Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 1, March-April 2022, p. 17-30

Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen)

M. Fouladi Nasrabad[1]- M. Amirabadizadeh[2]*- M. Pourreza Bilondi[3]- M. Yaghoobzadeh[4]

Received: 01-01-2022
Revised: 05-01-2022
Accepted: 31-01-2022
Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:
Fooladi M., Amirabadizadeh M., Pourreza Bilondi M,. and Yaghoobzadeh M. 2022. Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen). Journal of Water and Soil 36(1): 17-30. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.74115.1122

Introduction

The watershed acts as a hydrological unit regulating the quantity and quality of the water cycle, and human beings have incurred high costs due to ignorance of this complex cycle and lack of planning of projects in terms of the relationship between water management and community development.

Knowledge of features such as maximum flood discharge is essential for the design of hydraulic structures, such as dams, spillways, bridges, and culverts, in order to reduce potential damages and predict when peak discharges will be reached in the downstream areas when discussing flood warning. Rainfall-runoff modeling is one of the key tools in hydrology to achieve flood characteristics, such as peak rate and peak time. In current research, the performance of IHACRES model using "Hydromad" R package has been implemented to simulate flow in the Shoor river basin in Ghaen on a monthly scale. The model simulation was done to investigate the effect of selecting "ARMAX" and "EXPUH" methods in the linear part of the target function. Also, the modeling process and the optimized values of the model parameters were investigated.

Materials and Methods

The Shoor river basin with an area of 2412.92 square kilometers located in Ghaen between 59 degrees and 12 minutes to 59 degrees and 14 minutes east longitude and 33 degrees and 42 minutes to 33 degrees and 45 minutes north latitude. The study catchment with an average altitude of 1420 m above sea level and an average long-term annual rainfall of 173 mm has a dry climate. This river is the largest river in Ghaenat city which flows into Khaf Salt field. In this research, the IHACRES model was implemented using the Hydromad R package. To perform the flow simulation, precipitation, flow rate and temperature data on a monthly scale during the years 1998 to 2017 were used. The IHACRES model has two parts: the first part, which converts precipitation into effective precipitation at each time stage and the second part, which converts effective precipitation into modeled flow. These sections are called nonlinear and linear modules, respectively. To implement each of the sections of nonlinear modules and linear modules according to the data and conditions in the study area, methods with different parameters can be used. In this research, in the non-linear module section, the "CWI" method and in the linear module section, "ARMAX" and "EXPUH" methods have been used for proper routing in the "reverse" calibration section. In the validation section of the "ls" method, the performance criteria of KGE, NS and R^2 were used to evaluate the performance of the model in both calibration and validation process.

Result and Discussion

Comparison of obtained results in this study with previous studies showed that in terms of examining the

1- M.Sc of Water Resources, Department of Water Engineering and Science, University of Birjand, Birjand, Iran
2, 3 and 4- Assistant Professor and Associate Professors, Department of Water Engineering and Science, University of Birjand, Birjand, Iran and Member of Drought and Climate Change Research Group, respectively.
(*- Corresponding Author Email : mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

performance of the model with the EXPUH linear method, the obtained results were consistent with the results of Sadeghi et al. (2015) and Lotfi Rad et al. (2015) and the model with the EXPUH linear method. The NS criteria has shown acceptable performance. According to the results of the model in the calibration section, in terms of evaluation criteria NS, KGE and R^2, and in terms of simulation of peak flow values and the time to peak using EXPUH method in the linear part showed better performance than ARMAX method. The value of these criteria in EXPUH method is equal to 0.86, 0.93, and 0.86, and in ARMAX method are equal to 0.7, 0.85 and 0.73, respectively. In the validation section, the evaluation criteria in EXPUH method were equal to 0.51, 0.63, and 0.54 and in ARMAX method were equal to 0.55, 0.73 and 0.65, respectively, indicating better performance of the model by ARMAX method. Comparison of the EXPUH method, and also the model with ARMAX method showed more accurate performance in terms of peak discharges, quantity and time of occurrence. The values of NS, KGE and R^2 evaluation criteria in this section were 0.51, 0.63, and 0.54 using EXPUH method and 0.55, 0.73 and 0.65 with ARMAX method, respectively.

Conclusion

According to the results, the IHACRES model using ARMAX method in the linear section resulted in more accurate performance than EXPUH method in simulation of peak flow values and time to peak.

Keywords: Calibration, IHACRES Model, Rainfall-Runoff Simulation, Shoor Ghaen River

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۱۷-۳۰

ارزیابی عملکرد مدل IHACRES با روش‌های خطی ARMAX و EXPUH (مطالعه موردی: حوضه رودخانه شور در قائن)

محمد فولادی نصرآباد[۱]- مهدی امیرآبادی زاده[۲*]- محسن پوررضا بیلندی[۳]- مصطفی یعقوب زاده[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از ابزارهای کلیدی در هیدرولوژی برای دستیابی به خصوصیات سیلاب، مانند میزان دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج است. در این تحقیق مدل IHACRES در قالب بسته نرم‌افزاری hydromad و در بستر R، برای شبیه‌سازی جریان حوضه رودخانه شور قائن مورداستفاده قرار گرفت و عملکرد آن در شبیه‌سازی رواناب با روش‌های ARMAX و EXPUH در بخش خطی مدل، بررسی شد. برای انجام شبیه‌سازی با مدل مذکور، از داده‌های بارش، دبی جریان و دما در مقیاس ماهانه طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۸ استفاده شد. پارامترهای مدل IHACRES با استفاده از تابع هدف KGE، واسنجی شدند. در گام‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج ، از معیارهای ارزیابی NS، KGE و R^2 استفاده گردید. مقدار این معیارها در روش EXPUH به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۹۳، ۰/۸۶ و در روش ARMAX برابر ۰/۷، ۰/۸۵ و ۰/۷۳ محاسبه‌شد که نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر روش EXPUH نسبت به روش ARMAX می‌باشد. درگام مربوط به صحت‌سنجی نیز، معیارهای ارزیابی در روش‌های EXPUH و ARMAX به‌ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و ۰/۵۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۵ برآورد شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل با روش ARMAX نسبت به روش EXPUH است و همچنین مدل با روش ARMAX در شناسایی دبی‌های اوج از نظر مقدار و از نظر زمان وقوع عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داد. درمجموع نتایج تحقیق، نشان‌دهنده این مطلب است که مدل IHACRES در منطقه موردمطالعه، با استفاده از روش ARMAX نسبت به روش EXPUH عملکرد دقیق‌تری داشته است.

واژه‌های کلیدی: رودخانه شور قائن، شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل IHACRES، واسنجی

مقدمه

حیات بشر بر روی کره زمین موجب بروز تحولات عظیمی بر سطح زمین شده که ازجمله این تحولات می‌توان به تخریب جنگل‌ها و مراتع در سطح وسیع اشاره کرد. این عوامل نقش مهمی را در سیل‌خیزی منطقه ایجاد می‌کند (Baddoo *et al*., 2020).

حوضه آبخیز به‌عنوان واحد هیدرولوژیکی تنظیم‌کننده کمیت و کیفیت چرخه‌ی آب عمل می‌کند و انسان به دلیل ناآگاهی از این چرخه‌ی پیچیده و نیز نداشتن برنامه‌ریزی در طرح‌ها به لحاظ ارتباط بین مدیریت آب و تحولات جوامع، متحمل هزینه‌های فراوانی شده است.

اطلاع از خصوصیاتی مانند حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه‌های آبی، از قبیل سدها، سرریزها، پل‌ها و زیرگذرها در جهت کاهش خسارات احتمالی و پیش‌بینی زمان رسیدن به دبی اوج در بازه‌های پایین‌دست در بحث هشدار سیل ضروری است. کارشناسان و متخصصان منابع آب همواره در پی آن بوده‌اند که بتوانند معادله بین مقادیر بارندگی و رواناب را در حوضه‌های آبخیز و در شرایط مختلف زمانی و مکانی بیابند. تا امروز مدل‌های بارش - رواناب فراوانی باقابلیت و پیچیدگی‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی سیلاب ساخته و به‌کاربرده شده‌اند (Dooge, 1973).

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب استادیار و دانشیاران، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و عضو هیئت علمی گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم
(*- نویسنده مسئول: Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2022.74115.1122

مدل‌های بارش-رواناب قابلیت درون‌یابی و برون‌یابی جریان را متناسب با داده‌های ورودی به مدل دارند. مدل IHACRES[1] دارای ساختار یکپارچه مفهومی متریک در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که توسط جیکمن[2] در سال ۱۹۹۰ توسعه‌یافته است. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که این مدل در شناسایی هیدروگراف‌های واحد و مؤلفه‌های جریان حاصل از داده‌های بارش، تبخیر-تعرق و جریان رود، به دلیل دشواری در به دست آوردن داده‌های جامع موردنیاز مدل‌های فیزیکی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و با داده کم، یک مدل کارآمد و درعین‌حال اساسی برای شبیه‌سازی فرایندهای بارندگی -رواناب است (Ayele *et al*., 2017).

ابوشاندی و مرکل (Abushandi and Merkel, 2013) باهدف توسعه چارچوبی برای به‌کارگیری مدل بارش - رواناب در حوضه‌های خشک به دنبال تکمیل داده‌های ماهواره‌ای اصلاح شده بارش برای تعیین محل رگبار بودند. آنها یک رویداد بارش در حوضه‌ی خشک وادی دولیل اردن که اطلاعات آن به‌صورت ساعتی موجود بود را در IHACRES و HEC-HMS مدل‌سازی کردند. مدل IHACRES عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی داده‌های ساعتی نسبت به مدل HEC-HMS نشان داد، به‌طوری که ضریب کارایی مدل (نش - ساتکلیف) آنها به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۸۸ به دست آمد.

احمدی و همکاران (Ahmadi *et al*., 2019) از سه مدل ANN[3]، SWAT[4] و IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ای در منطقه کن به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد کارایی مدل‌های یادشده با در نظر گرفتن کمترین خطا، مدل ANN بهتر از دو مدل دیگر (معیار NS[5] برابر ۰/۸۶، معیار R^2 برابر ۰/۸۷، معیار RMSE[6] برابر ۲/۲ و معیار MBE[7] برابر ۰/۰۸ محاسبه شد) و همچنین، مدل SWAT (معیار NS برابر ۰/۶۵، معیار R^2 برابر ۰/۶۸، معیار RMSE برابر ۳/۳ و معیار MBE برابر ۰/۱۶۸- محاسبه شد) نیز بهتر از مدل IHACRES (معیار NS برابر ۰/۵۷، معیار R^2 برابر ۰/۵۸، معیار RMSE برابر ۳/۷ و معیار MBE برابر ۰/۰۴۹ محاسبه شد) است و بااینکه مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر خطای بیشتری دارد، ولی بازهم قابل‌قبول است.

زید علی نژاد و همکاران (Zeid Ali Nejad *et al*., 2021) در تحقیقی ضمن بررسی اثر تغییر اقلیم بر رودخانه تراز-هرکش استان خوزستان با استفاده از مجموعه داده NEX-GDDP[8]، کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی دبی رودخانه مذکور را نیز بررسی کردند و معیار ارزیابی R^2 در دوره واسنجی برابر ۰/۶ و در دوره صحت سنجی برابر ۰/۵۱ محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل IHACRES توانایی مناسبی در شبیه‌سازی دبی رودخانه مذکور دارد.

حافظ پرست و مرابی (Hafezparast and Marabi, 2021) در تحقیقی به مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و IHACRES در پیش‌بینی تخلیه رودخانه خرم رود به دلیل تغییرات آب و هوایی پرداختند. در این تحقیق مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از کتابخانه Scikit-Learn در محیط نرم‌افزار پایتون[9] و مدل IHACRES در محیط نرم‌افزار IHACRES اجراشد. معیارهای ارزیابی NS و MAE، RMSE، R^2 در مدل IHACRES در دوره واسنجی به‌ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۱/۲۹، ۲/۰۸، ۰/۹ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۱/۳۹، ۲/۲۴، ۰/۸۴ و در مدل شبکه عصبی مصنوعی در دوره واسنجی به‌ترتیب برابر ۰/۶ و ۱/۴۶، ۲/۳۳، ۰/۸۲ و در دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۲/۱۸، ۳/۰۱، ۰/۶۴ محاسبه‌شد. بنابراین نتایج این تحقیق نشان‌دهنده برتری مدل IHACRES نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی است.

صراف و قاسمی (Sarraf *et al*., 2021) در تحقیقی ضمن بررسی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی و عملیات جست‌وجو و نجات، نشان دادند که مدل IHACRES در حوضه رودخانه اعظم هرات واقع در استان یزد عملکرد خوب و قابل قبولی داشته است. در این تحقیق از معیارهای ارزیابی نش – ساتکلیف استفاده‌شده است و مقدار این معیار برای الگوریتم‌های عنکبوت اجتماعی و عملیات جست‌وجو و نجات به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۶۹ محاسبه شد.

لطفی راد و همکاران (Lotfirad et al., 2018)، در سال ۱۳۹۷ در پژوهشی تحت عنوان تخمین رواناب روزانه به‌کمک مدل نیمه‌مفهومی IHACRES در حوضه آبریز ناورود گیلان به بررسی پرداختند. در این پژوهش بارش رواناب حوضه ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های دبی روزانه ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه و نیز داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه طی دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ به‌عنوان دوره کالیبراسیون و دوره ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ نیز به‌عنوان دوره صحت‌سنجی شبیه‌سازی شد. نتایج آن‌ها بر اساس ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف (E) و میانگین خطای کل (BIAS) و میانگین خطای نسبی

1- Identification of unit Hydrograph And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data
2- Jakeman
3- Artificial Neural Networks
4- Soil and Water Assessment Tool
5- Nash–Sutcliffe
6- Root-Mean-Square Error
7- Mean Bias Error
8- NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled
9- Python

پارامتریک (ARPE) ارائه شد که مقدار به‌دست‌آمده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۶ به دست آمد که با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین قابل‌قبول است.

به‌طور کلی مطالعات انجام‌شده با مدل IHACRES نشان داده است که این مدل در مناطق مرطوب عملکردی قابل‌قبول و در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکردی خوب از خود نشان می‌دهد. همچنین این مدل در مقیاس روزانه و ماهانه عملکرد بهتری نسبت به مقیاس ساعتی دارد و در تحقیقات قبلی از تابع هدف نش–ساتکلیف استفاده‌شده و عملکرد مدل با سایر توابع هدف موردبررسی قرار نگرفته است. به همین منظور، ازآنجایی‌که در نرم‌افزار IHACRES در بخش‌های خطی و غیرخطی و توابع هدف مورداستفاده محدودیت وجود دارد، از بسته نر افزاری "هایدرومد[1]" استفاده شد. در این بسته نرم‌افزاری در بخش‌های خطی و غیرخطی مدل، روش‌های متعددی گنجانده‌شده و امکان استفاده از توابع هدف مختلف علاوه بر توابع هدف موجود در بسته وجود دارد.

با توجه به موارد بیان‌شده، در این تحقیق، با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد" و کد نویسی در محیط R، عملکرد مدل IHACRES، برای شبیه‌سازی جریان در منطقه رودخانه شور قائن در مقیاس ماهانه، مورد ارزیابی قرارگرفت و تأثیر انتخاب روش‌های "ARMAX" و "EXPUH" در بخش خطی و نیز تأثیر انتخاب تابع هدف KGE بر روند مدل‌سازی و مقادیر پارامترهای مدل، موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز رودخانه موردمطالعه (رودخانه شور) شامل شهرستان قائنات با وسعت ۲۴۱۲/۹۲ کیلومتر مربع بین ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه ۴۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. شکل ۱ محدوده حوضه آبریز رودخانه شور قائن را نشان می‌دهد.

حوضه آبریز موردمطالعه با متوسط ارتفاع ۱۴۲۰ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی درازمدت سالانه ۱۷۳ میلی‌متر دارای اقلیمی خشک می‌باشد (AkbariMotlagh *et al.*, 2016). رودخانه شور قائن بزرگ‌ترین رود شهرستان قائنات است که به نمکزار خواف می‌ریزد. طول آن ۱۰۰ کیلومتر، ارتفاع سرچشمه آن ۱۴۲۰ متر، ارتفاع ریزشگاه ۶۰۰ متر و مسیر کلی رود، به سمت شمال شرقی می‌باشد. این رودخانه از به هم پیوستن رودهای کوه باز و شاخن در ۲۰۰ کیلومتری جنوب شرقی قائن تشکیل گردیده است.

1- Hydromad

برای اجرای مدل IHACRES از داده‌های بارش برحسب میلی‌متر، داده‌های دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه و داده‌های دما برحسب درجه سانتی‌گراد، در مقیاس ماهانه استفاده گردید. داده‌های موردنظر از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی تهیه گردید. نمودار داده‌های بارش، دبی و دما استفاده‌شده در این تحقیق در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده‌شده است. لازم به توضیح است که داده‌های بارش و دمای استفاده شده در این تحقیق در ایستگاه سینوپتیک قائن و ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا ثبت شده است. مشخصات ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا و ایستگاه سینوپتیک قائن در جدول ۱ نشان داده شده است.

ساختار مدل

در این تحقیق مدل IHACRES در نرم‌افزار R و با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد[2]" اجرا شد. مدل IHACRES دارای دو بخش است: یک بخش که بارش را در هر گام زمانی به بارش مؤثر تبدیل می‌کند و بخش دیگر که بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده تبدیل می‌کند. این بخش‌ها به ترتیب ماژول غیرخطی و ماژول خطی نامیده می‌شوند (Dooge, 1973Box, 1970).

برای اجرای هریک از بخش‌های ماژول غیرخطی و ماژول خطی، با توجه به داده‌ها و شرایط موجود در منطقه مورد مطالعه می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد. در این تحقیق برای اجرای مدل، در بخش ماژول غیرخطی از روش "CWI[3]" و در بخش ماژول خطی از روش "ARMAX[4]" و "EXPUH[5]"، برای مسیریابی مناسب در بخش واسنجی از روش "Inverse" و در بخش صحت سنجی از روش "ls[6]" استفاده شد.

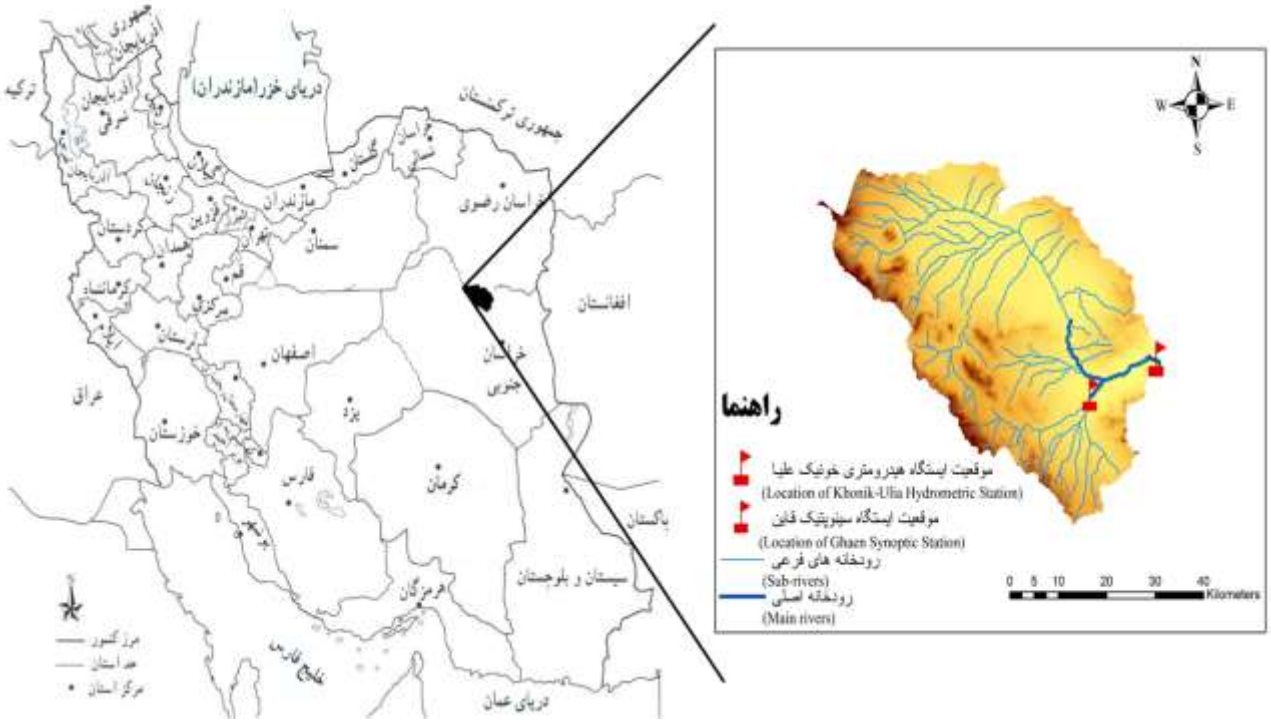
تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیرخطی)

همان‌طور که گفته شد برای اجرای مدل در بخش غیرخطی از روش (CWI) استفاده شد. در این روش برای محاسبه بارش مؤثر از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده می‌شود:

$$\tau_k = \tau_w{}^{0.062f(T_r - T_k)} \quad (۱)$$

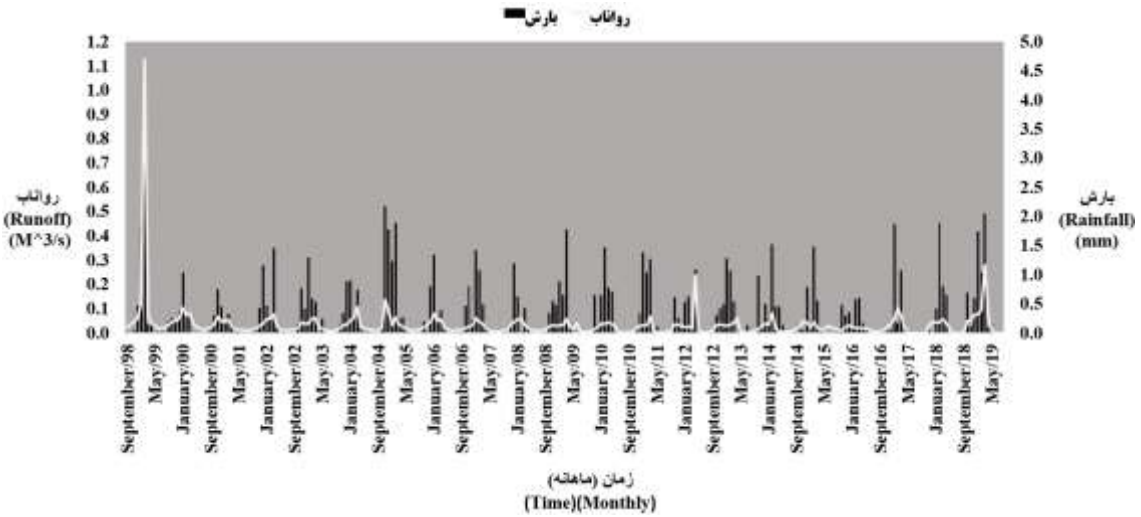
که در آن τ_k، شدت خشکی خاک است که به‌عنوان تابعی از دماست، τ_w، مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود، f تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)، T_r دمای مرجع و T_k دما در هر گام زمانی هستند.

2- Hydromad
3- Catchment Wetness Index
4- Auto-Regressive and Moving Average coefficients
5- Exponential unit hydrograph
6- Least Squares



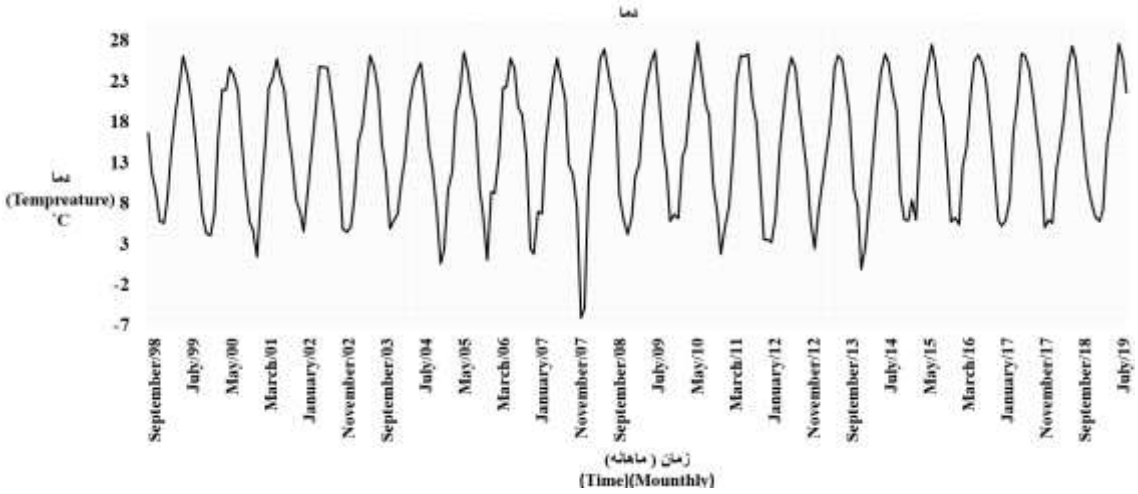
شکل ۱- حوضه آبریز رودخانه شور در قائن

Figure 1- The catchment of Shoor river in Ghaen



شکل ۲- مقادیر متوسط بارش ماهانه (میلی‌متر) و دبی رواناب ماهانه (متر مکعب برثانیه) مشاهداتی

Figure 2– The observed mean values of monthly rainfall (mm) and runoff flow (cubic meters per second)



شکل ۳- مقادیر متوسط دمای ماهانه مشاهداتی (درجه سانتی‌گراد)

Figure 3– The observed values of mean monthly temperature (degrees Celsius)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا و ایستگاه سینوپتیک قائن

Table 1- Characteristcs of Khonik-Ulia hydrometric and Ghaen synoptic stations

	عرض جغرافیایی (Latitude)	طول جغرافیایی (Longitude)	Utmy (m)	Utmx (m)	ارتفاع (متر) (Altitude (meters))
ایستگاه هیدرومتری خونیک علیا (Khonik-Ulia Hydrometric Station)	33° -47′- 19″	59°-20′-41″	3740942	716668	1330
ایستگاه سینوپتیک قائن (Ghaen Synoptic Station)	33°-43′- 00″	59°-11′-00″	3734721	702935	1446

پس از محاسبه τ_k، مقدار شاخص رطوبت حوضه یا φ_k از رابطه۲ محاسبه می‌شود:

$$\varphi_k = r_k + \left[1 - \frac{1}{\tau_k}\right] \varphi_{k-1} \quad (۲)$$

که در این رابطه r_k بارش مشاهداتی و τ_k شدت خشکی مبنا است. پس از محاسبه مقدار شاخص رطوبت حوضه مقدار بارش مؤثر در هر گام زمانی از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$U_k = r_k * c * \varphi_k \quad (۳)$$

که در این رابطه U_k بارش مؤثر، r_k بارش مشاهداتی، c ضریب تعادل حجم بارش و φ_k شاخص رطوبت حوضه است. لازم به ذکر است که پارامتر c در این رابطه به نحوی تعیین می‌شود که حجم بارش مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان شوند (Yaghoubi and Massah Bavani, 2014).

به‌طورکلی در بخش غیرخطی سه پارامتر τ_w، f و c که به ترتیب مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود (برحسب روز)، فاکتور تعدیل دما (برحسب $\frac{1}{°C}$) و ضریب تعادل حجم بارش (برحسب میلی‌متر) هستند که در بخش واسنجی مدل بهینه شدند و مقادیر آن‌ها در صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت.

تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی)

روش ARMAX

این روش می‌تواند به‌عنوان یک تابع انتقال برای محاسبه هیدروگراف واحد کلی جریان مورداستفاده قرار گیرد که در قالب مدل اتورگرسیو[1] و میانگین متحرک[2] تعریف‌شده است. در این روش برای محاسبه جریان رواناب در هر گام زمانی از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$X_t = a_1 X_{(t-1)} + b_0 U_{(t-1)} \quad (۴)$$

که در آن a_1 ضریب مربوط به اتورگرسیو و b_0 ضریب مربوط به میانگین متحرک است (Jakeman *et al.*, 1990).

ازآنجایی‌که در این بخش برای مسیریابی بهتر از روش "Inverse" استفاده شده، مقادیر ضرایب a_1 و b_0 به‌ترتیب، ۰/۰۷۰۲۷ و ۰/۹۲۹۷۳به‌صورت خودکار توسط مدل محاسبه شد.

روش EXPUH

در این روش، مقدار رواناب از اجتماع جریان آهسته و جریان

1- Auto-Regressive
2- Moving Average

سریع حاصل می‌شود که از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$X_t = \left(\alpha_s X_{t-1}^{(s)} + \beta_s U_t\right) + \left(\alpha_q X_{t-1}^{(q)} + \beta_q U_t\right) \quad (۵)$$

که در این رابطه α_s و β_s پارامترهای ثابت زمانی جریان آهسته و α_q و β_q پارامترهای ثابت زمانی جریان سریع هستند. دو پارامتر در این روش وجود دارد که عبارت‌اند از τ_s که بیانگر مدت زمانی است، که طول می‌کشد جریان آهسته کاهش یابد و V_s حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد که نحوه محاسبه آن‌ها در رابطه‌های۶ و ۷ نشان داده شده است (Jakeman and Hornberger, 1993).

$$\tau_s = \frac{-1}{\log(\alpha_s)} \quad (۶)$$

$$V_s = \frac{\beta_s}{1-\alpha_s} \quad (۷)$$

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق به‌منظور انجام عملیات واسنجی و تعیین پارامترهای بهینه از تابع هدف KGE و برای ارزیابی عملکرد مدل در دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی از معیارهای KGE، NS و R^2 استفاده شد. رابطه‌های شماره ۸، ۹ و ۱۰ نحوه محاسبه این معیارها را نشان می‌دهد:

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۸)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_s - \bar{Q}_s)(Q_o - \bar{Q}_o)]^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum(Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها cc ضریب همبستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، α نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی‌شده بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و β نسبت میانگین داده‌های شبیه‌سازی‌شده به میانگین داده‌های مشاهداتی، Q_s دبی شبیه‌سازی‌شده، $\bar{Q}_s$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، Q_o دبی مشاهداتی و $\bar{Q}_o$ میانگین مقادیر مشاهداتی است و هر چه مقادیر این شاخص‌ها به یک نزدیکتر باشد مطلوبتر خواهد بود.

نتایج و بحث

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا داده‌های بارش، دبی رواناب و دما به ترتیب برحسب میلی‌متر، متر مکعب بر ثانیه و درجه سلسیوس از سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ در مقیاس ماهانه به‌منظور واسنجی و از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ در مقیاس ماهانه به‌منظور صحت سنجی وارد مدل شد. پس از واردکردن داده‌های ذکرشده به مدل، برای انجام واسنجی از روش‌های موجود در پکیج "هایدرومد" روش "fitbyoptim" انتخاب و از تعداد ۵۰۰ نمونه پارامتر که با روش "latin.hypercube" تولید شدند، استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل با روش‌های "ARMAX" و "EXPUH" در بخش‌های واسنجی و صحت سنجی از معیارهای NS، KGE و R^2 استفاده شد.

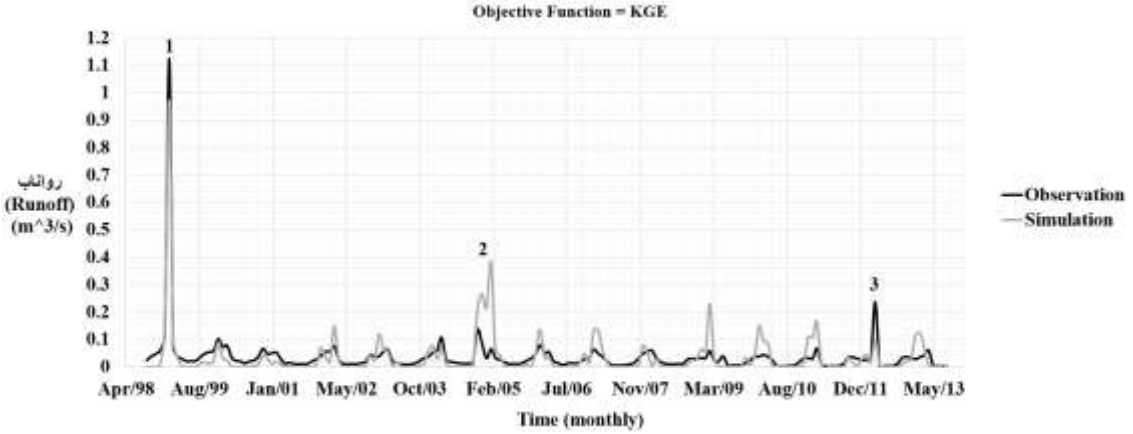
نتایج حاصل از اجرای مدل با روش خطی ARMAX

پس از واردکردن داده‌های ذکرشده به مدل، مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام شد. مقادیر واسنجی شده پارامترها در جدول ۲، مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش واسنجی در جدول ۴، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش صحت‌سنجی در جدول ۵ و نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترها با روش خطی ARMAX
Table 2- Optimal values of parameters with ARMAX linear method

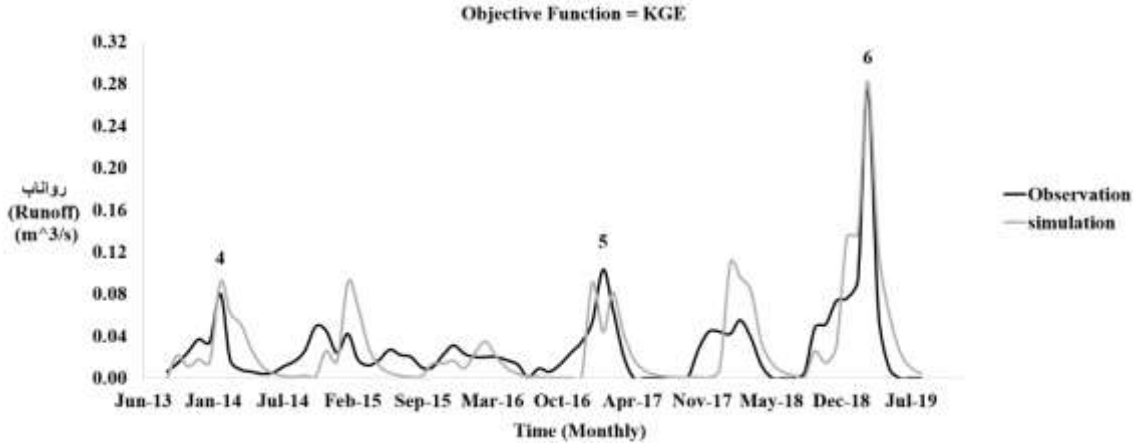
پارامتر (Parameter)	c	f	tw
مقادیر محاسبه‌شده (Calculated values)	0.040	0	5.715

با توجه به جدول ۲، مقدار محاسبه‌شده پارامتر c بیانگر این است که حوضه موردبررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد که ناشی از عدم و یا کم بودن تراکم پوشش گیاهی است، چراکه کاربری جنگلی و پوشش گیاهی مناسب، باعث نگهداشت جریان می‌شود تا با تأخیر وارد جریان رودخانه شود. همان‌گونه که اشاره گردید، این پارامتر نشان‌دهنده سرعت واکنش حوضه نسبت به بارش می‌باشد به‌طوری‌که هرچه مقدار آن بیشتر باشد حوضه واکنش آهسته‌تری نسبت به بارش نشان می‌دهد. مقدار محاسبه‌شده پارامتر f، بیانگر این است که تغییرات دما هیچ تأثیری بر میزان تلفات نداشته است. چراکه این پارامتر نشان‌دهنده تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات است. پارامتر tw، بیان می‌دارد که چه مدت‌زمان طول می‌کشد تا حوضه خشک شود و بر اساس نتایج حاصل‌شده مدل با روش ARMAX تقریباً ۶ روز موردنیاز می‌باشد تا حوضه موردبررسی خشک شود.



شکل ۴- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با روش ARMAX در بخش واسنجی

Figure 4- Observed and simulated flow by ARMAX method in calibration section



شکل ۵- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با روش ARMAX در بخش صحت سنجی

Figure 5- Observed and simulated flow by ARMAX method in the validation section

همچنین مقادیرشاخص های ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی در خروجی حوضه شامل NS، KGE و R^2 در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول ۳ و نظر موریاسی[1] و همکاران (Moriasi *et al.*, 2007)، آی ال[2] (Ayele *et al.*, 2017) و کرمی و بیاتی خطیبی (Karami *et al.*, 2019)، مقدار محاسبه‌شده این معیارها نشان می‌دهد که مدل با روش خطی ARMAX در بخش واسنجی از نظر معیار NS، عملکردی خوب و از نظر معیار R^2 و KGE، عملکردی خیلی خوب و در بخش صحت‌سنجی از نظر معیار NS، عملکرد قابل‌قبول و از نظر معیار R^2 و KGE، عملکرد خوبی داشته است.

جدول ۳- مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت سنجی با روش خطی ARMAX

Table 3- Calculated values of evaluation criteria in calibration and validation sections by ARMAX linear method

	NS	KGE	R^2
واسنجی (Calibration)	0.70	0.85	0.73
صحت سنجی (Validation)	0.55	0.73	0.65

با توجه به اینکه پیش‌بینی دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در مطالعات هیدرولوژیکی دارای اهمیت بسزایی می‌باشد، لذا تعداد سه دبی اوج تشخیص داده شد که اطلاعات آنها بترتیب در جداول ۴ و ۵ به تفکیک مراحل واسنجی و صحت‌سنجی ذکر شده است. همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، مدل برای دبی اوج شماره ۱ که در ماه فوریه سال ۱۹۹۹ با مقدار دبی ۱/۱۲۵ متر مکعب بر ثانیه اتفاق

1- Moriasi
2- Ayele

افتاده است و مهم‌ترین دبی اوج در بخش واسنجی محسوب می‌شود، توانسته از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف ۰/۱۵۵ متر مکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام دهد. در بخش صحت‌سنجی، مدل از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف اندک ۰/۰۰۴۴ متر مکعب در ثانیه بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی انجام داده و می‌توان گفت در این دبی اوج مدل عملکرد خوبی از خود نشان داده است.

جدول ۴- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش ARMAX در بخش واسنجی

Table 4- Information about peak flow and time to peak flow by ARMAX method in calibration section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی‌شده (Simulation)			
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی(درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
دبی اوج شماره ۱ (Peak discharge No. 1)	Feb-1999	1.125	Feb-1999	0.97	0.155 (٪13)	-
دبی اوج شماره ۲ (Peak discharge No. 2)	Nov-2004	0.135	Dec-1999	0.266	0.131 (٪97)	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۳ (Peak discharge No. 3)	Aprl-2012	0.236	Aprl-2012	0.139	0.139 (٪41.1)	-

جدول ۵- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش ARMAX در بخش صحت‌سنجی

Table 5- Information about the peak flow and the time to reach the peak flow by ARMAX method in the validation section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی‌شده (Simulation)			
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی(درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
دبی اوج شماره ۴ (Peak discharge No. 4)	Feb-2014	0.08	Feb-2014	0.0912	0.0112 (٪14)	-
دبی اوج شماره ۵ (Peak discharge No. 5)	Feb-2017	0.103	Jan-2017	0.09	0.013 (٪12.62)	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۶ (Peak discharge No. 6)	Mar-2019	0.278	Mar-2019	0.2824	0.0044 (٪1.58)	-

نتایج حاصل از اجرای مدل با روش خطی EXPUH

برای اجرای بخش واسنجی و صحت‌سنجی از داده‌های اولیه‌ی مورد استفاده در روش ARMAX استفاده شد. مقادیر واسنجی شده پارامترها در جدول ۶، مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۷، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش واسنجی در جدول ۸، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش صحت‌سنجی در جدول ۹ و نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ قرار داده‌شده است.

جدول ۶- مقادیر بهینه پارامترها با روش خطی EXPUH

Table 6- Optimal values of parameters with EXPUH linear method

پارامتر (Parameter)	c	f	tw	τ_s	V_s
مقادیر محاسبه‌شده (Calculated values)	0.094	0.434	0.591	17.365	0.405

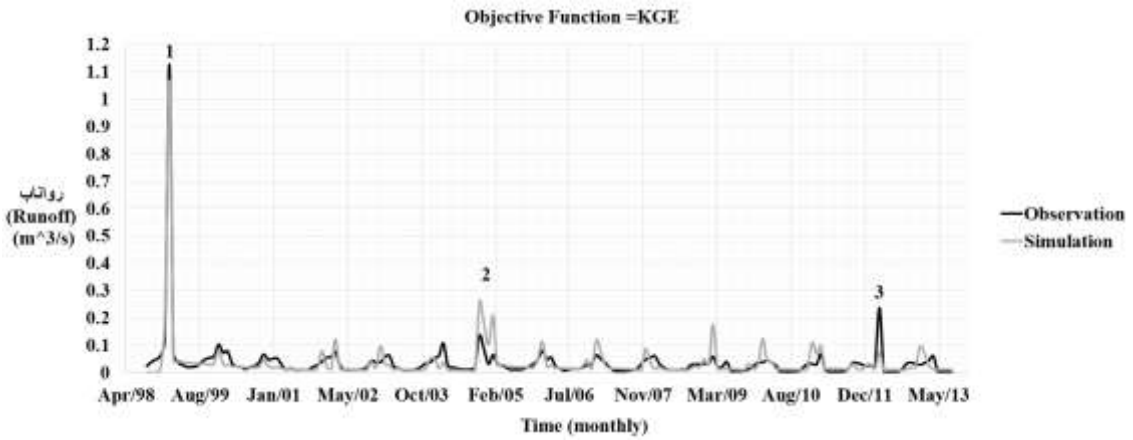
با توجه به جدول ۶، مقدار پارامتر c در این روش مانند روش ARMAX کوچک محاسبه شد و بیانگر این است که حوضه مورد بررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد. مقدار محاسبه‌شده پارامتر f، بیانگر این است که تغییرات دما تأثیر اندکی بر میزان تلفات داشته است. مقدار محاسبه‌شده پارامتر tw ، بیانگر این مطلب است که تقریباً نصف روز طول می‌کشد تا حوضه موردبررسی خشک شود. پارامتر τ_s، بیانگر مدت‌زمانی است، که طول می‌کشد جریان آهسته کاهش یابد و V_s، حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد.

مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در جدول ۷ آورده شده است. مقادیر محاسبه‌شده این معیارها نشان می‌دهد که مدل با روش خطی EXPUH در بخش واسنجی از نظر معیار NS، R^2 و KGE، عملکردی خیلی خوب و در بخش صحت‌سنجی از نظر معیار NS و R^2 عملکرد رضایت‌بخش و از نظر معیار KGE، عملکرد خوبی داشته است.

جدول ۷- مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت سنجی با روش خطی EXPUH

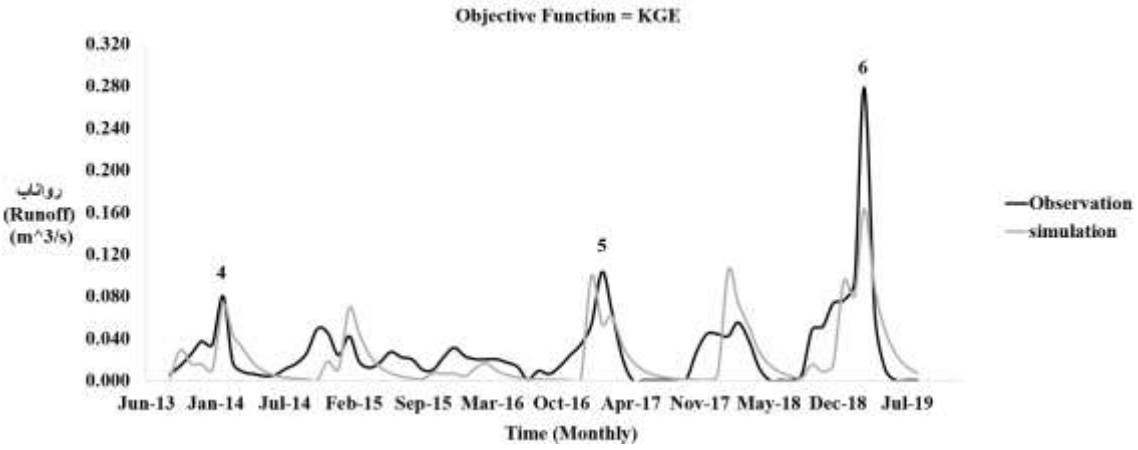
Table 7- Calculated values of evaluation criteria in calibration and validation sections by EXPUH linear method

	NS	KGE	R^2
واسنجی (Calibration)	0.86	0.93	0.86
صحت سنجی (Validation)	0.51	0.63	0.54



شکل ۶- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با روش EXPUH در بخش واسنجی

Figure 6- Observed and simulated flow by EXPUH method in calibration section



شکل ۷- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با روش EXPUH در بخش صحت‌سنجی

Figure 7- Observed and simulated flow by EXPUH method in the validation section

پس از بررسی داده‌های مشاهداتی دبی و خروجی حاصل از اجرای مدل، تعداد سه دبی اوج شناسایی شد که اطلاعات مربوط به مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در جداول ۸ و ۹ آورده شده است. با توجه به جدول ۸، مدل برای دبی اوج شماره ۱ که مهم‌ترین دبی اوج در بخش واسنجی محسوب می‌شود، توانست از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف اندک ۰/۰۵۸ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام دهد. با توجه به جدول ۹، در دبی اوج شماره ۶ که مهم‌ترین دبی اوج در بخش صحت‌سنجی محسوب می‌شود، مدل از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف ۰/۱۱۶ متر مکعب کمتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی انجام داده و می‌توان گفت در این دبی اوج مدل عملکرد خوبی از خود نشان نداده است. با توجه به موارد ذکرشده می‌توان گفت به‌طورکلی مدل با روش خطی EXPUH در بخش واسنجی در شناسایی زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و در بخش صحت‌سنجی با دقت نسبتاً خوب و از نظر محاسبه مقدار دبی اوج، در بخش واسنجی مقادیر اندکی کمتر از مقادیر مشاهداتی و در بخش صحت‌سنجی مقادیر کمتری از مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی کرده و عملکرد خوبی در مهم‌ترین دبی اوج بخش صحت‌سنجی از خود نشان نداده است.

جدول ۸- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش EXPUH در بخش واسنجی

Table 8- Information about peak flow and time to reach peak flow by EXPUH method in calibration section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی‌شده (Simulation)			
	تاریخ (Date)	دبی $(\frac{m^3}{s})$ (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی $(\frac{m^3}{s})$ (Discharge)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی(درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
دبی اوج شماره ۱ (Peak discharge No. 1)	Feb-1999	1.125	Feb-1999	1.06	(٪5.77) 0.058	-
دبی اوج شماره ۲ (Peak discharge No. 2)	Nov-2004	0.135	Nov - 2004	0.257	(٪90.37) 0.122	-
دبی اوج شماره ۳ (Peak discharge No. 3)	Apr-2012	0.236	Apr-2012	0.0713	(٪69.78) 0.164	-

جدول ۹- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش EXPUH در بخش صحت‌سنجی

Table 9- Information about the peak flow and the time to reach the peak flow by EXPUH method in the validation section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی‌شده (Simulation)			
	تاریخ (Date)	دبی $(\frac{m^3}{s})$ (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی $(\frac{m^3}{s})$ (Discharge)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی(درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
دبی اوج شماره ۴ (Peak discharge No. 4)	Feb-2014	0.08	Feb-2014	0.0717	(٪10.37) 0.0083	-
دبی اوج شماره ۵ (Peak discharge No. 5)	Feb-2017	0.103	Jan-2017	0.0991	(٪3.78) 0.0039	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۶ (Peak discharge No. 6)	Mar-2019	0.278	Mar-2019	0.162	(٪41.72) 0.166	-

با بررسی نتایج حاصل‌شده در این تحقیق با مطالعات پیشین می‌توان گفت، از نظر بررسی عملکرد مدل با روش خطی EXPUH نتایج به‌دست‌آمده با نتایج صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2015)، لطفی راد و همکاران (Lotfirad *et al.*, 2018)، صراف و قاسمی (Sarraf *et al.*, 2021) و حافظ پرست و مرابی (Hafezparast and Marabi, 2021) هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد مدل IHACRES، در شبیه‌سازی دبی خروجی حوضه رودخانه شور درقائن در مقیاس ماهانه با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد" و کد نویسی در محیط R، مورد ارزیابی قرارگرفت. در مقایسه با استفاده از نرم‌افزار IHACRES، در این پکیج امکان تغییر تابع هدف برای تعیین پارامترهای بهینه مدل و نیز تنظیماتی در بخش خطی مدل فراهم می باشدکه می‌تواند در عملکرد مدل در بازتولید دبی در خروجی حوضه موثر باشد. مدل IHACRES (بسته نرم افزاری هایدرومد) دارای دو ماژول غیرخطی و خطی است که بخش غیرخطی با هدف تبدیل بارش به بارش مؤثر در هر گام زمانی می‌باشد و بخش دیگر که بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده تبدیل می‌کند. در این مطالعه تأثیر انتخاب روش‌های "ARMAX" و "EXPUH" در بخش خطی و نیز تأثیر انتخاب تابع هدف KGE بر تعیین مقادیربهینه پارامترهای مدل، موردبررسی قرار گرفت. بمنظور بررسی عملکرد مدل در بازتولید مقادیر دبی ماهانه و نیز دبی حداکثر از سه شاخص ارزیابی NS، KGE و R^2 استفاده گردید. مقادیر این شاخص‌های ارزیابی درروش EXPUH به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و درروش ARMAX به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۵ برآورد شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل با روش ARMAX نسبت به روش EXPUH است. مقدار محاسبه معیارهای ارزیابی NS، KGE و R^2 در شبیه‌سازی دبی اوج و زمان رسیدن به اوج، درروش EXPUH به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و درروش ARMAX به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۵ برآورد شد. بنابراین مدل با روش ARMAX در شناسایی دبی‌های اوج از نظر مقدار و زمان وقوع، عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داد که این تاثیر انتخاب تابع انتقال مناسب در بخش خطی مدل را تایید می‌نماید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل IHACRES در مقیاس ماهانه عملکرد خوبی دارد که با نتایج تحقیقات دایلاری و همکاران (Dailari *et al*., 2021) و ابوشاندی و مرکل (Abushandi and Merkel, 2011) هم‌خوانی دارد. بنابراین درمجموع می‌توان گفت به علت اینکه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج از اهمیت بالایی برخوردار است، مدل IHACRES در منطقه موردمطالعه، با روش ARMAX در بخش خطی عملکرد دقیق‌تری نسبت به روش EXPUH داشته است.

منابع

1. Abushandi E., and Merkel B. 2013. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. Water Resources Management 27(7): 2391-2409. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0293-4.
2. Abushandi E.H., and Merkel B.J. 2011. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. Journal of Water and Climate Change 2(1): 56-71. https://doi.org/10.2166/wcc.2011.048.
3. AkbariMotlagh., Ahmad A., Rezaei M., Rezvani Mahmoui A., and Mousavi H. 2016. River Flow Prediction Using Artificial Neural Network System (Case Study of Shurqain River), International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning. (In Persian)
4. Ayele G.T., Teshale E.Z., Yu B., Rutherfurd I.D., and Jeong J. 2017. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Water. 9(10): 782. https://doi.org/10.3390/w9100782.
5. Ahmadi M., Moeini A., Ahmadi H., Motamedvaziri B., and Zehtabiyan G.R. 2019. Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 111: 65-77. https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002.
6. Baddoo T.D., Li Z., Guan Y., Boni K.R.C., and Nooni I.K. 2020. Data-Driven Modeling and the Influence of Objective Function Selection on Model Performance in Limited Data Regions. International Journal of Environmental Research and Public Health 17(11): 4132. https://doi.org/10.3390/ijerph17114132.
7. Box G.E. 1970. GM Jenkins Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco, Holdan-Day.
8. Chidaz A., Mohseni Sarvi M., Vafakhah M. 2009. Evaluation of HEC_HMS model for estimating flood hydrograph in Kasilian watershed, Watershed Management Research, No. 84. (In Persian with English abstract)
9. Dailari M., Darbandi S., Asadi E., and Samadian M. 2021. Simulation of effective parameters on river flow discharge trend using HACRES rainfall-runoff model in future periods (Case study: Zolachai River). Echo Hydrology 8(1): 177-193. (In Persian with English abstract)
10. Dooge J. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
11. Hafezparast M., and 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. https://doi.org/10.30501/jree.2021.257941.1162.
12. Jakeman A., Littlewood I., and Whitehead P. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and

identifiable component flows with application to two small upland catchments. Journal of Hydrology 117(1-4): 275-300. https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90097-H.

13. Jakeman A., and Hornberger G. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall- runoff model? Water Resources Research 29(8): 2637-2649. https://doi.org/10.1029/93WR00877.
14. Karimi M., Malekinejad H., Abqari H., and Azizian M. 2012. Evaluation of Different Flood Hydrograph Simulation Methods Using HEC_HMS Software Package (Case Study: Chehel Gezi Watershed), Iranian Journal of Water Research 5(9): 28-39. (In Persian with English abstract)
15. Karami F., and Bayati Khatibi M. 2019. Modeling soil erosion and sediment yield prioritization in Satar Khan Watershed using MUSLE and SWAT models: The Journal of Hydro Geomorphology 15(18): 115-137. (In Persian with English abstract)
16. Lotfirad M., Adib A., and 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 with English abstract). https://dx.doi.org/10.22059/ije.2017.234237.614.
17. 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. Transactions of the ASABE 50(3): 885-900. Doi: 10.13031/2013.23153.
18. Sadeghi S.H., Ghasemieh H., and Sadatinegad S.J. 2015. Performance Evaluation of the IHACRES Hydrological Model in Wet Areas (Case Study: Navrud Basin, Gillan) [Research]. Journal of Water and Soil Science 19(73): 73-83. https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.73. (In Persian with English abstract)
19. Sarraf A., and Ghasemi H. 2021. Calibration of the IHACRES hydrological model using multi-objective social spider optimization and search and rescue algorithms. Hydrogeomorphology. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22034/hyd.2021.45015.1581.
20. Yaghoubi M., and Massah Bavani A. 2014. Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. Journal of the Earth and Space Physics 40(2): 153-172. (In Persian with English abstract). https://dx.doi.org/10.22059/jesphys.2014.50640.
21. Zeid Ali Nejad N., Naseri Sh., and Alijani F. 2020. (Simulation of the effect of climate change on Taraz-Haraksh river runoff, Khuzestan province, using NEX-GDDP data set and IHACRES rainfall-runoff model. Meteorology and Atmospheric Sciences 2(2): 162-178. (In Persian with English abstract)