Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Comparative assessment of Sacramento, SMAR, and SimHyd models in long-term daily runoff simulation

Fatemeh Sadat Rezvani[1], Khalil Ghorbani[2]*, Meysam Salarijazi[2], Laleh Rezaei Ghaleh[3], Behnaz Yazarloo [4]

[1] Graduated M.Sc. Student, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[2]Associated Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[3] Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[4] Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

Abstract

Introduction

One of the most critical issues that have always been the concern of researchers in water engineering and hydrology is the simulation of runoff or river discharge to plan, prevent damages, and solve the water shortage problem, and soil erosion. In addition, due to the ever-increasing limitations of extractable freshwater resources, it is very important to predict the river discharge and its changes as accurately as possible. The prediction of runoff, this important hydrological variable, significantly impacts the sustainable management of water resources, engineering designs, environmental protection, water supply planning, water quality management, irrigation systems, and electricity generation worldwide. Besides, for data accuracy and to modify and complete the data, the results of these models can be used. The rainfall-runoff process is one of the most complex, dynamic, and non-linear hydrological phenomena, which is influenced by various factors such as temporal and spatial changes, geomorphology, and climatic characteristics of the catchment area. Knowing the connection between precipitation and runoff is one of the important issues of hydrology because precipitation data are used in flood prediction, and a good prediction is made when a suitable relationship is defined. By increasing the accuracy of river runoff prediction, more efficient management and planning are done. Therefore, improving runoff prediction modeling seems essential.

Materials and Methods

So far, complex and diverse relationships have been presented to predict the extent of river floodings, such as conceptual rainfall-runoff models, time series linear models, and hybrid models. However, due to the lack of accurate knowledge and the complexity of factors affecting river flooding, the values calculated from various relationships have significantly differed in many cases. In the meantime, hydrological models, with their potential, are considered efficient tools, especially in climate change conditions. One of the models that researchers use to model rainfall and runoff is the RRL (Rainfall Runoff Library) hydrological model. This software package includes integrated and conceptual models (such as AWBM, Sacramento, SMAR, SimHyd, and Tank). In this research, the comparative evaluation of the Sacramento, SimHyd, and SMAR models of this tool has been done in predicting the long-term runoff of the Galikesh watershed and also investigating the effect of parameters on the performance of each model.

Results and Discussion

In this research, after preparing the input data, the models were calibrated and validated for 1989-2010 and 2010-2019. The simulated and observation runoff results were analyzed to check the potential of the models. Furthermore, after evaluating the model using the optimized parameters, the sensitivity of each of the parameters of the three Sacramento, SimHyd, and SMAR models was investigated in the simulation of runoff from the Galikesh watershed so that the sensitivity of the models to the change of parameters and the effect of each parameter in the simulation makes it clear. To be the results of the evaluations indicate the optimal performance

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

of all models in runoff simulation. However, the Sacramento model with a Nash Sutcliffe coefficient of 0.82 for the calibration period and 0.7 for the validation period, and then the SimHyd model with a Nash Sutcliffe coefficient of 0.71 and 0.76 for the calibration and validation period has the best performance in the runoff simulation of the Galikesh watershed. The SMAR model has shown weaker results than other models in runoff simulation. Finally, the sensitivity of all parameters was checked. The results showed some parameters such as LZTWM (Lower zone tension water capacity) and Zperc (Maximum percolation rate coefficient) in the Sacramento model, impervious threshold parameters and infiltration coefficient in the SimHyd model, and the evaporation conversion (T) parameter in the SMAR model was the most sensitive to reducing their values. Also, increasing the value of the Rexp (Percolation equation exponent) parameter in the Sacramento model and the proportion direct runoff (H) parameter in the SMAR model has the greatest impact on the simulation runoff compared to other parameters.

Conclusion

Different models have been proposed to explain these complexities, considering the importance of runoff forecasting and the non-linearity of converting precipitation into the runoff. Different structures and approaches of studied models have led to their different predictions, which has led to the importance of the comparative evaluation of the models for various purposes. For this purpose, in this research, three hydrological models, Sacramento, SimHyd, and SMAR have been used to simulate the runoff of the Galikash catchment area. The investigations showed that all three models could simulate the outflow of the watershed, and all the models have successfully simulated high amounts of runoff. However, the Sacramento model has performed better than the others. Models parameters sensitivity analysis has been investigated considering the importance and effect on runoff simulation. Finally, The sensitivity analysis showed that some parameters are more sensitive than others in the runoff simulation. The optimal amount of these parameters should be considered during the simulation due to their high sensitivity.

Keywords: Galikesh watershed, Hydrological models, Rainfall-runoff, Sensitivity analysis, Simulation

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: ghorbani.khalil@gmail.com

Citation: Rezvani, F.S., Ghorbani, Kh., Salarijazi, M., Rezaei Ghaleh, L., & Yazarloo, B. (2023). Comparative assessment of Sacramento, SMAR, and SimHyd models in long-term daily runoff simulation. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 279-297.
DOI:10.22098/mmws.2022.11794.1171
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.18.6

Received: 14 November 2022, Received in revised form: 04 December 2022, Accepted: 05 December 2022, Published online: 06 December 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 279-297

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های Sacramento، SMAR و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب روزانهٔ بلندمدت

فاطمه سادات رضوانی[۱]، خلیل قربانی[۲*]، میثم سالاری‌جزی[۲]، لاله رضائی‌قلعه[۳]، بهناز یازرلو[۴]

[۱] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۲] دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۳] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

[۴] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

با توجه به تأثیر قابل‌توجه میزان رواناب در مدیریت پایدار منابع آب و عملیات مهندسی، پیش‌بینی و برآورد دقیق این متغیر از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد تعدادی از مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب و نیز تحلیل حساسیت پارامترهای این مدل‌ها جهت تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر شبیه‌سازی است. به این‌منظور در پژوهش حاضر پس از تهیهٔ داده‌های مورد نیاز در دورهٔ آماری ۱۳۹۷-۱۳۶۷ به شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز گالیکش استان گلستان با استفاده از سه مدل هیدرولوژیکی یکپارچهٔ Sacramento، SimHyd و SMAR پرداخته شد. پس از برآورد رواناب حوزهٔ آبخیز، عملکرد هر یک از این مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوزهٔ آبخیز با استفاده از چهار معیار ارزیابی ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین درصد قدر مطلق خطا (MAPE) در دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی بررسی شده و در نهایت حساسیت پارامترهای هر یک از مدل‌ها در برآورد رواناب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب حاکی از عملکرد بهتر مدل بارش-رواناب Sacramento با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۲ و ۰/۷۰ در دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به دیگر مدل‌های هیدرولوژیکی است. پس از آن، مدل SimHyd با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۱ و ۰/۷۶ برای دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی عملکرد مطلوبی را نشان داده است، اما مدل SMAR در شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز موفق نبوده و عملکرد پایینی داشته است. یافته‌های تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌ها نیز نشان می‌دهد که پارامترهایی مانند LZTWM و Zperc در مدل Sacramento، پارامترهای نسبت نفوذناپذیری و ضریب نفوذ در مدل SimHyd و پارامتر ظرفیت ذخیرهٔ برگابی در مدل SMAR بیش‌ترین حساسیت را به کاهش مقدار خود داشته‌اند. هم‌چنین، افزایش مقدار پارامترهای Rexp و نسبت رواناب مستقیم در مدل‌های Sacramento و SMAR بیش‌ترین تأثیر را نسبت به دیگر پارامترها بر شبیه‌سازی رواناب داشته‌اند. یافته‌ها حکایت از عملکرد بهتر مدل Sacramento و پس از آن مدل SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز دارد و مدل SMAR ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌ها داشته است. هم‌چنین، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر پارامترهای مدل تأثیر متفاوتی بر روند شبیه‌سازی رواناب داشته و بهینه‌سازی صحیح این پارامترها موجب افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: حوزهٔ آبخیز گالیکش، مدل هیدرولوژیکی، بارش-رواناب، تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghorbani.khalil@gmail.com

استناد: رضوانی، ف.س.، قربانی، خ.، سالاری‌جزی، م.، رضائی‌قلعه، ل.، و یازرلو، ب. (۱۴۰۳). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های Sacramento، SMAR و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب روزانهٔ بلندمدت. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۷۹-۲۹۷.

DOI:10.22098/mmws.2022.11794.1171

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.18.6

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۲۷۹ تا ۲۹۷

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائلی که همواره در مهندسی آب و هیدرولوژی مورد توجه پژوهشگران بوده است، شبیه‌سازی رواناب یا دبی رودخانه به‌منظور انجام برنامه‌ریزی‌ها، پیشگیری از خسارت‌ها، رفع مشکل کمبود آب و فرسایش خاک است. هم‌چنین با توجه به روند افزایش جمعیت، توسعهٔ فعالیت‌های کشاورزی نیاز به آب، بهره‌برداری بی‌رویه و غیراصولی (Ghoreishi Ghareh Takan et al., 2022) و محدودیت‌های روزافزون منابع آب شیرین قابل استحصال، پیش‌بینی هر چه دقیق‌تر دبی رودخانه و تغییرات آن از اهمیت زیادی برخوردار است (Ghorbani et al., 2016). رواناب، بخشی از نزولات جوی و یا آب حاصل از ذوب برف است و در صورتی‌که ظرفیت نفوذ آب به داخل خاک بیش‌تر باشد بر روی زمین جریان یافته و به منابع آب سطحی می‌پیوندد (Alizadeh, 2006). پیش‌بینی این متغیر مهم هیدرولوژیکی، بر مدیریت پایدار منابع آب، طراحی‌های مهندسی (Narbondo et al., 2020)، حفاظت از محیط زیست، برنامه‌ریزی تأمین آب، مدیریت کیفیت آب، سیستم آبیاری، تولید برقابی و غیره تأثیر قابل‌توجهی در سراسر جهان دارد (Wang et al., 2015; Mirzania et al., 2021)، هم‌چنین به‌منظور صحت داده‌ها، اصلاح و تکمیل داده‌ها می‌توان از نتایج این مدل‌سازی‌ها بهره برد (Naeimi kalourazi et al., 2016).

فرآیند بارش-رواناب یکی از پیچیده‌ترین و پویاترین پدیده‌های غیرخطی هیدرولوژیکی است که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات زمانی و مکانی، ژئومورفولوژی و ویژگی‌های اقلیمی حوزهٔ آبخیز قرار دارد (Vidyarthi and Jain, 2022). دانستن روابط بین بارش-رواناب یکی از مسائل مهم هیدرولوژی است (Adib et al., 2010). به این دلیل که داده‌های بارش در پیش‌بینی‌های مربوط به سیلاب‌ها کاربرد دارند و این پیش‌بینی زمانی صورت می‌پذیرد که یک رابطهٔ مناسب تعریف شود (Rezaie et al., 2017). با افزایش دقت در پیش‌بینی رواناب رودخانه، مدیریت و برنامه‌ریزی کارآمدتری صورت می‌پذیرد. بنابراین، بهبود مدل‌سازی پیش‌بینی رواناب امری ضروری به‌نظر می‌رسد (Khodakhah et al., 2022). تاکنون روابط گوناگون و پیچیده‌ای برای پیش‌بینی میزان آبدهی رودخانه‌ها مانند انواع الگوهای مفهومی بارش-رواناب، الگوهای خطی سری زمانی و الگوی ترکیبی یا هیبرید ارائه شده است، ولی به‌دلیل عدم شناخت دقیق و نیز پیچیدگی عوامل مؤثر در آبدهی رودخانه‌ها در بسیاری از مواقع میزان مقادیر محاسبه شده از روابط گوناگون تفاوت معناداری با یک‌دیگر داشته‌اند (Ahmadpour et al., 2019). در این بین مدل‌های هیدرولوژیکی با توان بالقوهٔ خود، ابزارهای کارآمدی به‌ویژه تحت شرایط تغییرات آب‌وهوایی محسوب می‌شوند (Ahmadi et al., 2020). یکی از مدل‌های مورد استفادهٔ پژوهشگران برای مدل‌سازی بارش-رواناب، مدل هیدرولوژیکی RRL[1] است. این بستهٔ نرم‌افزاری، مجموعه‌ای از مدل‌های یکپارچه و مفهومی از جمله Tank، AWBM[2]، SimHyd[3]، SMAR[4] و Sacramento است (Yonesi et al., 2020). تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینهٔ رواناب و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل هیدرولوژیکی انجام شده که در ادامه به بیان نتایج برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

Song et al. (2019) در مطالعات خود به شبیه‌سازی رواناب حوضهٔ رودخانه باس در استرالیا با استفاده از سه مدل هیدرولوژیکی Sacramento، SMAR و Tank پرداختند. ارزیابی‌ها گویای عملکرد خوب این سه مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضهٔ رودخانه است؛ از طرفی ارزیابی‌ها نشان داد که مدل Sacramento نسبت به دو مدل دیگر ایده‌آل‌ترین مدل است. Pourreza bilondi et al. (2019) در پژوهش خود از چهار روش ترکیبی SMA[5]؛ WAM[6]؛ MMSE[7] و M3SE[8] به‌منظور بهبود نتایج مدل‌های موجود در بستهٔ نرم‌افزاری RRL (SimHyd، AWBM، Sacramento و Tank) و مدل‌های SCS-Milc و Hymod استفاده نمودند. یافته‌ها نشان داد که تمامی مدل‌های شبیه‌سازی نتایج قابل‌قبولی را ارائه می‌دهند و هم‌چنین روش‌های ترکیبی موجب بهبود نتایج شبیه‌سازی شده‌اند. Mohammadivand et al. (2019) به بررسی کاربرد روش‌های بهینه‌سازی به‌منظور واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی پرداختند. به این منظور آن‌ها از سه مدل بارش رواناب یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento و SimHyd برای شبیه‌سازی رواناب روزانه در خروجی حوزهٔ آبخیز معرف امامه استفاده نمودند. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی گویای عملکرد بهتر مدل SimHyd نسبت به دو مدل دیگر است؛ اما دو مدل دیگر نیز نتایج رضایت‌بخشی را ارائه نموده است. هم‌چنین نتایج کارایی خوب بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند.

Yonesi et al. (2020) در پژوهش خود از مدل‌های موجود در بستهٔ نرم‌افزاری RRL جهت شبیه‌سازی روابط بارش-رواناب

[1] Rainfall Runoff Library
[2] Australian Water Balance Model
[3] Simple Hydrology
[4] Soil Moisture Accounting and Routing
[5] Weighted Average
[6] Weighted Average Method
[7] Multi Model Super Ensemble
[8] Modified Multi Model Super Ensemble

حوزهٔ آبخیز دشت سیلاخور در دورهٔ آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ بهره بردند. مقادیر به‌دست آمده ضریب نش–ساتکلیف در روش بهینه‌ساز رواناب در مدل SimHyd نشان‌دهندهٔ توانایی نسبی این مدل در بین سایر مدل‌ها و مقادیر نش–ساتکلیف در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل Tank با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک کارایی کم این مدل را نشان می‌دهد. هم‌چنین یافته‌ها حاکی از آن است که در بین روش‌های مختلف بهینه‌سازی، روش بهینه‌ساز جست و جوی مستقیم نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. Mubialiwo et al. (2021) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد هفت مدل مفهومی بارش رواناب IHACRES، Tank، Sacramento، AWBM، SMAR، SimHyd و HMSV در زیرحوضهٔ رودخانهٔ مالابا در اوگاندا پرداختند. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از عملکرد متوسط تمام این مدل‌ها دارد. هم‌چنین مشخص شد که این مدل‌ها در جریان‌های زیاد نسبت به مقادیر کم جریان، عملکرد بهتری داشته‌اند.

Guo et al. (2022) به ارزیابی چندین روش درون‌یابی بارش برای ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی GR4J، IHACRES، Sacramento و MIKE SHE در حوضهٔ رودخانه چائوهه در پکن پرداختند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر روش درون‌یابی ANUSPLIN و مدل Sacramento نسبت به دیگر روش‌ها و مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در این پژوهش است. Parvaz and Shahoei (2022) به بررسی دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه در ایستگاه سنته با استفاده از مدل AWBM در بازهٔ زمانی نُه سال پرداختند. نتایج حاکی از قابلیت بالای این مدل در شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز است. هم‌چنین در بین پارامترهای مدل AWBM، پارامتر شاخص جریان پایه (Base flow index) یا BFI حساسیت بیش‌تری را نسبت به دیگر پارامترها نشان می‌دهد.

مرور تحقیقات انجام شده در رابطه با برآورد رواناب نشان می‌دهد که با توجه به تنوع مدل‌های بارش–رواناب در دسترس و هم‌چنین نقاط قوت مدل‌های مختلف از لحاظ در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف فرآیندهای هیدرولوژیکی (Duan et al., 2007) انتخاب یک مدل بارش–رواناب مناسب برای حوزهٔ آبخیز از جهت بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم است. با توجه به سیل‌خیز بودن محدودهٔ مورد مطالعه و ضرورت برآورد دقیق و صحیح رواناب، در این پژوهش نقاط قوت و ضعف مدل‌های پیشنهادی از لحاظ کم برآوردی و بیش‌برآوردی با یک‌دیگر مورد ارزیابی قرار گرفته و هم‌چنین به بررسی تأثیر پارامترها بر عملکرد هر یک از مدل‌ها پرداخته شده است. با توجه به این مطالب فوق، در این پژوهش از سه مدل موجود در این بستهٔ نرم‌افزاری که شامل مدل Sacramrnto، مدل SimHyd و مدل SMAR استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

حوزهٔ آبخیز گالیکش با وسعت ۳۹۸ کیلومترمربع و محیط ۱۰۵ کیلومتر در دامنهٔ جغرافیایی ′۳۰ °۵۵ تا ′۴۵ °۵۵ طول شرقی و ′۵ °۳۷ تا ′۱۶ °۳۷ عرض شمالی در محدودهٔ شهرستان گالیکش از زیرحوضه‌های آبخیز گرگانرود واقع در استان گلستان است. دامنهٔ تغییرات ارتفاعی حوزهٔ آبخیز بین ۲۲۶ تا ۲۵۶۰ متر و ارتفاع وزنی متوسط حوزهٔ آبخیز برابر ۱۲۴۵ متر از سطح دریا با شیب متوسط ۲۳ درصد است. رودخانهٔ مهم این حوزهٔ آبخیز، رودخانهٔ اوغان است که به رودخانهٔ گرگانرود متصل شده و در نهایت رواناب آن در سد گلستان ذخیره می‌شود (SalariJazi et al., 2016). طول شاخه اصلی این حوزهٔ آبخیز ۲۶/۲ کیلومتر و زمان تمرکز برابر ۳/۵ ساعت است. اقلیم این حوزهٔ آبخیز براساس طبقه‌بندی دومارتن در محدودهٔ نیمه‌مرطوب قرار می‌گیرد (Moradi et al., 2018). مشخصات آماری ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۱ و موقعیت جغرافیایی حوزهٔ آبخیز گالیکش در کشور و استان گلستان در شکل ۱ ارائه شده است.

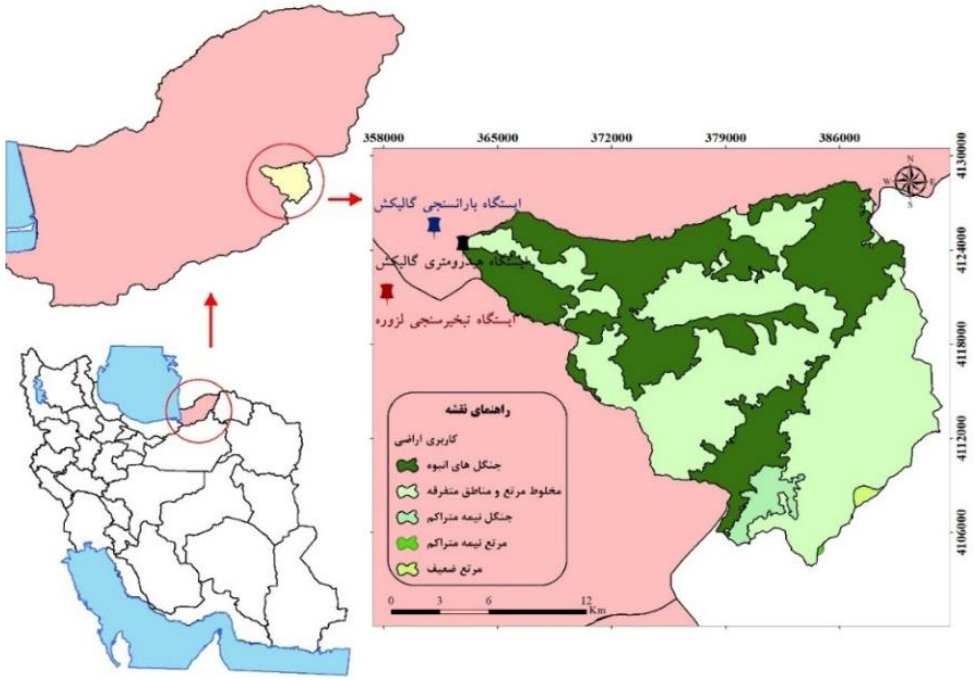
۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش از سه مدل Sacramrnto، SimHyd و SMAR استفاده شده است. ورودی این مدل‌ها شامل بارش، دبی و تبخیر-تعرق پتانسیل است.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازهٔ زمانی ۱۳۹۸-۱۳۶۷

Table 1- Statistical characteristics of the data in the studied stations in the period of 1989-2019

پارامتر	واحد	میانگین سالانه	کم‌ترین	بیش‌ترین
بارش (ایستگاه باران‌سنجی گالیکش)	میلی‌متر	632	0	313
رواناب (ایستگاه هیدرومتری گالیکش)	مترمکعب بر ثانیه	2.54	0	339.3
دما (ایستگاه تبخیرسنجی لزوره)	درجهٔ سانتی‌گراد	18.1	-6	34



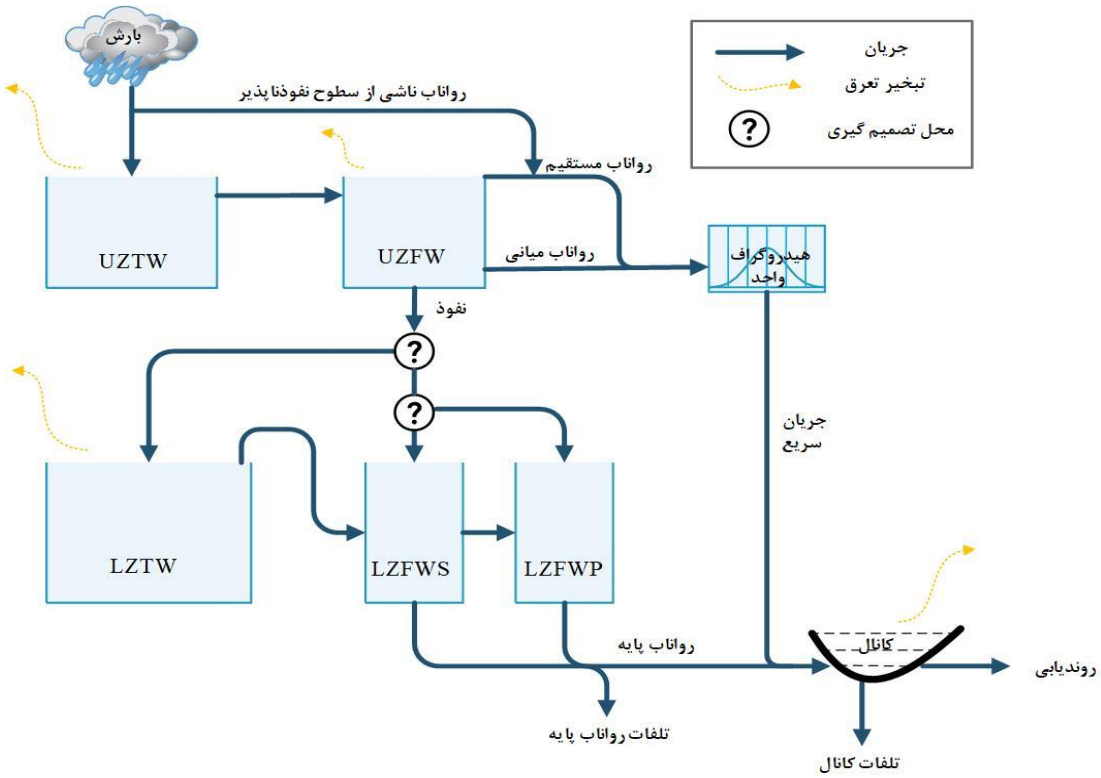
شکل ۱- موقعیت حوزهٔ آبخیز گالیکش و ایستگاه‌های پایش آن در استان گلستان و ایران

Figure 1- Location of Galikesh watershed and its monitoring stations in Golestan province, Iran

مدل Sacramento: مدل هیدرولوژیکی Sacramento یک مدل پیوستهٔ بارش–رواناب و یکی از مدل‌های سیستم پیش‌بینی آب و هوای ملی برای تبدیل ورودی بارش به خروجی جریان آبراهه‌ای است که توسط National Weather Service River Forecast System یا NWSRFS برای پیش‌بینی سیلاب در ایالات متحده توسعه پیدا کرده است (شکل ۲). این مدل توسط Brunash et al. (1973) تهیه شده و یکی از پرکاربردترین مدل‌های بارش–رواناب است. مدل Sacramento از رطوبت موجود در خاک جهت شبیه‌سازی بیلان آبی در حوزهٔ آبخیز استفاده می‌کند. این مدل به گونه‌ای کار می‌کند که ویژگی‌های نفوذ برای شبیه‌سازی شرایط جریان از حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه حفظ شود (Amollo, 2020). در این مدل از ۱۷ پارامتر برای شبیه‌سازی بیلان آب استفاده می‌شود که پنج پارامتر تعیین کنندهٔ اندازهٔ ذخایر رطوبتی خاک، سه پارامتر محاسبه‌کنندهٔ جریان جانبی، سه پارامتر محاسبه‌کنندهٔ میزان نفوذ آب از لایه‌های بالایی به لایه‌های پایین‌تر، سه پارامتر محاسبه‌کنندهٔ رواناب مستقیم و سه پارامتر تلفات سیستم را محاسبه می‌کنند (Jabbari and Rezaie, 2015).

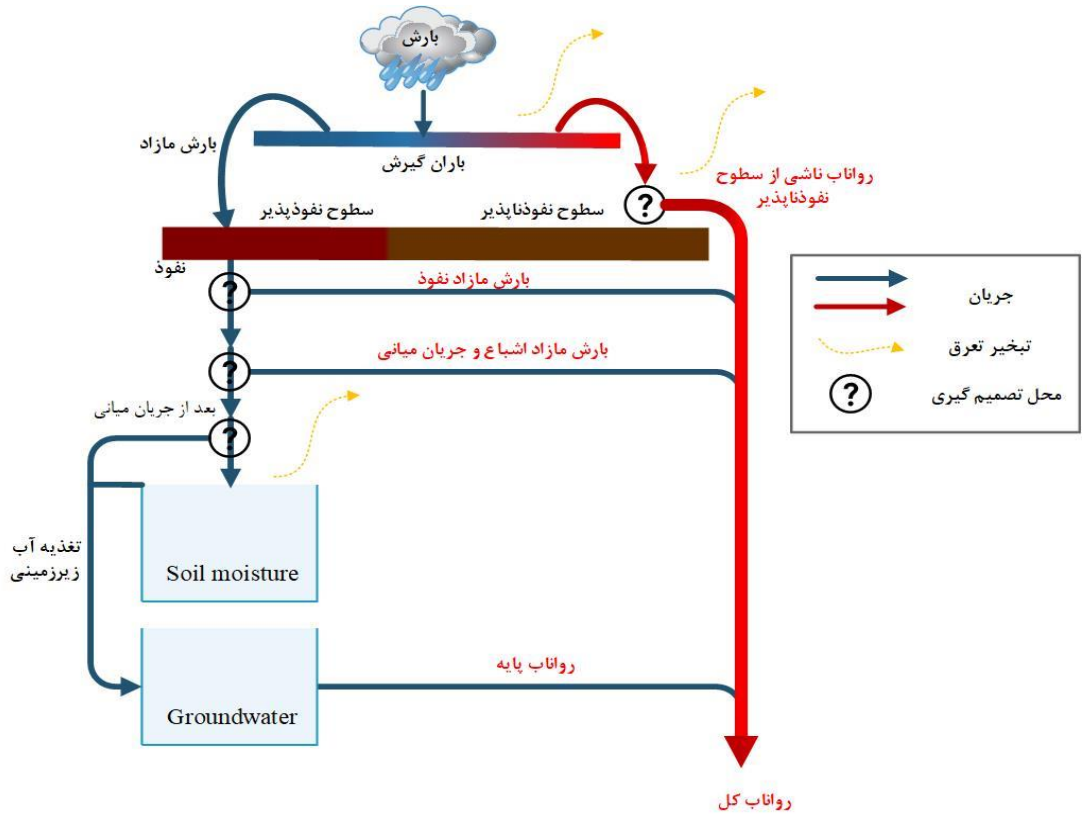
مدل SimHyd: مدل SimHyd نسخهٔ ساده شدهٔ مدل مفهومی بارش-رواناب روزانه به نام HYDROLOG است که در سال ۱۹۷۲ توسط Porter توسعه داده شده است (Porter and McMahon, 1975). هم‌چنین، مدل MODHYDROLOG که توسط Chiew (1991) توسعه یافته است. این مدل با استفاده از بارش و تبخیر–تعرق روزانه، جریان روزانه را تخمین می‌زند (Chiew et al., 2002). این مدل از نُه پارامتر ضریب جریان پایه، آستانهٔ نفوذناپذیری، ضریب نفوذ، شکل نفوذ، ضریب جریان زیرقشری، کسر نفوذپذیری، ظرفیت مخزن بارش برگاب، ضرب تغذیه و ظرفیت مخزن رطوبت خاک به‌منظور شبیه‌سازی رواناب استفاده می‌کند (Sharifi et al., 2021). در شکل ۳ چگونگی ساختار مدل SimHyd ارائه شده است.

مدل SMAR: مدل رطوبتی خاک (SMAR)، یک مدل بارش–رواناب بیلان آبی مفهومی یکپارچه است که در سال ۱۹۷۰ در دانشگاه Galway توسعه یافته و از مدل‌های رایج در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوزهٔ آبخیز است (شکل ۳) (O'connell et al., 1970). هم‌چنین، اجزاء بیلان آب این مدل توسط ناش و ساتکلیف در سال ۱۹۶۹ ارائه شده است (Clarke, 1994). هستهٔ اصلی این مدل را رطوبت خاک تشکیل می‌دهد. این مدل از دو مدول تشکیل شده است. مدول تعادل غیرخطی آب که از روابط پیوستگی قابل‌قبولی تشکیل شده است و مدول روندیابی که نزول و اثرات بخشی حوزهٔ آبخیز را با استفاده از روندیابی اجزای مختلف رواناب حاصل در فواصل زمانی مختلف شبیه‌سازی می‌کند (Salmani et al., 2014). این مدل شامل پنج پارامتر تعادل آب و چهار پارامتر روندیابی است (Mubialiwo et al., 2021).



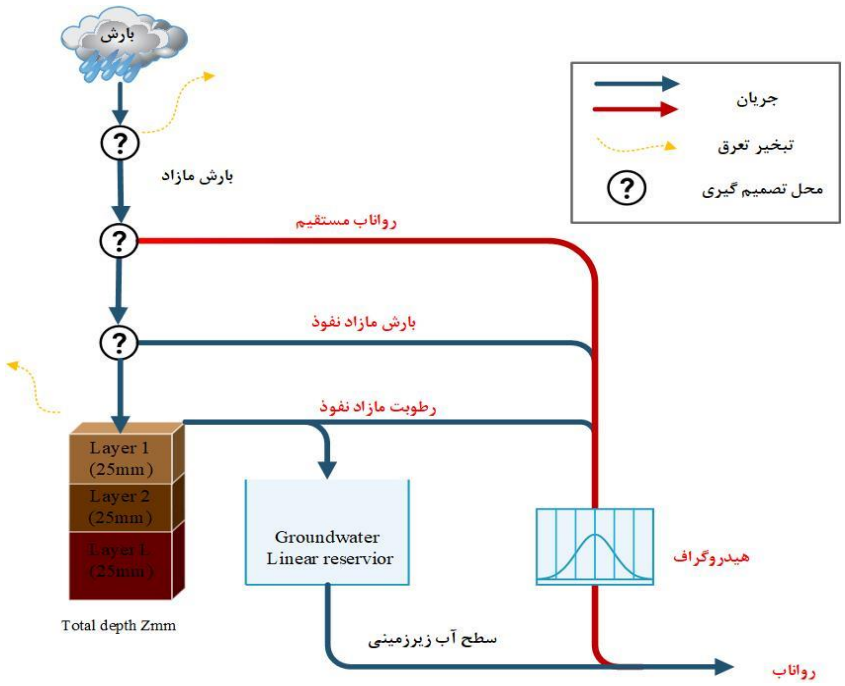
شکل ۲- ساختار مدل Sacramento (Podger, 2004; Kunnath-Poovakka and Eldho, 2019)

Figure 2- Structure of Sacramento model (Podger, 2004; Kunnath-Poovakka and Eldho, 2019)



شکل ۳- ساختار مدل SimHyd (Podger, 2004; Mohammadivand et al., 2019)

Figure 3- Structure of SimHyd model (Podger, 2004; Mohammadivand et al., 2019)



شکل ۴- ساختار مدل SMAR (Podger, 2004)

Figure 4- Structure of SMAR model (Podger, 2004)

این مدل‌ها دارای هفت بهینه‌ساز به‌منظور واسنجی خودکار مدل‌هاست: الگوریتم ژنتیک[1]، الگوی جست و جوی چندآغازه[2]، نمونه‌برداری تصادفی یکنواخت[3]، بهینه‌ساز با شروع چندگانه روزنبرک[4]، تک آغازه روزنبرک[5]، روش تکاملی به‌هم ریخته پیچیده[6]، الگوی جست و جو[7] (Razaghian et al., 2018). همچنین، این مدل‌ها از هشت تابع هدف اولیه شامل ضریب نش–ساتکلیف[8]، مجموع مربعات خطا[9]، ریشهٔ میانگین مربعات خطا[10]، اختلاف ریشهٔ میانگین مربعات در اریبی[11]، مقدار مطلق خطا[12]، مجموع مربع ریشه‌ها[13]، مجموع مربعات اختلاف مربعات[14] و مجموع اختلاف لگاریتم‌ها[15] بهره می‌برند که به‌منظور ارزیابی کمی نتایج صحت‌سنجی استفاده می‌شوند (Razaghian et al., 2018).

پس از انتخاب مدل هیدرولوژیکی، در مرحلهٔ بعدی با بررسی کمی و کیفی آمار هیدرومتری و هواشناسی ایستگاه‌های گالیکش و لزوره، دورهٔ آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ به‌طور مشترک برای شبیه‌سازی مدل‌های هیدرلوژیکی انتخاب شد و دورهٔ ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ برای واسنجی مدل‌ها و دورهٔ ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ برای صحت‌سنجی مدل‌ها انتخاب شدند. در نهایت، مدل‌ها به کمک چهار معیار ارزیابی R^2، NS، RMSE و MAPE مقایسه شدند. روابط (۱) تا (۴) به‌ترتیب برای محاسبهٔ ضریب تبیین (R^2)، ضریب ناش–ساتکلیف (NS)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد قدرمطلق خطا (MAPE) استفاده می‌شود.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_o - \overline{Q_o})(Q_s - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(Q_o - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^{N}(Q_S - \overline{Q_S})^2}} \right)^2 \quad (۱)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_s - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_s - Q_o)^2}{N}} \quad (۳)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{Q_o - Q_s}{Q_o}\right|}{N} \times 100 \quad (۴)$$

در این معادلات N تعداد مشاهدات، Q_o و Q_s مقادیر متناظر مشاهداتی و پیش‌بینی شده، $\overline{Q_o}$ و $\overline{Q_s}$ نیز میانگین ریاضی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است.

[1] Genetic Algorithm
[2] Pattern Search Multi-Start
[3] Uniform Random Sampling
[4] Rosenbrock Multi-Start Optimizer
[5] Rosenbrock Single-Start
[6] Shuffled Complex Evolution Method
[7] Pattern Search
[8] Nash-Sutcliffe Coefficient
[9] Sum of Squares Error
[10] Root Mean Square Error
[11] Root Mean Square Different about Bias
[12] Absolute Bias
[13] Sum of Squarea Root
[14] Sum of Squares Difference of Square
[15] Sum of Difference of Logs

۲-۳- تحلیل حساسیت

حساسیت‌سنجی پارامترهای مدل برای تعیین میزان حساسیت مدل به پارامترهای موجود در آن ضروری است (Trivedi et al., 2021) و از این طریق می‌توان پارامترهایی را که نسبت به بقیه نیازمند دقت و توجه بیش‌تری هستند، مشخص نمود (Razaghian et al., 2018). بنابراین به‌منظور تحلیل حساسیت مدل، از روش تحلیل حساسیت جزئی (مطلق) استفاده شد (Rostami Khalaj et al., 2019). پس از اجرای اولیهٔ مدل و تهیهٔ مقادیر بهینهٔ پارامترها، از تغییر مقادیر هر یک از پارامترها و نیز ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها استفاده و رواناب خروجی حوزهٔ آبخیز شبیه‌سازی شد. مقدار تأثیر تغییر هر پارامتر مدل بر خروجی با استفاده از معیار ارزیابی RMSE مورد بررسی قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی، مدل‌ها از ۲۸ مارس ۱۹۸۹ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۰ با استفاده از تمامی روش‌های بهینه‌سازی و توابع هدف موجود در مدل‌ها واسنجی شد. هم‌چنین این مدل‌ها نیاز به زمانی برای راه‌اندازی مدل‌ها با عنوان دورهٔ گرم کردن (warm up) دارند که این مدل‌ها امکان تنظیم خودکار دوره‌های warm up را برای واسنجی و صحت‌سنجی فراهم می‌کنند. سپس عملکرد این مدل‌های واسنجی شده برای دوره‌ای که واسنجی استفاده نشده است آزمایش شده و صحت‌سنجی مدل‌ها از یک آگوست ۲۰۱۰ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۹ انجام شد. در ادامهٔ نتایج رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بررسی پتانسیل مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین، پس از ارزیابی مدل با استفاده از پارامترهای بهینه شده، حساسیت هر یک از پارامترهای سه مدل Sacramento، SimHyd و SMAR در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضهٔ مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی با مدل Sacramento

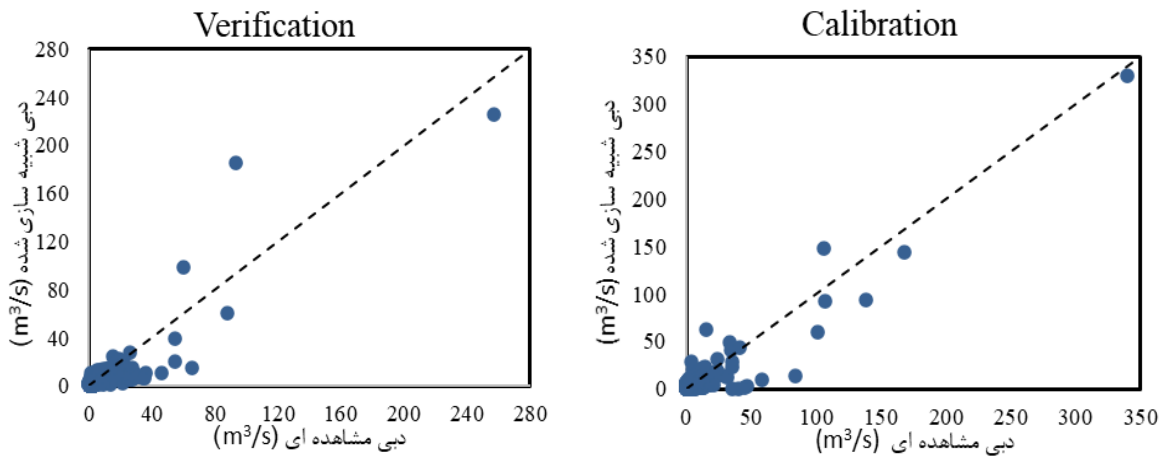
دبی حوزهٔ آبخیز توسط مدل Sacramento برای دورهٔ زمانی واسنجی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ در ایستگاه هیدرومتری گالیکش شبیه‌سازی شد. نتایج ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب ارزیابی نشان داد که مدل بهینه‌شده توسط بهینه‌ساز الگوی جست و جو و تابع هدف اولیهٔ ضریب تش-ساتکلیف از قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز گالیکش برخوردار است (جدول ۵). در پژوهش‌های مشابه نیز می‌توان به نتایج Salmani et al. (2014) در حوزهٔ آبخیز ارازکوسه، Yan et al. (2014) در رودخانهٔ واقع در جورجیای ایالات متحده، Kalbali (2015) در حوزهٔ آبخیز ارازکوسه استان گلستان و Daechini et al. (2022) در حوضهٔ گرگانرود اشاره کرد. تمامی این پژوهش‌ها کارایی مناسب این مدل را در مقایسه با سایر مدل‌های مورد استفاده نشان داد که هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر است. در ادامه، نمودار روابط رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است (شکل ۵). هم‌چنین در شکل ۶ ، نمودار مقایسه‌ای سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شد.

با توجه به شکل ۶، علی‌رغم عملکرد مطلوب مدل، اما نتوانسته دبی‌های اوج را به درستی شبیه‌سازی نماید. به‌طور کلی این مدل در شبیه‌سازی مقادیر بالای جریان عملکرد خوبی نداشته و این امر به‌شدت در سایر مدل‌ها نیز دیده می‌شود. اما جریان‌هایی با مقادیر متوسط و کم را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. در جدول ۲ نیز مقادیر بهینه شدهٔ پارامترها پس از مدل‌سازی بارش-رواناب نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، دو پارامتر Sarva و Adimp به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تغییر را نسبت به مقدار پیش‌فرض خود داشته‌اند.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی با مدل SimHyd

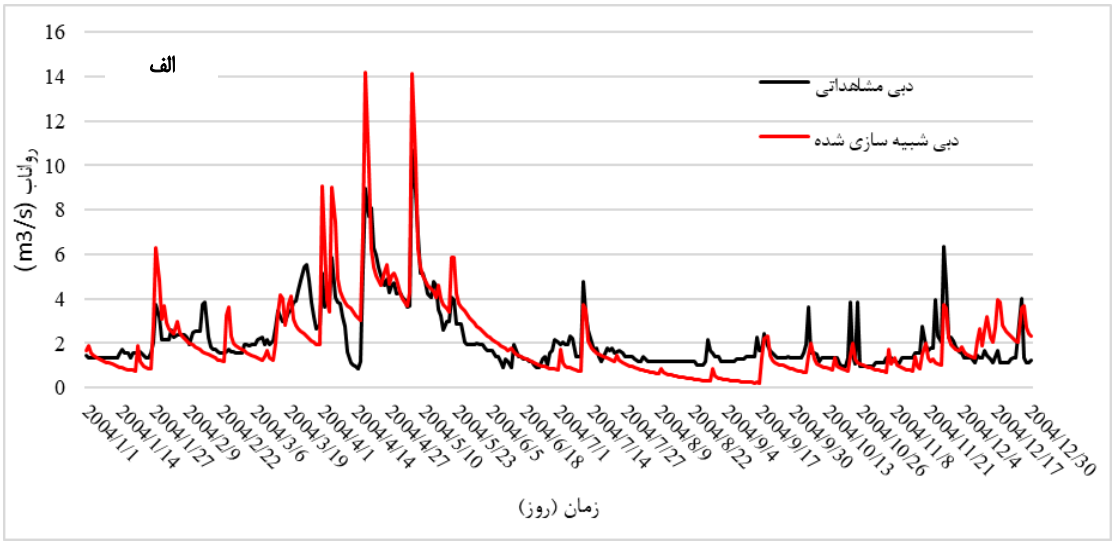
دبی حوضهٔ گالیکش نیز توسط مدل Simhyd برای دورهٔ مورد نظر شبیه‌سازی شد. برازش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علی‌رغم نزدیکی دبی‌های حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، این مدل نتوانسته است تمامی دبی‌های اوج را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید. نتایج ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب ارزیابی نشان داد که مدل بهینه‌شده با روش الگوی جست و جو و تابع هدف اولیه ضریب نش-ساتکلیف عملکرد مطلوبی را در شبیه‌سازی رواناب حوضه داشته است (جدول ۵). اما مقایسهٔ عملکرد مدل SimHyd با مدل Sacramento، حاکی از عملکرد پایین‌تر این مدل است. هم‌چنین نمودار مقایسه‌ای سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۸ ارائه شده است.

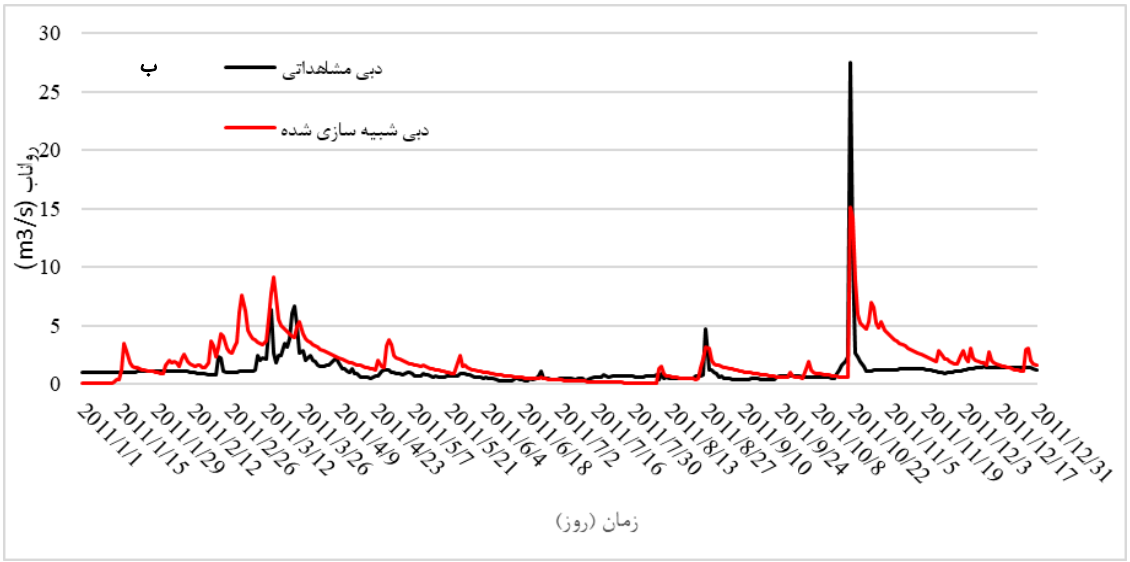
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود این مدل در دورهٔ صحت‌سنجی عملکرد بهتری داشته است، اما به‌طور کلی می‌توان گفت این مدل توانایی نشان دادن روند کلی جریان را دارا است. در جدول ۳ نیز مقادیر بهینه شدهٔ این پارامترها پس از مدل‌سازی بارش-رواناب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین تمامی پارامترهای بهینه شده پارامتر ضریب جریان پایه کم‌ترین تغییر و پارامتر آستانهٔ نفوذناپذیری بیش‌ترین تغییر را نسبت به مقادیر پیش‌فرض خود داشته‌اند.



شکل ۵- رابطهٔ بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل Sacramento

Figure 5- Relationship between observed and simulated runoff using the Sacramento model





شکل ۶- سری زمانی رواناب روزانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) در مدل Sacramento

Figure 6- Time series of observed and simulated daily runoff in the calibration (a) and verification (b) periods using the Sacramento model

جدول ۲- پارامترهای بهینه شدهٔ مدل Sacramento (Podger, 2004; Daechini et al., 2022)

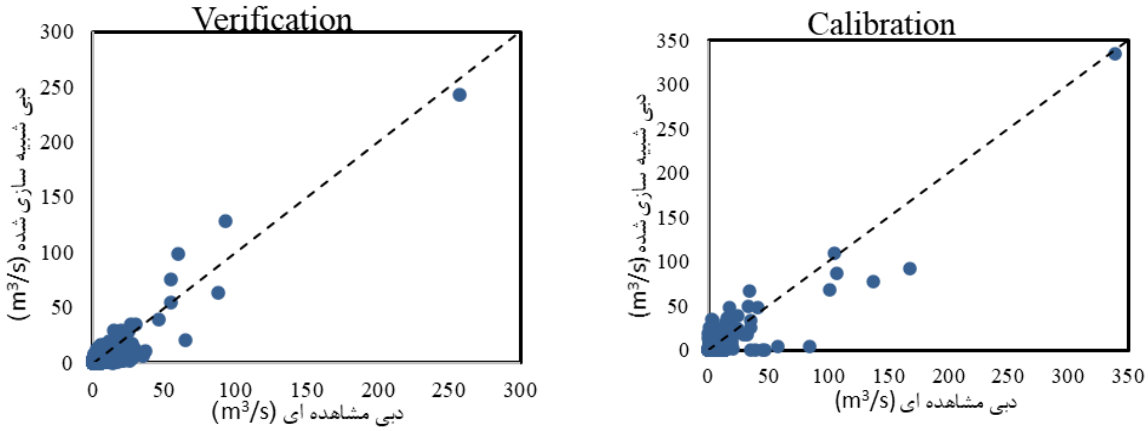
Table 2- Calibrated parameters of the Sacramento model (Podger, 2004; Daechini et al., 2022)

پارامتر	توضیحات	مقدار پیش‌فرض	محدودهٔ پارامترها	مقدار بهینه شده
Adimp (-)	بخش اضافی PCTIM که توسعه‌دهندهٔ منطقهٔ نفوذناپذیر تحت شرایط اشباع خاک است.	0.01	0-1	0.01
Lzfpm (میلی‌متر)	حداکثر آب مازاد اولیهٔ منطقهٔ پایینی	40	0-50	5.82
Lzfsm (متر)	حداکثر آب مازاد آزاد منطقهٔ پایینی	23	0-50	49.04
Lzpk (1/day)	نسبتی از آب در LZFPM که به‌عنوان جریان پایهٔ روزانه تخلیه می‌شود.	0.009	0-1	0.8
Lzsk (1/day)	نسبتی از آب در LZFSM که به‌عنوان جریان پایهٔ روزانه تخلیه می‌شود.	0.043	0-1	0.41
Lztwm (میلی‌متر)	حداکثر کشش آب منطقهٔ پایینی	130	0-400	355.44
Pctim (-)	بخش نفوذناپذیر حوضه که به تولید رواناب مستقیم منجر می‌شود.	0.01	0-1	0.0005
Pfree (-)	حداقل سهم نفوذ آب از منطقهٔ بالایی به منطقهٔ پایینی برای تغذیهٔ مخزن‌های آب آزاد منطقه	0.063	0-1	0.61
Rexp (-)	توان تعیین‌کنندهٔ نرخ تغییرات نفوذ با تغییر ذخیره‌سازی آب منطقهٔ پایینی	1	0-3	1.75
Rserv (-)	کسری از آب آزاد منطقهٔ پایینی که برای نفوذ موجود است.	0.3	0-1	0.73
Sarva (-)	کسری که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش گیاهی پوشیده شده است.	0.01	0-1	1.19E-08
Side (-)	کسری از جریان پایهٔ مشاهده شده‌ای، که حوضه را به‌عنوان جریان آب‌های زیرزمینی ترک می‌کند.	0	0-1	0.4
Ssout (مترمکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع)	حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان منتقل شود.	0.001	0-1	0.001
Uzfwm (میلی‌متر)	حداکثر آب منطقهٔ فوقانی	40	0-80	73.23
Uzk (1/day)	نسبتی از آب در UZFWM که به‌عنوان جریان زیرقشری روزانه تخلیه می‌شود.	0.245	0-1	0.46
Uztwm (میلی‌متر)	حداکثر کشش آب منطقهٔ بالایی	50	0-100	3.72
Zperc (-)	عاملی که به‌منظور تعریف حداکثر نرخ نفوذ به‌کار می‌رود.	40	0-80	79.81

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی با مدل SMAR

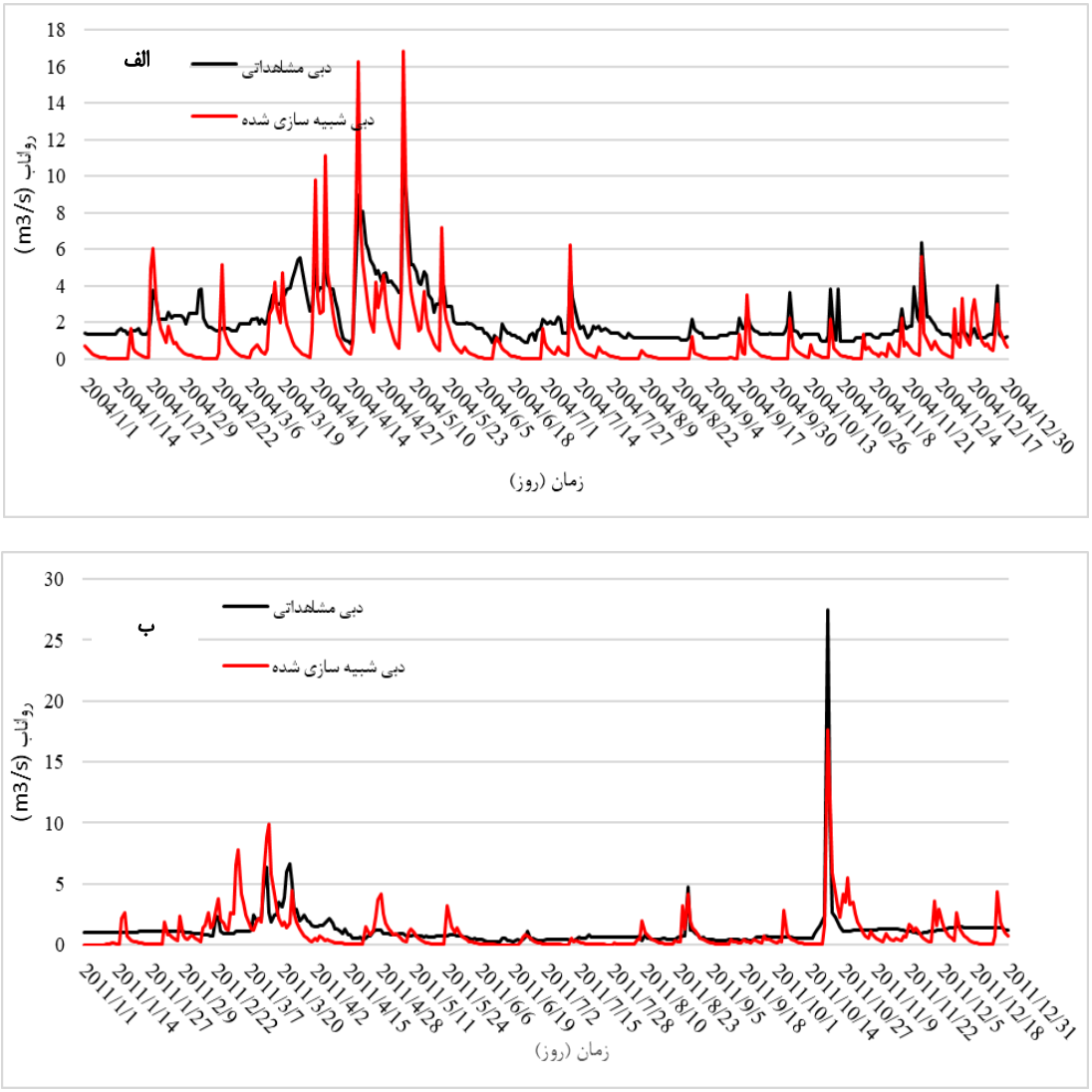
نتایج برازش دبی شبیه‌سازی شدهٔ حوزهٔ آبخیز گالیکش توسط مدل SMAR و دبی مشاهداتی برای دورهٔ مورد نظر در دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است (شکل ۹). پس از واسنجی خودکار مدل نیز مدل بهینه شده با استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک و تابع هدف اولیهٔ مجموع مربعات خطا بهترین عملکرد را داشته است. با توجه به نتایج می‌توان گفت این مدل در شبیه‌سازی رواناب روزانه روند خاصی را نشان نمی‌دهد، هم‌چنین نتایج ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب ارزیابی نشان داد که مدل عملکرد ضعیفی را نسبت به دیگر مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب حوضه داشته است (جدول ۵)، که این نتایج با یافته‌های Rostami khalaj et al. (2016) در حوزهٔ آبخیز نوده در استان گلستان هم‌راستا است. در ادامه نیز نمودار مقایسه‌ای سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، این مدل در شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز گالیکش موفق نبوده و نتوانسته است روند جریان را نشان دهد. در جدول ۴ نیز مقادیر بهینه شدهٔ پارامترهای مدل پس از مدل‌سازی بارش-رواناب نشان داده شده است. در بین نُه پارامتر این مدل نیز دو پارامتر Y و Z بیش‌ترین افزایش را نسبت به مقدار پیش‌فرض خود داشته‌اند.



شکل ۷- رابطهٔ بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل SimHyd

Figure 7- Relationship between observed and simulated runoff using the SimHyd model



شکل ۸- سری زمانی رواناب روزانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) در مدل SimHyd

Figure 8- Time series of observed and simulated daily runoff in the calibration (a) and verification (b) periods using the SimHyd model

جدول ۳- پارامترهای بهینه شدهٔ مدل SimHyd (Podger, 2004; Yu and Zhu, 2015)

Table 3- Calibrated parameters of the SimHyd model al. (Podger, 2004; Yu and Zhu, 2015)

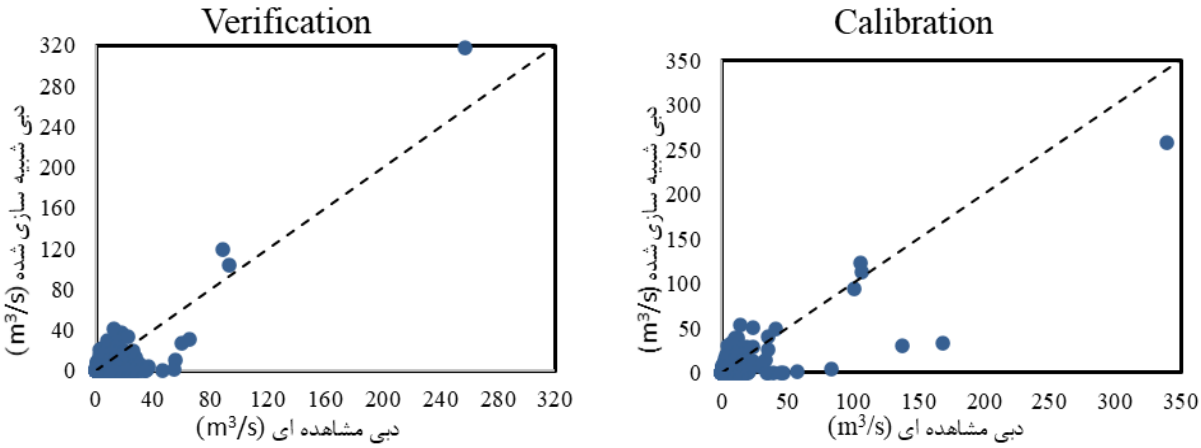
پارامتر	مقدار پیش‌فرض	محدودهٔ پارامترها	مقدار بهینه شده
ضریب جریان پایه (-)	0.3	0-1	0.27
آستانه نفوذناپذیری (میلی‌متر)	1	0-5	4.99
ضریب نفوذ (-)	200	0-400	356.15
شکل نفوذ (-)	3	0-10	1.32
ضریب جریان میانی (-)	0.1	0-1	0.0006
نسبت نفوذناپذیری (-)	0.9	0-1	0.94
ظرفیت ذخیرهٔ برگاب (میلی‌متر)	1.5	0-5	0.002
ضریب ذخیره (-)	0.2	0-1	0.86
ظرفیت ذخیرهٔ رطوبتی خاک (میلی‌متر)	320	1-500	429.96

۳-۴- حساسیت‌سنجی پارامترهای مدل‌های Sacramento، SimHyd و SMAR

نتایج حاصل از فرآیند تحلیل حساسیت تمامی پارامترهای مدل‌های Sacramento، SimHyd و SMAR به‌منظور درک حساسیت مدل‌ها به تغییر پارامترها و تأثیر هر یک بر شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوزهٔ آبخیز گالیکش در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در بین ۱۷ پارامتر مدل Sacramento با کاهش مقدار دو پارامتر Lztwm (حداکثر کشش آب منطقهٔ پایینی) و Zperc (حداکثر نرخ نفوذ) نتایج تغییر زیادی خواهند داشت؛ اما این دو پارامتر به افزایش مقدار حساس نبوده و با افزایش مقدار این پارامترها مقدار معیار ارزیابی RMSE تغییر زیادی نداشته است. از طرف دیگر با افزایش مقدار پارامترها، پارامتر Rexp مربوط به تغییرات نرخ نفوذ، بیش‌ترین تأثیر را بر نتایج شبیه‌سازی داشته است (شکل ۱۱).

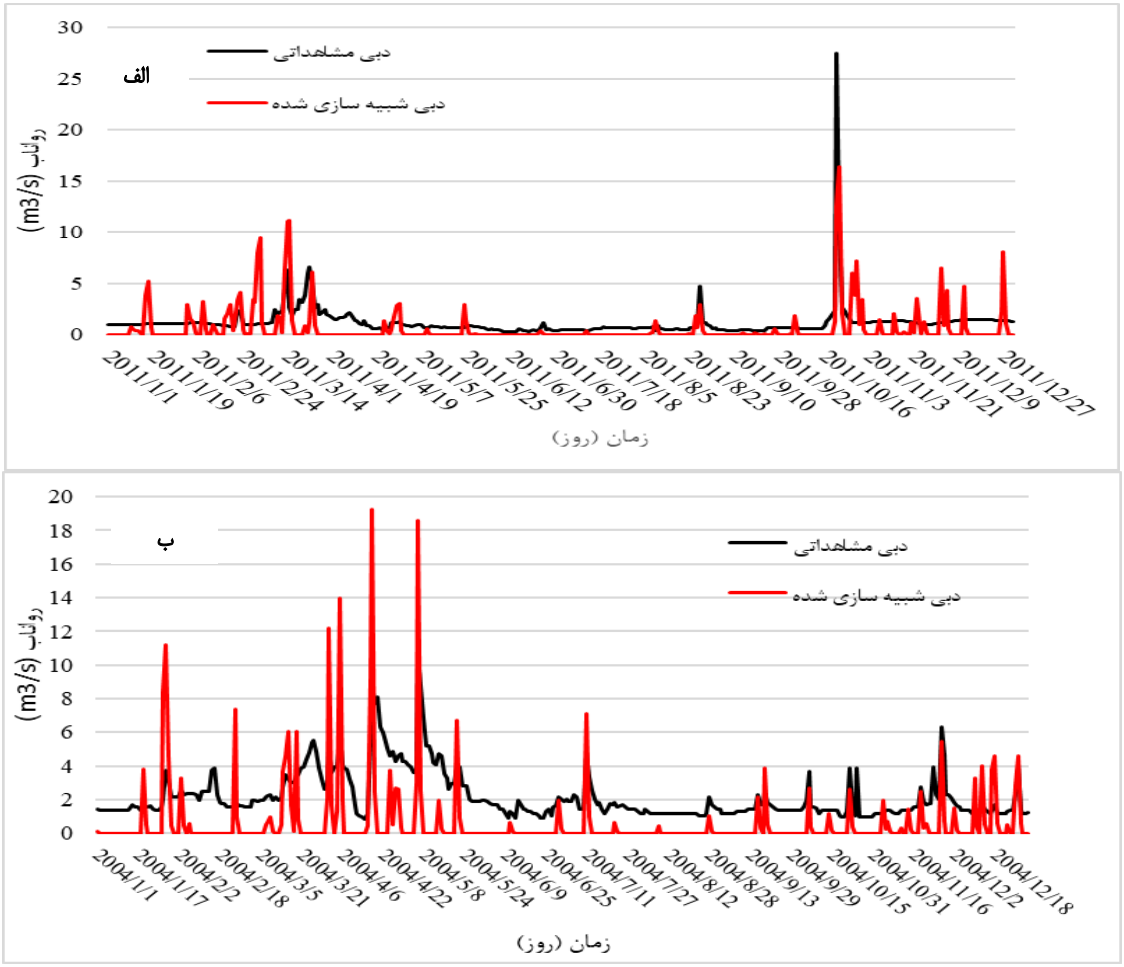
در مدل SimHyd نیز دو پارامتر نسبت نفوذناپذیری و ضریب نفوذ بیش‌ترین حساسیت را به کاهش مقادیر خود داشته‌اند (شکل ۱۲). هم‌چنین، با افزایش مقدار پارامتر شکل نفوذ بیش‌ترین تأثیر را بر شبیه‌سازی داشته است که با نتایج به‌دست آمده توسط Yonesi et al. (2020) در حوزهٔ آبخیز دشت سیلاخور و Shin et al. (2013) در تعدادی از حوضه‌های استرالیا هم‌راستاست.

در مدل SMAR نیز افزایش مقدار پارامتر H که نسبت رواناب مستقیم است، بیش‌ترین تغییر را در نتایج شبیه‌سازی ایجاد نموده است؛ اما همان‌طور که مشاهده می‌شود این تغییرات چشم‌گیر نیست. هم‌چنین مدل به کاهش مقدار پارامتر T مربوط به ظرفیت ذخیره برگابی، حساس بوده و کاهش مقدار این پارامتر بیش‌ترین تأثیر را بر شبیه‌سازی داشته است (شکل ۱۳). از پژوهش‌های مشابه نیز می‌توان به Yonesi et al. (2020) در حوزهٔ آبخیز دشت سیلاخور اشاره نمود.



شکل ۹- رابطهٔ بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل SMAR

Figure 9- Relationship between observed and simulated runoff in the SMAR model



شکل ۱۰- سری زمانی رواناب روزانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) در مدل SMAR

Figure 10- Time series of observed and simulated daily runoff in the calibration (a) and verification (b) periods using the SMAR model

جدول ۴- مقادیر پیش‌فرض پارامترهای بهینه شدهٔ مدل SMAR (Daechini et al., 2022; Podger, 2004)

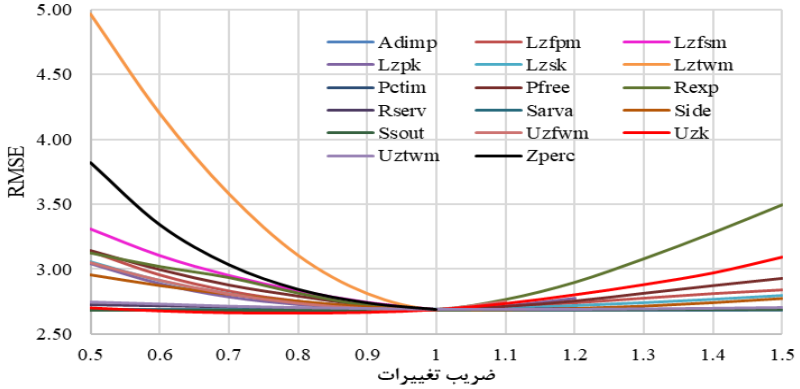
Table 4- Calibrated parameters of the SMAR model (Daechini et al., 2022; Podger, 2004)

پارامتر	توضیحات	مقدار پیش‌فرض	محدودهٔ پارامترها	مقدار بهینه شده
C (-)	میزان تبخیر آب زیرزمینی	0	0-1	0.28
G(-)	ضریب رواناب آب زیرزمینی	0	0-1	0.55
H (-)	نسبت رواناب مستقیم	0	0-1	0.35
Kg (میلی‌متر بر روز)	ضریب ذخیره‌سازی	0	0-1	0.7
N	مسیریابی خطی U.H	1	1-6	1.11
NK	مسیریابی خطی U.H N*K	1	0.01-1	0.96
T (-)	ظرفیت ذخیرهٔ برگابی	0	0-1	0.94
Y (میلی‌متر بر روز)	میزان نفوذ	0	00-5000	1509.8
Z (میلی‌متر بر روز)	عمق ذخیره‌سازی رطوبت خاک	200	0-5000	1686.27

جدول ۵- نتایج مدل‌های Sacramento، SimHyd و SMAR برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

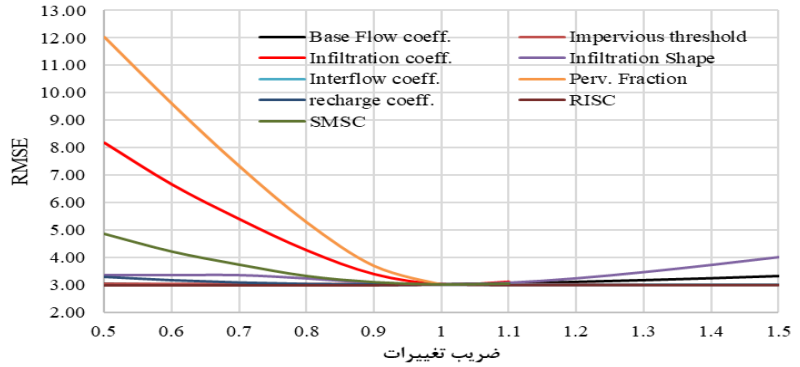
Table 5- Results of Sacramento, SimHyd, and SMAR models for calibration and verification periods

مدل	واسنجی				صحت‌سنجی			
	RMSE	MAPE	R^2	NS	RMSE	MAPE	R^2	NS
مدل Sacramento	2.44	59	0.82	0.82	3.2	81.9	0.72	0.7
مدل Simhyd	3.09	76.3	0.75	0.71	2.85	79.6	0.79	0.76
مدل SMAR	4.18	96.2	0.56	0.46	4.2	97.5	0.65	0.48



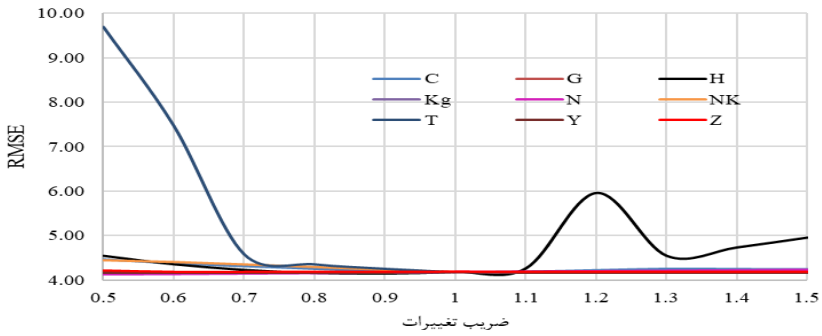
شکل ۱۱- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل Sacramento

Figure 11- Sensitivity graph for the parameters of the Sacramento model



شکل ۱۲- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل SimHyd

Figure 12- Sensitivity graph for the parameters of SimHyd



شکل ۱۳- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل SMAR

Figure 13- Sensitivity graph for the parameters of SMAR

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پیش‌بینی رواناب و نیز غیرخطی بودن فرآیند تبدیل بارش به رواناب، تاکنون مدل‌های گوناگونی برای تشریح این پیچیدگی‌ها پیشنهاد شده است. اما ساختار مدل‌ها و رویکردهای متفاوت این مدل‌ها منجر به پیش‌بینی‌های متفاوت آن‌ها شده که این موضوع منجر به اهمیت ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌ها برای اهداف گوناگون شده است. از طرفی با توجه به نقص و کمبود آمار طولانی‌مدت و دقیق، انتخاب مدلی که بتواند نتایج قابل‌قبولی را ارائه دهد ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور در این تحقیق از سه مدل هیدرولوژیکی Sacramento، SimHyd و SMAR برای شبیه‌سازی رواناب حوزهٔ آبخیز گالیکش استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داد که هر سه مدل توانایی شبیه‌سازی رواناب خروجی حوزهٔ آبخیز را دارا بوده، اما با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته مدل Sacramento بهترین عملکرد را نسبت به دو مدل دیگر داشته است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی می‌توان دریافت که این مدل‌ها در شبیه‌سازی مقادیر متوسط بهتر از مقادیر بیشینه و کمینه عمل نموده‌اند که دلیل آن می‌تواند یکپارچه بودن این مدل‌ها باشد. زیرا در مدل‌های یکپارچه عواملی مانند خصوصیات فیزیکی حوزهٔ آبخیز نادیده گرفته می‌شوند. البته باید به این نکته نیز توجه شود که اختلاف

دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل با دبی مشاهداتی ممکن است به‌دلیل خطا در قرائت داده‌های ورودی، خطا در ساده‌سازی ساختار مدل و هم‌چنین بهینه نبودن پارامترهای مدل باشد. باتوجه به اهمیت تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و تأثیر میزان این پارامترها در شبیه‌سازی رواناب، در این پژوهش حساسیت تمامی پارامترهای مدل‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که بعضی از پارامترها در شبیه‌سازی رواناب نسبت به دیگر پارامترها حساس‌تر هستند که میزان بهینهٔ این پارامترها با توجه به حساسیت زیاد آن‌ها باید در هنگام شبیه‌سازی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت، مدل‌های مذکور با توجه به احتیاجات داده‌ای کم آن‌ها می‌توانند مدل مناسبی برای شبیه‌سازی رواناب به‌خصوص در حوضه‌های فاقد آمار به‌شمار روند.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر خود را از گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اعلام کنند.

منابع

احمدپور، ع.، میرهاشمی، س.ح.، و حقیقت‌جو، پ. (۱۳۹۸). بررسی دقت مدل مفهومی HMS-SMA و مدل دو خطی سری زمانی در پیش‌بینی رواناب روزانه مطالعه موردی: (حوضه مارون ایستگاه هیدرومتری ایدنک). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۱۷۶-۱۶۱.

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع.، و دیرمجائی، آ. (۱۳۹۹). برآورد رواناب با استفاده از مدل IHACRES بر اساس داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS و مدل‌های CMIP5 (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود-منطقه آق‌قلا). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۳)، ۶۷۱-۶۵۹.

پرواز، م.، و شاهویی، و. (۱۴۰۱). بررسی دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل یکپارچهAWBM در استان کردستان در ایستگاه سنته. *مطالعات علوم محیط زیست*، ۷(۳)، ۵۳۵۹-۵۳۴۷.

پوررضا بیلندی، م.، معماریان خلیل‌آباد، ه.، شهیدی، ع.، و رهنما، س. (۱۳۹۸). روش‌های ترکیبی چندگانه مدل‌سازی برای تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: زیرحوضه آبریز قره‌سو، استان کرمانشاه). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۱۹۳-۲۰۶.

جباری، ا.، و رضائی، ح. (۱۳۹۷). انتخاب مدل‌های مختلف در مسائل مربوط به مهندسی منابع آب. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی ارومیه، ۱۳۷ صفحه.

خداخواه، ه.، قربانی، خ.، سالاری جزی، م.، و عبدالحسینی، م. (۱۴۰۰). برآورد رواناب ماهانه و فصلی با مدل‌های سری زمانی، درخت تصمیم و رگرسیون خطی چندمتغیره. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۸(۴)، ۲۷-۵۲.

دائی‌چینی، ف.، وفاخواه، م.، موسوی، و.، و ذبیحی سیلابی، م. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی پنج مدل بیلان آبی در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز گرگانرود. *علوم آب و خاک*، ۲۶ (۲)، ۲۶۳-۲۸۱.

رزاقیان، ه.، شاهدی، ک.، و محسنی، ب. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب SimHyd تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم. پژوهشنامه *مدیریت حوزه آبخیز*، ۹(۱۷)، ۲۱۶-۲۲۵.

رستمی خلج، م.، سلاجقه، ع.، مقدم نیا، ع.، خلیقی سیگارودی، ش.، و آذرخشی، م. (۱۳۹۸). مدل‌سازی بارش-رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم، مطالعه موردی: حوضه کارده مشهد. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۱)، ۲۷-۱۵.

رستمی‌خلج، م.، مقدم‌نیا، ع.، سلمانی، ح.، و سپهوند، ع. (۱۳۹۵). بررسی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های بارش رواناب AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank. *اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۷(۲)، ۴۷-۶۳.

رضایی، ح.، جباری، آ.، بهمنش، ج.، و حصاری، ب. (۱۳۹۵). مدل‌سازی رواناب روزانه حوضه نازلوچای در غرب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل Tank. *پژوهش‌های آب و خاک*، ۲۳(۶)، ۱۲۳-۱۴۱.

سالاری جزی، م.، قربانی، خ.، سهرابیان، ا.، و عبدالحسینی، م. (۱۳۹۵). پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه با استفاده از مدل‌های داده محور. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰(۴)، ۴۷۹-۴۸۸.

سلمانی، ح.، بهره‌مند، ع.، صابرچناری، ک.، و رستمی‌خلج، م. (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب AWBM، Sacramento و Tank در شبیه‌سازی رواناب رودخانه ارازکوسه حوضه آبخیز گرگانرود استان گلستان. *اکوهیدرولوژی*، ۱(۳)، ۲۲۱-۲۰۷.

شریفی، ز.، اسمعلی‌عوری، ا.، حزباوی، ز.، و گلشن، م. (۱۴۰۰). کاربرد مدل SIMHYD در مدل‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب. *علوم و فنون آبخاکی*، ۲(۲)، ۲۸-۴۰.

علیزاده، ا. (۱۳۹۱). اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ نوزدهم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۹۴۲ صفحه.

قربانی، خ.، نعیمی‌کلورزی، ز.، سالاری‌جزی، م.، و دهقانی، ا. (۱۳۹۵). برآورد جریان ماهانه در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از پارامترهای اقلیمی و فیزیوگرافی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۲۰۷-۲۲۴.

قریشی قره‌تکان، س.ک.، قره‌چلو، س.، محجوبی، ع.، گلیان، س.، و صالحی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی منابع آب سطحی قابل دسترس در

حوضه مرزی قره‌تیکان با استفاده از محصولات ماهواره‌ای و GIS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۱-۱۳.

کلبعلی، ا. (۱۳۹۴). ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب SimHyd، Sacramento، AWBM و Tank در شبیه‌سازی رواناب ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه حوضه آبخیز گرگانرود استان گلستان. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل.

محمدی‌وند، م.، عراقی‌نژاد، ش.، ابراهیمی، ک.، و مدرسی، ف. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد مدل‌های AWBM، Sacramento و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۷)، ۱۷۵۹-۱۷۶۹.

مرادی، ا.، نجفی‌نژاد. ع.، اونق، م.، کمکی، چ.ب.، و فولادی منصوری، م. (۱۳۹۷). آشکارسازی روند تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر دبی و بار معلق شبیه‌سازی شده با مدل SWAT (مطالعه موردی: آبخیز گالیکش استان گلستان). *مرتع و آبخیزداری*، ۷۱(۲)، ۴۸۹-۵۰۴.

میرزانیا، ا.، ملک احمدی، ح.، شاه‌محمدی، ی.، و ابراهیم‌زاده، ع. (۱۴۰۰). تأثیر موجک بر افزایش دقت مدل‌های تخمینی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه صوفی چای). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۳)، ۶۷-۷۹.

نعیمی‌کلورزی، ز.، قربانی، خ.، سالاری‌جزی، م.، و دهقانی، ا. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر پارامترهای فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه در شبیه‌سازی جریان فصلی رودخانه. *اکوهیدرولوژی*، ۳(۴)، ۵۴۵-۵۵۵.

یونسی، ح.، یوسفی سهزابی، ح.، ارشیا، آ.، و یاراحمدی، ی. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی بارش رواناب با استفاده از ابزار RRL (مطالعه موردی: ایستگاه رحیم‌آباد-دشت سیلاخور). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۴)، ۱۳۶۱-۱۳۴۸.

References

Adib, A., Salarijazi, M., & Najafpour, K. (2010). Evaluation of synthetic outlet runoff assessment models. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(3),13-18.

Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A., & Deyrmajai, A., (2020). Runoff estimation using IHACRES model based on CHIRPS satellite data and CMIP5 models (case study: Gorganroud basin-Aq Qala area). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 659-671 (in Persian).

Ahmadpour, A., Mirhashemi, S., & Haghighat jou, P. (2019). Evaluation of the accuracy of HMS-SMA and bilinear time series models in predicting daily runoff (Case study: Idenak station at Maroun basin). *Jornal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 161-176 (in Persian).

Alizadeh, A. (2006). *Principles of applied hydrology*. 19th Edition: Publications of Imam Reza University, 942 pages (in Persian).

Amollo, C. (2020). Comparing performance of different lumped conceptual hydrological models: a case study of River Kafu catchment. Ph.D. Thesis, Kyambogo University, Kampala, Uganda.

Burnash, R.J., Ferral, R.L., & McGuire, R.A. (1973). *A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers.* US Department of Commerce, National Weather Service, and State of California, Department of Water Resources.

Chiew, F.H.S., Peel, M.C., & Western, A.W. (2002). Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. Pp. 335-367, In: *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*.

Clarke, R.T. (1994). *Statistical modelling in hydrology*. 1t Edition, *John Wiley & Sons*.

Daechini, F., Vafakhah, M., Moosavi, V., & Zabihi Silabi, M. (2022). Performance assessment of five water balance models for runoff simulation in the Gorganrood watershed. *Journal of Water and Soil Science*, 26(2), 263-281 (in Persian).

Duan, Q., Ajami, N.K., Gao, X., & Sorooshian, S. (2007). Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in water Resources*, 30(5), 1371-1386.

Ghorbani, Kh., Naeimi Kalourazi, Z., Salarijazi, M., & Dehghani, A.A. (2016). Estimation of monthly discharge using climatic and physiographic parameters of ungauged basins. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 207-224 (in Persian).

Ghoreishi GharahTikan, S.K., Gharechelou, S., Mahjoobi, E., Golian, S., & Salehi, H. (2022). Evaluation of available surface water resources in Qarah Tikan border basin using satellite products and GIS. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 1-13 (in Persian).

Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Song, Y., Liu, M., & Dai, Z. (2022). Assessment of multiple precipitation interpolation methods and uncertainty analysis of hydrological models in Chaohe River basin, China. *Water SA*, 48(3), 324-334.

Jabbari, A., & Rezaie, H. (2015). *Choosing different models in water resources engineering issues*. 1th Edition: Urmia Academic Jihad Publications, 137 pages (in Persian).

Kalbali, E. (2015). Evaluation of the efficiency of AWBM, Sacramento, SimHyd and Tank rainfall runoff model in runoff simulation in Arazkoose hydrometric station in Goorganrood basin, Golestan porovince, MS.c. Thesis, University of Zabol, Zabol, Iran. (in Persian).

Khodakhah, H., Ghorbani, K., Salarijazi, M., & Abdolhosseini, M. (2022). Monthly and

seasonal runoff estimation using time series, decision tree, and multivariable linear regression. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(4), 27-52 (in Persian).

Kunnath-Poovakka, A., & Eldho, T.I. (2019). A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India. *Journal of Earth System Science*, 128(2), 1-15.

Mirzania, E., Malek Ahmadi, H., Shahmohammadi, Y., & Ebrahimzadeh, A. (2021). Impact of wavelet on accuracy of estimated models in rainfall-runoff modeling (Case study: Sufi Chay). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 67-79 (in Persian).

Mohammadivand, M.R., Araghinejad, Sh., Ebrahimi, K., & Modaresi, F. (2019). Performance evaluation of AWBM, Sacramento and SimHyd models in runoff simulation of the Amameh watershed using automatic calibration optimization method of genetic algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1759-1769 (in Persian).

Moradi, A., Nakafinejad, A., Ownagh, M., Komaki, C.B., & Foladi Mansouri, M. (2018). Landuse changes detection and evaluation of their effects on simulated discharge and sediment yield using SWAT model (Case Study: Galikesh Watershed, Golestan Province). *Journal of Range and Watershed Managment*, 71(2), 489-504 (in Persian).

Mubialiwo, A., Abebe, A., & Onyutha, C. (2021). Performance of rainfall–runoff models in reproducing hydrological extremes: a case of the River Malaba sub-catchment. *SN Applied Sciences*, 3(4), 1-24.

Naeimi Kalourazi, Z., Ghorbani, K., Salarijazi, M., & Dehghani, A.A. (2016). Investigation of effect of basin's physiographic and climatic parameters in seasonal river flow simulation. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), 545-555 (in Persian).

Narbondo, S., Gorgoglione, A., Crisci, M., & Chreties, C. (2020). Enhancing physical similarity approach to predict runoff in ungauged watersheds in sub-tropical regions. *Water*, 12(2), 528.

O'connell, P.E., Nash, J.E., & Farrell, J.P. (1970). River flow forecasting through conceptual models part II-The Brosna catchment at Ferbane. *hydrology*, 10(4), 317-329.

Parvaz, M., & Shahoei, S.V. (2022). Investigation using AWBM model for monthly runoff simulation of Urmia Lake basin in Kurdistan Province, Sonnate station. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(3), 5347-5359 (in Persian).

Podger, G. (2004). *Rainfall runoff library (RRL). Catchment Modeling Toolkit prepared by the CRC for Catchment Hydrology*, Australia, 110 pages.

Porter, J.W., & McMahon, T.A. (1975). Application of a catchment model in southeastern Australia. *Journal of hydrology*, 24(1-2), 121-134.

Pourreza Bilondi, M., Memarian, H., Shahidi, A., & Rahnama, S. (2019). Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations (case study: Gharesou sub-basin, Kermanshah province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 193-206 (in Persian).

Razaghian, H., Shahedi, K., & Mohseni, B. (2018). Evaluation of SIMHYD rainfall-runoff model efficiency in climate change conditions. *Journal of Watershed Management Research*. 9(17), 216-225 (in Persian).

Rezaie, H., Jabbari, A., Behmanesh, J., & Hessari, B. (2017). Modelling the daily runoff of Nazloo Chai watershed at the west side of Urmia Lake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 123-141 (in Persian).

Rostami khalaj, M., Moghadamnia, A., Salmani, H., & Sepahvand, A. (2016). Compare the performance of AWBM, Sacramento, SimHyd, SMAR and Tank. *Natural Ecosystems of Iran*, 7(2), 47-63 (in Persian).

Rostami Khalaj, M., Salajeghe, A., Moghadam Nia, A., Khalighi Sigarodi, S., & Azarakhshi, M. (2019). Rainfall-runoff modeling based on system dynamics approach (Case study: Mashhad Kardeh dam basin). *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 15-27 (in Persian).

Salarijazi, M., Ghorbani, K., Sohrabian, E., & Abdolhosseini, M. (2016). Prediction of daily stream-flow using data driven models. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(4), 479-488 (in Persian).

Salmani, H., Bahremand, A., Saber Chenari, K., & Rostami Khalaj, M. (2014). Evaluation of the efficiency of AWBM, Sacramento and Tank rainfall runoff model in runoff simulation in Arazkoose- Goorganrood basin, Golestan porovince. *Iranian journal of Eco Hydrology*, 1(3), 207-221 (in Persian).

Sharifi, Z., Esmali-Ouri, A., Hazbavi, Z., & Gholshan, M. (2021). Application of SIMHYD model for modeling water balance components. *Journal of Amphibious Science and Technology*, 2(2), 28-40 (in Persian).

Shin, M.J., Guillaume, J.H., Croke, B.F., & Jakeman, A.J. (2013). Addressing ten questions about conceptual rainfall–runoff models with global sensitivity analyses in R. *Journal of Hydrology*, 503, 135-152.

Song, M., Shi, Y., Yao, H., & Zhang, W. (2019). A comparative study of different hydrological model and their application in Bass river catchment. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 562(1), 12116.

Trivedi, A., Galkate, R.V., Gautam, V.K., & Pyasi, S.K. (2021). Development of RRL AWBM model and investigation of its performance, efficiency and suitability in Shipra River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(2),160-167.

Vidyarthi, V.K., & Jain, A. (2022). Incorporating non-uniformity and non-linearity of hydrologic and catchment characteristics in rainfall–runoff modeling using conceptual, data-driven, and hybrid techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 24(2), 350-366.

Wang, W.C., Chau, K.W., Xu, D.M., & Chen, X.Y. (2015). Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition. *Water Resources Management*, 29(8), 2655-2675.

Yan, S., Zhang, Z.Y., Zuo, F.L., & Zhang, W.H. (2014). A comparative study of different hydrological model and their application in little river catchment. *Applied Mechanics and Materials*, 641, 9-13.

Yonesi, H.A., yousefi, H., Arshia, A., & yarahmadi, Y. (2020). Runoff rainfall simulation using RRL Toolkit (case study: Rahim Abad station - Silakhor Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(4), 1348-1361 (in Persian).

Yu, B., & Zhu, Z. (2015). A comparative assessment of AWBM and SimHyd for forested watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), 1200-1212.