Watershed Engineering and Management
DOI: 10.22092/IJWMSE.2024.363746.2035
Volume 16, Issue 2, 2024, Pages 262-278

Evaluation of TOPKAPI-X distributed hydrological model in simulating daily discharge in Gamasiab Basin

Mohamad Mahdi Artimani[1], Hossein Zeinivand[2*] and Nasser Tahmasebipour[3]

[1] PhD Student, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran
[2] Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University. Khorramabad, Iran
[3] Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University. Khorramabad, Iran

Received: 08 January 2024 Accepted: 07 April 2024

Extended abstract

Introduction

Due to the heterogeneity in watersheds and the non-linearity of hydrological behaviors, it is very complicated and difficult to fully understand the relationships within watersheds. Therefore, in evaluating these systems, a modeling process is necessary. Over the last few decades, hydrological/hydraulic models have become essential in hydrology studies due to the development of programming languages and the provision of optimal and efficient algorithms for solving differential problems. The application of rainfall-runoff simulation models for flood events has been extensively studied by researchers in the field of water and soil protection, leading to the development of various models to simulate rainfall-runoff processes. One of the successful models in this field is the TOPKAPI-X model. This model was created in the 1990s at the University of Bologna by Professor Todini as a distributed rainfall-runoff model in watersheds. An important feature of distributed models is their ability to simulate components at any point of the watershed, allowing results to be extracted at any required point. Unlike lumped models that consider the entire watershed as a single unit, distributed models allow spatial distribution at any point in the watershed. Therefore, in this research, after calibrating and validating the TOPKAPI-X physical-distributed model in the studied basin, the model was optimized for flood estimation.

Materials and methods

The Gamasiab basin is located in the west of Iran, in the northern region of the Zagros mountain ranges, to the north of the Karkheh dam basin, and primarily within the territories of Hamadan and Kermanshah provinces. The mountainous regions of this basin are mainly concentrated in the northern and southern parts, while its lowlands and plains are mostly located in the middle and southeastern parts of the basin (Ministry of Energy, 2014). In this research, the TOPKAPI-X model was used to simulate floods in the Gamasiab watershed. First, the watershed boundary was delineated using a digital elevation model (DEM) with a resolution of 30 meters. Land use maps, soil texture, watershed network, and climatic components were entered into the TOPKAPI-X model. The outlet location of the basin (hydrometric station) was used to simulate the flow using the TOPKAPI-X distributed hydrological model. Continuous time series data on a daily time step were used in this rainfall-runoff model. Specifically, daily rainfall data from 13 rain gauge stations and temperature data from 4 synoptic stations during the statistical period (1999 to 2020) were used to simulate the flow. After running the model several times, the general parameters were manually adjusted each time until the optimal values of the general parameters were obtained by considering the appropriate values of the evaluation criteria (NS and Bias) for the basin.

Results and discussion

This research was conducted to analyze the flood discharge of one of the main sub-basins of the Karkheh dam basin using the TOPKAPI-X model on a daily time scale. In the TOPKAPI-X software environment, simulations were performed during the calibration period using input maps and observational rainfall, temperature, and discharge data. A visual comparison of the observed and simulated hydrographs allows

* Corresponding author: zeinivand.h@lu.ac.ir

DOI: 10.22092/IJWMSE.2024.363746.2035

for a general and quick evaluation of the model's accuracy. The graphical results of the comparison between the discharge generated by the TOPKAPI-X model with the calibrated parameters and the measured discharge in the Gamasiab basin were presented. The TOPKAPI-X model has the ability to estimate the maximum daily flow rates of the Gamasiab basin; however, some of the simulated flow rates are higher than the observed flow rates. Four criteria—NSE, R, BIAS, and RMSE—were used to evaluate the model. The evaluation results of the TOPKAPI-X model indicate the accuracy of flow simulation, with a Nash-Sutcliffe criterion of 0.697 during the calibration period (1999-2014) and 0.660 during the validation period (2015-2020) for the Gamasiab basin. Therefore, it can be concluded that this model has good performance for flow simulation.

Conclusions

The importance and usefulness of hydrological models for water resources management, understanding hydrological processes, and conducting impact assessment studies is clear. Hydrological models are crucial tools that enable scientists and policymakers to make informed decisions based on simulations of watershed behavior. Considering the increasing demand for water and the impact of climate change, hydrological simulation will be one of the essential methods for future water management. The results of this study showed that the TOPKAPI-X model has potential in simulating runoff in the selected basin. Due to the capabilities of the TOPKAPI-X distributed hydrological model, this software is recommended as a modeling tool for other basins.

Keywords: Hydrological simulation, Model calibration, Peak discharge, Rainfall-runoff, Spatially distributed model

Cite this article: Artimani, M.M., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., 2024. Evaluation of TOPKAPI-X distributed hydrological model in simulating daily discharge in Gamasiab Basin. Watershed Engineering and Management 16(2), 262-278.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۶، شماره ۲، ۱۴۰۳، صفحات ۲۶۲-۲۷۸

Watershed Engineering and Management
Volume 16, Issue 2, 2024, Pages 262-278
DOI:10.22092/IJWMSE.2024.363746.2035

ارزیابی کارآیی مدل هیدرولوژیکی توزیعی TOPKAPI-X در شبیه‌سازی دبی روزانه در حوزه آبخیز گاماسیاب

محمد مهدی آرتیمانی[۱]، حسین زینی وند[۲]* و ناصر طهماسبی پور[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری گرایش آب، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
[۲] دانشیار، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
[۳] دانشیار، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

چکیده مبسوط

مقدمه

ناهمگنی موجود در آبخیزها و غیرخطی بودن رفتارهای هیدرولوژیکی، شناخت کامل روابط موجود در آنها را بسیار پیچیده و مشکل ساخته است. از این رو، ارزیابی این سیستم‌ها، نیاز به فرایند مدل‌سازی دارد. با توجه به توسعه زبان‌های برنامه‌نویسی و ارائه الگوریتم‌های بهینه و کارا جهت حل مسائل دیفرانسیلی در چند دهه اخیر، مدل‌های هیدرولوژیکی/هیدرولیکی جایگاه خاصی در مطالعات هیدرولوژی پیدا کرده و بر این اساس، به‌کارگیری مدل‌های شبیه سازی بارش-رواناب، برای پیش‌بینی سیل مورد توجه محققین قرار گرفته است. این امر سبب شده تا مدل‌های متنوعی جهت شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب توسعه یابند. یکی از مدل‌های موفق در این زمینه، مدل TOPKAPI-X است. این مدل در دهه ۹۰ میلادی در دانشگاه بولونیا توسط پروفسور Todini به‌صورت یک مدل بارش-رواناب توزیعی مکانی قابل کاربرد در سطح حوزه آبخیز توسعه داده شد. از ویژگی‌های مهم مدل‌های توزیعی مکانی این است که می‌توان نتایج شبیه سازی مدل را در هر نقطه از حوزه آبخیز استخراج نموده و بر خلاف مدل‌های یکپارچه که کل حوزه آبخیز را یک واحد در نظر می‌گیرند، اجازه تفکیک‌بندی در هر نقطه از حوضه را می‌دهد. بنابراین، در این پژوهش بعد از واسنجی و اعتبارسنجی مدل فیزیکی-توزیعی TOPKAPI-X در حوزه آبخیز گاماسیاب، نسبت به بهینه‌سازی مدل در منطقه پژوهش جهت برآورد دبی روزانه اقدام می‌شود.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز گاماسیاب در غرب کشور و در نواحی شمالی رشته کوه زاگرس، در شمال حوضه سد کرخه و عمدتاً در محدوده استان‌های همدان و کرمانشاه قرار دارد. مناطق کوهستانی این حوضه بیشتر در قسمت‌های شمالی و جنوبی متمرکز شده‌اند و مناطق پست و جلگه‌ای آن بیشتر در بخش‌های میانی و جنوب غربی حوضه قرار دارند. در این پژوهش از مدل TOPKAPI-X برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌آبخیز گاماسیاب استفاده شد. برای این منظور، ابتدا مرز حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با وضوح ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی، بافت خاک، شبکه آبراهه حوزه آبخیز و مولفه‌های اقلیمی در مدل TOPKAPI-X وارد شد. پس از معرفی مکان حوضه، از محل خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری) برای شبیه‌سازی جریان استفاده شد. در این مدل بارش-رواناب، داده‌های سری زمانی پیوسته در گام زمانی روزانه در نظر گرفته شد. برای اجرای مدل در حوضه، سری زمانی دبی، بارش و دمای روزانه در دوره آماری ۲۱ ساله در ۱۳ ایستگاه هواشناسی و یک ایستگاه هیدرومتری داخل و خارج حوضه طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۰ بهره برده شد.

* مسئول مکاتبات: zeinivand.h@lu.ac.ir

پس از چندین بار اجرای مدل، هر بار پارامترهای کلی مدل به‌صورت دستی و سعی و خطا تغییر می‌کرد تا در نهایت، با در نظر گرفتن مقادیر مناسب معیارهای ارزیابی ناش-ساتکلیف و اریب مدل برای حوضه، مقادیر بهینه پارامترهای مدل به‌دست آمد.

نتایج و بحث

این پژوهش، به‌منظور تحلیل بارش-رواناب یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه آبخیز سد کرخه با استفاده از مدل TOPKAPI-X در مقیاس زمانی روزانه انجام شده است. در محیط نرم‌افزار TOPKAPI-X با استفاده از نقشه‌های ورودی و داده‌های مشاهداتی بارش، دما و دبی، واسنجی مدل انجام شد. مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه سازی شده، امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل‌ها را فراهم می‌کند. نتایج گرافیکی مقایسه دبی حاصل از اجرای مدل TOPKAPI-X با پارامترهای واسنجی شده و دبی اندازه‌گیری شده در حوضه گاماسیاب نشان داد که این مدل، توانایی خوبی در برآورد دبی روزانه این حوضه را دارد. اما در برخی موارد دبی‌های شبیه‌سازی شده بیشتر از دبی مشاهده شده است. چهار معیار NSE، R، BIAS و RMSE برای ارزیابی مدل استفاده شده است. برای حوزه آبخیز گاماسیاب مقدار معیار ناش-ساتکلیف در دوره واسنجی (۲۰۱۴-۱۹۹۹) برابر ۰/۶۹۷ و در دوره اعتبارسنجی (۲۰۲۰-۲۰۱۴) برابر ۰/۶۶۰ محاسبه شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل در حوضه مورد مطالعه، در شبیه‌سازی جریان عملکرد خوبی دارد.

نتیجه‌گیری

اهمیت مدل‌های هیدرولوژیکی برای مدیریت منابع آب، ارزیابی کیفیت مطالعات اجرایی و درک فرایندهای هیدرولوژیکی کاملاً مشخص است. مدل‌های هیدرولوژیکی ابزارهای مهمی هستند که به دانشمندان و همچنین سیاستگذاران اجازه می دهد تا بر اساس شبیه‌سازی رفتار حوضه، تصمیم‌گیری کنند. بنابراین، با توجه به افزایش تقاضا برای آب و تأثیر تغییرات آب و هوایی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی توسط مدل‌ها از ابزارهای مدیریت آب در آینده خواهند بود. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدل TOPKAPI-X پتانسیل بالایی در شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌آبخیز انتخابی دارد. بنابراین، با توجه به قابلیت‌های آن، استفاده از این محیط به عنوان یک ابزار مدل‌سازی برای حوزه‌های آبخیز پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بارش-رواناب، دبی اوج، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل توزیعی مکانی، واسنجی مدل

مقدمه

آبخیز، به‌عنوان واحد هیدرولوژیکی تنظیم‌کننده کمیت و کیفیت چرخه آب عمل می‌کند و انسان به‌دلیل عدم آگاهی کافی از این چرخه پیچیده و نیز عدم برنامه ریزی در طرح‌ها به لحاظ ارتباط بین مدیریت آب و تحولات جوامع، متحمل هزینه‌های فراوانی شده است (Nohegar et al., 2016). مدل‌سازی سیستم رودخانه، یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب است. این موضوع از نظر برنامه‌ریزی، مدیریت و سیاست‌گذاری منابع آب اهمیت بسیاری دارد (Huo et al., 2012). برخلاف سابقه طولانی مدل‌های آماری، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، تجارب حاکی از آن است که این مدل‌ها، با وجود نقاط قوت، ضعف‌های بسیار زیادی از قبیل داده های زیاد، یکپارچه نبودن، پارامترهای گوناگون و واسنجی وقت‌گیر دارند، به همین علت، به این مدل‌ها کمتر توجه شده است (Harun et al., 2002).

جهت کاهش این مشکلات استفاده از مدل‌های بارش-رواناب جهت تخمین دبی سیلاب، می‌تواند در علوم هیدرولوژیکی و مهندسی بیشترین نقش را ایفا نماید (Hali-Saz et al., 2016). Zarezadeh Mehrizi et al., (2018)، طی پژوهشی به ارزیابی کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز گاماسیاب

پرداختند. نتایج پژوهش حاکی از توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه گاماسیاب دارد. Zainali et al., (2019)، نیز در پژوهشی به ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی جریان رودخانه گاماسیاب پرداختند. نتایج نشانگر برتری نسبی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی بود و مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) تقریبا عملکرد بهتری نسبت به شبکه بیزین در مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه داشت.

Momeneh (2022)، طی پژوهشی به مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوزه آبخیز رودخانه گاماسیاب پرداخت. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل‌های RBF،ANN و LSTM به‌ویژه در نقاط اوج جریان نسبت به IHACRES در منطقه مورد مطالعه است. شبیه سازی فرایند بارش-رواناب در حوزه آبخیز ازنظر درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سیلاب اهمیت ویژه‌ای دارد (Najafinejad et al., 2020). Vakili and Moghadamnia (2022)، با مدل‌سازی سیلاب رودخانه شاه بهرام در استان کهکیلویه و بویراحمد به کمک مدل HEC-HMS و مقایسه آن با روش‌های مختلف برآورد سیلاب (روش تحلیل منطقه ای سیلاب و روش‌های تجربی دیکن، فولر، کریگر و فرانکو-رودیر) مشخص کردند مدل هیدرولوژیک HMS-HEC، دارای نتایج بهتری و با درصد خطای کمتری نسبت به روش‌های تجربی و تحلیلی است.

در دهه اخیر، مدل‌های هیدرولوژیکی/هیدرولیکی با توجه به توسعه زبان‌های برنامه نویسی و ارائه الگوریتم‌های بهینه و کارا جهت حل مسائل دیفرانسیلی جایگاه خاصی در مطالعات هیدرولوژی پیدا کرده و استفاده از مدل‌های بارش-رواناب، برای پیش‌بینی سیل در حوزه حفاظت آب و خاک توسط محققین، مد نظر قرار گرفته است و این امر سبب شده تا مدل‌های متنوعی جهت شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب توسعه داده شود. یکی از مدل‌های موفق در این زمینه، مدل*TOPKAPI-X است.

این مدل در دهه ۹۰ میلادی در دانشگاه بولونیا توسط پروفسور Todini به‌صورت یک مدل بارش-رواناب توزیعی در حوزه‌های آبخیز ایجاد شده است. یکی از ویژگی‌های مهم مدل‌های توزیعی مکانی این است که می‌توان اجزای مدل را در هر نقطه از حوزه آبخیز شبیه سازی نموده و نتایج را در آن نقطه مشاهده نمود و بر خلاف مدل‌های یکپارچه که کل حوزه آبخیز را یک واحد در نظر می‌گیرد اجازه تفکیک‌بندی در هر نقطه از حوضه را می‌دهد.

استفاده از مدل TOPKAPI-X در حوزه‌های‌آبخیز در زمینه‌های مختلف مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. Liu et al. (2005)، Sinclair et al. (2010) و Janabi et al., (2021)، از ابزار مدل‌سازی TOPKAPI-X برای شبیه‌سازی رخدادهای سیل تاریخی در آبخیزهای مقیاس کوچک استفاده کرده‌اند.

مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های آبی در آبخیزها و مدیریت خشکسالی است (Baghel et al., 2019). Kneb et al., (2005)، مدل منطقه‌ای برای شبیه‌سازی سیلاب در حوضه رودخانه سن آنتونیو واقع در ایالت تگزاس در کشور آمریکا را ارائه دادند. در این مدل منطقه‌ای از ابزار HEC-HMS برای تبدیل بارش مازاد به رواناب و از نرم‌افزار HEC-RAS برای مدل‌سازی جریان متغیر در مسیر رودخانه استفاده‌شده است. نتایج نشان داد که این مدل‌سازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی هیدرولوژیکی سیل در مقیاس منطقه‌ای مناسب باشد. Barthholmes and Todini (2005)، طی مطالعه‌ای به بررسی نتایج تلفیق مدل‌های هواشناسی و مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی بر روی رودخانه پو واقع در شمال ایتالیا با مساحت ۳۷۰۰۰ کیلومترمربع پرداختند. آن‌ها در این پژوهش، از مدل هیدرولوژیکی توزیعی TOPKAPI و مدل‌های هواشناسی اروپایی ECMWF استفاده کرده‌اند. در این مطالعه با ارتباط دادن مدل هواشناسی ECMWF و مدل فیزیکی TOPKAPI به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این روش می‌توان زمان هشدار سیل در حوزه‌های آبخیز را افزایش داد.

* TOPographic and Kinematic APproximation and Integration Extended

البته قابل‌ذکر است که نتایج مدل‌های مختلف هواشناسی به‌کار رفته در این مطالعه تفاوت‌های زیادی داشته است، اما به‌طورکلی، نتایج این تحقیق دلگرم‌کننده بوده است ولی ازنظر پیش‌بینی کمی سیل هنوز این روش به نتیجه مطلوب دست نیافته است. Zhang et al., (2013)، از سه مدل Simhyd، Sacramento و GR4J برای برآورد دبی روزانه حوزه آبخیز ریف استفاده کردند که نتایج نشان داد با توجه به ضریب تعیین و معیار ناش-ساتکلیف عملکرد سه مدل مناسب بوده است، اما با توجه به معیار ناش-ساتکلیف، بیشترین کارایی را مدل GR4J از خود نشان داد. Khosravi et al., (2019)، طی پژوهشی، برای برآورد رواناب روزانه در حوضه‌های فاقد آمار، پارامترهای مدل HBV در آبخیز البرز مرکزی و در سطح منطقه را تعیین کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل HBV قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان روزانه همه زیرحوضه‌ها داشته و با تطبیق مناسب مرحله واسنجی با داده مشاهداتی، استفاده از این مدل را برای منطقه مورد مطالعه تایید می‌نماید.

Mojerlo et al., (2018)، کاربرد مدل IHACRES برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوزه آبخیز تجن را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج این پژوهش، پیش‌بینی شد که میزان دبی تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۱۹/۸ و ۲۱/۷ درصد کاهش می‌یابد. Li et al., (2020)، طی پژوهشی به ارائه چارچوبی برای پیش‌بینی سیلاب در مناطق کم داده پرداختند. در این پژوهش به بررسی رابطه بین ویژگی‌های بارندگی و مقادیر CN با میزان سیل‌خیزی منطقه اقدام شد و به این نتیجه رسیدند که توزیع بارندگی تأثیر قابل‌توجهی بر روی برآورد رواناب (مقیاس‌بندی سیلاب) دارد.

Shahedi et al., (2022)، بیان کردند مدل بارش-رواناب WetSpa قابلیت شبیه‌سازی رواناب در تمام شبکه سلولی حوضه را دارد، این قابلیت مدل برای مدیران و کارشناسان این امکان را فراهم می‌نماید که قبل اجرای هرگونه عملیات، مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی نماید. Cantoni et al. (2022)، به‌منظور بررسی عملکرد هیدرولوژیکی تحلیل مجدد ERA5 برای مدل‌سازی سیل در تونس از مدل LISFLOOD استفاده کردند. نتایج حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی دبی روزانه است. Ding et al., (2022)، به‌منظور بررسی جریان رودخانه Huai چین از مدل MISDC استفاده کردند.

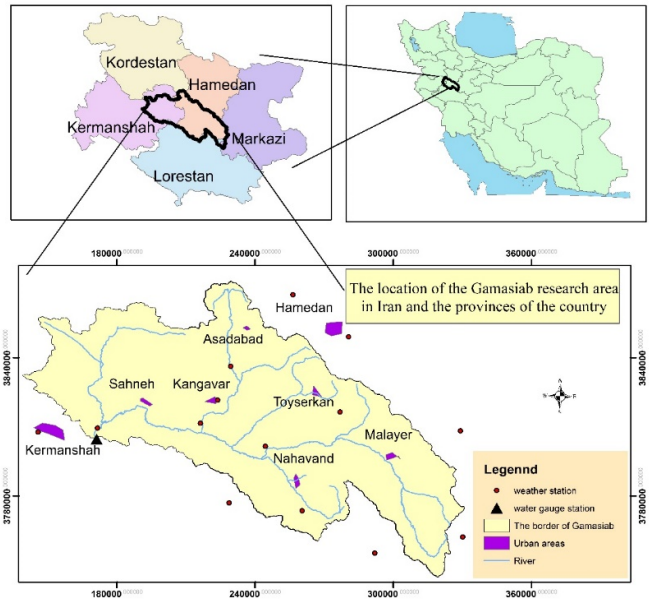
در این پژوهش، به‌منظور بررسی عملکرد مدل از داده‌های رطوبت خاک برای مدل استفاده شد که نتایج تحقیقات بیانگر بهبود عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه است. Lupakov et al., (2023)، به منظور شبیه‌سازی رواناب در حوضه رودخانه Ussuri از مدل GR4J استفاده کردند. در این پژوهش رواناب ۱۷ حوزه آبخیز تو در تو مورد بررسی قرار گرفت که نتایج تمامی شبیه‌سازی‌ها با توجه به معیارهای ارزیابی معمول در هیدرولوژی در بازه رضایت بخش تا خوب قرار گرفت.

حوزه آبخیز گاماسیاب، از حوضه‌های مهم و در عین حال بحرانی از نظر تغییر کاربری، فرسایش و سیل خیزی در حوضه رودخانه کرخه و غرب کشور ایران به شمار می‌روند. عواملی طبیعی (مانند شیب زیاد و سیل خیزی) و فعالیت انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی، استفاده نادرست از زمین و کشاورزی بر روی اراضی با شیب زیاد، چرای بی‌رویه دام و جاده‌سازی نادرست) موجب بروز انواع فرسایش، سیل و حرکات توده‌ایی در سطح این حوزه آبخیز شده است. این حوضه در سال های اخیر، دستخوش تغییرات شدید شده است که این استفاده نادرست از آبخیز باعث تغییراتی در پوشش گیاهی و سرعت جریان و ضریب رواناب شده است. بدین منظور، در این پژوهش پس از معرفی قابلیت‌های نرم افزار TOPKAPI-X به عنوان یک مدل فیزیکی-توزیعی فرایند بارش-رواناب در حوزه آبخیز گاماسیاب در محیط این نرم‌افزار، شبیه‌سازی می‌شود.

بنابراین، در این پژوهش، بعد از واسنجی و اعتبارسنجی این مدل فیزیکی-توزیعی در حوزه آبخیز گاماسیاب، نسبت به بهینه‌سازی مدل و برآورد رواناب روزانه اقدام می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز گاماسیاب در محـدوده '۴۹ °۳۳ تا '۵۷ °۳۴ عرض شمالی و '۰۴ °۴۷ تا '۰۹ °۴۹ طول شرقی با مساحت یک میلیون و هفتاد و پنج هزار هکتار، عمدتاً در مرز سیاسی استان‌های همدان و کرمانشاه قرارگرفته است. این زیرحوزه آبخیز از لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژیکی ایران، جزئی از حوزه آبخیز کرخه به شمار می‌رود. حداقل ارتفاع آن ۱۲۸۰ متر از سطح دریا و حداکثر ۳۶۰۰ متر است. رودخانه‌های حوزه آبخیز از بخش شمالی و جنوبی حوضه از سرشاخه‌های فرعی زیادی سرچشمه گرفته و در انتهای دشت کنگاور به دیگر سرشاخه‌های حوضه سد کرخه می‌پیوندند (Ministry of Energy, 2013).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز گاماسیاب در ایران

Fig. 1. Location of Gamasiab basin in Iran

معرفی نرم افزار TOPKAPI-X: مدل TOPKAPI-X که می‌توان آن را تقریب و ترکیب جنبشی و توپوگرافیکی توسعه یافته نامید، از انواع مدل‌های بارش رواناب توزیعی و پیوسته است که به‌عنوان یک مدل تحقیقاتی و هیدرولوژیکی عملیاتی در چندین حوزه آبخیز در جهان (ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، اوکراین، چین) با موفقیت اجراشده است (Liu and Todini, 2005). دراین مدل، می‌توان شبیه‌سازی هیدرولوژیکی را با گام زمانی دقیقه‌ای تا روزانه و تفکیک مکانی مختلف انجام داد. در واقع هسته اصلی این مدل مبتنی بر ترکیب روش موج جنبشی و خصوصیات توپوگرافی حوضه است. با توجه به توزیعی مکانی بودن پارامترهای سطح حوضه و ورودی‌های بارش، پاسخ هیدرولوژیکی به‌صورت سطحی و از طریق شبکه‌بندی مثلثی برآورد می‌شود و محاسبات عمقی این مدل مربوط به لایه‌های خاک در هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه انجام می شود. در شبیه‌سازی مدل، برحسب خصوصیات فیزیکی به هر پیکسل DEM یک مقدار معین اختصاص می‌یابد. در این پیکسل‌ها مقدار شیب و مسیر جریان برحسب پیکسل‌های مجاور یا همان الگوریتم D8 برآورد می‌شود. در لایه فوقانی خاک غیراشباع، حجم آب ذخیره شده در خاک سطحی از رابطه (۱)، محاسبه می‌شود.

$$\frac{dv_1}{dt}=\left[\left(f_a X-q_{uo}+q_{us}\right)-f_b X\right]-\frac{C_1}{X^{a_s}}v_1^{a_s} \qquad (1)$$

که در آن، v_1 حجم آب ذخیره‌شده خاک سطحی، t زمان، f_a مقدار نفوذ به داخل پیکسل موردنظر، X اندازه پیکسل موردنظر، q_{uo} مقدار جریان سطحی ورودی از بالادست پیکسل موردنظر، q_{us} مقدار جریان زیر قشری ورودی به پیکسل مور نظر از سمت بالادست، f_b مقدار

نشت از خاک سطحی، C_1 بیانگر هدایت هیدرولیکی سلول موردنظر و پارامتر a_s یک ضریب توانی است که به ویژگی‌های خاک بستگی دارد.

روندیابی جریان داخل کانال‌ها همانند اجزای خاک بر اساس روش موج جنبشی است که در آن رابطه مومنتوم با استفاده از فرمول مانینگ برآورد می‌شود. با انتگرال‌گیری رابطه موج جنبشی در بعد طولی به مدل مخزن غیرخطی برای جریان کانال و جریان روی زمینی رابطه‌های (۲) و (۳) شکل می‌گیرند.

$$\frac{dv_0}{dt}=r_0X^2-\frac{C_0X}{X^{10/3}}v_0^{5/3} \quad (۲)$$

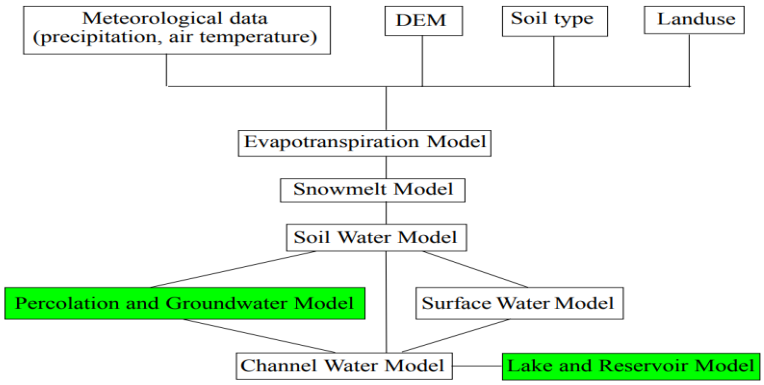
$$\frac{dv_c}{dt}=\left(r_c-XW+Q_{uc}\right)-\frac{C_cW}{(XW)^{5/3}}v_c^{5/3} \quad (۳)$$

که در آنها، v_0 و v_c به‌ترتیب بیانگر حجم آب ذخیره‌شده در جریان روی زمینی و کانال است. r_0 بیانگر اشباع مازاد که ممکن است نتیجه بارش مازاد باشد، r_c بیانگر جریان جانبی ورودی است که شامل رواناب سطحی که به کانال می‌رسد و یا نتیجه زهکش خاک به کانال باشد، W معادل عرض کانال مستطیلی شکل، Q_{uc} مقدار جریان ورودی از سمت بالادست، C_0 و C_c به‌ترتیب بیانگر ضرایب مربوط به رابطه مانینگ برای جریان سطحی و کانال است. همچنین فرم کلی رابطه مخزن غیرخطی در مدل مذکور به‌صورت رابطه (۴) است.

$$\frac{dv}{dt}=a-bv^c \quad (۴)$$

که در آن، v بیانگر متوسط محتوای رطوبتی خاک، حجم آب خاک در مخزن و عمق آب در طول شیب یا کانال و a و b و c ضرایب ثابت هستند. می‌توان دریافت که معادلات مربوط به مخزن غیرخطی می‌تواند به‌صورت عددی و با تخمین‌هایی حل شود. در این مدل، تقریب به‌صورت $v^c=v(\alpha+\beta v)$ است که در این رابطه α و β را می‌توان با استفاده از روش‌های حداقل مربعات برآورد نمود.

مدل TOPKAPI-X، از پنج ماژول اصلی تشکیل‌شده است که فرایندهای هیدرولوژیکی شامل جریان زیرسطحی، جریان زیرزمینی، جریان کانال، تبخیر و تعرق و برف را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل در گام‌های زمانی دقیقه، ساعتی یا روزانه توانایی شبیه سازی را دارد. در شکل ۲، نمودار جریانی مراحل اجرایی مدل TOPKAPI-X نمایش داده شده است.



شکل ۲- فلوچارت مراحل اجرایی مدل TOPKAPI-X (Andres, et al., 2013)

Fig. 2. Flowchart of TOPKAPI-X model execution steps (Andres et al., 2013)

قابل ذکر است، برای اجرای مدل TOPKAPI-X ابتدا اطلاعات فیزیکی حوزه آبخیز از قبیل نقشه DEM، نقشه مرز حوضه، موقعیت نقطه خروجی، نقشه تیپ خاک و نقشه کاربری اراضی وارد نرم‌افزار مدل به نام VISUAL TOPKAPI-X 2.0 می‌شود و مراحل تکمیل ورود اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی در مدل TOPKAPI-X به‌صورت زیر انجام می‌شود:

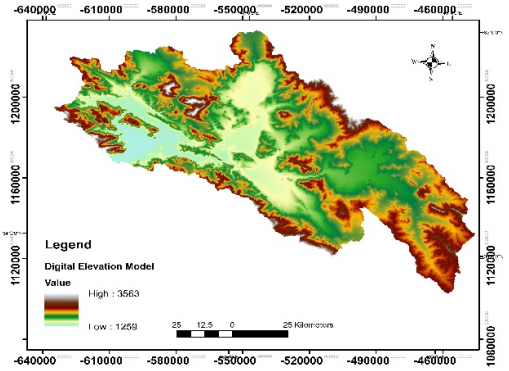
- واردکردن اطلاعات مربوط به دما (میانگین دمای ماهانه)

- واردکردن اطلاعات مربوط به خاک و تیپ خاک منطقه
- واردکردن اطلاعات مربوط به کاربری اراضی و طبقات مختلف کاربری اراضی
- وارد کردن اطلاعات مربوط به مخزن یا دریاچه در سطح زیرحوضه
- واردکردن اطلاعات مربوط به شبکه زهکشی حوضه (کانال‌ها)
- واردکردن اطلاعات مربوط به جریان‌های ورودی به زیرحوضه
- واردکردن پارامترها و اطلاعات مربوط به آب زیرزمینی
- واردکردن پارامترهای مربوط به تبخیر و تعرق و ماژول‌های ذوب برف در صورت انتخاب
- واردکردن اطلاعات مربوط به نقاط کنترلی در زیر حوضه (ایستگاه اندازه‌گیری انتخابی)
- واردکردن داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی مدل (بارندگی، دما و رواناب مشاهداتی یا نقشه‌های مرتبط)

پس از تکمیل اطلاعات پایه، نسبت به شبیه‌سازی جریان در حوضه و نقطه کنترلی مورد نظر در گام‌های زمانی روزانه اقدام می‌شود و با واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ضرایب مربوط به پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل بهینه می‌شود.

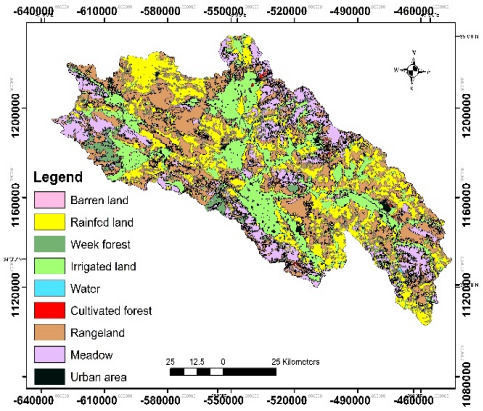
روش تحقیق: در این تحقیق برای شبیه‌سازی دبی روزانه در حوزه آبخیز گاماسیاب از مدل TOPKAPI-X استفاده شد. برای این منظور، پس از ورود اطلاعات مورد نیاز در مدل TOPKAPI-X نسبت به شبیه‌سازی بارش-رواناب در دوره آماری اقدام شد. لازم به ذکر است نقشه مدل رقومی ارتفاعی از نقشه ۱/۲۵۰۰۰ توپوگرافی سازمان نقشه برداری کشور در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شده است. همچنین، نقشه کاربری اراضی حوضه از نقشه‌های با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ پوشش گیاهی که توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در سال ۱۳۹۹ تهیه شده است، مورد استفاده قرار گرفت (Natural Resources and Watershed Management Organization, 2021). شایان ذکر است که سازمان مذکور برای تهیه لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ و با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI نقشه مقدماتی کاربری تهیه کرده است. سپس، با استفاده از امکانات نرم‌افزار ILWIS نقشه کاربری اراضی نهایی را ارائه داده است. همچنین، در این پژوهش با استفاده از تصاویر گوگل ارث و به‌وسیله بازدید میدانی، نقشه کاربری اراضی مورد نظر در منطقه مطالعاتی صحت‌سنجی شد. نقشه بافت خاک و مولفه های پارامتر خاک مورد نیاز مدل بر اساس اطلاعات گزارشات خاک‌شناسی زیرحوضه‌های مطالعه شده آبخیزداری در منطقه تحقیق و نتایج آزمایشات خاک طرح‌های آبیاری تحت فشار و سایر گزارشات دستگاه های اجرایی استان‌ها تهیه شده است Hamedan Agricultural and Natural Resources Research Center, 2009).

مدل‌سازی بارش-رواناب حوزه آبخیز گاماسیاب با استفاده از TOPKAPI-X: در این مدل، داده‌های سری زمانی پیوسته در گام زمانی روزانه در نظر گرفته شد. بدین منظور، برای اجرای مدل در حوزه آبخیز گاماسیاب از سری زمانی بارش روزانه سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴، ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی در سطح حوضه و متوسط دمای روزانه سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴، چهار ایستگاه سینوپتیک، فرودگاه همدان، کرمانشاه، بروجرد و کنگاور استفاده شد. بعد از اجرای مدل، در دفعات مختلف به‌صورت دستی و با سعی و خطا، هر بار پارامترهای عمومی مدل (جدول ۱) تغییر داده شد، تا نهایتاً مقادیر بهینه پارامترهای عمومی مدل با در نظر گرفتن مقادیر مناسب معیارهای ارزیابی ناش-ساتکلیف و اریب (NS و Bias) برای حوضه به‌دست آمد.



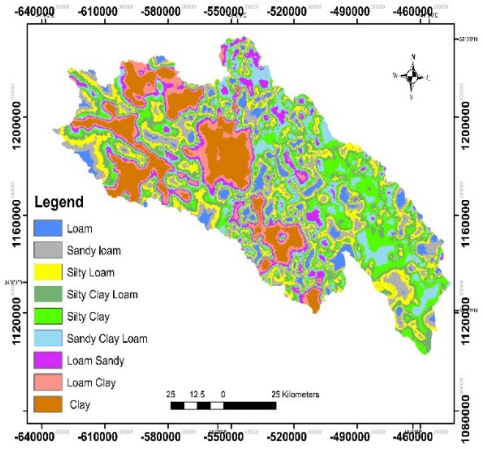
شکل ۳- مدل رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز گاماسیاب

Fig. 3. Digital elevation model of Gamasiab Basin



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز گاماسیاب

Fig. 4. Land use map of Gamasiab basin



شکل ۵- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز گاماسیاب

Fig. 5. Soil texture map of Gamasiab basin

واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی TOPKAPI-X: پس از شبیه‌سازی جریان در مدل TOPKAPI-X نسبت به واسنجی مدل اقدام شد. واسنجی در این مدل طی چند مرحله انجام شد. ابتدا مکان واسنجی در حوضه (ایستگاه/ بازه) انتخاب شد. برای این منظور، ایستگاه هیدرومتری پل‌چهر در خروجی حوضه واقع در استان کرمانشاه انتخاب شد. سپس، تابع هدف برای ارزیابی نتایج در مدل TOPKAPI-X شامل چهار تابع هدف ناش-ساتکلیف، اریب مدل، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی توسط مدل تعیین شد که در این پژوهش، معیار ناش-ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف اصلی جهت ارزیابی و تعیین کارایی مدل در نظر گرفته شد. در ادامه، بارگذاری داده‌های مشاهداتی ۱۵ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴) به‌عنوان دوره واسنجی انجام شد و یک دوره Warm-up (یک دوره دو ماهه قبل از سال ۱۹۹۹) به مدل معرفی شد.

پس از واسنجی مدل، دوره آماری شش ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰) برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد تا با توجه به پارامترهای بهینه به‌دست آمده در مرحله واسنجی، مدل در دوره اعتبارسنجی نیز ارزیابی شود.

نتایج و بحث

مقایسه گرافیکی دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی: این پژوهش، به‌منظور تجزیه‌وتحلیل دبی یکی از زیر حوضه‌های اصلی آبخیز سد کرخه به کمک مدل TOPKAPI-X در مقیاس زمانی روزانه صورت گرفته است. در این مدل، با استفاده از نقشه‌های ورودی حوضه گاماسیاب و داده‌های بارندگی، درجه حرارت داخل و خارج حوضه و دبی مشاهداتی ایستگاه خروجی، شبیه‌سازی در دوره واسنجی انجام شد.

در جدول ۱، مقادیر پارامترهای عمومی مدل بعد از واسنجی در حوزه آبخیز گاماسیاب آورده شده است. قابل ذکر است که به‌علت توزیعی-مکانی بودن مدل مورد استفاده و با توجه به شرایط مختلف و ناهمگنی موجود در حوزه آبخیز، برخی پارامترها، مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهند،

به همین علت، در این جدول مقادیر پارامترها گاهی به‌صورت دامنه آورده شده‌اند. همچنین، در جدول ۲، مقادیر پارامترهای ورودی به مدل مربوط به کاربری اراضی حوزه آبخیز گاماسیاب آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل TOPKAPI-X

Table 1. Parameters of TOPKAPI-X model

Symbol	Parameter	Values in Gamasiab basin
L(m)	Thickness of the upper soil layer	0.4-0.9
Ksh(m/s)	Horizontal hydraulic conductivity of soil	9.71E-03-1.8E-06
Ksv(m/s)	Vertical hydraulic conductivity of soil	2.4E-04-1.01E-09
Theta S	Saturated soil moisture content	0.3832-0.5051
Theta R	Residual soil moisture conten	0.0413-0.1024
Exp H	The power of the horizontal flow equation	2.5
Exp V	Power law of vertical penetration	13-25
Psi (m)	Soil suction height	0.062-0.32
n(s/m^1/3)	The Manning coefficient of landuse	0.01-0.35
Beta	Threshold coefficients for calculating potential evaporation and transpiration	0.3-0.8
Kc	Plant coefficient of landuse	0.183-1.05
Channel Level(m)	Channel depth	0.0128-1.48
Moisture.	Initial soil moisture	0.05-08
T(°c)	Average monthly temperature of the stations	0.14-28.8
-	Channel section	Triangular-rectangular
Q(m^3/s)	Maximum channel capacity	20000
-	Channel connection angle	1-7
n(s/m^1/3)	Channel coverage Manning factor	0.035-0.06
T(oc)	Threshold temperature of snow formation or melting	1_3
W(m)	Minimum and maximum channel width	5-50
H(m)	The height of the meteorological station	1318-1750
X-Y	Weather station coordinates	-- 484000 – 1114500

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ورودی کاربری اراضی حوزه آبخیز گاماسیاب

Table 2. Values of land use input parameters of Gamasiyab basin

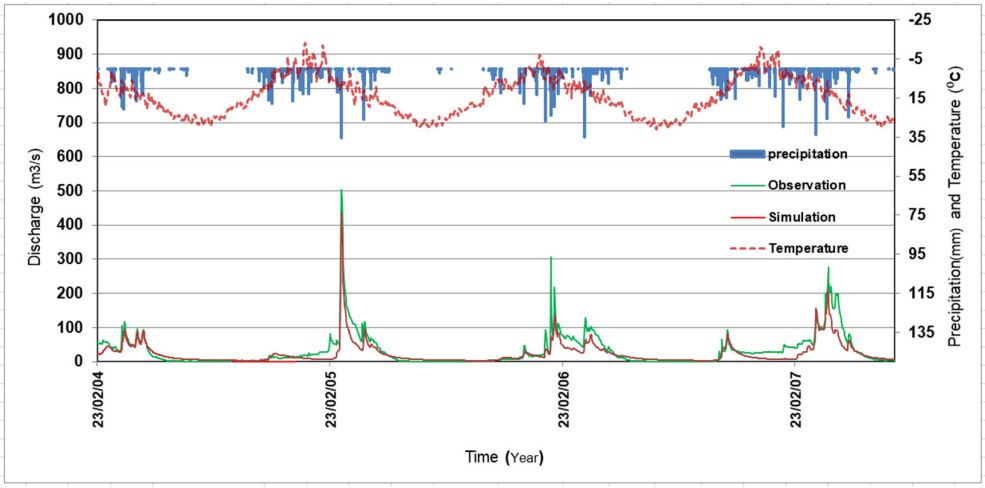
Average plant coefficient	Roughness coefficient	Area percentage	Types of land use
0.183	0.01	0.25%	Barren land
0.6167	0.07	29.16%	Rainfed land
1.0333	0.127	2.12%	Week forest
0.7125	0.35	21.06%	Irrigated land
1.05	0.04	0.09%	Water
0.8958	0.1	0.17%	Cultivated forest
0.45	0.12	30.25%	Rangeland
0.6166	0.15	15.42%	Meadow
0.2	0.02	1.48%	Urban area

مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه سازی شده، امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل‌ها را فراهم می‌نماید. نتایج گرافیکی مقایسه دبی حاصل از اجرای مدل TOPKAPI-X با پارامترهای واسنجی شده و دبی اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه آبخیز گاماسیاب در شکل ۶، نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶، مدل TOPKAPI-X هرچند توانایی بالایی در برآورد مقادیر دبی‌های حداکثر جریان روزانه حوزه آبخیز گاماسیاب داشته است اما گاها مقادیر دبی‌های اوج شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر دبی‌های مشاهداتی است. جدول ۴، مقادیر شاخص ارزیابی مدل مورد مطالعه را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده مدل TOPKAPI-X با ضریب ناش-ساتکلیف ۰/۶۹۷ در دوره واسنجی و ۰/۶۶ در دوره اعتبارسنجی، دارای توانایی لازم برای شبیه‌سازی مقادیر روزانه دبی حوزه آبخیز گاماسیاب است. در راستای کمک به تحلیل عملکرد مدل در حوضه مورد مطالعه، مطابق هیدروگراف شبیه‌سازی شده در سه سال نمونه (۲۰۰۴-۲۰۰۷) در شکل ۶، مشهود است که از اواسط آبان‌ماه تا اواخر اسفند ماه با وجود بارش‌های ممتد، شکل هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. دمای پایین منطقه دلالت بر وجود ریزش‌های جوی به‌صورت برف در این مدت بوده و مدل نیز به‌خوبی این وضعیت را شبیه‌سازی نموده است. اما از اوایل فروردین ماه به بعد، افزایش دما، بارش باران و ذوب شدن برف

در منطقه رخداده و باعث تولید رواناب بالا (سیلاب) در خروجی حوضه شده است. این نتایج با مشاهدات Artimani et al., (2014) در حوضه گاماسیاب و Zeinivand, (2014) در حوضه قره‌سو همخوانی دارد.

مقادیر مولفه‌های بیلان آبی حوضه در دوره شبیه‌سازی در جدول ۳، آورده شده است که بیانگر ضریب رواناب ۱۵/۱۸ درصد است.

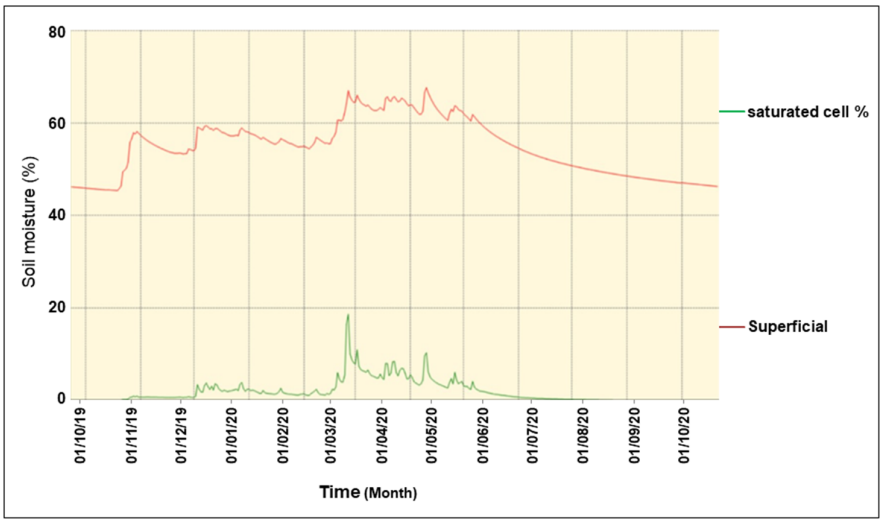


شکل ۶– هیدرو گراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۴ از دوره واسنجی مدل TOPKAPI-X (گاماسیاب)

Fig.6. Observed and simulated hydrograph of 2004-2007 from the calibration period of TOPKAPI-X model (Gamasiab basin)

در شکل ۷، مقادیر رطوبت خاک برای سال ۲۰۲۰ (به عنوان نمونه) در حوزه آبخیز گاماسیاب با استفاده از مدل TOPKAPI-X ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، نمودار رطوبت خاک به‌جز برای چند ماه مرطوب، تغییرپذیری بالایی را نشان نمی‌دهد. در شکل ۷، میزان این تغییرات بین حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد است، ولی میزان تغییرات رواناب این گونه نبوده است. این ممکن است نشان دهد که خاک به اندازه کافی اشباع شده و باعث ایجاد رواناب شده است. همچنین، همانطور که در نمودار رطوبت خاک مشاهده می‌شود، رواناب قابل توجه، زمانی مشهود است که رطوبت خاک به بالای ۶۰ درصد برسد.

آگاهی از حساسیت مدل‌های بارش-رواناب به داده های ورودی و پارامترهای مدل، برای توسعه و به کارگیری این مدل‌ها بسیار موثر است و منجر به درک بهتر و تخمین بهتر مقادیر شده و عدم قطعیت‌ها را کاهش می‌دهد. داده‌های ورودی و پارامترهای مدل شامل بارش و دمای روزانه، دبی روزانه مشاهداتی، خصوصیات زبری و ضریب گیاهی کاربری‌های مختلف، ویژگی‌های فیزیکی خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی آبراهه‌ها، دمای آستانه ذوب برف و سایر پارامترهای آب زیرزمینی و مخازن آبی در صورت وجود آمار و اطلاعات، درصد رطوبت اولیه خاک و عمق متوسط ماهانه جریان آبراهه اصلی در خروجی حوضه است. طی مراحل واسنجی مشخص شد، دبی خروجی حوضه به پارامتر ویژگی‌های بافت خاک و اندازه سلول‌های انتخابی برای نقشه رقومی ارتفاعی، بیشترین حساسیت را دارد. همچنین، دقت در داده‌های رطوبت اولیه خاک و عمق جریان در آبراهه اصلی در ماه‌های مختلف در به‌دست آوردن نتایج بهتر مدل، موثر است، اما مدل به ویژگی‌های پوشش گیاهی و مشخصات هیدرولیکی آبراهه‌ها چندان حساسیت نشان نمی‌دهد.



شکل ۷- مقادیر رطوبت خاک یک سال آبی از دوره اعتبارسنجی حوزه آبخیز گاماسیاب با استفاده از مدل TOPKAPI-X

Fig. 7. Soil moisture values during the calibration period of Gamasiab basin using TOPKAPI-X model

نتایج آماری ارزیابی TOPKAPI-X در شبیه‌سازی دبی جریان در جدول ۴، ارائه شده است. برای ارزیابی مدل از چهار معیار NSE، R، BIAS و RMSE استفاده شده است. نتایج ارزیابی مدل TOPKAPI-X دقت شبیه‌سازی جریان را بر اساس معیار ناش-ساتکلیف برابر ۰/۶۹۷ در دوره واسنجی (۱۹۹۹-۲۰۱۴) و برابر ۰/۶۶۰ در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۲۰)، برای حوزه آبخیز گاماسیاب نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان برداشت کرد که این مدل کارایی خوبی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه مورد مطالعه دارد و با نتایج Liu et al., (2005)، Sinclair et al., (2010) و Janabi et al., (2021) همخوانی دارد.

جدول ۳- مقادیر مولفه‌های بیلان آبی حوضه در دوره شبیه‌سازی

Table 3. Water balance components values of the basin in the simulation period

Basin	Runoff coefficient	Total runoff	Infiltrate	Evaporation and transpiration	Rainfall (mm)
Gamasiab	15.18	1366.6	6628.87	1006.3	9001.77

جدول ۴- معیارهای کارایی مدل TOPKAPI-X در دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه پل چهر به‌عنوان خروجی حوزه آبخیز گاماسیاب

Table 4. Performance criteria of TOPKAPI-X mode in the calibration and validation period for Pole Chehr station as Gamasiab basin outlet

Process	Criterion	Watershed
Calibration(1999-2014)	NSE	0.697
	R	0.843
	BIAS	3.40
	RMSE	16.40
Validation (2014-2020)	NSE	0.660
	R	0.826
	BIAS	-1.48
	RMSE	36.21

نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی (جدول ۴)، نشان داد که این مقادیر بسیار نزدیک بهم هستند که بیانگر کارآیی مناسب مدل و انتخاب مناسب دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی است. در کل در بخش‌هایی از طول دوره آماری نتایج مدل رضایت بخش بوده و در دوره‌هایی نیز روند شبیه‌سازی ضعیف تر بوده است.

دلیل آن می‌تواند مربوط به حساسیت مدل به طول دوره واسنجی (Croke et al., 2005؛ Zarei et al., 2009) و یا خطای مربوط به ساختار ریاضی مدل مورد استفاده (Mouelhi et al., 2006) و میزان دقت داده‌های مشاهداتی باشد. همچنین، مقادیر مثبت و منفی اریب مدل به ترتیب نشان‌دهنده کمتر و بیشتر بودن متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است (Croke et al., 2005). دلایل خطا در شبیه‌سازی می‌تواند عدم دقت کافی داده‌های ورودی نظیر نقشه خاک، کاربری اراضی، نقشه رقومی ارتفاعی و همچنین کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و معرف نبودن آنها برای کل حوضه باشد. در این رابطه، دیگر پژوهشگران نیز بر دقت داده‌های ورودی، واقعی بودن داده‌ها و بازه تغییرات آنها برای بهبود شبیه‌سازی توسط مدل‌های هیدرولوژیکی تاکید دارند (Schuol et al., 2008؛ Arnold et al., 2012).

نتایج این پژوهش، نشان داد مدل TOPKAPI در برآورد دبی در قسمت منحنی فروکش، غالبا تخمینی کمتر از واقعی ارائه می‌کند که با پژوهش Artimani (2015) در حوضه گاماسیاب با دو مدل SWAT و WetSpa همخوانی دارد. در این راستا، Momeneh (2022) از مدل نیمه‌مفهومی IHACRES برای شبیه سازی جریان، در حوزه آبخیز گاماسیاب استفاده کرد. نتایج این مدل برای برآورد جریان روزانه با خطای نسبتاً کم و همبستگی خوب، موفق بوده و در برآورد جریان آرام رودخانه و دبی‌های کم عملکرد مناسبی داشته است، اما این مدل در پیک‌های جریان عملکرد مناسبی از خود نشان نداده است. یک عامل اصلی در ضعف شبیه سازی نقاط اوج جریان به دلیل عدم توانایی کافی مدل IHACRES در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف است و به موجب آن، دبی‌های اوج که اغلب در فصل بهار اتفاق می افتند و ذوب برف هم در آن دخیل است را به خوبی مدل‌سازی نمی‌کند. پژوهشگران دیگر نیز به این ضعف در مدل‌ها اشاره کرده‌اند و مهم‌ترین علت آن را ضعف مدل در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف عنوان کرده‌اند (Chu et al., 2002؛ Spruill et al., 2000؛ Wang et al.,2005؛ Yang et al., 2009؛ و Zarezadeh Mehrizi et al., 2018). به‌طور کلی، با کنترل کیفیت داده‌های ورودی و انتخاب دوره آماری مناسب، انتخاب روش‌های مناسب درون‌یابی داده‌های مکانی و توجه کافی به مفروضات موجود در مدل و ساختار آن می‌توان به طور قابل توجهی عملکرد مدل را بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های بارش-رواناب برای مدیریت منابع آب و شبیه‌سازی رویدادهای سیل با مزایای بسیاری همراه است. هدف پژوهش فعلی ارزیابی کاربرد مدل TOPKAPI-X برای شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز گاماسیاب با استفاده از نقشه‌های با وضوح مکانی نسبتا بالا بود. منطقه مورد مطالعه دارای کاربری اراضی متنوع و انواع خاک بود. به‌طورکلی، مدل TOPKAPI-X عملکرد نسبتاً خوبی را برای منطقه مورد پژوهش از خود نشان داد. اهمیت و سودمندی مدل‌های هیدرولوژیکی برای مدیریت منابع آب، درک فرایندهای هیدرولوژیکی و مطالعات ارزیابی، مشخص بوده و ابزارهای مهمی هستند که به دانشمندان و همچنین سیاستگذاران اجازه می‌دهند تا بر اساس شبیه سازی رفتار حوضه تصمیم‌گیری کنند (Viviroli et al., 2009). بنابراین، با توجه به افزایش تقاضا برای آب و تأثیر تغییرات آب و هوایی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از ابزارهای مدیریت آب در آینده خواهند بود. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدل TOPKAPI-X پتانسیل بالایی در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز مورد مطالعه دارد.

مطابق تحقیقات Liu et al. (2009)، عملکرد مدل می‌تواند بسته به عوامل زیادی مانند ساختار مدل، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه و داده‌های موجود (قدرت تفکیک، دقت و کمیت) متفاوت باشد. ذکر این نکته نیز لازم است که هیچ مدل واحدی برای همه مشکلات، بهترین و کامل‌ترین نیست. یافته‌های این پژوهش، همچنین نشان داد که شرایط مختلف منجر به نمایش‌های متفاوتی از فرایندهای بارش-رواناب در حوضه می‌شود. شایان ذکر است، این مدل به‌دلیل داده های مورد نیاز نسبتاً کم بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌های ورودی، به آسانی می‌تواند در

بسیاری از آبخیزها به‌کار برده شود. مدل‌های هیدرولوژیکی که به داده‌های محدود جهت شبیه‌سازی رواناب نیاز دارند، می‌توانند در آبخیزهایی که از لحاظ آماری با مشکل مواجه هستند، استفاده شوند.

در نهایت می‌توان بیان کرد، مدل TOPKAPI-X یک ابزار مدل‌سازی برای فرایندهای هیدرولوژیکی، اهداف عملیاتی و برنامه‌ریزی حوزه آبخیز است. همچنین، این نرم‌افزار شرایطی را مهیا می‌کند که کل فرایندهای سیستم حوزه آبخیز در کنار هم مدل‌سازی شود و یک مدل واحد ارائه شود. در این پژوهش، عملکرد مدل TOPKAPI-X از طریق یک مطالعه موردی در حوزه آبخیز گاماسیاب نشان داده شد. بنابراین، استفاده از این محیط به‌عنوان یک ابزار مدل سازی برای حوزه‌های آبخیز به‌منظور بهبود کمیت و کیفیت آب و مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مسئولین ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه ای استان‌های همدان و کرمانشاه، به علت در اختیار قرار دادن آمار و اطلاعات و نقشه‌های منابع پایه آب و خاک برای استفاده در این پژوهش تشکر می‌کنند. همچنین، از داوران محترم که با نکات پیشنهادی ارزنده خود باعث ارتقاع کیفی مقاله شدند، سپاسگزاری می‌کنند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

منابع مورد استفاده

Andres, E.O., Coccia, G., 2013. Towards a better representation of the hydrological processes the model TOPKAPI-X. International Symposium on Distributed Hydrological Modelling, University of Bologna, 5-7 June 2013, Napoli, Italy.

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M., Srinivasan, J., Santhi, R.C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M., Kannan, W.N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Modeluse, Calibration, and Validation. American Soci. Agricul. Biologi. Engineer. 55(4), 1491-1508.

Artimani, M.M., 2015. Quantitative analysis of sensitivity to hydrological drought using SWAT and WetSpa models in Gamasiab Watershed. Master's thesis, Lorestan University (in Persian).

Artimani, M.M., Zainiwand, H., Tahmasabipour, N., 2016. Evaluation of SWAT model in determining water balance components of Gamasiab Watershed. J. Rain Catchment Surface Syst. 2(15), 51-64 (in Persian).

Artimani, M.M., Zainiwand, H., Tahmasabipour, N., 2018. Evaluating the effectiveness of SRM and HBV models in simulating runoff caused by snowmelt in Bojin watershed. Iran's Water Resou. Res. 15(2), 241-228 (in Persian).

Baghel, D., Gaur, A., Karthik, M., Dohare, D., 2019. Global trends in environmental flow assessment: an overview. J. The Institu. Engin. 100 (2), 191-197.

Bartholmes, J., Todini, E., 2005. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discus. 9(4), 346-333.

Cantoni, E., Tramblay, Y., Grimaldi, S., Salamon, P., Dakhlaoui, H., Dezetter, A., Thiemig, V., 2022. Hydrological performance of the ERA5 reanalysis for flood modeling in Tunisia with the LISFLOOD and GR4J models. J. Hydrol: Regional-Studies. 42(11), 111-138.

Chu, T., Shirmohammadi, A., Montas, H., Sohrabi, T., 2002. Modeling watershed nonpoint source pollution on piedmont physiographic region using SWAT. ASAE Meeting paper No: 022040.Ciarapica, L., Todini, E., 2002. TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. Hydrol. Process. 16, 207-229.

Coccia, G., Mazzetti, C., Ortiz, E., Todini, E., 2009. Application of the topkapi model within the dmip 2 project. Proceedings of the 23rd Conference on Hydrology, San Antonio, TX, USA, 10-12 January, 2009.

Croke, BM., Andrews, W., Spate, F., Cuddy, J., 2005. IHACRES user guide. Technical Report 2005/19. Second ed. ICAM, School of Resources. Environment and Society. The Australian National University. Canberra.

Ding, Z. Lü. H., Ahmed, N., Zhu, Y., Gou, Q., Wang, X., Liu, E., Xu, H., Pan, Y., Sun, M., 2022 . Soil moisture data assimilation in MISDc for improved hydrological simulation in upper Huai River Basin, China. Water. 14(21), 34-76.

Hali-Saz, A., Ahmadi Dost, B., Kamangar, Ameli, A., 2016. Investigating the effect of spatial scale change in flood estimation, a case study: Jamash Watershed, Hormozgan Province, J. Hydrol. Sci. 20(7), 1-13 (in Persian).

Hamedan Agricultural and Natural Resources Research Cente, 2009. information layers related to soil and land using GIS system in Hamadan Province.

Harun, S., Ahmat, N., Kassim, A., 2002. Artificial neural network model for rainfall-runoff relationship. J. Technol. 37(2), 1-12.

Hughes, J.D., Silberstein, R.P., Grigg, A., 2013. Extending rainfall-runoff models for use in environments with long-term catchment storage and forest cover changes. In MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation, 231-243.

Huo, Z., Feng, S., Kang, S., Huang, G., Wang, F., Guo, P., 2012. Integrated neural networks for monthly river flow estimation in arid Inland Basin of Northwest China. J. Hydrol. 420(2), 159-170.

Janabi, F., Ongdas, N., Bernhofer, C., Benisch, J., Krebs, P., 2021. Assessment of TOPKAPI-X applicability for flood events simulation in two small catchments in Saxony. Hydrol. 8, 109.

Khosravi, M., Saljagah, A., Mohseni Saravi, M., 2019. Estimation of daily runoff in basins without statistics Using regionalization of parameters Model HBV, a case study: Central Alborz. J. Water Soil Sci. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 43(12), 11-21 (in Persian).

Knebl, M., Yang, Z.L., Hutchison, K., Maidment, D., 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. J. Environ. Manage. 75(4), 336-325.

Lee, K.T., Huang, J.K., 2016. Influence of storm magnitude and watershed size on runoff nonlinearity. J. Earth Syst. Sci. 125(4), 794-777.

Li, J., Lei, K., Zhang, T., Zhong, W., Kang, A., Ma, Q., 2020. A framework for event-based flood scaling analysis by hydrological modeling in data-scarce regions, Hydrology Research, in Press.

Liu, J., Chen, X., Zhang, J., Flury, M., 2009. Coupling the Xinanjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting. Hydrol. Process. 23, 1337-1348.

Liu, Z., Martina, M.L.V., Todini, E., 2005. Flood forecasting using a fully distributed model: Application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 9, 347-364.

Liu, Z., Todini, E., 2005. Assessing the TOPKAPI non-linear reservoir cascade approximation by means of a characteristic lines solution. Hydrol. Process. 19, 1983-2006.

Lupakov, S.Y., Bugaets, A.N., Gonchukov, L.V., Motovilov, Yu. G., Sokolov, O.V., Bugaets, N.D., 2023 . Using the GR4J conceptual model for runoff simulation in the Ussuri River Basin. Russ. Meteorol. Hydrology. 48(2), 128-137.

Mahdi-Nasab, M., 2017. Rainfall-runoff modeling of Kashkan River catchment based on statistical models, J. Geogra. Environ. Plan. 58(2), 67-84 (in Persian).

Ministry of Energy, Water and Sewerage Deputy, Water and Sewerage Planning Office, 2013. Studies on updating the country's comprehensive water plan, volume five, final report on water resource planning modeling of the Karkheh catchment area, Bahan Dam Company.

Mojerlo, F., Fazl Oli, R., Emadi, A., 2018. Application of IHACRES model to evaluate the effects of climate change on watershed discharge Abriz Tajan. Irri. Drain. J. Iran. 1(13), 129-141.

Momeneh, S., 2022. Performance comparison of Artificial Intelligence models with IHACRES model in streamflow modeling of the Gamasiab River catchment. Water Soil Manage. Model. 2(3), 1-16.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., 2006. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. J. Hydrol. 328 (1), 283-296.

Najafinejad , A., Heravi, H., Bahremand, A., Zeinivand, H., 2020. Simulation of climate change on river hydrograph using WetSpa Model, case study: Taleghan Watershed Alborz Province. J. Spat. Analys. Environ. Hazards. 7(1), 121-134

Natural Resources and Watershed Management Organization., 2021. Vegetation map. https://frw.ir/uploads/f vegetation map.

Nguyen, H., Recknagel, F., Meyer, W., Frizenschaf, J., Ying, H., Gibbsd, M., 2019. Comparison of the alternative models SOURCE and SWAT for predicting catchment streamflow, sediment and nutrient loads under the effect of land use changes. Sci. The Total Environ. 662(3), 254-265.

Nohegar, A., Motamednia, M., Malekian, A., 2016. Daily river flood modeling using genetic programming and artificial neural network, case study: Amameh Representative Watershed. Physi. Geog. Res. 48(3), 367-383 (in Persian).

Peng, D., Zhijia, L., Zhiyu, L., 2008. Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application. Water Sci. Eng. 1, 14-21.

Rwasoka, D.T., Madamombe, C.E., Gumindoga, W., Kabobah, A., 2013. Calibration, validation, parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2–parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. Physi. Chemis. Earth. 67(3), 36-46.

Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H., 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. J. Hydrol. 352, 30-49.

Shahedi, K., Forotan Danash, M., 2022. Flow simulation using the wetspa model in the Ghorchai Watershed. Hydrogeomorphol. 23(9), 25-42.

Sinclair, S., Pegram, G.G.S., 2010. A comparison of ASCAT and modelled soil moisture over South Africa, using TOPKAPI in land surface mode. Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 613-626.

Sinclair, S., Pegram, G.G.S., 2013. A sensitivity assessment of the TOPKAPI model with an added infiltration module. J. Hydrol. 479, 100-112.

Spruill, C.A., Workman, S.R., Taraba, J.L., 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. Trans. Americ. Soci. Agricul. Engin. 43(6), 1439-1431.

Vakili, S., Moghadamnia, A.R., 2022. Comparative investigation of rainfall-runoff model-HEC HMS is estimated by different experimental methods flood. Iran-Watershed Manage. Sci. Engin.16(58), 32-41.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environ. Model. Soft. 24(10), 1209-1222.

Wang, X., Melesse, A.M., 2005. Evaluation of the SWAT models snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota Watershed. Trans. ofthe ASAE. 48(4), 1-18.

Yang, Q., Meng, F., Zhao, Z., Chow, T.L., Benoy, G., Rees, H.W., Bourque, C.P., 2009. Assessing the impact of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. Agri. Ecosyst. Environ. 132, 23-31.

Zainali, M., Golabi, M.R., Sharifi, M.R., Hafezparast Maudet, M., 2019. Evaluation of artificial intelligence models in river flow modeling, case study: Gamasiab River. Manage. Engineering Watershed J. 11, 941-954.

Zainiwand, H., 2014. Analysis of the effect of different amounts of daily precipitation on the amount of runoff in Qarasu Watershed in Kermanshah Province. Eco-Hydrol. J. 1(2).

Zarei, M., Ghanbarpoor, M.R., 2009. River flow simulations using rainfall-runoff models IHACRES, Kasilian River of Watershed Iran. Ecohydrol. 8, 20-11.

Zarezadeh Mehrizi, S., Khoorani, A., Bazrafshan, J., Bazrafshan, O., 2018. Assessing the efficiency of SWAT model for runoff simulation in Gamasiyab basin. J. Range Watershed Manage. 70(4), 881-893.

Zhang, X., Water, D., Ellis, R., 2013. Evaluation of Simhyd, Sacramento and GR4J rainfall runoff models in two contrasting great barrier reef catchments. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013, 3260-3266.