



Simulation of watershed output hydrograph before and after mechanical and biological measures in the watershed

Amir Moradinejad^{*1}, Saeed Khosrobigi²

1. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Arak, Agricultural Research Education & Extension Organization (AREEO), Arak, Iran.
2. Technical and engineering department of the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Markazi Province), Arak, Iran.

Received: 03 February 2025/ **Revised:** 17 February 2025/ **Accepted:** 12 March 2025

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2054959.1036>

Abstract

Watershed measures, like other construction and development projects, need to be evaluated in order to analyze the performance of activities and develop basic solutions. Due to the lack of equipment to measure and record the changes in the state of flooding, erosion and sedimentation of watersheds, the use of hydrological models to simulate the behavior of the watershed before and after watershed management measures is an efficient tool in achieving These are the goals. In this study, HEC-HMS hydrological model was used in order to evaluate the actions of Dareh Gardo watershed in Central Province. For this purpose, the geometric characteristics of the structures, sediment volume and empty volume were collected by conducting field visits. By harvesting the area's vegetation, the improvement of the area's vegetation and improving the area's hydrological status was calculated using the SCS method, and by applying the changes made to the model's inputs, simulating the flood behavior for rains with a return period of 50 years in the past. And after watershed management measures. The results of the study, along with the different effect of watershed management measures in reducing the peak discharge and flood volume for different return cycles, recommend its use in order to predict and evaluate the impact of watershed management measures. On a single-event scale, the peak flood discharge for 16 and 56 mm rains, respectively, from 2.81 to 0.16 cubic meters per second (rate of 94.3 percent) and from 20.40 to 1.11 cubic meters per second. (rate of 94.6 percent) decreased. Also, the base time of the hydrograph increased by 55:56 hours (from 4:30 to 60:24 hours) in 16 mm rainfall and by 270:10 hours (from 19:50 to 290:00 hours) in 56 mm rainfall. showed But the volume of the outgoing flood decreased by 1.97% and 2.50% respectively. In the long-term daily mode, the construction of flood dams has reduced the peak flow of the daily hydrograph from 7.5 cubic meters per second to 1.2 meters per second.

Keywords: Flood Discharge, Gerdo Basin, Modeling, Watershed Management.



شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی حوزه آبخیز در قبل و بعد از اقدامات مکانیکی و بیولوژیکی در حوضه

امیر مرادی‌نژاد^{۱*}، سعید خسروبیگی^۲

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.
۲. بخش فنی و مهندسی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی، اراک، ایران.

دریافت: ۱۵ بهمن ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۲۹ بهمن ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۲۲ اسفند ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2054959.1036>

چکیده

اقدامات آبخیزداری همچون سایر پروژه‌های عمرانی و توسعه‌ای به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد فعالیت‌ها و تدوین راه‌کارهای اساسی نیازمند ارزیابی می‌باشد. با توجه به نبود تجهیزات اندازه‌گیری و ثبت تغییرات ایجاد شده در وضعیت سیلاب، فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور شبیه‌سازی رفتار حوضه در قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری ابزاری کارآمد در دستیابی به این اهداف می‌باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی اقدامات حوضه آبخیز دره گردو در استان مرکزی از مدل هیدرولوژیک HEC-HMS استفاده گردید. بدین منظور با انجام بازدیدهای صحرایی اقدام به برداشت مشخصات هندسی سازه‌ها، حجم رسوب و حجم خالی گردید. با برداشت پوشش گیاهی حوضه میزان بهبود پوشش گیاهی حوضه و ارتقاء وضعیت هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از روش SCS محاسبه و با اعمال تغییرات ایجاد شده در ورودی‌های مدل اقدام به شبیه‌سازی رفتار سیلاب برای بارش‌های با دور بازگشت ۵۰ ساله در قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری گردید. نتایج مطالعه ضمن تأثیر متفاوت اقدامات آبخیزداری انجام شده در کاهش دبی اوج و حجم سیلاب برای دور بازگشت‌های مختلف کاربرد آن را به منظور پیش‌بینی و ارزیابی تأثیر اقدامات آبخیزداری توصیه می‌کند. در مقیاس تک واقعه دبی اوج سیلاب برای بارش‌های ۱۶ و ۵۶ میلی‌متری به ترتیب، از ۲/۸۱ به ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه (میزان ۹۴/۳ درصد) و از ۲۰/۴۰ به ۱/۱۱ مترمکعب بر ثانیه (میزان ۹۴/۶ درصد) کاهش داشت. همچنین زمان پایه هیدروگراف نیز در بارش ۱۶ میلیمتری به میزان ۵۵:۵۶ ساعت (از ۴:۳۰ به ۶۰:۲۴ ساعت) و در بارش ۵۶ میلیمتری به میزان ۲۷۰:۱۰ ساعت (از ۱۹:۵۰ به ۲۹۰:۰۰ ساعت) افزایش را نشان داد. ولی میزان حجم سیلاب خروجی به ترتیب به میزان ۱/۹۷ و ۲/۵۰ درصد کاهش یافت. در حالت روزانه طولانی‌مدت نیز احداث بندهای سیل‌گیر باعث شده است دبی اوج هیدروگراف جریان روزانه از ۷/۵ متر مکعب بر ثانیه به ۲/۱ متر بر ثانیه کاهش داده است.

کلمات کلیدی: آبخیزداری، حوضه گردو، دبی سیل، مدل‌سازی.

مقدمه

یکی از اقدامات کاهش خطرات سیلاب مدیریت حوضه آبخیز می‌باشد که ماهیت سازه‌ای و غیرسازه‌ای دارد و با تغییر نحوه تبدیل بارش به رواناب و کاهش سیلاب و رسوب به رودخانه در برنامه‌ریزی بلند مدت برای کنترل سیلاب مطرح می‌باشد. آبخیزداری یکی از فعالیت‌های عمده و زیربنایی می‌باشد که به مدیریت جامع منابع آب و خاک و پوشش گیاهی، بهره‌برداری بهینه از این منابع و حفظ سرمایه اصلی می‌پردازد. با توجه به مزیت اقدامات آبخیزداری و احداث سازه‌های کوچک و راه‌های بیولوژیکی در کنترل سیلاب، آگاهی از مقدار نتایج این اقدامات امری ضروری است. ارزیابی پروژه‌های آبخیزداری امروزه از بنیادی‌ترین مسائلی است که در کشورها به‌منظور برنامه‌ریزی های آتی در خصوص طرح‌های اجرایی و مدیریت منابع طبیعی انجام می‌گیرد. با توجه به نبود تجهیزات لازم به‌منظور اندازه‌گیری و ثبت تغییرات ایجاد شده در وضعیت سیلاب، فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز، استفاده از مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی رفتار حوضه در قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری ابزاری کارآمد در دستیابی به این هدف می‌باشد. بر این اساس تحقیق حاضر با هدف ارزیابی تاثیر اقدامات سازه‌ای و بیولوژیکی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS روی دبی سیلاب می‌باشد. انجام اقدامات آبخیزداری با تأثیرگذاری بر اجزای حوضه آبخیز با تغییر در رفتار هیدرولوژیکی آن سعی در آرام کردن پاسخ حوضه آبخیز در قبال بارش ورودی دارد و در پایین دست با مدیریت وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه و سیلاب‌دشت جهت تسهیل عبور سیلاب تلاش می‌نماید (Sadeghi et al., 2006). در سال‌های اخیر اقدامات گسترده‌ای از نظر کنترل سیل، فرسایش و رسوب در زمینه‌های تحقیقاتی، مطالعاتی و اجرایی آبخیزداری انجام شده است، این در حالی است که ارزیابی طرح‌های آبخیزداری به‌منظور تجزیه و تحلیل عملکرد اقدامات و تدوین راه‌کارهای اصولی یکی دیگر از نیازهای اساسی در این زمینه می‌باشد. آگاهی از میزان اثربخشی اجرای هر نوع پروژه برای مجریان آن از اهمیت زیادی برخوردار است، چراکه با شناخت کافی از میزان آن، ضمن آگاهی از میزان حصول اهداف اولیه، مزایا و معایب مرتبط شناسایی شده و تصمیم‌گیری لازم در خصوص اصلاح معایب و یا تجدید نظر در شیوه اجرا و یا حتی نوع عملیات اجرایی اتخاذ خواهد شد (Teymouri & Omrani, 2010). یک حوزه مانند یک سیستم است که باید به‌عنوان یک واحد در نظر گرفته شود. هر گونه تغییری در بخش‌های مختلف حوزه در خروجی حوزه آن تأثیر خواهد گذاشت. بر این اساس کاهش پیک جریان در زیر حوزه‌ها در اثر احداث بند‌های کنترلی موضوعی قابل قبول می‌باشد. با این وجود پیک سیل در خروجی اصلی تنها تابعی از پیک سیل در زیر حوزه‌ها نخواهد بود، بلکه تابعی از تغییرات زمان تأخیر زیر حوزه‌ها و نحوه تلفیق و هم زمانی ترکیب دبی اوج سیلاب آن‌ها می‌باشد (Abbasi et al., 2009). اقدامات مهار سیلاب در آبخیزداری از طریق احداث سازه‌های کوچک و اجرای روش‌های بیولوژیکی مهار سیلاب در دور دست‌ترین نقاط حوزه آبخیز اجرا می‌شود که آگاهی از میزان تأثیرگذاری این اقدامات تنها با بهره‌گیری از مدل‌های توزیعی و منطقه‌ای مناسب، ممکن می‌باشد (He, 2003). تأثیر این اقدامات آبخیزداری و موارد کنترلی دیگر در برابر سیلاب، از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی است. به عنوان نمونه می‌توان به نتایج و بررسی تحقیقات محققین زیر اشاره نمود. نیف و همکاران (۲۰۰۲) در حوزه آبخیزی در آلمان نشان دادند که بهبود کاربری اراضی و اقدامات مدیریتی در مناطقی که تولید رواناب سریع دارند، می‌تواند به طور معنی‌داری باعث کاهش سیلاب گردد و در مناطقی که تولید رواناب در آن‌ها با تأخیر صورت می‌گیرد، بهبود کاربری اراضی در کاهش سیلاب تأثیر چندانی ندارد (Naef et al., 2012). ماگیلیگان و نیسلو تأثیر سدها را در تنظیم رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها بسیار معنی‌دار دانسته و بیشترین تغییر در دبی‌های حداکثر و حداقل مشاهده کردند (Magilligan and Nislow, 2005). ایورارد و همکاران با هدف ارزیابی سازه‌های کنترل فرسایش، کاهش ۴۰ درصدی دبی اوج و رواناب را در اثر اجرای عملیات حفاظتی در آبخیز گزارش نمودند (Evrard et al., 2007). پوشیکاوان و همکاران به ارزیابی عملکرد کاهش خسارات سیل توسط اقدامات کنترلی پرداختند. برای این منظور با استفاده از تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی و روندیابی سیل، مدلی را شبیه‌سازی نمودند، که در نهایت شبیه‌سازی شده در سطح کوچک را برای مدیریت مناطق سیلابی وسیع پیشنهاد کردند (Yoshikawa et al., 2010). گلرنگ همکاران با انجام تحقیقی بر روی زیرحوضه‌های آبخیز کوشک آباد در استان خراسان رضوی به این نتیجه رسیدند که سدها و عملیات سازه‌ای نقش کمتری در کاهش زمان تمرکز دارند در حالی که اقدامات بیولوژیکی، ۱۹ درصد در کاهش دبی اوج سیلاب و ۱۴ درصد در کاهش حجم سیلاب مؤثر بوده است (Golrang et al., 2013). تحقیقات زیادی در ایران نیز بر روی حوضه‌های آبخیز ایران انجام شده است که بیانگر تأثیر مثبت اقدامات آبخیزداری در کاهش دبی اوج سیلاب می‌باشد (NabiPour et al., 2014; Ghaffari and Jamali, 2013; Soleimani et al., 2011; Kalhor, 2007). در این تحقیق

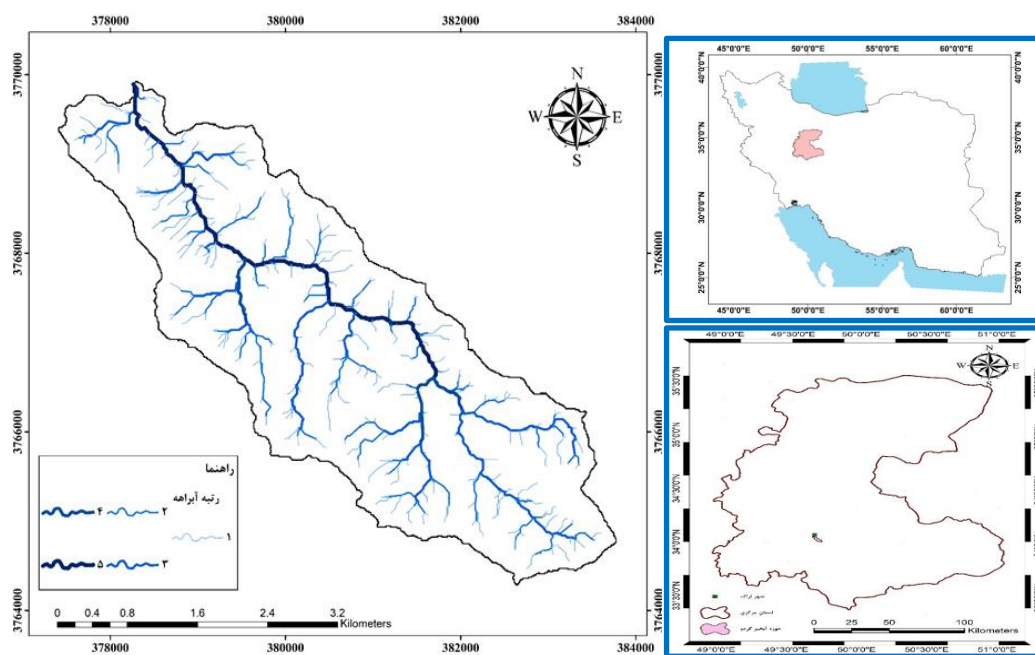
سعی بر آن شد تا با ارزیابی کمی خصوصیات سیل، تأثیر مستقیم اجرای عملیات آبخیزداری در دو دوره قبل (بدون انجام عملیات آبخیزداری) و بعد از آن (با انجام عملیات آبخیزداری) بر روی دبی سیلاب بررسی گردد. در حال حاضر استفاده از مدل‌های (بارندگی - رواناب) در این زمینه کاربرد وسیعی یافته و روش استدلالی به تدریج جای خود را به مدل‌هایی که در آن نه تنها دبی حداکثر (اوج) بلکه رژیم جریان سطحی نیز در هر نقطه از محدوده مطالعاتی مورد محاسبه قرار می‌گیرد، جایگزین گردید. به منظور برآورد رواناب و سیلاب مطالعات متعددی با استفاده از نرم افزار HEC- HMS در مناطق مختلف انجام شده است. پس از تعیین مقادیر شماره منحنی، مقادیر تلفات اولیه، زمان تاخیر با روش‌های SCS و اشنایدر و زمان تمرکز حوضه با روش SCS، مدل HEC-HMS را اجرا نمودند. نتایج نشان داد که در محاسبه شماره منحنی و تلفات اولیه جریان توسط مدل، استفاده از روش‌های اشنایدر و SCS برای محاسبه زمان تأخیر حوضه از تفاوت چندانی برخوردار نمی‌باشند. مرادی نژاد و همکاران در تحقیقی به بررسی اثر احداث بندهای گابیونی روی دبی اوج و مشخصات هیدرولیکی جریان رودخانه پرداختند. نتایج نشان داد که در حالت ایجاد سازه و انسدادی با نزدیک شدن جریان به بند، از سرعت جریان کاسته، در حالیکه پس از عبور از روی بند، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. بنابراین در این حالت، فرسایش بعد از روگذر افزایش خواهد یافت. در حالت بدون بند، سرعت جریان قبل از رسیدن به مقطعی که در حالت انسداد دارای روگذر بود تقریباً ثابت است ولی پس از عبور از این مقطع سرعت جریان افزایش می‌یابد (Moradinejad et al., 2023). احداث بندهای گابیونی در حوضه آبریز رودخانه باعث کاهش دبی اوج سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های مختلف شده است. با افزایش دوره بازگشت تأثیر آنها در کاهش و کنترل سیلاب کاهش می‌یابد. در این آبراهه و حوضه تاکنون مطالعه‌ای در مورد تأثیر عملیات آبخیزداری بر روی ویژگی‌های سیل و مشخصات هیدرولیکی آبراهه انجام نشده است. نفرزادگان و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به بررسی تأثیر بندهای اصلاحی بر هیدروگراف سیلاب در یک حوزه آبخیز فاقد آمار در استان فارس پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در دوره بازگشت‌های مختلف، بندهای اصلاحی مورد بررسی، از توانایی لازم برای ذخیره‌سازی رواناب و کاهش دبی اوج سیل در حوزه آبخیز کندر عبدالرضا فارس برخوردارند، اما با افزایش دوره بازگشت، نقش این سازه‌ها در مهار سیلاب و کاهش دبی اوج کاهش می‌یابد. مطالعات متعدد نشان داده است که ساخت بندهای اصلاحی می‌تواند حجم کل و زمان رسیدن تا اوج سیلاب را کاهش دهد و در نتیجه خسارات ناشی از سیلاب را کاهش دهد (Nafarzadegan et al., 2024). Yuan, (al., 2024) یوان و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر سامانه بندهای اصلاحی بر کاهش دبی اوج را بیشتر از تأثیر این سازه‌ها بر کاهش حجم سیلاب در فلات لسی چین ارزیابی کردند و نشان دادند که بندهای اصلاحی باعث کاهش حجم کل رواناب به میزان ۵۸ درصد و دبی اوج آن به میزان ۶۵ درصد می‌شود (Yuan et al., 2022). بندهای اصلاحی در بسیاری از حوضه‌های آبخیز در سراسر جهان به منظور تعدیل و تنظیم سیلاب، تله‌اندازی رسوبات و کاهش شیب بستر آبراهه‌ها به کار گرفته شده‌اند. یکی از بهترین راهبردهای پیش‌گیری از سیل، ساخت مخازن و حوضچه‌های نگهداری آب است که باعث افزایش ظرفیت حوضه در تنظیم و ذخیره سیلاب می‌شوند (Acheampong et al., 2023). آلیاس عمر و همکاران (۲۰۲۳) تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی سد باتو، مالزی را با مدل HEC-HMS مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، سد باتو با ظرفیت تخلیه سرریز ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه است، در شرایط PMF برای سد باتو مشکلی ایجاد نخواهد شد زیرا اوج خروجی سطح مخزن هنوز زیر سطح تاج سد است (Allias Omar et al., 2022). لاسیلیا و همکاران (۲۰۲۲) پیش‌بینی سیل را با مدل HEC-HMS در حوزه سد سیدی محمدین عبدالله در مراکش انجام دادند. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که حجم رواناب، جریان اوج و NSE به زمان تأخیر و پارامترهای CN حساستر هستند (Laassilia et al., 2022). در مقیاس حوزه آبخیز، احداث بندهای اصلاحی موجب کاهش حجم رواناب می‌شود و در این رابطه می‌توان به مطالعات رودخانه‌های هوآنگ فاجوآن و وودینگ (دو انشعاب اصلی رودخانه زرد کشور چین) اشاره کرد که احداث بندهای اصلاحی موجب کاهش ۳۹٪ و ۱۲٪ حجم رواناب در آنها شده است (Shi et al, 2019). مودنی و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی به بررسی اثر اجرای عملیات آبخیزداری بر رواناب و فرسایش خاک حوضه نخاب بشرویه پرداختند. هدف از مطالعه آنها بررسی نقش اقدامات اجرایی در مدیریت رواناب و فرسایش بود. برای این منظور برای تعیین میزان کاهش دبی اوج سیلاب، از مدل HEC-HMS و برای تعیین میزان تغییرات فرسایش و رسوب حوضه از مدل MPSIAC در دو حالت قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری استفاده شد. نتایج نشان داد که اجرای عملیات آبخیزداری باعث افزایش زمان رسیدن به اوج سیلاب به میزان ۶۰ و ۳۰ دقیقه و همچنین کاهش ۵۴ و ۲۸ درصدی دبی پیک به ترتیب برای دوره بازگشت ۲ و ۱۰۰ ساله شد. علاوه بر این در صورتی که مخزن سازه‌ها از رسوبات پر شوند همچنان تأثیر به‌سزایی در افزایش زمان رسیدن به اوج و کاهش دبی اوج و حجم سیلاب دارند (Moazeni-Noghondar et al., 2022). حوزه آبخیز مورد مطالعه مشرف به شهر اراک می‌باشد. در

این حوضه اقدامات سازه‌ای و بیولوژیکی قابل توجهی در چند سال اخیر انجام شده است. بنابراین شناخت رفتار هیدرولوژیکی این حوضه به خاطر کنترل سیل و شکست دبی پیک همچنین ذخیره رواناب آن اهمیت فراوانی دارد. از طرفی با توجه به مشکلات به وجود آمده به دلیل سیلاب‌های فراوان و در پی آن فرسایش خاک، تأکید ویژه‌ای توسط اسناد بالادستی به اقدامات آبخیزداری شده و هزینه‌های قابل توجهی به منظور اجرا و نگهداری اقدامات آبخیزداری در کشور اختصاص یافته است. در نتیجه بررسی اثربخشی این اقدامات در ابعاد مختلف امری ضروری است. بنابراین در این تحقیق سعی بر آن است تا با ارزیابی کمی خصوصیات سیلاب در این حوضه، تأثیر مستقیم اقدامات آبخیزداری در دو دوره قبل و بعد از اجرای عملیات مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه

شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه طرح در کشور، استان و شهرستان را نشان می‌دهد. پارک آبخیز گردو با مساحت هزار و ۴۱۳ هکتار در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۳۹، ۳۸، ۳۹ تا ۴۲، ۴۲، ۴۸ و عرض جغرافیایی ۳۴، ۰۳، ۵۴ تا ۳۴، ۰۰ قرار دارد و در خروجی حوضه، شهر اراک و شهرک گردو واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه استان ۳۳۴/۲ میلی‌متر است که از این میزان ۱۵۳/۹۸ میلی‌متر در فصل زمستان به عنوان پربارش‌ترین فصل سال، ۱۰۳/۷۲ میلی‌متر در فصل پاییز، ۷۴/۶۹ میلی‌متر در بهار و تنها ۱/۶۷ میلی‌متر در تابستان صورت می‌گیرد، همچنین ماه اسفند با میانگین ۶۲/۲۸ میلی‌متر بارندگی پر بارش‌ترین ماه سال محسوب می‌شود. شبکه آبراهه‌های این حوضه درختی بوده و طول بلندترین آبراهه آن ۹/۲۰ کیلومتر می‌باشد. زمان تمرکز این حوضه با توجه به روش‌های مختلف به‌طور متوسط حدود ۴۰ دقیقه می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه حوضه آبخیز گردو ۳۳۴/۲ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن برابر ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد است و از نظر اقلیمی (به روش دومارتن و آمبرژه)، اقلیم نیمه‌خشک سرد بر حوضه حاکم است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه طرح در کشور، استان و شهرستان.

Figure 1. Geographic location of the project area in the country, province, and county.

مراحل انجام کار

به‌منظور بررسی تأثیر فعالیت‌های بیولوژیک بر خصوصیات هیدرولوژیک حوضه (حجم و دبی اوج سیلاب) از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و همچنین مدل HEC-HMS استفاده شد. به‌طور کلی روش تحقیق در ۴ مرحله انجام شد. مرحله اول جمع‌آوری آمار و اطلاعات و تهیه نقشه‌های مورد نیاز (نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک، نقشه شماره منحنی (CN)، نقشه پتانسیل تولید رواناب حوضه آبخیز)، مرحله دوم مدل‌سازی و اعتباریابی مدل، مرحله سوم استفاده از مدل و تحلیل نتایج، مرحله چهارم بررسی تغییرات دبی جریان.

پس از تهیه نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز، نقشه کاربری، در این مطالعه با توجه به موارد ذکر شده نقشه کاربری/پوشش اراضی قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک تهیه شده در مطالعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان، با استفاده از تصاویر رقومی ماهواره لندست ۸، بازدیدهای میدانی و تصاویر Google earth، تدقیق شد. جهت ارزیابی و بررسی صحت ضرایب و پارامترهای به کار برده شده در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک تعدادی واقعه مورد نیاز است. با انتخاب واقعه بارش-رواناب هم‌زمان از بین وقایع مختلف ایستگاه‌های باران‌سنجی اراک، واسنجی مدل صورت پذیرفت. به منظور واسنجی مدل، عوامل تلفات اولیه، CN و زمان تأخیر به عنوان متغیر انتخاب شدند و مدل برای شبیه‌سازی و برآورد سیلاب آماده شد. سپس حساسیت مدل نسبت به عوامل فوق‌الذکر بررسی شد. بعد از هر واقعه بارندگی، تعداد سازه‌های آبیگری شده، تعیین شد و ضریب رواناب در هر یک از زیرحوضه‌ها برای به کارگیری در مدل محاسبه شد. در نهایت شبیه‌سازی بارش-رواناب با دوره بازگشت‌های ۵۰ سال در شرایط قبل (بدون اعمال حوضچه‌ها در مدل) و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری (با اعمال حوضچه‌ها در مدل) انجام شد (شکل ۲). بر اساس روابط تعریف شده، تغییرات حجم و دبی اوج سیلاب در سناریوهای کاربری/پوشش قبل از اجرای عملیات بیولوژیک و کاربری/پوشش بعد از اجرای عملیات بیولوژیک (فعلی) محاسبه گردید.



شکل ۲. مدل حوضه تهیه شده از حوزه آبخیز گردو برای قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک.

Figure 2. Watershed model prepared for the Walnut watershed before and after biological operations.

برای شبیه‌سازی سیلاب حوضه، از مدل ریاضی HEC-HMS استفاده شد. این مدل که حوضه را به عنوان یک سیستم یکپارچه با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می‌دهد قادر است، پاسخ رواناب سطحی یک حوضه را نسبت به بارندگی معین شبیه‌سازی نماید. مدل فوق قابلیت تحلیل ذخایر آبی و هیدرولوژی سیلاب و رواناب حوضه‌های طبیعی و شهری را دارا می‌باشد. یکی از دلایل عمده انتخاب این مدل کوهستانی بودن حوضه آبخیز گردو است. زیرا مدل مذکور در حوضه‌های کوهستانی نتایج خوبی را ارائه می‌نماید. اجزا مدل شامل؛ مدل فیزیکی حوضه، داده‌های هواشناسی، کنترل مشخصات زمانی داده‌ها، سری‌های زمانی و داده‌های زوجی می‌باشد. ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و مختصات مکانی، اقدامات آبخیزداری حوضه بررسی و به مدل معرفی شد. به منظور تبدیل بارش به رواناب از روش SCS و محاسبه شماره منحنی برای شرایط پیش از اقدامات آبخیزداری حوضه گردو استفاده شد. نقشه CN حوضه تهیه گردید. همچنین در موارد نیاز برای هر زیر حوضه، میزان متوسط وزنی شماره منحنی محاسبه شد. این عملیات در نرم‌افزار ARC GIS 10.4 انجام شد. برای برآورد زمان تمرکز و زمان تأخیر حوضه از روش کریچ و برای روندیابی جریان بازه‌ها از روش زمان تأخیر استفاده شد. در این مطالعه، به منظور محاسبه حجم رواناب حاصل از حداکثر بارش ۲۴ ساعته، از داده‌های ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک اراک استفاده شد (معادل ۵۸ میلی‌متر). همچنین از روش SCS برای هر کاربری برای حالت‌های قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک حجم رواناب برآورد گردید.

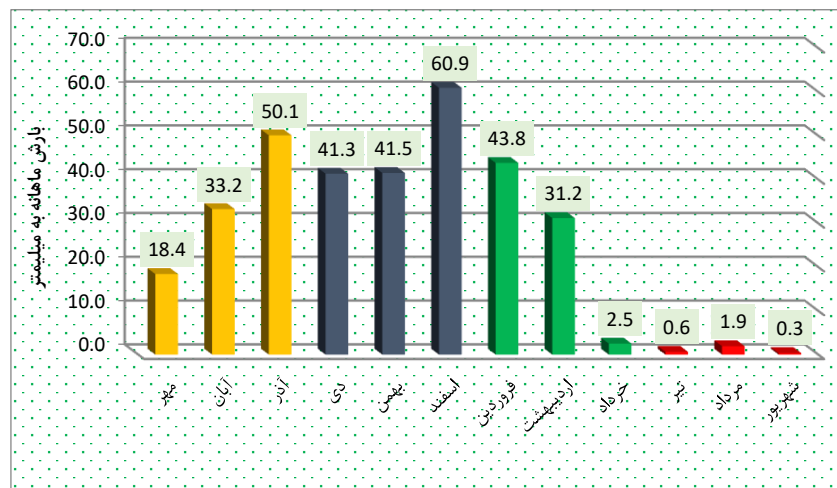
در این مطالعه از سازه‌های سنگی-ملاتی و خاکی استفاده شده در حوضه که دارای مخزن قابل توجهی برای ذخیره آب بودند استفاده شد. سایر سازه‌ها نظیر سازه‌های گابیونی که مخزن آن‌ها قابل توجه نبوده یا به وسیله رسوب پر شده بودند در ساختار مدل وارد نشدند. بنابراین با توجه به احداث تعداد ۱۴ سازه سنگی ملاتی و یک بند خاکی در زیرحوضه‌های مختلف حوضه و همچنین وارد کردن مقادیر CN زیرحوضه‌ها بعد از اجرای عملیات بیولوژیک یک مدل حوضه دیگر ساخته شد. از این‌رو، در شرایط بعد از اقدامات آبخیزداری از روندیابی مخزن در مورد بندهای احداث شده استفاده گردید. در این تحقیق از روش روندیابی هیدرولوژیکی Level Pool استفاده شد که به‌طور تقریب می‌تواند برای روندیابی با یک نسبت دبی خروجی-ذخیره به‌کار روند. بنابراین، از اطلاعات حجم-سطح-ارتفاع و همچنین ارتفاع-دبی هر یک از بندها که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مرکزی ثبت گردیده بود، استفاده شد. همچنین مقادیر دبی‌های خروجی معادل ارتفاع سرریزها نیز با توجه به مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزها و بر اساس رابطه سرریزهای مستطیلی برآورد گردید. با وارد کردن مقادیر ارتفاع-سطح و ارتفاع-دبی به مدل، شبیه‌سازی جریان بعد از اقدامات آبخیزداری صورت گرفت. تأثیر اقدامات بیولوژیکی با پارامتر شماره منحنی و تأثیر اقدامات سازه‌ای با استفاده از ورودی بندها به‌عنوان مخزن در مدل حوضه بررسی شد. به‌علاوه، روش شماره منحنی به‌علت اینکه بر اساس مشاهدات فیزیکی استوار است و از راه آن می‌توان تغییرات ایجاد شده در پوشش گیاهی را بررسی نمود نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است. در مدل HEC-HMS شبیه‌سازی و محاسبه هیدروگراف در حوضه به معرفی مؤلفه‌های مدل حوضه، مدل اقلیمی، داده‌های سری زمانی و شاخص‌های کنترل نیازمند است. بدین منظور اطلاعات و خصوصیات فیزیکی حوزه آبخیز گردو شامل مساحت، شماره منحنی، متوسط وزنی زیرحوضه‌ها و همچنین تلفات اولیه و پارامترهای مربوط به انتقال (زمان تأخیر زیرحوضه‌ها) و روندیابی سیل و روش جداسازی آب پایه از هیدروگراف سیلاب، به مؤلفه مدل حوضه وارد گردید. سپس داده‌های بارش مولد سیل در مؤلفه‌های مدل اقلیمی و داده‌های سری زمانی وارد گردید. همچنین محدوده زمانی شبیه‌سازی و فاصله زمانی آن در مؤلفه شاخص‌های کنترل وارد شد. وارد کردن اطلاعات به مدل HEC-HMS در شرایط قبل و بعد از اقدامات آبخیزداری مشابه است. اما برای شرایط بعد از اقدامات آبخیزداری باید از مشخصات حوضه مربوط به این زمان استفاده کرد. بنابراین برای آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل HEC-HMS برخی از خصوصیات فیزیکی حوضه نظیر شیب، مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه و زمان تمرکز از گزارش فیزیوگرافی حوضه استفاده شد.

شبیه‌سازی مدل در حالت زمانی تک‌واقعه انجام گردید. در حالت تک‌واقعه تغییرات دبی حداکثر لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان پایه هیدروگراف سیلاب در شرایط مختلف بدون اجرای عملیات، اجرای عملیات بیولوژیک و همچنین اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی شبیه‌سازی و مقایسه شد. با توجه به این که حوضه مورد مطالعه فاقد ایستگاه هیدرومتری می‌باشد، از پیش فرض‌های یکسان برای حالت‌های قبل و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری استفاده شد. بدین منظور پس از آماده‌سازی مدل، تأثیر اقدامات بیولوژیک و مکانیکی اجرا شده در حوضه از طریق تغییر نقشه کاربری/پوشش اراضی و معرفی سازه‌های اجرا شده در دوسناریوی قبل و بعد از اجرای فعالیت‌ها در حالت تک واقعه معادل ۱۶ میلیمتر (بارش طرح با دوره بازگشت ۵۰ سال و با تداوم ۵۰ دقیقه) و بارش حداکثر منطقه معادل ۵۶ میلیمتر (بررسی شد. مقادیر بارش متوسط، حداکثر، حداقل و انحراف معیار در مقیاس ماهانه و سالانه برای دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۰ در جدول (۱) آمده است. مطابق با نتایج مربوطه میزان بارش سالانه ۳۲۵ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین آن در ماه اسفند و حداقل آن مربوط به شهریور است. در شکل (۳) نیز نمودار تغییرات بارندگی سالیانه و ماهانه نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر بارش متوسط ایستگاه سینوپتیک اراک.

Table 1. Average precipitation values at the Arak Synoptic Station.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	کل
میانگین	18.4	33.2	50.1	41.3	41.5	60.9	43.8	31.2	2.5	0.6	1.9	0.3	325.6
حداکثر	89.7	154.6	143.9	80.8	121.9	124.5	133.5	101.5	13.3	5.8	25.5	5.6	516.0
حداقل	0.0	0.4	3.0	0.9	3.3	18.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	155.2
انحراف معیار	23.3	31.5	35.9	21.3	28.4	23.6	36.1	27.9	3.7	1.2	4.9	1.1	85.9



شکل ۳. نمودار تغییرات بارندگی ماهیانه ایستگاه سینوپتیک اراک.

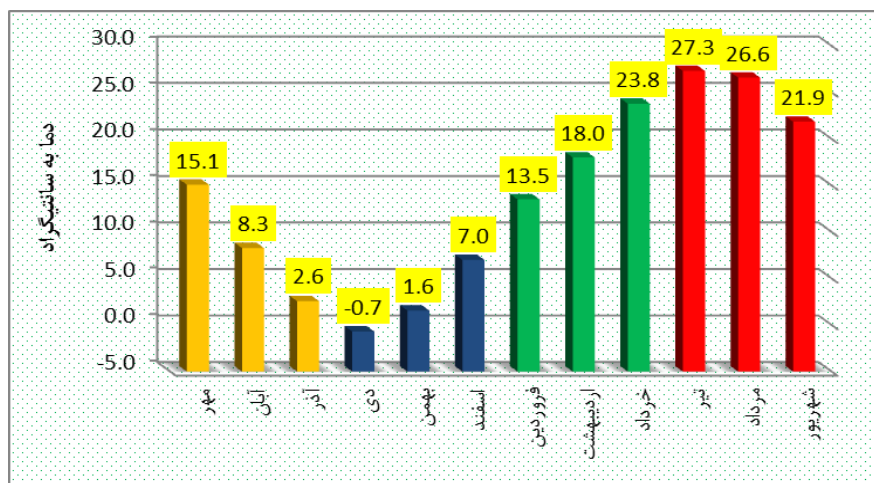
Figure 3. Monthly rainfall variation graph at the Arak Synoptic Station.

دما یکی از عوامل دیگر مهم هواشناسی است که در بررسی‌های اقلیمی داشتن آمار مربوط به این عامل و بررسی و تجزیه و تحلیل آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. شاخص‌های دمایی مورد مطالعه در این گزارش به ترتیب: دمای متوسط ماهانه و سالانه، دمای حداقل ماهانه و سالانه، دمای حداکثر ماهانه و سالانه، می‌باشد. میانگین سالانه دما در حقیقت میانگین روزانه دمای هوا برای تمامی سال می‌باشد و مهمترین پارامتر اقلیمی درجه حرارت به شمار می‌رود. در جدول (۲) مقادیر شاخص‌های مذکور و در شکل (۴) تغییرات سالانه و ماهانه دمای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقادیر دمای متوسط ایستگاه سینوپتیک اراک.

Table 2. Average temperature values at the Arak Synoptic Station.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	میانگین
میانگین ماهانه	15.1	8.3	2.6	-0.7	1.6	7.0	13.5	18.0	23.8	27.3	26.6	21.9	13.7
حداکثر	17.9	11.4	8.4	3.7	6.8	11.7	16.5	20.6	26.3	29.7	28.5	23.9	15.5
حداقل	12.2	4.9	-6.7	-9.4	-10.6	0.3	10.6	14.2	21.6	24.9	23.8	19.3	10.8
انحراف معیار	1.6	1.4	3.0	3.9	3.9	2.4	1.5	1.5	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2



شکل ۴. تغییرات ماهانه میانگین درجه حرارت در منطقه مورد مطالعه.

Figure 4. Monthly variations of mean temperature in the study area.

نتایج و بحث

در این مطالعه، به منظور محاسبه حجم رواناب حاصل از حداکثر بارش ۲۴ ساعته، از داده‌های ثبت شده در ایستگاه سیونوپتیک اراک استفاده شد (معادل ۵۸ میلی‌متر). همچنین از روش SCS برای هر کاربری برای حالت‌های قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیکی حجم رواناب برآورد گردید. جدول (۳) حجم رواناب تولیدی بر مبنای CN وزنی محاسبه شده در هر کاربری را برای حالت قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیکی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از محاسبه حجم رواناب در دو حالت قبل و بعد از انجام اصلاحات بیولوژیکی نشان داد که حجم رواناب نهایی حوزه آبخیز گردو در حالت بدون انجام عملیات بیولوژیکی و برای یک بارش ۲۴ ساعته برابر با $254433.6/6$ مترمکعب و برای حالت بعد از انجام بیولوژیکی برابر با $249648.6/6$ متر مکعب برآورد شده است. بنابراین انجام اصلاحات بیولوژیکی تنها $1/88$ درصد از میزان رواناب حوضه را کاهش داده است.

جدول ۳. تغییرات حجم و ارتفاع رواناب کل حوضه برای حالت قبل از اجرای عملیات بیولوژیکی

Table 3. Changes in runoff volume and height for the entire watershed before biological operations.

وضعیت حوضه	مساحت (ha)	CN وزنی	ضریب ذخیره (mm)	ارتفاع رواناب (mm)	حجم رواناب (m ³)
قبل از عملیات بیولوژیکی	1414.26	79.27	66.62	17.99	254433.6
بعد از عملیات بیولوژیکی		78.98	67.60	17.65	249648.6
درصد تغییرات	-	0.37	1.77	1.88	1.88

بررسی نقشه تغییرات کاربری و همچنین عملیات بیولوژیکی نشان داد که همه عملیات بیولوژیکی در اراضی مرتعی حوضه و در مساحت محدودی اجرا شده است. چنانچه مبنای مقایسه، تنها اراضی باشد که عملیات بیولوژیکی در آن‌ها صورت گرفته است، بر مبنای میزان CN وزنی در حالت قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیکی، حجم رواناب کاربری مرتع نیز تنها به میزان $2/51$ درصد تحت تاثیر عملیات بیولوژیکی کاهش یافته است (جدول ۴). بر اساس نتایج حاصل، انجام عملیات بیولوژیکی در حوزه آبخیز گردو، تاثیر قابل توجهی بر حجم رواناب خروجی از حوضه نداشته است و این عملیات فقط می‌تواند خروج رواناب را تعدیل نماید.

جدول ۴. تغییرات حجم و ارتفاع رواناب کاربری مرتع برای حالت قبل از اجرای عملیات بیولوژیکی

Table 4. Changes in runoff volume and height for rangeland use before biological operations.

وضعیت حوضه	مساحت (ha)	CN وزنی	ضریب ذخیره (mm)	ارتفاع رواناب (mm)	حجم رواناب (m ³)
قبل از عملیات بیولوژیکی	108.28	78.31	70.35	16.89	183439
بعد از عملیات بیولوژیکی		77.93	71.92	16.46	178842.8
درصد تغییرات	-	0.48	-2.24	2.51	2.51

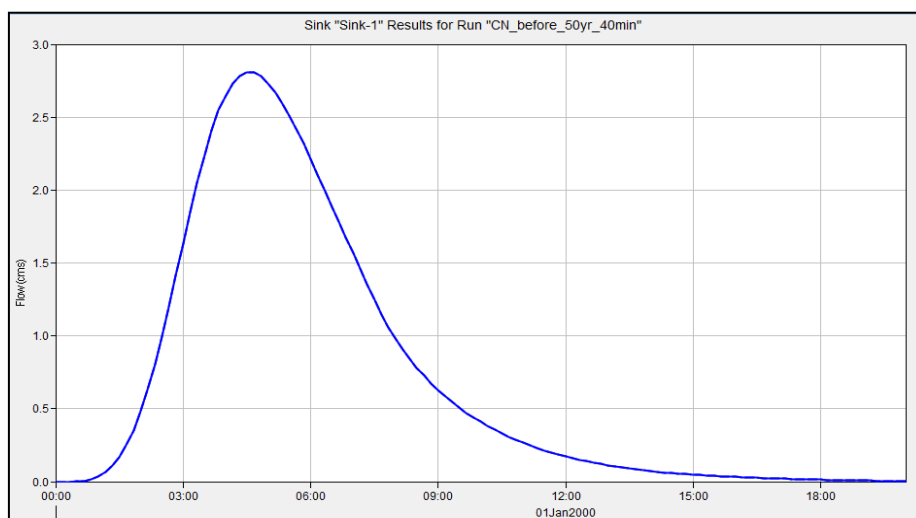
کاربری پوشش اراضی قبل از اجرای عملیات آبخیزداری

شکل (۵) هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده حوزه را در خروجی حوضه برای بارش طرح (معادل ۱۶ میلی متر) نشان می‌دهد. بارش طرح بحرانی‌ترین واقع بارندگی است که سازه‌های زهکشی بر اساس آن طراحی می‌شوند. بر اساس نتایج دبی حداکثر حوضه در این حالت برابر $2/81$ مترمکعب بر ثانیه و زمان تا اوج هیدروگراف معادل $4:30$ (چهار ساعت و سی دقیقه) برآورد شده است. کل رواناب حاصل از این بارش نیز معادل $50/7$ هزار متر مکعب بوده که در زمانی معادل حوضه $19:30$ از حوضه خارج شده است (جدول ۵).

جدول ۵. خصوصیات هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح تحت سناریوهای مختلف اجرای عملیات آبخیزداری

Table 5. Characteristics of the simulated flood hydrograph resulting from design rainfall under different watershed management operation scenarios.

کاربری و عملیات	دبی اوج (m ³ /s)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)	حجم (m ³ ×1000)	حجم بارش (m ³ ×1000)
قبل از اجرا	2.81	4:30	19:30	50.7	226.24
عملیات بیولوژیکی	2.78	4:40	19:35	50.4	
عملیات بیولوژیکی و مکانیکی	0.16	60:24	284:48	49.7	

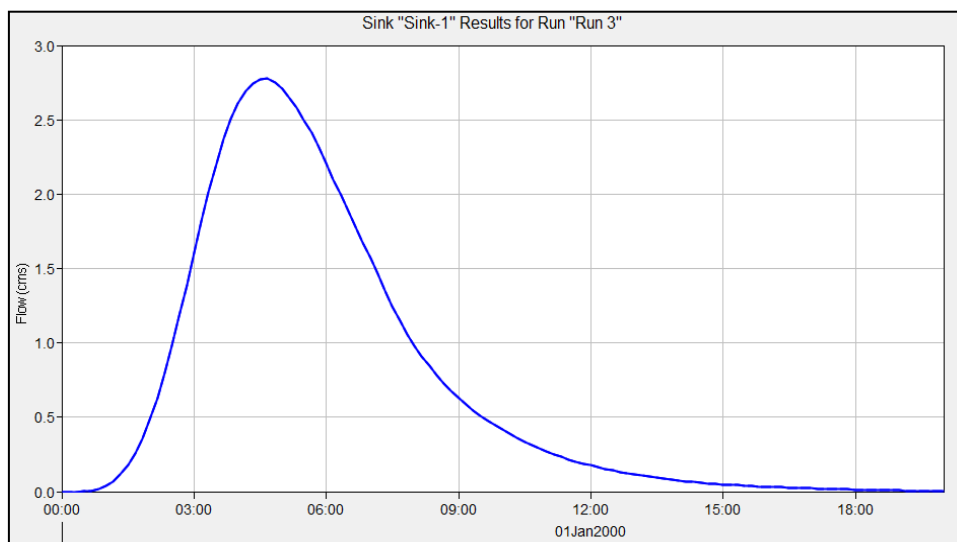


شکل ۵. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح در سناریو قبل از اجرای عملیات آبخیزداری

Figure 5. Simulated flood hydrograph resulting from design rainfall under the scenario before watershed management operations.

کاربری پوشش اراضی بعد از اجرای عملیات بیولوژیک

شکل (۶) هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز گردو را برای بارش طرح محاسبه شده و پس از اجرای عملیات بیولوژیک به مساحت ۶۹ هکتار نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل بعد از اجرای عملیات بیولوژیک دبی اوج هیدروگراف خروجی از ۲/۸ به ۲/۷۸ کاهش یافته و زمان پایه هیدروگراف نیز از ۱۹:۳۰ به ۱۹:۲۵ افزایش یافته است (جدول ۵). ایجاد عملیات بیولوژیک حجم سیلاب خروجی حوضه را از ۵۰/۷ هزار متر مکعب به ۵۰/۴ هزار متر مکعب کاهش داده است (معادل ۰/۰۰۶ درصد از حجم رواناب). این نتایج نشان می‌دهد که اجرای عملیات بیولوژیک در این سطح تاثیری بر حجم خروجی رواناب حوضه نداشته است و دبی حداکثر حوضه را به میزان ناچیزی کاهش داده است.



شکل ۶. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح در سناریو بعد از اجرای عملیات بیولوژیک

Figure 6. Simulated flood hydrograph resulting from design rainfall under the scenario after biological operations.

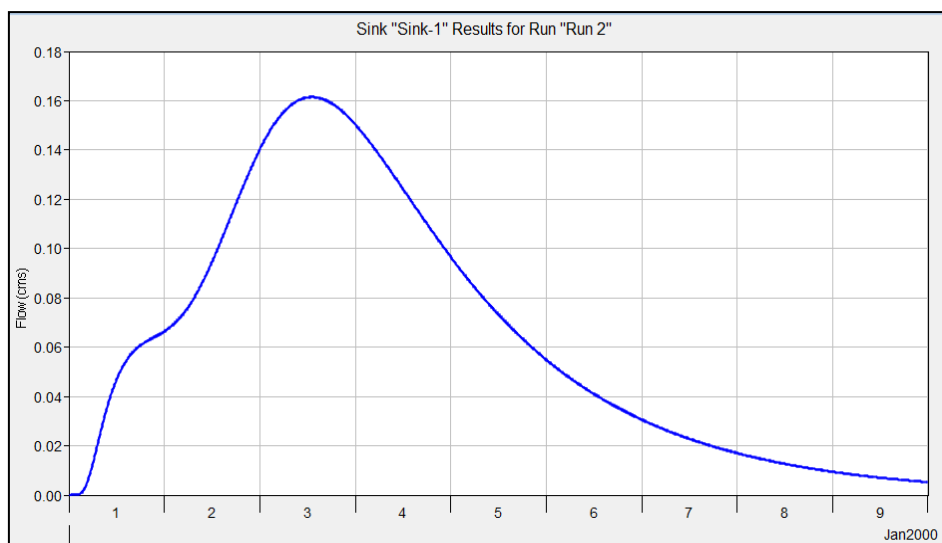
جدول (۶) خصوصیات هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز گردو تحت سناریوهای قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل در مقیاس زیر حوضه‌ها تاثیر قابل توجهی در دبی اوج، زمان تا اوج و حجم سیلاب در اثر اجرای عملیات بیولوژیک ایجاد نشده است. بیشترین ضریب رواناب متعلق به زیرحوضه شماره ۳ است که بیشترین مساحت را نیز به خود اختصاص داده است.

جدول ۶. خصوصیات هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح در زیرحوضه‌ها تحت سناریوهای قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک
Table 6. Characteristics of the simulated flood hydrograph resulting from design rainfall in sub-watersheds under scenarios before and after biological operations.

زیرحوضه	کاربری و عملیات	دبی اوج (m ³ /s)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)	حجم (m ³ ×1000)	حجم بارش (m ³ ×1000)	ضریب رواناب
زیرحوضه ۱	قبل	0.6	3:51	15:00	10.3	58.8	0.175
	بعد	0.59	3:47	15:35	10.3		
زیرحوضه ۲	قبل	0.42	2:40	10:00	5.1	31.1	0.164
	بعد	0.41	2:35	10:05	4.9		
زیرحوضه ۳	قبل	1.02	4:10	01:00	20	73.1	0.274
	بعد	1.00	4:00	18:40	20		
زیرحوضه ۴	قبل	0.28	2:40	10:30	3.7	23.6	0.157
	بعد	0.28	2:40	10:30	3.7		
زیرحوضه ۵	قبل	0.66	3:35	15:30	23.6	54.2	0.214
	بعد	0.64	3:40	15:55	54.2		

کاربری پوشش اراضی و اضافه شدن بندها بعد از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی

شکل (۷) هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده حوضه برای بارشی معادل بارش طرح در نظر گرفته شده را برای حالتی که عملیات بیولوژیک و مکانیکی هر دو اجرا شده است نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان از تاثیر بسیار زیاد اقدامات سازه‌ای بر دبی اوج و زمان تخلیه سیلاب دارد ولی حجم سیلاب خروجی تغییر زیادی نداشته است. بر اساس نتایج پس از اعمال اثر بندهای اصلاحی دبی اوج هیدروگراف از ۲/۸۱ به ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است و در عوض سیلاب حوضه در زمانی معادل ۲۸۴ ساعت از حوضه تخلیه شده است. میزان کاهش حجم رواناب تخلیه شده نیز تنها یک هزار مترمکعب یعنی کمتر از ۰/۲ درصد از رواناب می‌باشد (جدول ۷). نتایج حاصل نشان داد که حجم آب حاصل از بارش در این حوضه به ازای ۱۶ میلیمتر بارش معادل ۲۲۶/۲۴ هزار متر مکعب است. با توجه به حجم رواناب برآوردی معادل ۵۰/۷ هزار متر مکعب ضریب رواناب حوضه برابر ۰/۲۲۴ برآورد می‌شود. برآوردها نشان داد که انجام فعالیت‌های آبخیزداری تاثیری از نظر حجم رواناب خروجی حوزه آبخیز گردو نداشته است. در برخی مطالعات انجام شده در سایر نقاط ایران و جهان کاهش تا حدود ۱۴ درصدی رواناب خروجی نیز گزارش شده است ولی در حوضه آبخیز گردو با توجه به نوع سازندها، عمق کم خاک و همچنین شیب و شکل حوضه عملاً همه رواناب با تاخیر تخلیه می‌شود.



شکل ۷. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش طرح در سناریو بعد از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی

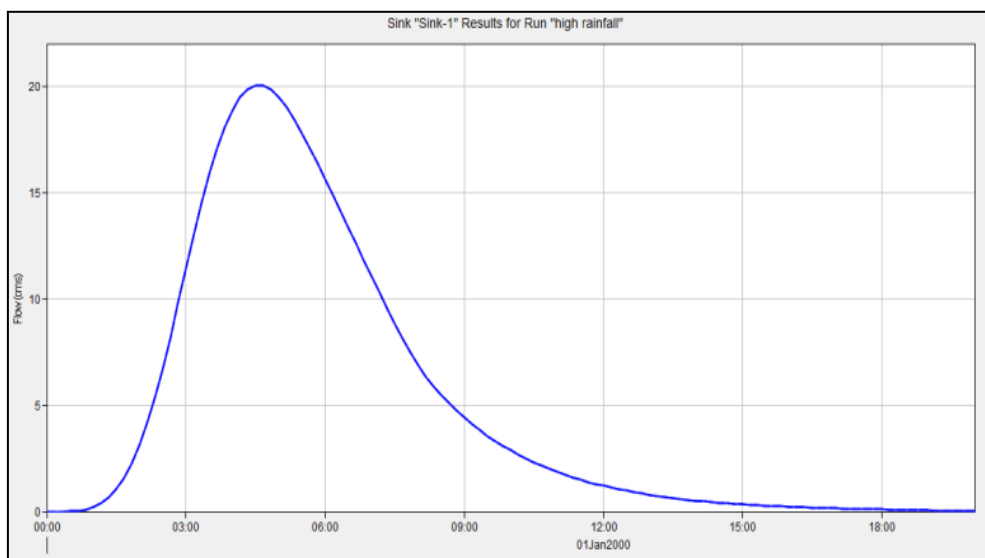
Figure 7. Simulated flood hydrograph resulting from design rainfall under the scenario after biological and mechanical operations.

بارش حداکثر منطقه

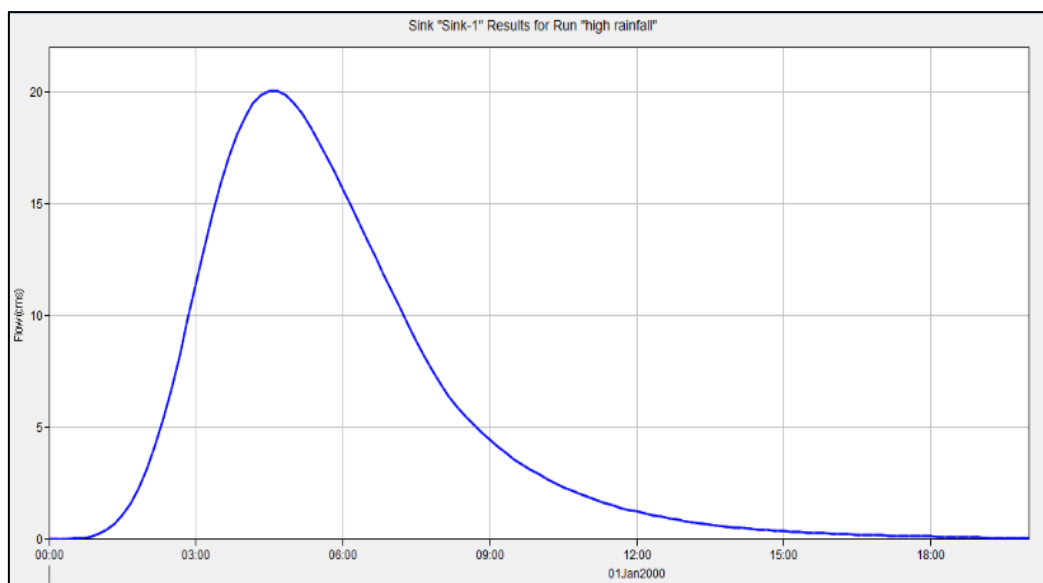
به منظور بررسی عملکرد فعالیت‌های بیولوژیک و مکانیکی انجام شده در سطح حوزه آبخیز گردو در بارش‌های شدید حداکثر بارش ۲۴ ساعته اتفاق افتاده طی دوره آماری مورد مطالعه (از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۷) معادل ۵۶ میلیمتر در سناریوهای مختلف وارد مدل شد. مطالعه حداکثر بارش روزانه در فعالیت‌های عمرانی، مقابله با بلایای طبیعی، عملیات آبخیزداری و کشاورزی اهمیت دارد.

کاربری پوشش اراضی قبل از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی

شکل (۸) هیدروگراف سیلاب خروجی شبیه‌سازی شده حوضه را برای یک بارش ۲۴ ساعته ۵۶ میلیمتری در سناریوی بدون عملیات آبخیزداری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل این بارش برای زمانی که هیچ عملیات آبخیزداری در حوضه انجام نشده باشد، دبی حداکثری معادل ۲۰/۴۰ مترمکعب در ثانیه ایجاد کرده است. شکل (۹) هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده حوزه آبخیز گردو را برای بارش طرح محاسبه شده و پس از اجرای عملیات بیولوژیک به مساحت ۶۹ هکتار نشان می‌دهد.



شکل ۸. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش حداکثر منطقه در سناریو قبل از اجرای عملیات آبخیزداری
 Fig. 8. Simulated flood hydrograph resulting from maximum regional rainfall under the scenario before watershed management operations.



شکل ۹. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش حداکثر منطقه در سناریو بعد از اجرای عملیات بیولوژیک
 Figure 9. Simulated flood hydrograph resulting from maximum regional rainfall under the scenario after biological operations.

کاربری پوشش اراضی بعد از اجرای عملیات بیولوژیک

بر اساس نتایج حاصل بعد از اجرای عملیات بیولوژیک دبی اوج هیدروگراف خروجی بعد از اجرای عملیات بیولوژیک از ۲۰/۴۰ به ۲۰/۰۲ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته و زمان پایه هیدروگراف نیز در دو حالت ۱۹:۵۰ بدون تغییر بوده است (جدول ۷). ایجاد عملیات بیولوژیک حجم سیلاب خروجی حوضه را از ۳۶۰/۱ هزار متر مکعب به ۳۵۸/۰ هزار متر مکعب کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که همانند بارش ۱۶ میلیمتری طرح، با افزایش مقدار بارش به میزان یک بارش حداکثر ۵۸ میلیمتری نیز اجرای عملیات بیولوژیک در این سطح تاثیری بر حجم خروجی رواناب حوضه نداشته است و دبی حداکثر حوضه را به میزان ناچیزی کاهش داده است.

جدول ۷. خصوصیات هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش حداکثر منطقه تحت سناریوهای مختلف اجرای عملیات آبخیزداری

Table 7. Characteristics of the simulated flood hydrograph resulting from maximum regional rainfall under different watershed management operation scenarios.

کاربری و عملیات	دبی اوج (m ³ /s)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)	حجم (m ³ ×1000)	حجم بارش (m ³ ×1000)
قبل از اجرا	20.40	4:30	19:50	360.1	735.5
عملیات بیولوژیک	20.02	4:30	19:50	358.0	
عملیات بیولوژیک و مکانیکی	1.11	64:40	29:00	351.0	

جدول (۸) تاثیر اجرای عملیات آبخیزداری بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه را در مقیاس زیر حوضه‌ها و به ازای بارش حداکثر ۲۴ ساعته ایستگاه سینوپتیک اراک برای حالت قبل و بعد از اجرای عملیات بیولوژیک نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل همانند بخش بارش طرح، در اینجا نیز در مقیاس زیرحوضه‌ها تأثیر قابل توجهی در دبی اوج، زمان تا اوج و حجم سیلاب در اثر اجرای عملیات بیولوژیک ایجاد نشده است. همچنین بیشترین ضریب رواناب متعلق به زیرحوضه شماره ۳ بوده که بیشترین مساحت را نیز به خود اختصاص داده است.

جدول ۸. خصوصیات هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش حداکثر منطقه در زیرحوضه‌ها تحت دو سناریو.

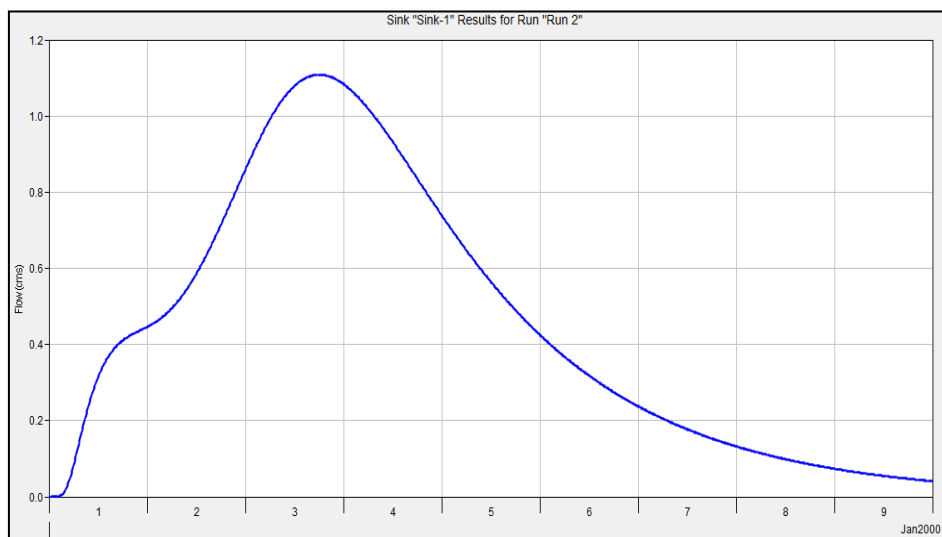
Table 8. Characteristics of the simulated flood hydrograph resulting from maximum regional rainfall in sub-watersheds under two scenarios.

زیرحوضه	کاربری و عملیات	دبی اوج (m ³ /s)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)	حجم (m ³ ×1000)	حجم بارش (m ³ ×1000)
زیرحوضه ۱	قبل	4.90	3:45	17:50	85	196.6
	بعد	4.82	3:45	18:10	84.7	
زیرحوضه ۲	قبل	3.98	2:45	12:10	47.3	104
	بعد	3.84	2:44	12:25	46.3	
زیرحوضه ۳	قبل	6.04	4:12	19:40	118.4	244.5
	بعد	5.98	4:18	20:05	117.8	
زیرحوضه ۴	قبل	2.41	2:55	13:20	31.6	79
	بعد	2.41	2:55	13:20	31.6	
زیرحوضه ۵	قبل	4.43	3:48	18:05	77.9	181.4
	بعد	4.30	3:50	18:18	76.7	

کاربری پوشش اراضی و اضافه شدن بندها بعد از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی

شکل (۱۰) هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده حاصل از یک بارش ۲۴ ساعته معادل ۵۶ میلی‌متری را پس از اعمال نقش هم‌زمان فعالیت‌های بیولوژیک و مکانیکی نشان می‌دهد. براساس نتایج در این حالت، دبی اوج سیلاب از ۲۰/۴۰ مترمکعب در ثانیه به ۱/۱۱ مترمکعب در ثانیه کاهش یافته است. زمان پایه هیدروگراف سیلاب در این حالت به ۲۹۰ ساعت افزایش یافته است در حالی که قبل از

اجرای عملیات آبخیزداری زمان پایه هیدروگراف سیلاب تنها ۱۹/۵ ساعت بوده است. کاهش دبی اوج سیلاب هم‌زمان با افزایش زمان پایه هیدروگراف سیلاب باعث شده است که ۰/۹۷۵ درصد سیلاب در طول ۲۹۰ ساعت از حوضه خارج شود. به عبارتی با احداث سازه‌های آبخیزداری تنها کمتر از ۳ درصد از حجم رواناب خروجی حوضه کاسته شده است و انجام عملیات آبخیزداری تنها باعث کاهش دبی اوج و تعدیل جریان خروجی از حوضه شده است.



شکل ۱۰. هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده حاصل از بارش حداکثر منطقه در سناریو بعد از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی

Figure 10. Simulated flood hydrograph resulting from maximum regional rainfall under the scenario after biological and mechanical operations.

بر اساس نتایج حاصل از واسنجی و ارزیابی مدل و با توجه به درصد کم اختلاف بین دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی در وقایع مورد استفاده، مشخص شد که مدل HEC-HMS از کارایی لازم برای شبیه‌سازی حوضه گردو برخوردار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، این مدل به پارامترهای شماره منحنی و تلفات اولیه حساسیت زیادی دارد. نتایج شبیه‌سازی این مدل در تحقیقات Abbasi و همکاران (۲۰۰۹)، Shokoohi (۲۰۰۷)، Azari و همکاران (۲۰۱۱)، Dehghani و همکاران (۲۰۱۵) و Chidaz و همکاران (۲۰۰۹) نیز موید تطابق قابل قبول هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تأثیر اجرای پروژه‌های آبخیزداری اجرا شده بر منابع آب سطحی از طریق مدل‌سازی و با استفاده از روش شماره منحنی بررسی شد. نتیجه شبیه‌سازی رواناب خروجی حوضه در سناریوهای مختلف نشان داد که اجرای عملیات بیولوژیک در این سطح محدود هیچ تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات سیلاب حوزه آبخیز نداشته است. از سوی دیگر اجرای عملیات سازه‌ای باعث شده است که دبی اوج سیلاب‌های منطقه بیش از ۷۵ درصد کاهش یابد. بررسی منطقه مورد مطالعه نشان داد که حوزه آبخیز گردو یک حوضه کوهستانی است و کلیه رواناب‌های این حوضه بایستی وارد آبخوان اراک شده و این آبخوان را تغذیه کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان خروجی حوضه گردو نشان داد که حدود ۹۸ درصد از رواناب‌های حوضه پس از اجرای عملیات بیولوژیک و مکانیکی از حوضه خارج می‌شود و در نهایت حدود ۲ درصد از حجم رواناب خروجی کاسته می‌شود. کاهش دبی اوج سیلاب‌ها از یک طرف و افزایش زمان تخلیه رواناب از سوی دیگر باعث می‌شود که سرعت و میزان نفوذ رواناب در سطح آبخوان افزایش یابد. بنابراین بخش زیادی از رواناب یا وارد منابع آب سطحی منطقه مانند تالاب میقان گردیده و یا داخل زمین نفوذ کرده و باعث تغذیه آبخوان می‌شود. بر این اساس احداث سازه‌های آبخیزداری تأثیری بر بیلان آب مناطق پایین‌دست نداشته است و تنها باعث کاهش دبی اوج سیلاب‌های منطقه و در نتیجه کاهش آثار زیان‌بار آن می‌گردد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که اجرای عملیات آبخیزداری با توجه به حجم مورد نیاز عملیات سازه‌ای و هزینه‌های بالا، در صورت استفاده از روش آرایه شده و مکان‌یابی مناسب امکان کاهش چشم‌گیر هزینه‌های اجرا فراهم شده و عملیات آبخیزداری بهینه‌سازی خواهد شد. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش فعلی توصیه می‌گردد مطالعات مشابه با بهره‌گیری از مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی

انجام و با انتخاب مدل‌های مناسب و منطقه‌ای و با عنایت به لزوم اهمیت انتخاب سناریوی برتر در مهار سیلاب بازه‌های مشخص مورد نظر، در ارزیابی پروژه‌های مختلف و انتخاب گزینه‌های مهار سیلاب قبل از اجرا به کار گرفته شود. نتایج این تحقیق و بررسی سوابق آن نشان می‌دهد که بیشتر به جنبه‌های اثربخشی اقدامات آبخیزداری روی مشخصات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه توجه شده است. در صورتیکه توجه به مسایل اقتصادی و تعیین استراتژی‌های تصمیم‌گیری برای تعدیل یا توسعه عملیات آبخیزداری با صرف کمترین هزینه از طریق شبیه‌سازی حوضه بسیار حائز اهمیت است. بنابراین نیاز است که در پژوهش‌های آینده به مسائل اقتصادی و استراتژی‌های تصمیم‌گیری، مدیریت و پیش‌بینی تعداد سازه‌های مورد نیاز پرداخته شود.

سپاسگزاری

در پایان از مدیریت آبخیزداری استان مرکزی نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

منابع

- Abbasi, M., Khairkhan Zarkhakh, M., Hosseini, M., & Mohseni Saravi, M. M. Rohani, 2009, Assessment of Watersheds Technical proceedings using the HEC-HMS Model (Case Study: Tehran Province Branch), Final report of the research project, Soil Conservation and Watershed Management Institute. *Educational Research Organization and Agriculture emitting*.
- Acheampong, J. N., Gyamfi, C., & Arthur, E. (2023). Impacts of retention basins on downstream flood peak attenuation in the Odaw river basin, Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101364.
- Allias Omar, S. M., Wan Ariffin, W. N. H., Mohd Sidek, L., Basri, H., Moh Khambali, M. H., & Ahmed, A. N. (2022). Hydrological analysis of Batu Dam, Malaysia in the Urban area: flood and failure analysis preparing for climate change. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16530.
- Evrard, O., Persoons, E., Vandaele, K., & Van Wesemael, B. (2007). Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt. *Agriculture, ecosystems & environment*, 118(1-4), 149-158.
- Ghaffari, F., & Jamali, A. (2013). Assessment of Watershed Biological proceedings in Reducing Flood Peak Using HEC-HMS Model in Dehgin Basin of Hormozgan Province. In *9th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. October* (Vol. 25).
- Golrang, B. M., Lai, F. S., Sadeghi, S. H. R., Khamurudin, M. N., Kudus, K., Mashayekhi, M., & Bagherian, R. (2013). Assessment of Watershed Management Implemented on Springal Peak Flood Discharge and Flood Volume, Using HEC-HMS Model (Case study: Kushk Abad subbasin in Iran). *Science and Nature*, 2(2), 59-64.
- He, C. (2003). Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9), 809-813.
- Kalhor, M. (2007). *Assessment of Technical-economic of watershed management projects in Jajroud Basin* (Doctoral dissertation, Thesis of Watershed Management, Tehran University, Department of natural resources).
- Laassilia, O., Saghiry, S., Ouazar, D., Bouziane, A., & Hasnaoui, M. D. (2022). Flood forecasting with a dam watershed event-based hydrological model in a semi-arid context: case study in Morocco. *Water Practice & Technology*, 17(4), 817-834.
- Magilligan, F. J., & Nislow, K. H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1-2), 61-78.
- Moazeni-Noghondar, S., Alikhani, F., & Hatami Yazd, A. (2022). Assessment of the effect of watershed management operations on runoff and soil erosion (Case study: Nakhah Boshrouyeh basin). *Journal of Range and Watershed Management*, 75(2), 299-317.
- Moradinejad, A., davodirad, A. and Akhondi, O. (2023). Effect of gabion dam construction on peak discharge and hydraulic characteristics of river flow. *Extension and Development of Watershed Management*, 11(41), 59-68. (In Persian).
- Nabi Pour, Y., Vafakhah, M., & H. Moradi, 2014, Effect of Watershed Management operation on Flood characteristics, *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 18 (67): 199-212. (In prison).
- Naef, F., Scherrer, S., & Weiler, M. (2002). A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of hydrology*, 267(1-2), 74-79.
- Nafarzadegan, A. R., Kazemi, M., & Samiee, M. (2024). Investigating the Effect of Check Dams on Flood Hydrograph in an Ungauged Watershed (Case study: Kander Abdolreza, Fars province). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 18(64), 64-75.
- Sadeghi, S. H. R., Frootan, E., & Sharifi, F. (2006). Performance evaluation of watershed management measures using qualitative method. *Geographical Research*, 79(4), 37-47.
- Shi, P., Zhang, Y., Ren, Z., Yu, Y., Li, P., & Gong, J. (2019). Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 664, 984-994.

- Soleimani, F., El-Kathir, A., & Arsham, A. F. Sosnager, 2011 Evaluation of performance biological operation of watershed management projects in the Karoon area Case study of Khersan valley watershed Masjed Soleiman. In *7th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. April* (pp. 27-28).
- Tajiki, M., 2007. Evaluation of the Effect of Watershed Management on Flooding and Sedimentation (Case Study of Ramian Watershed), Thesis of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 125 p.
- Teymouri, M., & Omrani, M. (2010). Investigating the performance of watershed projects, case study: Keshir Watershed. In *6th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. April* (pp. 26-27).
- Yoshikawa, N., Nagao, N., & Misawa, S. (2010). Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project. *Agricultural Water Management*, 97(2), 259-270.
- Yuan, S., Li, Z., Chen, L., Li, P., and Zhang, Z. 2022. Influence of check dams on flood hydrology across varying stages of their lifespan in a highly erodible catchment, Loess Plateau of China. *Catena*, 210: 105864.