ارزیابی اثربخشی اقدامات آبخیزداری در کاهش رواناب و رسوب با رویکرد مدل سازی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز الخلج

اولدوز بخشی‌راد*، ابوالفضل مختاری‌اصل

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری آذربایجان‌شرقی، تبریز، ایران

*مسئول مکاتبه، رایانامه: o.bakhshi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

DOI: 10.30470/jsp.2026.2090995.1035

چکیده

ارزیابی اثربخشی اقدامات آبخیزداری در کاهش رواناب، فرسایش و رسوب از مهم‌ترین موضوعات مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود. هدف این پژوهش بررسی تأثیر عملیات مکانیکی آبخیزداری بر کاهش دبی اوج سیلاب و رسوب در حوزه آبخیز الخلج در استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و MPSIAC است. در این تحقیق، ابتدا دبی اوج سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد. همچنین به‌منظور ارزیابی تغییرات فرسایش و رسوب، مدل MPSIAC در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که اجرای سازه‌های حفاظتی موجب کاهش قابل توجه دبی اوج سیلاب در تمامی زیرحوزه‌ها گردید. بیشترین کاهش دبی اوج در دوره بازگشت ۲ ساله در زیرحوزه‌های تیکمه‌داش با ۸۸ و الخلج با ۸۹ درصد و کمترین کاهش در زیرحوزه قزل‌احمد با ۳۲ درصد مشاهده شد. نتایج نشان داد با افزایش دوره بازگشت، میزان اثربخشی عملیات کاهش می‌یابد. بررسی هیدروگراف‌ها نیز بیانگر کاهش ارتفاع پیک و افزایش زمان تمرکز پس از اجرای عملیات آبخیزداری بود. نتایج مدل MPSIAC نشان داد که مقدار فرسایش و رسوب حوزه ۴۰/۸۱ درصد کاهش یافته است. بیشترین کاهش فرسایش و رسوب مربوط به زیرحوزه تیکمه‌داش با ۴۳/۱۵ درصد بود. نتایج این پژوهش نشان داد که عملیات مکانیکی آبخیزداری نقش مؤثری در کنترل رواناب، کاهش فرسایش و تعدیل پاسخ هیدرولوژیکی حوزه دارد و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب در مدیریت حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: دبی اوج سیلاب، فرسایش، HEC-HMS، MPSIAC

Assessment of the effectiveness of Watershed Management Measures in Reducing Runoff and Sediment Using a Hydrological Modeling Approach in Alkhalaj Watershed

O. Bakhshi Rad*, A. Mokhtari Asl

Department of Watershed Management, Natural Resources and Watershed Management Organization, East Azerbaijan, Tabriz, Iran
*Corresponding Author, Email: o.bakhshi@znu.ac.ir
Received: June 2026 Accepted: Julay 2026
DOI: 10.30470/jsp.2026.2090995.1035

Extended Abstract

Aim
Summer squash (Cucurbita pepo L.) is a valuable vegetable crop, but its production is severely threatened by water deficit stress, particularly in arid and semi-arid regions like Iran. This stress disrupts various physiological and biochemical processes, leading to reduced growth and yield. The application of organic compounds, such as humic acid, has emerged as a promising strategy to mitigate the adverse effects of drought stress. Humic acid can improve soil structure, enhance water retention, and stimulate plant antioxidant defense systems. This study was therefore conducted to investigate the effects of foliar-applied humic acid on the growth, yield, water use efficiency (WUE), and physiological responses of summer squash (cv. Zucchino tondo chiaro di Nizza) under different levels of water deficit stress.

Materials and Methods
The field experiment was carried out during the spring and summer of 2019 at the Research Farm of the Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran. The study employed a split-plot design based on a randomized complete block arrangement with three replications. Each experimental unit consisted of 6 plants. The main factor was irrigation level, which comprised three treatments: 100% (well-watered control), 80%, and 60% of the crop's water requirement (ETc). The sub-factor was the foliar application of humic acid (trade name Humax, containing 79% humic acid, 12% K_2O, and 12% fulvic acid) at three concentrations: 0 (control), 150, and 300 mg L^{-1}. Plants were grown using a drip-tape irrigation system, and the amount of water applied to each treatment was calculated based on the reference evapotranspiration (ET_0) using the FAO-Penman-Monteith equation, adjusted for crop coefficients and irrigation interval. The total water applied to the 100%, 80%, and 60% ETc treatments over the growing season was 4030, 3284, and 2583 m^3 ha^{-1}, respectively. Foliar humic acid applications were initiated with the appearance of the first female flowers and repeated twice more at 10-day intervals.
At mid-season, leaf area was measured using a leaf area meter. At the end of the growing season, plant height and total fruit yield (kg ha^{-1}) were recorded. Water use efficiency (WUE) was calculated as the ratio of total fruit yield to total water applied. For physiological and biochemical analyses, leaf samples were collected to determine total chlorophyll content, leaf proline content, membrane stability index (MSI), and the activities of the antioxidant enzymes catalase (CAT) and peroxidase (POX). Total chlorophyll was extracted using 80% acetone and measured spectrophotometrically. Proline content was determined using the ninhydrin method. The membrane stability index was calculated based on electrolyte leakage measurements. Antioxidant enzyme activities were assayed using standard spectrophotometric methods. All collected data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software, and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at a 1% or 5% significance level.

Results
The results demonstrated that water deficit stress significantly affected all evaluated traits. Compared to the well-watered control (100% ETc), the 60% ETc treatment resulted in a significant reduction in plant height (by 22.9%) and leaf area (by 51.8%). Conversely, leaf dry matter percentage increased under severe drought stress. The application of humic acid, particularly at 300 mg L^{-1}, significantly ameliorated these negative effects, leading to the highest single leaf area (969.78 cm^2) under well-watered conditions. Foliar humic acid application, however, did not significantly affect plant height.
Fruit yield was severely reduced by water deficit. The 60% ETc treatment led to a 58% reduction in total yield compared to the 100% ETc treatment. However, humic acid application significantly enhanced yield across all irrigation levels. The maximum fruit yield (32950 kg ha^{-1}) was recorded for plants treated with 300 mg L^{-1} humic acid and irrigated at 100% ETc, while the minimum (12114.9 kg ha^{-1}) was observed in the 60% ETc treatment with no humic acid. Under the 80% and 60% ETc stress conditions, the application of 300 mg L^{-1} humic acid increased fruit yield by 27.2% and 33.3%,

respectively, compared to the non-treated stressed plants. Water use efficiency followed a similar pattern, with the highest value (8.17 kg m^{-3}) observed in the 100% ETc + 300 mg L^{-1} humic acid treatment and the lowest (4.77 kg m^{-3}) in the 60% ETc + 0 mg L^{-1} humic acid treatment.

Physiological and biochemical parameters also showed marked responses to both drought stress and humic acid application. Total chlorophyll content declined under drought stress, with the 60% ETc treatment showing a decrease compared to the control. However, humic acid application significantly increased chlorophyll content, especially under well-watered and moderate stress conditions. The maximum chlorophyll content (2.27 mg $100g^{-1}$ FW) was obtained with 300 mg L^{-1} humic acid under 100% ETc.

Drought stress led to a significant accumulation of proline, an important osmotic regulator. Proline content increased by 45.5% under severe water deficit (60% ETc) compared to the control. Foliar application of humic acid further enhanced proline accumulation, with the highest level (9.68 mg g^{-1} FW) recorded in the 60% ETc + 300 mg L^{-1} humic acid treatment. Similarly, the membrane stability index (MSI) was significantly reduced by drought stress, decreasing from 77.05% in the control to 53.47% under 60% ETc. However, humic acid application, especially at 300 mg L^{-1}, effectively improved MSI under all irrigation levels, suggesting better membrane integrity and reduced electrolyte leakage.

The activities of antioxidant enzymes, catalase (CAT) and peroxidase (POX), were significantly increased under drought stress, indicating an active plant defense response against oxidative damage. The application of humic acid further boosted the activities of these enzymes, particularly under severe stress conditions. The highest CAT activity (10.93 µmol H_2O_2 g^{-1} FW. Min^{-1}) was recorded in the 60% ETc + 300 mg L^{-1} humic acid treatment, while maximum POX activity was observed in plants treated with 300 mg L^{-1} humic acid under 60% and 80% ETc.

Conclusion

Based on the results of this study, it can be concluded that water deficit stress significantly impairs the vegetative growth and fruit yield of summer squash by disrupting key physiological processes such as chlorophyll synthesis and membrane stability. However, the foliar application of humic acid proved to be an effective strategy for mitigating the adverse effects of drought stress. The application of 300 mg L^{-1} humic acid was particularly effective. It enhanced the plant's antioxidant defense system (by increasing CAT and POX activity), improved osmotic adjustment (by increasing proline accumulation), and protected cellular membranes (by increasing MSI). These physiological improvements led to better leaf area maintenance, higher chlorophyll content, and ultimately, significantly improved fruit yield and water use efficiency under both moderate and severe water deficit conditions. Therefore, we recommend foliar application of 300 mg L^{-1} humic acid as a viable management practice to enhance the resilience, productivity, and water productivity of summer squash in regions facing water scarcity.

Keywords: Erosion, HEC-HMS, MPSIAC, Peak flood discharge

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش شدت فرسایش خاک، وقوع سیلاب‌های مخرب و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز، به یکی از چالش‌های اساسی مدیریت منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه خشک تبدیل شده است (Morgan, 2005). این فرایندها عمدتاً تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، چرای بی‌رویه دام و افزایش فعالیت‌های انسانی بوده و موجب افزایش رواناب سطحی، افزایش دبی اوج سیلاب و انتقال حجم قابل توجهی از رسوبات به شبکه آبراهه‌ها و مخازن آبی می‌شوند (Toy et al., 2002; Morgan, 2005). در نتیجه، پیامدهایی نظیر کاهش حاصلخیزی خاک، تشدید خطر سیلاب‌های مخرب، کاهش عمر مفید سازه‌های آبی و افزایش خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی رخ می‌دهد (Ajao, 2024; Azizian et al., 2019). به‌منظور کاهش اثرات مخرب سیلاب و کنترل فرسایش، اجرای عملیات آبخیزداری به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای مدیریتی مورد توجه قرار گرفته است (Allawi et al., 2023). عملیات مکانیکی آبخیزداری شامل احداث بندهای خاکی، گابیونی، سنگ و ملات، چک‌دم‌ها و سایر سازه‌های کنترلی است که با کاهش سرعت جریان، افزایش زمان تمرکز، تقویت نفوذ آب در خاک و کاهش توان فرسایندگی رواناب، نقش مهمی در کنترل سیلاب و کاهش تولید رسوب ایفا می‌کنند (Mier-Valderramaet al., 2024). ارزیابی علمی میزان اثربخشی این عملیات می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز اهمیت زیادی داشته باشد (Nourali and Ghahraman, 2016; Nouri and Vahid, 2025). در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و فرسایش خاک برای بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری گسترش یافته است (Yuan et al., 2019; BhumikaUniya, 2020). مدل HEC-HMS[1] یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی بارش ـ رواناب است که قابلیت مناسبی در برآورد دبی اوج سیلاب و حجم رواناب در شرایط مختلف دارد (USACE, 2000). همچنین مدل MPSIAC[2] به‌عنوان یکی از روش‌های تجربی معتبر، برای برآورد فرسایش و رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Motaghian et al., 2023). ترکیب این دو مدل می‌تواند امکان ارزیابی همزمان تغییرات هیدرولوژیکی و رسوبی ناشی از اجرای عملیات آبخیزداری را فراهم سازد.

مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی اثر عملیات آبخیزداری بر کاهش رواناب، فرسایش و رسوب انجام شده است. نتایج اغلب این پژوهش‌ها نشان‌دهنده نقش مؤثر اقدامات مکانیکی و مدیریتی در کنترل فرآیندهای هیدرولوژیکی و رسوبی حوزه‌های آبخیز می‌باشد. بر اساس مطالعات جعفرزاده و کریمی‌سنگ‌چین (Jaafarzadeh and KarimiSangchini, 2025) در حوزه آبخیز آسیابرود شهرستان چالوس بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری، میزان فرسایش ویژه حوزه برابر ۳/۸۹ تن بر هکتار بر سال و میزان رسوب ویژه نیز ۱/۸۷تن بر هکتار بر سال برآورد شد که نشان دهنده افزایش زمان تمرکز حوزه و کاهش دبی پیک و حجم سیلابی به میزان ۱۰۷۸/٤۹ میلیون مترمکعب بود. متعاقباً با کاهش حجم سیلابی، خسارات مالی ناشی از سیل نیز در این حوزه کاهش یافت. نوری و وحید (Nouri and Vahid, 2025) با ارزیابی اثرات سازه های آبخیزداری در کاهش رسوب ورودی به مخزن سد زاینده رود با استفاده از مدل FAO نشان داد حجم ذخیره رسوب توسط مجموع بندهای آبخیزداری تقریباً معادل ٤ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۸۰ و یا ٥ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۹۰ در سد زاینده رود بوده است که نشان دهنده اهمیت این سازه ها در مدیریت رسوب رودخانه است. مطالعات متقیان و

[1] Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System

[2] Modified Pacific South-West Inter Agency Committee

همکاران (Motaghian et al., 2023) برای بررسی اثرات اقدامات آبخیزداری در حوزه آبخیز بادکش شهرستان میناب با استفاده از مدل MPSIAC نشان داد مقدار فرسایش ویژه از ۸/۷٤ تن در هکتار به ۷/٤٦ تن در هکتار رسیده است و میزان رسوب نیز کاهش محسوسی داشته است. بای و همکاران (Bai et al., 2020) در پژوهشی پس از برآورد میزان فرسایش و منشأیابی رسوبات حاصل از فرسایش اراضی بالادست در فلات لسی چین در ۷ تا ۲٦ رگبار بیان کردند میزان کل فرسایش، ٤/۲۰ میلیون تن بوده که سازه های اصلاحی در بستر آبراهه به مقدار۲٦/۳٦ درصد معادل۱/۱۱میلیون تن را در مخازن خود حفظ کرده اند. بری‌هان و همکاران (Berihun et al., 2020) با بررسی تأثیر عملیات حفاظت آب و خاک بر رواناب و رسوب، گزارش کردند که اجرای اقدامات حفاظتی موجب کاهش ۲۸ تا ٤۰ درصدی رواناب و ٤۳ تا ٦۸ درصدی رسوب گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که اقدامات مکانیکی تأثیر بیشتری بر کاهش رسوب نسبت به کاهش رواناب دارند (Hu and Shrestha, 2020). با شبیه سازی رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز غرب ایالات متحده امریکا با استفاده از مدل HEC-HMS تغییرات دبی اوج سیلاب را در زمان قبل و بعد از اقدامات حفاظتی بررسی نمود و نشان داد اقدامات حفاظتی با کاهش دبی اوج و حجم سیلاب در پوشش گیاهی و کاربری زمین نیز نقش موثری دارد. نورعلی و قهرمان (Nourali and Ghahraman, 2016) به کمک مدل HEC-HMS اثربخشی اقدامات آبخیزداری در حوزه آبخیز گوش و بهره در استان خراسان را ارزیابی نمودند و نشان دادند که انجام عملیات بیولوژیکی و مکانیکی در این حوزه باعث کاهش دبی اوج سیلاب تا ۳٦/۲۱ درصد و کاهش حجم سیلاب تا ۳٤/۷۸ درصد در دوره‌های بازگشت مختلف شده است. به‌طورکلی بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهند که اجرای عملیات مکانیکی آبخیزداری می‌تواند موجب کاهش معنی‌دار دبی پیک سیلاب، کاهش حجم رواناب و کنترل فرسایش و رسوب شود. با این حال، میزان اثربخشی این عملیات به عواملی نظیر ویژگی‌های فیزیوگرافی حوزه، نوع سازه‌ها، شرایط اقلیمی، شدت بارندگی و نحوه مدیریت حوزه وابسته است.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه اثرات اقدامات آبخیزداری، اغلب پژوهش‌های پیشین به‌صورت جداگانه به بررسی اثرات هیدرولوژیکی یا رسوبی پرداخته‌اند و مطالعات محدودی به ارزیابی همزمان تغییرات رواناب، دبی اوج سیلاب و فرسایش و رسوب در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات پرداخته‌اند. همچنین در بسیاری از حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک، به‌ویژه مناطقی با استقرار سازه‌های ترکیبی سنگ و ملات و گابیونی، هنوز ابهاماتی در خصوص میزان اثربخشی نسبی این اقدامات وجود دارد. نوآوری اصلی این پژوهش، ارزیابی همزمان اثر عملیات مکانیکی آبخیزداری بر پاسخ هیدرولوژیکی و رسوبدهی حوزه با استفاده تلفیقی از مدل‌های HEC-HMS و MPSIAC در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات است. همچنین استفاده از داده‌های واقعی سازه‌های سنگ و ملات و تحلیل همزمان دبی اوج، هیدروگراف و نقشه‌های فرسایش خاک، از ویژگی‌های متمایز این پژوهش محسوب می‌شود.

هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر عملیات مکانیکی آبخیزداری بر کاهش رواناب و رسوب در حوزه آبخیز الخلج است. در این مطالعه، تغییرات دبی اوج سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از مدل HEC-HMS و تغییرات فرسایش و رسوب با استفاده از مدل MPSIAC و نقشه اشکال فرسایش خاک، در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت سیلاب، حفاظت خاک و برنامه‌ریزی طرح‌های آبخیزداری مورد استفاده قرار گیرد.

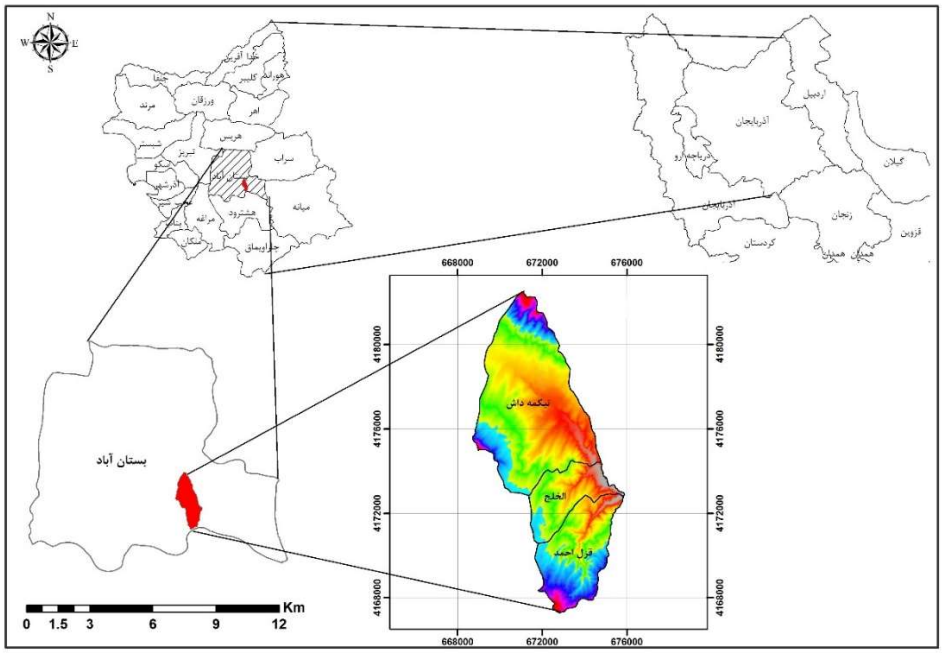
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز الخلج با مساحت ۵۷۰۷/۵ هکتار در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بستان آباد قرار دارد. در این حوزه سه روستای الخلج، تیکمه داش و قزل احمد واقع شده است. حوزه الخلج از لحاظ هیدرولوژی به سه زیرحوزه تقسیم می‌گردد که نهایتاً تمامی آبراهه‌های حوزه به رودخانه شهرچای ملحق می‌شوند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوزه الخلج و زیرحوزه‌های آن را در استان و کشور و جدول ۱ مشخصات زیرحوزه‌ها را نشان می‌دهد. مرتفع‌ترین نقطه این حوزه در نواحی شمالی در زیرحوزه تیکمه داش با ارتفاع ۱۹۷۷ متر و پست‌ترین نقطه نیز به خروجی در ضلع شرقی در زیرحوزه الخلج با ارتفاع ۱۸۸۰ متر منتهی می‌شود. شیب متوسط زیرحوزه قزل احمد با ۱۰/۵ درصد کمترین و تیکمه داش با ۱۹/٦ درصد بیشترین شیب حوزه را دارا می‌باشد. اقلیم منطقه با توجه به طبقه‌بندی آمبرژه نیمه خشک سرد تا خشک سرد بوده و با توجه به نمودار آمبروترمیک، منطقه مطالعاتی دارای ٤ ماه خشک و ۸ ماه مرطوب است.متوسط بارندگی حوزه ۳۸۷/٦ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین مقدار بارندگی مربوط به فروردین ماه با مقدار ۱۲۵/۲ میلی‌متر می‌باشد. خصوصیات چینه‌شناسی منطقه از قدیم به جدید شامل انواع رخساره‌های سنگی و رسوبی از سنگ‌های آذرین ترشیاری تا کوارترنر است. کاربری غالب منطقه مرتع، زراعت آبی و دیم است.

جدول ۱- مشخصات زیرحوزه‌های حوزه آبخیز الخلج بستان آباد

ردیف	زیرحوزه	مساحت (هکتار)	ارتفاع (متر)	شیب متوسط وزنی (درصد)	بارندگی (میلی‌متر)
۱	تیکمه داش	۳۳٤۷/۵	۱۹۷۷	۱۹/٦	۳۹۰/۱
۲	الخلج	۱۰۱۷/۵	۱۸۸۰	۱٤/۵	۳٤۲/۱
۳	قزل احمد	۱۳٤۲/۵	۱۹٦۱	۱۰/۵	۳۸۲/۲
٤	کل حوزه	۵۷۰۷/۵	۱۹۷۲	۱٦/۵۵	۳۸۷/٦



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه و زیرحوزه‌ها در ایران، استان آذربایجان شرقی و شهرستان بستان آباد

در حوزه مورد مطالعه تعداد ۹۶ سازه سنگ و ملات و گابیون به‌منظور کاهش سرعت جریان و مهار فرسایش اجرا شده است. این سازه‌ها عمدتاً در مسیر آبراهه‌های اصلی و فرعی حوزه احداث شده است. شکل ۲ تصاویر تعدادی از سازه‌های سنگ و ملات و گابیونی اجرا شده در حوزه الخلج را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد زیاد سازه‌ها، مشخصات سازه‌ها به‌صورت آماری در جدول ۲ نمایش داده شده است.

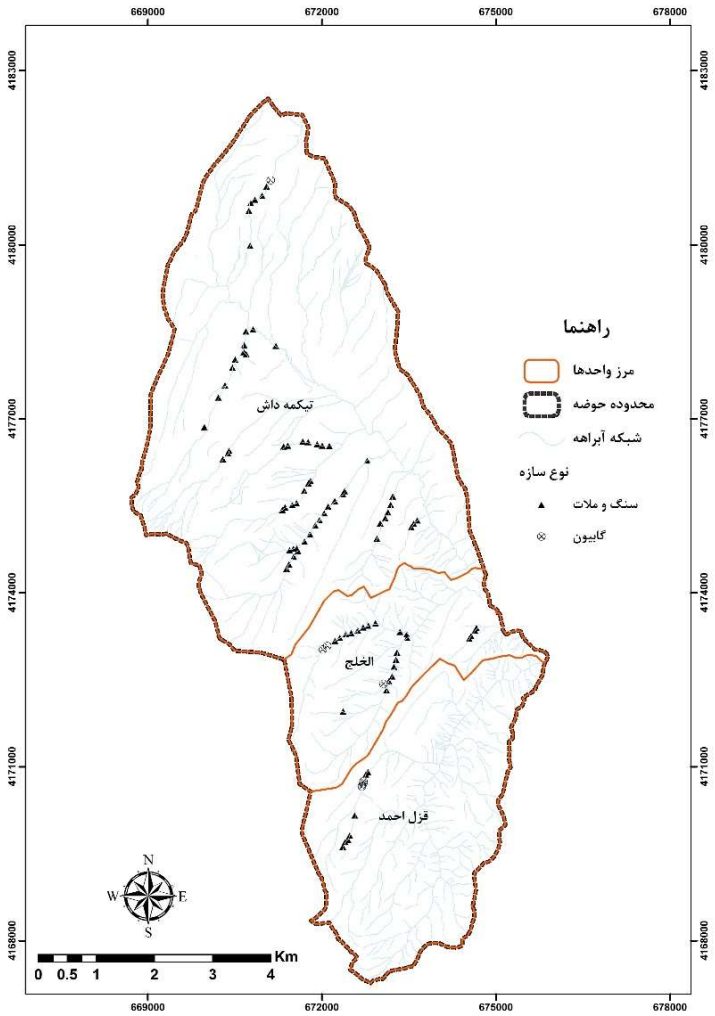


شکل ۲- تصاویری از اجرای سازه‌های سنگ و ملات و گابیون در حوزه آبخیز الخلج

جدول ۲- مشخصات آماری سازه‌های اجرا شده در حوزه آبخیز الخلج

مشخصات سازه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
عرض کف آبراهه در محل سازه (متر)	۱/۵	۱۸	۵/۹۸	۲/۹۷	٤۹/۵۸
طول تاج سازه (متر)	۳	۳۰	۱۳/۷۵	٤/۸۸	۳۵/۵۳
عرض آبراهه در انتهای مخزن (متر)	۱/۵	۱٤	٤/۰۹	۱/۹۲	٤۷/۰٦
ارتفاع سازه (متر)	۱	۵	۲/٤۰	۰/٦۹	۲۸/۸۷
ارتفاع خالی از رسوب فعلی (متر)	۰	۳/۸	۱/۵۱	۰/۷٤	٤۹/۰۲
طول دریاچه مخزن (متر)	۲	۷۰	۲۱/۱٤	۱۳/٦۰	٦٤/۳۵
کل حجم سازه (مترمکعب)	٤	۳۲۵۵	۲۵۲/٤۸	۳۹٤/۱۱	۱۵٦/۰۹
حجم خالی از رسوب فعلی (مترمکعب)	۰	۲۷٤۹	۱۵۷/۰٤	۳۱۹/۳۲	۲۰۳/۳۳

بررسی آماری مشخصات سازه‌های اجرا شده نشان داد که این سازه‌ها که اغلب به شکل سنگ و ملات و در مواردی گابیونی می‌باشد، از نظر ابعاد هندسی و ظرفیت ذخیره‌سازی دارای تنوع قابل توجهی هستند. میانگین ارتفاع سازه‌ها ۲/٤۰ متر و میانگین طول تاج ۱۳/۷۵ متر است، که این موضوع نشان‌دهنده طراحی سازه‌ها متناسب با شرایط مورفولوژیکی آبراهه‌های حوزه می‌باشد. ضریب تغییرات بالا در برخی پارامترها نظیر حجم سازه و طول دریاچه مخزن، بیانگر ناهمگنی شرایط هیدرولیکی محل اجرا و تطبیق ابعاد سازه‌ها با ویژگی‌های توپوگرافی و آبراهه‌ای منطقه است. شکل ۳ پراکنش مکانی سازه‌ها در حوزه آبخیز الخلج را نشان می‌دهد.



شکل ۳- پراکنش مکانی سازه‌های اجرا شده در حوزه آبخیز الخلج

جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی وزارت نیرو واقع در فاصله نزدیک به حوزه استفاده شد. دوره آماری ۲۰ ساله برای مطالعه استفاده گردید. مشخصات مربوط به سازه‌های آبخیزداری از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری، داده‌های هواشناسی از اداره کل هواشناسی و داده‌های هیدرولوژیکی از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ شد.

شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با مدلHEC-HMS

به‌منظور بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر رواناب و دبی اوج سیلاب، از مدل HEC-HMS استفاده شد. این مدل یکی از پرکاربردترین مدل‌های بارش ـ رواناب بوده که قابلیت شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز را دارا می‌باشد در این تحقیق، ابتدا حوزه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و اطلاعات توپوگرافی به زیرحوزه‌های مختلف تقسیم شد. سپس پارامترهای مورد نیاز مدل شامل مساحت زیرحوزه‌ها، زمان تمرکز، شماره منحنی [1](CN)، طول آبراهه اصلی و شیب متوسط استخراج گردید (USACE, 2001). به‌منظور تحلیل سیلاب، دبی اوج رواناب برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در دو حالت قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری محاسبه شد. پس از اجرای مدل، هیدروگراف سیلاب و مقادیر دبی اوج استخراج گردید. درصد کاهش دبی اوج سیلاب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد که در آن E درصد کاهش دبی اوج سیلاب، Q_b دبی اوج قبل از اجرای عملیات آبخیزداری بر حسب مترمکعب بر ثانیه و Q_a دبی اوج بعد از اجرای عملیات آبخیزداری بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.

$$E=\frac{Qb-Qa}{Qb}\times 100$$ رابطه ۱

برآورد فرسایش و رسوب با مدل MPSIAC

به‌منظور ارزیابی میزان فرسایش و رسوب حوزه، از مدل اصلاح‌شده PSIAC به نام مدل MPSIAC استفاده شد. این مدل بر اساس ۹ عامل مؤثر بر فرسایش و رسوب شامل زمین‌شناسی سطحی، خاک، اقلیم، رواناب، توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، فرسایش سطحی و فرسایش آبراهه‌ای عمل می‌کند. برای هر یک از عوامل مذکور، نقشه‌های مربوط تهیه و امتیازدهی انجام شد. سپس مجموع امتیازات برای هر واحد کاری محاسبه و مقدار رسوب ویژه حوزه و رسوب کل حوزه در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری برآورد گردید. مقدار فرسایش ویژه حوزه تعیین و به‌منظور تحلیل اثر عملیات آبخیزداری، مقادیر فرسایش و رسوب در دو دوره قبل و بعد از اجرای عملیات با یکدیگر مقایسه شد و درصد کاهش فرسایش و رسوب محاسبه گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی تغییرات بارش–رواناب از نرم افزار HEC-HMS ویرایش ٤ و برای محاسبه رسوب از مدل MPSIAC استفاده شد. پس از اجرای مدل‌های HEC-HMS و MPSIAC، نتایج حاصل در قالب جداول و نمودارها تحلیل شدند. تغییرات دبی اوج سیلاب، مقدار رواناب، فرسایش و نسبت تحویل رسوب در شرایط قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین اثربخشی عملیات مکانیکی آبخیزداری در کنترل رواناب و کاهش رسوب در دوره‌های بازگشت مختلف ارزیابی شد. نمودارها با استفاده از برنامه Excel و نقشه‌های مورد استفاده با بهره‌گیری از نرم‌افزار Arc Map ویرایش 10.8 تهیه و پردازش شدند.

نتایج و بحث

تغییرات هیدرولوژیکی

نتایج مدل HEC-HMS نشان داد که اجرای عملیات مکانیکی آبخیزداری موجب کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تمرکز در تمامی زیرحوزه‌ها شده است (جدول ۳). این تغییرات بیانگر کاهش پاسخ سریع حوزه به بارش است. مقایسه مقادیر دبی اوج قبل و بعد از اجرای عملیات نشان می دهد که سازه‌های آبخیزداری از طریق کاهش سرعت رواناب، افزایش زمان تمرکز و افزایش نفوذ آب در خاک، نقش مؤثری در کنترل سیلاب ایفا کرده‌اند.

کاهش محسوس دبی اوج سیلاب در زیرحوزه‌های مورد مطالعه را می‌توان ناشی از عملکرد سازه‌های آبخیزداری در کاهش انرژی جریان، ذخیره موقت رواناب و افزایش زمان تمرکز دانست. بررسی نتایج نشان داد که اثربخشی عملیات در دوره‌های بازگشت کوتاه‌تر بیشتر

[1] Curve number

بوده است، به‌گونه‌ای که در رخدادهای ۲ و ۵ ساله بیشترین کاهش مشاهده شد. این موضوع بیانگر آن است که سازه‌های آبخیزداری در مهار سیلاب‌هایی با شدت متوسط کارایی بیشتری داشته و در رخدادهای بسیار بزرگ به‌دلیل محدودیت ظرفیت ذخیره و عبور جریان، کارایی نسبی کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج مطالعه چمن‌پیرا و روغنی (Chamanpira and Roughani, 2018) که توانایی ذخیره‌سازی رواناب و کاهش دبی اوج سیلاب در حوزه آبخیز دادآباد لرستان در دوره بازگشت‌های پایین را به مراتب بیشتر از دوره‌های بازگشت طولانی گزارش دادند، مطابقت دارد. نجفی‌نژاد و همکاران (Najafinejad et al., 2018) نیز در حوزه آبخیز رامیان بیشترین کاهش دبی اوج و حجم جریان را در دوره بازگشت‌های پایین گزارش نمودند و کاهش تأثیر اقدامات آبخیزداری بر سیلاب را با افزایش دوره بازگشت تایید کردند.

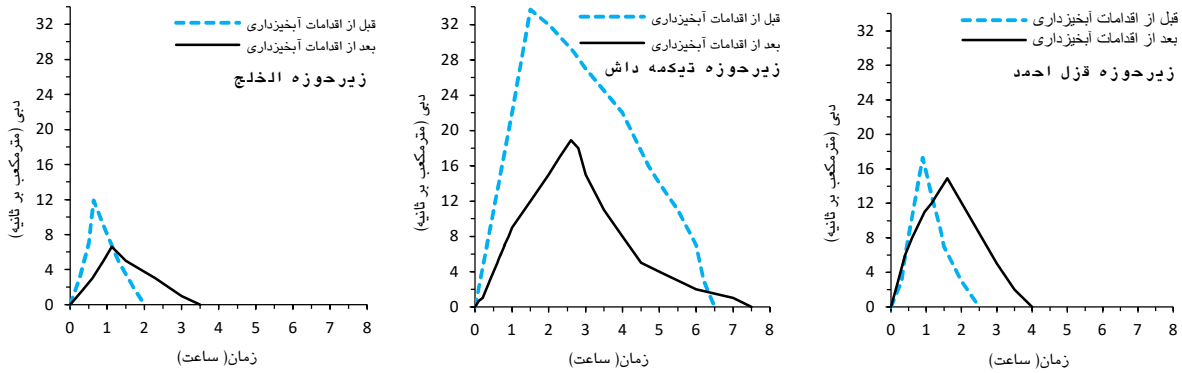
مقایسه زیرحوزه‌ها نشان داد که بیشترین کارایی عملیات آبخیزداری در زیرحوزه‌های تیکمه‌داش و الخلج مشاهده شد، در حالی‌که زیرحوزه قزل‌احمد درصد کاهش کمتری را نشان داد. این تفاوت می‌تواند ناشی از اختلاف در تراکم سازه‌ها، شرایط شیب، خصوصیات آبراهه‌ای و الگوی تولید رواناب در زیرحوزه‌های مختلف باشد. نتایج حاضر با یافته‌های خو و همکاران (Xu et al., 2013) در چین و دبیری و همکاران (Dabiri et al., 2013) در استان فارس که بیان کردند اقدامات مکانیکی آبخیزداری باعث کاهش دبی اوج و حجم سیلاب می‌شود، همخوانی دارد.

جدول ۳- درصد کاهش دبی اوج سیلاب ناشی از اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه آبخیز الخلج

دبی اوج سیلاب	زیرحوزه	دوره بازگشت (سال)					
		۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
بدون لحاظ اثر سازه‌ها	تیکمه داش	۷/۸	۱۵/۸	۲۱/۳	۲۹/۲	۳۳/۷	۳۹/۱
	الخلج	۲/۸	۵/٦	۷/۵	۱۰/۳	۱۱/۹	۱۳/۸
	قزل احمد	٤	۸/۱	۱۰/۹	۱۵	۱۷/۳	۲۰
با لحاظ اثر سازه‌ها	تیکمه داش	۰/۹	۲/۸	٦	۱۳/۲	۱۸/۹	۲۳/٤
	الخلج	۰/۳	۱	۲/۱	٤/٦	٦/٦	۸/۳
	قزل احمد	۲/۷	۵/۸	۸/٤	۱۲/۳	۱٤/۹	۱۸/٦
درصد کاهش دبی پیک سیلاب	تیکمه داش	۸۸/٤٦	۸۲/۲۷	۷۱/۸۳	۵٤/۷۹	٤۳/۹۱	٤۰/۱۵
	الخلج	۸۹/۲۸	۸۲/۱٤	۷۲	۵۵/۳۳	٤٤/۵۳	۳۹/۸۵
	قزل احمد	۳۲/۵	۲۸/۳۹	۲۲/۹۳	۱۸	۱۳/۸۷	۷

هیدروگراف سیلاب

مقایسه هیدروگراف‌های قبل و بعد از اجرای عملیات نشان داد که در تمام زیرحوزه‌های مورد مطالعه ارتفاع دبی اوج کاهش و زمان تمرکز افزایش یافته است که بیانگر تعدیل پاسخ هیدرولوژیکی حوزه در اثر اجرای سازه‌های سنگ و ملات می‌باشد. شکل ٤ هیدروگراف زیرحوزه‌های مورد مطالعه را در هر دو شرایط قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری نشان می‌دهد. بیشترین کاهش دبی اوج و افزایش زمان رسیدن به دبی اوج در زیرحوزه تیکمه داش مشاهده شد که با توجه به مساحت زیاد این زیرحوزه نسبت به بقیه زیرحوزه‌ها و تراکم سازه‌های آبخیزداری در این زیرحوزه قابل توجیه است. مطالعات بومیکایونیال و همکاران (BhumikaUniyal et al., 2020) نیز نشان داد اجرای سازه های مکانیکی با افزایش زمان تمرکز و کاهش دبی اوج سیلاب تأثیر محسوسی بر کاهش رواناب و رسوب دارد که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد.



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف سیلاب زیرحوزه‌های مورد مطالعه قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری در دوره بازگشت ۵۰ ساله

جدول۴- مقادیر دبی اوج زیرحوزهای مورد مطالعه در دوره های بازگشت ۵۰ ساله قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری

زیرحوزه	قبل از عملیات آبخیزداری			بعد از اجرای عملیات آبخیزداری		
	زمان (ساعت)	دبی اوج (مترمکعب/ثانیه)	دوره بازگشت (سال)	زمان (ساعت)	دبی اوج(مترمکعب/ثانیه)	دوره بازگشت (سال)
تیکمه داش	۱/۵۰	۳۳/۷	۵۰	۲/٦٦	۱۸/۹	۵۰
الخلج	۰/٦۳	۱۱/۹	۵۰	۱/۱۲	٦/٦	۵۰
قزل احمد	۰/۹۰	۱۷/۳	۵۰	۱/٦۰	۱٤/۹	۵۰

تغییر شکل هیدروگراف پس از اجرای عملیات آبخیزداری بیانگر کاهش پاسخ سریع حوزه به رخدادهای بارندگی است. سازه‌های اجرا شده با ایجاد ذخیره موقت رواناب، کاهش سرعت جریان و افزایش فرصت نفوذ، موجب کاهش شیب صعودی هیدروگراف و تأخیر در زمان رسیدن به دبی اوج شده‌اند. همچنین پهن‌تر شدن هیدروگراف بعد از عملیات نشان‌دهنده توزیع زمانی مناسب‌تر رواناب و کاهش تمرکز جریان در خروجی حوزه می‌باشد. این شرایط می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات ناشی از سیلاب در پایین‌دست حوزه داشته باشد. جدول ٤ مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج را در دوره بازگشت ۵۰ سال برای زیرحوزه‌های مورد مطالعه در زمان قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری نشان می‌دهد. این مطالعه با نتایج پژوهش نبی‌پور و همکاران (Nabipoor et al., 2014) که اثر مثبت عملیات آبخیزداری روی همه مؤلفه‌های هیدروگراف شامل زمان تداوم، زمان فروکش و زمان رسیدن به دبی اوج را گزارش نمودند مطابقت دارد.

فرسایش و رسوب

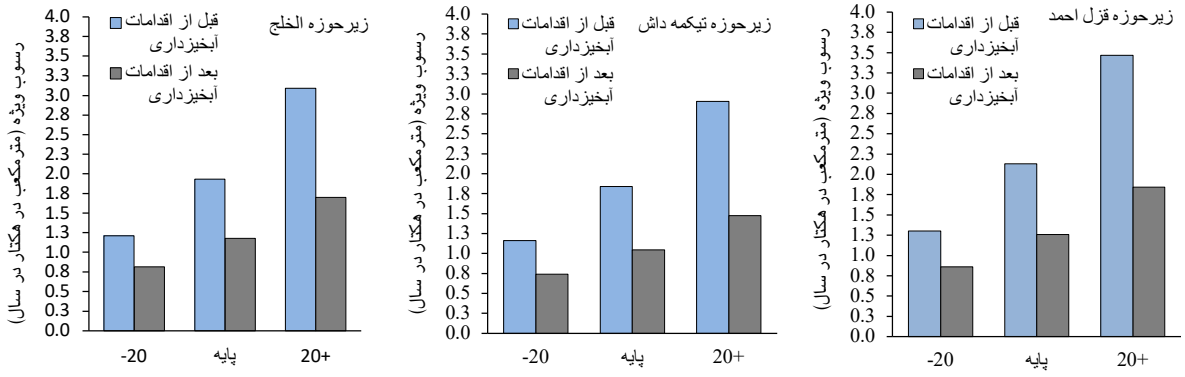
بر اساس نتایج به دست آمده مقدار فرسایش و رسوب در کل حوزه پس از اجرای عملیات آبخیزداری کاهش یافته است. بررسی امتیازات مدل MPSIAC نشان داد که بیشترین تغییرات مربوط به عوامل رواناب، فرسایش آبراهه‌ای و فرسایش سطحی بوده است. اجرای سازه‌های آبخیزداری باعث کاهش شدت جریان و کنترل فرسایش در مسیر آبراهه‌ها شده و در نتیجه امتیاز نهایی فرسایش حوزه کاهش یافته است. هرچند کلاس رسوب‌دهی حوزه در سطح متوسط (III) باقی ماند (امتیاز ۵۰ تا ۷۵)، اما کاهش امتیاز نهایی MPSIAC از ٦۵/٤٦ به ۵۰/۷۵ برای کل حوزه بیانگر کاهش شدت فرسایش و بهبود شرایط هیدرولوژیکی حوزه پس از اجرای عملیات آبخیزداری است. کاهش رسوب ویژه حوزه بیانگر کاهش انتقال رسوبات از دامنه‌ها به شبکه آبراهه‌ای می‌باشد (Basumatary et al., 2024). جدول ۵ مقادیر فرسایش و رسوب ویژه را قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری در زیرحوزه‌های مورد مطالعه نشان

می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد مقدار رسوب ویژه حوزه از ۱/۹۶ مترمکعب در هکتار در سال قبل از اجرای عملیات به ۱/۱۶ مترمکعب در هکتار در سال و مقدار فرسایش ویژه حوزه از ۷ به ٤/۰۷ مترمکعب در هکتار در سال پس از اجرای عملیات کاهش یافته است که در کل ٤۰/۸۱ درصد کاهش داشته است. بیشترین کاهش فرسایش و رسوب در زیرحوزه تیکمه داش با ٤۳/۱۵ درصد مشاهده شد که می‌تواند ناشی از شرایط مناسب‌تر استقرار سازه‌ها و کارایی بیشتر آن‌ها در کنترل رواناب و رسوب باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های باقریان‌کلات و همکاران (BagherianKalat et al., 2021) که ۵۰ درصد کاهش فرسایش بعد از اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه آبخیز کاخک را گزارش نمودند، همخوانی دارد. تفاوت در درصد کاهش مشاهده شده میان مطالعات مختلف می‌تواند ناشی از تفاوت شرایط اقلیمی، نوع سازه‌ها، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوزه و شدت بارندگی باشد.

جدول۵-مقایسه مقدار فرسایش و رسوب زیرحوزه ها قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری

زیرحوزه	مساحت	قبل از اجرای عملیات آبخیزداری			بعد از اجرای عملیات آبخیزداری			کاهش فرسایش و رسوب (درصد)
		مجموع عوامل مدل MPSIAC (عامل R)	فرسایش ویژه (متر مکعب در هکتار در سال)	رسوب ویژه (متر مکعب در هکتار در سال)	عوامل مدل MPSIAC (عامل R)	فرسایش ویژه (متر مکعب در هکتار در سال)	رسوب ویژه (متر مکعب در هکتار در سال)	
تیکمه داش	۳۳۷۵	٦۳/٦٦٤	۸/۰۸	۱/۸۳	٤۷/۹۵	٤/٦۱	۱/۰٤	٤۳/۱۵
الخلج	۸۳۲	٦۵/۰٤	۵/٦۸	۱/۹۳	۵۱/۲٤	۳/٤٦	۱/۱۷	۳۹/۱۵
قزل احمد	۱۳٤۷	٦۷/۷۲	۷/۰۱	۲/۱۳	۵۳/۰۸	٤/۱٤	۱/۲۵	٤۰/۹۷
کل	۵۵۵٤	٦۵/٤٦	۷	۱/۹٦	۵۰/۷۵	٤/۰۷	۱/۱٦	٤۰/۸۱

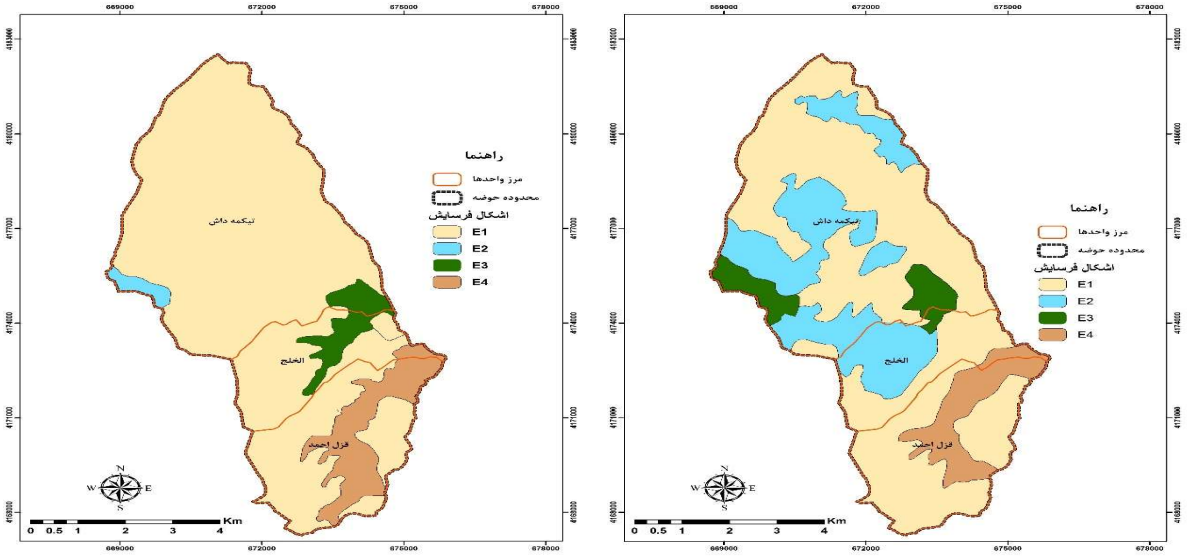
به‌منظور ارزیابی حساسیت مدل MPSIAC تغییرات ۲۰± درصدی امتیاز نهایی مدل اعمال و اثر آن بر برآورد رسوب بررسی شد (Behnam et al., 2024; Parekar et al., 2013). نتایج نشان داد که با وجود تغییرات اعمال شده روند کلی کاهش رسوب پس از اجرای اقدامات آبخیزداری حفظ شده و نتیجه مطالعه نسبت به عدم قطعیت عوامل مدل از پایداری مناسبی برخوردار است (شکل ۵).



شکل ۵- ارزیابی حساسیت مدل MPSIAC به تغییرات ۲۰± درصدی امتیاز نهایی مدل و اثر آن در برآورد رسوب

تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش

مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش قبل و بعد از اجرای عملیات نشان داد که پس از اجرای اقدامات آبخیزداری، وسعت مناطق با فرسایش شدید، کاهش یافته و تمرکز فرسایش به نواحی محدودتری منتقل شده است. شکل ٦ نشان می‌دهد در نقشه بعد از اجرای سازه‌های آبخیزداری بیشترین تیپ فرسایش خاک E1 است که شامل فرسایش سطحی و شیاری در حد کم می‌باشد. تیپ فرسایشی E2 شامل فرسایش سطحی، شیاری، آبراهه‌ای و خندقی در حد متوسط است که مقایسه نقشه قبل و بعد از اجرای سازه‌ها نشان می‌دهد اغلب قسمت‌هایی که قبلاً با تیپ E2 مشخص شده‌اند در نقشه جدید بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری به تیپ فرسایشی E1 تبدیل شده‌اند و اغلب دارای فرسایش سطحی در حد کم می‌باشند. تیپ فرسایشی E3 شامل مناطق با فرسایش سطحی، آبراهه‌ای و شیاری زیاد و خندقی کمتر است و تیپ E4 شامل مناطق با فرسایش سطحی، آبراهه‌ای، شیاری و خندقی زیاد است.



(الف) قبل از اقدامات آبخیزداری (ب) بعد از اقدامات آبخیزداری

شکل ۶- مقایسه اشکال فرسایش خاک در حوزه مورد مطالعه قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری

نقشه پهنه بندی فرسایش قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری در شکل ٦ نشان می‌دهد زیرحوزه تیکمه داش قبل از انجام عملیات آبخیزداری فرسایش تیپ E1، E2 و E3 داشت که در نقشه بعد از اجرای عملیات دارای فرسایش سطحی E1 و قسمت بسیار کوچکی دارای فرسایش تیپ E2 است که قبلاً دارای فرسایش E3 بود. زیرحوزه الخلج قبل از اجرای عملیات آبخیزداری دارای تیپ فرسایشی E1، E2 و E3 بود و بعد از اقدامات آبخیزداری تیپ E2 حذف شده است و تیپ E3 افزایش یافته است که با توجه به شکل ۳، در محل‌هایی که سازه‌های حفاظتی احداث شده‌اند کاهش فرسایش از تیپ E3 به تیپ E2 محسوس است. در زیرحوزه قزل احمد تعداد سازه کمتری احداث شده است و همانطور که در شکل ۳ و شکل ٦ مشاهده می‌شود در منطقه بدون سازه‌های حفاظتی بیشترین فرسایش در کل حوزه دیده می‌شود که با گذشت زمان مساحت ناحیه فرسایش یافته بیشتر شده و نیاز مبرم به اقدامات حفاظت خاک را در این زیرحوزه نشان می‌دهد. به‌طور کلی مقایسه نقشه اشکال فرسایش خاک در دو حالت قبل و بعد از اجرای سازه‌های آبخیزداری نشان‌دهنده نقش مؤثر سازه‌های اجرا شده در کنترل انواع فرسایش و کاهش انتقال خاک در سطح حوزه می‌باشد. همچنین در مناطق دارای تراکم بیشتر سازه‌ها، کاهش شدت فرسایش محسوس‌تر بوده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش اثر مثبت اقدامات آبخیزداری را در کاهش دبی اوج سیلاب، کاهش فرسایش و تولید رسوب در حوزه آبخیز مورد مطالعه نشان داد. نتایج شبیه‌سازی مدل HEC-HMS نشان داد که اجرای عملیات مکانیکی آبخیزداری موجب کاهش دبی اوج سیلاب در تمامی دوره‌های بازگشت شده است بر اساس نتایج به‌دست آمده اثربخشی عملیات در دوره‌های بازگشت کوتاه‌تر بیشتر بوده است، به‌گونه‌ای که در رخدادهای ۲ و ۵ ساله بیشترین کاهش مشاهده شد و مقادیر دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت ۲ سال در زیرحوزه‌های تیکمه داش، الخلج و قزل احمد به ترتیب ۸۸/٤٦، ۸۹/۲۸ و ۳۲/۵ درصد و در دوره بازگشت ۵۰ سال به ترتیب ٤۳/۹۱، ٤٤/۵۳ و ۱۳/۸۷ درصد کاهش داشت. این موضوع بیانگر آن است که سازه‌های آبخیزداری در مهار سیلاب‌های با شدت متوسط کارایی بیشتری داشته‌اند. مقایسه هیدروگراف‌های قبل و بعد از اجرای اقدامات آبخیزداری نشان داد که در تمام زیرحوزه‌های مورد مطالعه ارتفاع دبی اوج کاهش و زمان رسیدن به دبی اوج افزایش یافته است. همچنین نتایج بررسی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل MPSIAC و نقشه‌های فرسایش خاک نشان داد مقدار فرسایش و رسوب بعد از اجرای عملیات آبخیزداری کاهش محسوسی داشته است به‌طوری که مقدار فرسایش و رسوب در زیرحوزه‌های تیکمه داش، الخلج و قزل احمد به ترتیب ٤۳/۱۵، ۳۹/۱۵ و ٤۰/۹۷ درصد کاهش داشته است. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که عملیات مکانیکی آبخیزداری می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب و خاک، کاهش خسارات سیلاب و کنترل رسوب در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، تداوم اثربخشی این اقدامات مستلزم نگهداری مناسب سازه‌ها، اجرای اقدامات بیولوژیکی مکمل و پایش بلندمدت شرایط هیدرولوژیکی حوزه می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود در حوزه‌های آبخیز با شرایط مشابه، اجرای سازه‌های مکانیکی در کنار اقدامات بیولوژیکی و مدیریتی به‌عنوان بخشی از برنامه جامع سیلاب و فرسایش مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت سازمان آب منطقه‌ای، سازمان هواشناسی و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری آذربایجان شرقی در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

REFERENCES

Ajao, A. (2024). Recent Advancements in Sediment Transport Modelling in Reservoirs. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202403.0513.v1

Allawi, M. F., Sulaiman, S. O., Sayl, K. N., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2023). Suspended sediment load prediction modelling based on artificial intelligence methods: The tropical region as a case study. *Heliyon*, *9*(8), 18506. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18506

Azizian, A. H., Haghibi, A. H., Torabi, H., & Maleki, A. (2019). Modeling of erosion and sediment transport in rivers using the Gstars-3 model (Case study: TelvarHassanKhan river). *Iranian Water Research Journal*, *13*(2), 51-60. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10641.html (In Persian)

Bai, L., Wang, N., Jiao, J., Chen, Y., Tang, B., Wang, H., Chen, Y., Yan, X., & Wang, Z. (2020). Soil erosion and sediment interception by check dams in a watershed for an extreme rainstorm on the Loess Plateau, China, *International Journal of Sediment Research*, *35*(4), 408-416.

BagherianKalat, A., Lashkaripour, G. R., & Gafoori, M. (2021). Evaluating the Impacts of Implemented Watershed Management Project on Vegetal Cover and Sediment Yield in Kakhk Watershed Project. *Journal of environmental science and technology*, *23*(7), 51-63, https://doi.org/10.30495/jest.2022.27360.3642. (In Persian)

Basumatary, M. M., Wary, P., Maji, S., & Kumar, B. (2024). Advanced intelligence model for prediction of sediment transport rate and friction factor in alluvial channel. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, *Experiments and Design*, *7*(6), 5915-5931.

Berihun, M. L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., TaddeleDile, Y., Tsubo, M., AlmawFenta, A., TsegayeMeshesha, D., Ebabu, Dagnenet Sultan, K. & Srinivasan, R. (2020). Evaluating runoff and sediment responses to soil and water conservation practices by employing alternative modeling approaches. *Science of the Total Environment*, *747*, 141118.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141118

Behnam, N., Parehkar, M. & Pazira, E. (2024). Sensitivity Analyzing of MPSIAC Model. Journal of Rangeland Science. *1*(4), 295–302. https://doi.org/10.33899/regs.2011.6426.

BhumikaUniyal, B., Madan K. Jha, Kumar Verma, A. & KasargoduAnebagilu, P. (2020). Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. *Science of the Total Environment*. *744*, 140737.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140737

Chamanpira, R., & Roughani, M. (2018). Evaluation of the effects of watershed management operations in flood mitigation of Dadabad Watershed. *Watershed Engineering and Management*, *10*(3), 350-360. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117334. (In Persian)

Dabiri, S. S., Sofi, M., & Talbbedokhti, N. (2013). Effect of watershed check dams in control sediment (case study: Eghlid&Marvdasht&Mamsani watershed). *Journal of water Resources Engineering*, *6*(18), 1-21. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1392.6.18.1.1

Hu, S., & Shrestha, P. (2020).Examine the impact of land use and land cover changes on peak discharges of a watershed using the HEC-HMS model.*Papers in Applied Geography*, *6*(2), 101–118.https://doi.org/10.1080/23754931.2020.1732447

Jaafarzadeh, M. S., & KarimiSangchini, E. (2025). The role of watershed measures in management, protection and restoration of water resources (Examination of some latest reports on the effectiveness of watershed measures in Iran), *Watershed Engineering and Management*, *17*(1), pp. 64-81. https://doi: 10.22092/ijwmse.2024.366459.2073. (In Persian)

Mier-Valderrama, L., Leal, J., Perotto-Baldivieso, H. L., Hedquist, B., Menendez, H. M., Anoruo, A. & Turner, B. L. (2024). Evaluating soil erosion and runoff dynamics in a humid subtropic, low stream order, southern plains watershed from cultivation and solar farm development, *International Soil and Water Conservation Research*, *12*(2), 432-445.https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.004

Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.

Motaghian, M., Alavinia, S. H., & Ghazavi, R. (2023). Evaluation of the performance ofmechanical and biomechanical measures ofwatershed management on changes infloods, erosion, sedimentation and vegetation in arid and semi-arid areas. (Casestudy: Badkash Watershed in Minab City). *Journal of Arid Regions Geographic Studies, 14*(53): 67-84. https://doi: 10.22034/JARGS.2023.397286.1029. (In Persian)

Nabipoor, Y., Vafakhah, M., & Moradi, H. R. (2014). Evaluation of watershed management practices (wmps) effect on flood characteristics. *JWSS*, *18*(67), 199-215. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1393.18.67.23.6 (In Persian)

Najafinejad, A., Telvari, A., & Tajiki, M. (2018). Evaluation of watershed management measures on flooding using HEC-HMS model in Ramian watershed', *Iranian Water Researches Journal*, *12*(3), 19-26. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10597.html. (In Persian)

Nourali, M., & Ghahraman, B. (2016). Assessment of Watershed Management Projects on Flood Hydrograph using HEC-HMS Model (Case Study: Goosh-Bahreh Watershed). *J Watershed Manage Res*, *7*(13), 71-60. https://doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.71. (In Persian)

Nouri, H., & Vahid, H. (2025). Evaluation of the Effects of Mechanical Watershed Management Measures on Reducing Sedimentation in the Zayandeh Rood Dam Reservoir. *Ecohydrology*, *12*(3), 812-831. https//doi.org/10.22059/IJE.2025.397787.1876. (In Persian)

Parekar, A., Behnam, N. & Shokrabadi, M. (2013). An Investigating Survey on MPSIAC Model to Predict Sediment Yield in Iran. *Research Journal of Environmental and Earth Science*, *5*(6), 342-249. https://doi.org/10.19026/rjees.5.5709

Toy, T.J., Foster, G.R., & Renard, K.G., (2002). *Soil erosion: process, prediction, measurement, and control*. John Wiley & Sons Inc., New York, 352 pp.

USACE. (2000). *HEC-HMS Technical Manual*. Hydrologic Engineering Center. Davis. CA. 149 pp.

USACE. (2001). *HEC-HMS user's Manual*. Hydrologic Engineering Center. Davis. CA. 178 pp.

Xu Y. D. Fu B. J. & He C. S. (2013). Assessing the hydrological effect of the check dams in the Loess Plateau, China, by model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(6), 2185-93. https://doi.org/10.5194/hess-17-2185-2013

Yuan, Y., Bingner, R. L., Locke, M. A., & Rebich, R. A. (2019).Watershed modeling of runoff reduction induced by conservation practices. *Journal of Soil and Water Conservation*. *74*(2), 123–135.