

Experimental assessment of individual check dam performance for peak flow reduction using a small-scale model of Sijan Stream

Rouhangiz Akhtari^{1*}, Hamidreza Hajipour², Mojtaba Saneie³ and Mohammad Reza Gharib Reza³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² PhD Candidate, Department of Civil Engineering (Water Engineering), Islamic Azad University, Najafabad Branch, Isfahan, Iran

³ Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 19 April 2025

Accepted: 02 July 2025

Extended abstract

Introduction

Seasonal floods in mountainous regions of Iran are a major challenge for water resources management and the protection of rural communities. This study evaluates the effectiveness of check dams in reducing seasonal flood impacts in the Sijan watershed, Alborz Province, Iran. The watershed was selected because of its high flood potential, the occurrence of destructive debris floods (including the 2015 event), and the importance of Sijan village as a popular tourist destination. In 2018, the Forests, Rangelands and Watershed Management Organization of Iran constructed one masonry check dam and four gabion check dams along the main channel upstream of the village to reduce debris flood hazards. The main objective of this research was to simulate the historical flood event and evaluate the effectiveness of these structures in modifying flood hydrographs. Because the stream is seasonal and hydrometric data are limited, a physical model was used as the main research tool. This paper presents the results of the first stage of the study, which focuses on evaluating the effects of the check dams on runoff flood hydrographs (clear water flow without sediment).

Materials and methods

A direct physical modelling approach was used to investigate the influence of check dams on flood peak reduction and peak delay. Field investigations were carried out along a 700 m reach of the Sijan stream after the construction of the check dams. A detailed topographic survey at a scale of 1:1000 was then conducted. Due to laboratory space limitations, a 168 m section containing three 1 m high check dams was selected for modelling. A 1:10 scale physical model was built at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute following geometric and dynamic similarity principles. To eliminate infiltration effects, the channel bed and banks were made impermeable. The experiments considered two main factors: channel condition and inflow hydrograph characteristics. Three channel conditions were tested: (1) no check dams, (2) empty check dams, and (3) sediment-filled check dams. Flow conditions included both steady flow for stage-discharge calibration and unsteady triangular hydrographs for flood simulation. The time to peak was examined under three conditions: shorter than, equal to, and longer than the watershed concentration time. Peak discharges were selected below the estimated 10-year flood because of laboratory limitations. Hydraulic variables were measured using standard weirs, and all experiments were video recorded to improve measurement accuracy. The analysis focused on three hydraulic indicators: peak discharge reduction, delay in peak arrival time, and changes in flood base duration. In total, 90 experiments were conducted, and the outlet hydrographs were recorded using a sharp-crested rectangular weir.

Results and discussion

The results demonstrate that 1 m high check dams significantly modify flood hydrographs under different hydrological conditions using clear water over a rigid, non-erodible bed. In the natural channel without check dams, increasing inflow discharge reduced both peak attenuation and peak delay. Empty check dams showed the highest efficiency for floods with peak discharges below 4.74 m³/s (approximately corresponding to return periods of less than five years). Under these conditions, the dams temporarily stored runoff and effectively attenuated the flood hydrograph. However, as flood magnitude increased or the dams

* Corresponding author: r.akhtari@areeo.ac.ir

became filled with sediment, their storage capacity decreased, resulting in lower flood mitigation performance. The experiments showed that empty check dams reduced peak discharge by up to 28% and increased the time to peak by up to 36% during small and moderate floods. In addition, the ratio between watershed concentration time (t_c) and flood time to peak (T_p) was identified as a key parameter controlling dam performance. For floods with short hydrograph duration ($T_p < t_c$), representing intense short-duration storms, the dams achieved their highest efficiency, reducing peak discharge by up to 22.5% and increasing peak delay by up to 43%. Their effectiveness gradually decreased as flood return period and hydrograph duration increased. The results indicate that the design of check dam systems should consider watershed hydrological characteristics, including flood return period, hydrograph shape, time to peak, and sediment accumulation, to maximize flood reduction efficiency. Three empirical equations based on dimensional analysis were developed to quantify the effects of check dams on flood hydrograph characteristics. These equations showed good predictive performance, with coefficients of determination (R^2) ranging from 0.81 to 0.92. However, their application to other watersheds requires local calibration.

Conclusions

The physical model results also identified the ratio t_c/T_p as a practical indicator for evaluating check dam performance. When $t_c/T_p > 1$, floods have a short time to peak and a narrow hydrograph. Under these conditions, check dams provide temporary storage, increase backwater effects, enhance local turbulence and energy dissipation, and significantly reduce peak discharge while delaying flood propagation. When $t_c/T_p \approx 1$, the inflow hydrograph is well balanced with the storage capacity of the dams, resulting in effective but moderate flood attenuation. When $t_c/T_p < 1$, floods have a longer duration, and the available storage behind the dams gradually becomes full. Consequently, the proportion of dissipated flow energy decreases, leading to lower reductions in peak discharge and smaller delays in flood timing. Overall, the findings demonstrate that check dam performance depends not only on the structural characteristics of the dams but also on watershed hydrology, particularly the t_c/T_p ratio. Therefore, in watersheds with short concentration times, check dams are particularly effective for mitigating flash floods and should be designed to maximize temporary storage and energy dissipation. In contrast, in watersheds with longer concentration times, combining check dams with larger storage facilities and other watershed management measures is likely to provide better flood mitigation. The study also highlights the importance of considering long-term sediment deposition during the design and maintenance of check dams, as sediment accumulation significantly reduces their storage capacity and hydraulic performance over time.

Keywords: Debris flood, Energy dissipation, Flood hydrograph, Sediment deposition, Time of concentration, Watershed management

Cite this article: Akhtari, R., Hajipour, H., Saneie, M., Gharibreza, M.R., 2026. Experimental assessment of individual check dam performance for peak flow reduction using a small-scale model of Sijan Stream. Watershed. Water. Eng. Manag. 18(2), 275-296.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



بررسی آزمایشگاهی عملکرد بندهای اصلاحی منفرد در کاهش دبی اوج سیلاب با استفاده از مدل فیزیکی مسیل سیجان

روح انگیز اختری^{۱*}، حمیدرضا حاجی پور^۲، مجتبی صانعی^۳ و محمدرضا غریب‌رضا^۳

^۱ استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران

^۳ دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

چکیده مبسوط

مقدمه

سیلاب‌های فصلی در مناطق کوهستانی ایران از جمله چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب و حفاظت از سکونتگاه‌های روستایی محسوب می‌شوند. این مطالعه به بررسی اثربخشی سازه‌های آبخیزداری در کنترل سیلاب‌های فصلی در حوزه آبخیز سیجان واقع در استان البرز می‌پردازد. انتخاب این منطقه به دلایل متعددی از جمله حوزه آبخیز سیجان به دلیل پتانسیل بالای سیل‌خیزی، سابقه وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای مخرب (از جمله سیلاب سال ۱۳۹۴) و اهمیت گردشگری روستا به عنوان منطقه مطالعه انتخاب شد. در سال ۱۳۹۷، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور با هدف کاهش ریسک سیلاب‌های واریزه‌ای، اقدام به اجرای عملیات آبخیزداری در این منطقه نمود که شامل احداث یک بند سنگی ملاتی و چهار بند گابیونی در مسیل اصلی مشرف به روستا بود. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی سیلاب واریزه‌ای تاریخی و ارزیابی عملکرد سازه‌های مذکور در تعدیل ویژگی‌های هیدروگراف سیلاب طراحی شده است. با توجه به ماهیت فصلی جریان رودخانه و کمبود داده‌های هیدرومتری، از روش مدل‌سازی فیزیکی (مدل کوچک مقیاس مسیل سیجان) به عنوان ابزار اصلی تحقیق استفاده شد. پژوهش حاضر به ارائه نتایج مرحله‌ی اول این مطالعه که شامل تحلیل کمی تأثیر سازه‌ها بر پارامترهای هیدروگراف سیلاب روانابی (جریان آب بدون رسوب) است، اختصاص یافته است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مستقیم یک آبراهه مجهز به بندهای اصلاحی به بررسی تأثیر این سازه‌ها بر کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تأخیر در رسیدن به پیک جریان پرداخته است. مطالعه میدانی در مسیل سیجان (بالادست روستای سیجان) به طول ۷۰۰ متر انجام شد و پس از احداث بندهای اصلاحی، نقشه‌برداری زمینی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ صورت گرفت. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، بخشی به طول ۱۶۸ متر از این مسیل که شامل سه بند اصلاحی به ارتفاع یک متر بود برای پژوهش انتخاب شد. مدل فیزیکی با رعایت اصول تشابه هندسی و دینامیکی و با مقیاس ۱:۱۰ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور ساخته شد. برای حذف اثرات نفوذ جریان، مدل به صورت نفوذناپذیر طراحی شد. آزمایش‌ها بر اساس دو عامل شامل شرایط آبراهه (بدون بند، بندهای خالی از رسوب و بندهای پر از رسوب) و شرایط جریان ورودی (دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج) طراحی شدند. شرایط آبراهه در سه حالت

* مسئول مکاتبات: r.akhtari@areeo.ac.ir

شامل حالت شاهد (بدون بند اصلاحی)، بندهای اصلاحی خالی از رسوب و بندهای اصلاحی پر از رسوب بررسی شد. جریان ورودی به مدل در دو حالت جریان دائمی (برای ترسیم منحنی‌های دبی-اشل) و جریان غیردائمی (با هیدروگراف مثلثی جهت شبیه‌سازی سیلاب) اعمال شد. زمان رسیدن به دبی اوج در سه حالت کمتر، برابر و بیشتر از زمان تمرکز در نظر گرفته شد و دبی اوج نیز کمتر از مقدار متناظر با دوره بازگشت ده‌ساله (با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی) انتخاب شد. پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از سرریزهای استاندارد اندازه‌گیری و برای افزایش دقت قرائت اشل‌ها، کل آزمایش‌ها فیلم‌برداری شد. تحلیل داده‌ها با محاسبه شاخص‌های کمی شامل کاهش دبی پیک، تأخیر زمانی رسیدن به پیک و تغییرات زمان پایه سیلاب انجام شد. در مجموع، ۹۰ آزمایش انجام شد و هیدروگراف خروجی از طریق یک سرریز فشرده مستطیلی در انتهای مدل ثبت شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش تأثیر بندهای اصلاحی با ارتفاع یک متر را بر ویژگی‌های هیدروگراف سیلاب در شرایط مختلف هیدرولوژیکی، با استفاده از آب صاف و بستر صلب و غیرقابل فرسایش، بررسی کرد. در مسیل طبیعی بدون بند، با افزایش دبی ورودی، میزان کاهش دبی اوج و تأخیر زمانی رسیدن به پیک کاهش یافت. همچنین بندهای اصلاحی خالی از رسوب در دبی‌های کمتر از $4/74$ مترمکعب بر ثانیه (معادل سیلاب‌هایی با دوره بازگشت کمتر از ۵ سال) بیشترین کارایی را در ذخیره موقت جریان و تعدیل هیدروگراف نشان دادند، در حالی که با افزایش دبی یا پرشدگی بندها از رسوب، به دلیل کاهش حجم مفید ذخیره، اثربخشی آنها کاهش یافت. تحلیل نتایج نشان داد که بندهای خالی از رسوب در سیلاب‌های با دوره بازگشت کوتاه می‌توانند دبی اوج را تا ۲۸ درصد کاهش داده و زمان رسیدن به پیک را تا ۳۶ درصد افزایش دهند. علاوه بر این، نسبت زمان تمرکز حوضه به زمان رسیدن به دبی اوج، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سازه‌ها داشت؛ به‌گونه‌ای که در سیلاب‌های با زمان پایه کوتاه ($Tp < tc$)، که معرف وقوع رگبارهای ناگهانی هستند، بیشترین میزان کاهش دبی اوج (تا $22/5$ درصد) و افزایش زمان تأخیر (تا ۴۳ درصد) مشاهده شد. با افزایش دوره بازگشت سیلاب و طولانی‌تر شدن زمان پایه، اثر بندها در تعدیل سیلاب به‌تدریج کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج همچنین نشان داد طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب با بندهای اصلاحی باید بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه، شامل دوره بازگشت سیلاب، زمان رسیدن به دبی اوج و وضعیت رسوب‌گذاری بندها انجام شود تا بیشترین کارایی حاصل شود. در نهایت، سه رابطه تجربی مبتنی بر تحلیل ابعادی برای کمی‌سازی تأثیر بندهای اصلاحی بر ویژگی‌های هیدروگراف استخراج شد که با ضرایب تعیین $0/81$ تا $0/92$ قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی تغییرات هیدروگراف در شرایط مشابه دارند، هرچند کاربرد آنها در سایر حوضه‌ها مستلزم واسنجی است. بر اساس نتایج مدل فیزیکی، نسبت زمان تمرکز حوضه (tc) به زمان رسیدن به دبی اوج (Tp) به عنوان شاخص کلیدی در ارزیابی عملکرد بندهای اصلاحی در تعدیل هیدروگراف سیلاب شناسایی شد. بر این اساس، عملکرد هیدرولیکی سازه‌ها را می‌توان در سه حالت تفسیر کرد: حالت اول: ($tc/Tp > 1$) در این شرایط، زمان رسیدن به دبی اوج کوتاه‌تر از زمان تمرکز حوضه بوده و سیلاب دارای هیدروگرافی با اوج تیز و زمان پایه کوتاه است. در این وضعیت، بندهای اصلاحی فرصت کافی برای ذخیره‌سازی موقت رواناب و استهلاک انرژی دارند. تشکیل پس‌آب در بالادست بندها، افزایش آشفتگی و گردابه‌های موضعی و در نتیجه اتلاف بیشتر انرژی، موجب افزایش زمان انتقال جریان و کاهش دبی اوج خروجی می‌شود. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که بیشترین کارایی بندهای اصلاحی در کاهش دبی اوج و افزایش زمان تأخیر در این شرایط حاصل می‌شود. حالت دوم: ($tc/Tp \approx 1$) در این وضعیت، زمان رسیدن به دبی اوج تقریباً با زمان تمرکز حوضه برابر است و تعادل مناسبی میان حجم ذخیره‌سازی، دبی ورودی و ظرفیت استهلاک انرژی برقرار می‌شود. در نتیجه، بندهای اصلاحی همچنان عملکرد مناسبی در تعدیل هیدروگراف سیلاب دارند، هرچند میزان اثربخشی آنها نسبت به حالت اول کمتر است. حالت سوم: ($tc/Tp < 1$) در این شرایط، زمان رسیدن به دبی اوج از زمان تمرکز حوضه بیشتر بوده و سیلاب دارای زمان پایه بلندتری

است. با تداوم جریان، حجم مفید ذخیره پشت بندها به تدریج تکمیل شده و تغییرات زمانی جریان کاهش می‌یابد. در نتیجه، نسبت انرژی مستهلک‌شده به انرژی کل جریان کاهش یافته و کارایی بندهای اصلاحی در کاهش دبی اوج و افزایش زمان تأخیر افت می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که کارایی بندهای اصلاحی علاوه بر مشخصات هندسی سازه، به ویژگی‌های هیدرولوژیکی سیلاب، به‌ویژه نسبت t_c/T_p وابسته است. بنابراین، در حوضه‌های با زمان تمرکز کوتاه، این سازه‌ها در کنترل سیلاب‌های ناگهانی مؤثرتر بوده و طراحی آنها باید بر تأمین ظرفیت مناسب ذخیره‌سازی موقت و استهلاك انرژی متمرکز شود. در مقابل، در حوضه‌های با زمان تمرکز طولانی، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی گسترده‌تر و تلفیق بندهای اصلاحی با سایر اقدامات آبخیزداری می‌تواند اثربخشی بیشتری در کنترل سیلاب داشته باشد. همچنین، نتایج این مطالعه بر ضرورت لحاظ کردن روند رسوبگذاری در طراحی و بهره‌برداری از بندهای اصلاحی تأکید می‌کند، زیرا کاهش حجم مفید مخزن در طول زمان می‌تواند عملکرد هیدرولوژیکی این سازه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: آبخیزداری، اتلاف انرژی، رسوب‌گذاری، زمان تمرکز، سیلاب واریزه‌ای، هیدروگراف سیلاب

مقدمه

بررسی‌های جهانی حاکی از آن است که طی دو دهه اخیر، بلایای طبیعی با افزایش هم‌زمان فراوانی سیلاب‌های مخرب و تداوم دوره‌های خشکسالی همراه بوده‌اند. در حالی که سیلاب‌ها مسئول حدود ۴۷ درصد از کل بلایای طبیعی هستند، دوره‌های خشکسالی نیز با رشد ۲۹ درصدی نسبت به قرن گذشته، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب تبدیل شده‌اند. از این‌رو، جوامع انسانی به‌طور هم‌زمان با دو چالش اساسی، یعنی افزایش فراوانی و شدت بارش‌های حدی از یک سو و تداوم دوره‌های خشکسالی از سوی دیگر مواجه هستند.

این شرایط، ضرورت بازنگری در رویکردهای سنتی مدیریت منابع آب و حرکت به سوی مدیریت جامع و یکپارچه حوزه‌های آبخیز را بیش از پیش آشکار ساخته است. این پارادوکس اقلیمی در مناطق کوهستانی، از جمله استان البرز، که از یک سو با بارش‌های سیل‌آسا و از سوی دیگر با کاهش حدود ۴۰ درصدی نزولات جوی طی پنج سال اخیر مواجه بوده است، پیچیدگی بیشتری یافته است (UNDRR, 2022). در همین راستا، Mousafaei et al., (2019) نیز با بررسی روند توسعه آبخیزداری در ایران، بر ضرورت تلفیق اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای و اتخاذ رویکردهای جامع مدیریت آبخیز برای افزایش تاب‌آوری حوزه‌های آبخیز در برابر مخاطرات طبیعی تأکید کرده‌اند.

علاوه بر این، سیلاب‌ها بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی و میزان حمل رسوب، عمدتاً به سه گروه شامل سیلاب‌های روانابی (آب عاری از رسوب)، سیلاب‌های گلی و سیلاب‌های واریزه‌ای تقسیم می‌شوند. وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای معمولاً پس از دوره‌های طولانی خشکسالی، تخریب پوشش گیاهی و افزایش ناپایداری دامنه‌ها تشدید می‌شود؛ از این‌رو، شناخت نوع سیلاب غالب در هر حوزه آبخیز، یکی از پیش‌نیازهای اساسی برنامه‌ریزی و طراحی اقدامات آبخیزداری و سازه‌های کنترل سیلاب محسوب می‌شود. در این زمینه، Khalajzadeh et al., (2021) نشان دادند که ویژگی‌های مورفومتری و ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز، به‌ویژه طول آبراه اصلی و میانگین عرض حوزه، از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر در تفکیک سیلاب عادی، سیلاب واریزه‌ای و جریان واریزه‌ای بوده و می‌توانند مبنای مناسبی برای پیش‌بینی نوع جریان و انتخاب اقدامات مدیریتی مناسب باشند.

حوزه آبخیز سیجان به‌عنوان یکی از مناطق حساس استان البرز، سالانه شاهد خسارات قابل توجه ناشی از سیلاب‌های واریزه‌ای است که شامل تخریب اراضی کشاورزی، آسیب به زیرساخت‌ها و تهدید سکونتگاه‌های روستایی می‌شود (Akhtari et al., 2019). علاوه بر ویژگی‌های مورفولوژیکی حوزه، الگوی زمانی بارش، وضعیت پوشش گیاهی و شرایط فیزیوگرافی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید رواناب، فرسایش و انتقال رسوب دارند. Fattah et al., (2023) نشان دادند که

احیای اکوسیستم‌های آبخیز، کاهش تخریب کانال‌ها و افزایش پایداری ژئومورفولوژیکی نقش مؤثری دارند؛ هرچند موفقیت آنها به انتخاب صحیح محل احداث، طراحی هیدرولیکی مناسب و کیفیت اجرای پروژه وابسته است.

با وجود سرمایه‌گذاری‌های گسترده در اجرای پروژه‌های آبخیزداری، برخی از بندهای اصلاحی به دلیل مکان‌یابی نامناسب، انتخاب نادرست ابعاد سازه، کیفیت پایین اجرا و عدم استفاده از معیارهای طراحی متناسب با شرایط هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه، عملکرد مطلوبی نداشته‌اند و در برخی موارد موجب کاهش اعتماد به این سازه‌ها به‌عنوان ابزار مؤثر احیای آبخیز شده‌اند (Lucas-Borja et al., 2021). در همین راستا، Armin et al., (2024) با ارزیابی عملکرد رسوب‌گیری بندهای اصلاحی در حوضه آبخیز نهضت‌آباد نشان دادند که نسبت ظرفیت ذخیره مخزن به مساحت زیرحوضه بالادست، یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کارایی تله‌اندازی رسوب است و عدم رعایت معیارهای علمی در مکان‌یابی و طراحی بندهای اصلاحی می‌تواند موجب کاهش قابل توجه اثربخشی این سازه‌ها در مدیریت رسوب و آبخیزداری شود.

این سازه‌های کوچک‌مقیاس، متناسب با اهداف پروژه، شرایط هیدرولوژیکی و توپوگرافی منطقه و محدودیت‌های اقتصادی، می‌توانند به‌صورت منفرد یا متوالی طراحی و اجرا شوند (Bombino et al., 2014). بندهای اصلاحی متوالی معمولاً به‌صورت پشت‌سرهم (پنجه تا پاشنه) احداث می‌شوند تا با ایجاد اثر تجمعی، انرژی جریان را به‌تدریج مستهلک کرده و از فرسایش بستر و کناره‌های آبراهه جلوگیری کنند. این سازه‌ها علاوه بر کنترل سیلاب‌های فصلی، کاهش فرسایش موضعی، حفاظت از اراضی کشاورزی، کاهش رسوب ورودی به مخازن سدها، افزایش فرصت نفوذ آب و تغذیه آبخوان‌ها، به‌دلیل طراحی ساده، هزینه اجرایی مناسب، سازگاری با شرایط اکولوژیکی و کارایی قابل قبول در کنترل رسوبات، از مهم‌ترین اقدامات سازه‌ای آبخیزداری در مناطق کوهستانی محسوب می‌شوند.

مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی عملکرد بندهای اصلاحی و مدلسازی هیدرولوژیکی آنها انجام شده است. Akhtari et al., (2023) با ارائه یک مدل ریاضی،

الگوی رگبار، تغییرات پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبخیز، تأثیر معنی‌داری بر میزان رسوبدهی دارند و تغییرات زمانی بارش می‌تواند الگوی انتقال رسوب را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو، در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های کنترل سیلاب و رسوب، توجه هم‌زمان به رژیم بارش، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبخیز ضروری است.

در راستای کاهش مخاطرات ناشی از سیلاب در مناطق کوهستانی، بندهای اصلاح (Check Dams) به‌عنوان یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین اقدامات سازه‌ای آبخیزداری شناخته می‌شوند. این سازه‌ها با هدف کاهش انرژی جریان، کنترل فرسایش بستر و کناره‌ها، کاهش انتقال رسوب، افزایش ذخیره آب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و احیای اکوسیستم‌های تخریب‌شده احداث می‌شوند. تجربه کشورهای مختلف نشان می‌دهد که تلفیق احداث بندهای اصلاحی با اقدامات بیولوژیکی، نظیر توسعه پوشش گیاهی، یکی از موفق‌ترین راهبردهای مدیریت حوضه‌های آبخیز در مناطق کوهستانی محسوب می‌شود. به‌عنوان نمونه، در فلات لس‌چین، اجرای گسترده بندهای اصلاحی از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و بر اساس برنامه‌های توسعه‌ای، احداث بیش از ۱۶۳ هزار بند اصلاحی با ارتفاع بیش از پنج متر در دستور کار قرار گرفت که نقش مهمی در کنترل فرسایش و مدیریت رواناب ایفا کرده است (Xiang- Zhou et al., 2004; Abbasi et al., 2019).

مطالعات متعدد، اثربخشی این سازه‌ها را در کاهش مخاطرات هیدرولوژیکی و رسوبی تأیید کرده‌اند (Piton and Recking (2017) and نشان دادند که بندهای اصلاحی می‌توانند ضمن کنترل انتقال رسوبات و بقایای چوبی، دبی اوج سیلاب را نیز به‌طور قابل توجهی کاهش دهند. همچنین، Theofanidis et al., (2025) در بررسی عملکرد سازه‌های کنترل فرسایش پس از آتش‌سوزی در حوضه‌های جنگلی یونان، نقش مؤثر بندهای اصلاحی در کاهش انتقال رسوب و تثبیت بستر آبراهه‌ها را گزارش کردند. علاوه بر این، مطالعه مرووری (Lucas-Borja et al., (2021) که یکی از جامع‌ترین مرورهای انجام‌شده درباره بندهای اصلاحی در جهان است، نشان می‌دهد که این سازه‌ها علاوه بر کنترل سیلاب و رسوب، در

عملکرد هیدرولیکی بندهای اصلاحی منفرد، به‌ویژه در حوزه‌هایی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مشابه حوزه آبخیز سیجان، همچنان با کمبود اطلاعات مواجه است. از سوی دیگر، اگرچه مطالعات اخیر بر اهمیت انتخاب صحیح محل احداث و شاخص‌های طراحی بندهای اصلاحی تأکید کرده‌اند (Armin et al., 2024)، اما ارائه معیارهای طراحی مبتنی بر داده‌های حاصل از مدلسازی فیزیکی برای شرایط آبراهه‌های کوهستانی ایران همچنان نیازمند پژوهش‌های تکمیلی است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد بندهای اصلاحی اجرایی در مدیریت سیلاب واریزه‌ای مسیل سیجان در دو فاز برنامه‌ریزی شده است. در فاز نخست که موضوع این پژوهش است، با ساخت مدل فیزیکی در مقیاس 1:10 از مسیل سیجان، عملکرد بندهای اصلاحی در کنترل سیلاب‌های روانابی (آب عاری از رسوب) از طریق بررسی کاهش دبی اوج، افزایش زمان تأخیر هیدروگراف و استخراج روابط تجربی پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی ارزیابی شده است. در فاز دوم، عملکرد این سازه‌ها در شرایط جریان‌های واریزه‌ای و انتقال رسوب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

حوزه آبخیز سیجان به‌دلیل شیب زیاد، لیتولوژی حساس، آبراهه‌های پرشیب، توسعه سکونتگاه‌های روستایی در مخروط‌افکنه‌ها و سابقه وقوع مکرر سیلاب‌های واریزه‌ای، یکی از بحرانی‌ترین زیرحوضه‌های استان البرز از نظر مخاطرات هیدروژئومورفولوژیکی محسوب می‌شود. وقوع مکرر سیلاب‌های واریزه‌ای در این حوضه، علاوه بر تخریب اراضی کشاورزی، راه‌های ارتباطی و تأسیسات زیربنایی، موجب تهدید مستقیم سکونتگاه‌های روستایی و افزایش هزینه‌های بازسازی شده است (Akhtari et al., 2019؛ Pars Piyab Consulting Engineers, 2009). از این رو، ارزیابی علمی عملکرد اقدامات آبخیزداری اجرا شده، به‌ویژه بندهای اصلاحی، در این حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نتایج حاصل می‌تواند به‌عنوان الگویی برای طراحی و مدیریت سازه‌های مشابه در سایر حوضه‌های کوهستانی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش عبارت‌اند از ۱- طراحی و ساخت مدل فیزیکی مبتنی بر ویژگی‌های

اثر بندهای اصلاحی متوالی را بر کاهش دبی اوج هیدروگراف رواناب بررسی کردند. در این پژوهش، عملکرد بندهای اصلاحی به‌صورت یک مخزن خطی با زمان تأخیر مدلسازی شد و ضرایب اصلاحی لازم برای شبیه‌سازی تغییرات هیدروگراف خروجی در شرایط احداث متوالی بندهای کوتاه ارائه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با اعمال ضرایب ذخیره و زمان تأخیر بر هیدروگراف رواناب، می‌توان عملکرد هیدرولوژیکی بندهای اصلاحی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی و ارزیابی کرد. همچنین، نتایج پژوهش‌های تجربی در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که این سازه‌ها، بسته به شرایط حوزه آبخیز، می‌توانند بین ۲۵ تا ۴۰ درصد از دبی اوج سیلاب را کاهش دهند (Mousavi et al., 2011).

در کنار مطالعات عددی، مدلسازی فیزیکی به‌عنوان یکی از معتبرترین روش‌های بررسی رفتار جریان در سازه‌های هیدرولیکی شناخته می‌شود، زیرا امکان مشاهده مستقیم فرایندهای هیدرولیکی، بررسی برهم‌کنش جریان و سازه، ارزیابی الگوهای جریان و تولید داده‌های قابل اعتماد برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی را فراهم می‌کند. اگرچه این روش نسبت به مدلسازی عددی مستلزم صرف زمان و هزینه بیشتری است، اما به‌دلیل دقت بالا در بازنمایی رفتار واقعی جریان، همچنان یکی از ابزارهای اصلی در مطالعات هیدرولیکی و طراحی سازه‌های کنترل سیلاب محسوب می‌شود (Novak et al., 2010). در همین راستا، Schwindt (2016) عملکرد سدهای تأخیری را در سوئیس با استفاده از مدل فیزیکی در مقیاس ۱:۴۲ ارزیابی کرد و (Salabi et al., 2021) نیز با بهره‌گیری از مدل فیزیکی ۱:۲۰، آبستگي پایین‌دست بندهای اصلاحی سنگی را مورد بررسی قرار دادند.

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها بر ارزیابی عملکرد هیدرولوژیکی یا رسوبی بندهای اصلاحی به‌صورت مستقل متمرکز بوده‌اند و مطالعات محدودی به بررسی رفتار هیدرولیکی این سازه‌ها بر پایه مدلسازی فیزیکی در شرایط واقعی آبراهه‌های کوهستانی ایران پرداخته‌اند. همچنین، توسعه روابط تجربی برای پیش‌بینی تغییرات دبی اوج، زمان تأخیر هیدروگراف و

دهه ۹۰، سیلاب‌های مهیبی را تجربه کرده است. حوزه آبخیز ارنگه به ۳۲ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شده است. در شکل ۱، موقعیت مکانی حوزه آبخیز ارنگه و حوضه محدوده مورد مطالعه که شامل سه واحد هیدرولوژیکی A4-1، A4-2 و A4-int است، نشان داده شده است.

روستای سیجان در انتهای زیرحوضه A4-int قرار دارد. مساحت این سه زیرحوضه مجموعاً حدود ۱۰ کیلومتر مربع است که تقریباً ۱۰ درصد از مساحت کل حوزه آبخیز ارنگه را به خود اختصاص می‌دهد. جدول ۱، خلاصه‌ای از پارامترهای هیدرولوژیکی کلیدی برای هر واحد، شامل مساحت، ارتفاع متوسط، زمان تمرکز، طول رودخانه و شیب را نشان می‌دهد.

واقعی حوزه آبخیز سیجان، ۲- ارزیابی عملکرد بندهای اصلاحی منفرد بر شاخص‌های کلیدی هیدرولوژیکی شامل کاهش دبی اوج و افزایش زمان تأخیر، ۳- ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی بندهای اصلاحی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و ۴- پیشنهاد معیارهایی برای طراحی بهینه بندهای اصلاحی در آبراهه‌های کوهستانی با شرایط مشابه.

مواد و روش‌ها

انتخاب پروتوتایپ و مشخصات مدل: روستای سیجان در حوزه آبخیز ارنگه، با مساحتی تقریباً معادل ده هزار هکتار، در زیرحوضه‌های پایین‌دست سد امیرکبیر و آبخیز رودخانه کرج قرار دارد. این روستا در

جدول ۱- ویژگی‌های هیدرولوژیکی واحدهای A4-int، A4-2 و A4-1 حوضه بالادست روستای سیجان

Table 1. Hydrological Characteristics of A4-int, A4-2, and A4-1 Units of the Upper Watershed of Siyajian Village

Parameter	A4-1	A4-2	A4-int
Area (km ²)	3.5	2.6	4
Mean Elevation (m)	3077	3148	2636
Time of Concentration (min)	25	15	25
River Length (km)	3.4	2.5	3.3
Slope (%)	19	32	9

برای شبیه‌سازی انتخاب شد. این محدوده شامل سه بند گابیونی بوده که توالی این سازه‌ها در کنترل سیلاب، هدف اصلی مطالعه بوده است. به‌همین دلیل، شبیه‌سازی تنها بر روی سه بند از پنج بند انجام شد تا به دقت و با توجه به اهداف مورد نظر، نحوه عملکرد سازه‌ها در کنترل سیلاب بررسی شود (شکل ۱).
طراحی و ساخت مدل فیزیکی: مدل فیزیکی پروتوتایپ در یک فلوم بتنی به طول ۲۵/۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و با رعایت دقیق معیارهای تشابه هندسی و دینامیکی به صورت مستقیم^۱ ساخته شد (Akhtari et al., 2022). ساخته شد در این مدل، سه بند اصلاحی با حفظ ویژگی‌های اصلی پروتوتایپ میدانی طراحی و اجرا شد. حجم مخازن سه بند اصلاحی واقع در سراب، میانه و پایاب آبراهه به ترتیب برابر با ۶۵، ۱۹ و ۵۲ مترمکعب است. شیب طولی آبراهه در بازه بین بند سراب و میانی ۱۶ درصد و در بازه بین بند میانی و پایاب ۱۲/۵ درصد اندازه‌گیری شد.

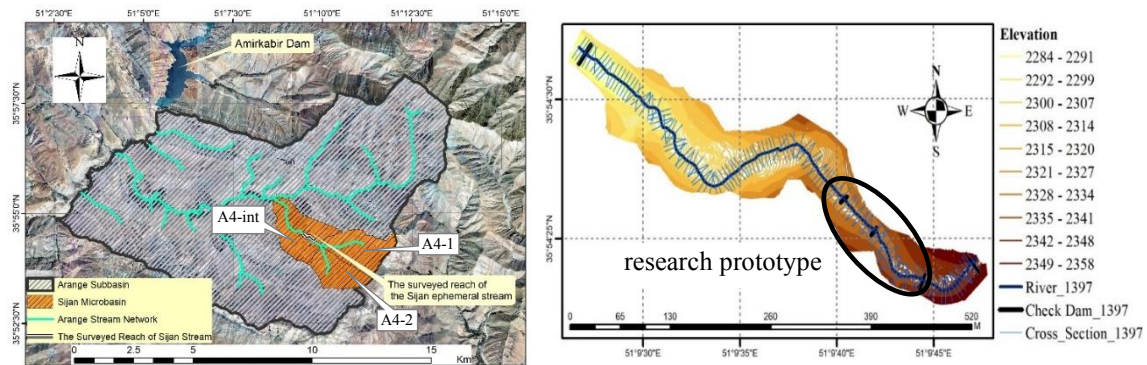
در این مطالعه، بازه‌ای ۷۰۰ متری از مسیل بالادست روستای سیجان (مسیل سیجان) که تحت عملیات آبخیزداری قرار گرفته است، انتخاب شد. این بازه شامل پنج سازه بود، شامل یک بند سنگی ملاتی به ارتفاع سه متر، چهار بند گابیونی به ارتفاع یک متر با یک متر دستک در سراب بند اصلی است. به دلیل پتانسیل بالای منطقه در تولید سیلاب‌های واریزه‌ای و همچنین جدید بودن سازه‌های احداث شده، این محدوده برای شبیه‌سازی انتخاب شد و نقشه‌برداری زمینی آن نیز انجام شد. طول افقی مسیل نقشه‌برداری شده ۵۵۲ متر است.

در این بازه، فاصله اولین بند گابیونی یک متری در بالادست بند سنگی ملاتی تا خود بند سنگی ملاتی ۳۷۳ متر است. همچنین، چینش چهار بند گابیونی یک متری در ۱۷۸ متر بالادست مسیل نقشه‌برداری قرار دارد همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های فضایی و امکانات موجود، تنها بخشی از این بازه (۱۶۷/۵ متر) به عنوان پروتوتایپ

¹ Direct Scaling

دو دبی سنج (فلومتر) برای تأمین و تنظیم دبی ورودی به مدل فیزیکی، یک آرام‌کننده جریان، یک شاخص اندازه‌گیری تراز سطح آب (اشل) در مخزن جهت محاسبه دقیق دبی ورودی، ادامه‌ی مقاطع عرضی مدل فیزیکی به منظور جلوگیری از پس‌زدگی جریان.

اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در فلوم بتونی به چهار بخش اصلی تقسیم می‌شوند:
I. بالادست مدل فیزیکی: شامل یک مخزن فلزی مجهز به سامانه تأمین آب و اندازه‌گیری جریان (شکل ۲) در بالادست فلوم بتونی تعبیه شد و اجزای آن عبارتند از



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، روستای سیجان و پروتوتایپ تحقیق

Fig. 1. Research prototype and topographic survey of the Sijan ephemeral stream (Right) and Geographic location within the study area (Left)



شکل ۲- اجزای بالادست مدل فیزیکی در فلوم بتونی، الف) مخزن فلزی شامل ب) فلومتر، پ) اشل اندازه‌گیری سطح آب در مخزن، ت) ادامه توپوگرافی مدل فیزیکی

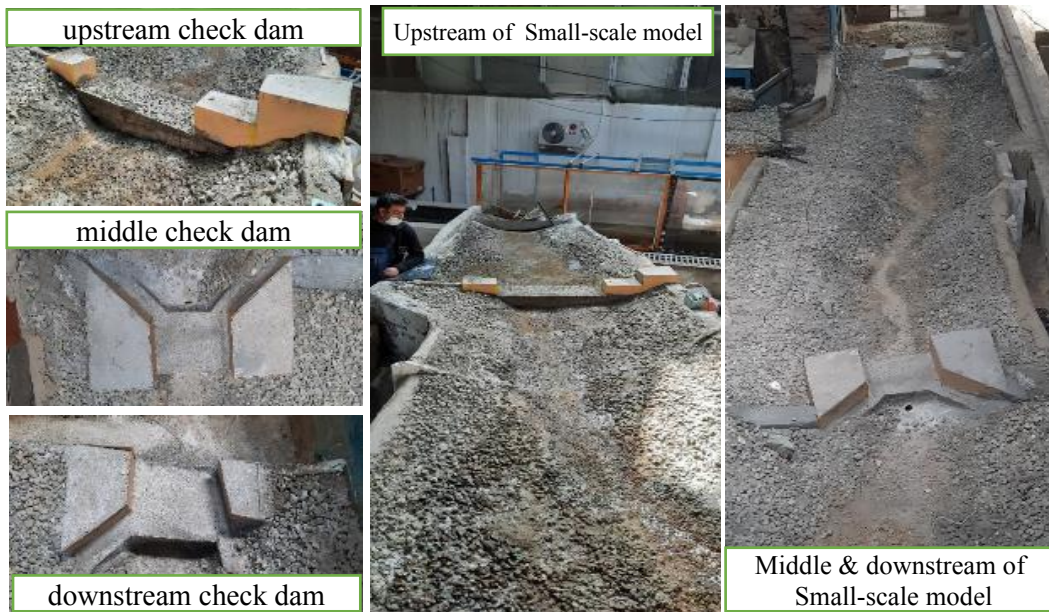
Fig. 2. Upstream components of the physical model in the concrete flume: a) Metal reservoir (tank) b) Flowmeter, c) Water level gauge in the reservoir, d) Continuation of the physical model's topography

در نفاط مختلف از طول آبراهه و سیلابدشت و با استفاده از رابطه کاون (۱۹۸۵) میزان زبری بستر در شرایط طبیعی محاسبه شد. بر این اساس، ضریب مانینگ برای بخش آبراهه اصلی ۰/۳۱ و برای

II. بدنه اصلی: مدل فیزیکی آبراهه همراه با سه بند اصلاحی با مقیاس ۱:۱۰ و با مشخصات طول: ۱۶/۷۵ متر، اختلاف ارتفاع ۱/۶۵۹ متر و عرض ۳ متر در طول فلوم بتونی ساخته شد. با نمونه‌برداری از دانه‌بندی رسوبات

بندهای اصلاحی در سه موقعیت سراب (بالادست)، میانه آبراهه و پایاب (پایین دست). قرار دارند. تمامی بندها به صورت سازه های صلب و نفوذناپذیر اجرا شدند (شکل ۳). فاصله افقی بین بند سراب و میانی ۷/۲۲ متر و بین بند میانی و پایاب ۴/۶۸ متر است.

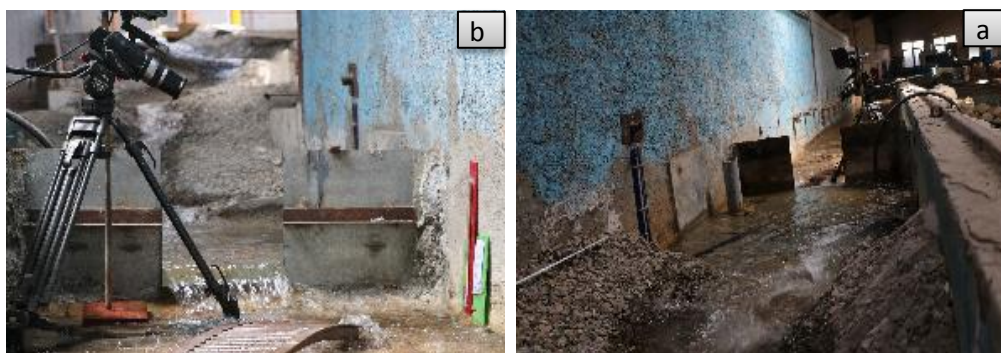
سیلابدشت ۰/۰۵ برآورد شد. در مدل فیزیکی ضریب مانینگ در بخش آبراهه ۰/۰۲۱ و برای سیلابدشت ۰/۰۳۴ به دست آمد. بر همین مبنا، زبری اعمال شده در مدل فیزیکی برای آبراهه و سیلابدشت به ترتیب هشت میلی متر و ۱۳۷ میلی متر در نظر گرفته شد. همچنین، مدل کوچک مقیاس بندها نیز با مقیاس ۱:۱۰ ساخته و در داخل مدل اصلی جانمایی شد. این



شکل ۳- مدل کوچک مقیاس مسیل منتخب سیجان با سه بند های اصلاحی غیر قابل نفوذ در سراب، میان و پایاب
Fig. 3. a small-scale physical model of the Sijan stream, with three check dams placed in its upstream, middle, and downstream sections

برای قرائت دقیق اشل در ابتدا و انتهای مدل فیزیکی طول مدت زمان هر اجرا فیلم برداری شد و با بازخوانی فیلمها، قرائت دقیق اشل ها انجام شد. هیدروگراف خروجی هر سناریو در این نقطه استخراج می شود.

III. پایین دست مدل فیزیکی: بعد از سومین بند در پایین دست مدل فیزیکی در میانه فوم بتونی یک سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی سامانه اندازه گیری جریان خروجی از مدل فیزیکی را تشکیل می دهد (شکل ۴).



شکل ۴- الف) بالادست سرریز مستطیلی پایین دست، ب) پایین دست سرریز مستطیلی، اشل اندازه گیری سطح آب
Fig. 4. a) Upstream section of the rectangular weir b) Downstream section of the rectangular weir, including the water level measurement gauge

برای استخراج دبی- اشل در انتهای فلوم بتونی تعبیه شد (شکل ۵).

IV. انتهای فلوم بتونی حاوی مدل فیزیکی: یک سرریز مثلثی استاندارد در انتهای فلوم به عنوان مبنای دبی



شکل ۵- سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری بده خروجی
Fig. 5. Triangular weir for measuring outflow discharge

مدلسازی مبتنی بر اطلاعات هیدرولوژیکی حوضه طراحی شد تا امکان ارزیابی دقیق تر پاسخ حوضه و تأثیر بندهای اصلاحی با ارتفاع یک متر در مواجهه با شرایط بارشی مختلف فراهم شود. دبی اوج به ازای دوره بازگشت‌های مختلف و زمان تمرکز برای محاسبه هیدروگراف مثلثی براساس روابط SCS از گزارش‌های پایه (Pars Piyab Consulting Engineers, 2009) استخراج شد.

- **دبی اوج هیدروگراف ورودی Q_p** : مقادیر دبی در دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله برای منطقه تحقیق عبارتند از ۳/۴، ۶/۳، ۸/۲، ۱۰/۷، ۱۲/۴ مترمکعب بر ثانیه با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی حداکثر جریان ورودی به مدل فیزیکی ۲۵ لیتر بر ثانیه بوده که در حدود دوره بازگشت ده ساله بوده است.

- **زمان رسیدن به اوج (T_p) و زمان پایه هیدروگراف ورودی ($T_b = D$)**: در محاسبات هیدروگراف مثلثی مورد استفاده در این مطالعه (شکل ۶)، زمان تمرکز حوضه به عنوان پارامتر کلیدی برای تعیین زمان رسیدن به دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف براساس روابط SCS به کار گرفته شد. با توجه به اینکه محدوده نقشه‌برداری در یک سوم بالایی حوضه A4-int قرار دارد، زمان تمرکز این محدوده حدود ۱۰ دقیقه برآورد شد. زمان رسیدن به دبی اوج T_p (پیک سیلاب) بر اساس رابطه $T_p = 0.6 * T_c$ ، شش دقیقه و زمان پایه هیدروگراف (T_b) طبق رابطه $T_b = D = 2/97 * T$ برابر با

۱- روش اجرای آزمایش‌ها

۱-۳- سناریوهای آزمایش

برای ارزیابی عملکرد بندها، سه سناریوی زیر در نظر گرفته شد:

I. مسیل در شرایط پایه (بدون بند اصلاحی) به عنوان شاهد.

I. مسیل با بندهای اصلاحی خالی از رسوب.

II. مسیل با بندهای اصلاحی پر از رسوب (شبیه‌سازی شرایط پس از رسوبگذاری).

۲-۳- روش‌های اعمال جریان ورودی به مدل و اندازه‌گیری

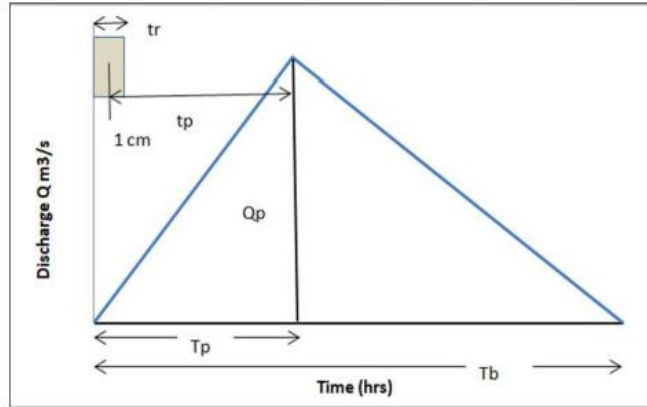
I. جریان دائمی: جهت استخراج منحنی‌های دبی-اشل، دبی‌های ثابت از طریق فلومترهای کالیبره شده اعمال شدند. حداقل جریان ۰/۸ لیتر بر ثانیه و حداکثر جریان ۲۶/۸ لیتر بر ثانیه در مدل بود. تراز آب در نقاط مختلف مدل با استفاده از سرریزهای مستطیلی و مثلثی استاندارد در طول زمان اجرا ضبط و با تحلیل تصاویر ثبت شده استخراج شد.

II. جریان غیردائمی (شبیه‌سازی سیلاب): رهاسازی جریان (هیدروگراف ورودی) به صورت یک هیدروگراف مثلثی (افزایش تدریجی تا دبی اوج و کاهش مجدد) اعمال شد.

در فرایند مدلسازی حاضر، برای دستیابی به شبیه‌سازی واقع‌نمایانه سیلاب، دبی‌های اوج در دوره‌های بازگشت مختلف و طول مدت هیدروگراف متناسب با زمان تمرکز در نظر گرفته شد. این رویکرد

است و سیلاب‌های با زمان پایه بلند که زمان رسیدن به پیک در آنها بیش از شش دقیقه (حدود ۳۱ دقیقه) طول می‌کشد.

۱۶ دقیقه محاسبه شد که این سناریو به‌عنوان حالت پایه در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، دو سناریوی دیگر نیز بررسی شد. سیلاب‌های با زمان پایه کوتاه که زمان رسیدن به دبی اوج در آن کمتر از شش دقیقه



شکل ۶- هیدروگراف مثلثی و پارامترهای کلیدی آن
 Fig. 5. Triangular Hydrograph and Its Key Parameters

برای تعمیم نتایج مدل فیزیکی به پروتوتایپ یا طبیعت، با توجه به رعایت تشابه فرود و مقیاس هندسی، مقیاس زمان متناسب با توان ۰/۵ و مقیاس دبی متناسب با توان ۲/۵ از مقیاس طول تعیین می‌شود. بنابراین، در این پژوهش زمان در عدد مقیاس ۳/۱۶ و دبی در عدد مقیاس ۳۱۶ ضرب شد.

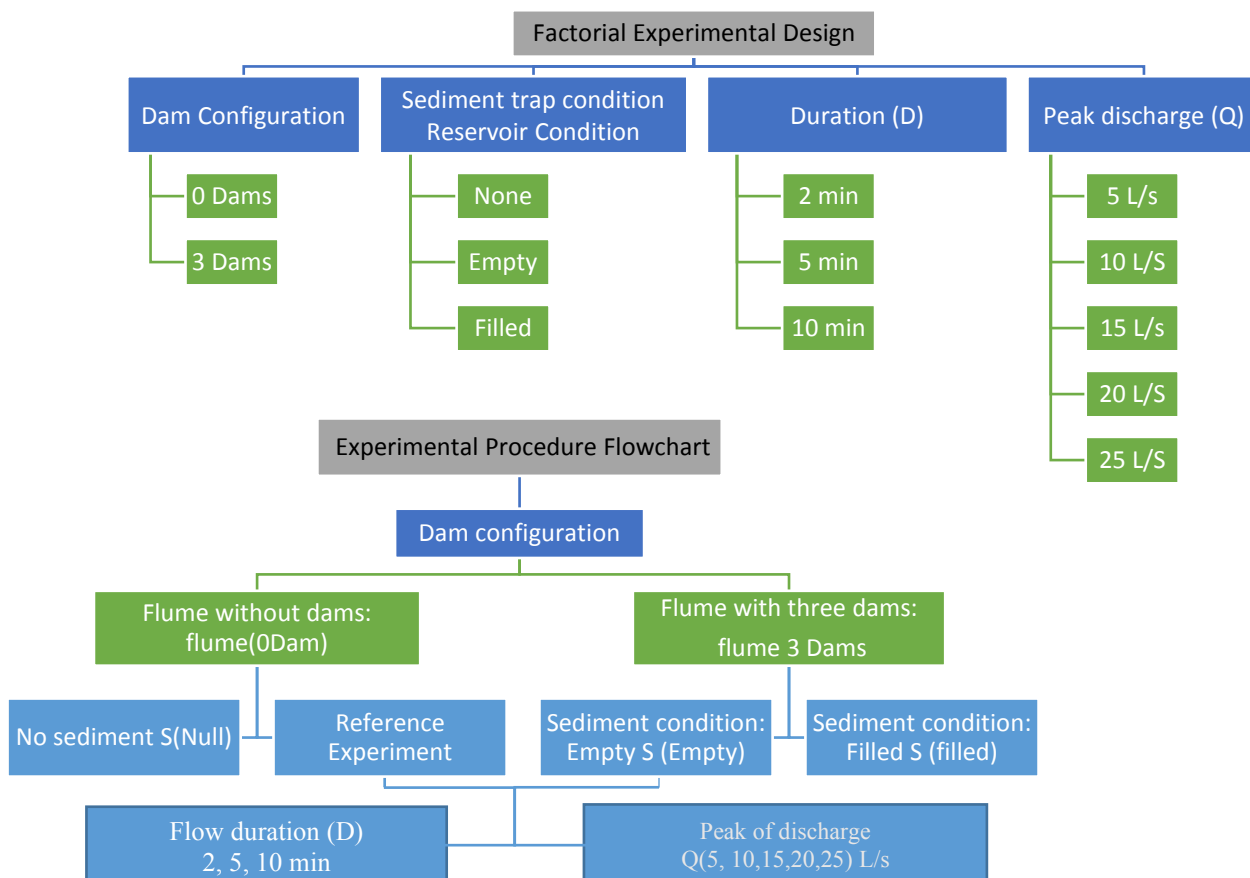
جدول ۲ مشخصات هیدروگراف‌های مورد بررسی را در مدل فیزیکی و شرایط طبیعی مسیل سیجان ارائه می‌دهد. داده‌های هیدروگراف خروجی پس از اجرای هر سناریو ثبت و با استفاده از منحنی‌های دبی-اشل کالیبره شدند.

جدول ۲- ویژگی‌های هیدروگراف مثلثی مورد استفاده در مدل فیزیکی، بر اساس شرایط طبیعت رودخانه سیجان
 Table 2. Characteristics of the triangular hydrograph used in the small-scale model, based on prototype conditions, for the Sijan stream study

Triangular Hydrograph Characteristics	Peak discharge of the input hydrograph (Qp)	Prototype (m ³ /s)	1.58	3.16	4.74	6.32	7.9
		Model (lites/sec)	5	10	15	20	25
	Flood return period		2-Year		5-Year	10-Year	
	Base length of the hydrograph (T _b =D)	Prototype (min)		00:06:19	00:15:48	00:31:36	
		Model (min)		00:02:00	00:05:00	00:10:00	
	Scenarios Based on Time to Peak			< T _p T _c		T _p > T _c	
		Floods with short time base	Base case T _p =6 min		Floods with long time base		

۳-۳- شرح آزمایش‌ها
 تقسیم‌بندی آزمایش‌ها بر اساس چهار پارامتر اصلی زیر در شکل ۷ نمایش داده شده است.
 I. دبی اوج (Qp): در پنج سطح پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه
 II. پایه زمانی هیدروگراف (Tb=D): شامل سه سطح دو، پنج و ۱۰ دقیقه

- تعداد بندهای اصلاحی (F): در دو حالت بدون بند (0Dam) و با سه بند (3Dams)
 III. وضعیت رسوب (S): در سه حالت پر از رسوب (Full of sediment)، خالی از رسوب (Empty of sediment) برای مدل فیزیکی با بند اصلاحی و بدون رسوب (Null) برای مدل فیزیکی بدون بند اصلاحی



شکل ۷- تقسیم‌بندی فاکتوریل آزمایش‌ها (نمودار بالا) و فلوچارت اجرای آزمایش‌ها (نمودار پایین) در مدل فیزیکی سیجان

Fig. 7. Factorial Experimental Design and Experimental Procedure Flowchart for the Sijan Physical Model

آزمایش‌ها بر اساس رابطه (۱) نامگذاری شده‌اند که ترکیبی از پارامترهای فوق است. این سیستم نامگذاری به صورت زیر عمل می‌کند.

آزمایش‌ها بر اساس رابطه (۱) نامگذاری شده‌اند که ترکیبی از پارامترهای فوق است. این سیستم نامگذاری به صورت زیر عمل می‌کند.

$$run \left(D \begin{cases} 2 \text{ min} \\ 5 \text{ min} \\ 10 \text{ min} \end{cases}, Q \begin{cases} 5 \frac{\text{lit}}{\text{s}} \\ 10 \\ 15 \\ 20 \\ 25 \end{cases}, F \begin{cases} 0 \text{ Dam} \\ 3 \text{ Dams} \end{cases}, S \begin{cases} \text{filled of sediment} \\ \text{Empty of sediment} \\ \text{Null} \end{cases} \right) \quad (1)$$

در مجموعه D10Q25F(3dams) S(Empty) تست‌های مدل فیزیکی نشان می‌دهد که هیدروگراف ورودی با پایه زمانی ۱۰ دقیقه، دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه در مدل فیزیکی یا سه بند اصلاحی و خالی از رسوب مورد بررسی قرار گرفته است.

یک سناریو به عنوان شاهد^۱ در نظر گرفته می‌شود. در این پروژه سناریوی بدون بند اصلاحی به عنوان سناریوی شاهد بوده است.

۳-تحلیل نتایج با آنالیز ابعادی: در این پژوهش، به منظور بررسی جامع پارامترهای مؤثر در پدیده روندیابی هیدروگراف، از روش تحلیل ابعادی Π باکینگهام بهره گرفته شد (Novak et al., 2010). این روش علمی با رویکردی سیستماتیک، امکان استخراج روابط حاکم بر پدیده را فراهم می‌سازد. فرایند اجرای تحلیل ابعادی در چهار گام اصلی، شناسایی و انتخاب متغیرهای کلیدی، تشکیل ماتریس ابعادی، استخراج پارامترهای بی بعد و استخراج روابط حاکم بر روندیابی هیدروگراف صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

صحت سنجی نتایج آزمایش‌ها: برای اطمینان از صحت و دقت نتایج آزمایشگاهی، مقایسه‌ای جامع بین دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط فلومتر و دبی‌های محاسبه شده از سرریز مثلی استاندارد در دو حالت مختلف به دست آمد. در حالت اول، مدل فیزیکی بدون بندهای اصلاحی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در نمودار شکل ۸ ارائه شده است. در حالت دوم، مدل فیزیکی مجهز به سه بند اصلاحی در شرایط بدون رسوب تحلیل شد که یافته‌های آن در نمودار شکل ۹ نمایش داده شده است. در هر دو حالت، ضریب همبستگی نمایی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی فراتر از ۹۹ درصد بود که نشان‌دهنده دقت و اعتبار بالای آزمایش‌ها است.

۲-تحلیل نتایج براساس معیارهای ارزیابی: برای تحلیل کمی سناریوها از دو دسته معیار ارزیابی استفاده شد. نخست، ارزیابی شدت روندیابی با محاسبه کارایی کاهش دبی پیک (بر اساس رابطه ۲) و کارایی تأخیر زمانی (بر اساس رابطه ۳) که هر دو برحسب درصد بیان می‌شوند. دوم، سنجش اثربخشی بندهای اصلاحی در تعدیل هیدروگراف سیلاب که با استفاده از روابط بدون بعد ۴ و ۵ و با نرمال‌سازی دبی خروجی هر سناریو نسبت به حالت پایه انجام پذیرفت. این روابط امکان مقایسه سیستماتیک عملکرد سازه‌های اصلاحی را در شرایط مختلف هیدرولیکی فراهم می‌کنند.

$$\text{Efficiency of Attenuation} = E \% (\text{Attenuation}) = \frac{Q_{p-inflow} - Q_{p-outflow}}{Q_{p-inflow}} \quad (2)$$

$$\text{Efficiency of lag} = \quad (3)$$

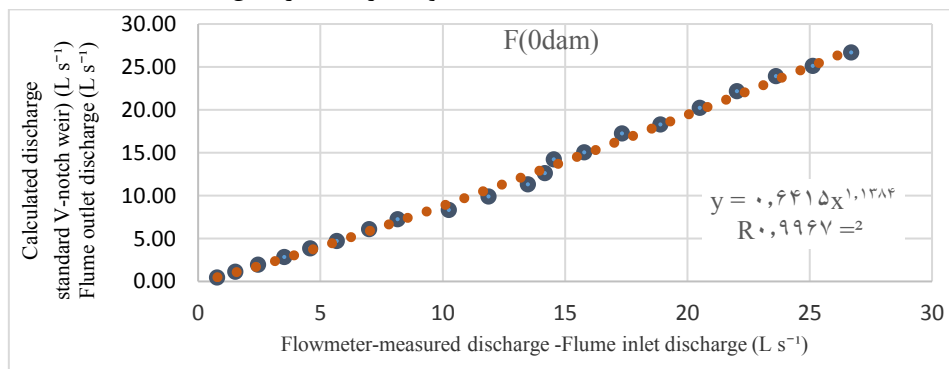
$$E \% (\text{lag}) = \frac{t_{p-inflow} - t_{p-outflow}}{t_{p-inflow}} \quad (4)$$

$$\text{normalized of Attenuation} = \quad (4)$$

$$\gamma(Q_{maz}) = \frac{Q_{p-outflow}}{Q_{p-outflow-ref}} \quad (4)$$

$$\text{normalized of lag} = \delta(t_{maz}) = \frac{t_{max}}{t_{max-ref}} \quad (5)$$

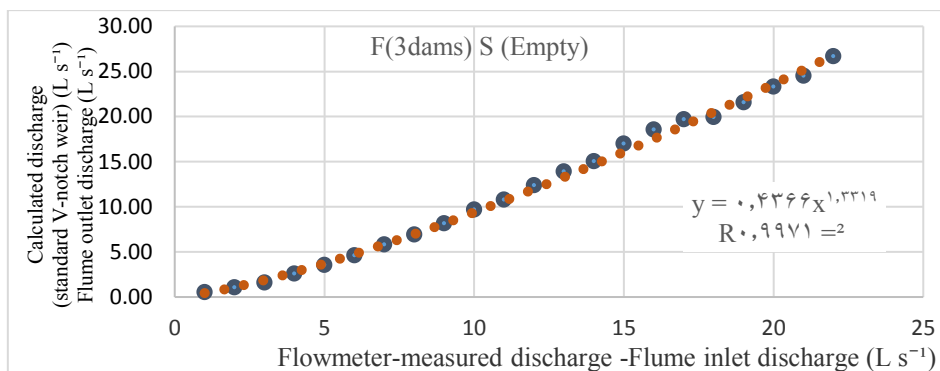
که در آنها $Q_{p-inflow}$ دبی پیک هیدروگراف ورودی، $Q_{p-outflow}$ دبی پیک هیدروگراف خروجی، $(t_p)_{inflow}$ زمان رسیدن به دبی پیک در هیدروگراف ورودی، $(t_p)_{outflow}$ زمان رسیدن به دبی پیک در هیدروگراف خروجی، Efficiency of Attenuation درصد کارایی کاهش دبی اوج، Efficiency of lag درصد کارایی افزایش زمان رسیدن به پیک است. t_{max} زمان رسیدن به پیک سناریوی مورد بررسی است. در رابطه‌های (۴) و (۵)



شکل ۸- نمودار پراکندگی و رابطه همبستگی بین بده ورودی و بده خروجی از فلوم رودخانه بدون بند اصلاحی

Fig. 8. Scatter plot and correlation relationship between input and output discharge in the flume without check dams

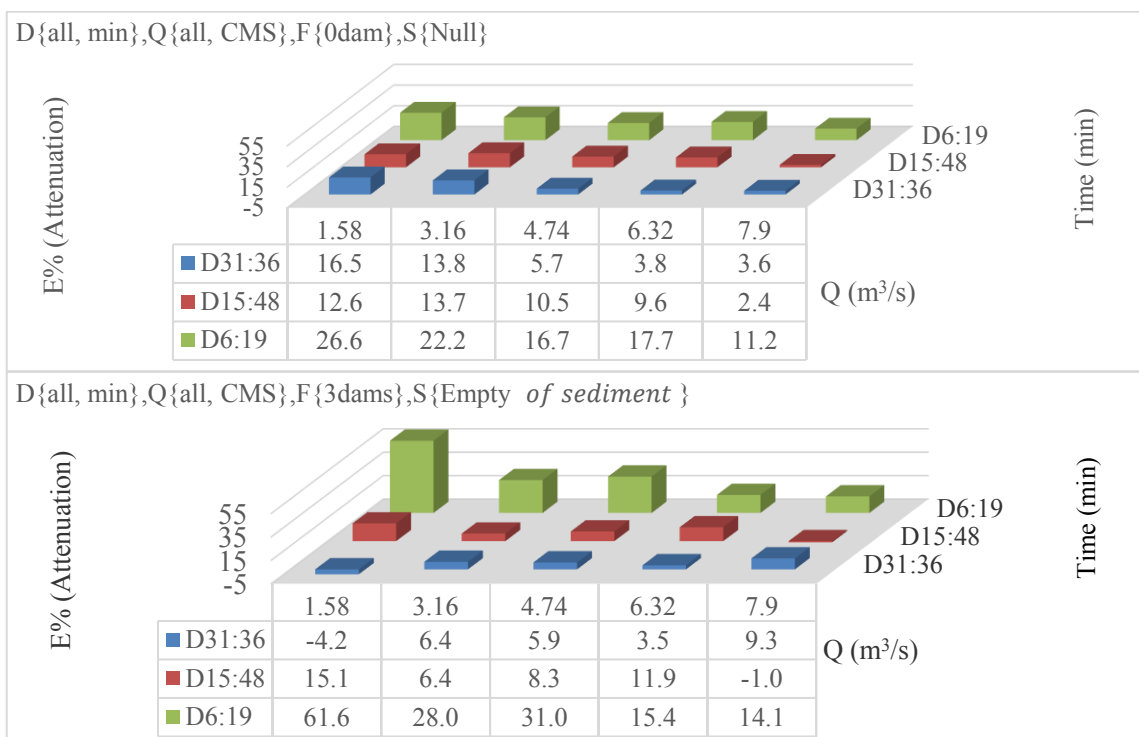
¹ Reference



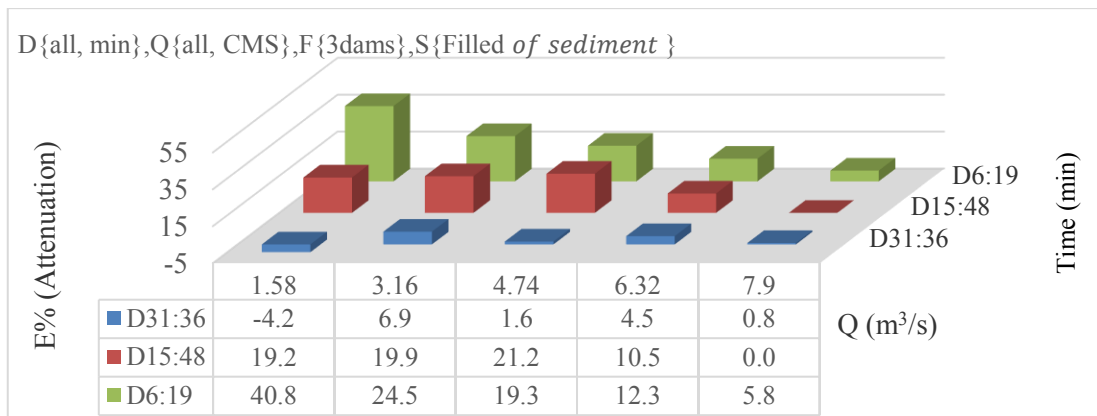
شکل ۹- نمودار پراکندگی و رابطه همبستگی بین بده ورودی و بده خروجی از فلوم رودخانه با سه بند اصلاحی خالی از رسوب
Fig. 9. Scatter plot and correlation relationship between input and output discharge in the flume with three empty check dams

در ادامه، نتایج حاصل از تأثیر دبی پیک هیدروگراف ورودی و زمان پایه هیدروگراف بر عملکرد مسیل و بندهای اصلاحی به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

ارزیابی روندیابی در پروتوتایپ: شکل ۱۰ میزان کارایی کاهش دبی پیک سیلاب و نتایج روندیابی هیدروگراف را در مسیل سیجان برای سه سناریوی مختلف شامل حالت پایه (بدون بند اصلاحی)، حالت وجود بندهای اصلاحی خالی از رسوب و حالت وجود بندهای اصلاحی پر از رسوب نشان می‌دهد.



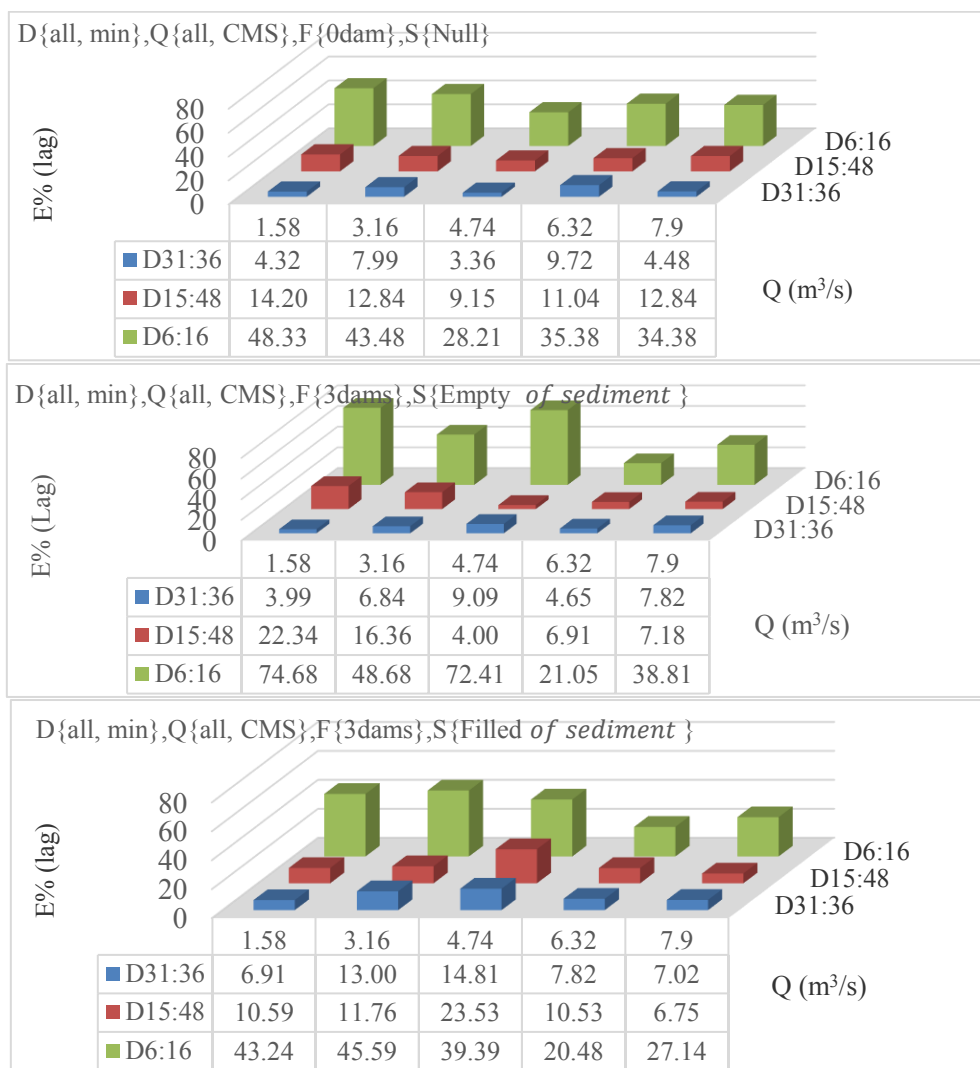
شکل ۱۰- میزان کاهش دبی پیک هیدروگراف های عبوری تحت سه سناریو مورد بررسی برای پروتوتایپ مسیل سیجان
Fig. 10. Reduction rate of peak discharge in outflow hydrographs under the three investigated scenarios for the Sijan waterway prototype



ادامه شکل ۱۰

Fig. 10. Continued

نمودارهای شکل ۱۱ درصد کارایی سناریوهای مختلف (Lag) را برای این سه سناریو نشان می‌دهد. مورد بررسی را در ایجاد افزایش زمان رسیدن به دبی



شکل ۱۱- میزان افزایش زمان رسیدن به پیک هیدروگراف های عبوری تحت سه سناریو مور بررسی برای پروتوتایپ مسیل سيجان

Fig. 11. Increase in time to peak for outflow hydrographs under the three investigated scenarios in the Sijan waterway prototype

نتایج حاکی از آن است که اثر تسکین دهندگی بندهای اصلاحی در کاهش دبی اوج هیدروگراف به‌ویژه برای دوره‌های بازگشت کمتر از پنج سال محسوس است. همچنین، تأثیر این سازه‌ها در افزایش زمان رسیدن به اوج هیدروگراف نیز برای دوره‌های بازگشت تا پنج سال و زمان‌های پایه کوتاه‌تر به‌وضوح در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کارایی بندهای اصلاحی تحت تأثیر مشخصات هیدروگراف ورودی و دوره بازگشت سیلاب قرار دارد. لازم به ذکر است که کاهش کارایی این سازه‌های کوچک‌مقیاس در مسیل سیجان، می‌تواند به دلیل وجود شیب زیاد مسیل، تعداد کم بندهای اصلاحی و ارتفاع نسبتاً کم بندها (یک متر) باشد.

پس از بررسی صحت و دقت اندازه‌گیری در آزمایش‌های مدل فیزیکی، نتایج نشان داد، متوسط کاهش تراز سطح آب در جریان دائمی در خروجی مدل فیزیکی با بند اصلاحی خالی از رسوب نسبت به سناریو شاهد (مدل فیزیکی بدون بند اصلاحی) چهار درصد بوده و حداکثر کاهش تراز سطح آب ۱۰ درصد در دبی تقریباً با دوره بازگشت دو ساله است. در محدوده دبی ۱/۴ تا ۵/۴ مترمکعب بر ثانیه (تا حدود دوره بازگشت پنج ساله منطقه) بیشترین تغییر را در تراز سطح آب (متوسط شش درصد) را دارد. حداکثر کاهش دبی و متوسط کاهش دبی به ازای وجود سه بند اصلاحی خالی از رسوب ۱۷ درصد و سه درصد بوده است.

بیشترین کاهش دبی به ازای سه بند اصلاحی خالی از رسوب تا دبی ۴/۳ مترمکعب ثانیه بوده است. که می‌توان گفت تأثیر بند اصلاحی آبخیزداری در کاهش دبی سیلاب تا دوره بازگشت پنج ساله است.

نتایج مربوط به تأثیر زمان پایه هیدروگراف سیل بر عملکرد مسیل و بندهای اصلاحی به شرح زیر است: زمان پیمایش طول مسیل سیجان را در دبی هشت مترمکعب بر ثانیه مطابق با دوره بازگشت ۱۰ ساله ۳۸ ثانیه بوده که با وجود سه بند اصلاحی خالی از رسوب تغییری در زمان پیمایش دیده نمی‌شود و تا دبی هفت مترمکعب بر ثانیه حدود دوره بازگشت پنج ساله ۱۳ ثانیه اختلاف زمان پیمایش در حالت بدون بند اصلاح و با سه بند اصلاحی خالی از رسوب است. برای دبی کمتر از یک مترمکعب بر ثانیه طول مسیل منتخب سیجان

نتایج مربوط به تأثیر دبی اوج هیدروگراف ورودی بر عملکرد مسیل و بندهای اصلاحی به شرح زیر است: در مسیل با شرایط طبیعی (بدون بند اصلاحی) با افزایش دبی ورودی، درصد تأخیر زمانی و تسکین دبی کاهش می‌یابد. در دبی ۴/۷۴ متر مکعب بر ثانیه و کمتر از آن، سیستم زمان بیشتری برای ذخیره و تأخیر در خروجی دارد. در دبی‌های بیشتر از آن، آب سریع‌تر از سیستم عبور می‌کند، لذا تأخیر و تسکین کاهش می‌یابد. در سناریوی دوم و با احداث بندهای خالی از رسوب در دبی‌های ۴/۷۴ مترمکعب بر ثانیه و کمتر از آن، آب را به خوبی ذخیره و تأخیر می‌اندازد. در دبی‌های بالا، ظرفیت ذخیره بندها سریع‌تر پر می‌شود و اثرگذاری آنها کاهش می‌یابد. در سناریو سوم و با سه بند اصلاحی پر از رسوب رسوب‌ها حجم مفید بندها را کاهش می‌دهند، لذا توانایی سیستم برای تأخیر و تسکین جریان کم می‌شود.

زمان رسیدن تا پیک سیلاب و همچنین زمان پایه هیدروگراف به‌عنوان طول مدت سیلاب هم در اثربخشی بندهای اصلاحی در کاهش هیدروگراف سیل موثر خواهد بود.

در سناریو بدون بند اصلاحی و در مسیل طبیعی سیلاب با دبی اوج حدود پنج مترمکعب بر ثانیه کمتر از دوره بازگشت پنج ساله با تغییر مدت زمان پایه هیدروگراف، حدود ۱۶ دقیقه (حالت پایه، رجوع شود به جدول ۲) متوسط کارایی زمان تأخیر آن ۱۲ درصد، با بند اصلاحی خالی از رسوب ۱۴ درصد و بند اصلاحی پر از رسوب ۱۵ درصد می‌شود. دبی اوج در انتهای مسیل بدون بند اصلاحی ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که با بند اصلاحی خالی از رسوب هشت درصد کاهش یافته و با سه بند اصلاحی پر از رسوب ۲۱ درصد خواهد شد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در دوره‌های بازگشت کمتر از پنج سال و برای کوتاه‌ترین زمان پایه، سناریوی دوم (مسیل با بندهای اصلاحی خالی از رسوب) بیشترین کاهش در دبی پیک را ایجاد می‌کند که پس از آن به ترتیب سناریوی سوم (مسیل با بندهای اصلاحی پر از رسوب) و حالت بدون بند اصلاحی قرار می‌گیرند. با این حال، با افزایش زمان پایه هیدروگراف، الگوی مشخصی در عملکرد سناریوهای مختلف مشاهده نمی‌شود.

تفاوت معنی‌داری بین سناریوی بدون اقدامات آبخیزداری و سناریوی وجود بندهای خالی از رسوب مشاهده نمی‌شود. در خصوص زمان تأخیر، مقادیر به ترتیب هشت، هفت و نه درصد برای سه سناریوی مذکور به دست آمد که حاکی از تأثیر یک درصدی بیشتر بندهای پر از رسوب نسبت به حالت طبیعی است.

اثربخشی بند اصلاحی در تسکین هیدروگراف

سیل: در این پروژه جریان غیردائمی (هیدروگراف) به صورت دستی و با تنظیم سه شیر تعبیه شده قبل از دو فلومتر ایجاد می‌شد. برای هر زمان پایه مورد نظر، نصف زمان به صورت افزایشی تا دبی مورد نظر فلومترها تنظیم می‌شدند. در قسمت دوم زمان دبی از پیک به صورت تدریجی تا دبی صفر کاهش داده می‌شد. لذا هیدروگراف های ورودی برای سری تست‌های مشابه مانند هیدروگراف با پایه زمانی دو دقیقه و دبی پیک ۱۵ لیتر بر ثانیه برای شرایط فلوم بدون بند، با بند اصلاحی خالی از رسوب، با بند اصلاحی پر از رسوب مسلماً یکسان نخواهد بود. در این شرایط نرمال کردن پارامترهای ارزیابی براساس رابطه‌های (۴) و (۵) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۲ و ۱۳ نرمال کردن دبی پیک و Lag سناریو دوم (بند اصلاحی خالی از رسوب) و سوم (بند اصلاح با رسوب) نسبت به سناریو شاهد در پروتوتایپ نشان می‌دهد.

در نرمال کردن که حاصل تقسیم دبی اوج سناریوها بر سناریو شاهد است، هر چه فاصله نمودارها از یک بیشتر فاصله داشته باشد یعنی تأثیر پارامتر مورد بررسی بیشتر بوده است و هرچه به یک نزدیکتر شود. یعنی پارامتر مورد بررسی در سناریو مورد نظر به شاهد نزدیکتر است. در این نمودارها هم برای زمان پایه شش دقیقه و دبی‌های تا ۴/۷۴ که بین دوره بازگشت دو تا پنج ساله است اثر بندهای اصلاحی در تسکین هیدروگراف عبوری از نظر کاهش دبی پیک و افزایش Lag محسوس تر است.

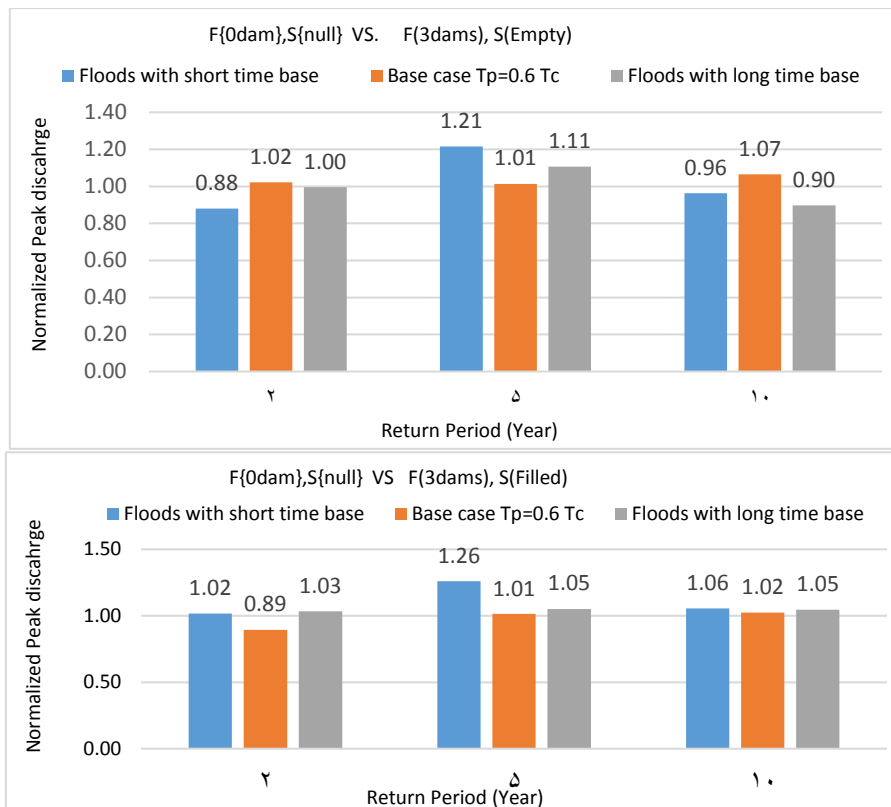
در دو دقیقه طی خواهد شد که با وجود سه بند اصلاحی به ارتفاع یک متر مسیر پیمایش در مدت زمان شش دقیقه طی می‌شود.

در شرایطی که سیلاب کوتاه مدت $T_p < T_c$ رخ دهد، نتایج نشان داد که در دبی‌های متناظر با دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ ساله، به ترتیب کاهش ۲۲/۵، ۱۸ و ۱۱ درصدی (متوسط ۱۷ درصد) در دبی خروجی نسبت به ورودی در مسیل فاقد اقدامات آبخیزداری مشاهده شد. همچنین زمان رسیدن به دبی اوج در این شرایط به طور متوسط به ترتیب ۴۳، ۳۵ و ۳۴ درصد (متوسط ۳۷ درصد) افزایش یافت.

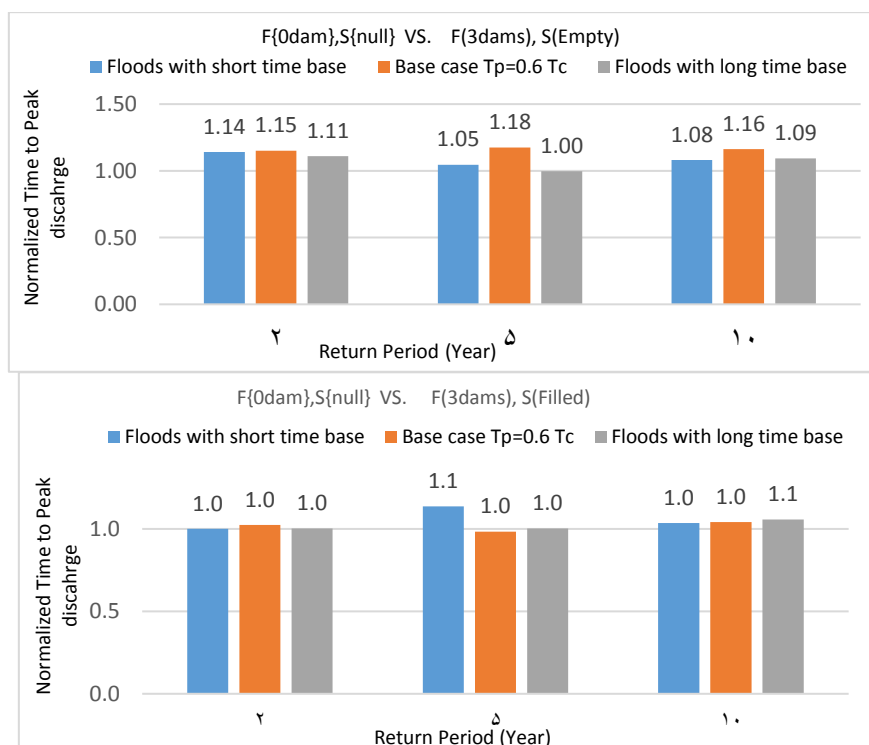
در همین مسیل و با وجود سه بند اصلاحی آبخیزداری در حالت خالی از رسوب، کاهش دبی اوج خروجی نسبت به ورودی به ترتیب ۲۸، ۱۵ و ۱۴ درصد (متوسط ۱۹ درصد) ثبت شد. در حالتی که این بندها پر از رسوب بودند، متوسط کاهش دبی خروجی ۱۴ درصد برآورد شد. از نظر تأخیر زمانی رسیدن به اوج، نتایج نشان داد که در شرایط وجود سه بند اصلاحی خالی از رسوب، تأخیر زمانی ۳۶ درصد و برای بندهای پر از رسوب ۳۱ درصد بود.

در شرایط پایه، بررسی ویژگی‌های مسیل شامل مقطع عرضی، شیب و ضریب زبری نشان داد که در حالت بدون اقدامات آبخیزداری، دبی اوج خروجی نه درصد کاهش یافته و زمان تأخیر ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. در همین شرایط، وجود سه بند اصلاحی پر از رسوب موجب کاهش ۱۰ درصدی دبی اوج و افزایش ۱۰ درصدی زمان تأخیر می‌شود، در حالی که سه بند خالی از رسوب به ترتیب شش و ۱۰ درصد در این پارامترها تأثیرگذار هستند.

برای سیلاب بلند مدت $T_p > T_c$ ، نتایج حاکی از آن است که میانگین کاهش دبی اوج در سه سناریوی مورد بررسی به ترتیب هفت درصد (بدون اقدامات)، شش درصد (بندهای خالی از رسوب) و چهار درصد (بندهای پر از رسوب) بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که



شکل ۱۲- نرمال کردن دبی پیک سناریو دوم (بنداصلاحی خالی از رسوب) و سوم (بند اصلاح با رسوب) نسبت به سناریو شاهد در پروتوتایپ
Fig. 12. Normalization of peak discharge in Scenario 2 (check dams without sediment) and Scenario 3 (check dams with sediment) relative to the baseline scenario in the physical model



شکل ۱۳- نرمال کردن دبی پیک سناریو دوم (بنداصلاحی خالی از رسوب) و سوم (بند اصلاح با رسوب) نسبت به سناریو شاهد در پروتوتایپ
Fig. 13. Normalization of peak discharge in Scenario 2 (check dams without sediment) and Scenario 3 (check dams with sediment) relative to the baseline scenario in the prototype

خروجی از مجموع دو فلومتر ۲۶/۷۱ لیتر بر ثانیه بوده، که معادل با ۸/۴۴ مترمکعب بر ثانیه در طبیعت و مسیل سیجان است که می توان آن را معادل با دوره بازگشت ۱۰ ساله در نظر گرفت.

در طول یک رودخانه بدون هیچگونه بند اصلاحی به ازای یک دبی اوج ثابت، هر چه زمان پایه هیدروگراف سیل بیشتر باشد، پایین افتادگی شدت دبی پیک جریان کمتر خواهد بود. تا دوره بازگشت پنج ساله و برای کوتاهترین زمان پایه بیشترین کاهش دبی پیک توسط سناریو دوم (مسیل با بندهای اصلاحی خالی از رسوب) و در مرتبه دوم، سناریو سوم (مسیل با بندهای اصلاحی پر از رسوب) و سپس در سومین مرتبه برای آبراهه بدون بند اصلاحی ایجاد می شود. اما با زیاد شدن زمان پایه هیدروگراف روند ثابتی را نمی توان بین سناریوها بیان کرد. تسکین دبی اوج هیدروگراف تا دوره بازگشت کمتر از پنج ساله مشهود است. برای افزایش زمان رسیدن به اوج هیدروگراف هم اثر بندهای اصلاحی تا دوره بازگشت پنج ساله و زمان هیدروگراف کم بیشتر در نتایج دیده می شود

نتایج حاکی از آن است که عملکرد بندهای اصلاحی به شدت تحت تأثیر سه عامل اصلی قرار دارد: (۱) مشخصات هیدروگراف ورودی، (۲) دوره بازگشت سیلاب، و (۳) زمان پایه هیدروگراف. همچنین عواملی مانند مسیل، تعداد و ارتفاع بندها، و میزان رسوبگذاری در آنها نیز در کارایی نهایی سیستم تأثیرگذار هستند. در این میان، بندهای خالی از رسوب در دورههای بازگشت کوتاهمدت (کمتر از پنج سال) بیشترین تأثیر را در کاهش دبی اوج و افزایش زمان تأخیر نشان می دهند.

مطالعات نشان داد که در زمانهای پایه کوتاهتر، بندهای اصلاحی تأثیر بیشتری بر کاهش دبی پیک دارند، اما با افزایش زمان پایه، این اثر نامشخص می شود. این نتیجه نشان دهنده حساسیت سیستم به ویژگیهای هیدروگراف ورودی است و لزوم طراحی سفارشی بندها برای شرایط هیدرولوژیکی خاص را توجیه می کند.

با توجه به اینکه حداکثر اثربخشی بندهای منفرد با ارتفاع یک متر و البته برای شرایط خاص مسیل سیجان در دوره بازگشت دو تا پنج ساله مشاهده شد، و می توان از این سازهها به عنوان راهکار کم هزینه برای کنترل

آنالیز ابعادی: کمیت های هیدرولیکی اصلی برای بررسی اثر بندهای اصلاحی بر هیدروگراف رواناب شامل، دبی پیک ورودی، زمان رسیدن به پیک، زمان پایه هیدروگراف، تعداد بندها، ارتفاع بندها، وضعیت رسوبگذاری، شیب طولی ضریب زبری مانینگ، شکل مقطع عرضی، دما و چلالی آب بود که با توجه به ثابت بودن شرایط آزمایشگاه سه پارامتر اول متغیر بودند. لذا براساس آنها روابط تجربی و بدون بعدی برای تعمیم نتایج مدل فیزیکی به طبیعت و استفاده در تحلیل و برنامه ریزی مدیریتی استخراج شد که در رابطه های (۶)، (۷) و (۸) آمده است.

$$\pi_1 = I \times (\pi_2)^{1.4} \quad \forall \text{ without check dams} \quad R^2 = 0.9$$

$$\frac{\text{peak discharge of input hydrograph}}{\text{peak discharge of outlet hydrograph}} = \left(\frac{\text{time to peak discharge of outlet hydrograph}}{\text{time to peak discharge of input hydrograph}} \right)^{1.4} \quad (7)$$

$$\pi_1 = I \times (\pi_2)^{0.53} \quad \forall \text{ with 3 empty check dams} \quad R^2 = 0.92$$

$$\frac{\text{peak discharge of input hydrograph}}{\text{peak discharge of outlet hydrograph}} = 1.1 \times \left(\frac{\text{time to peak discharge of outlet hydrograph}}{\text{time to peak discharge of input hydrograph}} \right)^{0.53} \quad \pi_1 = -0.4 \quad (8)$$

$$\pi_1 = I \times (\pi_2)^{0.53} \quad \forall \text{ without check dams VS with 3 empty check dams} \quad R^2 = 0.81$$

$$\frac{\text{peak discharge of input hydrograph, without check dam}}{\text{peak discharge of outlet hydrograph, with 3 empty check dams}} = \left(\frac{\text{time to peak discharge of input hydrograph}}{\text{base time of the input hydrograph}} \right)^{1.98} - 0.4$$

روابط ارائه شده وابسته به شرایط خاص مسیل سیجان است و برای تعمیم به سایر مسیلها نیاز به واسنجی دارد. رابطه (۸) این رابطه به خوبی نشان می دهد که چگونه بندهای اصلاحی می توانند رفتار هیدرولیکی یک مسیل را تغییر دهند و به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت سیلاب عمل کنند.

نتیجه گیری

در قطعی از مسیل سیجان به طول ۱۵۰ متر که مدل فیزیکی آن با مقیاس ۱ به ۱۰ ساخته شده است. براساس دو فلومتر موجود در مخزن حداکثر دبی

نتایج این مطالعه با استخراج سه رابطه تجربی مبتنی بر تحلیل ابعادی، تأثیر بندهای اصلاحی بر ویژگی‌های هیدروگراف سیلاب را به صورت کمی نشان می‌دهد. در حالت طبیعی بدون بند (رابطه ۶)، رفتار سیستم با یک رابطه توانی قوی (توان $1/4$) توصیف می‌شود که بیانگر ماهیت غیرخطی جریان در مسیل‌های طبیعی است. با نصب بندهای اصلاحی (رابطه ۷)، این رفتار غیرخطی به میزان قابل توجهی تعدیل می‌یابد (توان $0/53$)، که نشان‌دهنده اثر تعدیل‌کنندگی بندها بر مشخصات هیدروگراف است.

رابطه (۸) به عنوان یک ابزار تحلیلی مهم، امکان پیش‌بینی تغییرات هیدروگراف در حالت تبدیل از شرایط بدون بند به با بند را فراهم می‌کند. این روابط با ضرایب تعیین بالا ($0/81$ تا $0/92$) از دقت قابل قبولی برخوردارند، اما به دلیل وابستگی به شرایط خاص مسیل سیجان، برای کاربرد در سایر مسیل‌ها نیاز به واسنجی دارند.

در این میان، پارامترهای کلیدی مانند زمان پایه هیدروگراف و نسبت‌های زمانی به عنوان متغیرهای اصلی در روابط ظاهر شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بندهای خالی از رسوب می‌توانند تا ۲۰ درصد از دبی پیک بکاهند، اما این اثر با پر شدن بندها از رسوب کاهش می‌یابد. این یافته‌ها می‌تواند مبنای علمی برای طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب در حوضه‌های مشابه قرار گیرد، به شرط آنکه ملاحظات مقیاس و شرایط هندسی به دقت در نظر گرفته شوند.

تشکر و قدردانی

مؤلفین این تحقیق بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات بخش فنی و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی برای نصب و راه‌اندازی سیستم یاد شده قدردانی و تشکر نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

سیلاب‌های متداول در مناطق مشابه استفاده کرد. اما برای سیلاب‌های با دوره بازگشت طولانی‌تر (مثلاً ۵۰ یا ۱۰۰ ساله)، باید روش‌های تکمیلی (مانند سدهای خاکی یا مخازن تاخیری) در نظر گرفته شود.

با توجه به اینکه تأثیر سه بند اصلاحی در کاهش دبی پیک تا ۱۷ درصد مشاهده شد، اما این اثر در دبی‌های با دوره بازگشت بزرگتر کم‌رنگ می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد بندها لزوماً به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود. بلکه مکان‌یابی هوشمندانه (با در نظر گرفتن شیب مسیل و نقاط بحرانی رسوب‌گیر) می‌تواند کارایی سیستم را افزایش دهد. استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مکان‌یابی پیشنهاد می‌شود.

باتوجه به تعداد، ارتفاع و جایگاه مکانی بند اصلاحی آبخیزداری در مسیل سیجان اثربخشی عمده آنها را می‌توان در کنترل واریزه‌های ناشی از سیلاب دانست تا در کاهش دبی پیک سیلاب و افزایش زمان رسیدن به پیک به عنوان سازه‌های کنترل سیلاب.

عملیات آبخیزداری در مسیل سیجان از آبان ماه ۱۳۹۷ به بهره‌برداری رسید و در فاصله زمانی پنجم تا سیزدهم فروردین ماه ۱۳۹۸، بارش‌های شدید با برآورد مجموع ۱۲۲ میلی‌متر رخ داد که تخمین دبی پیک و دبی متوسط آن با روابط هیدرولوژیکی ساده به ترتیب ۳۸۶ و $18/3$ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. کنترل جریان بهمن توسط بندهای گابیونی به گونه‌ای بود که سه بند گابیونی کاملاً در زیر بهمن ناپدید شدند و جریان بهمن در مخزن بند گابیونی انتهایی متوقف گردید. سازه‌های احداث شده توانستند دبی‌های پیک سیلاب را از خود عبور دهند و با مهار جریان‌های خرده‌سنگی، بالغ بر سه میلیون تن رسوب را به دام انداخته و هیچ‌گونه تغییر شکل و تخریبی در سازه‌ها رخ نداده است.

این نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای سازه‌ها در کنترل واریزه‌ها در شرایط بارشی شدید است. لذا می‌توان استدلال کرد که سود حاصل از این عملیات بسیار بیشتر از هزینه‌های صرف‌شده برای ساخت سازه‌ها بوده است.

منابع مورد استفاده

- Abbasi, N.A., Xu, X., Lucas-Borja, M.E., Dang, W., Liu, B., 2019. The use of check dams in watershed management projects: examples from around the world. *Sci. Total Environ.* 676, 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.249>
- Armin, M., Zahedikhah, H., Mozayyan, M., 2024. Evaluation of sediment trapping in check dams, case study: Nehzatabad Watershed. *Watershed Eng. Manag.* 16(4), 586–599. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.365173.2051>
- Akhtari, R., Hajipour, H., Sanei, M., Gharib Reza, M., Basirat, S., 2022. Physical modeling of Sijan waterway (Arangeh Basin, Alborz Province): a strategy for watershed management assessment. 5th Natl. Conf. Soil Water Conserv. (in Persian).
- Akhtari, R., Gharib Reza, M.R., Hosseini Monfared, S.M., 2019. Performance evaluation of flood and sediment control structures in Koor waterway, Arangeh Basin. 14th Natl. Conf. Watershed Manag., Urmia.
- Akhtari, R., Rostami, M., Saghafian, B., Elmi, M., 2023. Calibration coefficients for runoff hydrographs under check dam construction in waterways. *Watershed Eng. Manag.* 15(3), 404–422. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357101.1948>
- Akhtari, R., Zarei, M., Gharib Reza, M.R., 2023. Estimation of Sijan flood debris volume using terrestrial mapping and Civil-3D. *Environ. Water Eng.* 9(3), 399–412. <https://doi.org/10.22034/ewe.2022.341249.1788>
- Beven, K., 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell.
- Bombino, G., Boix-Fayos, C., Gurnell, A.M., Tamburino, V., Zema, D.A., Zimbone, S.M., 2014. Check dam influence on vegetation species diversity in mountain torrents of the Mediterranean environment. *Ecohydrol.* 7, 678–691. <https://doi.org/10.1002/eco.1389>
- Cowan, W.L., 1956. Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agric. Eng.* 37, 473–475.
- Fattah, P., Hoseini, K., Hashemi, S.A.A., 2023. Investigation of the effects of storm pattern and area characteristics on sediment yield of the watershed. *Watershed Eng. Manag.* 15(2), 264–280. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.356798.1931>
- Guidelines for Check Dam Design, 2016. Watershed Management Office, Iran Forests and Rangelands Organization.
- Khalajzadeh, M., Vahabzadeh, G., Feiznia, S., Nazarisamani, A., Mousavi, S.R., 2021. Determination of effective physical and geomorphological indices affecting occurrence of various types of flood flows in Karaj Dam Watershed. *Watershed Eng. Manag.* 13(2), 460–478. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.128364.1736>
- Lucas-Borja, M.E., Piton, G., Yu, Y., Castillo, C., Zema, D.A., 2021. Check dams worldwide: objectives, functions, effectiveness and undesired effects. *Catena* 204, 105390.
- Mousavi, S.H., Rezaei, A., Karimi, M., 2011. Evaluation of check dams' performance in flood control. *Iran. J. Soil Water Res.* 42(3), 245–256.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve, D.E., 2010. *Hydraulic Modelling: Concepts and Practice*. ICE Publishing.
- Pars Piyab Consulting Engineers, 2009. Baseline hydrological study report of Arangeh watershed. Tehran.
- Piton, G., Recking, A., 2017. Design of sediment traps with open check dams. II: Woody debris. *J. Hydraul. Eng.* 143, 04017002.
- Salabi, A., Mohammadi, R., Norouzi, K., 2021. Experimental study of scour around rock check dams. *Amirkabir J. Civ. Eng.* 52(4), 1123–1134.
- Schwindt, S., 2016. Optimization of detention dams in Switzerland. *J. Hydraul. Eng.* 142, 04016023.
- Soleimanpour, S.M., Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Noroozie, K., 2023. Land subsidence risk management solutions in Seydan-Farooq Plain of Fars Province with the Driving Force–Pressure–State–Impact–Response approach. *Watershed Manag. Res.* 36, 50–65.
- Theofanidis, A., Kastridis, A., Sapountzis, M., 2025. Effectiveness of torrential erosion control structures (check dams) under post-fire conditions—The importance of immediate construction. *Land* 14, 629. <https://doi.org/10.3390/land14030629>
- United Nations, 2022. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. UNDRR, Geneva.
- Xiang-Zhou, X., Hong-Wu, Z., Ouyang, Z., 2004. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China. *Environ. Sci. Policy* 7, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2003.12.002>
- Zhang, Z., Chai, J., Li, Z., Chen, L., Yu, K., Yang, Z., Zhang, X., Zhao, Y., 2022. Effect of check dam on sediment load under vegetation restoration in the Hekou-Longmen region of the Yellow River. *Front. Environ. Sci.* 9, 823604. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.823604>