of Climate Change on Surface Runoff in Bazoft Watershed. *Journal of Water and Soil Science* 20(78): 39-52. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3434-fa.html>
5. Ansari, S., Massah Bavani, A., & Roozbahani, A. (2016). Effects of climate change on groundwater recharge (Case study: Sefid Dasht plain). *Journal of Water and Soil* 30(2): 416-431. (In Persian with English abstract)
6. Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Tramblay, Y., & Bargaoui, Z. (2017). Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of Hydrology* 550: 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.032>.
7. 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. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.234>.
8. Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2013). *Evaluation of climate models. in: climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
9. Gebremeskel, G., & Kebede, A. (2018). Estimating the effect of climate change on water resources: Integrated use of climate and hydrological models in the Werii watershed of the Tekeze river basin, Northern Ethiopia. *Agriculture and Natural Resources* 52(2): 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.06.010>.
10. Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations- a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3383-3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>.
11. Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature*, American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>.
12. Hashemi, H., Uvo C, B., & Berndtsson, R. (2015). Coupled modeling approach to assess climate change impacts on groundwater recharge and adaptation in arid areas. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(10): 4165-4181. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4165-2015>.
13. Hastie, T., Tibshirani, R., & Freidman, J.H. (2008). *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics.
14. Kahsay, K.D., Pingale, S.M., & Hatiye, S.D. (2018). Impact of climate change on groundwater recharge and base flow in the sub-catchment of Tekeze basin, Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development* 6: 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.002>.
15. Lawrence Livermore National Laboratory - Green Data Oasis Available at http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/dcpInterface.html.
16. Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Pantiz, H.J. (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 592. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125614>.
17. Moriasi, 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. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
18. Ougahi, J.H., Cutler, M.E.J., & Cook, S.J. (2022). Modelling climate change impact on water resources of the Upper Indus Basin. *Journal of Water & Climate Change* 13(2): 482-504. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.233>.
19. Safari Shad, M., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K., Ildoromi, A., & Zeinivand, H. (2017). The potential effects of the climate change on the river flow in Hamadan watershed-Bahar. *Hydrogeomorphology* 4(10): 81-98. (In Persian with English abstract)
20. Sharafati, A., Haji Seyed Asadollahi, S.B., & Shahbazi, A. (2021). Assessing the impact of climate change on urban water demand and related uncertainties: a case study of Neyshabur, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 145: 473-487. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03638-5>
21. Shrestha, S., Bach, T.V., & Pandey, V.P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 6: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.010>.

22. Tan, M.L., Ibrahim, A.L., Yusop, Z., Chua, V.P., & Chan, N.W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research* 189: 1-10. <https://doi.org/10.1016/g.atmosres.2017.01.008>.
23. Wang, Y., Liao, W., Ding, Y., Wang, X., Jiang, Y., Song, X., & Lei, X. (2015). Water resources spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quaternary International* 380: 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.023>.
24. Wang, Y., Sivandran, G., & Bielicki, J.M. (2017). The stationarity of two statistical downscaling methods for precipitation under different choices of cross-validation periods. *International Journal of Climatology* 38(5): 330-348. <https://doi.org/10.1002/joc.5375>.
25. Zhang, J., Wang, G., He, R., & Liu, C. (2009). Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River basin and its response to climate change. *Advances in Water Science* 20(2): 153-158.