

Comparative assessment of IHACRES, AWBM, and Tank models in simulated wet and dry periods

Fatemeh Sadat Rezvani¹, Khalil Ghorbani^{*2}, Meysam Salarijazi³,
Behnaz Yazarloo⁴, Laleh Rezaei Ghaleh⁵

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: f.rezvani1997@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghorbani.khalil@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: meysam.salarijazi@gmail.com
4. Ph.D. Student, Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran. E-mail: yazarlooobehnaz@birjand.ac.ir
5. Ph.D. Student, Dept. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: rezaei_1@ymail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 11.02.2023
Revised: 01.13.2024
Accepted: 01.28.2024

Keywords:
Galikash Watershed,
Hydrological model,
Optimization,
Rainfall-Runoff,
Sensitivity Analysis

ABSTRACT

Background and Objectives: Runoff is the main variable for the hydrological analysis of the watershed, and due to its importance, for several decades, hydrological research has focused on the simulation of rainfall-runoff relationships, which has led to the presentation of many models. Due to the multiplicity of hydrological models, choosing an optimal model among various models is not a simple process. For this purpose, in the present research, after selecting the Galikash watershed from the most flood-prone basins in Golestan province, the performance of three hydrological models AWBM, Tank, and IHACRES were evaluated. The parameters of the models were also analyzed for sensitivity, and finally, the efficiency of the models in wet and dry periods was examined.

Materials and Methods: The amount of daily runoff from the watershed for a period of 30 years (1989-2019) was simulated using each of the mentioned models and using four criteria Nash-Sutcliffe evaluation coefficient, root mean square error, coefficient of determination, and mean absolute percentage error, the performance of each model has been checked in two periods of calibration and validation. After optimizing the values of all the parameters, the sensitivity of the parameters of each model has been analyzed. Finally, after specifying the drought condition with the SPI index, the performance of each model for two wet and dry periods has been investigated and evaluated.

Results: The results indicate that two rainfall-runoff models, IHACRES and AWBM, have almost similar performance. IHACRES model with Nash-Sutcliffe coefficients of 0.73 and 0.75 and RMSE of 2.97 and 2.94, respectively, in two calibration and validation periods and the AWBM model with Nash-Sutcliffe coefficients of 0.74 and 0.69 and RMSE of 2.92 and 3.24 for the calibration and validation periods have shown good performance. Still the Tank model was not successful in simulating the watershed runoff and its performance is lower than the two other models. The sensitivity analysis of the model parameters also showed that K_{base} , H_{11} , and f parameters are the most sensitive to the change of their

values in AWBM, Tank, and IHACRES models, respectively. Finally, the comparison of the performance of the models in wet and dry periods showed that all the models have succeeded in simulating the watershed runoff with high accuracy in the wet period, so that the Nash-Sutcliffe coefficient is 0.79, 0.74 and 0.78 for the three AWBM, Tank and IHACRES models, respectively, shows the acceptable performance of the models in simulating the runoff in the wet period. The evaluation of the results has shown the poor performance of all models in the dry period, and the Nash-Sutcliffe coefficient obtained for the models is -0.05, -0.45, and 0.12, respectively, which shows the weakness of the models in simulation of the low flow.

Conclusion: In the evaluation of the three hydrological models AWBM, Tank, and IHACRES in daily runoff simulation, it was found that in general, with a small difference, the IHACRES model shows better results than the AWBM model. Also, in wet periods, according to the evaluations, the AWBM model led to good accuracy, while the IHACRES model showed better performance than other models in dry periods. Considering this issue, it can be said that the models performed weaker in simulating low flows that occur during dry periods, while the knowledge of streamflow conditions during dry periods can play an effective role in managing water resources. Therefore, to increase their accuracy, a solution should be found.

Cite this article: Rezvani, Fatemeh Sadat, Ghorbani, Khalil, Salarijazi, Meysam, Yazarloo, Behnaz, Rezaei Ghaleh, Laleh. 2024. Comparative assessment of IHACRES, AWBM, and Tank models in simulated wet and dry periods. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (1), 51-72.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21968.3697

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های IHACRES، AWBM و Tank برای شبیه‌سازی رواناب روزانه در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی

فاطمه سادات رضوانی^۱، خلیل قربانی^{۲*}، میثم سالاری‌جزی^۳، بهناز یازرلو^۴، لاله رضایی‌قلعه^۵

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: f.rezvani1997@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ghorbani.khalil@gmail.com
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: meysam.salarijazi@gmail.com
۴. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: yazarloobehnaz@birjand.ac.ir
۵. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: rezaei_l@ymail.com

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی | سابقه و هدف: رواناب متغیر اصلی برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی حوزه آبخیز است و باتوجه به اهمیت آن، برای چندین دهه پژوهش‌های هیدرولوژیکی بر شبیه‌سازی روابط بارش رواناب متمرکز بوده است که منجر به ارائه مدل‌های فراوانی گردیده است. باتوجه به تعدد مدل‌های هیدرولوژیکی، انتخاب یک مدل بهینه از بین انواع مدل‌ها فرآیند ساده‌ای نیست. بدین منظور در پژوهش حاضر پس از انتخاب حوزه آبخیز گالیکش از سیل خیزترین حوزه‌ها در استان گلستان، عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی AWBM، Tank و IHACRES مورد ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مدل‌ها نیز تحلیل حساسیت شد و در نهایت کارایی مدل‌ها در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی سنجیده شد. |
| تاریخ دریافت: ۰۲/۰۸/۱۱ تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۰۲/۱۱/۰۸ | |
| واژه‌های کلیدی: بارش - رواناب، بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت، حوزه آبخیز گالیکش، مدل هیدرولوژیکی | مواد و روش‌ها: مقدار رواناب روزانه خروجی از حوزه برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) با استفاده از هر یک از مدل‌های مذکور شبیه‌سازی شده و با استفاده از چهار معیار ضریب ارزیابی نش - ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و میانگین درصد قدرمطلق خطا، عملکرد هر یک از مدل‌ها در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی بررسی شده است. پس از بهینه‌سازی مقادیر تمامی پارامترها، حساسیت پارامترهای هر یک از مدل‌ها تجزیه و تحلیل گردیده است. در نهایت پس از مشخص کردن وضعیت خشک‌سالی با شاخص SPI، عملکرد هر یک از مدل‌ها در دو دوره ترسالی و خشک‌سالی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. |

یافته‌ها: نتایج بیانگر عملکرد تقریباً مشابه دو مدل بارش- رواناب IHACRES و AWBM است. مدل IHACRES با داشتن ضریب نش- ساتکلیف ۰/۷۳ و ۰/۷۵ و RMSE ۲/۹۷ و ۲/۹۴ به ترتیب در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی و مدل AWBM نیز با ضریب نش- ساتکلیف ۰/۷۴ و ۰/۶۹ و RMSE ۲/۹۲ و ۳/۲۴ برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی عملکرد مطلوبی را نشان داده‌اند، اما مدل Tank در شبیه‌سازی رواناب حوزه موفق نبوده و عملکرد پایین‌تری نسبت به دو مدل دیگر داشته است. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌ها نیز نشان داد پارامترهای K_{base} ، H11 و f به ترتیب در مدل‌های AWBM، Tank و IHACRES بیش‌ترین حساسیت را به تغییر مقادیر خود دارند. در نهایت مقایسه عملکرد مدل‌ها در دو دوره ترسالی و خشک‌سالی نشان داد که تمامی مدل‌ها با دقت بالایی موفق به شبیه‌سازی رواناب حوزه در دوره ترسالی شده‌اند به طوری که ضریب نش- ساتکلیف ۰/۷۹، ۰/۷۴ و ۰/۷۸ به ترتیب برای سه مدل AWBM، Tank و IHACRES عملکرد موردقبول مدل‌ها را در شبیه‌سازی رواناب در دوره ترسالی نشان می‌دهد. درحالی‌که ارزیابی نتایج، عملکرد ضعیف تمامی مدل‌ها را در دوره خشک‌سالی نشان داده است و ضریب نش- ساتکلیف به دست آمده برای مدل‌ها به ترتیب برابر ۰/۰۵، -۰/۴۵ و ۰/۱۲ است که نشان از ضعف مدل‌ها در شبیه‌سازی مقادیر پایین جریان است.

نتیجه‌گیری: در ارزیابی سه مدل هیدرولوژیکی AWBM، Tank و IHACRES در شبیه‌سازی جریان روزانه مشخص شد که به‌طورکلی با اختلاف کمی مدل IHACRES نسبت به مدل AWBM نتایج بهتری را نشان می‌دهد؛ اما در دوره‌های ترسالی با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته مدل AWBM دقت خوبی داشته است درحالی‌که مدل IHACRES در دوره خشک‌سالی نسبت به دیگر مدل‌ها عملکرد بهتری را نشان داده است. با توجه به این موضوع می‌توان گفت مدل‌ها در شبیه‌سازی جریانات کم که در دوره‌های خشک‌سالی اتفاق می‌افتد ضعیف‌تر عمل کردند درحالی‌که آگاهی از وضعیت جریان رودخانه‌ها در دوره‌های خشک‌سالی می‌تواند نقش مؤثری را بر مدیریت منابع آبی داشته باشد از این‌رو در جهت افزایش دقت آن‌ها باید به‌طورکلی چاره‌ای جست.

استناد: رضوانی، فاطمه سادات، قربانی، خلیل، سالاری‌جزی، میثم، یازرلو، بهناز، رضایی‌قلعه، لاله (۱۴۰۳). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های IHACRES، AWBM و Tank برای شبیه‌سازی رواناب روزانه در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی. پژوهش‌های حفاظت

آب و خاک، ۳۱(۱)، ۷۲-۵۱

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21968.3697



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

رواناب متغیر اصلی برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی از حوزه آبخیز تا قاره و مقیاس جهانی است. رواناب در تعامل مستقیم با بارندگی، آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک، رطوبت و برف است (۱) که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات زمانی و مکانی، ژئومورفولوژی و ویژگی‌های اقلیمی حوزه آبخیز قرار دارد (۲). خصوصیات زمانی و مکانی و ژئومورفولوژی متغیر حوزه آبخیز و الگوهای زمانی و مکانی بارش، تبدیل بارندگی به رواناب را به یک فرآیند بسیار پیچیده، پویا و غیرخطی تبدیل کرده است (۳ و ۴).

باتوجه به این که رابطه بارندگی - رواناب، یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی است که درک آن از اهمیت زیادی در هیدرولوژی و منابع آب برخوردار است، برای چندین دهه پژوهش‌های هیدرولوژیکی بر شبیه‌سازی روابط بارش رواناب متمرکز بوده است که منجر به ارائه مدل‌های فراوانی گردیده است (۵). مدل‌سازی بارش - رواناب نقش بسیار مهمی در مدیریت فعالیت‌های منابع آب مانند کنترل سیل و عملیات مخزن دارد (۶). مدل‌های بارش رواناب فرآیندهای غیرخطی و متغیرهای مکانی و زمانی را در حوزه ساده می‌کنند (۷) و رواناب را با ایجاد روابط میان بارش و رواناب براساس ویژگی‌های فیزیکی شبیه‌سازی می‌نمایند (۸).

با توسعه کاربرد کامپیوتر در انجام محاسبات پیچیده و پیشرفت علوم هیدرولوژی مدل‌های بسیاری در مقیاس‌های مختلف توسعه داده شده‌اند (۹). در عمل تعداد زیادی مدل هیدرولوژیکی وجود دارد که انتخاب یک مدل بهینه از بین این مدل‌ها فرآیند ساده‌ای نیست (۱۰). از جمله می‌توان به مدل‌های

یکپارچه مانند مدل‌های IHACRES^۱ (۱۱)، مدل تعادل آب استرالیایی^۲ (AWBM) (۱۲) و Tank (۱۳) اشاره کرد. با توجه به این که اندازه‌گیری همه کمیت‌های موردنیاز در بررسی حوزه امکان‌پذیر نیست، انتخاب مدل مناسبی که بتواند با حداقل اطلاعات ورودی و سادگی ساختار، برآورد قابل‌قبولی را ارائه دهد ضروری می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه رواناب و پیش‌بینی آن توسط این مدل هیدرولوژیکی صورت گرفته است که در ادامه به بیان نتایج برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

زرین و همکاران (۲۰۱۳) به شبیه‌سازی رواناب در تعدادی از زیرحوزه‌های بلوچستان جنوبی با استفاده از مدل بارش - رواناب AWBM پرداختند. نتایج نشان داد مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل‌قبولی را در این حوزه‌ها داشته باشد و از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک برخوردار است (۱۴). بالوانشی و تریودی (۲۰۱۵) به بررسی عملکرد، کارایی و مناسب بودن مدل AWBM در زیرحوزه راحتگر واقع در حوزه رودخانه بینا در مادیا پرادش در هندوستان پرداختند. نتایج بیانگر دقت بالا این مدل در پیش‌بینی رواناب روزانه می‌باشد و شاخص ارزیابی نش - ساتکلیف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برابر با ۰/۸۲۴ و ۰/۶۱۸ به دست آمده است (۱۵). اونیوتا (۲۰۱۶) به منظور انتخاب بهترین مدل بر اساس داده‌های حوزه آبخیز نیل به بررسی عملکرد ۵ مدل هیدرولوژیکی پرداخت. نتایج عملکرد متفاوت مدل‌ها را با توجه به اهداف مدل‌سازی و استفاده از رویدادهای مختلف جریان نشان داد. به طوری که، مدل IHACRES در شبیه‌سازی حداقل جریان، مدل AWBM در

1- Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data

2- Australian Water Balance Model

مرور پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با برآورد رواناب نشان می‌دهد که باتوجه به تنوع مدل‌های بارش- رواناب در دسترس و همچنین نقاط قوت و ضعف مدل‌های مختلف از لحاظ در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف فرآیندهای هیدرولوژیکی، انتخاب یک مدل بارش- رواناب بهینه برای حوزه از جهت بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری است (۲۱) اما با وجود پژوهش‌های مختلف، هنوز تفاوت توانایی مدل‌های بارش رواناب در شبیه‌سازی مقادیر بالا و پایین جریان کاملاً روشن نمی‌باشد. توجه به ضرورت برآورد دقیق و صحیح رواناب در رویدادهای آب‌وهوایی شدید و همچنین اهمیت محدوده مورد مطالعه در تولید رواناب حوزه گرگان‌رود، در این پژوهش پس از برآورد تغییرات حجم رواناب در حوزه مورد مطالعه با استفاده از سه مدل بارش رواناب AWBM، Tank و IHACRES و همچنین مقایسه کارایی هر یک از این مدل‌ها در پیش‌بینی رواناب خروجی، به بررسی عملکرد این مدل‌های هیدرولوژیکی پرداخته شده است. برای این منظور نتایج شبیه‌سازی شده در دو دوره ترسالی و خشک‌سالی تحلیل گردیده است تا توانایی مدل در پیش‌بینی رواناب با توجه به اهمیت این شاخص‌ها در هیدرولوژی، سنجیده شود. این موضوع می‌تواند به حل برخی از مشکلات مهندسی مانند طراحی و ساخت سازه‌های آبخیزداری و کنترل سیل کمک نماید.

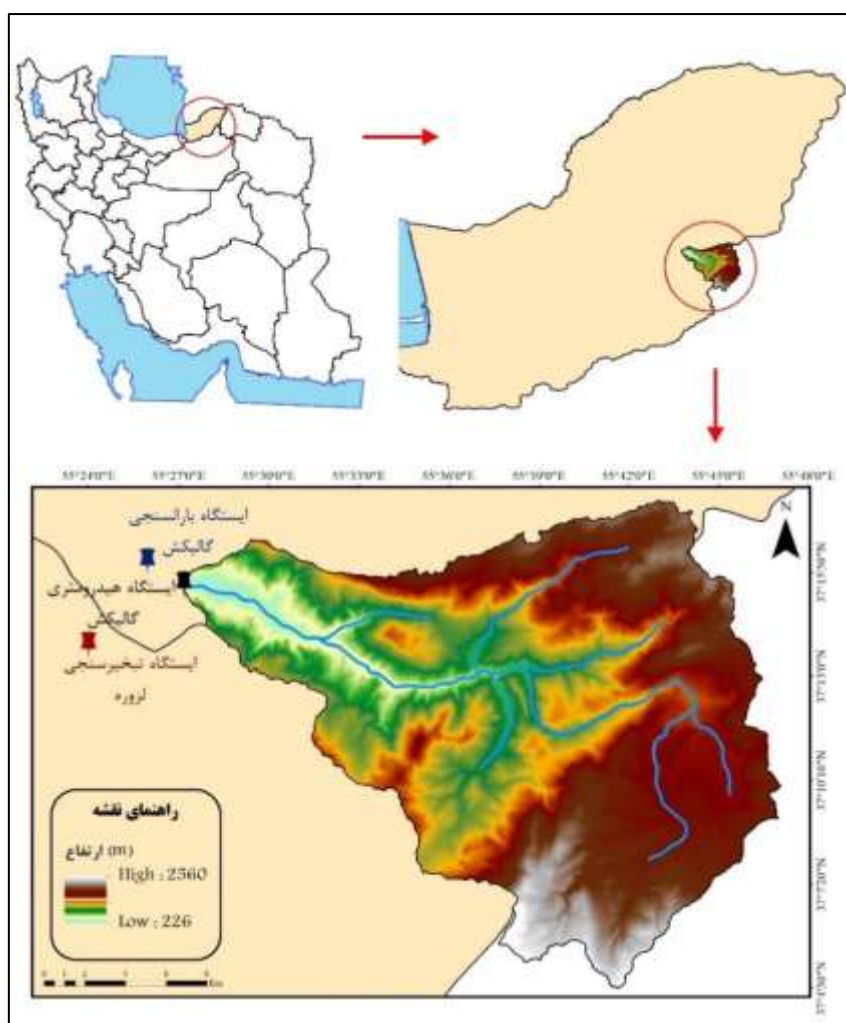
مواد و روش‌ها

باتوجه به اهمیت حوزه آبخیز گالیکش (شکل ۱) در تولید رواناب حوزه گرگان‌رود، این محدوده به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. این حوزه با مساحت ۳۹۸ کیلومتر مربع در شمال‌شرقی ایران در استان گلستان واقع شده است (۴). مرتفع‌ترین نقطه

شبیه‌سازی میانگین جریان سالانه، مدل SimHyd در شبیه‌سازی حداکثر و حداقل جریان و مدل Tank در شبیه‌سازی جریان متوسط سالانه بهترین نتایج را ارائه نمودند (۱۶). در پژوهشی دیگر امیرچ و همکاران (۲۰۱۷) به مقایسه دو مدل مفهومی بارش رواناب، GR و Tank در سه زیرحوزه الجزایر پرداختند. مقایسه این دو مدل برای داده‌های روزانه و ماهانه نشان داد که مدل Tank بسیار بهتر از مدل GR عمل می‌کند (۱۷). رضایی و همکاران (۲۰۱۷) نیز از مدل Tank به‌منظور مدل‌سازی رواناب حوزه نازلوچای در ارومیه بهره‌بردند. نتایج نشان داد علی‌رغم عملکرد مدل در مقادیر رواناب بالا، در حالت کلی مدل دبی‌های پایه را به خوبی شبیه‌سازی نموده و عملکرد آن قابل‌قبول می‌باشد (۱۸). همچنین برزی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی ارتباط بین آب زیرزمینی و حوزه رودخانه آلکانترا در ایتالیا پرداختند. به این منظور از مدل بارش- رواناب IHACRES برای مدل‌سازی رواناب استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل IHACRES عملکرد مناسبی را داشته و به‌خوبی تعاملات بین آبخوان و رودخانه را به تصویر می‌کشد (۱۹). پس از آن، تریودی و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی عملکرد مدل AWBM در حوزه رودخانه شیپرا در هند پرداختند. نتایج مدل‌سازی برای دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ نشان داد که این مدل در تخمین ویژگی‌های هیدروگراف عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. همچنین ارزیابی این مدل با معیارهای مختلف عملکرد خوب مدل را در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد (۲۰). محمدی و همکاران (۲۰۲۲) نیز در پژوهش خود به شبیه‌سازی رواناب در یک حوزه پوشیده از برف در سوئیس با استفاده از نرم‌افزارهای هیدرولوژیکی GR4J، IHACRES و MISD پرداختند. نتایج نشان داد مدل IHACRES رواناب را بهتر از دو مدل دیگر شبیه‌سازی می‌کند (۱).

همبستگی بالاتر داده‌های بارش ایستگاه باران‌سنجی گالیکش با دبی خروجی از حوزه، از داده‌های روزانه دبی، بارش و دما سه ایستگاه هیدرومتری گالیکش، باران‌سنجی گالیکش و تبخیرسنجی لزوره برای بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۸ استفاده است. جزئیات مختصر آماری داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

حوزه حدود ۲۵۶۰ در جنوب حوزه و کم‌ترین ارتفاع برابر ۲۲۶ متر در خروجی حوزه قرار داد. رودخانه اصلی این حوزه رودخانه اوغان به طول ۲۶۷/۲ کیلومتر (۲۲) است که یکی از سرشاخه‌های رودخانه گرگان‌رود است و رواناب آن در نهایت در سد گلستان ذخیره می‌شود (۲۳). با توجه به نواقص آماری ایستگاه‌های موجود در حوزه و نیاز به داده‌های بلندمدت جهت ورود به فاز مدل‌سازی و هم‌چنین



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز گالیکش.

Figure 1. Geographical location of the Galikash watershed.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۶۷.

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

| بیش‌ترین Maximum | کم‌ترین Minimum | میانگین سالانه Yearly Average | واحد Unit | پارامتر Parameter |
|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|
| 313 | 0 | 632 | mm | بارش (ایستگاه باران‌سنجی گالیکش) Precipitation |
| 339.3 | 0 | 2.54 | m ³ .s ⁻¹ | رواناب (ایستگاه هیدرومتری گالیکش) Runoff |
| 34 | -6 | 18.1 | C | دما (ایستگاه تیکسرسنجی لزوره) Temperature |

بارش استاندارد شده ° و دهک‌های بارندگی^۶ را محاسبه کرد (۲۴).

شاخص SPI به‌عنوان یک ابزار همه‌کاره در پایش و تجزیه و تحلیل خشک‌سالی توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) برای تعیین کمی کمبود بارندگی برای مقیاس‌های زمانی چندگانه، که منعکس‌کننده تأثیر رویدادهای آب‌وهوایی شدید بر منابع آب است (۲۵)، توسعه داده شد (۲۶). SPI برای هر منطقه براساس ثبت بارش بلند مدت آن محاسبه می‌شود و براساس جدول زیر تقسیم‌بندی می‌گردد. چنانچه بارش بیش‌تر از میانگین بلندمدت باشد، SPI مثبت و اگر کم‌تر باشد، SPI منفی است. این شاخص از دشوار کم‌تری نسبت به دیگر شاخص‌ها برخوردار است زیرا تنها به یک سری داده ورودی بارش طولانی مدت نیاز دارد (۲۷). شاخص بارش استاندارد شده براساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

که در آن، i مقیاس زمانی، x مقادیر بارندگی (mm)، \bar{x} متوسط بارندگی (mm) و σ انحراف معیار از داده‌های بارندگی (mm) است (۲۸).

در این پژوهش از سه مدل پیوسته بارش رواناب Tank، AWBM و IHACRES به‌منظور شبیه‌سازی رواناب روزانه خروجی حوزه آبخیز گالیکش استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار DrainC^۱ دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی استخراج گردیده است. به‌منظور محاسبه مقادیر شدت خشک‌سالی از شاخص SPI (شاخص بارش استاندارد) استفاده شده است. به‌منظور شبیه‌سازی رواناب با استفاده از این مدل‌ها از سری زمانی بارش (mm.day⁻¹)، دبی مشاهده‌ای (m³.s⁻¹) و تبخیر و تعرق پتانسیل (mm.day⁻¹) در مقیاس روزانه برای دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. در ادامه مدل‌های به‌کاررفته در این پژوهش به‌اختصار توضیح داده شده است.

بسته نرم‌افزاری DrinC با هدف ارائه ابزاری کاربرپسند برای محاسبه چندین شاخص خشک‌سالی در مرکز ارزیابی مخاطرات طبیعی و برنامه‌ریزی پیشگیرانه و آزمایشگاه کارهای احیا و مدیریت منابع آب دانشگاه فنی ملی آتن^۲ توسعه یافته است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان شاخص خشک‌سالی شناسایی^۳، شاخص خشک‌سالی جریان^۴، شاخص

- 1- Drought Indices Calculator
- 2- The Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning and the Laboratory of Reclamation Works and Water Resources Management of the National Technical University of Athens
- 3- The Reconnaissance Drought Index (RDI)
- 4- The Streamflow Drought Index (SDI)

5- Standardized Precipitation Index (SPI)
6- The Rainfall Deciles

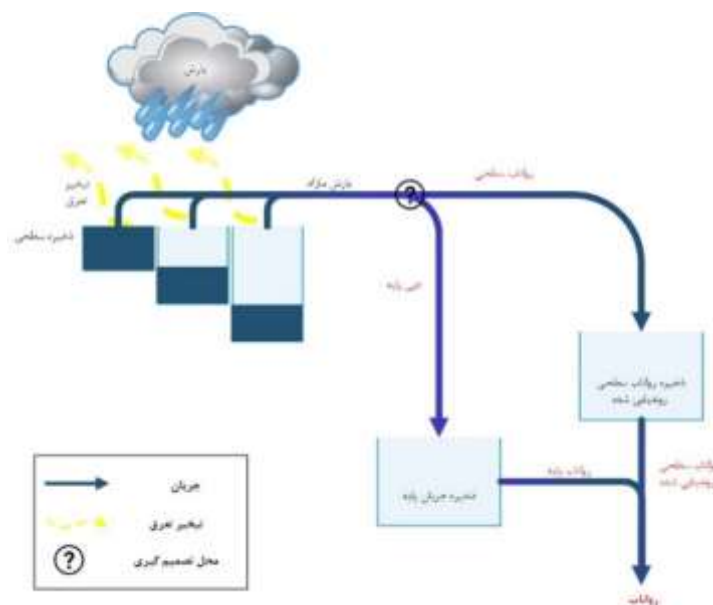
جدول ۲- طبقه‌بندی شرایط خشک‌سالی بر اساس SPI (۲۹).

Table 2. Classification of drought conditions according to the SPI (29).

| مقدار شاخص SPI SPI Values | طبقه‌بندی Classification |
|------------------------------|-----------------------------|
| 2.0 + | Extreme wet |
| 1.5 to 1.99 | Severe wet |
| 1.0 to 1.49 | Moderate wet |
| 0 to 0.99 | Mild wet |
| 0 to -0.99 | Mild drought |
| -1.0 to -1.49 | Moderate drought |
| -1.5 to -1.99 | Severe drought |
| ≤ -2.00 | Extreme drought |

سطوح متناظر با این ظرفیت‌ها (A_1 ، A_2 و A_3) برای تعیین ظرفیت رطوبت، دو پارامتر شاخص جریان پایه (BFI) و ضریب بازگشت جریان پایه (K_{base}) مربوط به تولید جریان پایه و یک پارامتر ضریب بازگشت جریان سطحی (K_{surf}) برای تخمین روندیابی رواناب سطحی وجود دارد. (۲۹، ۳۱، ۳۲) (شکل ۲).

مدل AWBM: مدل AWBM یک مدل بیلان آب حوزه است که در سال ۱۹۹۳ توسط والتر تکمیل شده است. این مدل بر اساس اصل تعادل آب می‌باشد و می‌تواند رواناب را به بارندگی با داده‌های روزانه مرتبط کرده و تلفات ناشی از بارندگی را با مدل‌سازی هیدروگراف سیل محاسبه کند (۳۰). در این مدل، ۶ پارامتر ظرفیت‌های ذخیره سطحی (C_1 ، C_2 و C_3) و

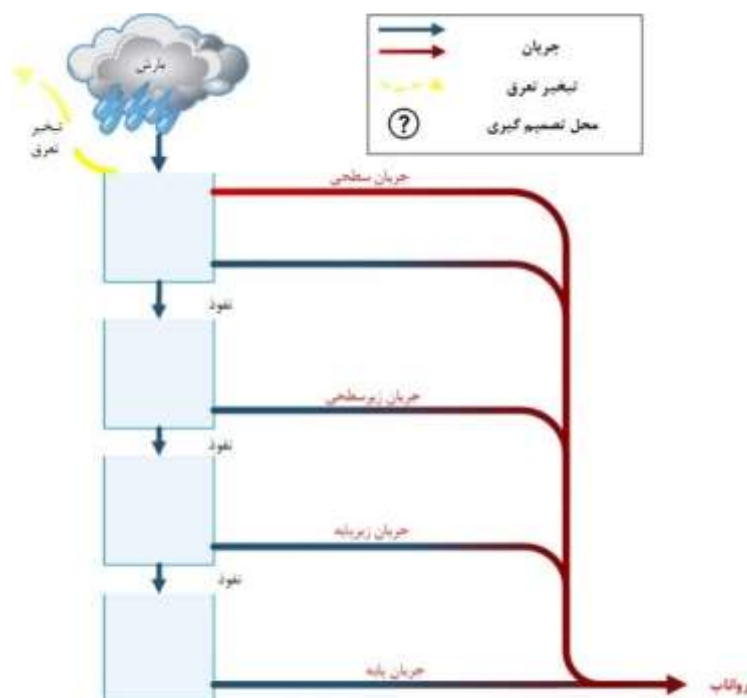


شکل ۲- ساختار مدل AWBM (۳۰ و ۳۲).

Figure 2. Structure of AWBM model (30, 32).

رواناب زیرسطحی، سومین مخزن نشان‌دهنده جریان زیر پایه و آخرین مخزن نشان‌دهنده جریان پایه است (شکل ۳). مدل هیدرولوژیکی Tank دارای ۱۸ پارامتر است که شامل پارامترهای مربوط به ضریب رواناب خروجی از هر یک از مخازن، نفوذ آب از مخزن بالایی به مخزن پایینی، سطح آب هر یک از مخازن و پارامترهای مربوط به ارتفاع آب پایین‌تر از سطح روزنه مخازن است.

مدل Tank: مدل بارش رواناب Tank به‌عنوان مدل قطعی، مفهومی و پیوسته طبقه‌بندی می‌شود (۳۳) که اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط ساگووارا (۳۴) برای شبیه‌سازی رواناب ارائه گردید. مزیت مدل Tank سادگی آن و ضعف آن تعداد نسبتاً زیاد پارامترها می‌باشد (۸). این مدل متشکل از چهار سری مخزن می‌باشد که به‌صورت متوالی و عمودی قرار گرفته‌اند. هر مخزن معرف یک لایه از خاک است. اولین مخزن نشان‌دهنده رواناب سطحی، دومین مخزن نشان‌دهنده

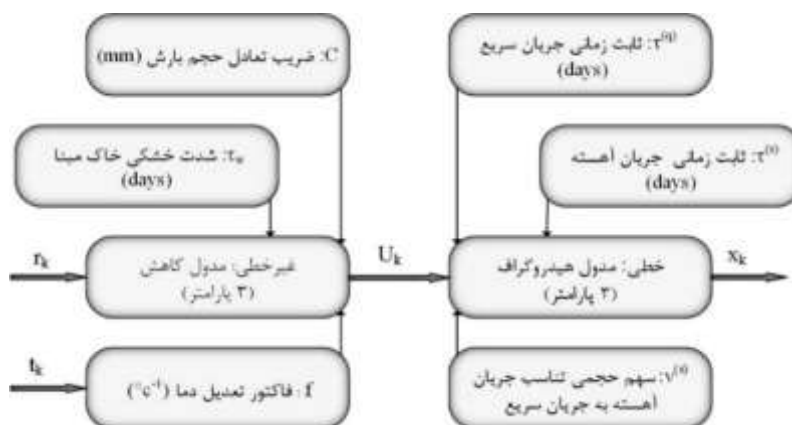


شکل ۳- ساختار مدل Tank (۳۰).

Figure 3. Structure of Tank model (30).

۱. مدل ساده، از نظر پارامتری کارآمد و از نظر آماری دقیق
۲. نتایج مبتنی بر داده و بدون نیاز به مقادیر پارامترهای تخمینی
۳. احتیاجات داده‌ای کم فقط شامل بارش، دبی و دما (۳۵) و سرعت شبیه‌سازی بالا
۴. قابلیت اجرا در هر اندازه حوزه آبخیز (۳۶).

مدل IHACRES: مدل IHACRES یک مدل بارش- رواناب یکپارچه مفهومی- متریک است که توسط جکمن و همکاران (۱۹۹۰) معرفی شده است (۱۱). این مدل به پنج تا هفت متغیر برای واسنجی نیاز دارد (شکل ۴). از مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



شکل ۴- ساختار مدل IHACRES (۳۱).

Figure 4. Structure of IHACRES model (31).

ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۱}، اختلاف ریشه میانگین مربعات در اریبی^{۱۱}، مقدار مطلق خطا^{۱۲}، مجموع مربع ریشه‌ها^{۱۳}، مجموع مربعات اختلاف مربعات^{۱۴} و مجموع اختلاف لگاریتم‌ها^{۱۵} بهره می‌برند که به منظور ارزیابی کمی نتایج صحت‌سنجی استفاده می‌شوند (۳۰).

پس از اتمام واسنجی مدل در دوره مذکور، از بقیه آمار موجود به منظور صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. به این منظور دوره صحت‌سنجی از اوت ۲۰۱۰ شروع و در سپتامبر ۲۰۱۹ خاتمه یافته است. لازم به ذکر می‌باشد که در مرحله صحت‌سنجی از مقادیر به دست آمده از پارامترها در دوره واسنجی استفاده شده و سپس رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به منظور بررسی پتانسیل مدل مقایسه گردید.

معیارهای ارزیابی: ارزیابی عملکرد مدل، برای تأیید توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب ضروری است. به این منظور در مطالعه حاضر، از چهار معیار ارزیابی R^2 (۳۷)، NS (۳۸)، RMSE و MAPE (۳۹) به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی سه مدل AWBM، Tank و IHACRES استفاده گردیده است. روابط این معیارهای ارزیابی در ادامه ارائه شده است.

واسنجی و صحت‌سنجی: واسنجی فرآیندی برای استاندارد کردن مقادیر پیش‌بینی شده یا شبیه‌سازی شده، با استفاده از انحراف از مقادیر مشاهده شده برای یک منطقه خاص است؛ بنابراین به استخراج عوامل تصحیح که می‌توانند برای تولید مقادیر پیش‌بینی شده اعمال شوند، کمک می‌کند (۱۳). به این منظور در پژوهش حاضر، پس از آماده‌سازی، از حدود ۷۰ درصد داده‌ها از مارس ۱۹۸۹ تا جولای ۲۰۱۰ برای واسنجی مدل‌ها استفاده گردید. البته باید در نظر داشت که در دو مدل هیدرولوژیکی AWBM و Tank واسنجی به صورت خودکار با استفاده از بهینه‌سازهای موجود در این مدل‌ها شامل الگوریتم ژنتیک^۱، الگوی جست‌وجوی چندآغاز^۲، نمونه‌برداری تصادفی یکنواخت^۳، بهینه‌ساز با شروع چندگانه روزنبرک^۴، تک‌آغاز روزنبرک^۵، روش تکاملی به هم‌ریخته پیچیده^۶، الگوی جست‌وجوی صورت گرفته است (۳۰).

هم‌چنین این مدل‌ها از هشت تابع هدف اولیه شامل ضریب نش-ساتکلیف^۸، مجموع مربعات خطا^۹،

- 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 developed
- 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 Squares Root
- 14- Sum of Squares Difference of Square
- 15- Sum of Difference of Logs

شبیه‌سازی مشاهدات را نشان می‌دهد در حالی که $NSE=0$ به معنی عملکرد بسیار ضعیف مدل است (۴۰). $RMSE$ نیز مقدار خطاهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و مقدار ایده‌آل آن برابر صفر می‌باشد (۴۱).

نتایج و بحث

برای تفکیک دوره‌های ترسالی و خشکسالی بر پایه نمایه SPI ، با استفاده از نرم‌افزار $DrinC$ داده‌های بارش به ارقام شاخص بارش استاندارد شده (SPI) تبدیل شده و تفکیک شدت خشکسالی صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود از ۳۰ سال طول دوره آماری نیمی از سال‌ها مقادیر SPI بالای صفر را به خود اختصاص داده‌اند که به معنی دوره ترسالی است و نیم دیگر مقادیر SPI کم‌تر از صفر را کسب کرده‌اند که نشان از وقوع خشکسالی در این دوره‌ها دارد.

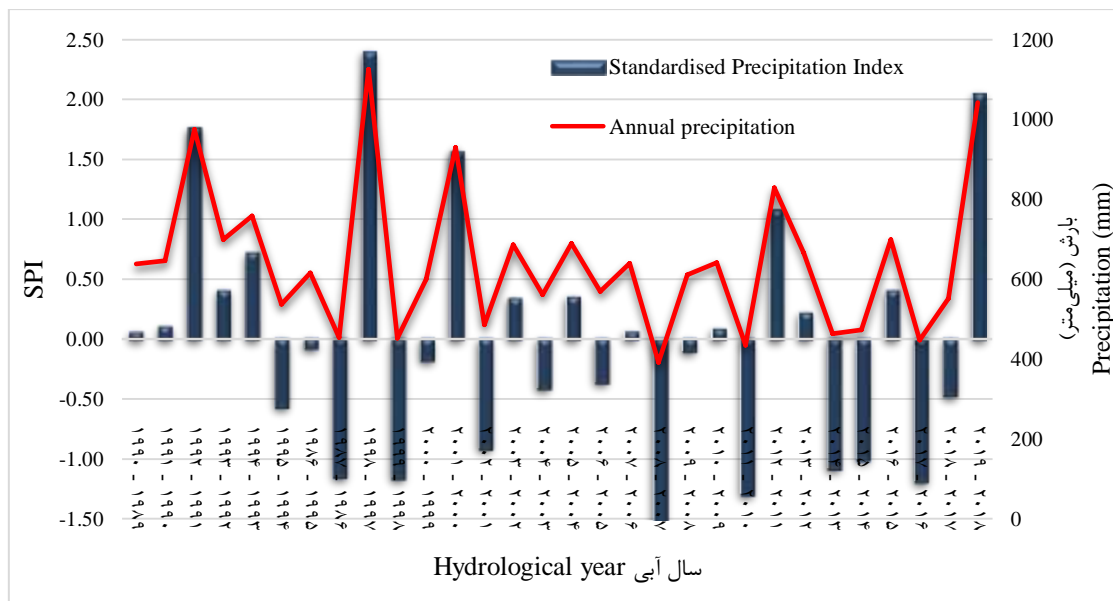
$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{N}} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{Q_{obs}} \right|}{N} \times 100 \quad (5)$$

در معادلات بالا، Q_{sim} و Q_{obs} مقادیر متناظر دبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده ($m^3.s^{-1}$)، $\overline{Q_{sim}}$ و $\overline{Q_{obs}}$ میانگین ریاضی داده‌های دبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده ($m^3.s^{-1}$) و N تعداد مشاهدات است. NSE مقدار نسبی واریانس باقی‌مانده را نسبت به واریانس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌کند و مقدار آن $-\infty$ تا ۱ است. مقدار $NSE=1$ عملکرد بی‌نقص مدل در



شکل ۵- نمودار دوره‌های ترسالی و خشکسالی SPI به همراه تغییرات میانگین سالانه بارش حوزه آبخیز گالیکش.

Figure 5. The diagram of wet and dry periods of SPI along with the annual precipitation changes of the Galikash watershed.

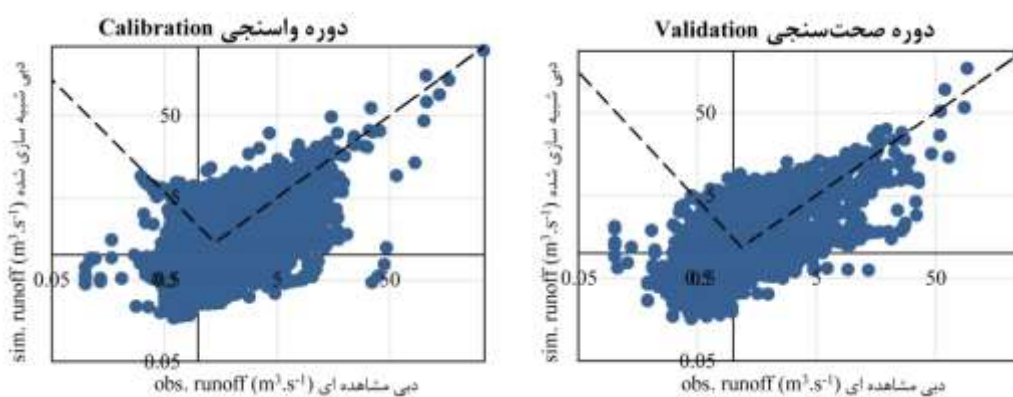
مجموع مربعات خطا به‌عنوان تابع هدف اولیه استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل $AWBM$ در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳

به‌منظور شبیه‌سازی رواناب روزانه حوزه گالیکش، ابتدا مدل $AWBM$ به روش الگوی جست‌وجوی چندآغاز و واسنجی شده است. هم‌چنین از روش

بر مدل‌سازی آشکار شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود کاهش مقدار تمامی پارامترها تأثیر زیادی بر عملکرد مدل دارد اما، کاهش مقدار پارامتر K_{base} بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد مدل داشته است. همچنین تغییرات مقادیر دو پارامتر C_3 و پس از آن BFI نیز تأثیر بیش‌تری بر عملکرد مدل نسبت به دیگر پارامترها داشته‌اند. تجزیه و تحلیل نتایج جدول و اشکال ارائه شده تطابق خوب دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

نشان داده شده است. نمایش گرافیکی روابط رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۶ ارائه شده است.

در مجموع این مدل دارای ۸ پارامتر می‌باشد که با توجه به ساختار مدل توانایی انتخاب هر پارامتر به‌عنوان پارامتر ثابت وجود دارد. در این پژوهش، پس از دستیابی به مقادیر بهینه، هر یک از پارامترها به‌صورت جداگانه به‌عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شد تا تأثیر آن پارامتر با استفاده از معیار ارزیابی NSE



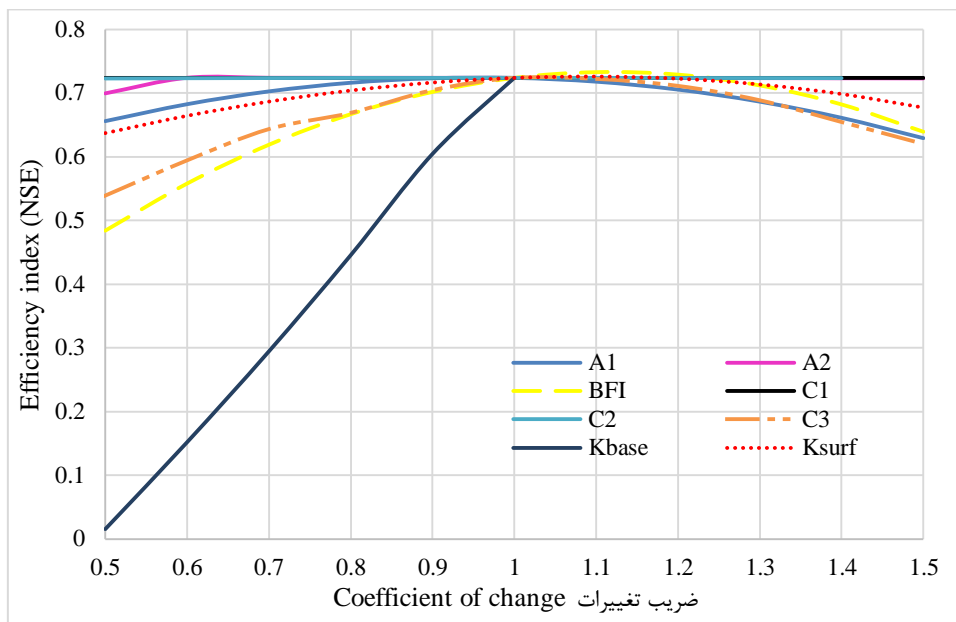
شکل ۶- رابطه بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مدل AWBM در دوره واسنجی و صحت‌سنجی.

Figure 6. The relationship between observed and simulated runoff in the AWBM model in Calibration and validation period.

جدول ۳- مقدار بهینه شده و محدوده پارامترها در مدل AWBM.

Table 3. Optimized value and range of parameters in AWBM model.

| پارامتر Parameters | مقدار بهینه‌شده Optimized values | محدوده پارامترها Parameters range | مقدار پیش‌فرض Default values | توضیحات Description |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| A_1 | 0.29 | 0-1 | 0.134 | ذخیره سطحی اول Partial area of surface store 2 |
| A_2 | 0.05 | 0-1 | 0.433 | ذخیره سطحی دوم Partial area of surface store 1 |
| BFI | 0.47 | 0-1 | 0.350 | شاخص جریان پایه Base flow index |
| C_1 | 0.006 | 0-50 | 7 | ظرفیت نگهداشت سطحی اول Capacity of surface store 1 |
| C_2 | 140.79 | 0-200 | 70 | ظرفیت نگهداشت سطحی دوم Capacity of surface store 2 |
| C_3 | 317.42 | 0-500 | 150 | ظرفیت نگهداشت سوم Capacity of surface store 3 |
| K_{base} | 0.98 | 0-1 | 0.95 | ضریب بازگشت جریان پایه Base flow recession constant |
| K_{surf} | 0.42 | 0-1 | 0.35 | ضریب بازگشت جریان سطحی Surface flow recession constant |

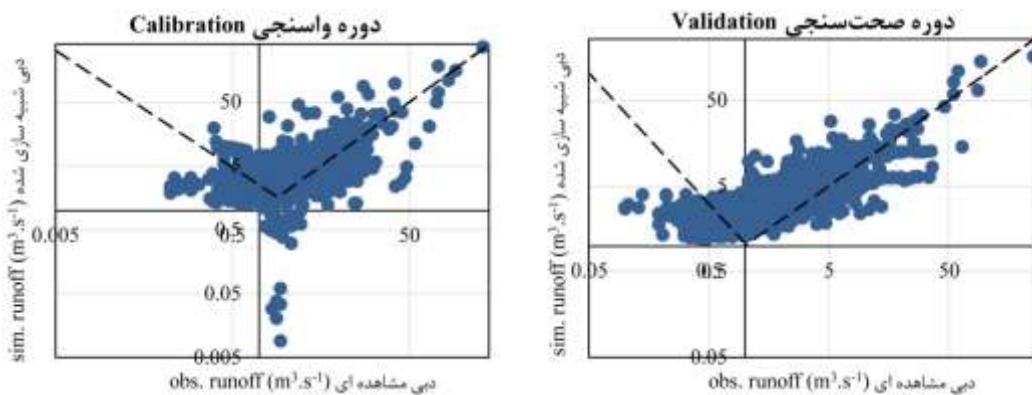


شکل ۷- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل AWBM.

Figure 7. Sensitivity graph for the parameters of AWBM model.

این مدل نتایج ضعیف‌تری داشته است. همچنین مدل Tank نیز شامل ۱۸ پارامتر بوده که تحلیل حساسیت مطلق پارامترهای این مدل نیز مانند مدل AWBM انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در میان تمامی پارامترها کاهش مقدار پارامتر H11 بیش‌ترین تأثیر را بر مدل داشته است؛ همچنین افزایش مقدار این پارامتر نیز پس از پارامتر a12 تأثیر به‌سزایی بر عملکرد مدل نسبت به دیگر پارامترها دارد (شکل ۹).

شبیه‌سازی رواناب ایستگاه گالیکش با استفاده از مدل Tank با روش Pattern search Multi-start و تابع هدف Sum of squares of errors صورت گرفته است (جدول ۴). نمودار برازش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در شکل ۸ ارائه شده است که عملکرد قابل‌قبول مدل را در شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوزه آبخیز گالیکش نشان می‌دهد. باین‌حال، در مقایسه با نتایج مدل AWBM



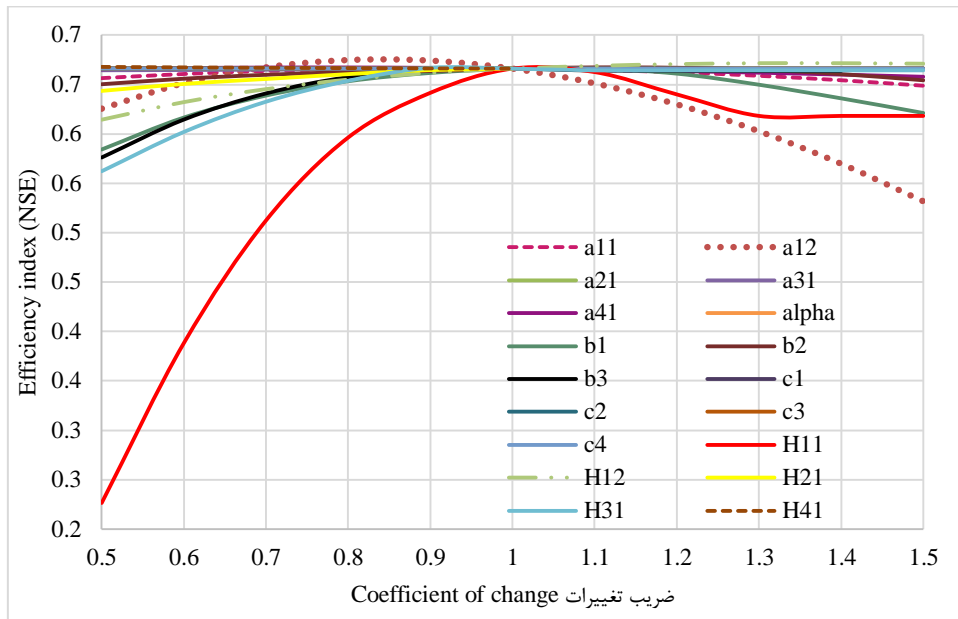
شکل ۸- رابطه بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مدل Tank در دوره واسنجی و صحت‌سنجی.

Figure 8. The relationship between observed and simulated runoff in the Tank model in Calibration and validation period.

جدول ۴- مقدار بهینه شده و محدوده پارامترها در مدل Tank (۴۲).

Table 4. Optimized value and range of parameters in Tank model (42).

| پارامتر Parameters | مقدار بهینه شده Optimized values | محدوده پارامترها Parameters range | مقدار پیش فرض Default values | توضیحات Description |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| H11 | 322.9 | 0-500 | 0 | ارتفاع رواناب سطحی تانک اول Height of first outlet of first tank |
| a11 | 0.36 | 0-1 | 0.2 | ضریب رواناب اول سطحی تانک اول Runoff coefficient from outlets of different tanks |
| a12 | 0.12 | 0-1 | 0.2 | ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول Runoff coefficient from outlets of different tanks |
| a21 | 0.08 | 0-1 | 0.2 | ضریب رواناب میانی دوم Runoff coefficient from outlets of different tanks |
| a31 | 0.98 | 0-1 | 0.2 | ضریب رواناب زیر پایه تانک سوم Runoff coefficient from outlets of different tanks |
| a41 | 0.008 | 0-1 | 0.2 | ضریب رواناب پایه تانک چهارم Runoff coefficient from outlets of different tanks |
| alpha | 2.1 | 0-1 | 0.1 | ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک Evaporation coefficient |
| b1 | 0.16 | 0-1 | 0.2 | ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم Infiltration coefficient in top three tanks |
| b2 | 0.34 | 0-1 | 0.2 | ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم Infiltration coefficient in top three tanks |
| b3 | 0.68 | 0-1 | 0.2 | ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم Infiltration coefficient in top three tanks |
| c1 | 1.94 | 0-100 | 20 | سطح آب مخزن در تانک اول Water level in the first tanks |
| c2 | 5.42 | 0-100 | 20 | سطح آب مخزن در تانک دوم Water level in the second tanks |
| c3 | 7.93 | 0-100 | 20 | سطح آب مخزن در تانک سوم Water level in the third tanks |
| c4 | 4.55 | 0-100 | 20 | سطح آب مخزن در تانک چهارم Water level in the fourth tanks |
| H12 | 19.98 | 0-300 | 0 | ارتفاع رواناب سطحی در تانک اول Height of second outlet of first tank |
| H21 | 96.25 | 0-100 | 0 | ارتفاع رواناب سطحی در تانک دوم Height of first outlet of second tanks |
| H31 | 47.73 | 0-100 | 0 | ارتفاع رواناب سطحی در تانک سوم Height of first outlet of third tanks |
| H41 | 93.69 | 0-100 | 0 | ارتفاع رواناب سطحی در تانک چهارم Height of first outlet of fourth tanks |

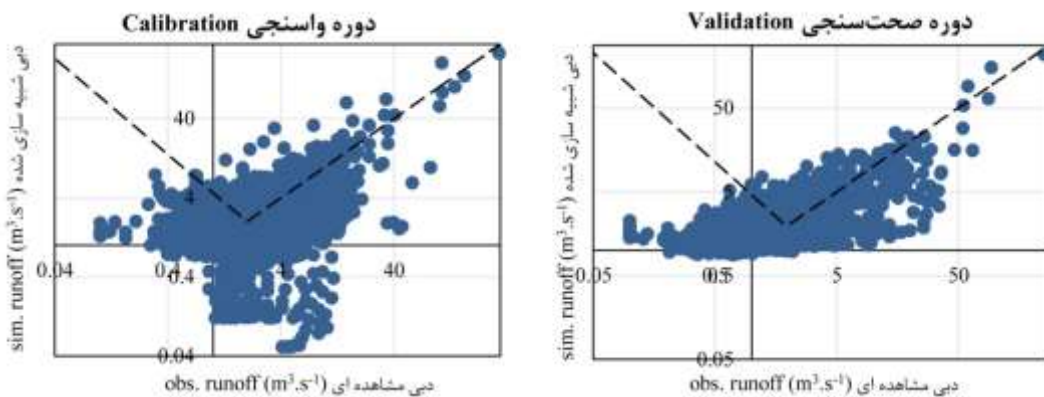


شکل ۹- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل Tank.

Figure 9. Sensitivity graph for the parameters of Tank model.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود نمودار از روند خاصی پیروی نکرده و حالت سینوسی به خود گرفته است، اما به‌طور کلی می‌توان گفت در بین ۴ پارامتر مورد استفاده در تحلیل حساسیت، پارامتر f بیش‌ترین حساسیت را به کاهش مقدار خود داشته است. هم‌چنین افزایش مقدار پارامتر t_{ref} نیز تأثیر زیادی بر عملکرد مدل دارد.

سومین مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل IHACRES می‌باشد. این مدل نیز مانند دو مدل دیگر از داده‌های روزانه دما و بارش به‌منظور شبیه‌سازی رواناب خروجی حوزه آبخیز گالیکش بهره برده است. نتایج شبیه‌سازی این مدل در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۱۰ و مقادیر بهینه شده پارامترها در جدول ۵ ارائه شده است. این مدل با اختلاف کمی نسبت به مدل AWBM بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی رواناب حوزه داشته است.



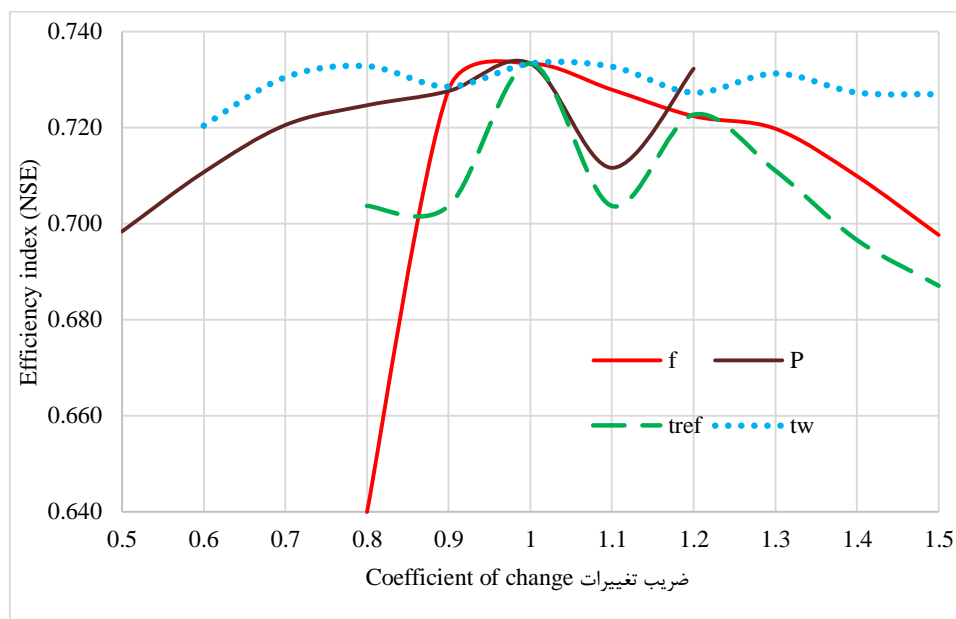
شکل ۱۰- رابطه بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مدل IHACRES در دوره واسنجی و صحت‌سنجی.

Figure 10. The relationship between observed and simulated runoff in the IHACRES model in Calibration and validation period.

جدول ۵- مقدار بهینه شده و محدوده پارامترها در مدل IHACRES (۴۳).

Table 5. Optimized value and range of parameters in IHACRES model (43).

| پارامتر Parameters | مقدار بهینه شده Optimized values | محدوده پارامترها Parameters range | توضیحات Description |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| δ | 0 | 0-1 | تأخیر بین بارش و جریان Delay between precipitation and flow |
| 1/c | 0.002198 | 0-600 | ظرفیت ذخیره رطوبت حوزه Volume of a conceptual catchment wetness storage |
| β^s | 0.001 | >0 | پارامترهای ثابت زمانی برای جریان آهسته slow flow response decay time constant parameters |
| a^s | -0.998 | $-1 < a^s < 0$ | پارامترهای ثابت زمانی برای جریان آهسته slow flow response decay time constant parameters |
| β^q | 0.175 | >0 | پارامترهای ثابت زمانی برای جریان سریع Quick flow response decay time constant parameters |
| a^q | -0.503 | $-1 < a^q < 0$ | پارامترهای ثابت زمانی برای جریان سریع Quick flow response decay time constant parameters |
| τ_w | 6 | 2-30 | ثابت زمانی خشکیدگی حوزه Catchment drying time constant |
| f | 2.2 | 0.01-3 | فاکتور تعدیل دما Temperature modulation factor |



شکل ۱۱- نمودار حساسیت برای پارامترهای مدل IHACRES

Figure 11. Sensitivity graph for the parameters of IHACRES model.

و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. مقادیر RMSE نسبتاً کوچک بوده و مقادیر R^2 و NSE نیز بالاتر از ۰/۵ می‌باشند که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب هر سه مدل در این مرحله می‌باشد. با این حال مقایسه مقادیر

نتایج معیارهای ارزیابی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ ارائه شده است. این جدول نتایج رضایت‌بخشی را برای هر سه مدل AWBM، IHACRES و Tank در مرحله واسنجی

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است مدل Tank عملکرد ضعیف‌تری را نسبت به دو مدل دیگر در شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب این حوزه شبیه‌سازی نشان داده‌است.

RMSE و MAPE در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد مدل IHACRES از دقت و کارایی بالاتری نسبت به دو مدل AWBM و TANK در شبیه‌سازی جریان روزانه حوزه آبخیز گالیکش برخوردار است و

جدول ۶- نتایج مدل‌های AWBM، IHACRES و Tank برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

Table 6. Results of AWBM, IHACRES & Tank Models for Calibration and Verification period.

| صحت‌سنجی Validation | | | | واسنجی Calibration | | | | مدل Model |
|------------------------|----------------|-------|------|-----------------------|----------------|-------|------|---------------|
| NS | R ² | MAPE | RMSE | NS | R ² | MAPE | RMSE | |
| 0.69 | 0.74 | 65.3 | 3.24 | 0.74 | 0.76 | 68.4 | 2.92 | AWBM Model |
| 0.67 | 0.74 | 201.8 | 3.35 | 0.66 | 0.73 | 120.6 | 3.31 | Tank Model |
| 0.75 | 0.75 | 88.3 | 2.94 | 0.73 | 0.73 | 62.5 | 2.97 | IHACRES Model |

IHACRES بهترین عملکرد را داشته است. در حالی که در دوره خشک‌سالی تمامی مدل‌ها عملکرد ضعیفی را نشان داده‌اند به‌طوری که معیار ارزیابی نش- ساتکلیف برای مدل‌های AWBM، Tank و IHACRES به ترتیب برابر ۰/۰۵، -۰/۴۵ و ۰/۱۲ به دست آمد در صورتی که معیار ارزیابی RMSE مقادیر پایینی را نشان می‌دهد که بیانگر بیش‌برآوردی تمامی مدل‌ها در مقادیر پایین جریان می‌باشد.

برای نتایج عملکرد مدل‌ها در دو دوره ترسالی و خشک‌سالی، پس از شبیه‌سازی رواناب، نتایج عملکرد هر یک از مدل‌ها در دو دوره خشک‌سالی و ترسالی برای مقایسه بهتر کارایی مدل‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است هر سه مدل عملکرد مطلوبی در دوره ترسالی داشته‌اند؛ ولی با توجه به معیارهای ارزیابی مدل AWBM با اختلاف کمی نسبت به مدل

جدول ۷- نتایج مدل‌های AWBM، IHACRES و Tank برای دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی.

Table 7. Results of AWBM, IHACRES & Tank Models for wet and dry period.

| خشک‌سالی Dry | | | | ترسالی Wet | | | | مدل Model |
|-----------------|----------------|--------|------|---------------|----------------|--------|------|---------------|
| NS | R ² | MAPE | RMSE | NS | R ² | MAPE | RMSE | |
| -0.05 | 0.12 | 64.46 | 2.01 | 0.79 | 0.79 | 70.62 | 3.79 | AWBM Model |
| -0.45 | 0.18 | 166.26 | 2.36 | 0.74 | 0.77 | 123.94 | 4.20 | Tank Model |
| 0.12 | 0.14 | 73.81 | 1.84 | 0.78 | 0.78 | 65.78 | 3.83 | IHACRES Model |

نتیجه‌گیری کلی

باتوجه به اهمیت حیاتی مدل‌سازی بارش رواناب در مدیریت منابع آب، در تاکنون مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای شبیه‌سازی روابط بین بارش و رواناب ارائه شده است. در این مطالعه، عملکرد سه مدل یکپارچه AWBM، IHACRES و Tank و همچنین حساسیت پارامترهای هر یک از این مدل‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن این نتایج به‌طور کلی تمامی مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب خروجی حوزه موفق عمل نموده‌اند؛ اما ارزیابی‌های صورت‌گرفته بیانگر آن است که مدل IHACRES با اختلاف کمی نسبت به مدل AWBM برای شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز گالیکش مناسب‌تر از دو مدل دیگر استفاده شده در این پژوهش است.

تناسب پارامترهای این مدل‌ها نیز با تحلیل حساسیت مطلق مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر هر یک از پارامترها بر عملکرد مدل بررسی شد. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌ها نیز نشان داد که حساسیت تمامی پارامترها به تغییر مقادیر خود یکسان نیست و هر پارامتر تأثیر متفاوتی را بر عملکرد مدل داشته است؛ برای نمونه در مدل AWBM کاهش مقدار پارامتر K_{base} بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد مدل داشته است و یا مدل Tank که در میان تمامی پارامترها کاهش مقدار پارامتر $H11$ بیش‌ترین تأثیر را بر مدل داشته است و همچنین مدل IHACRES که در بین ۴ پارامتر مورد استفاده در تحلیل حساسیت، پارامتر f بیش‌ترین حساسیت را به کاهش مقدار خود داشته است. همچنین بررسی عملکرد مدل‌ها در دو دوره ترسالی و خشک‌سالی بیانگر آن است که عملکرد مدل AWBM در مقایسه با دیگر مدل‌ها در دوره ترسالی بهتر است در حالی که نتایج ضعیفی را در دوره خشک‌سالی به دنبال داشته است. نتایج حاصله با

یافته‌های بررسی‌های یل‌دیریم و همکاران (۲۰۱۶) در چهار زیرحوزه استرالیا، لی (۲۰۲۱) در زیرحوزه‌ای در ویکتوریای مرکزی، مویالیوو و همکاران (۲۰۲۱) در زیرحوزه رودخانه مالابا در اوگاندا و همچنین نتایج امیری و رودباری (۲۰۱۶) در دو حوزه در استان گیلان هم‌راستا است (۴۴، ۲۹، ۴۵، ۴۶). از طرف دیگر در دوره خشک‌سالی تمامی مدل‌ها عملکرد ضعیفی داشته‌اند و تنها مدل IHACRES مقادیر رواناب را با دقت بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها شبیه‌سازی کرده است. به‌طور کلی می‌توان گفت مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان‌ات کم که در دوره‌های خشک‌سالی اتفاق می‌افتد ضعیف‌تر عمل کردند. در حالی که آگاهی از وضعیت جریان رودخانه‌ها در دوره‌های خشک‌سالی می‌تواند نقش مؤثری را بر مدیریت منابع آبی داشته باشد؛ از این رو در جهت افزایش دقت آن‌ها باید چاره‌ای جست. در کل می‌توان گفت که عملکرد کلی مدل‌ها برای شبیه‌سازی رواناب و سیلاب مناسب است اما این مدل‌ها قابلیت تعمیم به دوره خشک را ندارند و بهتر است این مدل‌ها برای شبیه‌سازی مقادیر کم جریان اصلاح شوند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش 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.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان ارزیابی مدل یادگیر جمعی در تلفیق نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی و داده‌کاوی در برآورد رواناب در دانشگاه علوم

نظارت تحقیق. نویسنده چهارم: بازبینی مقاله. نویسنده پنجم: بازبینی مقاله.

کشاورزی و منابع طبیعی گرگان است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشد.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

حمایت مالی

- حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت دانشجویی نویسنده اول این مطالعه بوده است.
- این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است ولی از امکانات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان استفاده گردیده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات و تهیه پیش‌نویس مقاله. نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها و نظارت تحقیق. نویسنده سوم: اصلاح مقاله، مشارکت در روش‌شناسی و آنالیزها و

منابع

- Mohammadi, B., Safari, M. J. S., & Vazifekhhah, S. (2022). IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. *Scientific Reports*, 12 (1), 12096. 1-21.
- Vidarthi, 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.
- Hsu, K. L., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31 (10), 2517-2530.
- Rezvani, F. S., Ghorbani, K., 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 Modelling*, 3 (1), 279-297. [In Persian]
- Kokkonen, T. S., & Jakeman, A. J. (2001). A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implications. *Water Resources Research*, 37 (9), 2345-2352.
- Zhai, A., Fan, G., Ding, X., & Huang, G. (2022). Regression tree ensemble rainfall-runoff forecasting model and its application to Xiangxi River, China. *Water*, 14 (3), 463. 1-12.
- Sadegh, M., Agha Kouchak, A., Flores, A., Mallakpour, I., & Nikoo, M. R. (2019). A multi-model nonstationary rainfall-runoff modeling framework: analysis and toolbox. *Water Resources Management*, 33 (9), 3011-3024.
- Yang, Q., Zhang, H., Wang, G., Luo, S., Chen, D., Peng, W., & Shao, J. (2019). Dynamic runoff simulation in a changing environment: A data stream approach. *Environmental Modelling & Software*, 112, 157-165.
- Li, H., Zhang, Y., & Zhou, X. (2015). Predicting surface runoff from catchment to large region. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-13.
- Herath, H. M. V. V., Chadalawada, J., & Babovic, V. (2021). Hydrologically informed machine learning for rainfall-runoff modelling: towards distributed modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (8), 4373-4401.

11. Jakeman, A. J., Littlewood, I. G., & Whitehead, P. G. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 117 (1-4), 275-300.
12. Boughton, W. C. (1995). An Australian water balance model for semiarid watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50 (5), 454-457.
13. Sugawara, M. (1974). Tank model with snow component. Study Report of National Research Center for Disaster Prevention. 293 p.
14. Zarin, H., Moghaddamnia, A. R., Nam Dorost, J., & Mosaedi, A. (2013). Simulation of outlet runoff in ungauged catchments by using AWBM Rainfall-Runoff Model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20 (2), 195-208. [In Persian]
15. Balvanshi, A., & Tiwari, H. L. (2015). Rainfall runoff estimation using RRL toolkit. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4 (5), 595-599.
16. Onyutha, C. (2016). Influence of hydrological model selection on simulation of moderate and extreme flow events: a case study of the Blue Nile basin. *Advances in Meteorology*, 2016, 1-28.
17. Amireche, M., Merabtene, T., Bermad, A., & Boutoutaou, D. (2017). Comparative assessment between GR model and tank model for rainfall-runoff analysis using Kalman filter-application to Algerian basins. In MATEC Web of Conferences, 120, 05006.
18. 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]
19. Borzì, I., Bonaccorso, B., & Fiori, A. (2019). A modified IHACRES rainfall-runoff model for predicting the hydrologic response of a river basin connected with a deep groundwater aquifer. *Water*, 11 (10), 2031. 1-15.
20. 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.
21. 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.
22. Sohrabian, E., Meftah Halghi, M., Ghorbani, K., Golian, S., & Zakerinia, M. (2015). Effects of climate change on the discharge basin hydrology model (case study: Galikesh Watershed in Golestan). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22 (2), 111-125. [In Persian]
23. Tatar, R., Ghorbani, K., Meftah halghi, M., & Salarijazi, M. (2021). Rainfall-Runoff modeling using Deep Learning model (Case Study: Galikesh Watershed). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 10 (2), 55-68. [In Persian]
24. Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8, 697-709.
25. Bernard, B., Vincent, K., Frank, M., & Anthony, E. (2013). Comparison of extreme weather events and streamflow from drought indices and a hydrological model in River Malaba, Eastern Uganda. *International Journal of Environmental Studies*, 70 (6), 940-951.
26. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. 17, 179-183.
27. Sadeghi, S. H., Kalehooe, M., Chamani, R., & Haji, K. Effectability of SPI-based Watershed Health Index from Data Length. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 17 (61), 52-61. [In Persian]
28. Pazaveh, A. (2023). Investigation of drought and wet season in Chahbahar city using SPI index. *Geography and Human Relationships*, 5 (4), 110-127. [In Persian]

29. Li, Y. (2021). Performance evaluation of Tanh and AWBM rainfall-runoff models. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 768 (1), 012048. 1-8.
30. Podger, G. (2004). Rainfall Runoff Library (RRL). Catchment Modeling Toolkit prepared by the © CRC for Catchment Hydrology. Australia. 110 p.
31. Esmaili-Gisavandani, H., Lotfirad, M., Sofla, M. S. D., & Ashrafzadeh, A. (2021). Improving the performance of rainfall-runoff models using the gene expression programming approach. *Journal of Water and Climate Change*, 12 (7), 3308-3329.
32. Mohammadivand, M. R., Araghinejad, S., 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]
33. Kwon, M., Kwon, H. H., & Han, D. (2020). A hybrid approach combining conceptual hydrological models, support vector machines and remote sensing data for rainfall-runoff modeling. *Remote Sensing*, 12 (11), 1801. 1-21.
34. Suga Wara, M. (1979). Automatic calibration of the tank model/ L'étalonnage automatique d'un modèle à cisterne. *Hydrological Sciences Journal*, 24 (3), 375-388.
35. Croke, B. F. W., Andrews, F., Spate, J., & Cuddy, S. M. (2005). IHACRES User Guide. Technical Report 2005/19. Second Edition. (Canberra: iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University)
36. Dye, P. J., & Croke, B. F. (2003). Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling & Software*, 18 (8-9), 705-712.
37. Dougherty, E. R., Kim, S., & Chen, Y. (2000). Coefficient of determination in nonlinear signal processing, *Signal Processing*, 80, 2219-2235.
38. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.
39. Lujano, E., Lujano, R., Huamani, J. C., & Lujano, A. (2023). Hydrological modeling based on the KNN algorithm: An application for the forecast of daily flows of the Ramis river, Peru. *Tecnología y ciencias del agua*, 14 (2), 169-203.
40. Ghorbani, M., Dinpashoh, Y., & Moayeri, M. (2020). Appraisal of the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation in HyMod and HBV models (Case study: Chehelchai catchment in Golestan province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27 (3), 23-43. [In Persian]
41. Deb, P., & Kiem, A. S. (2020). Evaluation of rainfall-runoff model performance under non-stationary hydroclimatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65 (10), 1667-1684.
42. Jaiswal, R. K., Ali, S., & Bharti, B. (2020). Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied Water Science*, 10, 1-14.
43. Vardian, F. (2012). Runoff simulation using IHACRES rainfall-runoff model in several catchment in Iran. M.Sc. Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran. [In Persian]
44. Yildirim, G., Haque, M., & Rahman, A. (2016). Variability in calibration and validation data lengths in relation to obtaining the best parameter set of a hydrological model. In Proceedings of the 37th Hydrology & Water Resources Symposium 2016: Water, Infrastructure and the Environment, New Zealand. 439-445.
45. 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, 1-24.
46. Amiri, E., & Roudbari Mousavi, M. M. (2016). Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (case study Polrood and Shalmanrood rivers). *Iranian journal of Ecohydrology*, 3 (4), 533-543. [In Persian]