Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 16, Issue 2, 2025 p: 1-18

OPEN ACCESS

Research Paper

Sensitivity Analysis of Parameters Influencing Runoff Reduction Using the HEC-HMS Model in Gonbad Paired Watersheds, Hamadan

Saeedreza Moazeni Noghondar[1], Ali Salajegheh[2], Shahram Khalighi Sigaroudi[3], and Ali Golkarian[4]

1- Ph.D. student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, (Corresponding author: salajegh@ut.ac.ir)
3- Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Received:01 February 2025 Revised:01 April 2025 Accepted: 10 May 2025

Extended Abstract

Background: Water resource management in semi-arid regions faces major challenges due to environmental conditions, such as flash floods and intense surface runoff. These areas are prone to destructive flooding because of high-intensity convective rainfall, uneven precipitation distribution, high evapotranspiration, sparse vegetation, and fragile soils. Accurate modeling of hydrological processes—particularly peak discharge and runoff volume—is essential for designing effective management measures, such as flood control, runoff regulation, and vegetation restoration. Hydrological models, especially HEC-HMS, are widely used for simulating rainfall–runoff processes due to their ability to integrate climatic, hydrometric, and watershed characteristics. Parameter sensitivity analysis further helps identify influential factors, reduce uncertainty, and improve prediction accuracy. In Iran's semi-arid regions, flash floods frequently cause severe damage. This study examines how vegetation restoration influences the sensitivity of HEC-HMS parameters in two adjacent sub-watersheds of the Gonbad paired watershed in Hamadan Province—one control (without restoration) and one treated (with restoration). The main goal is to analyze how restoration affects parameters controlling peak discharge and runoff volume. The study involves simulating rainfall–runoff processes, calibrating and validating the model with observed data, and performing sensitivity analysis on key parameters, such as curve number (CN), maximum retention (S), lag time, channel slope, and Manning's roughness coefficient. By comparing results between the two basins, the research evaluates how vegetation restoration alters model performance and parameter responsiveness, providing insights for improved water resource management and flood mitigation in semi-arid environments.

Method: This study was conducted in the paired watershed of Gonbad, located in Hamadan Province. Two adjacent sub-watersheds with similar physiographic and climatic characteristics were selected, one as a control watershed (without any restoration interventions) and the other as a restored watershed (subjected to vegetation restoration activities). The restoration operations in the restored watershed included planting drought-resistant plant species and implementing watershed management practices. The HEC-HMS hydrological model was employed to simulate the rainfall–runoff process. The data required for model simulation included meteorological data (precipitation, temperature, etc.), hydrometric data (streamflow), soil characteristics, and watershed physical attributes. Ten years of observed rainfall and runoff data were used for model calibration and validation, and various statistical indicators, including the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient and the Root Mean Square Error (RMSE), were applied to evaluate model performance. Sensitivity analysis of the model parameters was carried out using a percentage variation method (±30%) for key parameters, such as the Curve Number (CN), maximum retention (S), lag time, channel slope, and Manning's roughness coefficient.

Results: The vegetation restoration significantly affected soil properties, runoff simulation accuracy, and parameter sensitivity in the studied watersheds.

Copyright ©2025. Moazeni Noghondar et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

Changes in soil properties: Measurements indicated that both initial and final soil infiltration rates were significantly higher in the restored watershed than in the control watershed. Specifically, initial infiltration rates increased from a range of 3.82 to 4.76 mm/h in the control watershed to a range of 130.2 to 144.4 mm/h in the restored watershed. Similarly, final infiltration rates rose from 4.2 to 6.8 mm/h in the control watershed to 10.8 to 15.4 mm/h in the restored watershed. Furthermore, the restored watershed showed approximately 20% higher silt content, an average of 20% lower bulk density, and about 35% higher soil porosity than the control watershed. Soil saturation moisture and field capacity also increased in the restored watershed by approximately 30% and over 10%, respectively. These changes indicate an overall improvement in soil quality as a result of the restoration activities.

Model simulation results: The HEC-HMS model demonstrated acceptable performance in simulating watershed outflows, with NSE values exceeding 0.6 and RMSE values below 0.5. The match between observed and simulated hydrographs was stronger in the restored watershed, particularly at the peak discharge segment. Simulation accuracy in the restored watershed was higher than in the control watershed, consistent with findings from previous studies. Deviations in the hydrograph, especially during peak and recession phases, were more pronounced in the control watershed, likely due to insufficient vegetation cover and increased surface runoff.

Sensitivity analysis results: The sensitivity analysis showed that the maximum retention (S) and Curve Number (CN) parameters had the greatest influence on peak discharge. Specifically, a 30% increase in CN led to an approximate 25% increase in peak discharge in the control watershed, while this increase was about 15% in the restored watershed. Likewise, a 30% increase in maximum retention resulted in a reduction of runoff volume by nearly 35% in the control watershed, whereas the reduction was limited to around 20% in the restored watershed. These findings suggest that the model's sensitivity to these parameters was lower in the restored watershed, which could be attributed to improved soil infiltration, greater water storage capacity, and enhanced hydrological resilience. Other parameters, such as channel slope, lag time, and Manning's roughness coefficient, also affected peak discharge; however, their impact diminished at higher levels of variation. For example, a 30% increase in Manning's coefficient in the control watershed resulted in only about a 5% reduction in peak discharge.

Conclusion: The results of this study indicate that vegetation restoration can have a substantial impact on improving soil properties, enhancing runoff simulation accuracy, and reducing the sensitivity of hydrological models to parameter variations. Improved soil infiltration capacity and water storage potential in the restored watershed played a key role in reducing surface runoff and increasing the reliability of hydrological predictions. These findings highlight the importance of vegetation restoration as a practical and effective strategy for watershed management. They can be applied to the design and implementation of water resources management and watershed rehabilitation programs in similar semi-arid regions.

Keywords: Curve Number (CN), Hydrological modeling, Peak discharge, Runoff volume, Watershed restoration

How to Cite This Article: Moazeni Noghondar, S., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, Sh., & Golkarian, A. (2025). Sensitivity Analysis of Parameters Influencing Runoff Reduction Using the HEC-HMS Model in Gonbad Paired Watersheds, Hamadan. *J Watershed Manage Res,* 16(2), 1-18. DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

مقاله پژوهشی

تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه زوجی گنبد همدان

سعیدرضا مؤذنی نقندر[۱]، علی سلاجقه[۲]، شهرام خلیقی سیگارودی[۳] و علی گلکاریان[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، (نویسنده مسوول: salajegh@ut.ac.ir)
۳- استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳ تاریخ ویرایش:۱۴۰۴/۰۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰
صفحه: ۱ تا ۱۸

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک با چالش‌های متعددی به‌دلیل شرایط محیطی خاص، از جمله وقوع سیلاب‌های ناگهانی و رواناب‌های سطحی، روبه‌رو است. این مناطق به‌دلیل ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی مانند بارش‌های رگباری شدید، توزیع نامنظم زمانی و مکانی بارش، تبخیر و تعرق بالا، پوشش گیاهی کم‌تراکم و خاک‌های شکننده، مستعد تولید رواناب و وقوع سیلاب‌های مخرب هستند. مدل‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه پیش‌بینی دبی اوج و حجم رواناب برای طراحی و اجرای اقدامات مدیریتی مؤثر مانند کنترل سیلاب، تنظیم رواناب و احیای پوشش گیاهی اهمیت زیادی دارد. مدل‌های هیدرولوژیکی ابزارهایی مؤثر برای شبیه‌سازی این فرآیندها هستند و در میان آن‌ها، مدل HEC-HMS به‌دلیل توانایی ترکیب داده‌های اقلیمی، هیدرومتری و ویژگی‌های حوزه آبخیز برای شبیه‌سازی دقیق فرآیند بارش–رواناب کاربرد گسترده‌ای دارد. تحلیل حساسیت پارامترها نیز روشی کارآمد برای بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر خروجی مدل و شناسایی عوامل مؤثر است که به کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها کمک می‌کند. در مناطق نیمه‌خشک ایران، سیلاب‌های ناگهانی خسارات قابل‌توجهی را به زیرساخت‌ها و منابع طبیعی وارد کرده‌اند. این پژوهش به بررسی تأثیر احیای پوشش گیاهی بر حساسیت پارامترهای مدل HEC-HMS در دو حوزه آبخیز مجاور در حوضه زوجی گنبد همدان می‌پردازد؛ یکی به‌عنوان حوضه شاهد (فاقد عملیات احیا) و دیگری به‌عنوان حوضه تیمار شده (دارای عملیات احیای پوشش گیاهی). هدف اصلی پژوهش، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی اوج و حجم رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS است. در این مطالعه، فرآیند بارش–رواناب در هر دو حوضه شبیه‌سازی، مدل با داده‌های مشاهداتی واسنجی و اعتبارسنجی شد و تحلیل حساسیت بر پارامترهای کلیدی از جمله شماره منحنی (CN)، حداکثر نگهداشت (S)، زمان تأخیر، شیب آبراهه و ضریب زبری مانینگ انجام گرفت. نتایج دو حوضه برای ارزیابی اثر احیای پوشش گیاهی بر عملکرد مدل و حساسیت پارامترها مقایسه شدند. در نهایت، این پژوهش نتایجی کاربردی برای بهبود مدیریت منابع آب و کاهش اثرات سیلاب در مناطق نیمه‌خشک ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها: این تحقیق در حوضه زوجی گنبد همدان انجام شده است. دو حوزه آبخیز همجوار با ویژگی‌های مشابه، یکی به‌عنوان حوضه شاهد و دیگری به‌عنوان حوضه احیاشده انتخاب شدند. عملیات احیای پوشش گیاهی در حوضه احیاشده شامل کاشت گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی و اجرای عملیات آبخیزداری بود. برای شبیه‌سازی فرآیند بارش–رواناب، از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. داده‌های مورد نیاز برای مدل شامل داده‌های هواشناسی، هیدرومتری، ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های حوزه آبخیز بودند. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های ۱۰ ساله بارش و دبی استفاده شد و از معیارهای آماری مختلف از جمله ضریب نش–ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. برای تحلیل حساسیت پارامترها، از روش تغییرات درصدی (±۳۰ درصد) برای پارامترهایی مانند شماره منحنی (CN)، حداکثر نگهداشت (S)، زمان تأخیر، شیب آبراهه و ضریب زبری مانینگ استفاده شد.

یافته‌ها: عملیات احیای پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک، شبیه‌سازی رواناب و حساسیت پارامترها داشتند. تغییرات ویژگی‌های خاک: اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که نفوذپذیری اولیه و نهایی خاک در حوضه احیاشده در مقایسه با مقادیر متناظر در حوضه شاهد به‌طور قابل توجهی افزایش یافت؛ به‌طوری‌که نفوذپذیری اولیه از بازه ۸۲/۳ تا ۷۶/۴ میلی‌متر بر ساعت در حوضه شاهد، به بازه ۱۳۰/۲ تا ۱۴۴/۴ میلی‌متر بر ساعت در حوضه احیاشده افزایش یافت. همچنین، نفوذپذیری نهایی از ۴/۲ تا ۶/۸ در حوضه شاهد، به ۱۰/۸ تا ۱۵/۴ میلی‌متر بر ساعت در حوضه احیاشده رسید. علاوه بر این، در مقایسه با حوضه شاهد، درصد سیلت حدود ۲۰ درصد بیشتر، چگالی ظاهری به‌طور میانگین ۲۰ درصد کمتر و تخلخل خاک حدود ۳۵ درصد بیشتر اندازه‌گیری شد. رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی خاک نیز در حوضه احیاشده افزایش نشان دادند (رطوبت اشباع حدود ۳۰ درصد و ظرفیت زراعی بیش از ۱۰ درصد). این تغییرات نشان‌دهنده بهبود کیفیت خاک در اثر عملیات احیا هستند. نتایج شبیه‌سازی مدل: مدل HEC-HMS توانست جریان خروجی حوضه‌ها را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند (NSE>0.6 و RMSE<0.5). تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در حوضه احیاشده، به‌ویژه در بخش اوج جریان، بیشتر بود. دقت شبیه‌سازی در حوضه احیاشده نسبت به حوضه شاهد بیشتر بود که با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد. انحرافات هیدروگراف در حوضه شاهد، به‌ویژه در بخش اوج جریان و نزولی، بیشتر بودند که می‌تواند ناشی از کمبود پوشش گیاهی و افزایش جریان سطحی باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که پارامترهای حداکثر نگهداشت و شماره منحنی (CN) بیشترین تأثیر را بر دبی اوج داشتند. به‌طور مشخص، افزایش ۳۰ درصدی CN در حوضه شاهد منجر به افزایش دبی اوج به‌میزان حدود ۲۵ درصد شد، در حالی‌که در حوضه احیاشده این افزایش حدود ۱۵ درصد بود. همچنین، افزایش ۳۰ درصدی حداکثر نگهداشت در حوضه شاهد باعث کاهش حجم رواناب تا حدود ۳۵ درصد گردید، در حالی‌که در حوضه احیاشده این کاهش به حدود ۲۰ درصد محدود بود. این نتایج نشان می‌دهند که حساسیت مدل به این پارامترها در حوضه احیاشده کمتر است که می‌تواند ناشی از بهبود نفوذپذیری خاک، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و ارتقای تاب‌آوری هیدرولوژیکی باشد. سایر پارامترها نظیر شیب آبراهه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ نیز بر دبی اوج مؤثر بودند، اما اثر آن‌ها به‌ویژه در درصدهای بالای تغییر، کاهش می‌یافت؛ به‌عنوان مثال، افزایش ۳۰ درصدی ضریب مانینگ در حوضه شاهد تنها باعث کاهش حدود ۵ درصدی دبی اوج شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که عملیات احیای پوشش گیاهی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های خاک، افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب و کاهش حساسیت مدل‌های هیدرولوژیکی به تغییرات پارامترها داشته باشد. بهبود نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره‌سازی آب در حوضه احیاشده نقش مهمی در کاهش رواناب و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها ایفا می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و اجرای برنامه‌های مدیریت منابع آب و احیای حوزه‌های آبخیز در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: احیای حوزه آبخیز، حجم رواناب، دبی اوج، شماره منحنی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

مقدمه

سیلاب یکی از پدیده‌های هیدرولوژیکی پرخطر به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود، جایی‌که شدت و تمرکز بارش در زمان کوتاه، به‌همراه کاهش نفوذپذیری خاک و فقر پوشش گیاهی، منجر به تشدید رواناب سطحی و افزایش احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی می‌شود (Hejazi & Markus, 2009; Kachhawa & Agnihotri, 2024; Soleimani Sardo, 2014). تغییر کاربری اراضی نیز به‌عنوان یکی از عوامل تشدیدکننده سیلاب نقش مهمی در افزایش رواناب ایفا می‌کند (Bayani *et al.,* 2024). در ایران، سیلاب‌های متعدد در سال‌های اخیر خسارات زیادی را به جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و منابع طبیعی وارد کرده‌اند. برای مثال، سیلاب گسترده سال ۱۳۹۸ در حوضه کرخه، علاوه بر آسیب‌های وسیع، اهمیت برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت سیلاب را نشان می‌دهد (Fouladi, 2023). در پاسخ به این نیاز، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی فرآیند بارش–رواناب به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تحلیل رفتار حوضه‌ها و پیش‌بینی اثرات سیلاب‌ها موردتوجه قرار گرفته است (Kencanawati *et al.,* 2024; Parsamehr, 2024). در این میان، مدل HEC-HMS یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در سطح جهان است که به‌واسطه قابلیت‌هایی مانند محاسبه تلفات اولیه، روندیابی جریان و تلفیق با داده‌های مکانی و اقلیمی، امکان تحلیل جامع فرآیند بارش–رواناب را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Balkhair *et al.,* 2018; Yuan *et al.,* 2022). با این‌حال، دقت نتایج این مدل تا حد زیادی به نحوه واسنجی و حساسیت پارامترهای کلیدی آن وابسته است. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به اهمیت تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله HEC-HMS پرداخته‌اند. این تحلیل‌ها به شناسایی پارامترهای اثرگذار بر نتایج مدل کمک کرده، امکان بهینه‌سازی مدل، کاهش عدم قطعیت، و افزایش دقت پیش‌بینی را فراهم می‌سازند (Candela *et al.,* 2012; Razavizadeh *et al.,* 2013; Razmkhah *et al.,* 2016). برای نمونه، کاچاوا و آگنیهوتری (Kachhawa & Agnihotri, 2024) نیز تأکید کرد که CN و حداکثر نگهداشت بیشترین تأثیر را بر دبی اوج و حجم رواناب داشتند. در پژوهش دیگری، تاسیو و همکاران (Tassew *et al.,* 2019) با بررسی مدل HEC-HMS در اتیوپی نشان دادند که پارامترهای مرتبط با نفوذ و ذخیره‌سازی از حساس‌ترین پارامترها در پیش‌بینی رواناب بودند. در حوضه ملایر نیز ملایری و بشیرگنبد (Malayeri & Bashirgonbad, 2024) بر اهمیت شماره منحنی در ارزیابی پتانسیل سیلاب و رواناب در مناطق مشرف به شهرها تأکید کردند. مطالعات انجام شده در مناطق مختلف حاکی از کارایی مدل HEC-HMS در پیش‌بینی سیلاب‌ها و تحلیل رواناب هستند. مطالعه جهانبخش و همکاران (Jahanbakhsh Asl *et al.,* 2018) در حوزه آبخیز شهرچای نشان داد که مدل HEC-HMS توانایی بالایی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب داشت و به‌ویژه در مناطق فاقد داده‌های کافی توانست مورد استفاده قرار گیرد. اسدی و همکاران (Asadi *et al.,* 2020) در حوزه میناب نشان دادند که پارامترهای شماره منحنی (SCS-CN) و زمان تأخیر از حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی سیلاب با مدل HEC-HMS بودند. در مطالعات اخیر نیز عزیزی و حافظ‌پرست (Azizi & HafezParast-Mavedat, 2024) با بهره‌گیری از الگوریتم تکامل تفاضلی برای بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام (K و X) در حوضه رودخانه مرک، عملکرد مدل را به‌طور چشمگیری ارتقاء دادند (NSE=0.871)، و بر اهمیت بالای پارامترهای روندیابی هیدروگراف در دقت شبیه‌سازی تأکید کردند. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات متعددی نقش حساس پارامترهای کلیدی مدل HEC-HMS را در شبیه‌سازی رواناب و دبی اوج بررسی کرده‌اند. رزمخواه و همکاران (Razmkhah *et al.*, 2016) در حوضه رودخانه کارون نشان دادند که پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، ضریب ذخیره‌سازی کلارک و زمان تمرکز، بیشترین تأثیر را بر دبی‌های اوج در مدل پیوسته HEC-HMS داشتند. عملکرد مدل در این تحقیق با ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۷۶ در مرحله واسنجی و ۰/۶۴ در مرحله اعتبارسنجی رضایت‌بخش ارزیابی شد. در مطالعه‌ای دیگر، کاچاوا و آگنیهوتری (Kachhawa & Agnihotri, 2024) در اقلیم نیمه‌خشک حوضه رودخانه باناس (هند) با استفاده از مدل HEC-HMS و تحلیل شش رخداد بارندگی شدید دریافتند که شماره منحنی (CN) حساس‌ترین پارامتر برای هر دو متغیر دبی اوج و حجم رواناب بود. عملکرد مدل در اعتبارسنجی با NSE برابر ۰/۵۲ و ضریب تبیین ۰/۵۳ در بازه زمانی دو ساعته، بیانگر دقت مناسب مدل در پیش‌بینی سیلاب‌ها بود.

با وجود این مطالعات، بررسی مقایسه‌ای حساسیت پارامترهای هیدرولوژیکی در حوضه‌هایی با شرایط مدیریتی متفاوت (شاهد و احیاشده) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که اقدامات مدیریتی مانند احیای پوشش گیاهی می‌توانند نه‌تنها مقدار رواناب، بلکه ساختار پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و حساسیت مدل به پارامترها را نیز تحت تأثیر قرار دهند. بنا بر این، تحلیل حساسیت پارامترها در شرایط پیش و پس از احیا می‌تواند درک دقیق‌تری را از تأثیر مداخلات مدیریتی ارائه دهد.

هدف این تحقیق تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی اوج و حجم رواناب در حوضه زوجی گنبد همدان با استفاده از مدل HEC-HMS است. در این مطالعه، ابتدا مدل HEC-HMS به‌منظور شبیه‌سازی بارش–رواناب در این حوضه اجرا شد و سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر شبیه‌سازی رواناب و دبی پیک سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق به‌دنبال بهینه‌سازی پارامترهای مدل و ارزیابی حساسیت آن‌ها در فرآیند شبیه‌سازی سیلاب‌های رگباری است تا پیش‌بینی دقیقی از زمان و شدت سیلاب‌ها در این منطقه ارائه دهد. نتایج این تحقیق می‌توانند برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب و بهینه‌سازی سیستم‌های کنترل رواناب در مناطق نیمه‌خشک و مشابه حوضه زوجی گنبد همدان استفاده شوند. همچنین، این تحقیق به‌عنوان مرجعی برای پژوهش‌های بعدی در زمینه شبیه‌سازی سیلاب‌ها و کاهش خسارات ناشی از آن در مناطق مشابه محسوب می‌شود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

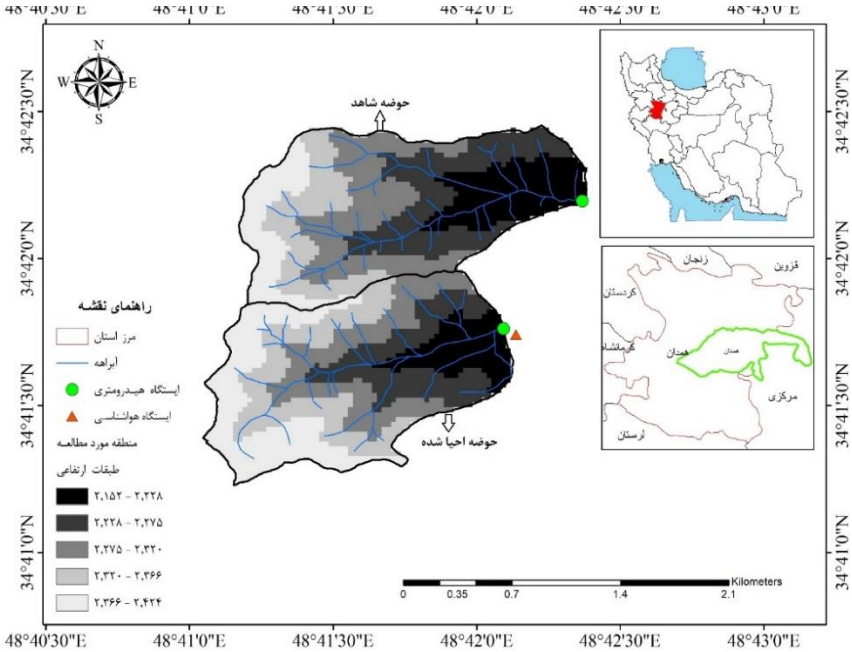
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این تحقیق در حوضه زوجی گنبد همدان شامل دو زیرحوضه همجوار انجام شده است: حوضه نمونه (احیاشده تحت عملیات اجرایی آبخیزداری) با مساحت ۱۴۵ هکتار و حوضه شاهد با مساحت ۱۴۳ هکتار (بدون انجام هیچ‌گونه فعالیت آبخیزداری شرایط فعلی منطقه را نمایش می‌دهد). همجواری و شباهت در شرایط اقلیمی، توپوگرافی و زمین‌شناسی این دو زیرحوضه، امکان مقایسه تأثیرات اجرای عملیات آبخیزداری بر رواناب و پارامترهای هیدرولوژیکی را فراهم کرده است. حوضه احیاشده طی دو دهه اخیر تحت مدیریت و قرق قرار گرفته است و با کاشت درختچه‌های بومی و گیاهان علفی مقاوم به خشکی بازسازی شده است.

اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دمارتون، نیمه‌خشک بوده و میانگین سالانه بارش آن ۳۹۶/۸ میلی‌متر است که عمدتاً در پاییز و زمستان رخ می‌دهد. فصل رشد گیاهان از اواخر اسفند تا اواخر تیرماه ادامه دارد. میانگین دمای سالانه حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد است که در زمستان به‌طور قابل توجهی کاهش و در تابستان به حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. توپوگرافی منطقه شامل شیب‌های متوسط تا تند است که میانگین آن در حوضه احیا شده ۳۲/۷٪ و در حوضه شاهد ۳۰/۱٪ است. خاک منطقه با بافت لوم رسی تا لوم شنی، به‌دلیل شیب‌های تند و بارش‌های فصلی، به‌شدت مستعد فرسایش است.

داده‌های این تحقیق از یک ایستگاه هواشناسی و دو ایستگاه هیدرومتری که در خروجی هر زیرحوضه قرار دارند، جمع‌آوری شده است. ایستگاه هواشناسی از سال ۱۳۸۴ اطلاعات بارش، دما و تبخیر را ثبت کرده و ایستگاه‌های هیدرومتری داده‌های رواناب خروجی زیرحوضه‌ها را در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای ذخیره کرده‌اند. شکل ۱ موقعیت منطقه موردمطالعه، ایستگاه هواشناسی و ایستگاه‌های هیدرومتری را نشان می‌دهد.



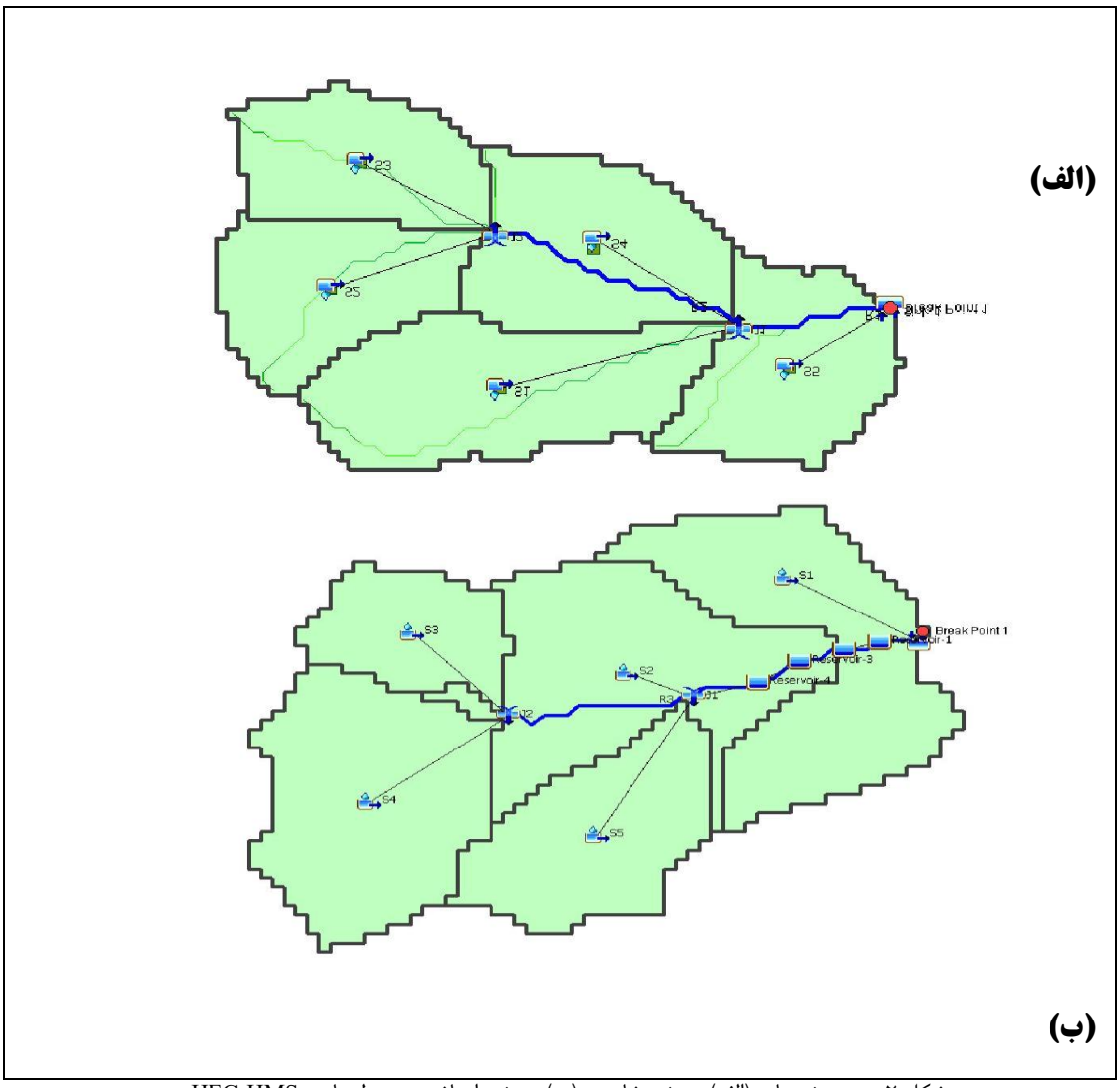
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Location of the study area

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نسخه ۴.۱۱ برای شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب در حوضه زوجی گنبد همدان استفاده شد. نقشه DEM با دقت ۳۰ متر از سایت USGS تهیه و پس از انجام تغییرات لازم، به مدل وارد شد. همچنین، نقشه‌های کاربری اراضی، پوشش گیاهی و خاک از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان جمع‌آوری شدند. داده‌های مورد نیاز از دو منبع اصلی جمع‌آوری شدند. ابتدا، جمع‌آوری داده‌های میدانی شامل پارامترهای نفوذپذیری اولیه (میزان نفوذ آب به خاک در ابتدای شروع بارش)، نفوذپذیری پایدار (میزان نفوذ آب به خاک پس از رسیدن به حالت پایدار)، بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، چگالی ظاهری، تخلخل، رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی از طریق برداشت‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی انجام شد. نمونه‌برداری از خاک و آزمایش نفوذپذیری در هریک از زیرحوضه‌هایی که توسط مدل HEC-HMS مشخص شده است، صورت گرفت (شکل۲). مدل هر دو حوضه شاهد و نمونه را به پنج زیرحوضه تقسیم کرد. با توجه به نقشه‌های پایه و بازدید میدانی، مشخص شد که در این منطقه، جهت شیب رو به شمال و رو به جنوب تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی، خاک و در نهایت تولید رواناب دارند. بنا بر این، در هر زیرحوضه یک دامنه رو به شمال و یک دامنه رو به جنوب انتخاب و از هر دامنه در سه نقطه مختلف از خاک نمونه‌برداری و آزمایش نفوذپذیری انجام شد. در شکل ۳ تصاویری از داده‌برداری میدانی و آزمایشگاهی نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]



شکل ۲- زیرحوضه‌های (الف): حوضه شاهد و (ب): حوضه احیاشده در مدل‌سازی HEC-HMS
Figure 2. Sub basins in (a): control area and (b): restored watershed in HEC-HMS model

علاوه بر داده‌های میدانی، اطلاعات هواشناسی و هیدرومتری نیز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان دریافت شد. این داده‌ها شامل اطلاعات روزانه و مربوط به بارش، دما، تبخیر و رواناب در خروجی هر زیرحوضه هستند که از سال ۱۳۸۴ در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای ثبت شده‌اند. این داده‌ها به‌منظور تحلیل دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی تأثیرات مدیریت منابع طبیعی بر رواناب استفاده شده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

شکل ۳- تصاویری از داده‌برداری میدانی و آزمایشگاهی
Figure 3. Pictures of field and laboratory data collection

روش پژوهش

مدل‌سازی هیدرولوژیکی

مدل HEC-HMS به‌عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، از مجموعه‌ای از روش‌های مختلف بهره می‌برد. این مدل شامل سه بخش اصلی است: مدل حوزه آبخیز، مدل هواشناسی و مدل کنترل. در مدل حوزه آبخیز، خصوصیات فیزیکی مانند مساحت، شیب، شبکه آبراهه‌ها، روش‌های تلفات، روندیابی و جریان پایه تعریف می‌شوند. در مدل هواشناسی، داده‌های بارش به‌صورت سری‌های زمانی یا عمقی وارد می‌شوند و روش توزیع مکانی بارش در سطح زیرحوضه‌ها تعیین می‌شود. مدل کنترل نیز زمان شروع و پایان شبیه‌سازی و گام‌های زمانی اجرا را مشخص می‌نماید.

در این تحقیق، برای محاسبه تلفات آب، از روش شماره منحنی SCS که توسط سازمان حفاظت خاک ایالات متحده (USDA Soil Conservation Service, 1986) توسعه یافته است، بهره گرفته شده است. این روش به دلیل سادگی و کاربرد گسترده در مدل‌سازی هیدرولوژیکی به‌ویژه برای حوضه‌های کوچک، یکی از روش‌های استاندارد و پذیرفته‌شده در مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. محاسبه CN در این مطالعه بر اساس سه فاکتور اصلی انجام شد:

۱- گروه هیدرولوژیکی خاک (HSG[1])

گروه‌های هیدرولوژیکی خاک بر اساس نفوذپذیری و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تعیین شدند. برای این منظور، از داده‌های میدانی و مشخصات فیزیکی خاک (مانند درصد رس، سیلت و ماسه، تخلخل، چگالی ظاهری و عمق خاک) استفاده شد. این اطلاعات با استفاده از معیارهای تعریف‌شده توسط USDA (1986) برای تعیین گروه‌های A، B، C و D به‌کار گرفته شدند. خاک‌های با نفوذپذیری بالا (مانند خاک‌های شنی) در گروه A و خاک‌های با نفوذپذیری پایین (مانند خاک‌های رسی) در گروه D دسته‌بندی شدند.

۲- نوع کاربری اراضی

1 Hydrologic Soil Group

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

نوع پوشش گیاهی و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها شامل مرتع علفی، مرتع بوته‌ای، رخنمون سنگی و باغ بود. درصد هریک از این کاربری‌ها در زیرحوضه‌ها از طریق برداشت میدانی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای محاسبه شد. این درصدها در انتخاب مقادیر CN مربوط به هر کاربری، بر اساس جداول استاندارد USDA SCS، لحاظ شدند.

۳- وضعیت مدیریت پوشش گیاهی

وضعیت هیدرولوژیکی پوشش گیاهی در هر زیرحوضه به سه دسته ضعیف، متوسط و خوب تقسیم شد. این تقسیم‌بندی بر اساس تراکم پوشش گیاهی، وضعیت زراعی، درصد بقایای گیاهی (مانند پوشش علفی و بقایای بوته‌ای) انجام شد. پوشش گیاهی ضعیف بیانگر اراضی با پوشش گیاهی کم و در معرض فرسایش بالا است، در حالی که پوشش گیاهی خوب نشان‌دهنده اراضی با تراکم بالای پوشش و حفاظت مناسب خاک است.

درنهایت، برای هر زیرحوضه، CN نهایی به‌صورت میانگین وزنی محاسبه شد. ابتدا CN هر کاربری با توجه به گروه هیدرولوژیکی خاک و شرایط هیدرولوژیکی از جداول استاندارد استخراج شد. سپس، میانگین وزنی CN برای هر زیرحوضه بر اساس درصد مساحت کاربری‌های مختلف به‌دست آمد. فرمول محاسبه میانگین وزنی CN به‌صورت رابطه (۱) است:

$$CN_W = \frac{\sum(CN_i.A_i)}{\sum A_i} \qquad (۱)$$

که در آن CN_i شماره منحنی مربوط به نوع کاربری i و A_i مساحت نوع کاربری i هستند. مقدار تلفات اولیه S نیز ازCN مطابق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \qquad (۲)$$

زمان تأخیر فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و مرکز ثقل هیدروگراف است و معمولا به جای آن زمان تاخیر تا اوج در نظر گرفته می‌شود که فاصله زمانی بین مرکز بارش مازاد و نقطه اوج است.در این پژوهش، پارامتر زمان تأخیر با استفاده از روش هیدروگراف واحد بدون بعد SCS محاسبه شد (رابطه ۳).

$$T_{lag} = \frac{2.578\times L^{0.8}\times(\frac{1000}{CN}-9)^{0.7}}{1900W_S^{0.5}} \qquad (۳)$$

که در آن، T_{lag} زمان تأخیر حوزه بر حسب ساعت، L طول آبراهه‌های اصلی (متر)، CN شماره منحنی متوسط وزنی حوضه، و W_s شیب متوسط وزنی حوضه (درصد) هستند.

در ادامه، برای تحلیل دقیق‌تر تأثیرات پوشش گیاهی و رواناب سطحی، از روش تاج پوشش ساده[1] استفاده شد. این روش به شبیه‌سازی تأثیر پوشش گیاهی بر بارش و رواناب کمک می‌کند و از پارامترهای نگهداشت اولیه (Initial Storage) و حداکثر نگهداشت (Max Storage) استفاده می‌کند. این پارامترها از طریق داده‌های میدانی مرتبط با درصد پوشش گیاهی، شدت ناهمواری سطح زمین، و نرخ نفوذپذیری خاک با استفاده از دستورالعمل USDA-SCS (1986) برآورد شدند.

همچنین، برای انتقال رواناب به خروجی حوضه، از روش هیدروگراف واحد SCS[2] استفاده گردید و برای روندیابی جریان در آبراهه‌ها، از روش موج سینماتیکی[3] بهره گرفته شد. در این روش، زبری مانینگ (n) در آبراهه‌های حوضه‌های مورد مطالعه، از روش استریکلر (Strickler, 1923; Chow, 1959) بررسی شد. این روش مبتنی بر ارزیابی ویژگی‌های میدانی بستر آبراهه است و به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای تعیین دقیق‌تر پارامتر زبری به کار می‌رود. به این منظور، ابتدا آبراهه‌های هر زیرحوضه به چندین مقطع طولی همگن از نظر ویژگی‌هایی مانند جنس بستر، پوشش گیاهی و ناهمواری تقسیم‌بندی شدند. در هر مقطع، ویژگی‌هایی نظیر نوع مواد بستر (مانند گلی، شنی، یا سنگی)، میزان تراکم پوشش گیاهی، وجود موانع طبیعی نظیر سنگ‌ها و خرده‌ریزه‌ها ثبت و بررسی شد. شدت ناهمواری سطح نیز با استفاده از مشاهده مستقیم و مقایسه با استانداردهای موجود ارزیابی گردید.

بر اساس داده‌های میدانی، مقادیر اولیه ضریب زبری مانینگ (n) از جدول استاندارد استریکلر استخراج شد. سپس با توجه به شرایط مشاهده‌شده در بستر آبراهه‌ها، مانند نوع مواد بستر، میزان پوشش گیاهی، وجود موانع طبیعی و شدت ناهمواری سطح، اصلاحاتی بر اساس روش پیشنهادی کاون (Cowen, 1956; Barnes, 1967) اعمال شدند. این اصلاحات شامل مقادیر افزایشی برای عواملی مانند پوشش گیاهی کم‌تراکم (+۰/۰۱۰)، موانع متوسط (+۰/۰۱۵) و ناهمواری زیاد (+۰/۰۲۰) بودند. ضریب زبری نهایی برای هر مقطع از معادله ۴ محاسبه شد.

$$n = n_0 + \sum \Delta_n \qquad (۴)$$

که در آن n_0 ضریب زبری پایه و Δ_n مقادیر تصحیح برای عوامل مختلف هستند. مقدار نهایی n برای هر بخش به‌عنوان نماینده ضریب زبری کل آبراهه در نظر گرفته شد.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی رواناب از پنج رخداد سیلاب در تاریخ‌های ۱۹ مارس ۲۰۱۷، ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸، ۲۸ ژانویه ۲۰۱۹، ۲۵ مارس ۲۰۱۹ و ۲۰ فوریه ۲۰۲۰ با بارش‌های متناظر آنها استفاده شد. از میان این رخدادها، سه رخداد نخست جهت واسنجی مدل و دو رخداد آخر برای اعتبارسنجی به‌کار گرفته شدند. فرآیند واسنجی به‌صورت همزمان برای سه رخداد انتخابی انجام گرفت، به‌گونه‌ای که مجموعه‌ای از پارامترها تعیین شدند که به‌طور کلی بهترین انطباق را با هر سه رخداد فراهم کنند.

برای ارزیابی کارایی مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. این مقایسه شامل تحلیل هیدروگراف‌های خروجی و بررسی انحرافات بین نتایج شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی رواناب است. در این پژوهش، معیارهای ضریب نش–ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سنجش دقت براساس معادله (۵) و (۶) استفاده شد.

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i-1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i-1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \qquad (۵)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(O_i-P_i)^2}{n}} \qquad (۶)$$

1 Simple Canopy
2 SCS Unit Hydrograph
3 Kinematic Wave

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

که در آن، O_i مقادیر داده‌های مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، P_i مقادیر داده‌های شبی‌سازی شده و n تعداد داده‌ها هستند.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت مدل به دو روش دستی و خودکار انجام می‌شود. روش‌های خودکار با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده و نرم‌افزارهای ویژه، تأثیر تغییرات پارامترها را به‌سرعت و به‌طور جامع بررسی می‌کنند. در مقابل، تحلیل دستی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، امکان بررسی تأثیرات هر پارامتر را به‌طور مرحله‌ای فراهم می‌آورد. انتخاب روش دستی برای تحلیل حساسیت مدل مزایای قابل‌توجهی دارد، از جمله دقت بیشتر در شناسایی پارامترهای حساس، فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژیکی و روابط بین پارامترها، و انعطاف‌پذیری در اعمال تغییرات خاص بر اساس نیازهای تحقیق (Arlimasita & Lasminto, 2020).

در این تحقیق، برای تحلیل حساسیت، پارامترهای ورودی مدل شامل شماره منحنی(CN) ، حداکثر نگهداشت، زمان تأخیر، شیب آبراهه، و ضریب زبری مانینگ، به‌میزان ±۱۰، ±۲۰ و ±۳۰ درصد تغییر داده شدند. پس از اعمال هر تغییر، مدل HEC-HMS مجدداً اجرا شد و مقادیر دبی پیک و حجم رواناب ثبت گردیدند. هدف از این فرآیند، بررسی میزان واکنش مدل به تغییرات پارامترها و فراهم‌سازی مبنای مقایسه میان آن‌ها بود. جدول ۱ ساختار مدل، پارامترهای مورد بررسی و روش‌های اعمال تغییرات را معرفی می‌کند.

جدول ۱- روش‌های مختلف اجرای مدل و پارامترهای مورد بررسی

Table 1. Different methods of implementing the model and the investigated parameters

اجزای مدل هیدرولوژیکی Hydrological model components	روش انتخاب Method	پارامترهای شبیه‌سازی شده Simulated parameters
روش نگهداشت تاج پوشش Canopy method	تاج پوشش ساده Simple Canopy	نگهداشت اولیه (٪) Initial storage (%) حداکثر نگهداشت (میلی‌متر) Maximum Storage (mm)
روش تلفات Loss method	شماره منحنی SCS SCS Curve Number	شماره منحنی Curve Number سطوح نفوذ ناپذیر (٪) Impervious (%)
انتقال Transform	هیدروگراف واحد SCS SCS Unit Hydrograph	زمان تأخیر (دقیقه) Lag time (min)
مسیریابی Routing	موج سینماتیکی Kinematic Wave	شیب آبراهه (متر بر متر) River slope (m/m) ضریب مانینگ Manning coefficient

نتایج و بحث

داده‌های مشاهداتی

داده‌های مشاهداتی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی خاک برای پنج زیرحوضه در هریک از حوضه‌های شاهد و احیا شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی استخراج و در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که میانگین نفوذپذیری اولیه در حوضه شاهد بین ۱۲۸ تا ۱۴۳ میلی‌متر بر ساعت متغیر بوده است، در حالی‌که در حوضه احیاشده این مقدار به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر بر ساعت افزایش یافته است. به‌طور مشابه، نفوذپذیری پایدار در حوضه شاهد در محدوده ۱۶/۴ تا ۲۲/۴ میلی‌متر برساعت قرار داشته است، در حالی که در حوضه احیا شده بین ۲۳/۴ تا ۳۳/۲ میلی‌متر بر ساعت متغیر بوده است. این افزایش در هر دو پارامتر بیانگر بهبود وضعیت نفوذ آب بر اثر عملیات احیای پوشش گیاهی است. از نظر بافت خاک نیز تفاوت‌های چشمگیری بین دو حوضه مشاهده نمی‌شود. در حوضه شاهد، بافت تمام زیرحوضه‌ها رسی سیلتی است، در حالی‌که در حوضه احیاشده ترکیبی از و رس سیلتی مشاهده شده است.

بررسی چگالی ظاهری نشان می‌دهد که میانگین این پارامتر در حوضه شاهد حدود ۱/۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و در حوضه احیاشده حدود ۱/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است که کاهش تقریبی ۹ درصدی را نشان می‌دهد. این کاهش منجر به افزایش تخلخل خاک و تسهیل نفوذ آب گردیده است. همچنین، رطوبت اشباع در حوضه شاهد بین ۴۲/۱ تا ۵۵/۱ درصد و در حوضه احیاشده بین ۳۴/۵ تا ۴۳/۷ درصد بوده است که علی‌رغم همپوشانی جزئی، نشانگر تمایل بیشتر خاک‌های احیا شده به نگهداشت آب در لایه‌های سطحی است. ظرفیت زراعی (Field Capacity) نیز در حوضه احیاشده به‌طور متوسط بالاتر است، به‌طوری‌که مقدار آن در زیرحوضه‌های احیا شده بین ۲۲/۳ تا ۲۹/۴ درصد و در حوضه شاهد بین ۲۸/۶ تا ۳۵/۴ درصد ثبت شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

جدول ۲- میانگین ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در زیرحوضه‌های حوضه شاهد و حوضه احیاشده
Table 2. Average physical and hydraulic soil properties in the sub-watersheds of the control and restored watersheds

ظرفیت زراعی Field Capacity (%)	رطوبت اشباع Saturated Moisture (%)	چگالی ظاهری Bulk Density (g/cm³)	نفوذپذیری پایدار Steady State Infiltration (mm/h)	نفوذپذیری اولیه Initial Infiltration (mm/h)	بافت Soil Texture	زیرحوضه Sub-watershed	
33.1	52.6	1.29	20.5	143	رس سیلتی Silty Clay	1	حوضه شاهد Control Watershed
30.0	42.1	1.32	17.8	132	رس سیلتی Silty Clay	2	
28.6	45.5	1.34	16.4	128	رس سیلتی Silty Clay	3	
31.2	49.1	1.31	18.1	134	رس سیلتی Silty Clay	4	
35.4	55.1	1.27	22.4	152	رس سیلتی Silty Clay	5	
22.3	34.5	1.25	23.4	203	رس سیلتی Silty Clay	1	حوضه احیا شده Restored Watershed
27.6	40.8	1.15	30.7	239	رس سیلتی Silty Clay	2	
25.9	39.2	1.18	28.3	221	لوم Loam	3	
29.4	43.7	1.14	33.2	245	رس سیلتی Silty Clay	4	
25.1	37.2	1.21	25.1	215	رس سیلتی Silty Clay	5	

تحلیل ویژگی‌های سطحی و پوشش گیاهی

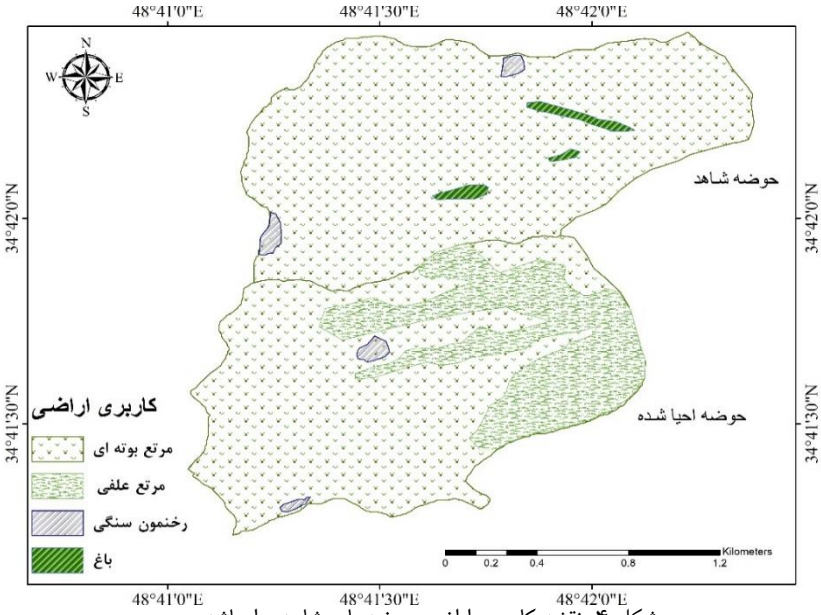
به‌منظور تحلیل دقیق‌تر تأثیر شرایط سطحی و مدیریتی بر رفتار هیدرولوژیکی دو حوضه مورد مطالعه، نقشه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در دو حوضه شاهد و احیاشده در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در نقشه کاربری اراضی (شکل ۴) مشاهده می‌شود، بخش عمده حوضه احیاشده دارای پوشش مرتع علفی و مرتع بوته‌ای متراکم است، در حالی که در حوضه شاهد، سهم بیشتری از زمین‌ها با پوشش‌های ضعیف‌تر مانند رخنمون سنگی و خاک لخت مشاهده می‌شود. این تفاوت در کاربری و پوشش گیاهی نقش مهمی در کاهش رواناب و افزایش نفوذ در حوضه احیاشده ایفا می‌کند.

همچنین، نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (شکل ۵) نشان می‌دهد که خاک‌های گروه D، که نفوذپذیری کمتر و پتانسیل رواناب بیشتری دارند، در بخش‌های وسیع‌تری از حوضه شاهد غالب هستند، در حالی‌که در حوضه احیا شده، سهم بیشتری از خاک‌ها در گروه C قرار دارند. جدول ۳ میانگین ویژگی‌های پوشش سطح زمین و فرم‌های رویشی را در تیپ‌های گیاهی دو حوضه احیاشده و شاهد نشان می‌دهد. در حوضه احیاشده، میانگین تاج‌پوشش گیاهی برابر با ٪۶۹/۶ و در حوضه شاهد ٪۶۵/۱ بوده است .درصد خاک لخت در حوضه احیاشده کمتر از شاهد است و همین‌طور پوشش سنگ و سنگریزه نیز در حوضه احیاشده حدود ٪۱۱ و در شاهد ٪۱۲/۴ بوده است. از نظر فرم رویشی، گراس‌ها در حوضه احیاشده سهم بیشتری دارند در حالی که فرم بوته‌ای در حوضه شاهد بیشتر مشاهده شده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که عملیات احیا منجر به افزایش تراکم پوشش علفی، کاهش سطوح بدون پوشش و بهبود شرایط اکولوژیکی سطح حوضه شده است.

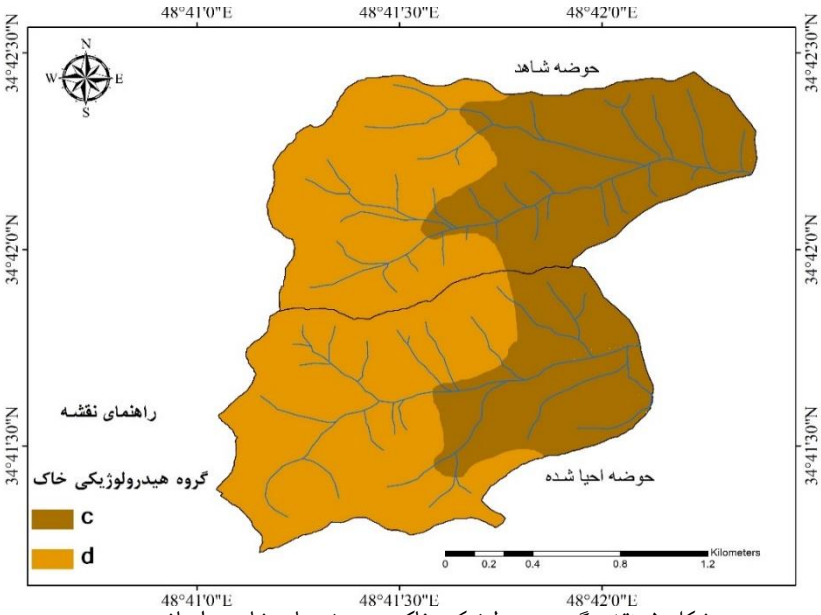
جدول ۳- میانگین پوشش گیاهی و شاخص‌های سطحی تیپ‌های پوشش در حوضه‌های شاهد و احیاشده
Table 3. Average vegetation cover and surface indices of cover types in the control and restored basins

فرم رویشی Life Form			پوشش سطح زمین Land surface cover					
سایر (٪) Other (%)	بوته ای (٪) Bush (%)	گراس (٪) Grass (%)	سنگ و سنگریزه (٪) Rock Fragment (%)	خاک لخت (٪) Bare Soil (%)	لاشبرگ (٪) Litter (%)	تاج پوشش گیاهی (٪) Vegetation canopy(%)	نام تیپ Type name	شماره تیپ Type number
5.0	67.6	27.5	8	8	9	75	*Astragalus verus - Annual grasses*	Type1_R
6.9	80.9	12.2	6.8	8.9	10.7	73.7	*Astragalus verus-Bromus tomentellus*	Type2_R
5.0	77.5	17.5	20.5	11.1	13.1	55.3	*Astragalus verus-Acanthophylum sp-Acroptilon* sp	Type3_R
4.6	74.7	20.7	8.9	8.1	8.4	74.6	*Astragalus Verus- Artemisia sp- Bromus tomentellus*	Type4_R
5.4	36.6	19.5	11	9	10.3	69.6	میانگین زیر حوزه احیاشده Average for the restored watershed	
3.9	84.5	11.7	7.1	11.1	8.7	73.1	*Astragalus Verus- Acantholimon sp- Bromus tomentellus*	Type1_sh
25.0	56.3	18.8	10.8	11.0	10.5	67.8	*Astragalus Verus- Bromus tomentellus - Gundellia* sp	Type2_sh
14.0	64	22.0	13.6	11.0	13.6	61.8	*Astragalus verus - Annual grasses*	Type3_sh
4.2	64.2	31.7	18.1	13.7	10.4	57.8	*Astragalus verus-Acanthophylum* sp-*Acroptilon* sp	Type4_sh
11.8	28.5	21	12.4	11.7	10.8	65.1	میانگین زیرحوزه شاهد Average for the control watershed	

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی حوضه‌های شاهد و احیاشده
Figure 4. The land use map of the control and restored watersheds

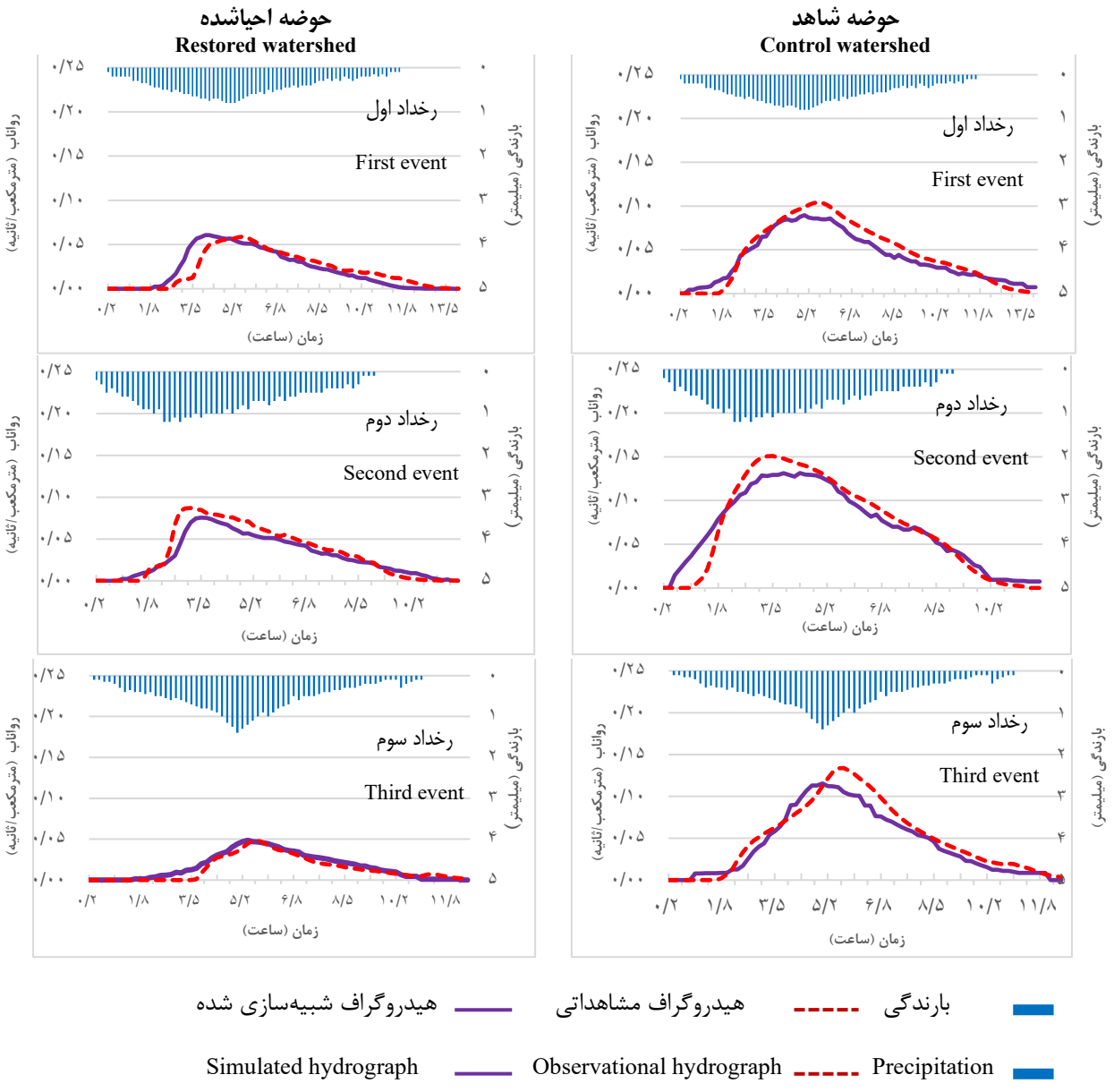


شکل ۵- نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک در حوضه‌های شاهد و احیاشده
Figure 5. The soil hydrological group map of the control and restored watersheds

نتایج شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی

نتایج شبیه‌سازی مدل HEC-HMS برای پنج رخداد بارندگی در دو حوضه آبخیز شاهد و احیاشده، در قالب دوره‌های واسنجی (رخدادهای اول تا سوم) و اعتبارسنجی (رخدادهای چهارم و پنجم)، در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۴ ارائه شده‌اند. بررسی هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که در هر دو حوضه، شبیه‌سازی دبی جریان با داده‌های مشاهداتی تطابق قابل قبولی داشته است. شاخص‌های آماری مانند NSE و RMSE نیز نشان دادند که مدل HEC-HMS در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد مناسبی داشت. در دوره واسنجی، مقدار NSEبرای حوضه شاهد در بازه ۰/۶۷ تا ۰/۷۷ و برای حوضه احیاشده در بازه ۰/۷۵ تا ۰/۸۴ قرار داشت. در دوره اعتبارسنجی نیز این شاخص برای حوضه شاهد بین ۰/۵۶ تا ۰/۶۲ و برای حوضه احیا شده بین ۰/۶۹ تا ۰/۷۴ گزارش شد. مقادیر RMSEدر دوره واسنجی، در حوضه شاهد بین ۰/۴۵ تا ۰/۴۹ و در حوضه احیاشده بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۶، و در دوره اعتبارسنجی بین ۰/۴۵ تا ۰/۴۹ در هر دو حوضه قرار داشت. در مجموع، دقت شبیه‌سازی مدل در هر دو حوضه رضایت‌بخش ارزیابی شد و نتایج آماری بیانگر تطابق مناسب بین دبی شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی هستند.

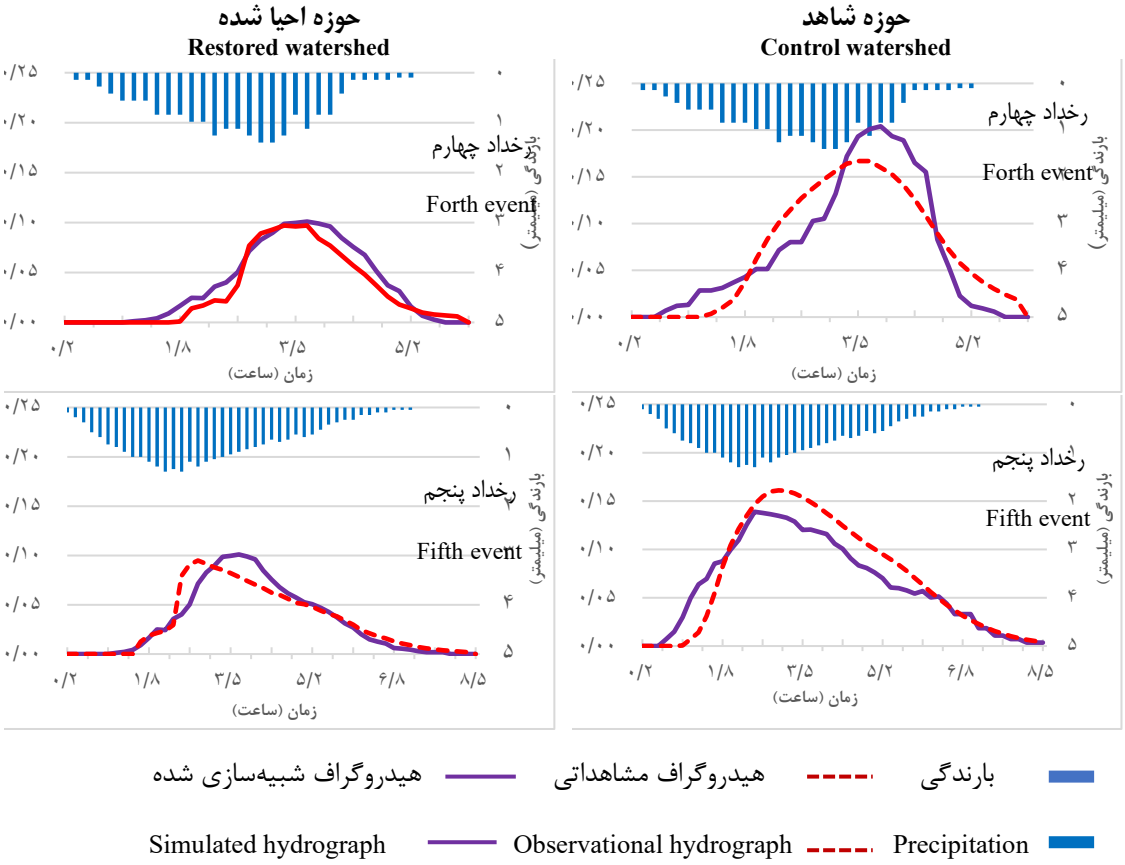
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]



شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف مدل HEC-HMS در حوضه شاهد و حوضه احیاشده برای دوره
Figure 6. The results of the HEC-HMS model hydrograph simulation in the control and restored watersheds for the periods of calibration

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف مدل HEC-HMS در حوزه شاهد و حوزه احیاشده برای دوره اعتبارسنجی
Figure 7. The results of the HEC-HMS model hydrograph simulation in the control and restored watersheds for the periods of validation

جدول ۴- نتایج ارزیابی مدل

Table 4. Model evaluation results

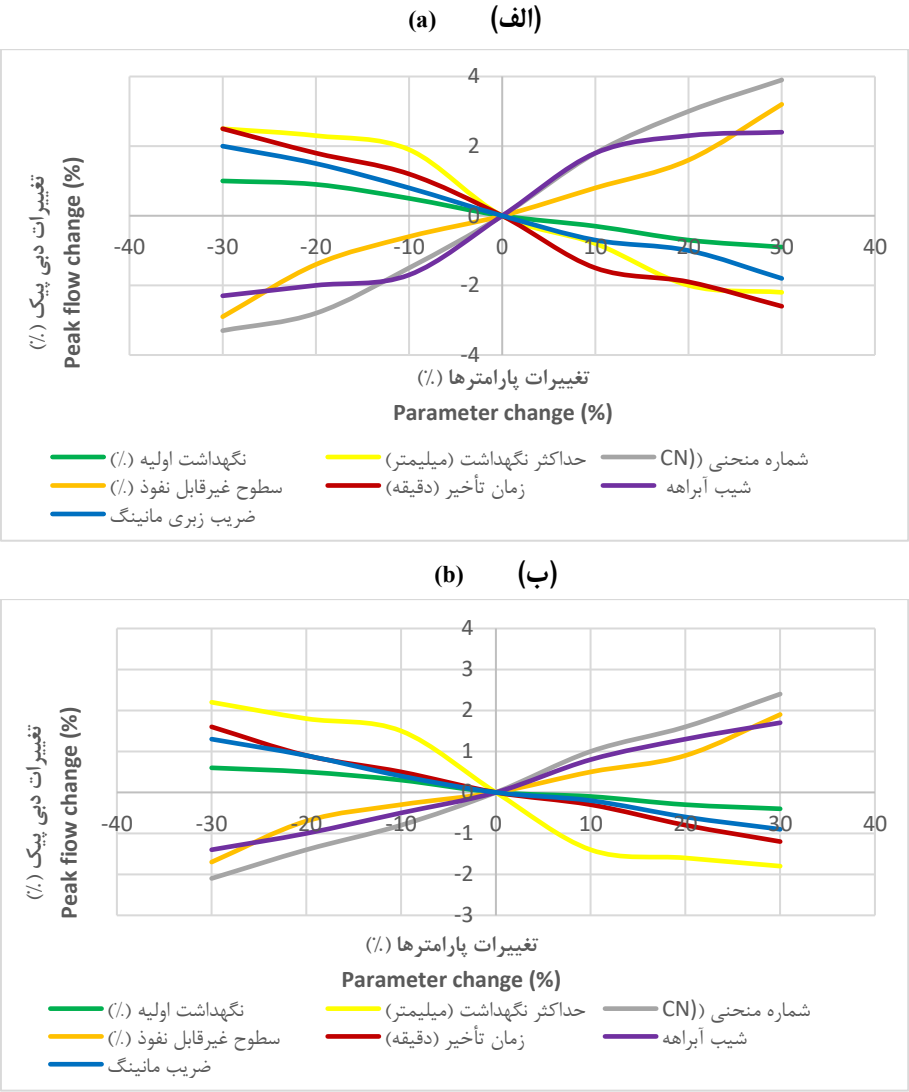
رخداد Event	حوضه شاهد Control watershed		حوضه احیاشده Restored watershed	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE
اول First	0.768	0.463	0.844	0.406
دوم Second	0.674	0.494	0.792	0.456
سوم Third	0.777	0.450	0.755	0.453
چهارم Forth	0.617	0.467	0.696	0.472
پنجم Fifth	0.563	0.487	0.746	0.452

نتایج تحلیل حساسیت

شکل ۸ تأثیر تغییرات ۳۰± درصدی پارامترهای هیدرولوژیکی مختلف بر دبی اوج را در دو حوضه شاهد و احیا شده نشان می‌دهد. این پارامترها شامل نگهداشت اولیه (Ia)، حداکثر نگهداشت(S) ، شماره منحنی(CN) ، درصد سطوح نفوذناپذیر، زمان تأخیر(Lag Time) ، شیب آبراهه و ضریب زبری مانینگ (n) هستند. نتایج نشان می‌دهند که CN و S بیشترین تأثیر را بر دبی اوج دارند. برای نمونه، افزایش ۳۰ درصدی CN در حوضه شاهد منجر به افزایش دبی اوج تا حدود ۲۲٪ شد، در حالی که کاهش ۳۰ درصدی S باعث افزایش دبی اوج تا ۲۵٪ گردید. در مقابل، افزایش ۳۰ درصدی حداکثر نگهداشت منجر به کاهش دبی اوج تا حدود ۱۹٪ شد. این امر نقش کلیدی پارامترهای مرتبط با نفوذ و ذخیره‌سازی در تنظیم شدت جریان را تأیید می‌کند. پارامترهایی نظیر زمان تأخیر و ضریب مانینگ تأثیرات کمتری داشتند. تغییر ۳۰ درصدی در این دو پارامتر در هر دو حوضه منجر به تغییراتی کمتر از ۵٪ در دبی اوج گردید که نشان‌دهنده حساسیت پایین آن‌ها به رواناب سطحی لحظه‌ای است. مقایسه بین دو حوضه نشان داد

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

که حساسیت دبی اوج به تغییرات پارامترها در حوضه شاهد بیشتر از حوضه احیا شده بود. به‌طور خاص، تغییرات CN و S در حوضه شاهد دامنه اثرگذاری بیشتری بر دبی اوج داشتند.



شکل ۸– حساسیت تغییرات پارامترها نسبت به دبی اوج رواناب برای (الف): حوضه شاهد و (ب): حوضه احیاشده
Figure 8. The sensitivity of parameter changes to peak runoff flow for (a): control and (b): restored watersheds

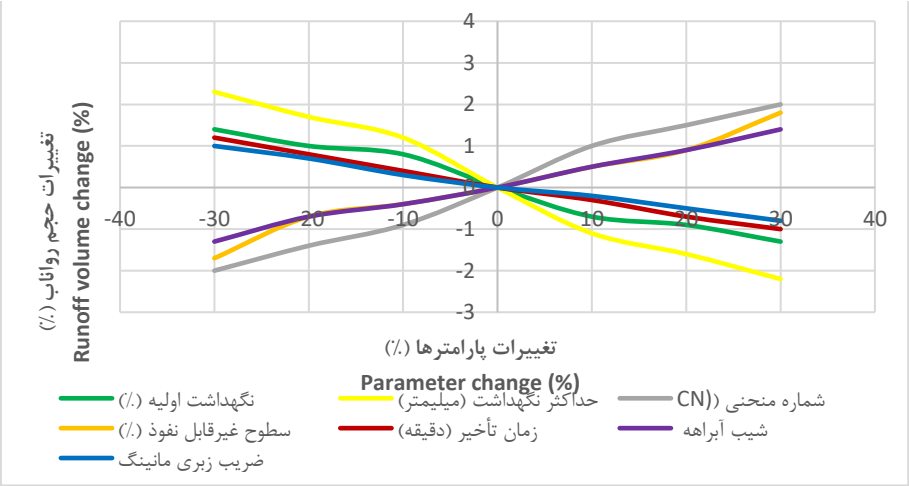
شکل ۹ بیانگر تأثیر تغییرات پارامترهای کلیدی هیدرولوژیکی بر حجم رواناب در حوضه شاهد و حوضه احیاشده است. نتایج نشان می‌دهند که حداکثر نگهداشت بیشترین تأثیر را بر حجم رواناب دارد. افزایش ۳۰ درصدی این پارامتر منجر به کاهش چشمگیر در حجم رواناب شد و در مقابل، کاهش این پارامتر به شدت حجم رواناب را افزایش داد. از سوی دیگر، CN که نمایانگر میزان نفوذپذیری و رفتار هیدرولوژیکی حوضه است، تأثیر مستقیم بر افزایش حجم رواناب دارد. سایر پارامترها مانند درصد سطوح غیرقابل نفوذ و نگهداشت اولیه نیز تأثیرات قابل ملاحظه‌ای دارند، اما این تأثیرات در مقایسه با حداکثر نگهداشت و CN به‌مراتب محدودتر هستند. پارامترهای مرتبط با زمان، نظیر زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ، کمترین حساسیت را نشان دادند. در حوضه شاهد، تغییرات پارامترها اثرات قوی‌تری بر حجم رواناب داشتند. به‌ویژه، تغییر در حداکثر نگهداشت و CN در این حوضه تغییرات بیشتری در رواناب ایجاد کرد. در مقابل، در حوضه احیاشده، تأثیر تغییرات پارامترها تعدیل یافت و کمتر بود. به‌عنوان مثال، تغییرات CN در این حوضه تأثیر ملایم‌تری بر حجم رواناب داشت، که نشان‌دهنده افزایش نفوذپذیری خاک و بهبود ویژگی‌های ذخیره‌سازی آب است.

بررسی نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹ روندهای معناداری را نشان داد. به عنوان نمونه، افزایش شیب آبراهه تا ۲۰ درصد موجب افزایش سریع دبی اوج شد، اما با عبور از این مقدار، نرخ تغییرات به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. این کاهش نرخ

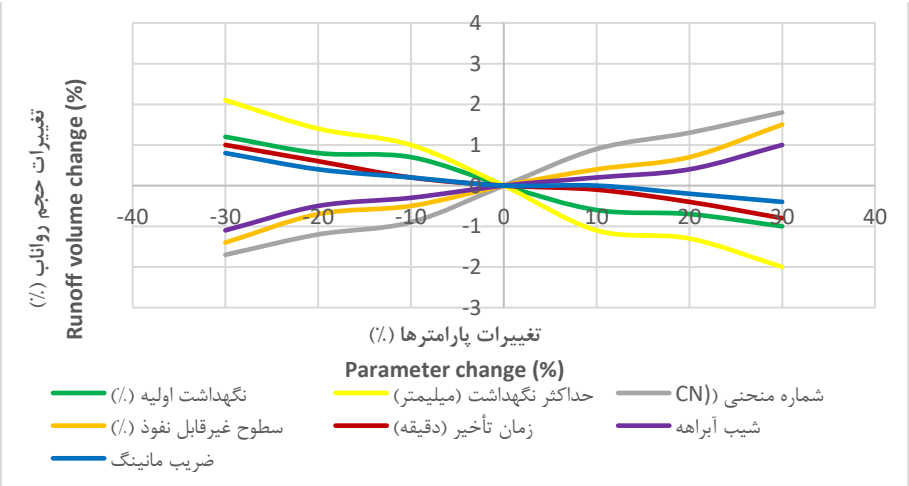
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

تغییرات پس از رسیدن به یک حد خاص برای شیب، به‌طور کلی می‌تواند به دلیل تبدیل شدن به یک وضعیت پایدارتر باشد. در مقادیر اولیه افزایش شیب، تغییرات در سرعت جریان آب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، اما وقتی که شیب از یک مقدار خاص عبور می‌کند، ظرفیت خاک و ویژگی‌های فیزیکی حوضه، مانند مقاومت سطحی، نقش مهم‌تری پیدا می‌کنند که باعث محدودشدن تأثیر شیب بیشتر بر رواناب می‌شود.

(a) (الف)



(b) (ب)



شکل ۹- حساسیت تغییرات پارامترها نسبت به حجم رواناب برای (الف): حوضه شاهد و (ب): حوضه احیاشده
Figure 9. The sensitivity of parameter changes to the runoff volume for (a): control and (b): restored watersheds

نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که عملیات احیای پوشش گیاهی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود رفتار هیدرولوژیکی حوضه، کاهش حجم و دبی اوج رواناب دارد. بررسی هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که در حوضه احیاشده، به‌ویژه در بخش اوج جریان، تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی وجود دارد. این امر می‌تواند به عوامل متعددی از جمله پایداری بیشتر شرایط سطحی پس از عملیات احیای پوشش گیاهی، کاهش رواناب سطحی سریع، و یکنواخت‌تر شدن فرآیند نفوذ و ذخیره‌سازی آب در خاک مرتبط باشد که مدل را قادر ساخته است تا رفتار هیدرولوژیکی را دقیق‌تر بازتاب دهد. در مقابل، در حوضه شاهد که پوشش گیاهی ضعیف‌تر و ناهمگونی سطحی بیشتری دارد، رفتار رواناب پیچیده‌تر است و ممکن است تغییرات سریع‌تر یا پیک‌های کوتاه‌مدت باعث کاهش دقت مدل در تطبیق با داده‌های میدانی شده باشد. همچنین، دقت بیشتر در داده‌های میدانی ثبت‌شده در حوضه احیاشده نسبت به حوضه شاهد نیز می‌تواند از دیگر دلایل بهبود عملکرد مدل در این حوضه باشد.

این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین مانند رضوی‌زاده و همکاران (Razavizadeh *et al.*, 2013) و سلیمانی سردو و همکاران (Soleimani Sardo *et al.*, 2014) همخوانی دارند که نشان دادند تغییرات کاربری اراضی می‌تواند به افزایش سیلاب‌ها و دبی اوج منجر شود. این یافته‌ها اهمیت مدیریت حوزه‌های آبخیز و بهبود پوشش گیاهی و کیفیت خاک را در کاهش عدم قطعیت‌ها و افزایش دقت مدل نشان می‌دهند. در حوضه احیاشده، افزایش نفوذپذیری خاک و ظرفیت

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

ذخیره‌سازی آب و در نتیجه عملیات احیای پوشش گیاهی، موجب کاهش حجم رواناب و شکل‌گیری هیدروگراف‌های با شیب ملایم‌تر و کم‌اوج‌تر شد؛ این تغییرات سبب بهبود دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب سطحی شدند. مطالعات مشابهی نیز در سطح بین‌المللی به همین نتایج رسیدند. فانتا و تاداسه (Fanta & Tadesse, 2022) در بررسی خود نشان دادند که افزایش پوشش گیاهی در مناطق احیاشده منجر به کاهش رواناب و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی آب در خاک شد، که با یافته‌های این تحقیق در حوضه گنبد همدان کاملاً مطابقت دارد. همچنین، پژوهش‌های جعفری و همکاران (Jafari *et al.,* 2024)، یو و ژانگ (Yu & Zhang, 2023) و الموسوی و همکاران (Almousawi *et al.,* 2020) تأکید کرده‌اند که مدیریت کاربری اراضی نقش مؤثری در کاهش نوسانات هیدروگراف و افزایش پایداری پاسخ حوضه دارد.

تحلیل حساسیت پارامترها یکی از مهم‌ترین بخش‌های این مطالعه بود. مشخص شد که دو پارامتر شماره منحنی و حداکثر نگهداشت بیشترین تأثیر را بر دبی اوج و حجم رواناب دارند. در حوضه شاهد، افزایش ٪۳۰ در CN منجر به افزایش حدود ٪۲۲ در دبی اوج گردید، در حالی که کاهش مشابه در S باعث افزایش حدود ٪۲۵ در دبی اوج شد. در مقابل، در حوضه احیاشده این تأثیرات به‌ترتیب ٪۱۵ و ٪۱۸ بودند که کاهش حساسیت مدل به‌وضوح مشهود است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین از جمله پژوهش‌های (Razmkhah *et al*., 2016; Khalighi Sigaroudi *et al.,* 2009; Kachhawa & Agnihotri, 2024; Soomro *et al*., 2019) همخوانی دارند، که حساسیت بالای پارامترهای CN و نگهداشت اولیه را در مدل HEC-HMS نشان داده‌اند.

جالب توجه آن که نتایج حاصل از تحلیل حجم رواناب نیز نشان دادند که پارامتر حداکثر نگهداشت، بیشترین تأثیر را بر حجم رواناب را داشت، به‌طوری‌که افزایش ۳۰ درصدی آن موجب کاهش شدید در حجم رواناب شد. CN نیز در این زمینه نقش مهمی داشت. تفاوت‌های میان دبی اوج و حجم رواناب نشان می‌دهند که CN بیشترین تأثیر را بر دبی اوج داشت، اما حداکثر نگهداشت نقش پررنگ‌تری در کنترل حجم رواناب ایفا کرد. به‌عبارت دیگر، دبی اوج به پارامترهای مرتبط با تغییرات لحظه‌ای و شدت جریان حساس‌تر است، در حالی که حجم رواناب به پارامترهای ذخیره‌سازی و نفوذپذیری بیشتر وابسته است. این یافته‌ها با نتایج پیشین (Kachhawa & Agnihotri, 2024; Tassew *et al*., 2019) و هم‌راستا هستند که نشان داده‌اند CN و S به‌عنوان پارامترهای نفوذ و ذخیره‌سازی، تعیین‌کننده‌ترین عوامل در پیش‌بینی سیلاب و حجم رواناب هستند. به‌ویژه مطالعه تانگام و همکاران (Tangam *et al.,* 2024) که در حوضه رودخانه سیربا در آفریقای غربی، CN، نگهداشت اولیه و زمان تأخیر را به‌عنوان پارامترهای حساس در مدل HEC-HMS شناسایی کردند. آن‌ها نشان دادند که این پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت پیش‌بینی جریان و برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب داشتند، خصوصاً در تحلیل‌های رخدادمحور، که نتایج آن با دقت بالایی به‌دست آمد.

از سوی دیگر، تأثیر پارامترهای زمانی مانند زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ در مقایسه با CN و S بسیار محدود بود، به‌ویژه هنگامی که تغییرات درصدی آن‌ها از حد خاصی فراتر می‌رفت. تغییرات زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ تأثیر بیشتری بر دبی اوج نسبت به حجم رواناب نشان دادند. در مقابل، پارامترهای مربوط به نگهداشت، نظیر حداکثر نگهداشت، تأثیر بیشتری بر حجم رواناب دارند. این پدیده مشابه توضیحات سومرو و همکاران (Soomro *et al*., 2019) است که نشان دادند افزایش شیب به‌طور اولیه باعث افزایش سرعت و دبی جریان می‌شود، اما پس از رسیدن به یک حد مشخص، تأثیر آن به‌دلیل ظرفیت محدود زمین برای هدایت سریع آب کاهش می‌یابد. رفتار مشابهی در پارامترهای زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ مشاهده شد، به‌گونه‌ای که تأثیرات این پارامترها در تغییرات کوچک بیشتر بودند و با افزایش درصد تغییرات، به مرور کاهش یافتند.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب سطحی و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی اوج و حجم رواناب در دو حوضه آبخیز شاهد و احیاشده بررسی شد. ارزیابی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری نشان داد که HEC-HMS توانست در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، جریان خروجی را با دقت قابل قبولی بازسازی کند. در دوره واسنجی، شاخص NSE در حوضه احیاشده بین ۰/۷۵۵ تا ۰/۸۴۴ و در حوضه شاهد بین ۰/۶۷۴ تا ۰/۷۷۷ بود. در دوره اعتبارسنجی، این شاخص به‌ترتیب ۰/۷۴۶ و ۰/۵۶۳ به‌دست آمد. همچنین، مقادیر RMSE در تمام رخدادها کمتر از ۰/۵ بود. دقت بالاتر مدل در حوضه احیاشده نسبت به حوضه شاهد، به احتمال زیاد ناشی از یکنواختی بیشتر شرایط سطحی و بهبود ساختار هیدرولوژیکی پس از عملیات احیای پوشش گیاهی است.

نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که پارامترهای شماره منحنی (CN) و حداکثر نگهداشت بیشترین تأثیر را بر رواناب داشتند. در حوضه شاهد، افزایش ۳۰ درصدی CN باعث افزایش دبی اوج تا ۳۸ درصد شد، در حالی که همین افزایش در حوضه احیاشده منجر به افزایش فقط ۲۱ درصدی گردید. همچنین، کاهش ۳۰ درصدی CN در حوضه شاهد باعث کاهش ۲۷ درصدی دبی اوج در مقایسه با ۱۵ درصد کاهش در حوضه احیاشده شد. در مورد پارامتر حداکثر نگهداشت، افزایش ۳۰ درصدی آن باعث کاهش ۳۷ درصدی حجم رواناب در حوضه شاهد و ۲۳ درصدی در حوضه احیاشده شد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که مدل در حوضه احیاشده به تغییرات پارامترها حساسیت کمتری دارد که ناشی از افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، بهبود نفوذپذیری و تاب‌آوری هیدرولوژیکی است. پارامترهایی مانند زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ نیز اثرگذار بودند، اما تغییرات ۳۰ درصدی این دو پارامتر فقط بین ۴ تا ۷ درصد تغییر در دبی اوج ایجاد کرد که در مقایسه با CN و نگهداشت قابل‌توجه نیست. همچنین، مشاهده شد که با عبور از یک آستانه تغییر (مثلاً افزایش شیب آبراهه بیش از ۲۰ درصد)، اثر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

پارامترها بر رواناب کاهش یافت و مدل به شرایط پایدار رسید. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که اجرای عملیات آبخیزداری و احیای پوشش گیاهی علاوه بر کاهش رواناب، موجب کاهش حساسیت مدل به پارامترهای کلیدی می‌شود و قابلیت اطمینان مدل‌سازی را به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و کاربری افزایش می‌دهد. این نتایج می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب و طراحی پروژه‌های احیای سرزمین در مناطق نیمه‌خشک باشند.

پیشنهادات کاربردی و پژوهشی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب

۱- توصیه می‌شود که مطالعات مشابه در دوره‌های زمانی بلندمدت‌تر و در مقیاس‌های مکانی مختلف (حوضه‌های با اقلیم متفاوت) انجام گیرند تا پایداری اثرات احیای پوشش گیاهی بر پاسخ‌های هیدرولوژیکی با دقت بیشتری بررسی شود.

۲- استفاده از مدل‌های مختلف (مانند SWAT یا MIKE SHE) در کنار HEC-HMS، امکان مقایسه ساختاری عملکرد مدل‌ها و سنجش دقت نتایج را فراهم می‌کند.

۳- پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، اثر متغیرهای اقلیمی بلندمدت و تغییر اقلیم نیز در تحلیل حساسیت گنجانده شود تا رفتار پارامترهای حساس در شرایط آب‌وهوایی آینده نیز قابل پیش‌بینی باشد.

۴- ترکیب داده‌های مشاهداتی میدانی با داده‌های سنجش از دور می‌تواند دقت تعیین پارامترهای ورودی مدل را افزایش دهد و فرآیند واسنجی را بهبود بخشد.

۵- توصیه می‌شود که از نتایج تحلیل حساسیت برای تمرکز بر پارامترهای کلیدی مانند CN و حداکثر نگهداشت در طراحی پروژه‌های حفاظت خاک و آب بهره گرفته شود.

۶- توسعه زیرساخت‌های داده‌برداری شامل ایستگاه‌های هیدرومتری و سنجش بارش، برای ارتقاء کیفیت مدل‌سازی‌های آینده در حوضه‌های کوچک، ضروری است.

References

Almousawi, D., Almedeij, J., & Alsumaiei, A. A. (2020). Impact of urbanization on desert flash flood generation. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(12), 441.

Arlimasita, A., & Lasminto, U. (2020). Sensitivity analysis of rainfall-runoff model in malino sub-watershed. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *10*(4), 1578-1583.

Asadi, M., Jabari, Y., & Hasadi, H. (2020). Flood modeling in arid and semi-arid regions using the HEC-HMS model (Case study: Esteqlal Dam Basin, Minab). *Quantitative Geomorphological Researches*, 8(3), 17-33. [In Persian]

Balkhair, K. S., Masood, A., Almazroui, M., Rahman, K. U., Bamaga, O. A., Kamis, A. S., Ahmed, I., Al-Zahrani, M. I., & Hesham, K. (2018). Groundwater share quantification through flood hydrographs simulation using two temporal rainfall distributions. *Desalination and Water Treatment*, 114, 109-119.

Bayani, H., Bagheri, A., Akbari Nodehi, d., & Karimi, V. (2024). The effect of land use change on runoff using the SWAT model in the Tajen watershed. *Journal of Watershed Management Research*, *15*(2), 77-88. [In Persian]

Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., & Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, *440*, 253-260.

Chow, P. D. VT. (1959). Open-Channel Hydraulics. In: McGraw-Hill, Inc., New York.

Fanta, S. S., & Tadesse, S. T. (2022). Application of HEC–HMS for runoff simulation of Gojeb Watershed, Southwest Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(4), 4687-4705.

Fouladi, N. S., A. & Raziei, T. (2023). Evaluation of the performance of runoff precipitation model in the simulation of flood hydrograph in April 2018; A case study of Karkheh watershed. *Protection of Water and Soil Resources*, *13*(2), 39-52. [In Persian]

Hejazi, M. I., & Markus, M. (2009). Impacts of urbanization and climate variability on floods in Northeastern Illinois. *Journal of Hydrologic Engineering*, *14*(6), 606-616.

Heydari Chenari, F., Fazlollahi, R., Nikzad Tehrani, E. (2022). Calibration and evaluation of the HEC-HMS hydrological model parameters in simulating individual rainfall-runoff events (Case study: Tajen Watershed). *Journal of Watershed Management Research*, *13*(26), 69-81. [In Persian]

Jafari, F., Moradi, H., & Bagheri, A. (2024). Changes in water discharge in eastern watersheds of Mazandaran province under the influence of climate change. *Journal of Watershed Management Research*, *15*(1), 14-28. [In Persian]

Jahanbakhsh Asl, S., Rezaei, B., Rostamzadeh, H., & Alinejad, M.H. (2018). Continuous rainfall-runoff simulation of Shaharchay Basin, Urmia, using the HEC-HMS model. *Hydrogeomorphology*, *5*(16), 101-118. [In Persian]

Kachhawa, N. S., & Agnihotri, P. G. (2024). Identification of Possible Incoming Runoff using Different Combinations of Extreme Rainfall Events in a Semi-arid Context: Banas River, Bisalpur Dam Catchment. *Journal of the Geological Society of India*, *100*(7), 981-995.

Kencanawati, M., Iranata, D., & Maulana, M. A. (2024). An Advanced Empirical NRCS-CN Model Estimation for Ungauged Catchment Insufficient Data. *International Journal on Advanced Science, Engineering & Information Technology*, *14*(2).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]

Khalighi Sigaroudi, S., Zeinati Shoa, T., Salajegheh, A., Kohandel, E., & Mortezaei Farizhendi, Q. (2009). *Semi-distributed rainfall-runoff modeling in low-data watersheds (Case study: Latian Watershed).* National Conference on Watershed Sciences and Engineering (Sustainable Natural Disaster Management), Iran. [In Persian]

Malayeri, S., & Bashirgonbad, M. (2024). Estimation of Runoff Height to Analyze the Flood Production Potential of the Watershed Overlooking Malayer City. *Journal of Watershed Management Research*, *15*(1), 29-39. [In Persian]

Parsamehr, A. H., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, S., & Ahmadali, K. (2024). Modeling spatial-temporal rainfall changes for use in dynamic and distributed rainfall-runoff models. *Journal of Rangeland and Watershed Science*, *77*(1), 33-49. [In Persian]

Razavizadeh, S., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, S., & Jafari, M. (2013). Investigating the impact of land-use changes on flood characteristics using the HEC-HMS model (Case study: Taleghan Watershed). *Journal of Rangeland and Watershed Science*, *66*(3), 373-386. [In Persian]

Razmkhah, H., Saghafian, B., Ali, A.-M. A., & Radmanesh, F. (2016). Rainfall-runoff modeling considering soil moisture accounting algorithm, case study: Karoon III River basin. *Water Resources*, *43*, 699-710.

Soleimani Sardo, F., Soltani Koupai, S., Salajegheh, A. (2014). Selecting appropriate flood risk indices using the HEC-HMS rainfall-runoff model and GIS/RS techniques (Case study: Jiroft Dam Watershed). *Journal of Watershed Management Research*, *4*(8), 90-105. [In Persian]

Soomro, A. G., Babar, M. M., Memon, A. H., Zaidi, A. Z., Ashraf, A., & Lund, J. (2019). Sensitivity of direct runoff to curve number using the SCS-CN method. *Civil Engineering Journal*, *5*, 2738-2746.

Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2019). Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrology*, *6*(1), 21.

USDA, U. (1986). Urban hydrology for small watersheds. *Technical Release*.

Yu, X., & Zhang, J. (2023). The application and applicability of HEC-HMS model in flood simulation under the condition of river basin urbanization. *Water*, *15*(12), 2249.

Yuan, W., Lu, L., Song, H., Zhang, X., Xu, L., Su, C., Liu, M., Yan, D., & Wu, Z. (2022). Study on the early warning for flash flood based on random rainfall pattern. *Water Resources Management*, *36*(5), 1587-1609.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-31]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1305]