Integrated Watershed Management, Autumn 2022, 2(3), 82-94 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2022.563130.1046 **Online ISSN: 2783-4581**

Evaluation of IHACRES models and neural-fuzzy inference system in forecasting the runoff of the Kurit dam catchment in the future period

Rasool Karami[1], Mahdi Amirabadizadeh[2*], Mohsen Pourreza bilondi[3], Mostafa Yaghoobzadeh[3]

1- MSc student, Water engineering department, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Water engineering department, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Associate Professor, Water engineering department, University of Birjand, Birjand, Iran

***Corresponding author**: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

(Received: 15 October 2022 Revised: 18 November 2022 Accepted: 06 December 2022)

Extended abstract

Introduction: Today, the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere causes changes in the components of water resources on a global and regional scale. On the other hand, forecasting the river flow in the future period is considered a basic tool in water resources management. The rainfall-runoff process is completely non-linear, and it is completely random in terms of time and place. Therefore, it is not possible to easily describe its mechanism using simple models. The IHACRES hydrological model is used to simulate precipitation and runoff in large basins and most weather conditions, and it is also an integrated and conceptual model. The main advantage of this model compared to other rainfall-runoff simulation models is the acceptable accuracy of the results along with the use of minimal input data and its simple structure. The aim of this research is to compare the performance of IHACRES models and the fuzzy neural inference system in the simulation of the outflow of the catchment of Kurit Dam in Golshan Tabas and its forecast in the near future under the RCP4.5 scenario and the large-scale GISS-E2-R model.

Material and method: In this research, the performance of IHACRES models and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) in forecasting the runoff was investigated. Model performance comparison of these models introduced the superior model. To simulate the future climate, the downscaling LARS-WG5.0 model was used under the RCP4.5 scenario. The temperature and precipitation data of the output of the large-scale model of the fifth GISS-E2-R report of the American country were extracted from the site. The precipitation and temperature data from 2022 to 2051 were downscaled and then the discharge values for the mentioned years were estimated with the superior model. The input data to the IHACRES rainfall-runoff simulation models and the ANFIS model include rainfall and temperature on a monthly scale. In this research, 60% of observed precipitation, temperature, and runoff data were used for training and the remaining 40% of data were used for validation of ANFIS and IHACRES models. After calibration of the two models, evaluation was done using RMSE and NS indices.

Results and Discussion: Investigation of linear correlation between precipitation and temperature with observed runoff showed that there is a significant relationship between precipitation and runoff in low and high monthly precipitation, but changes in observed runoff and temperature do not have a significant correlation (at the 95% confidence level). The evaluation criteria of RMSE and NS in the validation section of the IHACRES model were calculated as 0.1 and 0.95, respectively, and for the ANFIS model as 0.05 and 0.52 respectively, which shows the superiority of the IHACRES model over the fuzzy neural inference system model at this stage. In order to complete this section, as explained in the research method section, the LARS-WG5.0 software was used for downscaling of precipitation and temperature output of the large-scale model GISS-E2-R in the near future (2022-2051) under the RCP4.5 scenario. Extracting the long-term monthly average showed that the average values of precipitation and temperature in the future horizon are equal to 17.38 mm and 21.7 °C, which, compared to the same values in the base period, shows that an increase of 5.45 mm in the average monthly precipitation and 2.9 °C an increase in the average temperature will occur. It can also be expected that this change in the values of climatic parameters will cause changes in the runoff caused by precipitation in the future. After simulating the monthly rainfall and temperature data from 2022 to 2051 by the LARS-WG5.0 downscaling model, these data were given as input to the IHACRES model to simulate the discharge by this model for the near future time period. Based on the results of flow simulation by the superior model (IHACRES model), the flow rate in the river will increase in the near future horizon.

Conclusion: In this research, in order to evaluate the IHACRES models and the adaptive neuro-fuzzy inference system, the available data (2013-2018) were divided based on the ratio of 60% to 40% for calibration (2013-2016) and validation (2016-2018). The validation result showed that the IHACRES model was more capable than the neural-fuzzy inference system model in simulating the observed runoff at Mavder station. The American GISS-E2-R large-scale model and the RCP4.5 scenario was used as input of hydrological model to simulate the runoff in the near future horizon. The results of statistical downscaling by LARS-WG from 2022 to 2051 showed an increase of 2.9 °C in temperature and an increase of 5.45 mm in total monthly precipitation. The output of the downscaling model was used as the input to the superior IHACRES model to simulate the runoff in the near future horizon for the investigated watershed.

Keywords: Adaptive Neuro-fuzzy Inference System, Climate change, Golshan Tabas, Rainfall-runoff model.

Citation: Karami, R., Amirabadizadeh, M., Pourreza bilondi, M., & Yaghoobzadeh, M. (2022). Evaluation of IHACRES models and neural-fuzzy inference system in forecasting the runoff of the Kurit dam catchment in the future period. *Integrated Watershed Management*, 2(3), 82-94. doi: 10.22034/iwm.2022.563130.1046

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال دوم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحات (۹۴-۸۲) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2022.563130.1046

ارزیابی مدل‌های IHACRES و سیستم استنتاج عصبی-فازی در پیش‌بینی رواناب حوزه آبخیز سد کریت در دوره آتی

رسول کرمی[۱]، مهدی امیرآبادی‌زاده*[۲]، محسن پوررضا بیلندی[۳]، مصطفی یعقوب‌زاده[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار گروه آموزشی مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

***نویسنده مسئول:** mamirabadizadeh@birjand.ac.ir

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۰۷/۲۳ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۰۸/۲۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۹/۱۵)

چکیده

امروزه افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر سبب تغییر در مؤلفه‌های منابع آب در مقیاس جهانی و منطقه‌ای شده است. از سوی دیگر پیش‌بینی آورد رودخانه در دوره آتی، ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب به‌حساب می‌آید. در این پژوهش عملکرد مدل‌های IHACRES و سیستم استنتاج عصبی - فازی (ANFIS) در پیش‌بینی رواناب حوضه سد کریت در طبس گلشن موردبررسی قرار گرفت. داده ورودی به مدل‌های شبیه‌سازی بارش- رواناب IHACRES و مدل سیستم استنتاج عصبی فازی شامل بارش و دما در مقیاس ماهانه است. پس از واسنجی دو مدل در بازتولید آورد رودخانه مشاهداتی، ارزیابی با استفاده از شاخص‌های RMSE و NS صورت پذیرفت. در این تحقیق، ۶۰ درصد داده‌های بارش، دما و رواناب مشاهداتی برای آموزش و ۴۰ درصد باقیمانده داده‌ها برای صحت‌سنجی مورداستفاده قرار گرفتند. معیارهای ارزیابی RMSE و NS در بخش صحت‌سنجی در مدل IHACRES به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹۵ و برای مدل ANFIS به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۵۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده برتری مدل IHACRES نسبت به مدل سیستم استنتاج عصبی فازی در بازتولید دبی جریان مشاهداتی در این مرحله است. پس از مشخص شدن مدل برتر، با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS- WG5.0 تحت سناریوی RCP4.5 و خروجی مدل گردش عمومی جو- اقیانوس GISS-E2-R، داده‌های بارش و دما برای سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۱ ریزمقیاس گردید و سپس با مدل برتر، مقادیر دبی برای سال‌های آینده نزدیک برآورد گردید. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان توسط مدل برتر (مدل IHACRES) در افق آینده مقادیر دبی جریان در رودخانه در مقایسه با ماه‌های متناظر در دوره پایه، افزایش اندکی خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، طبس گلشن، مدل بارش-رواناب، عصبی-فازی

استناد: کرمی، ر.، امیرآبادی زاده، م.، پوررضا بیلندی، م؛ و یعقوب زاده، م. (۱۴۰۱). ارزیابی مدل‌های IHACRES و سیستم استنتاج عصبی-فازی در پیش‌بینی رواناب حوزه آبخیز سد کریت در دوره آتی. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، (۳)۲، ۹۴-۸۲.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی کاری دشوار ولی دارای اهمیت است، چراکه این فرآیندها درنتیجه تأثیرات متقابل پارامترهای مؤثر زیادی که نمایانگر یک سامانه پیچیده است، حاصل می‌شوند؛ بنابراین توسعه مدلی که بتواند رواناب حاصل از بارندگی در یک حوضه آبریز را با استفاده از عوامل تأثیرگذار، با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند امری ضروری و مهم به نظر می‌رسد. در بررسی سامانه‌های منابع آب ضمن نیاز به بررسی و تحلیل داده-های گذشته، نیاز به مدل‌سازی برای پیش‌بینی وقایع آینده، لازم به نظر می‌رسد. فرآیند بارش- رواناب یک فرآیند کاملاً غیرخطی و ازنظر زمانی و مکانی کاملاً تصادفی است، همچنین تشریح مکانیسم آن با استفاده از مدل‌های ساده به‌راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. مدل هیدرولوژیک IHACRES برای شبیه‌سازی بارش و رواناب در حوضه‌های بزرگ و اغلب شرایط آب و هوایی کاربرد دارد و همچنین یک مدل یکپارچه و مفهومی است. مزیت اصلی این مدل نسبت به سایر مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب، دقت قابل‌قبول نتایج این مدل در کنار استفاده از حداقل داده ورودی و ساختار ساده آن است. همچنین از این مدل در شبیه‌سازی جریان آینده، تحت شرایط تغییر اقلیم نیز می‌توان بهره جست (Zarei و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه تحقیقات مرتبط با این پژوهش به‌اختصار ذکر می‌شود.

Lotfirad و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با استفاده از مدل نیمه مفهومی IHACRES به تخمین رواناب روزانه در حوضه آبریز ناورود گیلان پرداختند. در این پژوهش، رواناب حوضه ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های مشاهداتی دبی روزانه در ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه و نیز بارش و دما شبیه‌سازی شد. ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی در شبیه‌سازی، بر اساس ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف، میانگین خطای کل و میانگین خطای نسبی انجام شد که نتایج این پژوهش عملکرد مدل را قابل‌قبول ارزیابی نمود.

Zandi Daregharibi و همکاران (۲۰۱۷) به مقایسه عملکرد دو مدل بارش-رواناب IHACRES و GR2M در شبیه‌سازی دبی ماهانه حوضه دره تخت در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۷۹ پرداختند. واسنجی و صحت‌سنجی این مدل‌ها بر اساس معیارهای نش، مجذور میانگین خطا و خطای کل در حجم جریان برآورد شد. شبیه‌سازی رواناب نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش دو مدل در شبیه‌سازی جریان بود. همچنین نتایج نشان داد که مدل IHACRES با ضریب نش ۰/۷ و معیار خطای ۰/۶۵ بهتر از مدل GR2M است.

در تحقیق دیگری Hafezparast و Marabi (۲۰۲۱) به مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و IHACRES در شبیه‌سازی آورد رودخانه خرم‌رود پرداختند. در این تحقیق مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از کتابخانه Scikit-Learn در محیط نرم‌افزار پایتون و مدل IHACRES در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان از برتری مدل IHACRES نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی در بازتولید دبی مشاهداتی در خروجی حوضه داشت.

Abushandi و Merkel (۲۰۱۳) با هدف توسعه چارچوبی برای به‌کارگیری مدل بارش-رواناب در حوضه‌های خشک به دنبال تکمیل داده‌های ماهواره‌ای اصلاح‌شده بارش برای تعیین محل رگبار بودند. آن‌ها یک رویداد بارش در حوضه خشک وادی‌دولیل[1] اردن که

1.Wadi Dhuliel

اطلاعات آن به‌صورت ساعتی موجود بود را با استفاده از مدل‌های IHACRES و HEC-HMS مدل‌سازی کردند. مدل IHACRES عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی داده‌های ساعتی نسبت به مدل HEC-HMS نشان‌داد، به‌طوری‌که ضریب کارایی مدل (نش- ساتکلیف) به ترتیب، ۰/۵۱ و ۰/۸۸ به دست آمد. Amiri و Roudbari Mousavi (۲۰۱۶) ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژی IHACRES در شبیه‌سازی دبی مشاهداتی روزانه رودخانه‌های پلرود و شلمان‌رود در استان گیلان را که در منطقه مرطوب واقع است، موردبررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده انحراف کم مدل در شبیه‌سازی مقادیر روزانه دبی بود. در پژوهشی دیگر به مقایسه کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در شبیه‌سازی بارش- رواناب در حوزه آبخیز سد زاینده‌رود توسط Dastorani و همکاران (۲۰۱۱) پرداخته شد. نتایج این تحقیق پس از آموزش و صحت‌سنجی مدل‌ها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی بسته به ترکیب‌های مختلف پارامترهای ورودی، نتایج متفاوتی را از خود نشان می‌دهند ولی در کل، این دو روش به میزان قابل قبولی قادر به تخمین رواناب حاصل از بارش با به‌کارگیری پارامترهای ورودی مناسب هستند. Sedighi و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی را در پیش‌بینی رواناب در حوزه آبخیز لتیان موردبررسی قرار دادند. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی بارش– رواناب با دخالت دادن ارتفاع آب معادل برف به کمک استنتاج عصبی فازی تطبیقی در حوزه آبخیز رودک واقع در استان تهران انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل نروفازی با ساختار بارندگی دما و آب معادل برف با یک روز تأخیر با ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۵ و ضریب تبیین ۰/۶۲، عملکرد قابل قبولی داشته است که می‌توان نتیجه گرفت وارد کردن آب معادل برف به مدل، موجب افزایش دقت آن در بازتولید دبی مشاهداتی شده است.

Fakhr Hashemian و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی مدل سیستم استنتاج فازی در برآورد جریان رودخانه باباامان بجنورد پرداختند. در این پژوهش، برای پیش‌بینی دبی متوسط روزانه و دبی حداکثری در شرایط سیلابی رودخانه که خروجی نهایی محدوده شهر بجنورد با سرشاخه‌های متعدد مناطق چناران، بازخانه، بش قارداش، حمید و سایر سرچشمه‌های روانابی منتهی به رودخانه باباامان است، از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سیستم استنتاج فازی با مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان روشی دقیق و کارا در پیش‌بینی جریان رودخانه و سیلابی شدن آن به‌کاربرده شود.

Ahmadpour و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی به بررسی کارایی مدل‌های سری زمانی خطی باکس-جنکینز، مدل مفهومی IHACRES، مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مدل هیبریدی ARMA-ANN برای شبیه-سازی و پیش‌بینی جریان روزانه حوضه مارون پرداختند. در این تحقیق از دو آماره اکائیک و شوارتز برای تحلیل سری زمانی باکس-جنکینز استفاده نمودند. در ارزیابی عملکرد مدل‌ها مشخص شد که مدل هیبریدی ARMA-ANN نسبت به سایر مدل‌های مورداستفاده در این پژوهش دارای برتری است. به‌گونه‌ای که مدل ARMA-ANN بیشترین مقادیر عددی ضریب تبین ۰/۸۶ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۱ به خود اختصاص داد.

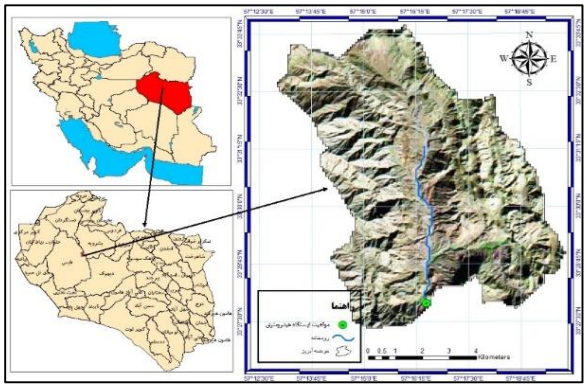
Momeneh (۲۰۲۲) کارایی مدل‌های هوش مصنوعی و IHACRES در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه گاماسیاب را مورد مقایسه قرار دادند. مدل‌های هوش مصنوعی مورداستفاده شامل شبکهٔ عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، شبکهٔ عصبی تابع پایه شعاعی و مدل حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) بود. نتایج شاخص ارزیابی نش-ساتکلیف در دوره صحت‌سنجی برای مدل‌های LSTM، RBF، ANN و IHACRES به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۹۰۷، ۰/۹۰۳ و ۰/۵۱۲ بود. بر اساس این نتایج، مدل LSTM عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین دبی جریان ارائه نموده و نتایج نشان از عملکرد بهتر مدل‌های ANN، RBF و LSTM در شبیه‌سازی مشخصات نقاط اوج جریان نسبت به IHACRES برای منطقهٔ موردمطالعه بود.

هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد مدل‌های IHACRES و سیستم استنتاج عصبی فازی در شبیه-سازی رواناب خروجی حوزه آبخیز سد کریت طبس گلشن و پیش‌بینی آن در افق آینده نزدیک تحت سناریو RCP4.5 و مدل بزرگ‌مقیاس GISS-E2-R است.

مواد و روش‌ها

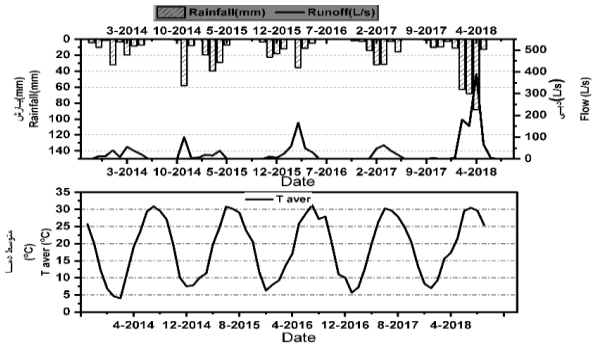
منطقه موردمطالعه

شهرستان طبس گلشن که یکی از شهرستان‌های استان خراسان جنوبی است، بین طول جغرافیائی '۳۰ °۵۵ تا '۲۲ °۵۸ طول شرقی و عرض جغرافیائی '۳۳ °۳۱ تا '۶ °۳۵ عرض شمالی قرار دارد. اقلیم این شهرستان گرم و خشک است و تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد دارد. متوسط بارندگی سالانه این شهرستان ۸۰ میلی‌متر است. سد کریت در ۳۳ کیلومتری جنوب شرقی شهر طبس گلشن بین بلوک طبس گلشن و بلوک لوت در منتهی‌الیه غربی رشته‌کوه‌های شتری واقع‌شده است. داده‌های هیدرومتری مورداستفاده متعلق به ایستگاه ماودر در خروجی حوضه است. رودخانه ماودر یکی از شاخه‌های رودخانه نمک است و ایستگاه هیدرومتری ماودر بر روی آن واقع گردیده است. مساحت حوضه موردبررسی ۷۴/۹۳ km^2 است که در بخش واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها دارای اهمیت است. نقشه موقعیت و مدل رقومی ارتفاع حوضه در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد کریت

Figure 1- location of the Kurit dam catchment



شکل ۲- سری زمانی بارش، دما و رواناب مشاهداتی در حوضه سد کریت طی دوره آماری

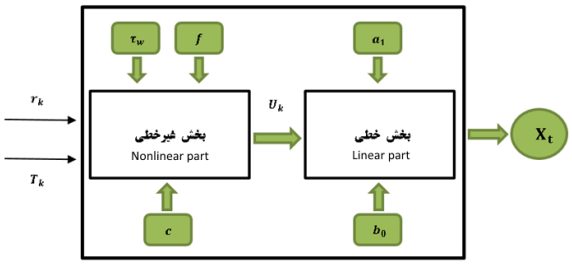
Figure 2- Time series of observed precipitation, temperature and runoff in the Kurit dam catchment during the statistical period

داده‌های مورداستفاده در این تحقیق مشتمل بر داده‌های مشاهداتی بارندگی (برحسب میلی‌متر) و درجه حرارت

(برحسب درجه سانتی‌گراد) مربوط به ایستگاه کریت از سازمان هواشناسی استان خراسان جنوبی و رواناب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری ماودر از شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی دریافت گردید. ازآنجاکه تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه سد کریت در افق آینده نزدیک نیز جزو اهداف این تحقیق بوده است، داده‌های درجه حرارت و بارش خروجی مدل بزرگ‌مقیاس گزارش پنجم GISS-E2-R کشور آمریکا نیز از سایت https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5 استخراج گردید. در این تحقیق، ۶۰ درصد داده‌های بارش، دما و رواناب مشاهداتی برای آموزش و ۴۰ درصد باقیمانده داده‌ها برای صحت‌سنجی مدل انفیس و IHACRES مورداستفاده قرار گرفت.

مدل IHACRES[1]

مدل بارش- رواناب IHACRES به‌صورت مشترک به‌وسیله هیدرولوژیست‌های مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوزه آبخیز (iCAM) دانشگاه ملی استرالیا، کنبرا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی (HEC) انجمن پژوهش‌های زیست‌محیطی انگلستان توسعه‌یافته است که به‌صورت مستمر در تحقیقات مرتبط با منابع آب مورداستفاده قرارگرفته است. ساختار این مدل به‌گونه‌ای است که در حوضه‌های فاقد آمار بین خصوصیات حوزه آبخیز از قبیل تراکم زهکشی، شیب، طول دامنه و پارامترهای واسنجی مدل رابطه رگرسیونی برقرار نموده و مقادیر بهینه پارامترهای مدل شبیه‌سازی تعیین می‌شود (شکل ۳). همان‌گونه که درشکل ۳ نشان داده‌شده است ساختار این مدل شامل دو بخش غیرخطی (تبدیل بارش به بارش مؤثر) و بخش خطی (تبدیل بارش مؤثر به رواناب) است. در حوضه‌های دارای آمار کامل، روش کار این مدل بدین‌صورت است که بر اساس سری‌های زمانی در اختیار، به روش آزمون‌وخطا مقدارهای بهینه پارامترهای مدل برآورد می‌شود.



شکل ۳: ساختار کلی مدل IHACRES

Figure 3- General structure of the IHACRES model

مهم‌ترین پارامترهایی که در بخش واسنجی مدل بایستی مقادیر بهینه آن مشخص شود عبارت‌اند از:

τ_w: مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا حوزه خشک شود (برحسب روز)، f: تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات برحسب $\frac{1}{°C}$) و c: ضریب تعادل حجم بارش برحسب میلی‌متر که نشان‌دهنده سرعت واکنش باشد، به‌طوری‌که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، حوزه واکنش آهسته‌تری نسبت به بارش نشان می‌دهد.

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS[2])

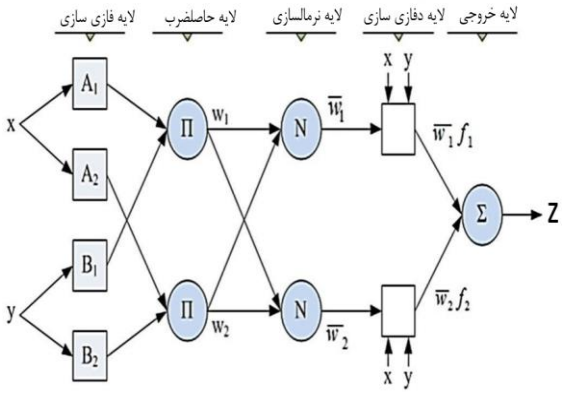
سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی از فرایندهای یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به‌منظور ارتباط بین یک فضای ورودی به یک فضای خروجی بهره‌گیری می‌نماید و درواقع یک شبکه پیشخور چندلایه است. انفیس قابلیت بالایی در آموزش، ساخت و دسته‌بندی دارد و همچنین دارای مزایایی ازجمله اجازه استخراج قوانین فازی از اطلاعات عددی یا دانش متخصص است. مشکل

1. Identification of unit Hydrograph and Component Flow Rainfall, Evaporation and Streamflow data

2. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

اصلی مدل انفیس، زمان‌بر بودن آن برای آموزش ساختار و تعیین پارامترها است (Bacanli *et al.*, 2009).

روش آموزش اصلی در سامانه استنتاج عصبی فازی تطبیقی، روش پس انتشار خطا است. در این مدل، فازی-سازی به‌عنوان یک نگاشتی از یک نقطه (پارامتر ورودی مدل) به یک مجموعه تعریف می‌شود. خروجی فازی-سازی، ایجاد درجه عضویت متناظر با آن پارامتر ورودی است. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها توزیع می‌گردد و با این روش پارامترها تصحیح می‌شوند. شکل ۴ ساختار کلی مدل انفیس با دو ورودی x، y و خروجی z و نیز وزن‌های ضرایب w_i را نشان می‌دهد:



شکل ۴- ساختار مدل ANFIS با دو ورودی x، y و خروجی z

Figure 4- Structure of ANFIS model with two input variables x, y and output z

بیشتر سیستم‌های استنتاج عصبی- فازی شامل سه نوع سیستم ممدانی[1]، سیستم سوگنو[2] و سیستم تسوکاموتو[3] می‌باشند. در این تحقیق از سیستم سوگنو و تـابع عضـویت مثلثی استفاده شد. در این تحقیق برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های IHACRES و ANFIS از بارش و دمای میانگین مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک کریت به‌عنوان بردار ورودی و رواناب مشاهداتی حوضه سد کریت در ایستگاه ماودر به‌عنوان بردار خروجی در شبیه‌سازی دبی جریان استفاده شد.

مدل گردش عمومی جو- اقیانوس GISS-E2-R

مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس یکی از مهم‌ترین ابزارهای موجود به‌منظور شبیه‌سازی رفتار اقلیمی در افق آینده می‌باشند. این مدل‌ها، مقیاس‌های کوچکی نظیر آب‌وهوای یک منطقه تا مقیاس‌های بزرگ مانند تغییرات اقلیم در حد قاره‌ای را شامل می‌شوند. با توجه به اینکه مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ‌مقیاس می‌باشند، از این مدل‌ها، به‌صورت مستقیم نمی‌توان برای مطالعات در مقیاس ایستگاهی و حتی حوضه استفاده نمود. لذا خروجی‌های این مدل‌ها بایستی در مقیاس ایستگاه ریزمقیاس شوند. در این تحقیق از مدل بزرگ‌مقیاس GISS-E2-R استفاده گردید که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات مدل بزرگ‌مقیاس مورداستفاده

Table 1- Characteristics of the used large-scale model

نام مدل	کشور سازنده	مقیاس شبکه
GISS-E2R	آمریکا	2.5°×2°

ریزمقیاس نمائی

با توجه به اینکه داده‌های مشاهداتی در مقیاس محلی (مقیاس کوچک) و داده‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم در مقیاس بزرگ می‌باشند لذا برای پر کردن فاصله بین این مقیاس‌ها و نیز استفاده از خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس نیاز به ریزمقیاس سازی است. در این تحقیق از روش LARS-WG5.0 که متعلق به ریزمقیاس سازی آماری است استفاده گردید. این روش ریزمقیاس نمائی دارای

1. Mamdani
2. Sugeno
3. Tsukamoto

سه بخش اصلی است که شامل واسنجی، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دوره آینده است. نیاز اساسی مدل LARS- WG در مرحله واسنجی، فایلی است که مشخص‌کننده رفتار اقلیمی در دوره گذشته است. در این تحقیق سناریوی RCP4.5 استفاده گردید. این سناریو توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی‌شده است و در آن میزان غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ حدود 750 ppm تخمین زده شده و بازتابش ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند. در این سناریو میزان رشد جمعیت کمتر از سناریوی RCP2.6 تخمین زده شده است. ارزیابی این مدل‌ها در بخش واسنجی و صحت‌سنجی، با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و نش-ساتکلیف (NS) صورت گرفت که در ادامه معادلات (معادله ۱ و ۲) مورداستفاده در این تحقیق ارائه می‌گردد:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{\sum(Q_o - \overline{Q}_o)^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{n}} \quad (۲)$$

که در این رابطه Q_s دبی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، $\overline{Q}_o$ میانگین مقادیر داده‌های مشاهداتی و Q_o دبی مشاهداتی در ایستگاه مادور است. شاخص NS بین منهای بی‌نهایت تا یک تغییر می‌نماید و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بالاتر مدل است. همچنین مقدار ایده‌آل شاخص RMSE برابر صفر است و بیانگر این است که مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده هیچ اختلافی ندارند.

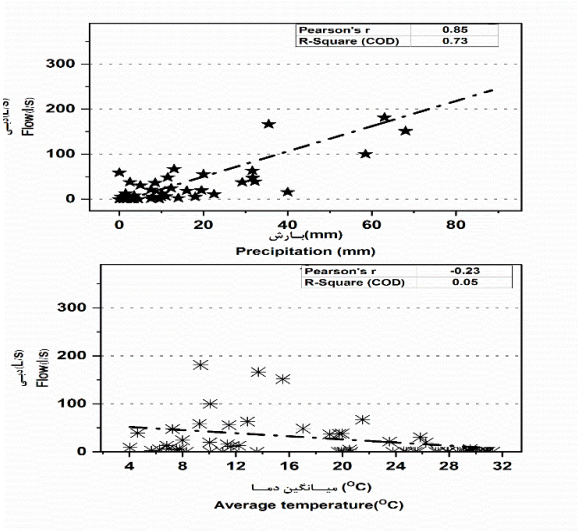
نتایج و بحث

بررسی همبستگی بین متغیر وابسته (رواناب) و متغیرهای مستقل (بارش و دما) دارای اهمیت بسزایی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. البته لازم به ذکر است که در این تحقیق از مدل هیدروژیکی IHACRES استفاده شد و یکی از مهم‌ترین مزایای این مدل استفاده از کمترین پارامترهای اقلیمی در مدل‌سازی است. درعین‌حال بررسی ارتباط بین پارامترها در واسنجی مدل تأثیرگذار است. جدول ۲ نتایج بررسی همبستگی و مقادیر P-Value برای هر یک از این بررسی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین رواناب مشاهداتی ماهیانه در ایستگاه هیدرومتری ماودر با بارش و دما ارتباط معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ نشان می‌دهد. همبستگی بین بارش و رواناب مستقیم و نسبت به رواناب و دما بسیار بالاتر است و لذا میزان تأثیرپذیری رواناب از بارش ماهانه نسبت به دما بیشتر است. نحوه تغییرات این متغیرها در شکل ۵ نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مقادیر کم و بالای بارش ماهانه ارتباط معنی‌داری بین بارش و رواناب وجود دارد، اما تغییرات رواناب مشاهداتی و دما دارای همبستگی معنی-داری (در سطح ۹۵ درصد) نمی‌باشند. همچنین مقادیر همبستگی در این شکل نشان داده‌شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون همبستگی رواناب با بارش و دما در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد

Table 2- The results of the correlation test of runoff with precipitation and temperature at 95% significance level

متغیرهای مستقل و وابسته Dependent and independent variables	P		T	
	ρ	P-value	ρ	P-value
Q	0.85	$2.2*10^{-16}$*	-0.23	0.0004



شکل ۵- بررسی ارتباط متغیرهای بارش و دمای میانگین با رواناب مشاهداتی

Figure 5- Investigating the relationship between precipitation and average temperature variables with observed runoff

برای اجرای مدل IHACRES و استنتاج عصبی-فازی در بخش واسنجی از داده‌های بارش، دما و دبی در بازه زمانی سپتامبر ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۶ و در بخش صحت-سنجی از سپتامبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۸ در مقیاس ماهانه استفاده شد (۶۰ درصد داده‌های مشاهداتی برای واسنجی (آموزش) و ۴۰ درصد مابقی آن برای صحت-سنجی (آزمون) استفاده شد). شکل ۶ نتایج حاصل از اجرای مدل در بخش واسنجی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای بهینه‌شده مدل IHACRES در جدول ۳ آورده شده است.

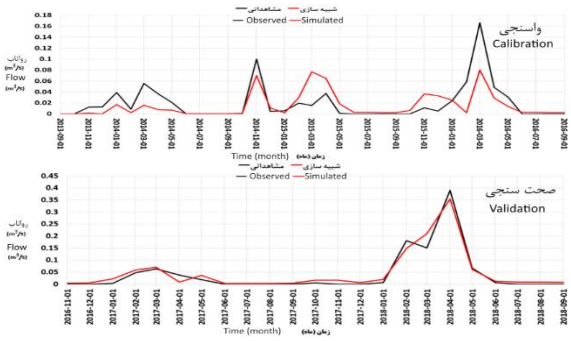
همان‌گونه که در خصوص پارامترهای مدل IHACRES گفته شد، پارامتر f بیانگر تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات است که مقدار $\frac{1}{°C}$ ۱/۸۴ توسط مدل محاسبه‌شده است. پارامتر t_w بیانگر این است که چه مدت‌زمانی طول می‌کشد تا حوضه خشک شود. مقدار محاسبه‌شده این پارامتر برابر ۲۶ روز است (جدول ۳).

جدول ۳- مقدار بهینه پارامترهای ماژول غیرخطی در گام واسنجی

Table 3- The optimal value of parameters of the nonlinear module in the calibration step

پارامترهای مدل IHACRES Parameters of IHACRES model	مقدار بهینه پارامترها Value of optimal parameters
C	0.00044
t_w	26
F	1.84

با توجه به شکل ۶، سه پیک اصلی در بخش صحت‌سنجی مشاهده شد. پیک اول در مارس ۲۰۱۷ با دبی ۰/۰۶۳ مترمکعب بر ثانیه، پیک دوم در فوریه ۲۰۱۸ با دبی ۰/۱۸ مترمکعب بر ثانیه و پیک سوم در آوریل ۲۰۱۸ با دبی ۰/۳۹ مترمکعب بر ثانیه. مدل IHACRES در دبی اوج اول ازنظر زمان رسیدن به پیک با دقت بالا و ازنظر مقدار دبی پیک با اختلاف اندک ۰/۰۶ مترمکعب بر ثانیه بیشتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام داده و عملکرد خوبی از خود در این پیک نشان داده است. مدل در اوج دوم از نظر زمان رسیدن به پیک با دقت بالا و ازنظر مقدار دبی پیک با اختلاف ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام داده و عملکرد خوبی از خود در این پیک نشان داده است. در پیک سوم، مدل IHACRES، ازنظر زمان رسیدن به پیک، با دقت بالا و ازنظر مقدار دبی پیک به ترتیب با اختلاف ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام داده و عملکرد خوبی از خود در این پیک نشان داده است.



شکل ۶- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES در بازه ۲۰۱۸-۲۰۱۳

Figure 6- The results of the calibration and validation of the IHACRES model during 2013-2018 period

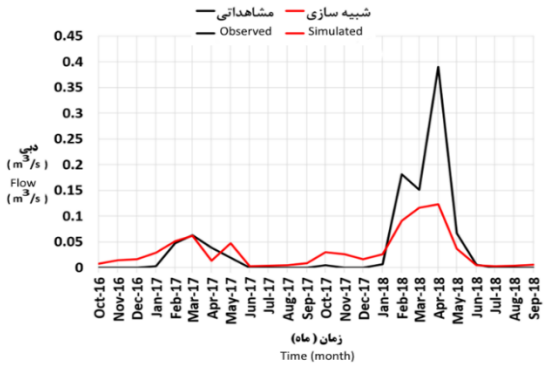
جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل IHACRES در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی

Table 4- Evaluation results of IHACRES model in calibration and validation sections

شاخص ارزیابی Evaluation index	واسنجی Calibration	صحت‌سنجی Validation
NS	0.48	0.95
RMSE(m)	0.02	0.01

همان‌گونه که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود در گام صحت‌سنجی مدل IHACRES که دارای اهمیت بالایی است، ازنظر معیارهای ارزیابی RMSE و NS مدل عملکرد خوبی از خود نشان داده است. در مرحله واسنجی مدل نیز، شاخص‌های ارزیابی دارای نتایج قابل قبولی می‌باشند که با نتایج تحقیقRezaei Moghaddam و همکاران (۲۰۱۹) و Zandi Daregharibi و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد. به‌بیان‌دیگر این مدل علی‌رغم استفاده از حداقل داده‌های ورودی، توانمندی خوبی در شبیه‌سازی رواناب حداکثر را دارد که به دلیل بهینه‌سازی خوب پارامترهای این مدل مفهومی است.

در مرحله آموزش و صحت‌سنجی مدل استنتاج عصبی-فازی نیز داده آموزش از تاریخ سپتامبر ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۶ و داده‌های ارزیابی از تاریخ سپتامبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۸ در مقیاس ماهانه وارد مدل شد و بر اساس تکرارهای مختلف بهترین نتایج بر اساس این تنظیمات به دست آمد که تعداد توابع عضویت برابر ۲، نوع تابع عضویت ورودی trimf، نوع تابع عضویت خروجی ثابت و از ۶۰ تکرار برای بخش آموزش استفاده گردید. نتایج مرحله آزمون انفیس ساخته‌شده در گام قبل بر اساس شاخص RMSE برابر ۰/۰۱۸ مترمکعب بر ثانیه پذیرفته شد و بخش آزمون مدل انجام شد. شکل ۷ مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل سیستم استنتاج عصبی فازی در بخش آزمون مدل را نشان می‌دهد.



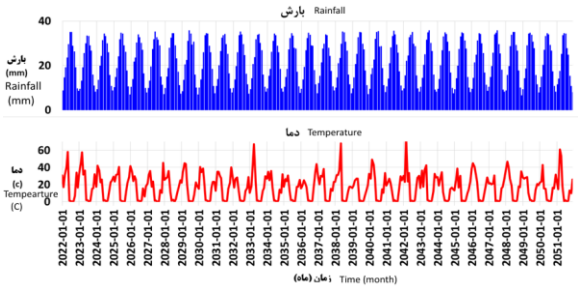
شکل ۷- مقایسه دبی رواناب مشاهداتی در مقابل مقادیر شبیه‌سازی‌شده آن با سیستم استنتاج عصبی فازی در مرحله آزمون

Figure 7- The comparison of observed and simulated values with Addaptive neuro- fuzzy inference system in the validation section

با توجه به شکل ۷ سه پیک در بخش صحت‌سنجی شامل پیک اول در مارس ۲۰۱۷ با دبی ۰/۰۶۳ مترمکعب بر ثانیه، پیک دوم در فوریه ۲۰۱۸ با دبی ۰/۱۸ مترمکعب بر ثانیه و پیک سوم در آوریل ۲۰۱۸ با دبی ۰/۳۹ مترمکعب بر ثانیه مشاهده می‌شود. مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی در پیک اول ازنظر زمان رسیدن به پیک با

دقت بالا و ازنظر مقدار دبی پیک با اختلاف اندک ۰/۰۲ بیشتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام داده و عملکرد خوبی داشته است. مدل در پیک دوم ازنظر زمان رسیدن به دبی حداکثر، با دقت بالا و ازنظر مقدار دبی با اختلاف ۰/۰۹ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام داده و به نسبت دبی اوج قبل عملکرد ضعیف‌تری داشته است. در دبی اوج سوم، مدل سیستم استنتاج عصبی فازی، ازنظر زمان رسیدن به دبی پیک، با دقت بالا و ازنظر مقدار دبی پیک با اختلاف ۰/۲۷ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی کم‌تخمینی داشته و لذا عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است. این نتیجه می‌تواند به دلیل روش متفاوت این مدل در نمونه‌گیری از داده‌ها برای آموزش باشد زیرا در انتخاب داده‌ها برای آموزش یا آزمون مدل امکان استفاده از داده‌هایی با تغییرات زیاد نسبت به داده‌های قبلی وجود دارد. مقادیر معیارهای ارزیابی مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی برای شاخص نش-ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد؛ لذا بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مرحله آزمون، این مدل ازنظر معیارهای ارزیابی RMSE و NS عملکرد خوبی از خود نشان نداده است.

مقدار معیار ارزیابی RMSE در بخش صحت‌سنجی برای مدل‌های IHACRES و سیستم استنتاج عصبی -فازی به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه و مقدار معیار ارزیابی نش-ساتکلیف به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۵۲ محاسبه شد. همچنین مقایسه نمودار مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده با مشاهداتی نشان داد که مدل IHACRES نسبت به مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی نتایج بهتری را ازنظر شبیه‌سازی مقادیر دبی اوج رواناب و هم‌زمان رسیدن به دبی اوج بازتولید می‌نماید. مقایسه مدل‌های استنتاج سیستم عصبی-فازی با IHACRES نشان داد که مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب IHACRES دارای توانمندی بالاتری در بازتولید رواناب مشاهداتی ناشی از شرایط اقلیمی حادث‌شده است؛ لذا در گام بعدی این تحقیق، این مدل برتر در پیش‌بینی رواناب ناشی از بارش و درجه حرارت در افق آینده مورداستفاده قرار گرفت. در جهت تکمیل این بخش، از نرم‌افزار LARS-WG5.0 برای ریزمقیاس نمائی بارش و دما از خروجی مدل بزرگ‌مقیاس GISS-E2-R در افق آینده نزدیک (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سناریو RCP4.5 استفاده گردید. نتایج ریزمقیاس نمائی بارش و دمای متوسط در شکل ۸ نشان داده‌شده است.

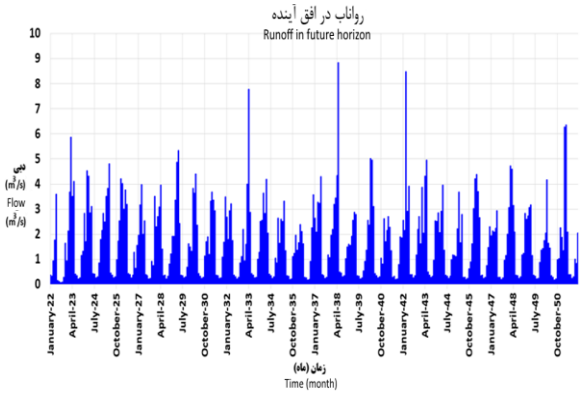


شکل ۸: بارش و دمای ماهانه ریزمقیاس شده توسط مدل LARS-WG5.0 تحت سناریو RCP4.5 در افق آینده نزدیک

Figure 8- Monthly downscaled precipitation and temperature by the LARS-WG5.0 model under the RCP4.5 scenario in the near future horizon

استخراج میانگین درازمدت ماهانه، نشان داد که مقادیر میانگین بارش و دما در افق آینده معادل ۱۷/۳۸ میلی‌متر و ۲۱/۷ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با مقادیر مشابه در دوره پایه ۵/۴۵ میلی‌متر افزایش در میانگین بارش ماهانه و ۲/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دما اتفاق خواهد افتاد. همچنین می‌توان انتظار داشت که این تغییر در مقادیر پارامترهای اقلیمی، باعث وقوع تغییراتی در رواناب ناشی از بارش در آینده شود.

پس از ریزمقیاس سازی داده‌های روزانه بارش و دما برای سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۱ توسط مدل ریزمقیاس LARS-WG5.0، این داده‌ها به‌عنوان ورودی به مدل IHACRES داده شد تا شبیه‌سازی دبی توسط این مدل صورت گیرد. شکل ۹ مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل IHACRES با استفاده از داده‌های بارش و دمای خروجی مدل ریزمقیاس LARS-WG5.0 را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقادیر رواناب شبیه‌سازی‌شده در افق آینده نزدیک توسط مدل IHACRES

Figure 9- Simulated runoff values in the near future horizon by the IHACRES model

با توجه به شکل ۹، تعداد چهار دبی پیک در افق آینده برآورد شده است که پیک اول در ماه آوریل ۲۰۳۳ با دبی ۷/۷۶ مترمکعب بر ثانیه در اثر بارش ۶۷/۳۴ میلی‌متر، پیک دوم در ماه می ۲۰۳۸ با دبی ۸/۸۴ مترمکعب بر ثانیه در اثر بارش ۴۴/۹ میلی‌متر، پیک سوم در ماه مارس ۲۰۴۲ با دبی ۸/۴۶ مترمکعب بر ثانیه در اثر بارش ۷۵ میلی‌متر، پیک چهارم در ماه آوریل ۲۰۵۱ با دبی ۶/۳۴ مترمکعب بر ثانیه در اثر بارش ۵۳/۵ میلی-متر است. با توجه به خصوصیات پدیده تغییر اقلیم در ایجاد مقادیر حدی بارش و دما در آینده، مقادیر بالای مجموع بارش ماهانه، وقوع رواناب با مقادیر حدی بالا را در پی خواهد داشت؛ لذا بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب، افزایش میانگین رواناب مشاهداتی در تعدادی از ماه‌های سال نسبت به همان ماه‌ها در دوره پایه دیده می‌شود که با نتایج Hejazizadeh و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، توانمندی دو مدل IHACRES و سیستم استنتاج عصبی-فازی در شبیه‌سازی بارش و رواناب ورودی سد کریت در طبس گلشن موردبررسی قرار گرفت. نتایج صحت‌سنجی این دو مدل نشان از برتری مدل IHACRES نسبت به مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی در شبیه‌سازی رواناب مشاهداتی در ایستگاه مادور (ورودی به سد کریت) دارد. با عنایت به بررسی تأثیر اقلیم بر رواناب ورودی به سد کریت در افق آینده، مدل LARS-WG5.0 و خروجی مدل بزرگ‌مقیاس GISS-E2-R و سناریو RCP4.5 استفاده گردید. نتایج ریزمقیاس نمائی آماری برای سال‌های ۲۰۵۱-۲۰۲۲ نشان از افزایش ۲/۹ درجه‌ای سانتی‌گراد در دما و افزایش ۵/۴۵ میلی‌متری درمجموع بارش ماهانه دارد. نتایج شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب نشان از افزایش میانگین رواناب مشاهداتی در تعدادی از ماه‌های سال نسبت به همان ماه‌ها در دوره پایه دارد.

References

Ahmadpour, A., Mirhashemi, S. & Haghighatjou, P. (2020). Evaluation of classical, conceptual ihacres and hybrid arma-ann models in simulation and prediction of daily discharge of Maroun River. I*ranian Journal of Soil and Water Research*. 51(3), 727-736. (In Persian)

Abushandi, E. & Merkel, B. (2013). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resource Management*. 27(7), 2391-2409. DOI: 10.1007/s11269-0130293-4.

Amiri, E. & Roudbari Mousavi, M.M. (2016). Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (Case study Polrood and Shalmanrood rivers). *Iranian journal of Ecohydrology*, *3*(4), 533-543. (In Persian)

Bacanli, U.G., Firat, M., & Dikbas, F. (2009). Adaptive neuro-fuzzy inference system for drought forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(8), 1143-1154.

Dastorani, M.T., Sharifi Darani, H., Talebi, A. & Moghadam Nia, A. (2011). Evaluation of the application of artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for rainfall-runoff modeling in Zayandeh-rood dam basin. *J. of Water and Wastewater*, 80, 114-125.

Fakhr Hashemian, S., Farabi, H., Kazemi, M., & Solaimanian, M. (2017). *Presenting an efficient model for river flow estimation using fuzzy inference system, case study of Baba Aman River*. The 5th National Conference on Geomorphology and Environmental Challenges, September. Mashhad, Iran. (In Persian)

Hafezparast, M., & Marabi, S. (2021). Prediction of Discharge Using Artificial Neural Network and IHACRES Models Due to Climate Change. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8-3, 75-85.

Hejazizadeh, Z., Ashofteh, P.S., Fatahi, E., & Gholampour, Z. (2015). Analysis of streamflow changes under climate change using rainfall-runoff model in the Kor River basin. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 15(38), 31-47 (In Persian)

Lotfirad, M., Adib, A. & Haghighi, A. (2018). Estimation of Daily Runoff Using of the Semi-Conceptual Rainfall-Runoff IHACRES Model in the Navrood Watershed (a watershed in the Gilan province. *Iranian journal of Ecohydrology*, *5*(2), 449-460. (In Persian)

Momeneh, S. (2022). Performance comparison of artificial intelligence models with IHACRES model in streamflow modeling of the Gamasiab River catchment. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(3), 1-16. (In Persian)

Rezaei Moghaddam, M.H., Hejazi, M.A. & Behbuodi, A. (2019). A Calibration and Dvaluation of IHACRES Model in Runoff Simulation the Lanbaran Sub-basin, Ahar Chay. *Hydrogeomorphology*, 6(20), 187-204. (In Persian)

Sedighi, F., Vafakhah, M. & Javadi, M.R. (2014). *Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Rainfall-Runoff Forecasting in Latyan Watershed*. The second national conference of applied research in civil engineering, architecture and urban management, Tehran, Iran. (In Persian)

Zandi Daregharibi, F., Khorsandi, Z., Mozayan, M., & Arman, N. (2017). Comparing the Performance of Two Hydrological Models, IHACRES and GR2M for Simulating Monthly Flow of Dareh-Takht Basin. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 147-158. (In Persian)

Zarei, M., Habibnezhad, R.M., Shahedi, K., & Ghanbarpour, M.R. (2011). Calibration and Evaluation of IHACRES Hydrological Model for Daily Flow Simulation. *Journal of Water and Soil*, 25(1), 104-114. (In Persian)