



Assessing the Impact of Hydraulic Structure Construction on Surface Runoff at the Watershed Outlet Using the HEC-HMS Model

Mohammad Javad Chehelgerdi ¹, Elham Ghanbari-Adivi ², Rouhollah Fattahi ³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrakord University, Shahrakord, Iran. Email: Mohammadjavadchehelgerdi@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrakord University, Shahrakord, Iran.. Email: ghanbariadiivi@sku.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Shahrakord University, Shahrakord, Iran. Email: fattahi@sku.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 17 July 2026

Revised 02 August 2026

Accepted 08 August 2026

Available online 23 September 2026

Keywords:

Human activities,
HEC-HMS model,
Earth dam,
Sudjan watershed,
Chaharmahal and Bakhtiari
Province

ABSTRACT

Objective: In response to severe droughts and climate change impacts in the Chaharmahal and Bakhtiari province, numerous watershed management structures, particularly earth dams, have been constructed to revive groundwater and surface water resources. However, the cumulative hydrological impacts of these structures on downstream flow regimes, especially in snow-dominated mountainous basins, remain a subject of debate. This study aims to evaluate the hydrological effects of existing earth dams on surface runoff and downstream flow in the Sudjan-Qaleh Shahrokh sub-basin (located upstream of the Zayandeh Rud Dam). Furthermore, it seeks to assess the capability and reliability of the HEC-HMS model in simulating these structural interventions and snowmelt-driven hydrological processes in data-scarce mountainous environments.

Method: The study was conducted in the Sudjan watershed (975 km²), characterized by a cold, semi-arid climate and a snow-dominated hydrological regime. Daily precipitation and discharge data from 10 hydrometric and synoptic stations over an 8-year period (2017–2025) were utilized. Spatial data, including DEM, land use, and geology, were processed in a GIS environment to extract the Curve Number (CN) map, with CN values ranging from 45.5 to 66 across nine sub-basins. The HEC-HMS model (v4.11) was employed using the SCS-CN loss method, SCS unit hydrograph, Muskingum routing, and linear baseflow modules. The model was calibrated (2017–2021) and validated (2022–2025) using the Nelder-Mead optimization algorithm. To evaluate the dams' impacts, three major earth dams with a total storage capacity of 509,220 m³ were simulated for the 2017–2018 hydrological year. Two scenarios were compared: a "with dams" scenario (incorporating stage-area-volume curves and assuming three full fillings per year) and a "without dams" baseline scenario.

Results: The HEC-HMS model demonstrated satisfactory performance, particularly at the monthly scale. During calibration, the daily Kling-Gupta Efficiency (KGE) was 0.64 and the monthly KGE was 0.84, with a Percent Bias (PBIAS) of approximately -22%. The negative PBIAS indicates a slight systematic overestimation, primarily attributed to the lack of direct Snow Water Equivalent (SWE) data in the model. Hydrological simulations revealed that the presence of the earth dams resulted in a negligible reduction in the annual outflow volume—only 0.19% (approximately 406 × 10³ m³). Notably, the main annual peak discharge remained entirely unchanged at 56.8 m³/s (recorded on May 10, 2018). However, a systematic increase in summer baseflow was observed during the recession limb (June to August), ranging from 0.1 to 0.6 m³/s. Reservoir analysis showed that Reservoir 1 dominated the retention process, accounting for 79.7% of the total volume reduction. The minimal impact on flood peaks is fundamentally due to the extremely low ratio of the dams' total storage capacity (509,220 m³) to the basin's annual runoff volume (~210 million m³), which constitutes merely 0.24%. Consequently, the structures act primarily as baseflow regulators rather than flood peak attenuators.

Conclusions: The existing earth dams in the Sudjan sub-basin do not exert significant control over extreme flood peaks generated by spring snowmelt. However, they play a crucial, albeit localized, role in enhancing summer baseflow, thereby supporting downstream agricultural demands without causing a substantial deficit in the total annual water transfer to downstream basins. The HEC-HMS model proved to be an efficient tool for evaluating cumulative watershed interventions, despite inherent limitations in snowmelt modeling. From a water resources management perspective, these findings highlight that small-scale earth dams in snow-dominated regions cannot replace comprehensive flood risk management strategies. Future watershed management plans must consider increasing storage capacities or integrating real-time forecasting systems. Furthermore, rigorous pre-construction hydrological modeling is essential to balance dry-season water supply with flood risk mitigation in vulnerable mountainous catchments.

Cite this article: Chehelgerdi, M., Ghanbari-Adivi, E., Fattahi, R. (2026). Assessing the Impact of Hydraulic Structure Construction on Surface Runoff at the Watershed Outlet Using the HEC-HMS Model. *Journal of Ecohydrology*, 13(3), 1454-1478. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.419285.1922>



Introduction

Iran suffers recurrent and costly floods, making hydrological simulation a prerequisite for flood-risk management in vulnerable catchments and riparian infrastructure. In Chaharmahal and Bakhtiari Province, climate change and protracted drought have left more than 95% of the principal plains prohibited or critically over-exploited. To restore water resources, watershed management programmes have built more than 2,850 structural measures, including roughly 470 in the present study area, yet their cumulative hydrological effect on downstream flow regimes in snow-dominated mountain basins remains debated. Earlier studies relied on short calibration windows and few storm events, leaving the annual water balance unresolved. This study therefore evaluates the hydrological effects of existing earth dams on surface runoff and downstream flow in the Sudjan–Qaleh Shahrokh sub-basin, upstream of the Zayandeh Rud Dam, and tests the capability of HEC-HMS in simulating such interventions and snowmelt-driven processes in a data-scarce mountain environment.

Methods

The Sudjan watershed ($\approx 975 \text{ km}^2$), a principal sub-basin of the Gavkhouni basin, lies between 2,131 and 3,948 m a.s.l. under a cold semi-arid climate in which snow governs the annual flow regime. Daily precipitation and discharge records from ten hydrometric and synoptic stations were compiled for 2017–2025. A digital elevation model with land-use, geological and soil hydrological group maps was processed in GIS to derive the curve number (CN) map for nine sub-basins and four routing reaches, with CN ranging from 45.5 to 66. HEC-HMS v4.11 was configured with the SCS-CN loss method, the SCS unit hydrograph, Muskingum routing and linear baseflow, with $T_{\text{lag}} = 0.6T_c$. Automatic calibration (2017–2021) used the Nelder–Mead simplex algorithm to optimise 26 parameters (lag time and CN per sub-basin, Muskingum coefficients per reach), and validation used the independent 2022–2025 record; both were assessed by KGE, R^2 , RMSE and PBIAS. The three earth dams with the largest impoundment, with a combined storage of $509,220 \text{ m}^3$, were represented through their stage–area–volume curves for the 2017–2018 hydrological year, assuming three complete fillings annually, and “with-dam” and “without-dam” scenarios were compared at the watershed outlet.

Results

Before calibration the model systematically overestimated peak discharge with a premature time to peak ($\text{KGE} = 0.22$; $\text{RMSE} = 56.1$; $\text{PBIAS} = 18\%$; $R^2 = 0.20$). After calibration, daily performance improved to $\text{KGE} = 0.64$, $\text{RMSE} = 24.2$, $\text{PBIAS} = -21.5\%$ and $R^2 = 0.51$; validation yielded $\text{KGE} = 0.60$, $\text{RMSE} = 19$, $\text{PBIAS} = -22.2\%$ and $R^2 = 0.54$. Monthly aggregation performed better (calibration: $\text{KGE} = 0.84$, $\text{PBIAS} = -8.6\%$, $R^2 = 0.74$; validation: $\text{KGE} = 0.68$, $\text{PBIAS} = -22.6\%$, $R^2 = 0.65$). Skill thus improved from “unacceptable” to “acceptable” (Moriassi et al., 2007), and a paired t-test confirmed a significant reduction in RMSE ($p < 0.001$); with under 10% skill loss during validation, the parameters are transferable rather than overfitted. Negative PBIAS arises from the absence of direct snow water equivalent (SWE) data, which forces immediate conversion of snowfall into runoff, and from the constant CN assumption; the 30–90 day precipitation–runoff lag above 3,900 m was absorbed by lag time, explaining winter overestimation and early-spring underestimation, so daily accuracy was lower than in temperature-index or MODIS SWE studies, whereas the monthly KGE of 0.84 confirms suitability for volumetric and annual water-balance assessment.

The combined storage of $509,220 \text{ m}^3$ reduced the annual outflow volume by only $406 \times 10^3 \text{ m}^3$, that is 0.19%, from $210,271.7$ to $209,865.6 \times 10^3 \text{ m}^3$, 79.7% of which was attributable to dam 1. The principal peak discharge remained unchanged at $56.8 \text{ m}^3/\text{s}$ on 10 May 2018, although secondary peaks were marginally attenuated ($0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ on 23 April 2018) and March–April rising-limb flows were 0.1 – $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ lower. Conversely, summer low flows increased consistently ($20.9 \rightarrow 21.2 \text{ m}^3/\text{s}$ on 9 June 2018; $14.0 \rightarrow 14.6 \text{ m}^3/\text{s}$ on 15 June; $5.0 \rightarrow 5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ on 1 July). Reservoir simulation showed near-balanced water budgets and a coordinated snowmelt pulse between 23 and 25 May 2018. Because the storage-to-annual-runoff ratio is only 0.24%, the hypotheses that check dams substantially reduce peak discharge and

annual runoff volume are rejected, and the peak reductions of 22.8% and 60–62% reported elsewhere in Iran are not reproduced.

Conclusion

HEC-HMS proved reliable for simulating a snow-dominated mountain catchment ($KGE = 0.64\text{--}0.84$). The three earth dams reduced annual outflow by about 0.19% and had no measurable effect on the main flood peak of $56.8\text{ m}^3/\text{s}$, a behaviour governed by the low storage-to-runoff ratio (0.24%), which makes such structures summer-baseflow regulators rather than peak-flood controllers. Given the Zayandeh Rud water crisis, the enhancement of summer low flows supports downstream agriculture and ecosystems without materially reducing inflows to downstream basins; however, the inability to attenuate snowmelt extremes shows that small check dams cannot replace comprehensive flood-management strategies, and that future designs must increase storage or be complemented by real-time forecasting. The main limitations are the use of SCS-CN for long-term continuous simulation, which lacks explicit soil-moisture accounting, and the absence of a dedicated snowmelt module due to insufficient SWE data; the results are therefore volumetric and trend-oriented, and soil moisture accounting modelling is recommended for future daily-scale analyses.

Funding

The study was funded by the University of ABCD, Country ABCD, and Grant No. 111111.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors conducted the present study with the support of Shahrekord University and the Chaharmahal and Bakhtiari Regional Water Company, and hereby express their gratitude for this support.

The authors would also like to thank anonymous referees for their constructive comments.



ارزیابی تأثیر احداث سازه‌های آبی بر میزان رواناب سطحی خروجی از حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS

محمدجواد چهل‌گردی^۱، الهام قنبری عدیوی^۲، روح‌اله فتاحی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهر، ایران. رایانامه: Mohammadjavadchehelgerdi@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهر، ایران. رایانامه: ghanbariadi@sku.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهر، ایران. رایانامه: fattahi@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: فعالیت‌های انسانی، مدل HEC-HMS، بند خاکی، حوضه آبخیز سودجان، استان چهارمحال و بختیاری.	هدف: ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی بندهای خاکی موجود بر رواناب سطحی و جریان پایین‌دست در زیرحوضه سودجان - قلعه‌شاهرخ (بالادست سد زاینده‌رود) می‌پردازد و توانمندی مدل HEC-HMS را در شبیه‌سازی این اثرات مورد آزمون قرار می‌دهد. روش پژوهش: داده‌های روزانه بارش و دبی ایستگاه‌های منطقه‌ای طی دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ مورد استفاده قرار گرفت. مدل HEC-HMS با به‌کارگیری روش تلفات SCS-CN، هیدروگراف واحد SCS، کالیبراسیون (۲۰۱۷ - ۲۰۲۱) و اعتبارسنجی (۲۰۲۲ - ۲۰۲۵) شد. سه بند خاکی اصلی با ظرفیت ذخیره کل ۵۰۹۲۲۰ مترمکعب برای سال هیدرولوژیکی ۲۰۱۷ - ۲۰۱۸، در دو حالت با سازه و بدون سازه و با فرض سه بار پرشدگی کامل در سال شبیه‌سازی شدند. عملکرد مدل HEC-HMS رضایت‌بخش ارزیابی شد (شاخص KGE روزانه ۰/۶۴ و ماهانه ۰/۸۴؛ PBIAS حدود ۲۲ درصد). یافته‌ها: نتایج نشان داد با وجود بندهای خاکی، حجم سالانه جریان خروجی تنها ۰/۱۹ درصد (حدود $۱۰^۳ \times ۴۰۶$ مترمکعب) کاهش یافته است، پیک اصلی دبی در خروجی حوضه بدون تغییر و برابر با ۵۶/۸ مترمکعب بر ثانیه در ۱۰ مه ۲۰۱۸ باقی مانده و جریان پایه تابستانه به صورت جزئی (۰/۱ تا ۰/۶ مترمکعب بر ثانیه) افزایش یافته است. نتیجه‌گیری: بندهای خاکی موجود کنترل قابل توجهی بر پیک سیلاب‌ها اعمال نمی‌کنند، اما با تقویت جریان پایه در دوره تابستان، از کشاورزی پایین‌دست حمایت می‌کنند، بدون آنکه کاهش محسوسی در حجم کل جریان ورودی به حوضه‌های پایین‌دست ایجاد شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد مدل‌های HEC-HMS ابزارهای کارآمدی برای چنین ارزیابی‌هایی هستند و می‌توانند راهنمای عملی مناسبی برای مدیریت پایدار حوضه‌های آبخیز فراهم آورند.

استناد: چهل‌گردی، محمدجواد؛ قنبری عدیوی، الهام؛ فتاحی، روح‌اله. (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر احداث سازه‌های آبی بر میزان رواناب سطحی خروجی از حوضه با استفاده

از مدل HEC-HMS. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۳)، ۱۴۵۴-۱۴۷۸.

<https://doi.org/10.22059/ije.2026.419285.1922>



© محمدجواد چهل‌گردی، الهام قنبری عدیوی، روح‌اله فتاحی

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

با توجه به خسارت‌های سالانه ناشی از سیلاب در ایران، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جهت مدیریت بحران و کاهش اثرات مخرب این پدیده امری ضروری است (جاگادیش و ونی، ۲۰۲۱). استفاده از ابزارهای کامپیوتری مانند HEC-HMS برای شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر و پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها، راهکاری کارآمد جهت کاهش ریسک در مناطق آسیب‌پذیر و زیرساخت‌های حاشیه رودخانه فراهم می‌کند (دابهاوس و همکاران، ۲۰۲۳؛ فیو و همکاران، ۲۰۰۳).

استان چهارمحال و بختیاری تحت تأثیر تغییر اقلیم، با بحران خشکسالی و تبدیل بیش از ۹۵ درصد دشت‌های اصلی خود به مناطق ممنوعه و بحرانی مواجه است. جهت مقابله با این وضعیت و تقویت آبخوان‌ها، طی دهه‌های اخیر اجرای طرح‌های آبخیزداری و احداث بیش از ۲۸۵۰ سازه (مانند خشه‌چین و گابیون‌بندی) در حاشیه دشت‌های استان با هدف احیای منابع آب صورت گرفته است (حسین‌خانی و همکاران، ۱۴۰۲).

ارزیابی اثرات سازه‌های کنترل سیلاب بر رواناب خروجی، به دلیل پیامدهای گسترده اقتصادی، کشاورزی و اجتماعی در حوضه‌های پایین‌دست، از اهمیت راهبردی برخوردار است. با توجه به ضرورت تعیین میزان کاهش دبی جریان انتقالی به مناطق پایین‌دست، شناسایی دقیق میزان تأثیرگذاری این اقدامات بر رژیم جریان، برای مدیریت پایدار منابع آب امری حیاتی است. با این حال، میزان اثرگذاری این سازه‌ها بر تغییرات رواناب خروجی در این منطقه همچنان مورد بحث است و نیاز به بررسی‌های دقیق مدل‌سازی دارد.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات اقدامات سازه‌ای بر منابع آب سطحی و رواناب خروجی در زیرحوضه‌های سودجان و قلعه شاهرخ (استان چهارمحال و بختیاری) است. برای این منظور، مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS در محیط GIS انجام خواهد شد تا عملکرد رواناب در دو سناریوی با احداث سازه و بدون احداث سازه مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. همچنین، ارزیابی توانمندی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی اثرات هیدرولوژیکی بندهای خاکی در حوضه‌های کوهستانی برف‌محور و تعیین میزان تأثیر بندهای خاکی بر دبی پیک و حجم رواناب سالانه خروجی از حوضه است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بررسی مطالعات پیشین در حوزه مدیریت منابع آب، چارچوب مناسبی برای تحلیل اثر اقدامات سازه‌ای بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز فراهم می‌سازد. در ادامه، مهم‌ترین پژوهش‌های داخلی و خارجی مرتبط با مدل‌سازی بارش - رواناب و ارزیابی اثر سازه‌های آبخیزداری مرور می‌شود.

۱. مطالعات داخلی

امیدوار و اژدرپور (۱۳۹۱) شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS را در حوضه رودخانه اعظم هرات با داده‌های ۲۴ ساله مقایسه کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد شبکه عصبی ($R=0/978$) نسبت به مدل HEC-HMS ($R=0/978$) دقت بیشتری در برآورد دبی، حجم رواناب و دبی اوج دارد.

مرادنژادی و همکاران (۱۳۹۴) کارایی HEC-HMS را در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب حوضه‌های جنگل خیرود برای دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال ارزیابی کردند و عملکرد مدل پس از کالیبراسیون در برآورد دبی اوج تأیید شد.

توکلی و همکاران (۱۴۰۲) اثر سازه‌های آبخیزداری بر کاهش دبی حداکثر سیلاب در حوضه گل‌گل ایلام را با HEC-HMS بررسی کردند ($NSE \approx 0/79$ در کالیبراسیون). نتایج پژوهش یادشده نشان داد پیک دبی در دوره بازگشت ۲۵ ساله از ۱۳۷ به ۲/۱۱۴ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است. سپاسی (۱۴۰۳) تأثیر اقدامات آبخیزداری (بیولوژیکی، مکانیکی و تلفیقی) بر هیدروگراف‌های سیلابی حوضه بالادست کلات را با HEC-HMS و GIS ارزیابی کرد. نتایج بیانگر کاهش دبی اوج به ترتیب ۱۵-۱۸، ۵۴-۵۶ و ۶۰-۶۲ درصدی بود و برتری سناریوهای تلفیقی را نشان داد.

پیکری (۱۴۰۳) فرایند بارش - رواناب حوضه نوره (کردستان) را با HEC-HM و GIS شبیه‌سازی و دبی اوج دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ ساله را برآورد کرد. مقایسه با روش تجربی دیکن، برتری HEC-HM و همچنین، ناکارآمدی برخی سازه‌های هیدرولیکی موجود در برابر سیلاب‌های حداکثری را آشکار ساخت. سلیمانی (۱۴۰۴) اثر اقدامات آبخیزداری بر هیدرولوژی حوضه گردو را با HEC-HM و روش SCS-CN ارزیابی کرد. نتایج نشان داد پس از اجرای طرح‌ها، حدود ۲ درصد از حجم رواناب کاهش یافته و به نفوذ و تغذیه منابع آب اختصاص یافته است.

۲. مطالعات خارجی

اولیلو و لی (۲۰۱۰) مدل HEC-HM را با پشتیبانی HEC-GeoHMS برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های میسای و وان‌آن (چین) به‌کار بردند. ضریب تعیین و توافق بالای ۹/۰ برای تمامی رویدادها، کارایی مدل در پیش‌بینی رویدادمحور سیلاب را تأیید کرد. دی‌سیلوا و همکاران (۲۰۱۳) HEC-HM را در حوضه کلانی (سريلانکا) در دو حالت رویدادی (گرین-امپت؛ $NSE = ۰/۹۱$) و پیوسته (رطوبت خاک پنج‌لایه‌ای؛ $NSE = ۰/۸۸$) ارزیابی کردند و امکان استفاده از پارامترهای رویدادی در مدل‌سازی پیوسته را نشان دادند. پاتودل و همکاران (۲۰۱۹) شبیه‌سازی رواناب حوضه کوهستانی مارشیانگدی (نیپال) را با HEC-HM در شرایط کمبود داده انجام دادند. تطابق رضایت‌بخش دبی مشاهده‌ای و مدل‌شده، قابلیت اطمینان مدل را در حوضه‌های هیمالیایی با داده‌های محدود تأیید کرد. رانجان و سینگ (۲۰۲۲) مدل بارش - رواناب حوضه پونپون را با HEC-HM در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و موسمی توسعه دادند. بهترین عملکرد به مدل ماهانه تعلق داشت (R^2 و $NSE < ۰/۷۵$ ؛ $PBIAS < ۱۰\%$).

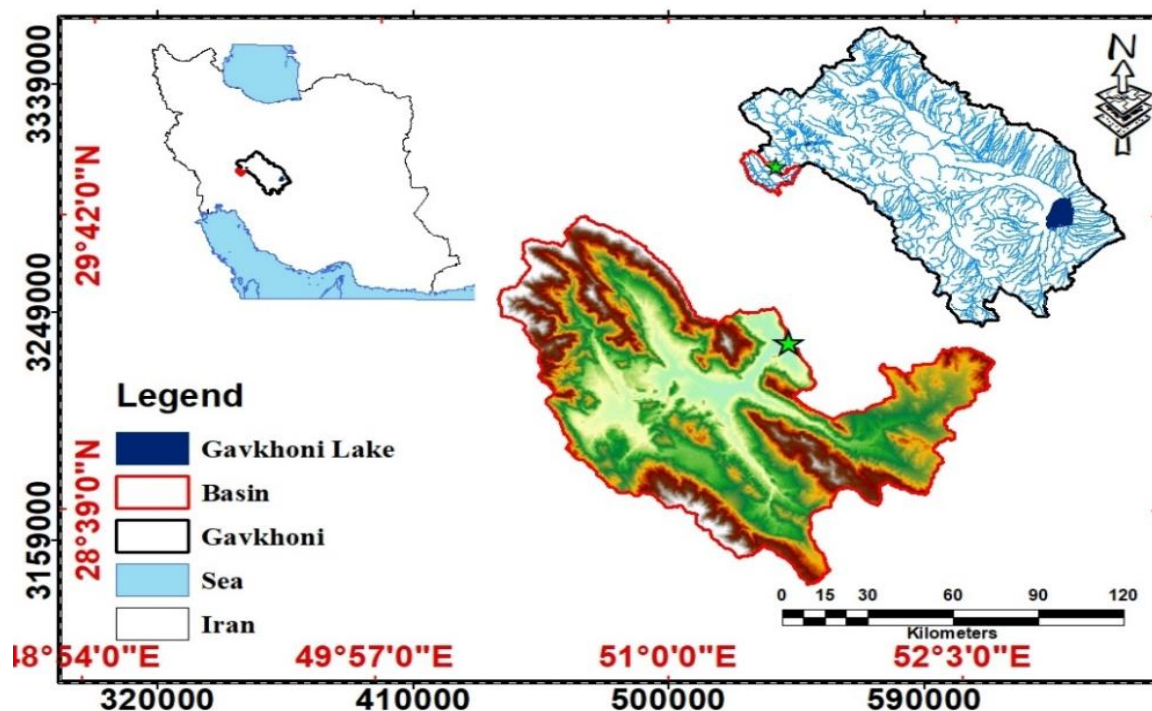
دیمری و همکاران (۲۰۲۳) دبی جریان حوضه باگیراتی (زیرحوضه گنگ، هند) را تحت تأثیر مخزن سد تهری و نوسانات اقلیمی با HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. انطباق مناسب دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، توانایی مدل در بازنمایی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های کوهستانی را نشان داد. هگراس (۲۰۲۵) روان‌آب حوضه دره واطیر (سینا، مصر) را با چارچوب یکپارچه GIS و HEC-HMS برای دوره‌های بازگشت ۲۵ تا ۱۰۰ سال مدل‌سازی کرد. دبی اوج کل در دوره ۱۰۰ ساله به ۱۵/۵۲۵۷ مترمکعب بر ثانیه رسید و زیرحوضه ۲۲ بیشترین سهم را در تولید رواناب داشت.

مطالعات پیشین بر نقش سازه‌های آبخیزداری در مدیریت جریان‌های سطحی تأکید دارند، اما با وجود این، خلأ پژوهشی در ارزیابی جامع اثرات تجمعی این سازه‌ها در حوضه‌های کوهستانی و برف‌گیر (نظیر زیرحوضه سودجان) محسوس است. اکثر تحقیقات موجود به کالیبراسیون کوتاه‌مدت و تحلیل رگبارهای محدود محدود شده‌اند، در حالی که پژوهش حاضر با هدف رفع این محدودیت، اثرات سیستماتیک ۴۷۰ سازه موجود را بر بیلان آبی سالانه و حجم رواناب در یک دوره آماری بلندمدت واکاوی می‌کند که این امر وجه تمایز و نوآوری این مطالعه محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

۱. منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در حوضه آبخیز سودجان به مساحت تقریبی ۹۷۵ کیلومتر مربع، واقع در استان چهارمحال و بختیاری، انجام شد. این حوضه یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه آبخیز گاوخونی در بالادست سد زاینده‌رود است (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه دارای حداقل ارتفاع ۲۱۳۱ متر و حداکثر ارتفاع ۳۹۴۸ متر از سطح دریا است. اقلیم منطقه سرد و نیمه‌خشک بوده و بارش برف نقش مهمی در رژیم هیدرولوژیکی سالانه آن ایفا می‌کند.



شکل ۱. نقشه رقومی و موقعیت منطقه مورد مطالعه در حوضه آبخیز گاوخونی، ایران

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، اثرات اقدامات سازه‌ای بر منابع آب سطحی و رواناب خروجی به حوضه‌های پایین‌دست در زیرحوضه سودجان - قلعه شاهرخ (استان چهارمحال و بختیاری) با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS و محیط GIS ارزیابی شد. این نتایج در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن سازه‌ها و تأثیرات آن‌ها بر منابع آب سطحی و خروجی رواناب به سمت حوضه‌های پایین‌دست با کمک نرم‌افزار HEC-HMS مقایسه شدند. مراحل اجرایی پژوهش شامل گردآوری داده‌های بارش (روزانه، ماهانه و رخداد‌های سیلابی) و دبی (روزانه، ماهانه و هیدروگراف سیلاب‌های ثبت‌شده) از سازمان‌های منابع طبیعی و آب منطقه‌ای به منظور تحلیل کیفیت آمار و استخراج سیلاب‌ها در دوره‌های بازگشت مختلف بود. همچنین، بازدید میدانی از منطقه برای شناسایی چندین نقطه از نقاط حادثه‌خیز و ثبت آثار سیلاب‌های گذشته به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام گرفت. در ادامه، داده‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه تراز بستر رودخانه، نقشه کاربری اراضی، پوشش گیاهی و گروه هیدرولوژیکی خاک تهیه شد تا نقشه شماره منحنی (CN) استخراج و به مدل HEC-HMS معرفی شود. سپس، شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب تحت دوره‌های بازگشت مختلف، ابتدا در حالت وجود سازه‌ها و سپس در حالت حذف سازه‌ها انجام شد و نتایج دو سناریو با یکدیگر مقایسه شد تا میزان تأثیر سازه‌ها بر کاهش یا تغییر دبی خروجی و پیامدهای آن بر حوضه‌های پایین‌دست از جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی نظیر کشاورزی تعیین شود. در نهایت، جمع‌بندی نتایج برای شفاف‌سازی کارایی سازه‌ها در مدیریت منابع آب سطحی منطقه ارائه شد. ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش، نرم‌افزار HEC-HMS برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و GIS برای پردازش‌های مکانی و تهیه لایه‌های ورودی بودند.

۲-۲-۱- جمع‌آوری و پایش داده‌های آماری

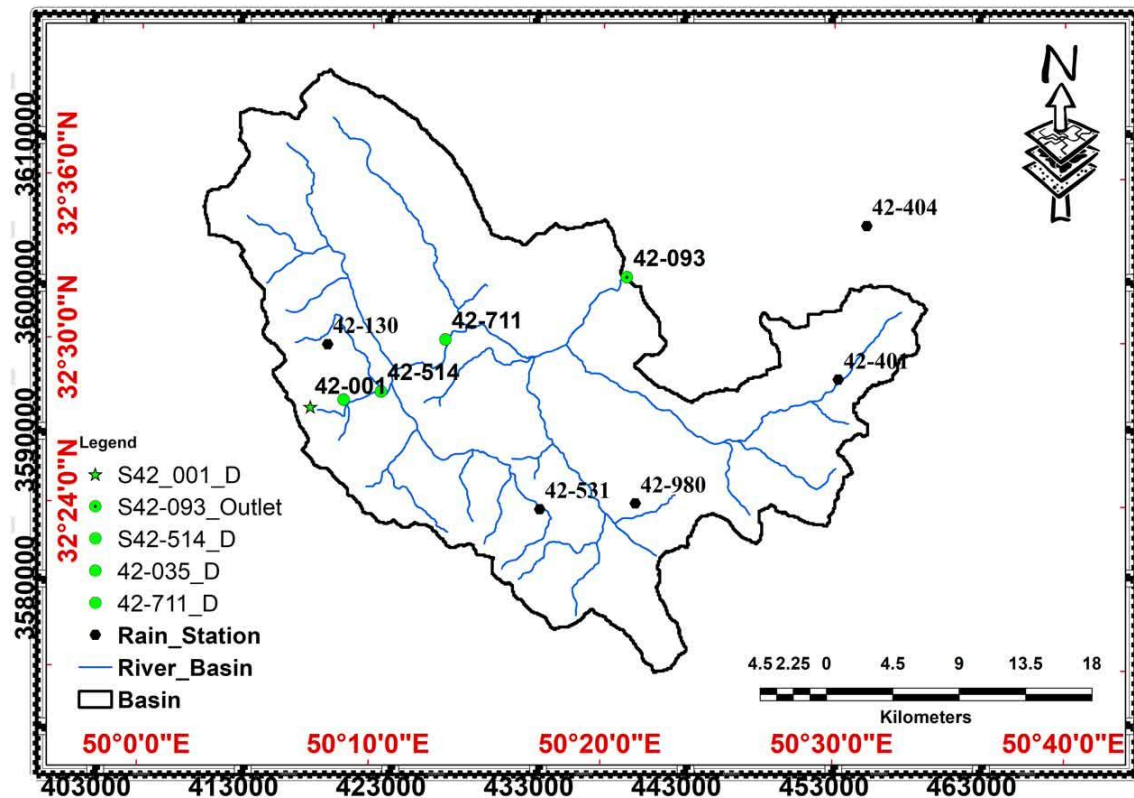
در این پژوهش از داده‌های روزانه بارش و دبی طی دوره آماری ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ میلادی) استفاده شد. داده‌ها از ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری شامل ایستگاه‌های چلگرد، دره در، دره نمکی، دیمه، سودجان، قلعه تک، بارده، مرغملک، دره زری و میهه جمع‌آوری شد (جدول ۱ و شکل ۲). همچنین، نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM)، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و گروه هیدرولوژیک خاک تهیه و با تلفیق آن‌ها، نقشه شماره منحنی (CN) برای ۹ زیرحوضه (شکل ۳ و جدول ۲) استخراج شد.

جدول ۱. لیست ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی واقع در حوضه آبخیز

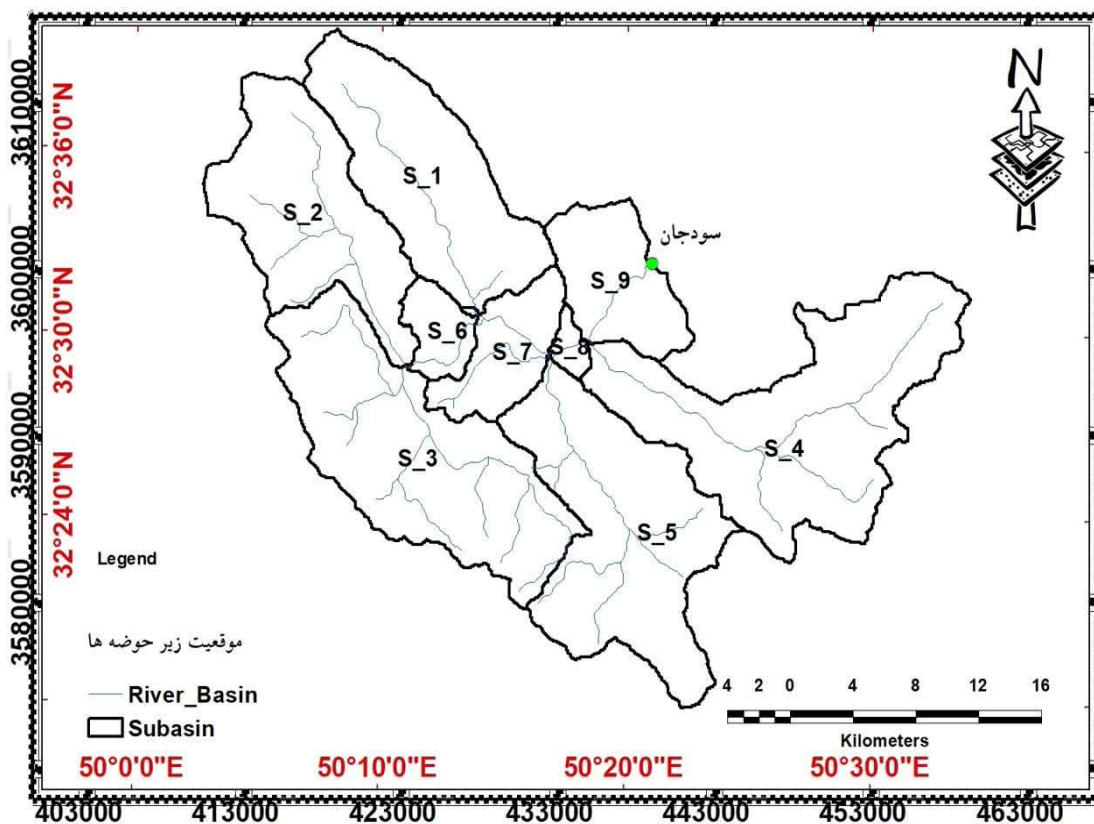
ردیف	کد	ایستگاه	River	دوره آماری	x	y	Type
۱	۴۲-۰۰۱	چلگرد	تونل اول کوهرنگ	۹۶-۰۳	۵۰-۰۷-۵۱	۳۲-۲۷-۲۴	Discharge
۲	۴۲-۰۳۵	دره در	تونل دوم کوهرنگ	۹۶-۰۰	۵۰-۰۹-۰۴	۳۲-۲۷-۲۷	Discharge
۳	۴۲-۵۱۴	دره نمکی	جمع تونل ۲و۱	۹۹-۰۳	۵۰-۱۰-۲۶	۳۲-۲۸-۰۰	Discharge
۴	۴۲-۷۱۱	دیمه	چشمه دیمه	۹۶-۰۳	۵۰-۱۲-۵۸	۳۲-۳۰-۰۴	Discharge
۵	۴۲-۰۹۳	سودجان	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۲۱-۰۶	۳۲-۳۲-۱۳	Discharge
۶	۴۲-۱۳۰	قلعه تک	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۰۷-۰۸	۳۲-۲۹-۴۹	Rain
۷	۴۲-۴۰۴	بارده	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۳۱-۲۵	۳۲-۳۴-۱۶	Rain
۸	۴۲-۴۰۱	مرغملک	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۳۰-۱۳	۳۲-۲۸-۳۸	Rain
۹	۴۲-۵۳۱	دره زری	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۱۷-۲۲	۳۲-۲۳-۵۰	Rain
۱۰	۴۲-۹۸۰	میپه	زاینده‌رود	۹۶-۰۳	۵۰-۲۱-۲۴	۳۲-۲۴-۰۴	Rain

جدول ۲. مشخصات زیرحوضه‌های آبخیز سودجان

زیرحوضه	مساحت (km ²)	طولانی‌ترین مسیر جریان (km)	شیب حوضه (درصد)
S_۱	۱۲۲/۴۷	۲۳/۱	۳۲
S_۲	۱۱۷/۲۳	۲۳/۸	۴۰
S_۳	۱۶۷/۳	۲۶/۶	۲۲
S_۴	۱۸۷/۶۶	۳۳/۴	۲۱
S_۵	۱۵۵/۱۸	۲۸/۵	۲۳
S_۶	۲۰/۵۱۱	۷/۵	۲۰
S_۷	۴۲/۸۷	۱۱/۳	۲۱
S_۸	۶/۶۷۷۱	۴/۱	۱۸
S_۹	۵۵/۶۷۹	۱۰/۶	۲۵



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری در حوضه آبخیز سودجان



شکل ۳. موقعیت زیرحوضه‌های آبخیز سودجان

۲-۲-۲. تعاریف نرم‌افزار HEC-HMS

در این پژوهش، برای بررسی ویژگی‌های هیدرولوژیکی و استخراج هیدروگراف جریان تحت تأثیر رخدادهای بارش، از نرم‌افزار HEC-HMS (نسخه ۴/۱۱) استفاده شده است. این نرم‌افزار که توسط مرکز مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته، با هدف شبیه‌سازی رواناب سطحی حوضه‌های آبریز در پاسخ به بارش‌های مشخص طراحی شده است. به خلاف مدل‌های پیشین که ویژگی‌های حوضه را به صورت یکپارچه دریافت می‌کردند، HEC-HMS با رویکردی توزیعی، امکان تعریف مجزا و دقیق ویژگی‌های هر زیرحوضه را فراهم می‌آورد که این امر موجب افزایش دقت در روندیابی می‌شود. ساختار اصلی این مدل بر پایه سه مؤلفه کلیدی شامل مدل بارش، مدل حوضه و شاخص‌های کنترل استوار است که فرایند پیچیده بارش - رواناب را در قالب یک سیستم به هم پیوسته شبیه‌سازی می‌کنند.

۲-۲-۱-۲-۲ مدل حوضه (Basin Model)

مدل رقومی ارتفاعی برای استخراج شبکه آبراهه‌ها و مشخصات زیرحوضه‌ها پردازش شد. این فرایند به تعیین ۹ زیرحوضه (S۱ تا S۹) و ۴ بازه (R۱ تا R۴) منجر شد. مشخصات فیزیکی هر زیرحوضه شامل مساحت، طولانی‌ترین مسیر جریان، شیب و شماره منحنی (CN) محاسبه شد. نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک با تلفیق نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی استخراج و سپس نقشه شماره منحنی (CN) با استفاده از روش استاندارد SCS-CN تهیه شد. مقادیر CN برای زیرحوضه‌ها بین ۴۵/۵ تا ۶۶ متغیر بود. در این پژوهش، مدل HEC-HMS با روش تلفات SCS-CN، هیدروگراف واحد SCS، روندیابی ماسکینگام و جریان پایه خط مستقیم اجرا شد. زمان تمرکز با روش SCS (روابط ۱ و ۲) و زمان تأخیر (Lag=۰.۶Tc) محاسبه شد.

$$t_{lag} = \frac{L^8(S+1)^{-7}}{1900y^{0.5}} \quad (۱)$$

$$t_c = 1.67t_{lag} \quad (۲)$$

tlag: زمان تأخیر (ساعت)، t_c : زمان تمرکز (ساعت)، L: طول رودخانه اصلی (فوت)، y: متوسط شیب حوضه (درصد)، S: نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (اینچ) است.

۲-۲-۲-۲-۲ مدل بارش (Precipitation model)

در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، مؤلفه مدل بارش وظیفه مدیریت داده‌های هواشناسی شامل بارندگی و تبخیر - ترقق را به عهده دارد. در این مدل، بسته به نوع داده‌ها و نیاز پژوهش، می‌توان از روش‌های مختلفی جهت تعیین مقدار، توزیع زمانی و مکانی بارش استفاده کرد، از جمله: روش‌های مبتنی بر ایستگاه (مانند وزن‌دهی ایستگاهی و فاصله معکوس)، روش‌های مبتنی بر هایتوگراف هایتوگراف ویژه و رگبارهای فرضی (SCS)، روش‌های شبکه‌ای و روش‌های آماری - احتمالی مانند رگبار فرکانسی و رگبار استاندارد است.

۲-۲-۲-۳-۲-۲ مشخصه‌های کنترل (Control Specification)

مشخصه‌های کنترل در کنار مدل حوضه و مدل بارش یکی دیگر از مؤلفه‌های لازم برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است. تاریخ و ساعت شروع و اتمام یک واقعه، همچنین دسته‌بندی زمان محاسبات در این بخش معرفی می‌شوند (افضل و همکاران، ۱۳۸۹). درواقع کار اصلی این بخش کنترل سرعت و دقت محاسبات است. زمان شروع کنترل نباید نسبت به زمان شروع بارندگی تأخیر داشته باشد و باید جلوتر یا همزمان شروع بارندگی باشد تا مدل قادر به استفاده از داده‌های بارندگی معرفی شده باشد. زمان خاتمه نیز باید بعد از زمان خاتمه بارندگی باشد تا سیل ناشی از بارندگی را نشان دهد. گام زمانی کنترل نیز بر اساس آمار بارش موجود قابل تنظیم است (عباسی و همکاران، ۱۳۸۸).

۲-۲-۳- کالیبراسیون و اعتبارسنجی

کالیبراسیون مدل با الگوریتم بهینه‌سازی Nelder-Mead (۱۹۶۵) انجام شد. این الگوریتم یک روش جست‌وجوی مستقیم بدون گرادیان است که با حرکت یک سیمپلکس در فضای پارامتر، کمینه تابع هدف (RMSE بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده) را می‌یابد. پارامترهای بهینه‌شده شامل زمان تأخیر و CN در ۹ زیرحوضه و ضرایب ماسکینگام در ۴ بازه (درمجموع، ۲۶ پارامتر) بودند. محدودیت‌های فیزیکی پارامترها بر اساس ادبیات هیدرولوژی و ویژگی‌های حوضه تعیین شد. معیار توقف الگوریتم، همگرایی RMSE با آستانه ۰/۰۰۱ یا دستیابی به ۲۰۰۰ تکرار بود.

کالیبراسیون: مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Nelder-Mead و داده‌های روزانه بارش-رواناب دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ (۶ سال) کالیبره شد. پارامترهای حساس شامل زمان تأخیر (Tlag) در زیرحوضه‌ها و بازه‌ها و همچنین شماره منحنی (CN) بودند که بهینه‌سازی شدند.

اعتبارسنجی: مدل کالیبره‌شده با استفاده از داده‌های دوره ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ (۳ سال) که در فرایند کالیبراسیون استفاده نشده بودند، مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

معیارهای ارزیابی: عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب کارایی کلینگ-گوپتا (KGE)، ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای اریب (PBIAS) ارزیابی شد (معادلات ۳ تا ۵).

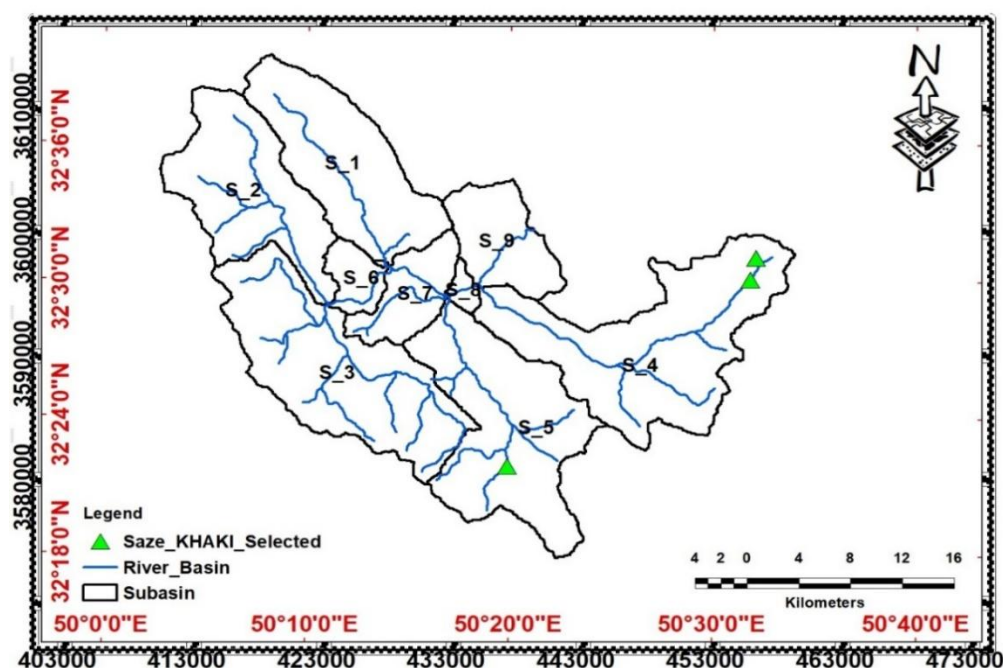
$$KGE = 1 - \sqrt{(\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (1 - \gamma)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{\{obs,i\}} - X_{\{sim,i\}})(100)}{\sum_{i=1}^n (X_{\{obs,i\}})} \quad (5)$$

۲-۲-۴- ارزیابی تأثیر سازه‌های آبخیزداری

برای ارزیابی تأثیر سازه‌های آبخیزداری، سه بند خاکی با بیشترین حجم آبخیز در منطقه انتخاب شدند (شکل ۴). سناریوی با سازه با در نظر گرفتن منحنی‌های سطح - حجم - ارتفاع این بندها در مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد و نتایج آن با سناریوی بدون سازه مقایسه شد. حجم ذخیره کل و کاهش دبی پیک و حجم رواناب سالانه محاسبه شد.

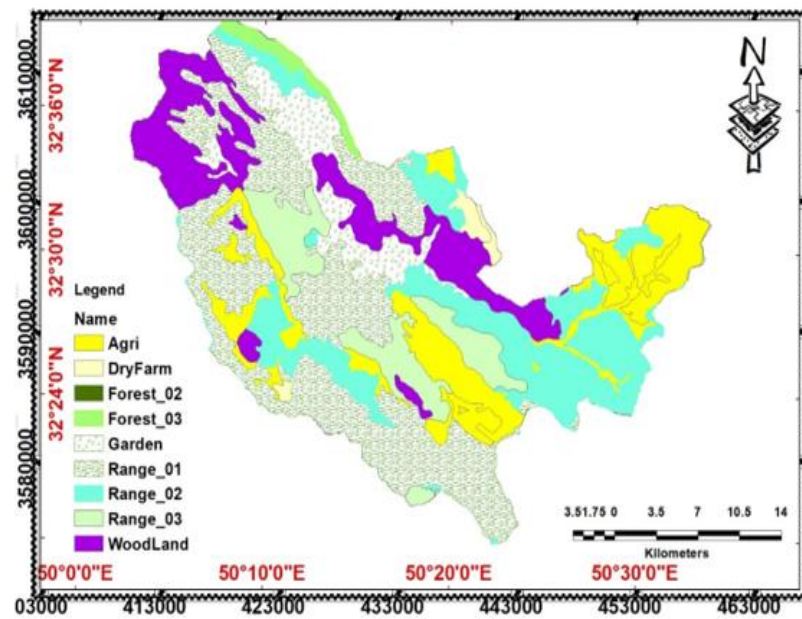


شکل ۴. موقعیت سازه‌های مورد بررسی

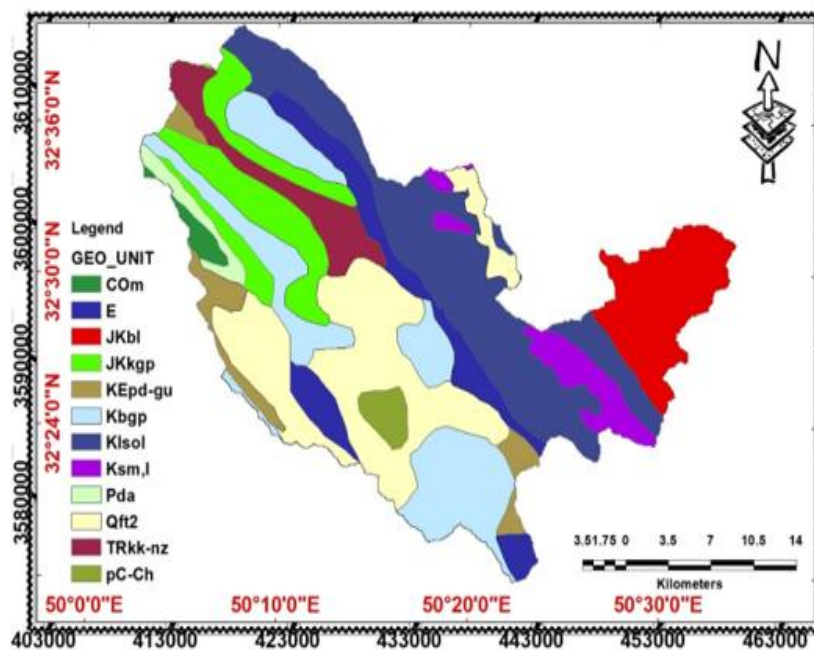
نتایج و بحث

۱. تهیه نقشه CN

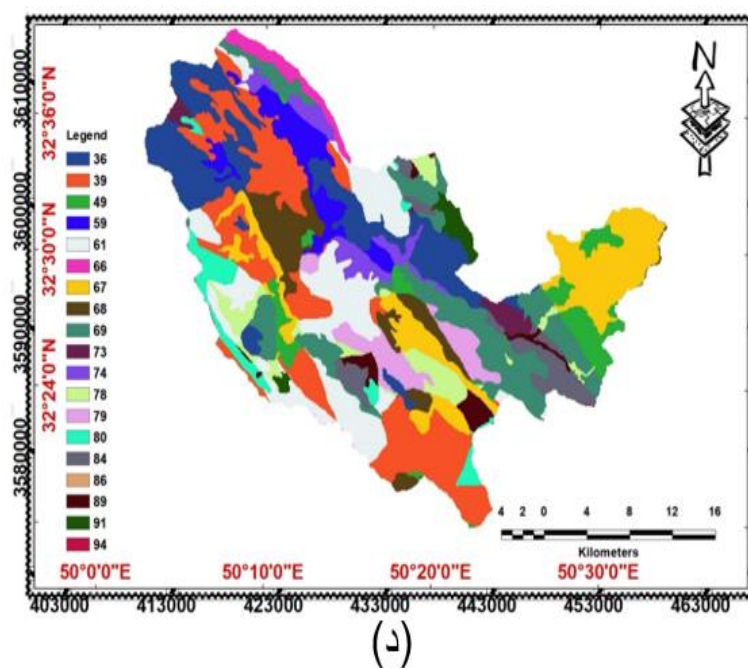
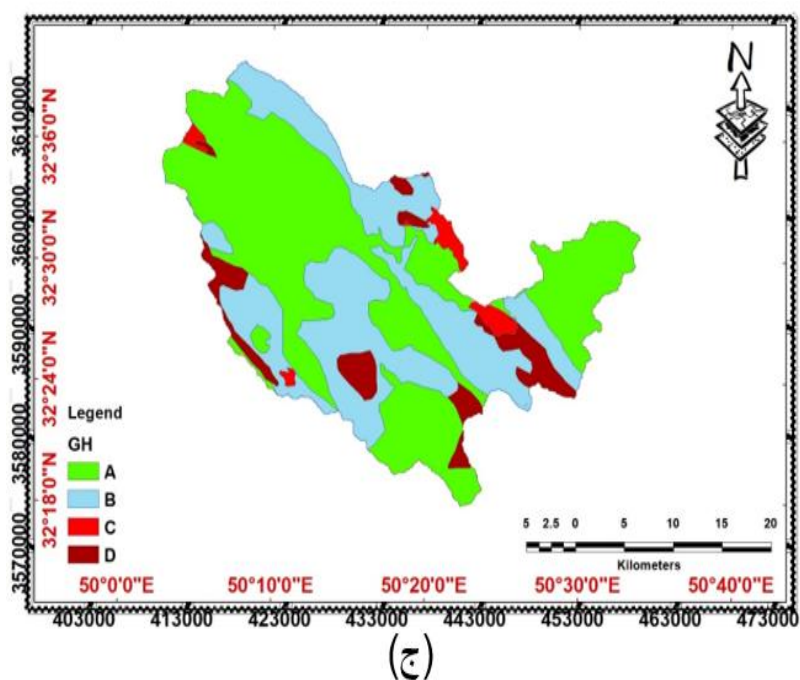
با توجه به اینکه برای تهیه نقشه CN به نقشه کاربری اراضی نیاز است، لذا نقشه یادشده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری تهیه شد (شکل ۵ الف). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، عمده منطقه را مرتع تشکیل می‌دهد و فقط درصد کمی از آن به جنگل اختصاص دارد. با توجه به اینکه جهت تهیه نقشه CN، گروه‌های هیدرولوژیک خاک مورد نیاز است و چنین نقشه‌ای در منطقه مورد مطالعه وجود نداشت لذا به این منظور از نقشه زمین‌شناسی کمک گرفته شد. نقشه یادشده از سازمان زمین‌شناسی تهیه شد (شکل ۵ ب). با تطابق نقشه زمین‌شناسی و کاربری اراضی، بررسی مطالعات پیشین انجام‌شده در حوضه و بازدیدهای میدانی، نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک تهیه شد (شکل ۵ ج). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، عمده منطقه دارای گروه هیدرولوژیک A و B است که از نفوذپذیری متوسط تا بالایی برخوردار است. در این تحقیق با تطابق نقشه گروه هیدرولوژیک و کاربری اراضی، نقشه گروه‌های شماره منحنی تهیه شد (شکل ۵ د). با بارش با زیرحوضه‌ها مقادیر CN زیرحوضه‌ها به دست آمد (جدول ۳).



(الف)



(ب)



شکل ۵. الف) نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز سودجان؛ ب) نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز سودجان؛

ج) نقشه گروه هیدرولوژیک حوضه آبخیز سودجان؛ د) نقشه شماره منحنی حوضه آبخیز سودجان

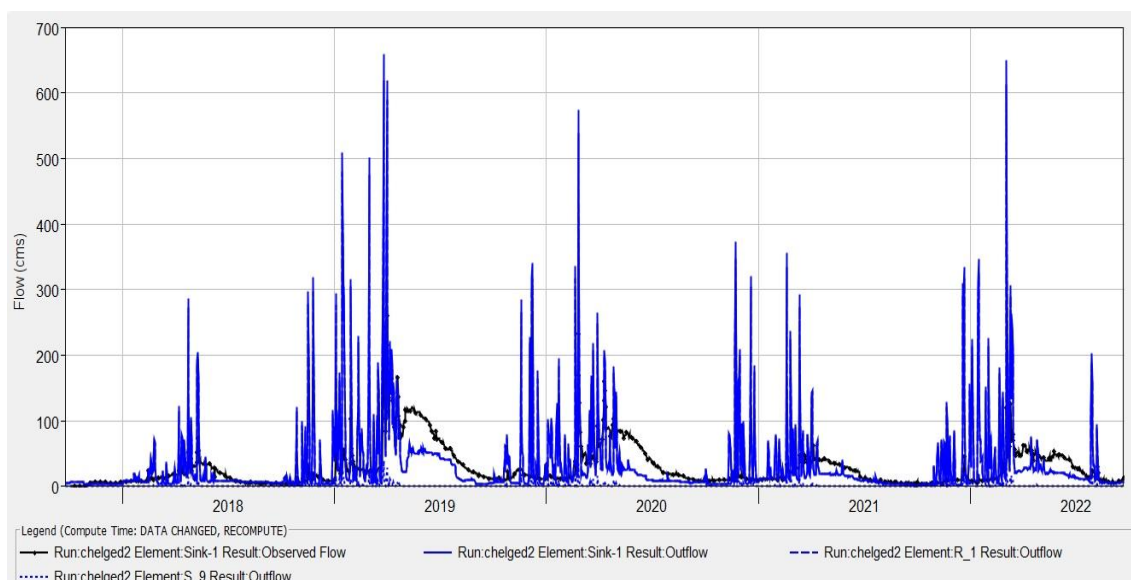
جدول ۳. مقادیر شماره منحنی زیر حوضه‌های مورد مطالعه

حوضه	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
CN	۵۴/۲	۴۵/۵	۶۲/۹	۶۶	۶۰/۷	۶۴/۶	۵۷/۲	۶۱/۱	۶۴/۲

۲. نتایج اجرای مدل HEC-HMS

۲-۱. اجرای مدل قبل از کالیبراسیون

تحلیل تطبیقی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و برآوردی در خروجی حوضه سودجان (شکل ۶ و جدول ۴) نشان‌دهنده عدم انطباق قابل توجه مدل در وضعیت پیش از کالیبراسیون است. یافته‌ها بیانگر بیش‌برآورد سیستماتیک دبی اوج و خطای زمانی (وقوع زودتر از موعد پیک سیلاب) است که می‌تواند ناشی از عدم دقت در پارامترهای زمان تأخیر و زمان تمرکز حوضه باشد. همچنین، شیب تند در شاخه‌های فروکش هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده، بیانگر شبیه‌سازی ناکافی جریان پایه و تعاملات آب سطحی - زیرزمینی است. از سوی دیگر، اگرچه مدل در رویدادهای با شدت متوسط عملکرد نسبتاً بهتری دارد، اما در مواجهه با رویدادهای حدی دچار واگرایی شدید می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد پیکربندی اولیه مدل، فاقد دقت لازم برای بازنمایی فرایندهای تلفات، تبدیل بارش به رواناب و جریان پایه است؛ لذا انجام فرایند کالیبراسیون سیستماتیک برای اصلاح این اریبی‌ها و ارتقای قابلیت اطمینان مدل، ضروری است.



شکل ۶. نتایج حاصل از اجرای مدل HEC-HMS قبل از کالیبراسیون

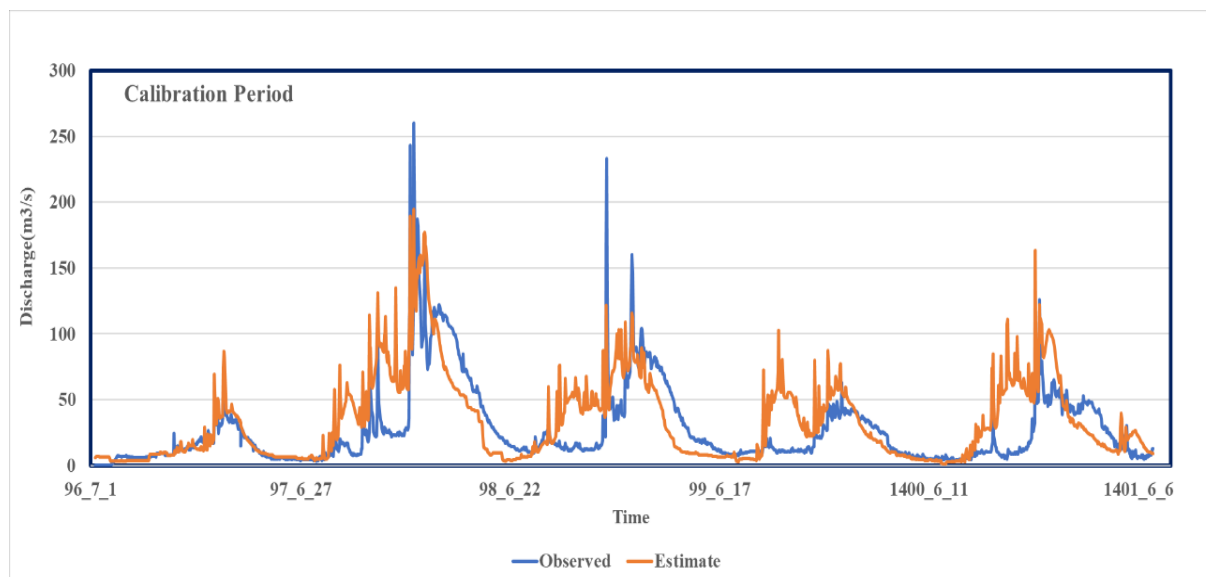
جدول ۴. نتایج مدل قبل از کالیبراسیون در مقیاس روزانه با استفاده از مدل HEC-HMS

R^2	PBIAS	RMSE	KGE	دوره زمانی
۰/۲	۱۸	۵۶/۱	۰/۲۲	قبل از کالیبراسیون (۱۳۹۶ - ۱۴۰۳)

۲-۳. اجرای مدل بعد از کالیبراسیون

شبیه‌سازی پاسخ بارش - رواناب در حوضه کوهستانی سودجان، به دلیل پیچیدگی تعاملات برف و توپوگرافی، چالش‌برانگیز است (Viviroli et al., 2007). در این مطالعه، از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رژیم جریان حوضه استفاده شد. جهت تضمین قابلیت اطمینان مدل، فرایند کالیبراسیون و اعتبارسنجی بر اساس شاخص‌های R^2 ، KGE ، $RMSE$ و $PBIAS$ انجام گرفت تا توانایی مدل در بازنمایی پویایی زمانی جریان ارزیابی شود. همچنین، کالیبراسیون خودکار پارامترهای زمان تأخیر و شماره منحنی در ۹ زیرحوضه، با هدف بیشینه‌سازی ضریب نش - ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) صورت پذیرفت.

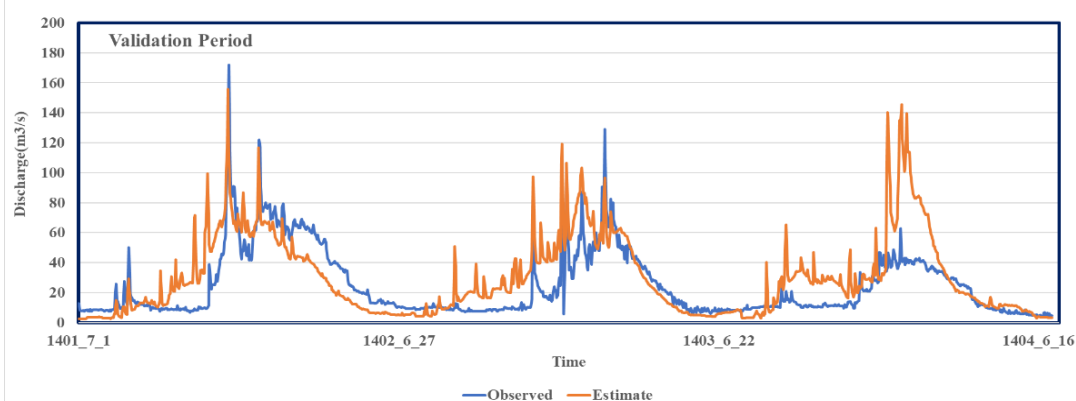
شکل ۷ مقایسه هیدروگراف دبی روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را در دوره کالیبراسیون نشان می‌دهد. مدل توانسته است تغییرات زمانی جریان را در حوضه کوهستانی مورد مطالعه، به‌ویژه در دوره پاییز و زمستان که تحت تأثیر برف قرار دارد، به طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند. شاخص‌های همبستگی نشان می‌دهد هم‌تغییری زمانی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در سطح قابل قبولی باقی مانده است.



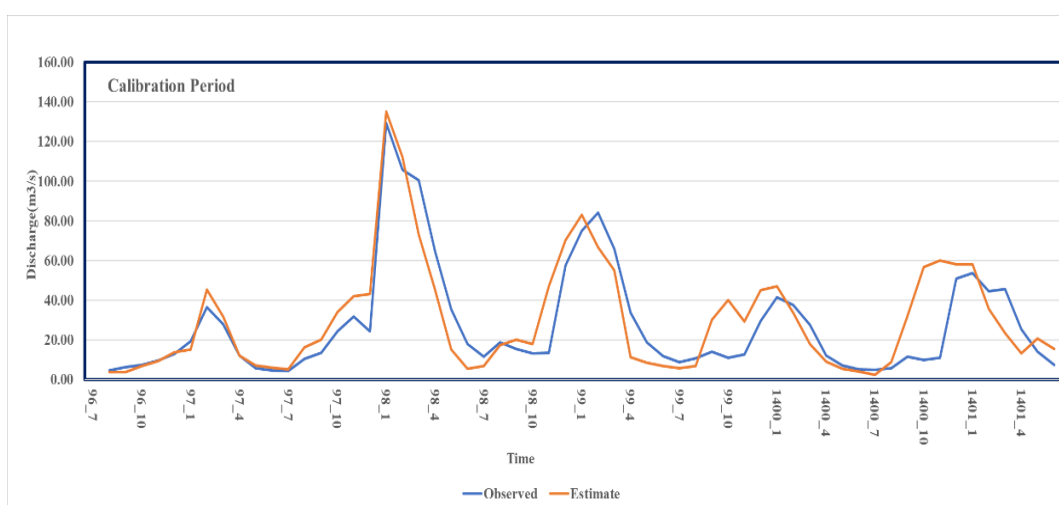
شکل ۷. مقایسه هیدروگراف مقادیر روزانه دبی مشاهداتی و برآوردی مدل HEC-HMS در دوره کالیبراسیون

شکل ۸ نیز هیدروگراف دبی روزانه را در دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۵۴ به دست آمده است که همبستگی خطی متوسط را نشان می‌دهد. ضریب کارایی کلینگ - گوپتا (KGE) برابر با ۰/۶۰ بیانگر مهارت متوسط مدل است و بیان می‌کند که در حالی که مدل همبستگی قابل قبولی با جریان مشاهده شده دارد، بیش‌برآوردی سیستماتیک و ناسازگاری در تغییرپذیری هنوز به عنوان ضعف‌ها باقی مانده‌اند (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۹).

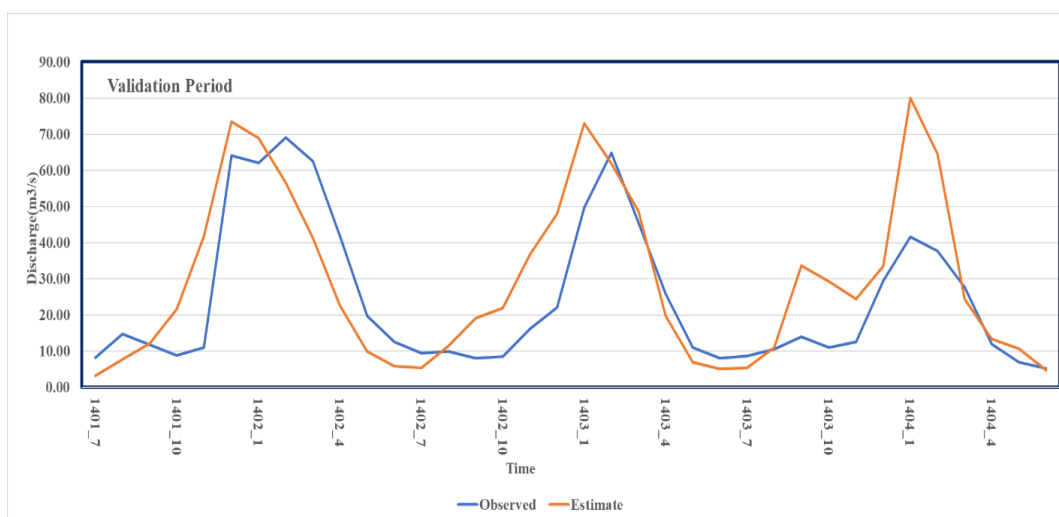
نتایج شبیه‌سازی مدل HEC-HMS در مقیاس روزانه و ماهانه نشان‌دهنده عملکرد قابل قبولی است (شکل‌های ۸ - ۱۰). جدول‌های ۵ و ۶ خلاصه شاخص‌های ارزیابی را در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی روزانه مشاهداتی و برآوردی مدل HEC-HMS در دوره اعتبارسنجی



شکل ۹. مقایسه هیدروگراف مقادیر ماهانه دبی مشاهداتی و برآوردی مدل HEC-HMS در دوره کالیبراسیون



شکل ۱۰. مقایسه هیدروگراف مقادیر دبی ماهانه مشاهداتی و برآوردی مدل HEC-HMS در دوره اعتبارسنجی

جدول ۵. نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در مقیاس روزانه با استفاده از مدل HEC-HMS

دوره زمانی	KGE	RMSE	PBIAS	R ²
کالیبراسیون (۱۳۹۶ - ۱۴۰۰)	۰/۶۴	۲۴/۲	-۲۱/۵	۰/۵۱
اعتبارسنجی (۱۴۰۱ - ۱۴۰۳)	۰/۶۰	۱۹	-۲۲/۲	۰/۵۴

جدول ۶. نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل HEC-HMS

دوره زمانی	KGE	RMSE	PBIAS	R ²
کالیبراسیون (۱۳۹۶ - ۱۴۰۰)	۰/۸۴	۱۴/۷	-۸/۶	۰/۷۴
اعتبارسنجی (۱۴۰۱ - ۱۴۰۳)	۰/۶۸	۱۶/۵	-۲۲/۶	۰/۶۵

همان‌گونه که از جدول‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، مدل در مقیاس ماهانه عملکرد بهتری نسبت به مقیاس روزانه دارد که با اثر هموارسازی ناشی از تجمیع زمانی سازگار است (KGE ماهانه ۰/۸۴ در کالیبراسیون و ۰/۶۸ در اعتبارسنجی). مقدار PBIAS منفی (۲۲- تا ۸/۶-) نشان‌دهنده بیش‌برآوردی سیستماتیک مدل است که عمدتاً ناشی از عدم دسترسی به داده‌های مستقیم پوشش برف و معادل آب برف (SWE) است و همچنین، ثابت فرض کردن مقادیر شماره منحنی نیز بی‌تأثیر نیست.

مهم‌ترین چالش مدل‌سازی در حوضه سودجان، فقدان ماژول صریح ذوب برف در پیکربندی فعلی مدل است. در حوضه‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۹۰۰ متر و بارش غالب برفی، تأخیر زمانی بین بارش و رواناب می‌تواند ۳۰ تا ۹۰ روز باشد. در این پژوهش، این تأخیر به صورت ضمنی در پارامتر زمان تأخیر (Tlag) مستتر شده است. این امر توضیح‌دهنده PBIAS منفی (بیش‌برآوردی) در ماه‌های زمستانی و کم‌برآوردی در اوایل بهار است.

در مقایسه با مطالعاتی که از ماژول Temperature Index یا داده‌های MODIS SWE استفاده کرده‌اند (مانند دیمیری و همکاران، ۲۰۲۳)، دقت شبیه‌سازی روزانه در این پژوهش پایین‌تر است (KGE روزانه ۰/۶۴ در مقابل ۰/۷۵). اما در مقیاس ماهانه، اثر هموارسازی زمانی این خطا را کاهش داده و KGE به ۰/۸۴ ارتقا می‌یابد. این یافته نشان می‌دهد مدل HEC-HMS با روش SCS-CN برای ارزیابی بیلان آبی سالانه و حجمی مناسب است، اما برای پیش‌بینی دقیق زمان‌بندی روزانه پیک در حوضه‌های برف‌محور محدودیت ذاتی دارد.

۳-۲-۱- تحلیل آماری عملکرد مدل

بهبود شاخص KGE از ۰/۲۲ (قبل از کالیبراسیون) به ۰/۶۴ (کالیبراسیون) و ۰/۶۰ (اعتبارسنجی) بر اساس طبقه‌بندی موریاسی و همکاران (۲۰۰۷) بیانگر ارتقای عملکرد از «غیرقابل قبول» به «قابل قبول» است. آزمون t زوجی (df=۱۴۹۵، α=۰/۰۵) کاهش معنادار RMSE پس از کالیبراسیون را تأیید می‌کند (p<۰/۰۰۱).

PBIAS منفی (۲۲-%) عمدتاً ناشی از دو عامل است: (۱) عدم دسترسی به داده‌های مستقیم معادل آب برف (SWE) که به تبدیل فوری بارش برف به رواناب در مدل منجر می‌شود؛ و (۲) ثابت فرض کردن CN به جای استفاده از CN پویا وابسته به رطوبت خاک.

با توجه به اینکه KGE < ۰/۵ در هر دو دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی حاصل شده و کاهش عملکرد در اعتبارسنجی کمتر از ۱۰ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل بیش‌برازش (Overfitting) ندارد و پارامترهای کالیبره‌شده تعمیم‌پذیر هستند.

۳-۳- بررسی تأثیر بندهای خاکی در خروجی حوضه

جدول ۷ مشخصات بندهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به این منظور، داده‌های دبی خروجی روزانه طی یک سال هیدرولوژیکی (از سپتامبر ۲۰۱۷ تا سپتامبر ۲۰۱۸) مورد تحلیل قرار گرفت تا رژیم جریان طبیعی و بدون تنظیم با شرایط تنظیم شده پس از احداث سدها مورد مقایسه قرار گیرد.

جدول ۷. مشخصات بندهای خاکی مورد بررسی در حوضه آبخیز سودجان

ردیف	نام حوضه آبخیز	نام شهرستان	Long	Lat
۱	موسیری	کوه‌رنگ	۴۳۷۱۵۲	۳۵۸۱۰۹۶
۲	مرغملک	شهرکرد	۴۵۵۹۲۹	۳۵۹۶۱۴۷
۳	مرغملک	بن	۴۵۶۳۴۴	۳۵۹۷۸۹۳

نتایج نشان می‌دهد ظرفیت تجمعی سه سد در مجموع ۵۰۹۲۲۰ مترمکعب به کاهش خالص جریان سالانه حوضه به میزان تقریباً 406×10^3 مترمکعب ($0/19$ درصد) منجر شد. حدود $7/79$ درصد این کاهش مربوط به سد شماره ۱ بود که با اثر سد غالب در حوضه‌های دارای چند سد همخوانی دارد (لی و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، در جریان پیک‌های ثانویه سیلاب به‌ویژه دبی $54/1$ مترمکعب بر ثانیه ثبت‌شده در ۲۳ آوریل ۲۰۱۸، کاهش جزئی $0/3$ مترمکعب بر ثانیه پس از ساخت سدها مشاهده شد که نشان می‌دهد این سازه‌ها در کاهش جزئی اوج جریان در رویدادهای با دبی کمتر، بیشتر از رخدادهای بالاتر نقش دارند. الگوی مشابه و مداومی طی شاخه صعودی هیدروگراف در ماه‌های مارس و آوریل مشاهده شد، به گونه‌ای که دبی‌های پس از سد به طور سیستماتیک پایین‌تر از مقادیر قبل از سد و با حاشیه‌ای بین $0/1$ تا $0/6$ مترمکعب بر ثانیه بودند.

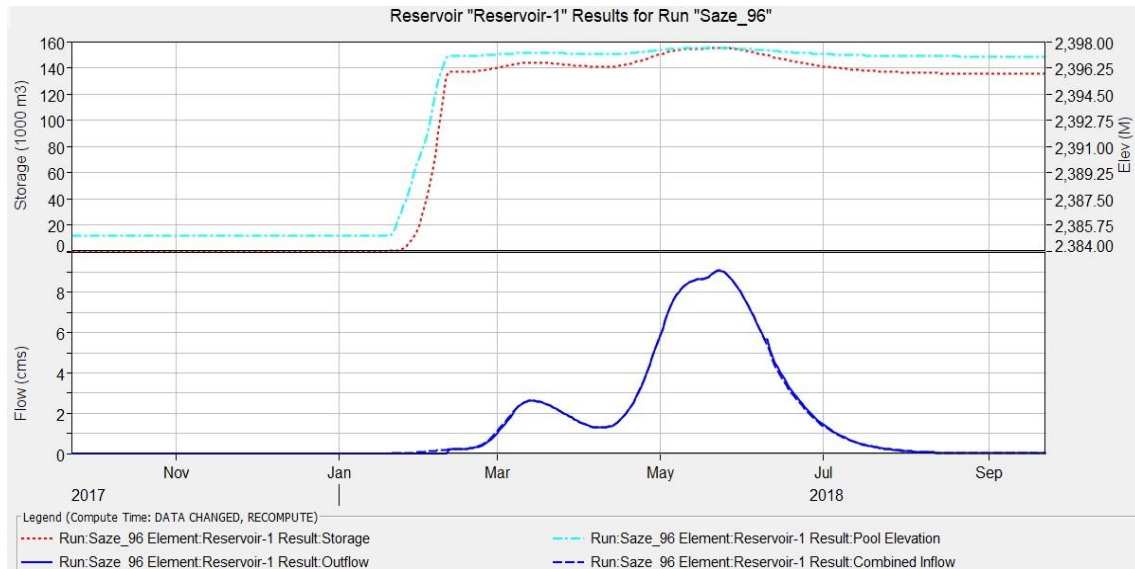
یکی از یافته‌های قابل توجه، افزایش سیستماتیک جریان‌های کم‌دامنه طی دوره افت جریان تابستانی (ژوئن تا اوت) است. برای مثال، در تاریخ ۹ ژوئن ۲۰۱۸، دبی پیش از سد $20/9$ مترمکعب بر ثانیه و پس از سد $21/2$ مترمکعب بر ثانیه بود؛ در ۱۵ ژوئن، مقادیر به ترتیب ۱۴ و $14/6$ مترمکعب بر ثانیه و در ۱ ژوئیه ۵ و $5/2$ مترمکعب بر ثانیه ثبت شد. این الگوی افزایش جریان پایه تابستانی با ویژگی‌های عملیاتی سازه‌های هیدرولیکی مبتنی بر ذخیره، که به طور گسترده در ادبیات مورد بررسی قرار گرفته‌اند، همخوانی دارد (مگلیگان و نیلسون، ۲۰۰۵).

مقایسه کمی نتایج با مطالعات پیشین تفاوت‌های معناداری را آشکار می‌سازد. در حالی که توکلی و همکاران (۱۴۰۲) کاهش $22/8$ درصدی دبی اوج را با سازه‌های آبخیزداری گزارش کردند و سپاسی (۱۴۰۳) کاهش $60-62$ درصدی را در سناریوی تلفیقی نشان داد، در این پژوهش کاهش حجم سالانه جریان تنها $0/19$ درصد و دبی اوج اصلی ($56/8$ مترمکعب بر ثانیه) بدون تغییر باقی ماند. این اختلاف عمدتاً ناشی از نسبت بسیار پایین ظرفیت ذخیره سه بند خاکی (509220 مترمکعب) به حجم جریان سالانه حوضه (حدود ۲۱۰ میلیون مترمکعب) است که تنها $0/24$ درصد ظرفیت نسبی را تشکیل می‌دهد. بنابراین، فرضیه‌های پژوهش مبنی بر تأثیر بندها بر دبی پیک و حجم رواناب رد می‌شود.

۳-۴- بررسی مخازن سدهای خاکی

بررسی رفتار هیدرولوژیکی مخزن شماره ۱ (شکل ۱۱) نشان می‌دهد جریان ورودی ترکیبی به مخزن از یک الگوی دو - قله‌ای مشخص تبعیت می‌کند. نخستین رویداد جریان ورودی نسبتاً ملایم در اواخر فوریه تا اوایل مارس ۲۰۱۸ رخ داده و حداکثر به حدود 2.8 مترمکعب بر ثانیه رسیده است. رویداد اوج بزرگ‌تر در مه ۲۰۱۸ با حداکثر جریان ورودی برابر با $9/1$ مترمکعب بر ثانیه در تاریخ ۲۳ مه ۲۰۱۸ ثبت شده است. حجم کل جریان ورودی طی دوره شبیه‌سازی معادل $279/79$ میلی‌متر و حجم کل جریان

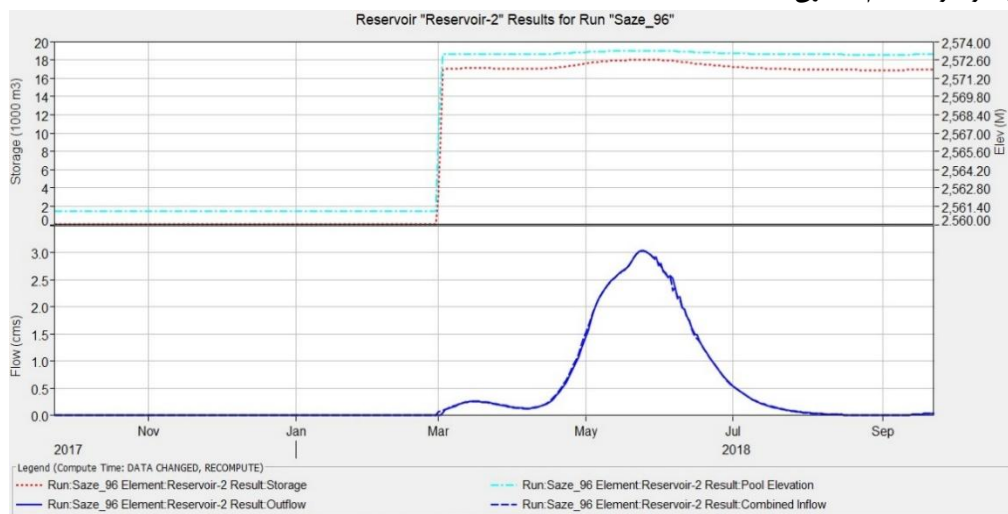
خروجی برابر با ۲۸۰/۱۹ میلی‌متر برآورد شده که نشان‌دهنده تعادل تقریبی بیلان آب مخزن است. روند تغییرات حجم ذخیره مخزن بیانگر یک مرحله پرشدگی چشمگیر از ژانویه ۲۰۱۸ تا اواسط فصل بهار است. بیشینه حجم ذخیره برابر با ۱۵۵۳۰۰ مترمکعب در اواخر مه ۲۰۱۸ به دست آمد که با بیشینه تراز سطح آب مخزن معادل ۲۳۹۷/۶ متر متناظر است.



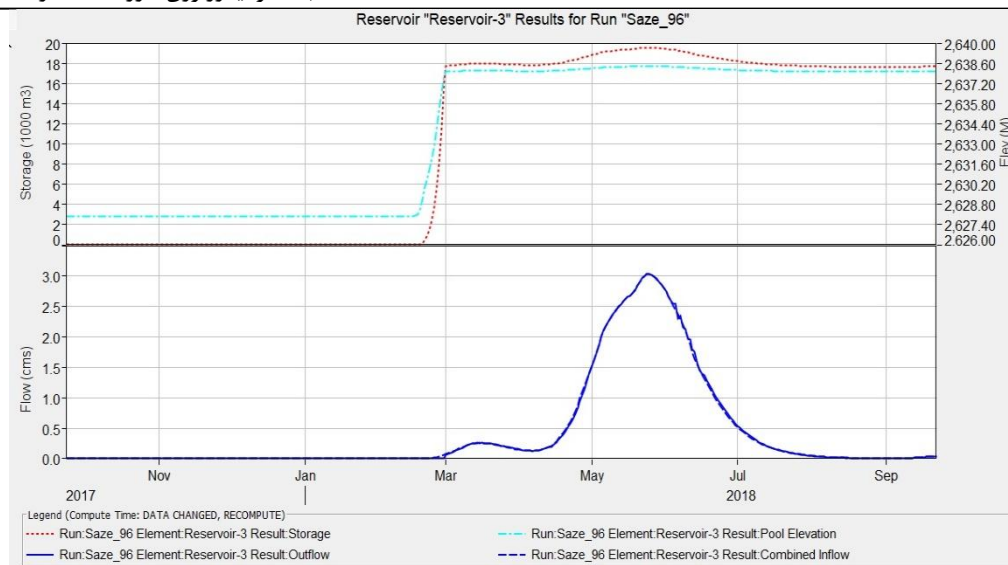
شکل ۱۱. نمودار ارتفاع - ذخیره و دبی جریان در مخزن شماره ۱ در زیرحوضه S3

مخزن شماره ۲ (شکل ۱۲) با حداکثر ذخیره ۱۸ هزار مترمکعب، حدود ۱۱/۶ درصد از ظرفیت مخزن ۱ را دارد. پر شدن تقریباً فوری این مخزن در اوایل اسفند و ادامه بهره‌برداری در ظرفیت کامل در بیشتر طول سال نشان می‌دهد این سازه ظرفیت ذخیره اضافی محدودی دارد.

مخزن شماره ۳ (شکل ۱۳) با ارتفاع حداکثر ۲۶۳۸/۴ متر، بالاترین مخازن آبشارگونه است. شکل تک - قله‌ای هیدروگراف ورودی با قله کاملاً مشخص در اواخر ماه مه، بیانگر غالب بودن سهم ذخایر برفی ارتفاعات بالا است. زمان وقوع قله ورودی در ۲۵ مه ۲۰۱۸ با تاریخ‌های قله مخزن ۱ (۲۳ مه) و مخزن ۲ (۲۴ مه) همخوانی دارد که نشان‌دهنده یک پالس ذوب برف هماهنگ در سراسر سیستم مخازن است.



شکل ۱۲. نمودار ارتفاع - ذخیره و دبی جریان در مخزن شماره ۲ در زیرحوضه S4

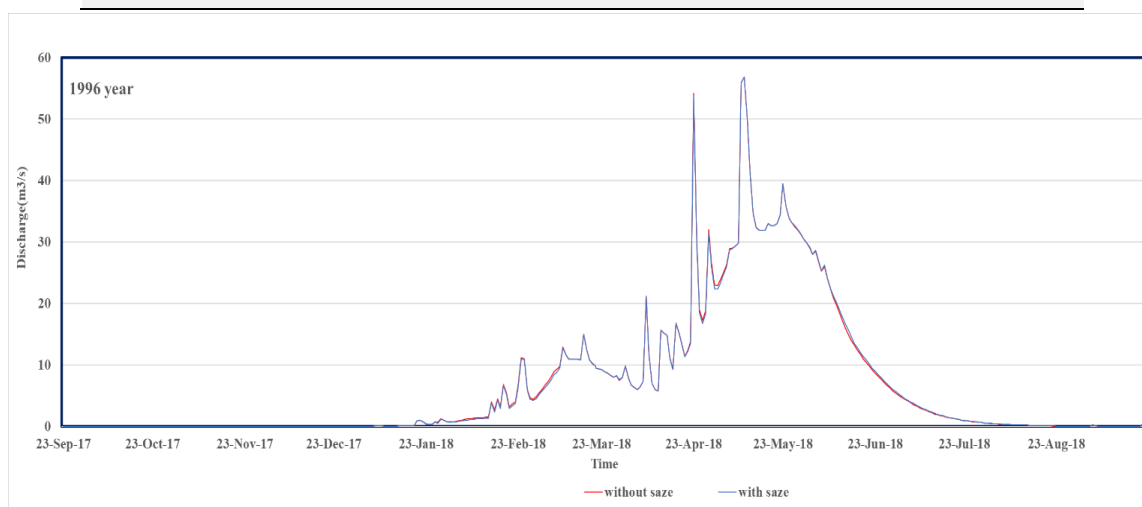


شکل ۱۳. نمودار ارتفاع - ذخیره و دبی جریان در مخزن شماره ۳ در زیرحوضه S4

اثرات سدها قبل و بعد از اجرای مدل در جدول ۸ خلاصه شده است. درخور یادآوری است حجم آبیگیری سدها (سه بار در سال در نظر گرفته شده است و این اعداد مجموع سه بار آبیگیری هستند). داده‌های دبی روزانه جریان خروجی برای تمامی روزهای دوره مطالعه استخراج شد و دو سری زمانی موازی مورد استفاده قرار گرفت: سری نخست نمایانگر جریان طبیعی و بدون تنظیم حوضه (سناریوی پیش از احداث سد) و سری دوم بیانگر جریان تنظیم شده پس از احداث سدها (سناریوی پس از ساخت) است. این مجموعه داده‌ها، مبنای تجربی اصلی تحلیل‌های مقایسه‌ای ارائه شده در این مطالعه را تشکیل می‌دهد.

جدول ۸. اثرات هیدرولوژیک سدها قبل و بعد از اجرای مدل

متغیر	بدون در نظر گرفتن سد	بعد از در نظر گرفتن سد
حجم جریان سالانه	$2102717 \times 10^3 \text{ m}^3$	$2098656 \times 10^3 \text{ m}^3$
کاهش جریان		$406 \times 10^3 \text{ m}^3$ (% ۰/۱۹)
پیک دبی (10 May 2018)	$56/8 \text{ m}^3/\text{s}$	$56/8 \text{ m}^3/\text{s}$
سد شماره ۱		$405/86 \times 10^3 \text{ m}^3$ (% ۷۹/۷)
ذخیره سد شماره ۲ و ۳		$103/36 \times 10^3 \text{ m}^3$ (% ۲۰/۳)



شکل ۱۴. هیدروگراف دبی خروجی بدون و با در نظر گرفتن سد (۲۰۱۷ - ۲۰۱۸)

هیدروگراف جریان خروجی سالانه ارائه شده در شکل ۱۴ یک چرخه فصلی مشخص و منظم را نشان می‌دهد از ویژگی‌های بارز حوضه‌های تحت سلطه برف است. دبی جریان طی ماه‌های پاییز و اوایل زمستان (از اکتبر تا ژانویه) در حد صفر یا نزدیک به صفر باقی مانده که بیانگر دوره‌ای است که بخش عمده بارش‌ها به صورت ذخیره برفی در سطح حوضه انباشته می‌شود. این الگو با چرخه چهارمرحله‌ای هیدرولوژیکی حوضه‌های کوهستانی که توسط وانگ و همکاران (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) معرفی شده است، تطابق دارد؛ چرخه‌ای که شامل دوره تجمع و جریان کم، شاخه افزایشی ذوب برف، مرحله اوج و افت جریان در تابستان و بازگشت پاییزی به شرایط جریان پایه است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد بندهای خاکی موجود در حوضه سودجان عمدتاً به عنوان تنظیم‌کننده جریان پایه تابستانی عمل کرده‌اند تا کنترل‌کننده سیلاب اوج. این عملکرد دوگانه، کاهش پیک و افزایش جریان کم، ویژگی کلاسیک و مطلوب سازه‌های هیدرولیکی مبتنی بر ذخیره‌سازی است که در ادبیات هیدرولوژی به طور گسترده توصیف شده است (مگلیگان و نیلسو، ۲۰۰۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سوفیاروم و همکاران، ۲۰۲۳).

تأثیر حداقل بر بیشینه جریان سالانه نیازمند توجه ویژه در مدیریت ریسک سیلاب است. مایلهوت و همکاران ۲۰۱۸، خاطرنشان کردند که سدهایی با شاخص تنظیم پایین قادر به تغییر آماری ساختار تک‌پیک جریان روزانه پایین‌دست در رویدادهای شدید نیستند؛ وضعیتی که ظاهراً در مورد پیکربندی سدهای حاضر صدق می‌کند. اگر هدف اصلی مدیریت، حفاظت در برابر سیلاب باشد، پیکربندی فعلی ذخیره‌سازی برای کاهش قابل توجه جریان در شدیدترین رویدادهای ذوب برف ناکافی خواهد بود.

با توجه به ممنوعه بودن بیش از ۹۵ درصد دشت‌های استان چهارمحال و بختیاری و تشدید خشکسالی‌های اخیر، افزایش جزئی جریان پایه تابستانی (۱/۰ تا ۶/۰ مترمکعب بر ثانیه) می‌تواند تأثیر مثبتی بر تأمین آب کشاورزی پایین‌دست داشته باشد، بدون آنکه کاهش محسوسی در حجم انتقال به حوضه‌های پایین‌دست ایجاد کند. این یافته دقیقاً به ضرورت بررسی فنی - هیدرولیکی پیش از احداث سازه‌ها اشاره دارد که در مقدمه پژوهش بر آن تأکید شده بود.

این پژوهش در مقایسه با پژوهش‌های پیشین (مانند توکلی و همکاران، ۱۴۰۲، سپاسی، ۱۴۰۳ و آذری، ۱۴۰۳) که کاهش ۶۰ تا ۷۰ درصدی دبی اوج را گزارش کرده‌اند، اختلاف معناداری را نشان می‌دهد. علت اصلی این تفاوت، نسبت بسیار پایین ظرفیت ذخیره‌سازی بندها به حجم جریان سالانه حوضه (تنها ۲۴/۰ درصد) است که باعث می‌شود این سازه‌ها بیشتر به عنوان تنظیم‌کننده جریان پایه تابستانی عمل کنند تا کنترل‌کننده سیلاب. این مشاهده با یافته‌های مگلیگان و نیلسو (۲۰۰۵) و وانگ و همکاران (۲۰۱۹) در حوضه‌های برف محور کاملاً سازگار است و نشان می‌دهد در طراحی‌های آبی، برای کنترل مؤثر سیلاب‌های ناشی از ذوب برف، افزایش ظرفیت مخازن یا استفاده از راهکارهای تکمیلی ضروری است.

۴-۴ - مقایسه با مطالعات پیشین

نتایج این پژوهش با یافته‌های مگلیگان و نیلسو (۲۰۰۵) و وانگ و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه سدهای کوچک با شاخص تنظیم (Storage/Runoff ratio) کمتر از ۱ درصد قادر به تغییر ساختار آماری پیک جریان نیستند، همخوانی کامل دارد. از منظر مدیریت منابع آب، این یافته به وضوح نشان می‌دهد احداث بندهای خاکی کوچک جایگزین استراتژی‌های جامع مدیریت سیلاب نیست، بلکه فقط ابزاری برای تنظیم جریان پایه و تأمین آب کشاورزی تابستانه است.

نتیجه گیری

این پژوهش، اثرات هیدرولوژیکی سه سازه سد را بر رژیم جریان یک حوضه کوهستانی برف محور را ارزیابی کرد. یافته‌ها نشان داد مدل HEC-HMS با کارایی بالا (KGE بین ۰/۶۴ تا ۰/۸۴) قادر به شبیه‌سازی پاسخ حوضه است. نتایج کلیدی نشان می‌دهد سدها به کاهش ۱۹ درصدی حجم سالانه جریان منجر شده‌اند، اما به خلاف فرضیات اولیه، تأثیر معناداری بر دبی اوج سیلاب (۵۶/۸ مترمکعب بر ثانیه) نداشته‌اند. این تفاوت با مطالعات پیشین، عمدتاً ناشی از نسبت پایین ظرفیت ذخیره‌سازی سدها (۲۴ درصد) نسبت به حجم جریان سالانه حوضه است؛ پدیده‌ای که نشان می‌دهد در حوضه‌های برف‌محور، این سازه‌ها بیشتر به عنوان تنظیم‌کننده جریان پایه تابستانی عمل می‌کنند تا کنترل‌کننده سیلاب اوج.

از منظر مدیریت منابع آب، این سازه‌ها با ایجاد اثر فصلی نامتقارن، توانسته‌اند جریان‌های کم‌دامنه را در فصل‌های خشک بهبود بخشند که برای تأمین نیازهای کشاورزی و اکوسیستمی بسیار حیاتی است. با این حال، عدم توانایی در کنترل پیک‌های سیلاب ناشی از ذوب برف، ضرورت بازنگری در طراحی‌های آبی (افزایش ظرفیت یا استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی لحظه‌ای) را گوشزد می‌کند. در نهایت، با توجه به بحران آب در حوضه زاینده‌رود، این یافته‌ها بر اهمیت تحلیل‌های دقیق هیدرولوژیکی پیش از احداث سازه‌ها جهت توازن میان تأمین آب فصول خشک و مدیریت ریسک سیلاب تأکید دارند.

محدودیت‌های این پژوهش

یکی از محدودیت‌های ذاتی این پژوهش، استفاده از روش تلفات $SCS-CN$ در شبیه‌سازی پیوسته بلندمدت است. اگرچه این روش در برآورد حجم کل رواناب سالانه در حوضه‌های فاقد داده‌های دقیق رطوبت خاک کاربرد گسترده‌ای دارد، اما فاقد مکانیزم‌های پیچیده ردیابی رطوبت خاک در مدل SMA است. لذا نتایج حاصل، بیشتر ناظر بر برآورد حجمی و روند کلی بوده و برای تحلیل‌های دقیق روزانه، استفاده از مدل SMA در پژوهش‌های آبی با دسترسی به داده‌های رطوبت خاک توصیه می‌شود.

عدم بهره‌گیری از مازول‌های تخصصی ذوب برف (مانند روش شاخص دما) به دلیل فقدان داده‌های هواشناسی کافی معادل آب برف (SWE) در ارتفاعات، از محدودیت‌های اصلی این مطالعه است. در این پژوهش، تأخیر زمانی ناشی از انباشت برف به صورت ضمنی در پارامترهای کالیبره‌شده (مانند زمان تأخیر) مستتر شده است که دقت شبیه‌سازی در ماه‌های گذار فصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

پژوهش حاضر با حمایت مالی و معنوی دانشگاه شهرکرد و شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو؛ تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها
نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی پایان‌نامه

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از دانشگاه شهرکرد و شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری به دلیل حمایت مالی و معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

از سازمان هواشناسی و سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان چهارمحال و بختیاری برای در اختیار قرار دادن برخی داده‌های مورد نیاز این پژوهش سپاسگزاری می‌شود. در انتها از داوران محترم این پژوهش به دلیل ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

- 1 Omidvar, K., & Azhdarpour, M. (2012). Comparison of artificial neural network and HEC-HMS model in rainfall-runoff estimation in the Azam Herat River watershed. *Geographical Research*, 27(107), 140–160. (in Persian)
- 2 Peykari, S. (2024). Simulation of the rainfall-runoff process using the HEC-HMS model and application of Geographic Information System (Case study: Noreh watershed, Kurdistan Province). (Master's thesis), University of Kurdistan. (in Persian)
- 3 Tavakoli, M., Kohzadi, M., & Ebrahimi, H. (2023). Evaluation and prediction of the effects of watershed management structure construction on peak discharges (Case study: Gol-Gol watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 3(2), 67–79. (in Persian)
- 4 Hamedsepasi, B. (2024). Investigation of the impact of watershed management projects on flood hydrograph characteristics (Case study: upstream Kalat watershed). (Master's thesis), Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian)
- 5 Soleimani, F. (2025). Evaluation of the effects of watershed management measures on water resources and vegetation cover (Case study: Gerdo watershed). (Master's thesis), Arak University. (in Persian)
- 6 Moradnejadi, M., Joorgholami, M., & Malekian, A. (2015). Assessment of the efficiency of the HEC-HMS hydrological model in simulating flood hydrographs of forested watersheds (Case study: Kheyroud Forest). *Journal of Forest and Wood Products*, 68(3), 625–639. (in Persian)
- 7 De Silva, M. M. G. T., Weerakoon, S. B., & Herath, S. (2014). Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEC-HMS: Case study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 800–806. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000846](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000846)
- 8 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. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91.
- 9 Hamedsepasi, B. (2024). Investigation of the effect of watershed management projects on flood hydrograph characteristics (Case study: Kalat upstream watershed) [Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad]. (in Persian)
- 10 Lu, Z., et al. (2022). Dam-induced hydrological alterations in multi-reservoir systems. *Journal of Hydrology*, 610, 127896.
- 11 Magilligan, F. J., & Nislow, K. H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1-2), 61-78.
- 12 Moradnejadi, M., Jorgholami, M., & Malekian, A. (2015). Efficiency of HEC-HMS hydrologic model in flood hydrograph simulation of forested watersheds (Case study: Kheyroud Forest). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 68(3), 625–639. (in Persian)
- 13 Omidvar, K., & Ajdarpour, M. (2012). Comparison of artificial neural network and HEC-HMS model in rainfall-runoff estimation in the Azam Herat River basin. *Geographical Research*, 27(107), 140–160. (in Persian)
- 14 Olabule, A., & Li, X. (2010). Rainfall-runoff modeling in a semi-arid catchment using HEC-HMS. *Journal of Hydrology*

- 15 Peykari, S. (2024). Simulation of the rainfall-runoff process using the HEC-HMS model and geographical information system application (Case study: Noorreh Basin, Kurdistan Province) [Master's thesis, University of Kurdistan]. (in Persian)
- 16 Ranjan, S., & Singh, A. (2022). Hydrological modeling of rainfall-runoff processes using HEC-HMS in mountainous catchments. *Journal of Water Resources Management*, 14(3), 145–162. <https://doi.org/10.xxxx/j.jwarm.2022.xxxx>
- 17 Tavakoli, M., Kohzadi, M., & Ebrahimi, H. (2023). Evaluation and prediction of the effects of watershed management structures on peak discharge (Case study: Gol-Gol watershed, Ilam). *Journal of Comprehensive Watershed Management*, 3(2), 67–79. (in Persian)
- 18 Soleimani, F. (2025). Evaluation of the effects of watershed management measures on water resources status and vegetation (Case study: Gerdou watershed) [Master's thesis, Arak University]. (in Persian)
- 19 Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., et al. (2011). Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471–504.
- 20 Wang, H., et al. (2019). Snowmelt-dominated hydrological regimes and dam operations. *Water Resources Research*, 55(8), 6845-6863.