

Evaluation of VIC Hydrological Model in Runoff Simulation using Climatic Precipitation Datasets, case study: Hableroud Watershed

Hossein Salehi¹, Saeid Gharechelou^{2*}, Saeed Golian³, Mohammadreza Ranjbari⁴ and Emad Mahjoobi⁵

¹ PhD Student, Department of Physics, University of Trento, Trento, Italy

² Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Senior Researcher, SKR, Cardiff, UK

⁴ PhD Student, Department of Water Management, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University, Isfahan, Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 07 July 2023

Accepted: 18 December 2023

Extended abstract

Introduction

The rapid growth of the global population has led to a significant surge in water consumption across various sectors such as agriculture, industry, and domestic use. This heightened demand for water has profound implications, particularly in ensuring food security, meeting industrial needs, and providing safe drinking water. However, alongside this population growth, climate change has emerged as a critical factor, altering precipitation patterns and exacerbating water scarcity issues. In response to these challenges, there is a growing need to identify and manage accessible water resources effectively. This involves understanding the complex interactions between different components of the hydrological cycle, including surface water, groundwater, soil moisture, and atmospheric water. Hydrological models have emerged as valuable tools in this regard, offering insights into water availability, flow patterns, and quality assessment. These models play a crucial role in various aspects of water resource management, including mitigating environmental impacts, managing floods, and predicting future water stress scenarios. Additionally, they facilitate the analysis of watershed-scale dynamics and provide a basis for informed decision-making. Global Hydrological Models (GHMs) have gained prominence due to their ability to capture the interconnectedness of water systems across different regions. They enable researchers to assess and predict hydrological processes on a large scale, contributing to a more comprehensive understanding of water resource dynamics. Recent studies have focused on evaluating the performance of hydrological models, such as the Variable Infiltration Capacity (VIC) model, in simulating river discharge, soil moisture, and precipitation patterns. These evaluations often utilize various data sources, including satellite imagery, to validate model outputs and improve their accuracy. Moreover, the integration of advanced optimization algorithms, such as NSGA-II, enhances the modeling process by optimizing model parameters and improving simulation results. In light of limited ground station data in extensive watersheds, researchers increasingly rely on long-term weather data and modeling techniques to bridge data gaps and improve the accuracy of hydrological predictions. Overall, ongoing research efforts aim to refine hydrological modeling approaches, integrate diverse data sources, and develop robust strategies for sustainable water resource management in the face of growing population pressures and climate uncertainties.

Materials and methods

The Heblehroud Watershed, situated in the southern part of the Central Alborz mountain range, covers approximately 326,991 hectares and lies between coordinates 52° 13' to 53° 13' East longitude and 35° 17' to 35° 58' North latitude. It spans across Tehran, Mazandaran, and Semnan provinces. Mount Sefidab, with an elevation of 4047 meters, marks its highest point. The region features a semi-arid climate, receiving 272 mm of annual rainfall predominantly in winter and spring. The Heblehroud River, originating from the northern mountains, serves as the main drainage outlet. The semi-distributed hydrological model (VIC) was employed in this study to optimize the coefficient of efficiency (KGE) in simulating runoff on daily and monthly scales in the state of water balance. The study validated the VIC model using data from the Bonekooh station and applied the NSGA-II optimization algorithm to calibrate

*Corresponding author: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

soil parameters from 1992 to 1996, considering the impact of watershed management. Soil data were obtained from the HWSO database available on the FAO website and categorized into 36 classes based on physical and chemical soil properties. Land cover data were sourced from the MODIS satellite database and classified into 17 categories according to the IGBP standard. Elevational bands are crucial in the VIC hydrological model for assessing soil water pressure distribution and surface runoff. In the Heblehroud basin, elevation differences can reach several thousand meters, impacting flow estimation. Therefore, using elevation bands derived from SRTM data is essential for accurate simulation. The accuracy of precipitation data from each database at the cell scale was evaluated using the IDW method.

Results and discussion

The results indicated that the APHRODITE database had the highest accuracy, while PERSIANN-CDR had the lowest. Additionally, the runoff simulation results demonstrated that the VIC hydrological model performed well in simulating daily and monthly runoff. The KGE efficiency index for simulated daily runoff was 0.78 during the calibration period and 0.76 during the validation period. Evaluating the simulated runoff using climatic precipitation data revealed that PERSIANN-CDR satellite precipitation data was less accurate in detecting precipitation amounts but performed better in simulating runoff. The KGE for this data on a daily scale was 0.64 during the calibration period and 0.77 during the validation period. The KGE index for APHRODITE precipitation data based on ground stations ranked second, with values of 0.62 and 0.75 during the calibration and validation periods, respectively. ERA5-Land precipitation data, which is reanalyzed data, ranked third with a KGE index of 0.50 during the calibration period and 0.66 during the validation period.

Conclusions

These findings indicate that climatic precipitation data can be effectively utilized in watershed management studies with low cost and appropriate accuracy, particularly in basins lacking a regular network or long-term data availability.

Keywords: APHRODITE, ERA5-Land, Global precipitation data, IDW, PERSIANN-CDR, VIC Rainfall-Runoff Model

Cite this article: Salehi, H., Gharechelou, S., Golian, S., Ranjbari, M., Mahjoobi, E., 2024. Evaluation of VIC Hydrological Model in Runoff Simulation using Climatic Precipitation Datasets, case study: Hableroud Watershed. *Watershed Engineering and Management* 16(2), 224-243.

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



ارزیابی مدل هیدرولوژیکی VIC در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از پایگاه داده های بارش اقلیمی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود

حسین صالحی^۱، سعید قره‌چلو^{۲*}، سعید گلیان^۳، محمدرضا رنجبری^۴ و عماد محجوبی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه ترنتو، ترنتو، ایتالیا

^۲ استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ محقق ارشد، موسسه SKR، کاردیف، انگلستان

^۴ دانشجو دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۵ استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶

چکیده مبسوط

مقدمه

مدل‌سازی هیدرولوژیکی، جهت شبیه‌سازی رواناب برای یک دوره بلندمدت در راستای مطالعات اقلیمی از اهمیت بالایی در مدیریت منابع آب حوزه آبخیز برخوردار است. این دسته از شبیه‌سازی‌ها، نیاز به داده‌های ورودی با طول دوره بلندتر دارد که در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور که دارای کمبود داده هستند، قابل‌انجام نیست. داده‌های بارش اقلیمی با طول دوره بلند در دو دهه اخیر کارایی زیادی از خود نشان داده‌اند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با استفاده از سه داده بارش اقلیمی APHRODITE، PERSIANN-CDR و ERA5-Land و داده بارش درون‌یابی شده ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش (IDW) شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز حبله‌رود در دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۲ پرداخته شد. مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی (VIC) در این مطالعه، در حالت تعادل آبی با هدف بهینه‌سازی ضریب کارایی (KGE) مورد استفاده قرار گرفت. جهت ارزیابی دقت داده‌های بارش هر پایگاه داده در مقیاس سلول، از روش IDW استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد پایگاه APHRODITE بیشترین دقت و PERSIANN-CDR کمترین دقت را داشته است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی رواناب نشان داد مدل هیدرولوژیکی VIC در مقیاس روزانه و ماهانه توانایی مناسبی در شبیه‌سازی رواناب دارد. میزان شاخص کارایی KGE رواناب شبیه‌سازی‌شده روزانه با استفاده از بارش مشاهده‌ای در دوره واسنجی برابر با ۰/۷۸ و در دوره صحت‌سنجی برابر با ۰/۷۶ بود. نتایج ارزیابی رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط داده‌های بارش اقلیمی نشان داد، داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR با وجود اینکه دقت کمتری در تشخیص میزان بارش داشت، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی رواناب دارد. به طوری که میزان KGE برای این داده در مقیاس روزانه در دوره واسنجی برابر با ۰/۶۴ و در دوره صحت‌سنجی برابر با ۰/۷۷ به دست آمد. داده بارش APHRODITE که یک داده بارش بر اساس ایستگاه‌های زمینی است، با شاخص KGE برابر با ۰/۶۲ در دوره واسنجی و ۰/۷۵ در دوره صحت‌سنجی

در رده دوم قرار گرفت. داده بارش ERA5-Land که یک داده بازتحلیل شده است در رده سوم قرار گرفت که شاخص KGE برابر با ۰/۵ در دوره واسنجی و ۰/۶۶ در دوره صحت‌سنجی بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد، داده‌های بارش اقلیمی در حوضه‌های فاقد شبکه منظم یا با طول دوره کوتاه‌مدت از داده‌ها، می‌توانند عملکرد مناسبی و مشابه با داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی داشته و در مطالعات مدیریت حوزه آبخیز با هزینه کم و دقت مناسب مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: مدل بارش-رواناب VIC، داده‌های بارش جهانی، درون‌یابی IDW، APHRODITE، ERA5-Land، PERSAINN-CDR

مقدمه

در مواجهه با انواع متغیرها یا پارامترهای مختلف یک وضعیت واقعی و امکان تحلیل کلیه ترکیبات احتمالی بین فاکتورهای بالقوه با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتر را فراهم می‌کند و همچنین، در دسترس نبودن اطلاعات کافی در تمامی نقاط زمین به‌طور پیوسته نیاز به مدل‌سازی برای آگاهی بهتر از شرایط موجود را مهم‌تر نشان می‌دهد (Kauffeldt et al., 2016, Salehi et al., 2022).

مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی GHMs^۱، به‌دلیل تاثیرپذیری و تاثیرگذاری حوزه‌های آبخیز بر یکدیگر، به یک زمینه پژوهشی مجزا تبدیل شده است. بنابراین، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در مقیاس جهانی امری ضروری در راستای درک درستی از شرایط موجود به‌نظر می‌رسد. در این زمینه، پژوهش‌های بسیاری در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است برای نمونه Azizian and Shokouhi (2017)، به ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC^۲ برای شبیه‌سازی دبی رودخانه چالوس در مقیاس‌های زمانی مختلف پرداختند. آنها با بررسی شاخص کارایی (نش-ساتکلیف) به‌دست آمده در مراحل واسنجی (۰/۸۴) و صحت‌سنجی (۰/۷۴) به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور از توانایی مناسبی جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوزه آبخیز رودخانه چالوس برخوردار است. در مطالعه دیگری، در حوزه آبخیز رودخانه سفید رود (Koochi et al., 2019)، مدل

افزایش روزافزون جمعیت جوامع بشری، باعث افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی برای تأمین غذا، فعالیت‌های صنعتی جهت رفع نیازهای دیگر بشر و همچنین افزایش مصرف آب در بخش شرب شده است (Islam et al., 2007). از طرفی، در دهه گذشته تغییر اقلیم، به‌صورت محسوسی در الگوهای بارندگی چه در میزان و چه در پراکندگی، تأثیرگذار بوده است. بنابراین، شناسایی منابع آب قابل دسترسی جهت حفظ این منابع، که منجر به بهبود شرایط حاکم بر چرخه‌های هیدرولوژیکی و همچنین برنامه‌ریزی صحیح ضروری است (Sayama and McDonnell, 2009). آب‌های سطحی، برگاب، رطوبت خاک و آب‌های زیرزمینی و جو، مؤلفه‌های پیوسته هیدرولوژیکی هستند.

درک تعامل بین این مؤلفه‌ها و دسترسی به اطلاعات آنها جهت پیش‌بینی در مقیاس بزرگ، نیاز به راه‌حلی دقیق و کارآمد دارد که در این راستا چارچوب‌هایی به نام مدل‌های هیدرولوژیکی ارائه شده است (Kumar, 2009). در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی جهت مدیریت منابع آب، حل مشکلات زیست‌محیطی مانند اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب، مدیریت سیلاب و بررسی کیفیت آب کارآمد بوده است (Dwarakish and Ganasri, 2015; Martin et al., 2013; Liang et al., 2020; Li et al., 2016; Nepal et al., 2009; Mauser and Bach, 2014; Wang et al., 2013). از سوی دیگر، مدل‌های هیدرولوژیکی امکان بررسی و پیش‌بینی رفتار سیستم

¹ Global Hydrology Models

² Variable Infiltration Capacity

دقت و پیوستگی زمانی لازم از گذشته تاکنون برخوردار باشد، نیاز به استفاده از داده‌های هواشناسی بلندمدت و شبیه‌سازی در مدل‌های هیدرولوژیکی آن کاملاً محسوس است (Ghoreishi GharahTikan et al., 2022). بر این اساس، پژوهش حاضر به بررسی امکان استفاده از مدل VIC بر پایه داده‌های هواشناسی اقلیمی جهت شبیه‌سازی رواناب اختصاص یافته است. در این پژوهش، توانایی مدل هیدرولوژیکی VIC، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II³ در حوزه آبخیز حبله‌رود شمالی ارزیابی شده است. از دیگر اهداف مهم این پژوهش، بررسی امکان بهره‌برداری بهینه از بانک‌های اطلاعاتی بزرگ مقیاس در سطح کشور است که در همین راستا به ارزیابی داده‌های بارش اقلیمی سه پایگاه داده APHRODITE⁴، PERSIANN-CDR⁵ و ERA5⁶ Land براساس داده‌های زمینی، پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز رودخانه حبله‌رود، در حاشیه جنوبی البرز مرکزی با مساحتی بالغ بر ۳۲۶۹۹۱ هکتار، بین ۱۳° ۵۲' تا ۱۳° ۵۳' طول شرقی و ۱۷° ۳۵' تا ۱۷° ۵۸' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۲). از نظر تقسیمات کشوری بخش اعظم آن در استان تهران و قسمتی از شمال آن در استان مازندران و قسمتی از جنوب آن در استان سمنان قرار گرفته است. بلندترین نقطه ارتفاعی این حوزه در قله کوه سفیدآب با ارتفاع مطلق ۴۰۴۷ متر و حداقل ارتفاع آن ۹۸۲ متر از سطح دریا است. اقلیم منطقه به روش دومارتن نیمه‌خشک بوده و توزیع فصلی بارندگی به صورت ۴۵ درصد زمستان، ۲۹ درصد بهار، ۲۲ درصد پاییز و سه درصد تابستان است و همچنین میانگین بارندگی ۳۰ ساله در کل حوزه ۲۷۲ میلی‌متر است.

VIC-3L را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت سطحی خاک مورد واسنجی قرار دادند. آنها دریافتند که یکی از مزیت‌های واسنجی مدل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک برخلاف واسنجی با استفاده از داده‌های جریان مشاهداتی این است که می‌توان تغییرات مکانی پارامترهای مدل در سطح حوزه را نیز برآورد کرد (Koochi et al., 2019). طی مطالعه دیگری، در همین حوزه آبخیز، (Azizian et al., 2019)، در حوزه رودخانه سفیدرود استان گیلان، داده‌های منابع بارشی دو پایگاه بازتحلیل شده و ماهواره‌ای را ارزیابی کردند. آنها در این پژوهش از داده‌های بارش پایگاه داده ECMWF و همچنین PERSIANN¹ استفاده کردند. آنها دریافتند علی‌رغم آنکه داده‌های بارش ECMWF از کیفیت بهتری نسبت به داده‌های PERSIANN برخوردار است، در مدل‌سازی هیدرولوژیکی با مدل VIC عملکرد خوبی را نشان نداده است، درحالی‌که PERSIANN در شبیه‌سازی رواناب عملکرد بهتری داشته و نتایج بهتری را ارائه کرده است. در پژوهشی (Markert et al., 2018)، در منطقه جنوب شرق آسیا برای بررسی تأثیر تغییرات کاربری زمین بر خصوصیات هیدرولوژیکی از مدل VIC استفاده کردند و پس از کالیبره کردن داده‌ها برای سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۸۲، در اعتبارسنجی برای سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۱، به کیفیت خوب تا خیلی خوب در شبیه‌سازی ماهیانه رواناب رسیدند (Markert et al., 2018). در مطالعه دیگری، (Sabzi et al., 2019)، به بررسی آب قابل دسترس در حوزه Red River در اوکلوهاما ایلات متحده آمریکا پرداختند. آنها با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC جهت شبیه‌سازی رواناب و سناریوهای مختلفی از CMIP5² نقاطی را که در آینده در این منطقه تحت استرس آبی قرار می‌گیرند را پیش‌بینی کردند (Sabzi et al., 2019). با توجه به قابل دسترس نبودن اطلاعات ایستگاه‌های زمینی در تمامی نقاط حوزه‌های آبخیز وسیع که از

³ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

⁴ Asian Precipitation - Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources

⁵ PERSIANN- Climate Data Record

⁶ ECMWF Reanalysis v5-Land

¹ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

² Coupled Model Intercomparison Project Phase

این روش با کدنویسی در زبان برنامه نویسی پایتون توسط Dang et al., (2020) برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC مورد استفاده قرار گرفت (Dang et al., 2020). این کدها به واسنجی هفت پارامتر خاک مربوط به مدل VIC پرداخته است که در جدول ۱، ارائه و در شکل ۲، روند مطالعه انجام گرفته ارائه شده است. در این پژوهش، با توجه به اینکه داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی از سال ۱۹۹۱ کامل بودند، این سال ابتدای دوره مدلسازی انتخاب شد. از طرفی، به دلیل آغاز عملیات آبخیزداری که منجر به تغییر رژیم طبیعی رودخانه شده بود، سال ۱۹۹۶ به عنوان پایان دوره انتخاب شد. در فرایند مدلسازی داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه وارد مدل شدند و مدلسازی در گام زمانی روزانه انجام گرفت که سال ۱۹۹۱ برای گرم کردن مدل^۴، سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۲ برای واسنجی و سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ به عنوان صحت‌سنجی انتخاب شدند.

داده های مورد استفاده در پژوهش-داده‌های مربوط به خاک، پوشش گیاهی و مدل رقومی ارتفاعی: در این مطالعه اطلاعات مربوط به خاک منطقه از پایگاه داده HWSD^۵ قابل‌دسترس در سایت فائو تهیه شد که دارای ۳۶ طبقه است (Nachtergaele et al., 2009). این طبقه‌بندی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک صورت گرفته است. هر طبقه نشان‌دهنده خصوصیات خاص خاک مانند رنگ، ساختار، بافت، محتوای عناصر شیمیایی و غیره است. در حوزه آبخیز رودخانه حبله‌رود، سه طبقه از این دسته‌بندی وجود دارد که شامل لپتوسول^۶، سولونچاک^۷ و رگوسول^۸ می‌شود که طبقه اول در طبقه بندی مثلث خاک در طبقه رس و هر دو طبقه دوم و سوم در طبقه لوم قرار می‌گیرند. لایه‌های خاک در حوزه آبخیز مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی مثلث خاک در (شکل ۲) نمایش داده شده است.

داده‌های مربوط به پوشش گیاهی برای این

رودخانه حبله‌رود که از رودخانه‌های جاری در این حوضه از کوه‌ها و ارتفاعات شمالی و میانی سرچشمه گرفته و پس از قطع جاده گرمسار-سمنان در حوزه آبخیز پایاب حبله‌رود و در رودخانه گلو تخلیه می‌شود، زهکش اصلی حوزه آبخیز حبله‌رود است. حوزه آبخیز حبله‌رود، دارای پنج ایستگاه هیدرومتری مهم شامل دلیچای، سیمین‌دشت، فیروزکوه، نم‌رود و بن‌کوه است که در این پژوهش، به دلیل کامل بودن اطلاعات مربوط به ایستگاه هیدرومتری بن‌کوه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از این ایستگاه انجام گرفت.

مدل هیدرولوژیکی: مدل هیدرولوژیکی VIC^۱ مدلی است بزرگ مقیاس که در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه واشنگتن^۲ توسط Liang et al., (1994) توسعه یافته است و تاکنون محققان زیادی به توسعه و پیشرفت آن پرداخته‌اند. این مدل، مدلسازی را در دو حالت تعادل کامل آب و انرژی انجام می‌دهد و در بسیاری از رودخانه‌های بزرگ زمین و همچنین در سطح قاره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدای توسعه این مدل از داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی استفاده می‌شد که با توسعه و در دسترس قرار گرفتن محصولات داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس جهانی اخیراً رویکرد استفاده بیشتر داده‌های ورودی مدل از طریق داده‌های ماهواره‌ای بیشتر شده است. همچنین، با توجه به اینکه داده‌های بارش اقلیمی دارای شبکه‌بندی و اندازه سلول خاصی هستند، می‌توان از محاسن دیگر این مدل شبکه‌بندی بودن آن اشاره کرد که می‌تواند با داده‌های اقلیمی هماهنگ شده و پردازش‌های قبل از مدلسازی را کاهش دهد (Salehi, 1399).

واسنجی مدل: در این پژوهش، از یک روش بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک^۳ به نام NSGA-II استفاده شده است. این روش توسط Deb et al., (2002) توسعه یافته است (Deb et al., 2002) و در مطالعات هیدرولوژیکی کاربرد زیادی پیدا کرده است.

⁴ Warm-up

⁵ Harmonized World Soil Database

⁶ Leptosol

⁷ Solonchak

⁸ Regosol

¹ Variable Infiltration Capacity

² University of Washington

³ Genetic Algorithm

Description	Unit	Range	Name
Variable infiltration curve parameter	N/A	0-0.4	Binf
Fraction of Dsmax where non-linear baseflow begins	Fraction	0-1	Ds
Maximum velocity of baseflow	mm/day	0-30	Dsmax
Fraction of maximum soil moisture where non-linear baseflow occur	N/A	0-1	Ws
Exponent used in baseflow curve, normally set to 2	Fraction	1-4	C
Thickness of soil moisture of first layer	m	0.05-0.25	D1
Thickness of soil moisture of second layer	m	0.25-2.5	D2
Thickness of soil moisture of third layer	m	0.25-2.5	D3

داده‌های هواشناسی-داده‌های بارش: در این

پژوهش، از چهار سری داده بارش جهت شبیه‌سازی رواناب استفاده شد.

داده بارش ایستگاه‌های زمینی: در این حوضه ۱۰

ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو وجود دارد که از سال ۱۹۹۱ دارای داده کامل بودند (جدول ۲)، به همین علت، این سال به عنوان مبنای ارزیابی و مدل‌سازی انتخاب شد. جهت ارزیابی دیگر داده‌های بارش و همچنین مدل‌سازی با داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و همچنین ارزیابی توانایی مدل VIC در این حوزه آبخیز، برای مرکز هر سلول درون‌یابی با توجه به موقعیت ایستگاه‌ها به روش فاصله معکوس IDW^۶ انجام گرفت (شکل ۳).

داده بارش PERSIANN-CD^۷ از پایگاه

CHRS^۸: داده بارش ماهواره‌ای با کاربرد مطالعات اقلیمی است که برای شبیه‌سازی رواناب مورد استفاده قرار گرفت (Ashouri et al., 2015).

داده بارش APHRODITE: یک داده بارش بر

اساس ایستگاه‌های زمینی است و توسط مرکز تحقیقات انسان و طبیعت و مرکز هواشناسی ژاپن^۹ راه‌اندازی شده است. هدف از تأسیس این سازمان،

منطقه از پایگاه داده ماهواره مودیس^۱ و محصول MCD12Q1 تهیه شد که بر اساس استاندارد IGBP^۲ در ۱۷ طبقه، دسته‌بندی شده است (Sulla-Menashe and Friedl, 2018). در این حوضه، پنج طبقه مرتع باز (۰/۶ درصد)، بوته‌زار یکساله (۷۴/۴ درصد)، منطقه کشاورزی (۰/۰۲ درصد)، منطقه شهری (۰/۱۲ درصد) و زمین بایر (۲۴/۸ درصد) وجود دارد. داده‌های ضریب سطح برگ از محصول MCD12Q1 و طبقه‌بندی IGBP تهیه شد. برای تهیه داده‌های آلبدو از داده‌های ماهواره مودیس که با استفاده از الگوریتم Theoretical^۳ استخراج شده بودند (شکل ۲)، استفاده شد (Strahler et al., 1999).

باند‌های ارتفاعی در مدل هیدرولوژیکی VIC، به‌عنوان یک ویژگی مهم برای تعیین توزیع فشار آب در خاک و جریان سطحی استفاده می‌شوند. با استفاده از این باندها، مدل قادر است تا تغییرات ارتفاعی در سطح زمین را در نظر بگیرد و به‌عنوان یک عامل مهم برای تعیین دبی جریان در حوزه آبخیز استفاده شود. در حوزه آبخیز رودخانه حبله‌رود که در شمال آن کوه‌های البرز و در جنوب آن کویر مرکزی قرار دارد، بر اساس سلول‌بندی مدل اختلاف ارتفاع در بعضی سلول‌ها به چند هزار متر می‌رسد که در صورت عدم ارائه باندهای ارتفاعی به مدل، مدل سلول را هم سطح در نظر می‌گیرد. اگر چه فایل ورودی باندهای ارتفاعی به مدل اختیاری است، اما با توجه به اختلاف ارتفاع بالا و همچنین تأثیر بالای این ورودی در شبیه‌سازی رواناب، در این منطقه ضروری است. برای تهیه این فایل از SRTM^۴ که یک مدل رقمی ارتفاعی DEM^۵ است استفاده شده است (شکل ۲).

جدول ۱- پارامترهای واسنجی مدل هیدرولوژیکی VIC

Table 1. Calibration Parameters of VIC Model

⁶ Inverse Distance Weighting

⁷ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record

⁸ Center for Hydrometeorology and Remote Sensing

⁹ Center for Humans and Nature Research and Meteorological Center of Japan

¹ MODIS

² International Geosphere-Biosphere Programme

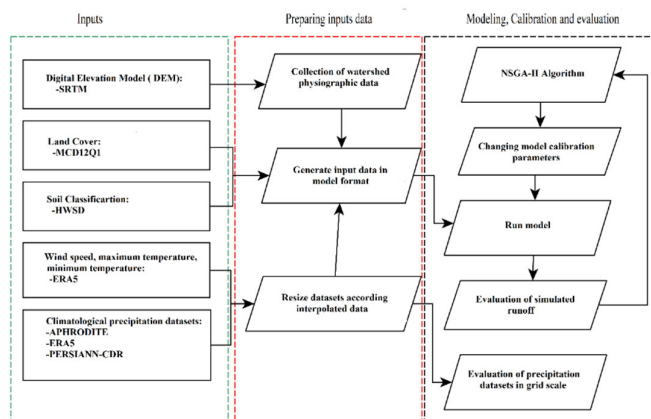
³ Algorithm Theoretical

⁴ Shuttle Radar Topographic Mission

⁵ Digital Elevation model

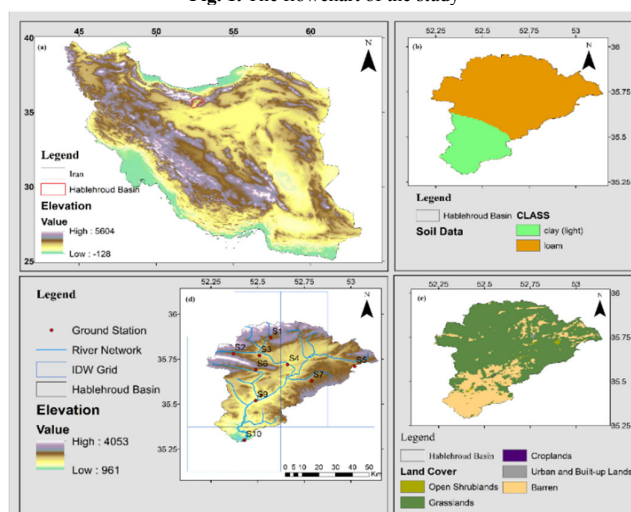
و با سلول‌بندی تعریف شده برای مدل هم‌اندازه و هم شکل شدند. این کتابخانه که در زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده است و به صورت دستور در سیستم عامل لینوکس کار می‌کند، برای تجزیه و تحلیل داده های NetCDF به کار برده می‌شود. اطلاعات کامل داده‌های هواشناسی استفاده شده در این مطالعه در جدول ۳، ارائه شده است.

ایجاد داده‌های بارش روزانه شبکه‌بندی شده در سراسر آسیا است. داده بارش بازتحلیل شده ERA5-Land: داده بارش بازتحلیل شده با طول دوره آماری طولانی است، در شبیه‌سازی رواناب استفاده شد (Muñoz-Sabater et al., 2021). با توجه به اینکه این داده بارش دارای مقیاس مکانی ۹×۹ کیلومتر است، با استفاده از کتابخانه CDO (Schulzweida et al., 2006) پردازش



شکل ۱- روند مطالعه

Fig. 1. The flowchart of the study



شکل ۲- موقعیت حوزه آبخیز حبله رود (a)، لایه های اطلاعاتی استفاده شده در مدل هیدرولوژیکی VIC، جنس خاک (b)، پوشش

گیاهی (c)، اطلاعات رقومی ارتفاع، موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی، ایستگاه هیدرومتری، سلول بندی مدل (d)

Fig. 2. Geographical location of Hablehroud catchment (a), Information layers used in the VIC hydrological model, Soil type (b), Land cover (v), Digital Elevation Model, location of ground stations, outlet, model's network (d)

از سطح زمین و همچنین، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از این پایگاه داده بازتحلیل شده اخذ شد. معیارهای ارزیابی-ارزیابی داده‌های بارش اقلیمی: برای سنجش کیفیت و دقت داده‌های بارش، سری زمانی بارش درون‌یابی شده مربوط به هر سلول

داده‌های دما و باد: به دلیل عدم وجود ایستگاه هواشناسی در دوره مطالعه، در این پژوهش، داده‌های دما و سرعت باد از مرکز پیش‌بینی آب‌وهوا با دامنه متوسط اروپا ERA5 استفاده شد. برای این منظور، داده‌های حداقل دما و حداکثر دما در ارتفاع دو متری

اقلیمی در میان تمام وقایع بارندگی تشخیص می‌دهد و نرخ اشتباه نسبت وقایع بارندگی غیرواقعی در بین تمام بارش‌های تشخیص داده شده به‌وسیله داده بارش اقلیمی است. شاخص آستانه موفقیت تابعی از شاخص احتمال آشکارسازی و نرخ اشتباه است که ترکیبی از خطاهای اشتباه برآورد و رویدادهای ازدست‌رفته است، بنابراین نتیجه متعادل‌تری است.

با سری زمانی مربوط به همان سلول در داده بارش اقلیمی مقایسه شدند که در این مقایسه شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، ضریب کارایی (Gupta et al., 2009)، درصد انحراف نسبی، احتمال آشکارسازی نرخ اشتباه و شاخص آستانه موفقیت محاسبه شد که رابطه‌های آن در جدول ۳، ارائه شده است. احتمال آشکارسازی بخشی از وقایع بارندگی است که بارش

جدول ۲- اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در این پژوهش

Table 2. Information of rain gauge stations used in this research

Station's name	Data availability	Standard Division(mm)	Average(mm)	Elevation(m)	Latitude	Longitude
Lazoor (S1)	1360-Present	4.10	1.34	2424	35° 52' 11"	52° 34' 11"
Najafdar (S2)	1361-Present	4.12	1.06	2388	35° 47' 20"	52° 22' 41"
Ali Abad (S3)	1360-Present	3.44	0.94	2133	35° 46' 11"	52° 30' 06"
Namrood (S4)	1346-Present	3.52	0.93	1816	35° 43' 16"	52° 39' 39"
Chandab (S5)	1367-Present	3.95	0.95	2330	35° 42' 45"	53° 01' 31"
Kahanak (S6)	1360-Present	3.76	1.26	2321	35° 41' 22"	52° 29' 22"
Pirdeh (S7)	1360-Present	1.72	0.51	2283	35° 39' 41"	52° 47' 44"
Firoozkooh (S8)	1345-Present	3.40	0.92	1965	35° 45' 35"	52° 46' 22"
Simin Dasht (S9)	1351-Present	2.92	0.67	1495	35° 31' 24"	52° 29' 46"
Benkooh (S10)	1346-Present	2.23	0.38	1040	35° 18' 19"	52° 25' 54"

جدول ۳- اطلاعات داده‌های بارش استفاده شده در این پژوهش

Table 3. Precipitation datasets information used in this research

Dataset	Temporal resolution	Spatial resolution	Temporal coverage	Spatial coverage	Website
PERSIANN-CDR	Daily, Monthly, Yearly	0.25°×0.25°	1983-present	Global	CHRS portal
ERA5- Land	Hourly, Monthly	9 Km×9 Km	1950-present	Global	Copernicus climate data store
APHRODITE	Daily	0.25°×0.25°	2015-1951	Asia	Aphrodite home page

نتایج و بحث

عملکرد داده‌های بارش اقلیمی: داده‌های بارش اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش، در تمامی سلول‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج شاخص‌های آماری در (جدول ۵) ارائه شده است. بر اساس اطلاعات این جدول، بیشترین همبستگی با میانگین همبستگی ۰/۵۴ در داده بارش APHRODITE مشاهده می‌شود. داده بارش ERA5-Land و PERSIANN-CDR به

ارزیابی عملکرد مدل با داده‌های ماهواره‌ای: در

این پژوهش، از ضریب کارایی KGE به‌عنوان تابع هدف استفاده شد و خود این ضریب و اجزای آن که بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوم مقیاس روزانه و ماهانه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه محاسبه خواهند شد، در این پژوهش ارزیابی شدند.

از نقطه نظر تشخیص وقوع بارش، داده بارش از APHRDITE و ERA5-Land با تشخیص بیش‌تر از ۸۰ درصد وقایع بارش عملکرد بهتری از داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR داشتند که به‌طور تقریبی نیمی از وقایع بارش را تشخیص نداده بود. اگر چه هر سه پایگاه داده بارش در میزان خطا در تشخیص بارش عملکرد مشابهی داشته‌اند اما داده بارش APHRDITE کمترین خطا در تشخیص وقایع بارش داشته‌است و میزان FAR برای این پایگاه داده برابر با ۰/۶۷ است. این میزان خطا برای PERSIANN-CDR برابر با ۰/۶۹ است و برای ERA5-Land برابر با ۰/۷۳ است که این میزان خطا نشان می‌دهد ۷۳ درصد تشخیص‌های بارش توسط این پایگاه داده بارش خطا بوده است. میزان ضریب کارایی CSI که کامل‌تر از دو شاخص تشخیص بارش دیگر است، نشان داد که پایگاه داده بارش APHRDITE با میزان ضریب CSI برابر با ۰/۳۱ بهترین عملکرد در این زمینه را داشته‌است در حالی که دو داده دیگر تفاوت چشمگیری ندارند.

ترتیب با میانگین همبستگی ۰/۴۱ و ۰/۲۴ در رده‌های بعدی قرار دارند. میزان میانگین درصد انحراف نشان می‌دهد داده بارش APHRDITE بارش را کمتر از میزان گزارش شده توسط ایستگاه‌ها تخمین می‌زند در حالی که دو داده دیگر برآورد بیشتری نسبت به میزان گزارش شده دارد. بر اساس این ضریب، سنجش میزان خطا بارش، بیشترین میزان خطا در داده بارش ERA5-Land و کمترین خطا در داده بارش APHRDITE مشاهده شد.

بر اساس میزان میانگین ضریب کارایی KGE که در آن همبستگی و انحراف لحاظ شده است، داده بارش APHRDITE در تخمین بارش بیشترین دقت را دارا بوده و این ضریب به‌طور میانگین در سطح حوزه آبخیز حبله‌رود برابر با ۰/۴۰ است. داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR با میزان میانگین KGE برابر با ۰/۱۸ در رده دوم و داده بارش بازتحلیل شده ERA5-Land با میانگین ۰/۰۵ در رده سوم قرار دارد.

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی داده‌های بارش اقلیمی و رواناب شبیه‌سازی شده

Table 4. Statistical metrics used for evaluating of precipitation datasets and simulated runoff

Number	Index	Unit	Description
1	$CC = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (P_{o,t} - \bar{P}_o) (P_{s,t} - \bar{P}_s)}}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (P_{o,t} - \bar{P}_o)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (P_{s,t} - \bar{P}_s)^2}}$	/	$P_{s,t}$ is the climatological precipitation in time step t $P_{o,t}$ is the Observation precipitation in time step t $\bar{P}_s = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_{s,t}$, $\bar{P}_o = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_{o,t}$
2	$PBias = \frac{\sum_{t=1}^N (P_{s,t} - P_{o,t})}{\sum_{t=1}^N P_{o,t}} * 100$	%	H: is the observed precipitation correctly detected. M: is the observed precipitation not detected.
3	$POD = H / (H + M)$	/	F: is the precipitation detected but not observed
4	$FAR = F / (F + H)$	/	N: Length of period
5	$CSI = H / (F + H + M)$	/	σ_s simulation time series variance, σ_o observation time series variance
6	$KGE = \sqrt{(1 - CC)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ $\beta = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}, \alpha = \frac{\mu_s}{\mu_o}$	/	μ_s simulation time series average, μ_o observation time series average

انحراف بسیار بالا که در یک سلول حتی به بالای ۲۰۰ درصد رسیده است، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR داشته و میزان KGE نیز موید این امر است.
عملکرد داده‌های بارش اقلیمی در مدل هیدرولوژیکی VIC: در این پژوهش، برای ارزیابی از

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد داده بارش APHRDITE در تمامی شاخص‌های مربوط به میزان و تشخیص بارش بهترین عملکرد را داشته است. داده بارش باز تحلیل‌شده ERA5-Land علی‌رغم برتری در میزان همبستگی و همچنین برتری نسبی در تمامی شاخص‌های تشخیص بارش، به دلیل میزان

جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌است. هیدروگراف رواناب شبیه‌سازی شده دوره واسنجی و صحت‌سنجی در مقیاس روزانه و ماهانه در شکل ۳ و ۶ نشان داده شده‌است. همچنین، داده‌های رواناب شبیه‌سازی شده توسط هر داده بارش در برابر رواناب مشاهداتی در مقیاس زمانی روزانه در شکل‌های ۴ و ۵، و در مقیاس ماهانه در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌است.

توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در سطح حوزه آبخیز حبله‌رود، ابتدا واسنجی مدل با داده‌های بارش درون‌یابی شده به روش IDW انجام گرفت و پس از اطمینان از عملکرد مدل، واسنجی مدل با داده‌های بارش اقلیمی انجام گرفت. رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده از چهار سری داده بارش با رواناب مشاهداتی در ایستگاه بنکوه مقایسه شد و نتایج این مقایسه در مقیاس روزانه و ماهانه به‌ترتیب در

جدول ۵- خلاصه نتایج ارزیابی محصولات مختلف بارش اقلیمی با داده بارش درون‌یابی شده با کمک ایستگاه‌های زمینی

Table 5. Comparison of climatological datasets with interpolated of ground station's precipitation data

Index	APHRODITE			PERSIANN-CDR			ERA5-Land		
	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
CC	0.18	0.54	0.78	0.09	0.24	0.33	0.10	0.41	0.59
PBIAS	-16.29	-0.49	30.11	-12.49	19.58	76.29	12.48	66.90	208.3
KGE	0.05	0.40	0.65	-0.11	0.18	0.32	-1.26	0.05	0.54
POD	0.75	0.85	0.96	0.42	0.51	0.62	0.76	0.82	0.89
FAR	0.47	0.67	0.83	0.53	0.69	0.85	0.57	0.73	0.87
CSI	0.16	0.31	0.48	0.13	0.23	0.33	0.13	0.25	0.38

مشابهی دارند. میزان ضریب کارایی KGE برای داده بارش APHRODITE برابر با ۰/۶۲ و برای PERSIANN-CDR برابر با ۰/۶۴ است. داده بارش ERA5-Land که عملکرد ضعیف‌تری در تخمین میزان بارش داشت، در این شبیه‌سازی رواناب نیز با میزان KGE برابر با ۰/۵۱ در جایگاه سوم قرار گرفت. دو داده بارش APHRODITE و ERA5-Land رواناب را کمتر از واقعیت تخمین می‌زنند، در حالی که PERSIANN-CDR تخمین بیشتری از رواناب را ارائه می‌دهد. اگرچه کمترین همبستگی در قسمت ارزیابی بارش مربوط به داده بارش PERSIANN-CDR بود، این داده بارش بیشترین همبستگی را در شبیه‌سازی رواناب نشان می‌دهد. خط برازش رسم شده در شکل ۴ و همچنین هیدروگراف روزانه ارائه شده در شکل ۳، نشان می‌دهند که مدل با استفاده از این سه سری داده بارش، دبی‌های کم را بیش‌تر از واقعیت و دبی‌های بیشینه را کمتر از میزان واقع‌شده تخمین می‌زنند که این به می‌تواند به‌دلیل برداشت آب در دوره کشت و آبیاری اراضی و باغات باشد.

در دوره صحت‌سنجی بر اساس تابع هدف مدل‌سازی، مدل با داده بارش PERSIANN-CDR

نتایج روزانه: با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۶، در دوره واسنجی، مدل با استفاده از داده‌های بارش درون‌یابی شده، با توجه به میزان ضریب کارایی KGE که برابر با ۰/۷۸ بوده است، عملکرد مناسبی داشته و رواناب را همبستگی بالایی شبیه‌سازی کند. ارزش عدد α برابر با ۰/۹۳ نشان می‌دهد که میزان رواناب شبیه‌سازی شده نسبت به میزان مشاهداتی در ایستگاه بنکوه کمتر بوده و مدل آن را کمتر تخمین زده است. خط برازش رسم شده در شکل ۴، نیز این برآورد کمتر از واقعیت را نشان می‌دهد. در دوره صحت‌سنجی مدل تقریباً با همان دقت دوره واسنجی، رواناب را شبیه‌سازی کرده است که این نشان‌دهنده همگن بودن داده‌های بارش ورودی به مدل بوده است. در این دوره نیز رواناب کمتر از واقعیت تخمین زده شده است که میزان α کمتر از یک و خط برازش ارائه شده در شکل ۵، این تخمین کمتر از واقعیت را اثبات کرده است. همبستگی در این دوره نسبت به دوره واسنجی کاهش یافته است.

نتایج شبیه‌سازی رواناب روزانه در دوره واسنجی توسط داده‌های بارش اقلیمی نشان می‌دهد، دو داده بارش APHRODITE و PERSIANN-CDR عملکرد

نسبت به داده بارش ERA5-Land در شبیه‌سازی رواناب داشته است. میزان KGE برای APHRODITE و ERA5-Land به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۶۶ است که این نشان می‌دهد هر سه داده بارش اقلیمی در این دوره عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. شکل ۵، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی رواناب کمینه توسط دو داده بارش PERSIANN-CDR و APHRODITE عملکرد بهتری نسبت به داده بارش ERA5-Land داشته است که این به دلیل میزان انحراف کمتر در تخمین میزان بارش است.

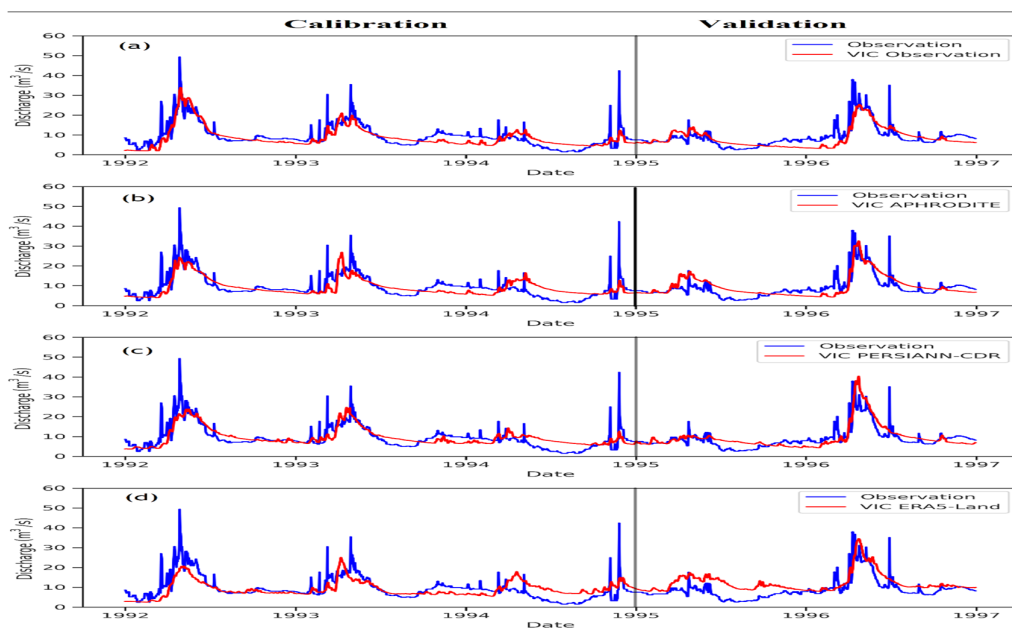
عملکرد بهتری در شبیه‌ساز رواناب داشته است. میزان KGE و همبستگی برای این داده ماهواره‌ای به ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۰/۸۳ بوده است که حاکی از عملکرد بهتر این داده بارش نسبت به داده بارش مشاهداتی است.

همان‌طور که این داده در دوره واسنجی رواناب را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند، در این دوره نیز رواناب را بیشتر تخمین می‌زند و این بیش‌برآورد در ارزیابی دقت بارش این پایگاه نیز مشاهده شده بود. داده بارش APHRODITE همچون دوره واسنجی عملکرد بهتری

جدول ۶- نتایج دبی روزانه ایستگاه بنکوه با رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های بارش مختلف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

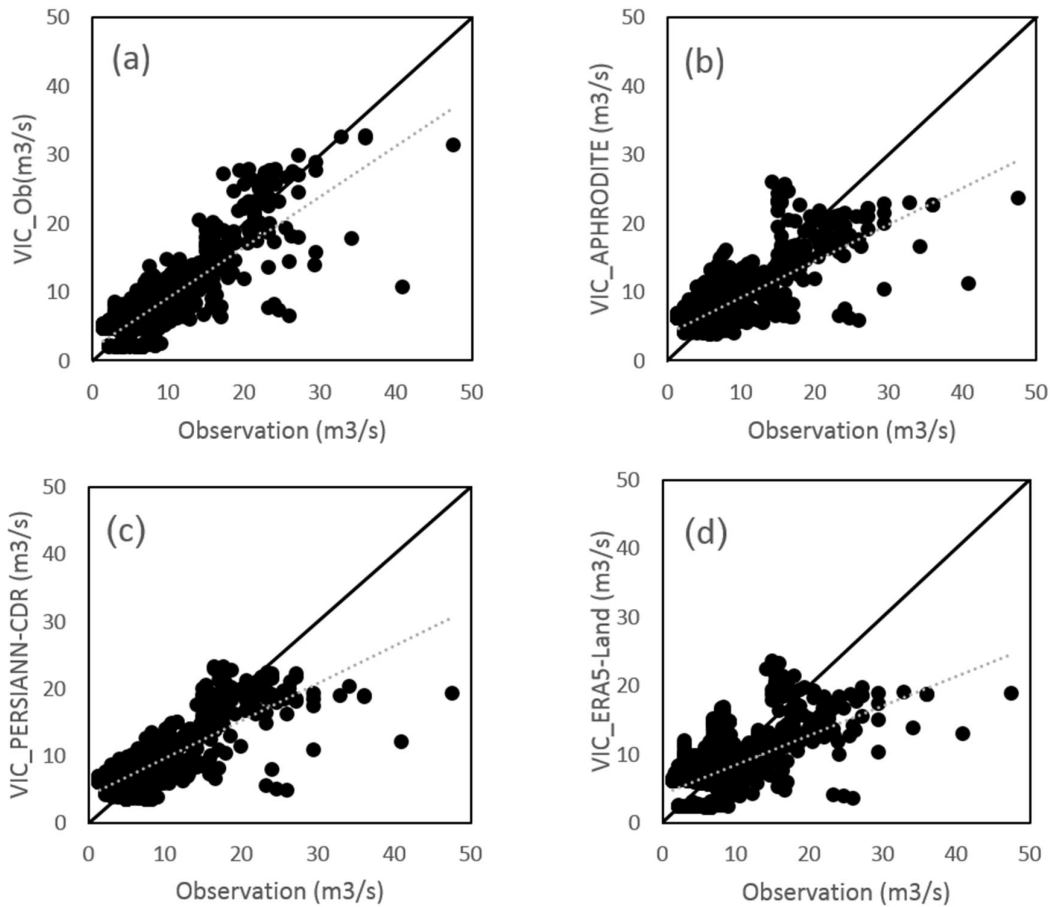
Table 6. The results of the daily discharge of Bonekooh station with runoff simulated with different precipitation datasets in the calibration and validation period

Calibration (1992-1994)				
	α	β	CC	KGE
Observation	0.93	0.90	0.81	0.78
APHRODITE	0.98	0.74	0.72	0.62
PERSIANN-CDR	1.01	0.73	0.76	0.64
ERA5-Land	0.90	0.67	0.64	0.50
Validation (1995-1996)				
	α	β	CC	KGE
Observation	0.93	0.92	0.79	0.76
APHRODITE	1.08	1.03	0.77	0.75
PERSIANN-CDR	1.05	1.14	0.83	0.77
ERA5-Land	1.24	0.93	0.78	0.66



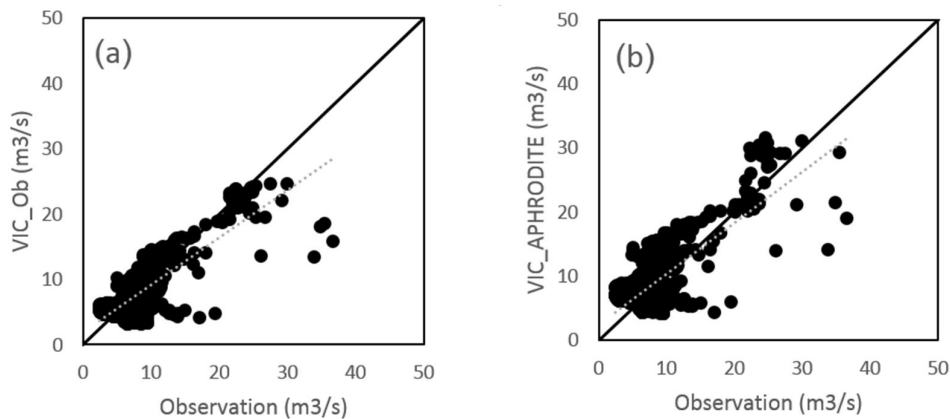
شکل ۳- هیدروگراف روزانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی (a)، داده‌های بارش پایگاه APHRODITE (b)، داده‌های بارش پایگاه PERSIANN-CDR (c)، داده‌های بارش پایگاه ERA5-Land (d)

Fig. 3. Daily hydrograph of observed and simulated runoff during calibration and validation period using: Observed rain gauge stations (a), APHRODITE dataset (b), PERSIANN-CDR dataset (c) and ERA5-Land dataset (d)



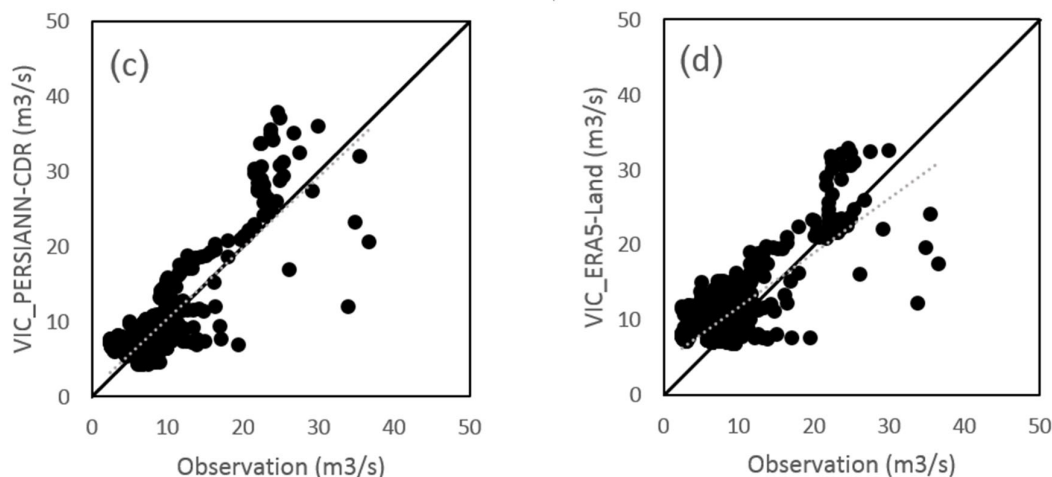
شکل ۴- نمودار رواناب مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه‌سازی شده با استفاده از: (a) داده بارش ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی (محور عمودی)، (b) داده بارش APHRODITE (محور عمودی)، (c) داده بارش PERSIANN-CDR (محور عمودی)، (d) داده بارش ERA5-Land در دوره واسنجی (محور عمودی) در مقیاس روزانه برای دوره واسنجی

Fig. 4. Scatter plot of monthly observation streamflow (horizontal axis) and simulated daily streamflow using: (a) Observed rain gauge stations (vertical axis); (B) APHRODITE dataset (vertical axis); (C) PERSIANN-CDR dataset (vertical axis); (D) ERA5-Land (vertical axis) in calibration period



شکل ۵- نمودار رواناب مشاهداتی (محور افقی) در برابر رواناب روزانه شبیه‌سازی شده با استفاده از: (a) داده بارش ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی (محور عمودی)، (b) داده بارش APHRODITE (محور عمودی)، (c) داده بارش PERSIANN-CDR (محور عمودی)، (d) داده بارش ERA5-Land در دوره واسنجی (محور عمودی) در مقیاس روزانه برای دوره واسنجی

Fig. 5. Scatter plot of monthly observation streamflow (horizontal axis) and simulated daily streamflow using: (a) Observed rain gauge stations (vertical axis); (B) APHRODITE dataset (vertical axis); (C) PERSIANN-CDR dataset (vertical axis); (D) ERA5-Land (vertical axis) in validation period



ادامه شکل ۵

Fig. 5. Continued

میزان ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری بن‌کوه کمتر است.

بر اساس میزان ضریب کارایی KGE و میزان همبستگی ارائه شده در جدول ۷، داده بارش PERSIANN-CDR در دوره واسنجی عملکرد بهتری نسبت به دیگر داده‌های بارش در تخمین رواناب داشته است. میزان این ضریب برای داده‌های بارش PERSIANN-CDR، APHRODIATE و ERA5-Land به ترتیب برابر است با ۰/۷۶، ۰/۷۱ و ۰/۵۹ که ترتیب برتری این داده‌ها در شبیه‌سازی رواناب در مقیاس روزانه، در مقیاس ماهانه مجدداً تکرار شد.

دو داده بارش ERA5-Land و APHRODITE تمایل به برآورد کمتر از واقعیت رواناب دارند، در حالی که PERSIANN-CDR رواناب را بیشتر تخمین می‌زند. خط برازش رسم شده در شکل ۷ همانند نتایج شبیه‌سازی رواناب در مقیاس روزانه نشان می‌دهد.

این سه سری داده رواناب‌های کمینه را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زنند که این رواناب‌ها مربوط به دوره آبیاری زمین‌های کشاورزی است، در حالی که دبی‌های بیشینه را عموماً کمتر از واقعیت تخمین می‌زنند.

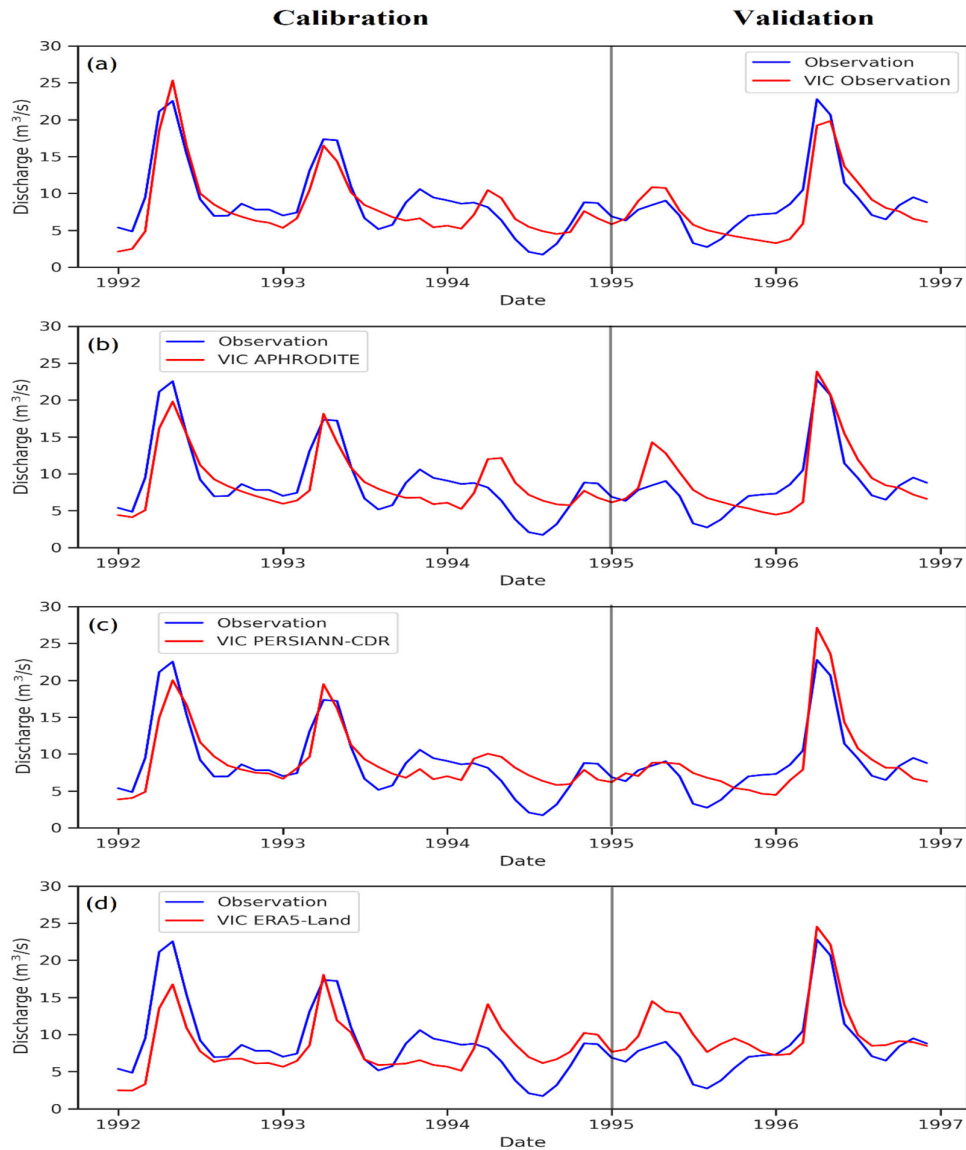
نتایج ماهانه: مدل هیدرولوژیکی VIC رواناب را به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند که در این پژوهش نتایج به مقیاس ماهانه تبدیل شده و با رواناب ماهانه مشاهداتی در ایستگاه بن‌کوه مقایسه شد. نتایج در جدول ۷ و شکل‌های ۶، ۷ و ۸، ارائه شده است.

جدول ۷، نشان می‌دهد که رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های بارش درون‌یابی شده ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو، از دقت بالایی در مقیاس ماهانه برخوردار بوده است. میزان ضریب کارایی KGE برای این سری داده در دوره واسنجی برابر با ۰/۸۶ و برای دوره صحت‌سنجی برابر با ۰/۸۳ است که اندکی از میزان این ضریب در مقیاس روزانه بیشتر است.

شکل ۶، نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی رواناب در ماه‌هایی که برداشت آب جهت مصارف کشاورزی انجام گرفته شده است، عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهد اما توانسته رواناب‌های بیشینه را با دقت مناسبی تخمین بزند. خط برازش رسم شده در شکل ۷ (الف) و شکل ۸ (الف) نشان می‌دهد در هر دو دوره شبیه‌سازی، میزان رواناب تخمین زده شده از

جدول ۷- نتایج دبی ماهانه ایستگاه بنکوه با رواناب شبیه‌سازی شده با داده‌های بارش مختلف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی
Table 7. Results of comparison monthly simulated runoff by using different datasets with Bonekooch station discharge for calibration and validation period

Calibration (1992-1994)				
	α	β	CC	KGE
Observation	0.93	0.99	0.87	0.86
APHRODITE	0.98	0.81	0.78	0.71
PERSIANN-CDR	1.01	0.82	0.83	0.76
ERA5-Land	0.90	0.74	0.70	0.59
Validation (1995-1996)				
	α	β	CC	KGE
Observation	0.93	0.98	0.84	0.83
APHRODITE	1.08	1.10	0.83	0.79
PERSIANN-CDR	1.05	1.20	0.90	0.77
ERA5-Land	1.24	0.97	0.86	0.72



شکل ۶- هیدروگراف ماهانه رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی (a)، داده‌های بارش پایگاه APHRODITE (b)، داده‌های بارش پایگاه PERSIANN-CDR (c)، داده‌های بارش پایگاه ERA5-Land (d)

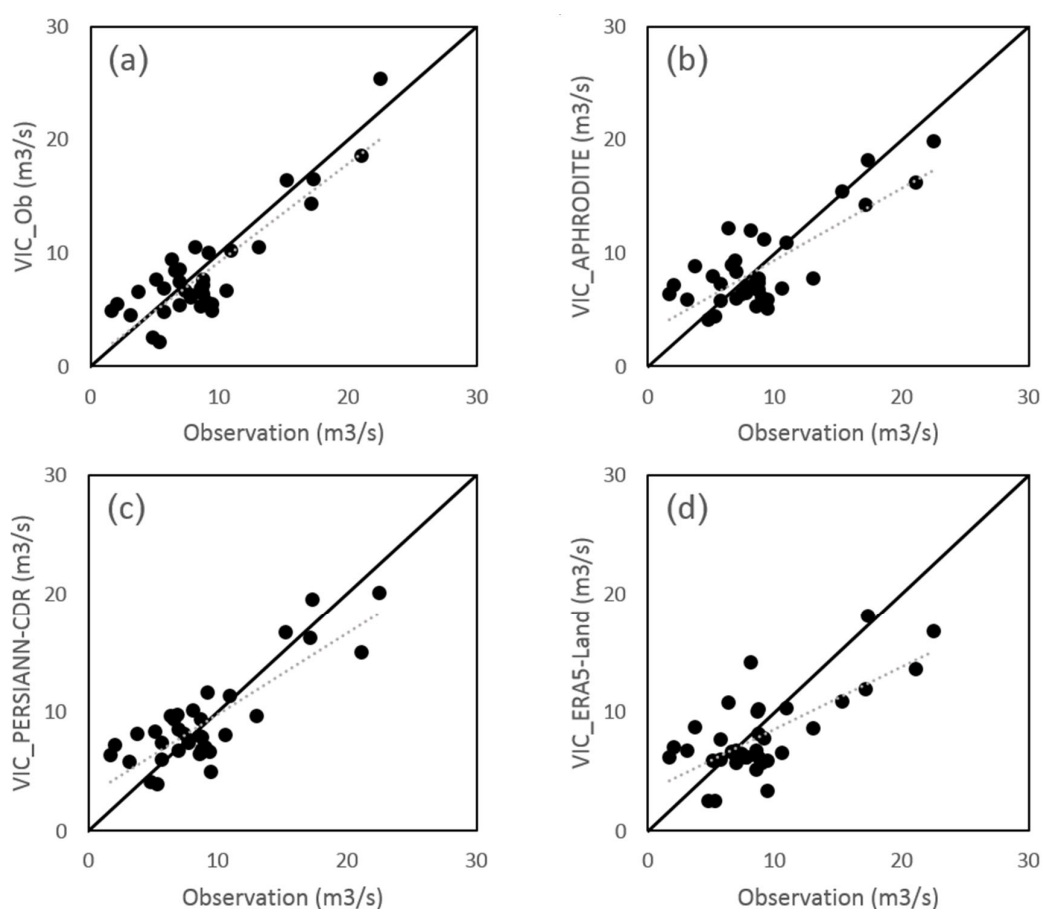
Fig. 6. Monthly hydrograph of observed and simulated runoff during calibration and validation period using: Observed rain gauge stations (a), APHRODITE dataset (b), PERSIANN-CDR dataset (c) and ERA5-Land dataset (d)

حالی که این داده بارش کمترین میزان همبستگی در مقایسه با ایستگاه‌های باران‌سنجی داشت.

شکل‌های ۶ و ۸ نشان می‌دهند که داده بارش APHRDITE دقت مناسب‌تری در تخمین دبی بیشینه دارد در حالی که داده بارش PERSIANN-CDR دبی کمینه را بهتر تخمین می‌زند اما در تخمین دبی‌های بیشینه بیش‌برآورد دارد. داده بارش ERA5-Land دقت نامناسبی در دبی‌های کمینه دارد و آنها را بیشتر تخمین می‌زند.

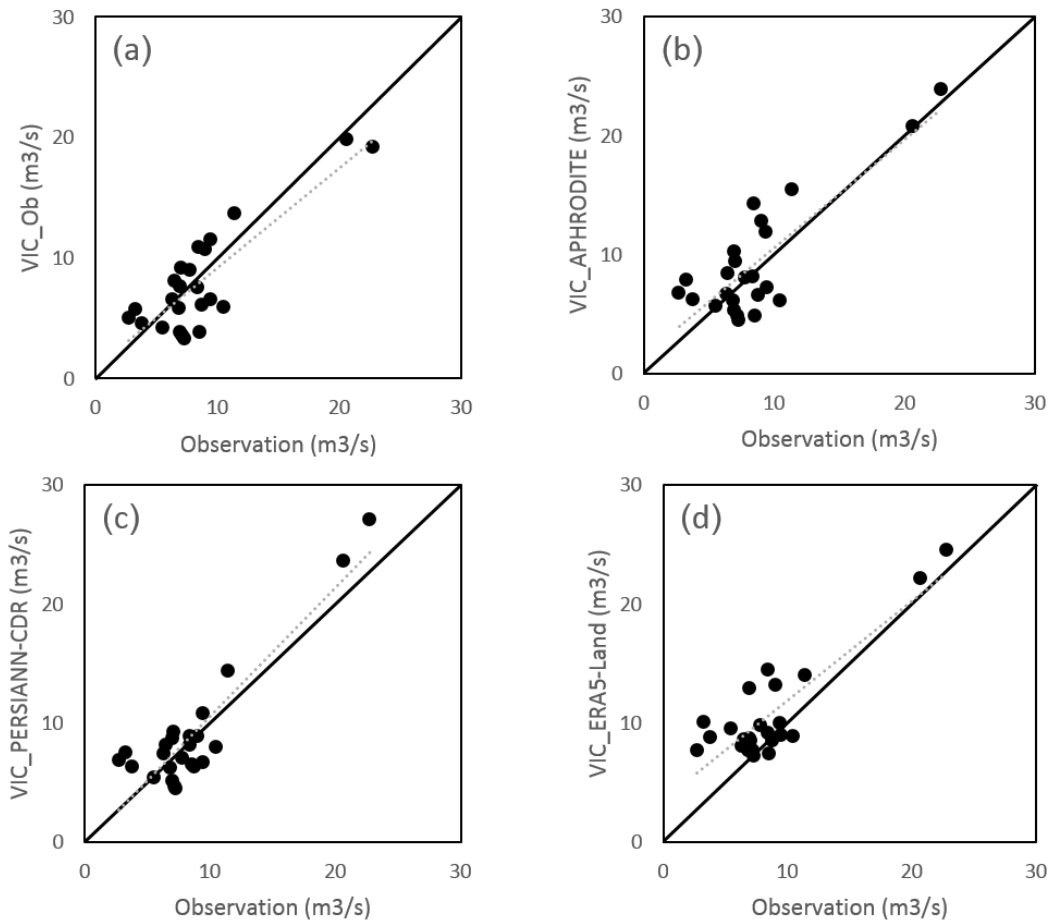
در دوره صحت‌سنجی هر سه داده بارش، رواناب را بیشتر از واقعیت تخمین زده‌اند که این در میزان α بیشتر از یک و همچنین، خط برازش داده شده در شکل ۸، نمود پیدا کرده است.

بر اساس تابع هدف واسنجی، بهترین عملکرد در این دوره مربوط به داده بارش APHRDITE است با میزان KGE برابر با ۰/۷۹ که این ضریب برای PERSIANN-CDR برابر با ۰/۷۷ و برای ERA5-Land برابر با ۰/۷۲ است. بیشترین همبستگی مربوط به داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR است در



شکل ۷- نمودار رواناب ماهانه مشاهده‌ای (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از: (a) داده بارش ایستگاه‌های مشاهده‌ای زمینی (محور عمودی)، (b) داده بارش APHRDITE (محور عمودی)، (c) داده بارش PERSIANN-CDR (محور عمودی)، (d) داده بارش ERA5-Land در دوره واسنجی (محور عمودی) در مقیاس ماهانه برای دوره واسنجی

Fig. 7. Scatter plot of monthly observation streamflow (horizontal axis) and simulated monthly streamflow using: (a) Observed rain gauge stations (vertical axis); (B) APHRDITE dataset (vertical axis); (C) PERSIANN-CDR dataset (vertical axis); (D) ERA5-Land (vertical axis) in calibration period.



شکل ۸- نمودار رواناب ماهانه (محور افقی) در برابر رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از: (a) داده بارش ایستگاه‌های مشاهده‌ای زمینی (محور عمودی)، (b) داده بارش APHRODITE (محور عمودی)، (c) داده بارش PERSIANN-CDR (محور عمودی)، (d) داده بارش ERA5-Land در دوره واسنجی (محور عمودی) در مقیاس ماهانه برای دوره صحت‌سنجی

Fig. 8. Scatter plot of monthly observation streamflow (horizontal axis) and simulated monthly streamflow using: (a) Observed rain gauge stations (vertical axis); (B) APHRODITE dataset (vertical axis); (C) PERSIANN-CDR dataset (vertical axis); (D) ERA5-Land (vertical axis) in validation period

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از داده‌های بارش اقلیمی جهت ورود به مدل VIC استفاده شد. حوضه انتخاب شده یک منطقه مناسب از جنبه وجود داده‌های ایستگاه‌های مشاهده‌ای بود. جهت آگاهی از دقت داده‌های بارش اقلیمی، این داده‌ها در مقیاس سلول با داده بارش درون‌یابی شده ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از این ارزیابی برای بررسی توان مدل هیدرولوژیکی VIC در این منطقه، ابتدا شبیه‌سازی رواناب با داده‌های بارش درون‌یابی شده ایستگاه‌های باران‌سنجی انجام گرفت و پس از آگاهی از عملکرد مدل در این حوزه آبخیز، نتایج شبیه‌سازی رواناب با کمک داده‌های بارش اقلیمی در دو مقیاس

زمانی روزانه و ماهانه مقایسه شد.

موضوع قابل تأملی که در این پژوهش وجود داشت، برداشت زیاد آب در بخش کشاورزی بود که این امر مدل‌سازی را با خطای زیادی روبرو می‌کرد. این برداشت‌ها به تناوب و بسته به شرایط هر زیرحوضه، از اردیبهشت ماه آغاز و تا آبان‌ماه ادامه داشت، اما از خردادماه تا مهرماه به صورت یکپارچه در سطح حوضه انجام می‌گرفت.

بنابراین، می‌توان به طور خلاصه جمع‌بندی نتایج پژوهش را به صورت زیر ارائه نمود:

- در این حوضه داده بارش APHRODITE دقت بهتری نسبت به دو داده بارش دیگر دارد. این به دلیل ماهیت این داده بارش است که حاصل درون‌یابی

با توجه به این که ضریب کارایی KGE داده‌های بارش استفاده شده در این مطالعه کمتر از ۰/۴۰ بود، نتایج رواناب حاصل از استفاده این داده‌ها در شبیه سازی رواناب منجر به ضریب کارایی بالاتر از ۰/۵۰ برای هر سه داده بارش شد که این نتیجه با نتایج ارائه شد در پژوهش (Salehi et al., 2022) همخوانی دارد. با توجه به اینکه اقدامات آبخیزداری در این حوضه از سال ۱۹۹۸ آغاز شده است، مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی انجام گرفته در این حوضه به دو بخش قبل از سال ۱۹۹۸ و بعد از آن تقسیم شده است و نمی توان مدل را به صورت یکپارچه برای یک دوره بلندمدت استفاده کرد. از طرفی، با توجه به اینکه مدل هیدرولوژیکی VIC یک مدل بر پایه سلول است، می توان از داده‌های جهانی مربوط به دیگر اجزا هیدرولوژیکی شامل رطوبت خاک و تبخیر-تعرق نیز برای ارزیابی توان مدل استفاده کرد. همچنین، دیگر خروجی این مدل میزان برف و آب معادل آن است که در این حوضه که شمال آن منطقه کوهستانی است، کاربرد زیادی خواهد داشت و می‌توان با شبیه‌سازی آن، میزان تغییرات آن را در طول یک دوره بلند مدت با کمک داده‌های اقلیمی بررسی کرد.

تشکر و قدردانی

از سازمان هواشناسی و دفتر مطالعات حبله‌رود سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور به علت در اختیار قراردادن اطلاعات پایه حوضه حبله‌رود کمال تشکر و قدردانی را دارد.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند.

ایستگاه‌های زمینی است که در موسسه‌ای در کشور ژاپن انجام می‌گیرد. داده بارش ERA5-Land اگر چه دقت بهتری در تشخیص وقایع بارش داشت اما میزان انحراف بالای آن که در موردی به بیش از ۲۰۰ درصد رسید، باعث شد در جایگاه سوم قرار گرفته و داده بارش PERSIANN-CDR در جایگاه دوم قرار دارد.

- مدل هیدرولوژیکی VIC در حوزه آبخیز حبله رود، توانایی مناسبی در شبیه‌سازی رواناب در مقیاس روزانه و ماهانه با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه های باران‌سنجی وزارت نیرو داشت. همچنین، نتایج نشان داد داده‌های بارش APHRODITE و PERSIANN-CDR علی‌رغم دقت متفاوت در تخمین بارش، عملکرد مشابهی با یکدیگر و همچنین با داده بارش درون‌یابی شده در شبیه‌سازی رواناب داشتند که این دو داده بارش در شبیه‌سازی رواناب در این حوزه آبخیز می‌تواند به‌عنوان جایگزین داده بارش ایستگاه های زمینی قرار گیرند. داده بارش ERA5-Land به دلیل انحراف بالا در تخمین بارش، در تخمین رواناب بیش‌برآورد زیادی داشت.

- اگر چه داده بارش APHRODITE عملکرد بهتری در تخمین میزان بارش و همچنین در تشخیص واقع بارش داشت اما داده بارش PERSIANN-CDR در شبیه‌سازی رواناب عملکرد بهتری داشت و در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، در مقیاس روزانه رواناب را با دقت بیشتری تخمین زد. این نتیجه مشابه نتیجه ارائه شده توسط (Shayeghi et al., 2020) است که نشان دادند اگرچه داده بارش بازتحلیل شده ERA-Interim دقت بیشتری در تخمین بارش دارد اما داده بارش PERSIANN در تخمین رواناب بهتر عمل می‌کند. لذا، برتری یک داده بارش در مقایسه با ایستگاه‌های باران‌سنجی دلیل بر برتری آن داده در شبیه‌سازی رواناب نیست و می‌تواند عملکرد هیدرولوژیکی آن‌ها متفاوت باشد.

منابع مورد استفاده

- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R., Prat, O.P., 2015. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. America. Meteorol. Soci.* 96(1), 69-83 .
- Dang, T.D., Vu, D.T., Chowdhury, A.F.M.K., Galelli, S., 2020. A software package for the representation and optimization of water reservoir operations in the VIC hydrologic model. *Environ. Model. Soft.* 126, 104673.

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evolu. Comput.* 6(2), 182-197 .
- Dwarakish, G., Ganasri, B., 2015. Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geosci.* 1(1), 1115691 .
- Ghoreishi GharahTikan, S., 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 Soil Manage. Model.* 2(1), 1-13 .
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377(1-2), 80-91 .
- Islam, M.S., Oki, T., Kanae, S., Hanasaki, N., Agata, Y., Yoshimura, K., 2007. A grid-based assessment of global water scarcity including virtual water trading. *Water Resou. Manage.* 21(1), 19-33 .
- Kauffeldt, A., Wetterhall, F., Pappenberger, F., Salamon, P., Thielen, J., 2016. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environ. Model. Soft.* 75, 68-76 .
- Li, Q., Yu, X., Xin, Z., Sun, Y., 2013. Modeling the effects of climate change and human activities on the hydrological processes in a semiarid watershed of loess plateau. *J. Hydrol. Engin.* 18(4), 401-412 .
- Liang, J., Liu, Q., Zhang, H., Li, X., Qian, Z., Lei, M., Li, X., Peng, Y., Li, S., Zeng, ., 2020. Interactive effects of climate variability and human activities on blue and green water scarcity in rapidly developing watershed. *J. Cleaner Produc.* 265, 121834 .
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 99(D7), 14415-14428 .
- Markert, K.N., Griffin, R.E., Limaye, A S., McNider, R.T., 2018. spatial modeling of land cover/land use change and its effects on hydrology within the Lower Mekong Basin. In *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia* (pp. 667-698). Springer .
- Martin, E., Gascoïn, S., Grusson, Y., Murgue, C., Bardeau, M ,.Anctil, F., Ferrant, S., Lardy, R., Le Moigne, P., Leenhardt, D., 2016. On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: examples from the Garonne Basin of France. *Surv. Geophys.* 37, 223-247 .
- Mausser, W., Bach, H., 2009. PROMET–Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *J. Hydrol.* 376(3-4), 362-377 .
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Sys. Sci. Data* 13(9), 4349-438.
- Nachtergaele, F., Velthuisen, H., Verelst, L., Wiberg, D., 2009. Harmonized World Soil Database (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Nepal, S., Krause, P., Flügel, W.A., Fink, M., Fischer, C., 2014. Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrolo. Proces.* 28(3), 1329-1344 .
- Sabzi, H.Z., Moreno, H.A., Fovargue, R., Xue, X., Hong, Y., Neeson, T.M., 2019. Comparison of projected water availability and demand reveals future hotspots of water stress in the Red River basin, USA. *J. Hydrol.: Regional Studies* 26, 100638 .
- Salehi, H., Sadeghi, M., Golian, S., Nguyen, P., Murphy, C., Sorooshian, S., 2022. The Application of PERSIANN Family Datasets for Hydrological Modeling. *Remote Sens.* 14(15), 3675.
- Sayama, T., McDonnell, J.J., 2009. A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale. *Water Resou. Res.* 45.
- Schulzweida, U., Kornblueh, L., Quast, R., 2006. CDO user's guide. Climate Data Operators, Version, 1(6), 205-209 .
- Shayeghi, A., Azizian, A., Brocca, L., 2020. Reliability of reanalysis and remotely sensed precipitation products for hydrological simulation over the Sefidrood River Basin, Iran. *Hydrol. Sci. J.* 65(2), 296-310 .
- Strahler, A.H., Muller, J., Lucht, W., Schaaf, C., Tsang, T., Gao, F., Li, X., Lewis, P., Barnsley, M.J., 1999. MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version 5.0. MODIS documentation, 23(4), 42-47 .
- Sulla-Menashe, D., Friedl, M.A., 2018. User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product. USGS: Reston, VA ,USA, 1-18 .

- Wang, W., Shao, Q., Yang, T., Peng, S., Xing, W., Sun, F., Luo, Y., 2013. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China. *Hydrolo. Proces.* 27(8), 1158-1174 .