

Sub-basin prioritization for flood control based on their contribution to flood characteristics using satellite remote sensing data: A case study of the Hablehroud River Basin

Razie Khani¹, Khosrow Hosseini²  , Sayed-Farhad Mousavi³ 

1. M.Sc. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: razie.khaniii@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: khoseini@semnan.ac.ir
3. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: fmousavi@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 Feb 2025
Revised 10 May 2025
Accepted 26 May 2025
Published 26 Jun 2025

Keywords:
Rainfall-Runoff,
Flood Potential,
HEC-HMS,
IMERG.

ABSTRACT

Objective: In this study, the sub-basins of the Hablehroud watershed were prioritized in terms of flood potential using the HEC-HMS hydrological model.

Method: Due to the lack of ground-based precipitation data, satellite-based rainfall data from the Global Precipitation Measurement (GPM) mission, specifically the IMERG product, were utilized. Three flood events were selected for model calibration and validation, with calibration performed using two flood events from 2007. The coefficients of determination (R^2) and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) for the April event were 0.93 and 0.83, respectively, while for the June event, they were 0.86 and 0.75, indicating satisfactory model performance. After model development, a 50-year return period design storm was introduced into the model. Using the sequential sub-basin elimination method, the contribution of each sub-basin to peak discharge and flood volume at the Bankouh gauging station was analyzed.

Results: The results showed that Sub-basin 4, with an area of 575.56 km², a peak discharge of 239 m³/s, and a flood volume of 12,086 thousand m³, played the most significant role in flood generation, resulting in a 22.58% reduction in outlet discharge upon its removal. Evaluation of the satellite precipitation data revealed a mean correlation coefficient of 0.51, a bias coefficient of 3.13, and a mean error of 1.92.

Conclusion: The average probability of precipitation detection exceeded 0.86. Furthermore, the results demonstrated that larger basin area or higher discharge do not necessarily lead to greater flood contribution, and that factors such as basin location, concentration coefficient, and time lag also play critical roles in flood generation.

Cite this article: Khani R, Hosseini Kh, Mousavi SF. Sub-basin prioritization for flood control based on their contribution to flood characteristics using satellite remote sensing data: A case study of the Hablehroud river basin. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 11-24. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12359.1009>.



Introduction

This study prioritizes sub-basins of the Hablehroud watershed for flood risk using the HEC-HMS model, with GPM satellite rainfall data due to the lack of ground observations. Three flood events were used for calibration and validation, showing strong model performance (e.g., R^2 up to 0.93).

A 50-year flood simulation and sub-basin elimination method identified Sub-basin 4 as the most critical, reducing outflow by 22.58% when removed. Satellite data evaluation showed reasonable accuracy. Results indicate that factors like location and concentration time matter more than just area or peak flow.

Method

This section focuses on modeling the Hablehroud Watershed using the HEC-HMS hydrological model. The study area, covering approximately 326,991 hectares, spans parts of Tehran, Mazandaran, and Semnan provinces.

Soil data were obtained from the HWSDB database, while vegetation cover information was derived from MODIS satellite imagery. Curve Numbers (CN) for sub-basins were calculated based on soil hydrologic groups and land use types using TR-55 reference tables. Due to the unavailability of high-resolution observational rainfall data, satellite-based GPM (IMERG product) precipitation data with a 30-minute temporal resolution were utilized and converted to hourly intervals via Python programming.

The SCS-CN and Clark methods were applied for runoff estimation. Model performance was evaluated using R^2 , Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Percent Bias (PBIAS) indices. The model was calibrated and validated against three selected flood events recorded at the Bankouh hydrometric station.

Results

This study employed the HEC-HMS model to manage flood risk in the Hablehroud Basin. After determining Curve Numbers (CN) for sub-basins using land cover and soil data, the accuracy of IMERG satellite rainfall data was evaluated and deemed acceptable.

The model was then calibrated and validated using these data, showing strong agreement between simulated and observed hydrographs (R^2 up to 93% and NSE up to 83%).

To identify flood-prone areas, the impact of individually removing each sub-basin on peak discharge and flood volume was analyzed. Sub-basin 4, which showed the highest reduction in peak discharge, was prioritized for flood control interventions.

Additionally, a 30% reduction in CN values for individual sub-basins significantly decreased peak discharge and flood volume, with model performance (NSE) improving up to 89.6%.

The results highlight that land use modifications and enhanced soil infiltration can serve as effective strategies for flood mitigation. The study underscores the value of targeted sub-

basin management and CN adjustment in improving watershed hydrological responses and reducing flood risk.

Conclusion

This study investigates the simulation of hydrological processes in a watershed using the HEC-HMS model, along with remote sensing and GIS data. The results indicate that the model performs well in simulating runoff and streamflow, and satellite data significantly enhance the simulation accuracy in the absence of ground-based stations. Land use maps, digital elevation models, and soil data were generated using GIS.

The analysis shows that watershed area alone does not determine the amount of runoff; factors such as slope, elevation, time of concentration, and sub-basin location also play important roles.

Sub-basin 4 is the largest in terms of area, while sub-basin 7 is the smallest. Sub-basin 4 also shows the greatest reduction in discharge, whereas sub-basin 15 has the least. Moreover, smaller sub-basins tend to produce higher peak discharges and are more sensitive to sudden rainfall events. Overall, the integration of remote sensing, GIS, and numerical modeling provides an effective tool for analyzing the hydrological behavior of watersheds.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

Authors Contributions

Razie Khani developed the theory and performed the computations. Khosrow Hosseini and Sayed-Farhad Mousavi verified the analytical methods. Khosrow Hosseini encouraged Razie Khani to investigate a specific aspect. Khosrow Hosseini supervised the findings of this work. All authors discussed the results and contributed to the final manuscript. Razie Khani wrote the manuscript with support from Khosrow Hosseini and Sayed-Farhad Mousavi. Khosrow Hosseini conceived the original idea.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.



اولویت بندی زیر حوضه ها در کنترل سیلاب با توجه به میزان تاثیر گذاری آنها بر مشخصات سیلاب با استفاده از داده های ماهواره ای (مورد مطالعاتی: رودخانه حبله رود)

راضیه خانی^۱، خسرو حسینی^۲، سیدفرهاد موسوی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: razie.khaniiii@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: khoseini@semnan.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: mousavi_sf@yahoo.com

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵</p> <p>کلیدواژه ها: بارش-رواناب، سیل خیزی، HEC-HMS، IMERG</p> | <p>هدف: در این پژوهش، زیرحوضه های حوضه آبخیز حبله رود از نظر سیل خیزی با استفاده از مدل HEC-HMS اولویت بندی می شوند.</p> <p>روش: به دلیل نبود داده های بارش، از داده های ماهواره ای GPM^۲ (محصول IMERG^۳) استفاده می شوند. سه واقعه سیلاب به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل انتخاب می گردند. واسنجی با استفاده از دو سیلاب سال ۲۰۰۷ انجام می شود. شاخص های R^2 و NSE برای آوریل به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۳ و برای ژوئن به ترتیب ۱/۸۶ و ۳/۷۵ بودند که نشان دهنده عملکرد مطلوب مدل است. پس از ساخت مدل، بارش معادل سیلاب ۵۰ ساله وارد مدل شد. به کمک روش حذف ترتیبی زیرحوضه ها، میزان تأثیر آنها بر دبی اوج و حجم سیلاب در ایستگاه بنکوه تحلیل گردید.</p> <p>یافته ها: نتایج نشان دادند که زیرحوضه ۴ با مساحت ۵۷۵/۵۶ کیلومتر مربع، دبی اوج ۲۳۹ مترمکعب بر ثانیه و حجم سیلاب ۱۲۰۸۶/۲ هزار مترمکعب، بیش ترین نقش را در سیلاب دارد، به طوری که حذف آن موجب کاهش ۲۲/۵۸ درصدی جریان خروجی شد. ارزیابی دقت داده های ماهواره ای نشان داد که میانگین همبستگی ۰/۵۱، ضریب اریبی ۳/۱۳ و خطای میانگین ۱/۹۲ بوده و میانگین دقت تشخیص وقوع بارش بیش از ۰/۸۶ است.</p> <p>نتیجه گیری: مشخص شد که مساحت یا دبی بالا به طور حتم به مشارکت بیش تر در سیلاب منجر نمی شود و عواملی مانند موقعیت، ضریب تمرکز و تاخیر نیز نقش دارند.</p> |

استناد: خانی راضیه، حسینی خسرو، موسوی سیدفرهاد. اولویت بندی زیرحوضه ها در کنترل سیلاب با توجه به میزان تاثیر گذاری آنها بر مشخصات سیلاب با استفاده از داده های ماهواره ای (مورد مطالعاتی: رودخانه حبله رود). *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۴؛ (۲): ۱۱-۲۴.

<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12359.1009>

²- Global Precipitation Measurement
³- Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM



۱- مقدمه

مکانی و زمانی بالا و جمع‌آوری آسان داده‌ها هستند و توسط شرایط زمین محدود نمی‌شوند. این اطلاعات برای هشدار سیل در مناطق کوهستانی مستعد سیل ناگهانی، جایی که داده‌های بارش به‌ندرت اندازه‌گیری شده است، بسیار مهم هستند و برخی از داده‌های بارش ماهواره‌ای برای ارزیابی سیل در حوضه‌ها استفاده شده است. با این حال، داده‌های بارش ماهواره‌ای ممکن است بارش بسیار قوی را دست‌کم بگیرند، و دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در گرفتن سیل‌های ناگهانی به‌خوبی شناخته نشده است [۶ و ۷]. در دسترس بودن داده‌های بارش ماهواره‌ای SSP^3 ، فرصت‌هایی را برای مدل‌سازی آب‌شناسی، فراهم کرده است [۸].

با توجه به عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری در تمام زیرحوضه‌ها و کم‌بودن آمار و اطلاعات ثبت‌شده از سیل در حوضه‌های آبخیز کشور، به‌طور عملی نمی‌توان شدت سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها را به‌تنهایی از تحلیل داده‌های موجود استنتاج کرد. در نتیجه نقش مدل‌های ریاضی آب‌شناسی در تعیین سیل‌خیزی حوضه‌ها بسیار مهم است. هدف اصلی استفاده از مدل‌های آب‌شناسی، شبیه‌سازی رفتار حوضه آبخیز و پیش‌بینی اثر تغییرات شرایط حوضه و متغیرها بر روی عملکرد سامانه آبخیز می‌باشد [۹].

مدل‌های آب‌شناسی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای چرخش آب در سطح زمین به‌منظور بهبود مدیریت منابع آب می‌باشند. مدل‌های بارش-رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و ابزاری مناسب برای مطالعه فرآیندهای آب‌شناسی و ارزیابی منابع آبی می‌باشند. دو کاربرد مهم مدل‌های بارش-رواناب، پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناسی است [۱۰]. یکی از این مدل‌های مهم، مدل HEC-HMS است که توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا تدوین و ارائه شده است و کاربرد آن شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و سیلاب ناشی از یک

مخاطرات محیطی همه‌ساله خسارت‌های فراوانی را در سراسر جهان و ایران به‌بار می‌آورند که زلزله، طوفان، خشک‌سالی، آتش‌سوزی و سیل از جمله آنها هستند. سیل بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بحران طبیعی است که همه‌ساله جان هزاران نفر را می‌گیرد و خسارات فراوانی به جامعه انسانی و محیط زیست وارد می‌سازد. سیل‌ها در اثر بارندگی بیش از حد ایجاد می‌شوند که می‌تواند به شکل بارانی بی‌وقفه باشد که بیش از ظرفیت تحمل بستر رودخانه است و باعث جاری شدن آب بر روی سواحل رودخانه و مناطق مجاور می‌شود [۱]. افزایش سیل در سال‌های اخیر حاکی از آن است که بیش‌تر مناطق کشور در معرض تهاجم سیلاب‌های ادواری و مخرب قرار دارند و ابعاد خسارات و تلفات جانی و مالی سیل افزایش یافته است [۲]. چنان‌چه ابعاد و گستردگی پیامدهای وقوع سیل از لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی قرار گیرد، آنگاه پرداختن به مسائلی چون سیل در اولویت قرار می‌گیرد. بنابراین برای پیشگیری و مهار سیلاب باید در درجه اول مناطقی که پتانسیل بالایی در تولید سیل دارند، تعیین و سپس عوامل تولید و ایجاد سیل شناسایی شوند [۳]. در دسترس بودن اطلاعات سیل به‌موقع و قابل اعتماد برای کاهش بلایا پس از رویداد در حوضه‌های رودخانه، بسیار مهم است [۴]. برای این منظور از مدل‌های رایانه‌ای متنوعی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبخیز ارائه شده است، می‌توان استفاده نمود. این مدل‌ها به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی سیلاب به‌کار گرفته شده است. در این‌گونه مطالعات به‌طور معمول از مدل‌های یک‌پارچه استفاده شده و حوضه آبخیز با هر وسعتی به‌عنوان یک واحد تلقی شده است [۵]. با توجه به تغییرات اقلیمی و فرآیندهای تخریب زمین، ابزارهای جدید برای پایش و کاهش بلایای سیل به‌شدت مورد نیاز است. اطلاعات بارش ماهواره‌ای دارای پوشش وسیع، وضوح

³- Single Point Positioning

حوضه آبریز چنارسوخته با مساحت ۱۴۱ کیلومتر مربع با استفاده از شش رویداد بارش به شبیه‌سازی در HEC-HMS پرداختند. در تحقیق ایشان با روش حذف متوالی زیرحوضه‌ها میزان مشارکت هریک از آن‌ها در سیل‌خیزی کل حوضه مشخص شد. در بررسی‌ها مشخص شد که شماره منحنی در شرایط گوناگون خاک موجب تغییر در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها شد و همچنین زمان تاخیر و تلفات اولیه نیز در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها موثر بودند [۱۴].

اسلامی و همکاران در پژوهشی به اولویت‌بندی نه زیرحوضه برحسب وقوع سیل در حوضه آبریز اسکندری، با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS پرداختند. ایشان با استفاده از روش حذف متوالی زیرحوضه‌ها و همچنین حذف CN هر زیرحوضه برای هر مرحله از اجرای مدل، تأثیر هر کدام از زیرحوضه‌ها در تولید رواناب خروجی را بررسی نمودند و زیرحوضه‌ها اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که زیرحوضه‌هایی که دارای مساحت بزرگ‌تر هستند، به‌طور حتم بر خروجی بیش‌ترین تأثیر را نمی‌گذارد و عواملی مانند موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها و نقش مسیریابی در رودخانه اصلی نیز می‌تواند نقش مهمی ایفا کند [۱۵].

با توجه به مطالعات پیشین و چالش‌های موجود در حوضه آبخیز حبله‌رود و همچنین با توجه به عمده مشکل موجود در این حوضه یعنی عدم دسترسی به اطلاعات بارش متناظر وقایع انتخابی براساس گام زمانی مورد نیاز، از داده‌های بارش ماهواره GPM محصولIMERG استفاده و سه واقعه برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود. اطلاعات مورد نیاز و ورودی‌های نرم‌افزار مذکور هم‌چون زمان تمرکز، ضریب منحنی CN، ضریب ذخیره و زمان تاخیر با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه و وارد مدل شدند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، بارشی معادل با دبی سیلاب ۵۰ ساله به مدل وارد شد. سپس با استفاده از روش حذف

بارش و قابلیت واسنجی پارامترهای مختلف با توجه به مقادیر مشاهداتی است. در همین راستا مطالعات مختلفی در راستای مدل‌سازی بارش رواناب و آسیب‌پذیری زیرحوضه‌ها انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

لاوآخریا^۴ و منصورى کارآیی مدل نیمه توزیعی HEC-HMS و مدل شبکه محدودشده با حوضه آبریز^۵ (WBNM) در شهر آزابا^۶ واقع در شمال شرقی الجزایر را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان دادند که WBNM قابلیت شبیه‌سازی هیدروگراف مشاهداتی را ندارد، درحالی که مدل HEC-HMS با دقت مناسبی هیدروگراف مشاهداتی را شبیه‌سازی کرده است و به‌منظور ارزیابی و شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب مدل مناسبی می‌باشد [۱۱].

گائو^۷ و همکاران از مدل HEC-HMS برای ارزیابی اثرات تغییر کاربری زمین بر پاسخ‌های آب‌شناسی حوضه رودخانه کینه‌های^۸ چین استفاده کردند [۱۲].

میرزایی و همکاران در پژوهشی با کمک شبیه‌سازی بارش-رواناب در نه رویداد حوضه آبخیز عموقین، کارآمدی مدل HEC-HMS و سهم مشارکت زیرحوضه‌ها را تعیین کردند. آنها برای تعیین سهم مشارکت زیرحوضه‌ها از حذف تک‌به‌تک زیرحوضه‌ها بهره بردند و در نهایت نتایج نشان دادند که سه زیرحوضه بیش‌ترین سهم را در سیل‌خیزی داشتند و دریافتند که سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها تنها متأثر از مساحت زیرحوضه‌ها نبود و عواملی از قبیل فیزیوگرافی، کاربری اراضی و حتی موقعیت مکانی آنها و روندیابی جریان خروجی زیرحوضه در پتانسیل سیل‌خیزی هر حوضه موثر بودند [۱۳].

نصیری و همکاران برای اجرای مدیریت کنترل سیلاب در بالادست حوضه‌های بزرگ، چگونگی تأثیر آن‌ها بر سیلاب حوضه را مورد بررسی قرار دادند. ایشان به ارزیابی

⁷- Gao
⁸- Qinhuai

⁴- Laouacheria
⁵- Watershed Bounded Network Model
⁶- Azaba

۱-۲- منطقه مطالعاتی

حوضه حبله رود در حاشیه جنوبی البرز مرکزی با مساحتی بالغ بر ۳۲۶۹۹۱ هکتار واقع شده است (شکل ۲). میانگین بارندگی ۳۰ ساله در کل حوضه ۲۷۲ میلی‌متر می‌باشد. 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 حوضه ۴۰۵۷ متر و کمینه ارتفاع آن ۸۱۸ متر از سطح دریا می‌باشد. حوضه حبله رود دارای پنج ایستگاه هیدرومتری مهم شامل دلچای، سیمین‌دشت، فیروزکوه، نمرود و بنکوه است. در این پژوهش براساس ایستگاه هیدرومتری بنکوه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. در جدول ۱ مشخصات این ایستگاه ارائه شده است.

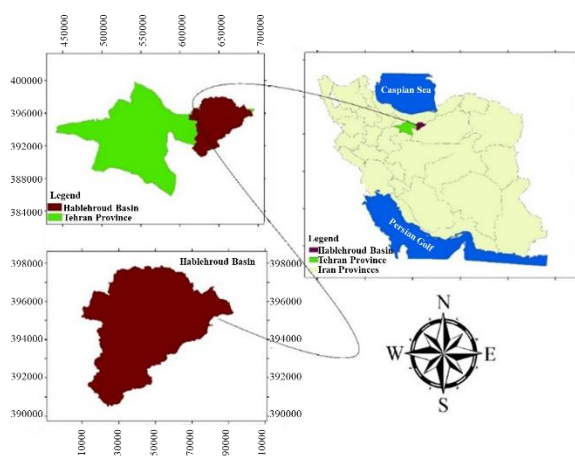


Figure 2. Geographical location of the Hablehroud Watershed

شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز حبله رود

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هیدرومتری بنکوه

Table 1. Specifications of the Bankouh Hydrometric Station

| Station name | Longitude | Latitude | Elevation (Meters) |
|--------------|-----------|-----------|--------------------|
| Bankouh | 52°25'54" | 35°18'19" | 982 |

ترتیبی زیرحوضه‌ها در هر مرتبه میزان دبی اوج و حجم سیلاب ایستگاه بنکوه که در خروجی حوضه قرار دارد، مورد ارزیابی قرار گرفت.

هدف از این تحقیق، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های حوضه آبخیز حبله رود از نظر سیل‌خیزی با مدل HEC-HMS می‌باشد. برای انجام این کار ابتدا اطلاعات مربوط به مدل جمع‌آوری شد و پس از تهیه نقشه حوضه و زیرحوضه‌ها، برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه مدل اجرا و پس از واسنجی و اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل، تک‌تک زیرحوضه‌ها حذف شدند تا اثر آن زیرحوضه‌ها در خروجی بررسی گردد. تاکنون در این حوضه، بررسی اولویت بندی از نظر سیل‌خیزی انجام نشده است. نتایج این تحقیق کاربرد زیادی در رفتارسنجی سیل‌خیزی داشته و مؤثرترین زیرحوضه را از نظر سیل‌خیزی شناسایی کرده تا مدیریت حوضه آبخیز و عملیات آبخیزداری در حوضه بحرانی انجام شود.

۲- مواد و روش‌ها

روندنمای انجام تحقیق حاضر در شکل ۱ ارائه شده است.

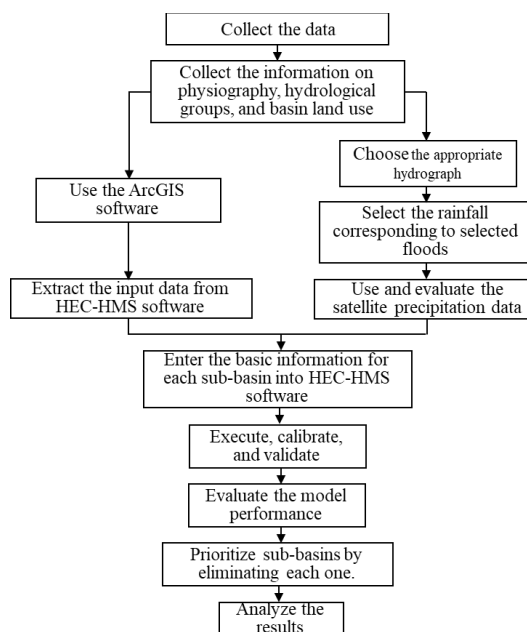


Figure 1. Flowchart of the research process

شکل ۱- روندنمای فرآیند انجام پژوهش

نفوذپذیری هر زیرحوضه بوده و مقدار آن بین صفر تا ۱۰۰ متغیر می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین شماره منحنی هر زیرحوضه از جدول تخمینی محاسباتی TR-55 مطابق با جدول ۲، استفاده شد.

جدول ۲- راهنمای تعیین ضرایب CN با استفاده از TR-55

Table 2. Guide to determining CN coefficients using TR-55

| Land use | Hydrological soil group | | | |
|---|-------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Agricultural | 64 | 75 | 82 | 85 |
| Forest | 30 | 55 | 70 | 77 |
| Good pasture | 39 | 61 | 74 | 80 |
| High-Density Urban Areas | 77 | 85 | 90 | 92 |
| Industrial areas | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Low-Density Urban Areas | 54 | 70 | 80 | 85 |
| Open Spaces (Parks, Golf Courses, etc.) | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Water areas | 0 | 0 | 0 | 0 |

با استفاده از نقشه کاربری اراضی و گروه آب‌شناسی خاک هر زیرحوضه، مقدار CN تعیین گردید. در زیرحوضه‌هایی که دارای چند شماره منحنی بودند، شماره منحنی هر زیرحوضه پس از تعیین شدن، در مساحت تحت پوشش آن ضرب می‌شود. چنانچه مجموع حاصل ضرب‌ها به مساحت کل حوضه تقسیم شود، شماره منحنی متوسط حوضه به دست می‌آید.

با مراجعه به آب منطقه‌ای استان سمنان، آب‌نمودهای ثبت سیلاب ایستگاه بن‌کوه تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزار Excel تمامی وقایع بررسی و تحلیل شدند و از میان آنها، سه واقعه در واسنجی و صحت‌سنجی به‌عنوان وقایع انتخابی مورد استفاده قرار گرفتند که اطلاعات آنها در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این که در مراجعات به این سازمان، اطلاعات مناسب و صحیحی

به‌منظور تعیین گروه آب‌شناسی خاک در این پژوهش از اطلاعات مربوط به خاک منطقه از پایگاه داده HWSO از سایت فائو استفاده شد [۱۶]. داده‌های مربوط به پوشش گیاهی برای این منطقه از ماهواره MODIS و محصول MCD12Q1 تهیه گردید که براساس استاندارد IGBP در ۱۷ کلاس طبقه‌بندی شده است. نقشه خاک و کاربری اراضی در منطقه در شکل ۳ نشان داده شده است.

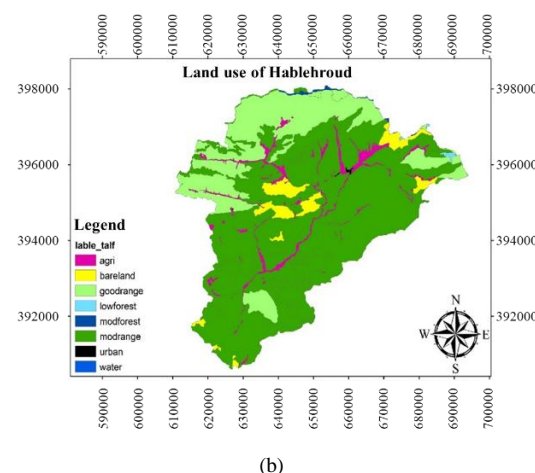
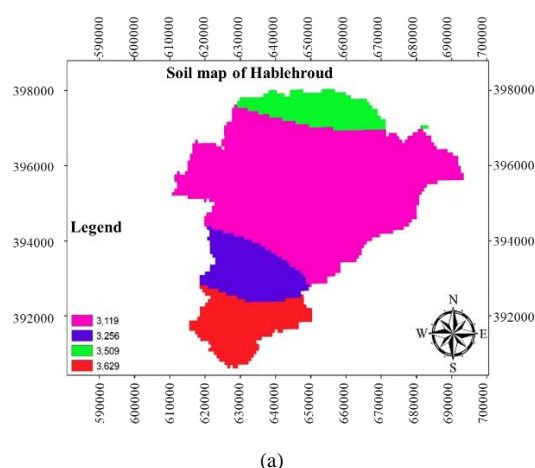


Figure 3. (a) Soil map, and (b) Land use map of the Hablehroud Basin

شکل ۲- (الف) نقشه خاک و (ب) نقشه کاربری اراضی حوضه حبله‌رود

مقدار CN در یک حوضه به‌عنوان تابعی از گروه آب‌شناسی خاک، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، اندازه‌گیری‌های حفاظت خاک و وضعیت رطوبت پیشین خاک می‌باشد. شماره منحنی نشان‌دهنده وضعیت

زیرحوضه‌هایی که دارای چند داده بودند، میانگین وزنی براساس مساحت در برگرفته‌شده آن زیرحوضه لحاظ شده است. شبکه‌بندی داده‌های بارش و موقعیت مکانی آنها در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به در اختیار داشتن اطلاعات سیلاب مشاهداتی در گام زمانی یک‌ساعته، اطلاعات دریافتی از محصول IMERG با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون به گام زمانی ۱ ساعته تبدیل گردید. خروجی این برنامه‌نویسی دارای فرمت netCDF هستند که برای بهره‌برداری از این اطلاعات در نرم‌افزار HEC-HMS باید به فرمت Excel تبدیل شوند. برای این کار از نرم‌افزار Arc-GIS استفاده شد. در محیط نرم‌افزاری Arc-GIS نقشه‌های رستری فراخوانی شدند و در قالب فایل Excel خروجی اطلاعات بارش تهیه شد.

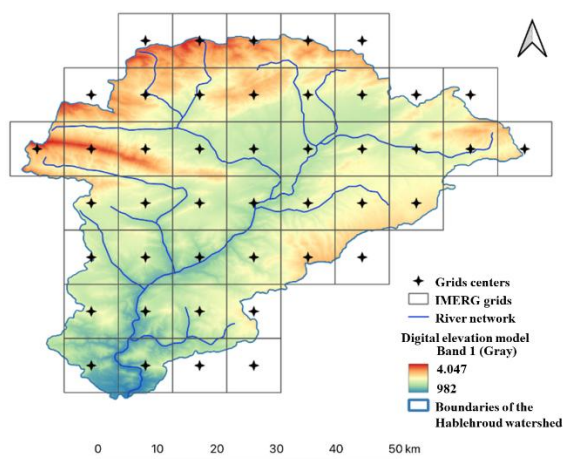


Figure 4. IMERG Product gridding and its distribution across the Basin

شکل ۴- سلول‌بندی محصول IMERG و پراکندگی آن‌ها در سطح حوضه

۲-۲- مدل آب‌شناسی HEC-HMS

معیار طراحی مدل آب‌شناسی HEC-HMS براساس شبیه‌سازی بارندگی رواناب در حوضه‌های آبخیز است که قادر به حل مسائل متنوعی است [۲۲]. مدل HEC-HMS از انواع مدل‌های رایانه‌ای بوده که خود دارای چندین زیرمدل در بخش‌های جریان سطحی، آب پایه و جریان کانالی می‌باشد و برای شبیه‌سازی رفتار آب‌شناسی

برای اطلاعات بارش براساس گام زمانی مورد نیاز یافت نشد، از اطلاعات بارش ماهواره‌ای برای مدل‌سازی حوضه مورد مطالعه استفاده شد.

جدول ۳- تاریخ وقایع منتخب سیلاب مورد ارزیابی

Table 3. Selected flood event dates under evaluation

| Hydrometric station | Event date (Gregorian) | Duration (Hours) |
|---------------------|------------------------|------------------|
| Bankouh | 1 & 2 Apr 2007 | 12 |
| Bankouh | 28 Jun 2007 | 9 |
| Bankouh | 31 Oct 2011 | 10 |

برای برآورد میزان بارش از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و مشاهدات مستقیم، به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای و یا استفاده از روش‌های درون‌یابی که مبتنی بر روش‌های زمین‌آمار هستند، استفاده می‌شود [۱۷]. کمبود داده‌های با وضوح دقتی بالا می‌تواند منجر به تغییرات فضایی بارندگی شوند. بنابراین توسعه رویکردهای نوآورانه برای تخمین بارش در مناطقی که داده‌های مناسب یا کافی ندارند، اهمیت حیاتی دارد [۱۸، ۱۹، ۲۰]. در حال حاضر محصولات ماهواره‌های جهانی تخمین‌زننده بارش شامل، ماهواره PERSIAN، TRMM، CMORPH، GMP می‌باشند. در این میان ماهواره رادارمحور GPM به دلیل قابلیت هم‌چون اندازه‌گیری بارش‌های سبک و هم‌چنین بارش برف از عملکرد قابل قبولی نسبت به دیگر ماهواره‌ها برخوردار بوده است [۲۱].

در این پژوهش با توجه به عدم‌دستیابی به اطلاعات بارش مشاهداتی در واقعه سیلاب منتخب و هم‌چنین با توجه به دقت تفکیک زمانی ماهواره‌ها، از ماهواره GPM و محصول IMERG با گام زمانی نیم‌ساعته برای مدل‌سازی سیلاب حوضه حبله‌رود استفاده گردید. این محصول دارای وضوح مکانی 0.1×0.1 می‌باشد. از این‌رو در چنین داده‌هایی، اطلاعات مرکز این سلول‌ها به‌عنوان بارش آن سلول در نظر گرفته می‌شود. برای

زمان، روابط تجربی بسیاری ارائه شده که از مهم‌ترین آنها که در این مطالعه هم استفاده شده است می‌توان به رابطه کریچ اشاره کرد [رابطه (۱)]:

$$t_c = 0.0087 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (1)$$

که در آن، t_c = زمان تمرکز برحسب ساعت؛ L طولانی‌ترین مسیر حرکت آب در حوضه برحسب فوت، و S = شیب حوضه برحسب درصد، هستند.

- ضریب ذخیره: ضریب ذخیره در مخازن خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اثرات ذخیره‌سازی را محاسبه می‌کند. نسبت بدون بعد آن را می‌توان به صورت تقسیم ضریب ذخیره بر مجموع زمان تمرکز و ضریب ذخیره، تعریف نمود.

۳-۲- شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل آب‌شناسی

ضریب تبیین: این تابع هدف که با نماد R^2 نمایش داده می‌شود، نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده تا چه میزان به مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند. مقدار این شاخص با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m) * (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 * \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

که در آن، $Q_{m,i}$ = دبی مشاهداتی، $Q_{s,i}$ = دبی شبیه‌سازی‌شده و \bar{Q}_m و \bar{Q}_s = میانگین ریاضی مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده، هستند.

شاخص کارایی نش- ساتکلِف^{۱۱} (NSE): این تابع هدف که اغلب در واسنجی مدل‌های آب‌شناسی کاربرد دارد، خطای جریان‌های بیشینه را کاهش می‌دهد. مقدار آن از بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقدار یک نشان‌دهنده

حوضه‌های آبخیز به کار می‌رود. این مدل دارای سه بخش اصلی: مدل حوضه، مدل اقلیمی و شاخص‌های کنترلی می‌باشد. همچنین این مدل قابلیت بهینه‌سازی پارامترها را نیز دارد. در این نرم‌افزار فرآیند محاسبات همواره از بالادست حوضه شروع شده و به سمت پایین‌دست حوضه و نقطه خروجی حوضه ادامه می‌یابد.

مدل حوضه: در این مرحله، با ورود نقشه DEM به نرم‌افزار و استفاده از قابلیت جدید ترسیم آبراهه در نسخه ۴/۸ نرم‌افزار HEC-HMS حوضه و زیرحوضه‌ها و همچنین آبراهه اصلی منطقه ترسیم شدند. سپس برای تمامی زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها نقاط کنترلی و پایین‌دست و اتصالی تعریف گردید.

تلفات: عوامل مختلفی هم‌چون برگاب، تبخیر و تعرق و ذخیره آب در چالاب‌های سطح زمین و نیم‌رخ خاک، در یک حوضه سبب تلفات شده و مانع تبدیل مستقیم بارش به رواناب می‌شود. HEC-HMS برای محاسبه رواناب، با شبیه‌سازی هرکدام از عوامل فوق، تلفات ناشی از آن‌ها را نیز مدنظر قرار می‌دهد. در این تحقیق از روش SCS-CN برای منظور کردن اثر تلفات استفاده گردید.

انتقال: در این قسمت باید روشی برای تبدیل بارش مازاد به جریان سطحی در حوضه‌ها در نظر گرفت که با توجه به اطلاعات موجود از روش کلارک^۹ استفاده گردید. در روش کلارک، داده‌های الزامی ورودی برای هر زیرحوضه شامل زمان تمرکز و ضریب ذخیره هر زیرحوضه می‌باشد که با استفاده از روابط کریچ^{۱۰} و مقادیر تجربی محاسبه گردیدند.

- رابطه کریچ: زمان تمرکز حوضه یکی از زمان‌های پاسخ حوضه می‌باشد که در بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی سیلاب به کار می‌رود. دورترین نقطه نسبت خروجی حوضه ممکن است فاصله فیزیکی آن دو نقطه نباشد، بلکه فاصله آب‌شناسی آنها مورد نظر است. برای محاسبه این

^{۱۱}- Nash-Sutcliffe Efficiency

^۹- Clarke
^{۱۰}- Kirpich

در ادامه نتایج اجرای مدل HEC-HMS و فرآیند واسنجی، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها ارائه گردیده است.

۳-۱- لایه شماره منحنی CN

طبق استاندارد SCS جدولی برای مقایسه آب‌شناسی خاک‌ها براساس لایه‌های کاربری اراضی، نوع خاک و مشخصات پوشش گیاهی ایجاد می‌گردد که در انتها به هر نوع خاک براساس مشخصات آن عددی بین ۳۰ تا ۱۰۰ تحت عنوان شماره منحنی رواناب تعلق خواهد گرفت. بر طبق جدول TR-55 مقدار شماره منحنی در حوضه در جدول ۴ ارائه گردید.

جدول ۴- مقادیر شماره منحنی متوسط وزنی حوضه حبله‌رود

Table 4. Weighted average curve number value of the Hablehroud River basin

| Sub-basin number | Curve number (CN) | Sub-basin number | Curve number (CN) |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 81 | 11 | 81 |
| 2 | 82 | 12 | 80 |
| 3 | 80 | 13 | 80 |
| 4 | 81 | 14 | 79 |
| 5 | 83 | 15 | 78 |
| 6 | 80 | 16 | 80 |
| 7 | 80 | 17 | 81 |
| 8 | 79 | 18 | 81 |
| 9 | 81 | 19 | 79 |
| 10 | 80 | - | - |

نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای محصولIMERG در مقابل داده‌های بارش زمینی در مقیاس زمانی روزانه براساس شاخص‌های مذکور در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- خلاصه نتایج ارزیابی داده‌های بارش ماهواره‌ای با کمک ایستگاه‌های زمینی

Table 5. Summary of results of evaluating satellite precipitation data with the help of ground stations

| Evaluation index | IMERG satellite precipitation | | |
|------------------|-------------------------------|---------|---------|
| | Minimum | Average | Maximum |
| CC | 0.23 | 0.51 | 0.77 |
| PBIAS | -11.25 | 3.13 | 14.36 |
| RMSE | 1.01 | 1.92 | 3.11 |
| POD | 0.73 | 0.86 | 0.93 |

تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

که در آن، Q_{si} = دبی شبیه‌سازی شده مدل، Q_{oi} = دبی مشاهداتی در منطقه مطالعاتی و \bar{Q}_o = میانگین دبی مشاهداتی در طول دوره واسنجی، هستند. مقدار i از یک تا N (تعداد گام‌های زمانی در طول دوره واسنجی) اعمال می‌شود.

اریبی مدل در برآورد جریان PBIAS: این شاخص به‌منظور ارزیابی اریبی مدل در شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن مقدار صفر حالت ایده‌آل محسوب می‌شود و نتایج این شاخص در صورتی که کمتر از ۱۰ درصد باشد نتایج بسیار خوب، کمتر از ۱۵ ($10 < PBIAS < 15$) نتایج خوب و اگر بیش از ۱۵ باشد نتایج بد ارزیابی می‌گردد [۲۳] که به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$PBIAS = \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i) \times 100}{\sum Q_i} \quad (4)$$

۳- نتایج و بحث

افزایش سیل در سال‌های اخیر نشان از آن دارد که بیش‌تر مناطق کشور در معرض تهاجم سیلاب‌های مخرب قرار دارند. به‌دلیل وسعت زیاد حوضه‌های آبریز و محدودیت‌های اجرایی و اقتصادی، احیای تمامی زیرحوضه‌ها بسیار سخت و دشوار است. بنابراین، انتخاب اولویت مناطق برای اجرای طرح‌های کنترل سیلاب‌ها، یک تصمیم‌گیری مدیریتی است که باید با مطالعه عوامل مختلف صورت گیرد. برای پیشگیری و مهار سیلاب باید در درجه اول مناطقی که پتانسیل بالایی در تولید سیل دارند، تعیین و سپس عوامل تولید و ایجاد سیل شناسایی شوند. در همین راستا این پژوهش براساس روش‌ها و فرآیندی که در بخش مواد و روش‌ها به آن اشاره گردید به اولویت‌بندی زیرحوضه‌های حوضه مطالعاتی پرداخته است.

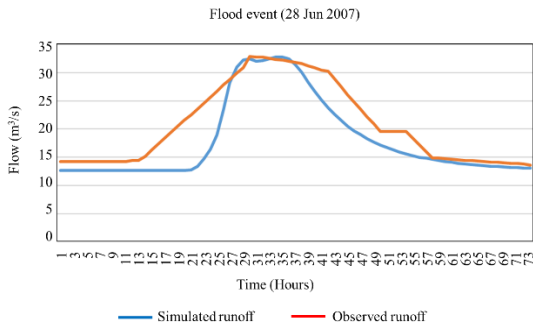


Figure 6. Verification of the hydrograph of the event 28 Jun 2007

شکل ۶- صحت‌سنجی هیدروگراف رویداد ۲۸/۰۶/۲۰۰۷

جدول ۶- نتیجه ارزیابی مدل ساخته‌شده در مرحله صحت‌سنجی

Table 6. Evaluation result of the model built in the verification stage

| Characteristic | 1 & 2 Apr 2007 | 28 Jun 2007 |
|--------------------------------------|----------------|-------------|
| R^2 (%) | 93 | 86.1 |
| NSE (%) | 83 | 75.3 |
| PBIAS | 8.66 | -9.93 |
| Simulated peak discharge (m^3/s) | 28.6 | 32.8 |
| Observed peak discharge (m^3/s) | 28.3 | 32.9 |
| Simulated Volume ($1000 m^3$) | 2678.3 | 4006.5 |
| Observed Volume ($1000 m^3$) | 2442.8 | 4524.7 |

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، مقدار ضریب تبیین، ضریب نش-ساتکلیف و ضریب اریب بودن جریان نشان از دقت خوب مدل شبیه‌سازی‌شده و پارامترهای بهینه‌شده دارد.

دبی اوج، حجم جریان و زمان رسیدن به دبی اوج آنمودهای شبیه‌سازی‌شده با دقت بالایی نسبت به آنموود مشاهداتی برآورد شده‌اند که عملکرد خوب انتخاب مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

به‌منظور اجرای اعتبارسنجی و ارزیابی مدل ساخته‌شده، پارامترهای بهینه‌شده در مرحله واسنجی و

برطبق نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی ارائه‌شده در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، ماهواره منتخب با میانگین همبستگی ۰/۵۱، ضریب اریبی میانگین ۳/۱۳ و خطای میانگین ۱/۹۲ دارای دقت مناسبی هستند. از نقطه‌نظر تشخیص وقوع بارش، میانگین بالای ۰/۸۶ دارای دقت مطلوبی در میان داده‌های ماهواره‌ای می‌باشد که موجب گردید، داده‌های بارش محصول IMERG در این پژوهش مورد استفاده قرار گیرد.

پس از واردکردن داده‌های موردنیاز HEC-HMS، براساس روش‌های ذکرشده در بخش‌های قبل، مدل آب‌شناسی، آماده و سپس با استفاده از داده‌های اولیه اجرا شد که با بررسی نتایج اولیه مشاهده گردید که در دبی تولیدی کمی بیش‌برآوردی و تاخیر در رسیدن به دبی اوج وجود داشت. برای رفع این عدم‌تطابق، به‌صورت دستی و با اعمال تغییرات چندمرحله‌ای در پارامترهای حساس سعی گردید تا بیشینه تطابق در آنموود شبیه‌سازی‌شده و هیدروگراف مشاهداتی صورت پذیرد. شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۶ نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل ساخته‌شده را براساس آنموود شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی نمایش می‌دهد.

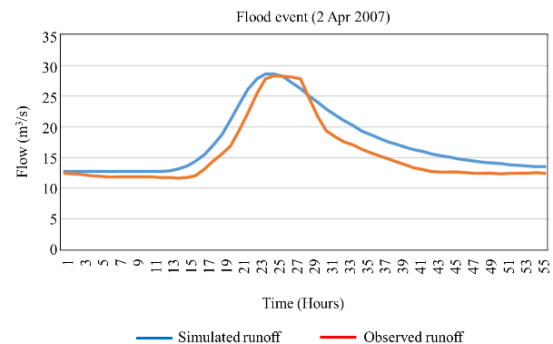


Figure 5. Verification of the hydrograph of the event 2 Apr 2007

شکل ۵- صحت‌سنجی هیدروگراف رویداد ۰۲/۰۴/۲۰۰۷

دبی اوج ۳۰۸/۷ مترمکعب بر ثانیه با حجم سیلاب ۱۴۰۳/۶ هزار مترمکعب بود استفاده گردید.

جدول ۷- نتیجه ارزیابی مدل ساخته شده در مرحله اعتبارسنجی

Table 7. Evaluation result of the model built in the validation stage

| Characteristic | 31 Oct 2011 |
|--------------------------------------|-------------|
| R^2 (%) | 1.85 |
| NSE (%) | 77.1 |
| PBIAS | -7.91 |
| Simulated peak discharge (m^3/s) | 30.6 |
| Observed peak discharge (m^3/s) | 30.9 |
| Simulated Volume (1000 m^3) | 3978.9 |
| Observed Volume (1000 m^3) | 4307.8 |

بارش طرح به مدل وارد گردید و سپس با استفاده از سناریوی حذف زیرحوضه‌ها در هر بار اجرا یکی از زیرحوضه‌های موجود حذف گردید تا اختلاف دبی اوج و حجم سیلاب نسبت به شرایط قبل و بعد از حذف مشخص گردد. نتایج حاصل از این اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۸ نمایان است، زیرحوضه ۴ و زیرحوضه ۱۵ با ۲۲/۵۸ و ۰/۰۰۴ درصد کاهش دبی خروجی حوضه آبریز، بالاترین و پایین‌ترین تاثیر در مشارکت سیلاب تولیدی را دارند. با توجه به نتایج حاصل مشخص می‌گردد که در برخی موارد با این که دبی خروجی حوضه نسبت به شرایط اولیه و بدون حذف زیرحوضه‌ها کاهش بیشتری داشته است، اما حجم سیلاب بیش‌تری تولید شده است که عوامل مختلفی هم‌چون زمان تمرکز و موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها در این امر دخیل می‌باشد و عوامل مذکور موجب شده است تا حجم بالاتری از سیلاب به نقطه خروجی برسد. نکته دیگری که در نتایج بالا مشهود است، مساحت بالای زیرحوضه‌ها به‌طور حتم موجب تاثیر بالای آن‌ها در سیلاب رخ داده نبوده است و عوامل مختلفی هم‌چون کاربری اراضی

سایر پارامترهای لازم برای اجرای مدل به نرم‌افزار وارد شدند.

سپس مدل با استفاده از داده‌های بارش برای یک واقعه که در فرآیند واسنجی از آن استفاده نشده بود و هیدروگراف سیل آن در محل ایستگاه خروجی (بنکوه) موجود بود، اجرا گردید.

آب‌نمود حاصل از نتایج مرحله اعتبارسنجی در شکل ۷ و نتایج عددی آن در جدول ۷ ارائه شده است.

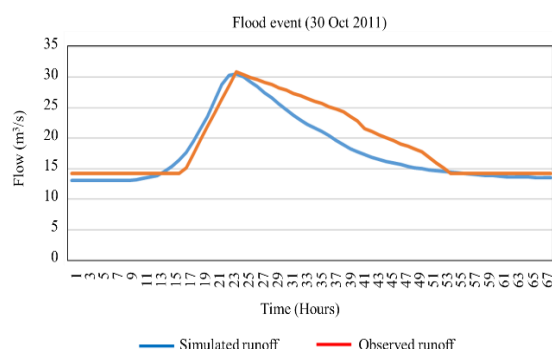


Figure 7. Hydrograph of validation of the model built in the Hablehroud basin

شکل ۳- هیدروگراف اعتبارسنجی مدل ساخته شده در حوضه حبله‌رود

همان‌طور که در شکل ۷ و جدول ۷ مشاهده می‌گردد، دبی اوج، حجم جریان و زمان رسیدن به دبی اوج آب‌نمودهای شبیه‌سازی شده با دقت بالایی نسبت به آب‌نمود مشاهداتی برآورد شده‌اند.

مقادیر ضریب تبیین، ضریب نش-ساتکلیف و ضریب اریب بودن جریان نشان از دقت بالا در ساخت مدل در حوضه مورد مطالعه دارد و به‌طور کلی می‌توان گفت مقایسه چشمی و نتایج حاصله حاکی از ساخت مدلی مناسب است که می‌تواند موجب دریافت اطلاعات مطلوب و صحیح در اقدامات بعدی بر روی مدل ساخته شده، داشته باشد.

بعد از صحت‌سنجی و اعتبارسنجی و به‌دست آوردن اطمینان از صحت داده‌ها، نیاز به انتخاب رگبار طرح و پس از آن به‌دست آوردن سیلاب نظیر آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور رسیدن به این هدف از بارش معادل سیل با دوره بازگشت ۵۰ساله استفاده گردید که در آن مقدار

زمان به‌معنای کاهش سرعت تجمع آب و کاهش ارتفاع اوج سیلاب است. کاهش CN می‌تواند شدت و حجم رواناب ناشی از بارش‌های سنگین را کاهش داده و احتمال وقوع سیلاب را کم می‌کند.

جدول ۹- تغییرات خطای *NSE* و حجم و دبی اوج سیلاب با کاهش ۳۰ درصد منفرد لایه شماره منحنی رواناب

Table 9. Changes in *NSE* error, peak flood volume, and discharge with a 30% reduction in the individual runoff curve number layer

| Sub-Basin | Peak discharge (m ³ /s) | Flood volume (1000 m ³) | <i>NSE</i> (%) |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| 1 | 30.3 | 2722.2 | 75.4 |
| 2 | 30.3 | 2732.8 | 73.3 |
| 3 | 30.3 | 2732.3 | 73.5 |
| 4 | 30.3 | 2732.9 | 73.3 |
| 5 | 30.3 | 2729.6 | 74.0 |
| 6 | 30.2 | 2720.1 | 75.3 |
| 7 | 30.3 | 2732.6 | 73.4 |
| 8 | 30.3 | 2733.1 | 73.3 |
| 9 | 29.8 | 2722.6 | 74.7 |
| 10 | 30.3 | 2733.1 | 73.3 |
| 11 | 29.2 | 2718.7 | 76.0 |
| 12 | 30.2 | 2730.4 | 73.7 |
| 13 | 29.9 | 2725.0 | 74.8 |
| 14 | 30.3 | 2732.8 | 73.4 |
| 15 | 30.3 | 2733.1 | 73.3 |
| 16 | 30.3 | 2733.0 | 73.3 |
| 17 | 30.2 | 2729.5 | 74.3 |
| 18 | 28.3 | 2690.8 | 80.3 |
| 19 | 25.0 | 2442.8 | 89.6 |

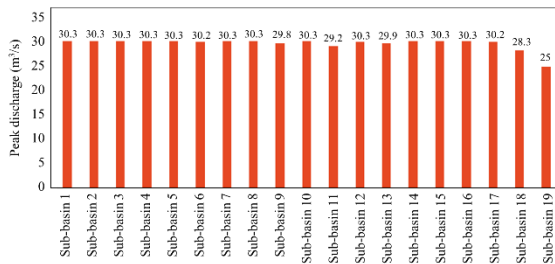


Figure 8. Peak discharge at the outlet with a single decrease in the runoff curve number in the sub-basins

شکل ۸- دبی اوج در خروجی با کاهش منفرد شماره منحنی رواناب در زیرحوضه‌ها

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش عبارتند از:

- مدل‌های آب‌شناسی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای جرخش آب در طبیعت می‌باشند و

و ضریب منحنی، نقشه خاک و نفوذپذیری و شیب زیرحوضه‌ها در این مورد مهم بوده و موثر است.

جدول ۸- اولویت‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی با حذف زیرحوضه‌ها

Table 8. Prioritization of flood potential by eliminating sub-basins

| Sub-basin | Area (km ²) | CN | Slope | Total basin outflow flood volume (1000 m ³) | Peak discharge (m ³ /s) | Change in flood volume (%) | Prioritization based on participation in the total basin discharge |
|-----------|-------------------------|----|-------|---|------------------------------------|----------------------------|--|
| 1 | 169.83 | 81 | 0.37 | 13513 | 295.2 | -4.37 | 6 |
| 2 | 564.08 | 82 | 0.26 | 11426 | 241.9 | -21.64 | 2 |
| 3 | 175.32 | 80 | 0.24 | 13507 | 290.2 | -5.99 | 4 |
| 4 | 575.56 | 81 | 0.27 | 12086 | 239 | -22.58 | 1 |
| 5 | 60.231 | 83 | 0.32 | 12787 | 299.4 | -3.01 | 9 |
| 6 | 94.205 | 80 | 0.36 | 13690 | 293.9 | -4.79 | 5 |
| 7 | 9.3515 | 80 | 0.40 | 13972 | 307.3 | -0.45 | 14 |
| 8 | 228.08 | 79 | 0.30 | 13193 | 273.3 | -11.47 | 3 |
| 9 | 143.74 | 81 | 0.34 | 13672 | 296.7 | -3.89 | 7 |
| 10 | 58.396 | 80 | 0.41 | 13803 | 303.3 | -1.75 | 12 |
| 11 | 333.62 | 81 | 0.42 | 13309 | 299.3 | -3.05 | 8 |
| 12 | 178.33 | 80 | 0.33 | 13379 | 300.5 | -2.66 | 10 |
| 13 | 160.28 | 80 | 0.25 | 13584 | 306.5 | -0.71 | 13 |
| 14 | 22.856 | 79 | 0.38 | 13925 | 308.6 | -0.005 | 18 |
| 15 | 98.063 | 78 | 0.38 | 13666 | 308.4 | -0.004 | 19 |
| 16 | 176.17 | 80 | 0.40 | 13400 | 308.7 | -0.01 | 16 |
| 17 | 68.314 | 81 | 0.44 | 13691 | 308.5 | -0.006 | 17 |
| 18 | 12.375 | 81 | 0.45 | 13969 | 307.6 | -0.36 | 15 |
| 19 | 92.454 | 79 | 0.45 | 13795 | 302.9 | -1.88 | 11 |

همان‌طور که پیش‌تر هم به آن اشاره گردید، از جمله راه‌کارهای مناسب در کاهش اثر سیلاب و کنترل آن، تغییرات در شرایط کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشد که به نسبت شرایط اقلیمی کنترل بیش‌تری بر آن می‌توان داشت. در این بخش، سناریوی کاهش ۳۰ درصدی ضریب رواناب CN بر تک‌تک زیرحوضه‌ها اعمال شد تا اثر کاهش آن بر حوضه سنجیده شود. نتایج حاصل از آن در جدول ۹ و شکل ۸ ارائه شده است. با کاهش CN، بخش بیش‌تری از بارش به داخل خاک نفوذ می‌کند و در نتیجه حجم رواناب سطحی کاهش می‌یابد. هم‌چنین کاهش CN باعث کاهش دبی اوج رواناب و تغییر در توزیع زمانی و مکانی جریان آب در سامانه‌های سطحی می‌شود. کاهش CN به‌طور معمول به افزایش نفوذ آب و کاهش شیب رواناب سطحی منجر می‌شود که این امر منجر به کاهش سرعت جریان رواناب می‌شود. کاهش CN باعث می‌شود زمان بیش‌تری طول بکشد تا آب به رودخانه‌ها و جریان‌های سطحی برسد که منجر به تغییر در الگوی جریان آب‌نمود می‌شود. این افزایش

گرچه با افزایش یا کاهش این ضریب، میزان تغییرات حجم دبی افزایشی یا کاهش‌ی نبوده است، اما دو مورد از بالاترین کاهش دبی‌ها مربوط به زیرحوضه‌هایی با ضرایب CN، ۸۱ و ۸۲ بود که جز بالاترین ضرایب رواناب محسوب می‌شدند.

- با مقایسه شیب زیرحوضه‌ها نیز مشاهده شد که با توجه به این که در این مورد هم نمی‌توان گفت رابطه مستقیم یا غیرمستقیمی بین حجم دبی و شیب زیرحوضه وجود دارد، اما در چند زیرحوضه که کم‌ترین شیب را نسبت به بقیه داشتند تاثیر بالاتری در تغییرات حجم دبی رویت شد.

- میزان مشارکت زیرحوضه‌ها تنها براساس دبی خروجی آنها نبوده و نمی‌توان گفت اگر زیرحوضه‌ای دبی بیشتری تولیدی دارد، بیش‌ترین سهم در تولید دبی کل حوضه را نیز خواهد داشت، زیرا عواملی مانند روندیابی آبراهه‌ها و موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها نسبت به خروجی نهایی حوضه و هم‌چنین مدل رقومی ارتفاعی زیرحوضه نیز می‌تواند موجب تغییر در مشارکت زیرحوضه‌ها شود. نتایج مشابهی توسط اسلامی و همکاران [۱۵] ارائه شده است. آنها در پژوهش خود نشان دادند که زیرحوضه‌هایی که دارای مساحت بزرگ‌تر هستند، به‌طور حتم بر خروجی بیش‌ترین تأثیر را نمی‌گذارد و عواملی مانند موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها و نقش مسیریابی در رودخانه اصلی نیز می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. به‌نظر می‌رسد که با افزایش مساحت حوضه آبریز، دبی اوج متوسط کاهش می‌یابد. این رفتار ممکن است به این دلیل باشد که در حوضه‌های بزرگ‌تر، رواناب به‌دلیل فاصله بیش‌تر و زمان طولانی‌تر برای رسیدن به خروجی حوضه، بیش‌تر توزیع می‌شود و از اوج دبی کاسته می‌شود. اختلاف قابل توجهی بین دبی اوج متوسط دسته‌های مختلف وجود دارد. حوضه‌های کوچک‌تر دبی اوج بالاتری دارند، که نشان‌دهنده این است که این حوضه‌ها ممکن

یکی از روش‌ها و ابزارهای مناسب برای مطالعه فرآیندهای گردش آب در طبیعت می‌باشند.

- سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور کارآیی مناسبی در تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه مدل رقومی ارتفاعی، شماره منحنی و خاک حوضه مطالعاتی دارد.

- بارش تهیه‌شده با استفاده از ماهواره‌ها و سامانه سنجش از دور دارای دقت قابل‌قبولی بوده و با توجه به عدم‌وجود داده‌های زمینی موجب بهبود فرآیند شبیه‌سازی حوضه مطالعاتی شده است.

- نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان از عملکرد مطلوب نرم‌افزار HEC-HMS در شبیه‌سازی حوضه مطالعاتی داشت.

- نتایج اولویت‌بندی از نظر مساحت نشان‌دهنده این است که بزرگ‌ترین مساحت متعلق به زیرحوضه ۴ و کوچک‌ترین زیرحوضه، زیرحوضه ۷ می‌باشد.

- نتایج اولویت‌بندی براساس کاهش دبی نشان‌دهنده این است که زیر حوضه ۴ با کاهش ۲۲/۵۸ درصدی و زیرحوضه ۱۵ با کاهش ۰/۰۴ درصدی بالاترین و کم‌ترین مشارکت را در تولید دبی کل حوضه داشته‌اند.

- با مقایسه مساحت زیرحوضه‌ها و درصد مشارکت آنها در تولید رواناب مشاهده می‌شود که بزرگ بودن مساحت تنها عامل بیش‌تر بودن دبی تولیدی در یک حوضه نیست و عوامل مختلفی هم‌چون زمان تمرکز، موقعیت زیرحوضه‌ها، شیب و ارتفاع حوضه نیز در این امر دخیل می‌باشد.

- با توجه به این که تنوع خاکی زیادی در نقشه جهانی خاک مورد استفاده در حوضه مطالعاتی وجود ندارد، بنابراین ضرایب CN اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند و تغییرات آنها در بازه ۷۹-۸۳ می‌باشد. با این حال با مقایسه تغییرات حجم دبی برحسب ضرایب CN زیرحوضه‌ها مشاهده شد که

را مورد تأیید قرار دادند. خسرو حسینی، راضیه خانی را به بررسی جنبه‌ای خاص تشویق کرد. خسرو حسینی بر یافته‌های این پژوهش نظارت داشت. تمامی نویسندگان نتایج را مورد بحث قرار داده و در نگارش نسخه نهایی مقاله مشارکت کردند. راضیه خانی با حمایت خسرو حسینی و سیدفرهاد موسوی مقاله را نگارش نمود. ایده‌ی اصلی توسط خسرو حسینی مطرح شد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

است حساس‌تر به بارش‌های ناگهانی باشند و رواناب به‌سرعت به خروجی برسد. اسلامی و همکاران [۱۵] نیز نتایج مشابهی را در خصوص عملکرد حوضه‌ها در خصوصیات هیدروگراف سیل ارائه نمودند. طبق نظر ایشان، سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها تنها متأثر از مساحت زیرحوضه‌ها نیست و عواملی از قبیل فیزیوگرافی، کاربری اراضی و حتی موقعیت مکانی آن‌ها و روندیابی جریان خروجی زیرحوضه در پتانسیل سیل‌خیزی هر حوضه موثر می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

راضیه خانی نظریه را توسعه داده و محاسبات را انجام داد. خسرو حسینی و سیدفرهاد موسوی روش‌های تحلیلی

References

- [1] Singh SK, Kanga Sh, Đurin B, Kranjčić N, Chaurasia R, Markovinović D. Flood risk modeling using HEC-RAS and geospatial techniques. E-ZBORNİK Electronic collection of papers of the Faculty of Civil Engineering. 2021 Dec; 11 (22): 20-36. <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2021.22.11.20>.
- [2] Rajabizadeh Y, Ayoubzadeh SA, Zahiri A. Flood survey of Golestan province in 2018-2019 and providing solutions for its control and management in the future. Journal of Ecohydrology. 2020 Jan; 6(4): 921-942. <https://doi.org/10.22059/ije.2019.283004.1137> [In Persian].
- [3] Sampson ChC, Smith AM, Bates PD, Neal JC, Alfieri L, Freer JE. A high-resolution global flood hazard model. Water Resources Research. 2015 Sep; 51(9): 7358-7381. <https://doi.org/10.1002/2015WR016954>.
- [4] Ali S, Cheema MJM, Waqas MM, Waseem M, Leta MK, Qamar MU, Awan UK, Bilal M, Rahman MHU. Flood mitigation in the transboundary Chenab River Basin: A basin-wise approach from flood forecasting to management. Remote Sensing. 2021 Sep; 13(19), 3916. <https://doi.org/10.3390/rs13193916>.
- [5] Mohammadi Motlagh R, Jalalkamali N, Jalalkarami A. Study of contribution role of sub-basin in intense flooding; Case Study: Dalaki basin in Frasin Province. Journal of Irrigation and Water Engineering. 4(1): 31-44 [In Persian].
- [6] Belabid N, Zhao F, Brocca L, Huang Y, Tan Y. Near-real-time flood forecasting based on satellite precipitation products. Remote Sensing. 2019 Jan, 11(3): 252. <https://doi.org/10.3390/rs11030252>.
- [7] Aminyavari S, Saghaifan B, Sharifi E. Assessment of precipitation estimation from the NWP models and satellite products for the Spring 2019 severe floods in Iran. Remote Sensing. 2019 Nov, 11(23): 2741. <https://doi.org/10.3390/rs11232741>.
- [8] Xiang Y, Chen J, Li L, Peng T, Yin Zh. Evaluation of eight global precipitation datasets in hydrological modeling. Remote Sensing. 2021 Jul; 13(14): 2831. <https://doi.org/10.3390/rs13142831>.

- [9] Nohegar A, Ghashghaieezadeh N, Helisaz A. Determining flood-prone areas and prioritizing flood risk in sub-basins. (Case study: Jamash watershed, Hormozgan province). *Researches in Earth Sciences*. 2013; 3(1): 14-25 [In Persian].
- [10] Kang H, Moon J, Shin Y, Ryu J, Kum DH, Jang Ch, Choi J, Kong DS, Lim KJ. Modification of SWAT auto calibration for accurate flow estimation at all flow regimes. *Paddy and Water Environment*. 2016 Oct; 14: 499-508. <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0519-6>.
- [11] Laouacheria E, Mansouri R. Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff Hydrograph prediction in a small urban catchment. *Water Resource Management*. 2015 Jun; 29: 2485-2501. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0953-7>.
- [12] Gao Y, Chen J, Luo H, Wang H. Prediction of hydrological responses to land use change. *Science of The Total Environment*. 2020 Mar; 708: 134998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134998>.
- [13] Mirzayi Sh, Esmali A, Mostafazadeh R, Ghorbani A, Mirzaei S. Flood hydrograph simulation and analysis of its components with landscape metrics in Amoughin Watershed, Ardabil Province. *Journal of Ecohydrology*. 2018 Jul; 5(2): 357-372. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.231141.547> [In Persian].
- [14] Nasiri Z, Talebi A. Prioritizing sub-basins in terms of flood risk using the HEC-HMS model in the upper reaches of the Khoshk River in Shiraz. *Journal of Ecohydrology*. 2020 Apr; 7(1): 47-57. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.284092.1145> [In Persian].
- [15] Eslami Z, Shojaei S, Hakimzadeh MA. Exploring prioritized sub-basins in terms of flooding risk using HEC_HMS model in Eskandari catchment, Iran. *Spatial Information Research*. 2017 Oct; 25: 677- 684. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0135-1>.
- [16] Nachtergaele F, Velthuisen H, Verelst L. Harmonized World Soil Database (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2009 Mar.
- [17] Refsgaard JCh, Knudsen J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*. 1996 Jul; 32(7): 2189-2202. <https://doi.org/10.1029/96WR00896>.
- [18] Hengade N, Eldho TI, Ghosh S. Climate change impact assessment of a river basin using CMIP5 climate models and the VIC hydrological model. *Hydrological Sciences Journal*. 2018 Mar; 63(4): 596-614. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1441531>.
- [19] Zubieta R, Getirana A, Espinoza JC, Lavado W. 2015. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall-runoff modeling of the Western Amazon Basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*. 2015 Sep; 528: 599-612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>.
- [20] Khanmohamadi Z, Mahjoobi E, Gharechelou S, Banikhedmat A. Statistical assessment of satellite rainfall products in daily and monthly gauge spatial scales. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 2023 Dec; 14(4):512- 527. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.355269.1908> [In Persian].
- [21] Ordooni M, Memarian H, Akbari M, Pourreza M. Evaluation and comparison of GPM satellite precipitation data with meteorological station using Kolmogorov-Smirnov Test. *Rainwater Catchment Systems*. 2021; 9(2): 11-24. <https://doi.org/20.1001.1.24235970.1400.9.2.5.9> [In Persian].
- [22] AmirAhmadi A, Mohammadnia M, Golshani N. Analysis of geomorphological factors influencing the flood using the HEC-HMS model. *Journal of Hydrogeomorphology*. 2017 Jan; 2(3): 21-42 [In Persian].
- [23] Banikhedmat A, Salehi H, Golian S, Koohian Afzal F, Ezati Boorestan N. Evaluation of the impact of non-aligned objective functions in multiobjective calibration with SWAT hydrological model. *Watershed Engineering and Management*. 2023 Dec; 15(4): 639-654. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.360792.2003> [In Persian].