

The effect of design discharge and the performance of culverts on the natural flood crisis in selected watershed of Yazd province

SeyedMohsen Atashi¹, Hossein Malekinezhad^{2*}, MohammadReza Hadian³, Asghar ZareChahouki⁴

¹ Ph.D. Student in Watershed Management Engineering and Sciences, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Iran

² Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

Extended Abstract

Introduction

Culverts are among the most common and important transitional structures used to convey water, materials, or buried facilities beneath the ground. Therefore, the structures in question should be designed and constructed to maintain their safety, durability, and efficiency in a variety of environmental conditions. Several factors, including the flow pattern at the structure site, maximum instantaneous flood discharge, backflow due to blockage, morphological stability of the river, and erosion and scour effects, influence the hydraulic performance of crossing structures. Therefore, considering various influencing factors in the design and location of these structures to improve their performance is essential. On the other hand, hydrologic models are effective tools for simulating surface and subsurface hydrologic processes in watersheds and are widely used to enhance water resource management. Prediction of flood events and simulation of hydrological processes in watersheds are two fundamental applications of rainfall-runoff models that play a crucial role in water resource planning and management. Accordingly, this research was conducted using the HEC-HMS model to examine the impact of and performance of road-crossing water on flood crises in several selected watershed in the Yazd province.

Materials and Methods

The present study was conducted due to the presence of multiple intersecting structures and the history of damage during the floods of 2022 in six selected watersheds in the counties of Taft, Ashkazar, and Mehriz, including the Khamsian, Darbe Raz, Dashtak, Roobaz, Ghavam-Abad, and Konj-Kuh watersheds in Yazd province. The aim was to gather and obtain necessary information about corresponding rainfall-runoff events from relevant sources and extract precise details of intersecting structures such as culverts and small bridges to gain a comprehensive view of the physical, hydraulic, and structural conditions. This serves as the basis for evaluating capacity, analyzing hydraulic performance during floods, and assessing the efficiency of the studied route's drainage system. After identifying the number of culverts in the watersheds, the HEC-HMS software was used to determine the volume and amount of flood. To determine the compatibility of their flow capacity with the flood discharge using the HEC-HMS model, hydrological parameters were first extracted from the watershed and then, using numerical hydraulic models, the flow behavior at culvert sections was analyzed.

Results and Discussion

The results of comparing the hydraulic capacities of selected culverts with the design flood discharge at various return periods revealed that the hydraulic behavior of structures in response to increased return periods is non-linear and highly sensitive; in most cases, as intensity and frequency of rainfall increase, ratio (Q_c/Q_d) decreases rapidly, leading the structure into the critical. The watersheds of Khamsian, Dashtak, and Roobaz have minimum relative capacities and enter an unstable state from 5 to 10-year periods. A $Q_c/Q_d < 0.5$ in these areas severe hydraulic section deficiencies, significant energy at the culvert outlet, and the risk of overflow from the culvert. Such conditions are mainly observed in structures with reduced hydraulic performance due to siltation, increased roughness, and geometric shapes. In the Darbe Raz and Dashtak watersheds, the structure's condition is acceptable up to 10-25-year return periods, but beyond 25 years, there is a likelihood of flooding and upstream reversal. The rate of capacity reduction to Q_d decreasing from 0.09 to below 0.5 the 25-50- range indicates that the flood is entering unstable state and the outlet is starting saturate. In the Ghavam-Abad watershed, the ratio (Q_c/Q_d) above 1 in all return periods, making it the only structure evaluated as from a hydraulic design perspective. Ac/Q_d value of 4.1 indicates a significant

excess capacity resulting the larger outlet dimensions and the suitable longitudinal slope of the inlet channel. However, for extreme events above 500 years, this ratio decreases to around 1, indicating that the flow has reached the threshold of the final capacity. Given the potential for severe rainfall events with return periods exceeding 500 years in 2022, it necessary to reassess the design range for this structure as well. Conversely, the Konj-Kuh culvert exhibits the poorest performance, entering a critical state even at the 2-year return period, meaning that normal annual rainfall could trigger overflows.

Conclusion

In view of the flood rainfall in April 2022 in Yazd province, as one of the most intense recorded rainfall events in the contemporary statistical period; the analysis of ratios (Q_c/Q_d) showed that with an increase in the return period from 5 to 500 years, the average ratio of design capacity to flow rate from around 0.75 to less than 0.20 percent. Among the existing structures in the studied watersheds, only 1 structure was evaluated safe (Ghavam-Abad) and 8 structures are in critical conditions in one of the return periods less than an equal 25 years. This pattern that the initial design of culverts based on return periods lower than the of publication 415 (1 to 25 years).

Keywords: Flood, Hydraulic modeling, Culverts, HEC-HMS model, Yazd province

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This work is part of the doctoral dissertation and was jointly supported by the Faculty of Natural Resources of Yazd University.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

SeyedMohsen Atashi: Conceptualization, Performing statistical analysis, Writing - original draft preparation

Hossein Malekinezhad: Supervision, Manuscript editing, Controlling results; **MohammadReza Hadian:** Consultation, Reviewing text; **Asghar ZareChahouki:** Consultation, Conceptualization, Reviewing text

*Corresponding Author, E-mail: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

Citation: Atashi, SM., Malekinezhad, H., Hadian, MR., & ZareChahouki, A. (2026). The Effect of Design Discharge and the Performance of Culverts on the Natural Flood Crisis in Selected Watershed of Yazd Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 162-180.

doi: 10.22098/mmws.2026.19278.1778

Received: 28 January 2025, Received in revised form: 27 February 2026, Accepted: 19 March 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3 pp. 162-180.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تأثیر دبی طراحی و عملکرد زیرآب گذرها در بحران طبیعی سیل در تعدادی از حوزه‌های آب‌خیز منتخب استان یزد

سیدمحسن آتشی^۱، حسین ملکی‌نژاد^۲، محمدرضا هادیان^۳، اصغر زارع‌چاهوکی^۴

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۲ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۴ استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

زیرآب‌گذرها از جمله رایج‌ترین و مهم‌ترین سازه‌های انتقالی هستند که برای عبور جریان آب، مصالح، یا تأسیسات مدفون در زیر خاک به کار می‌روند. بنابراین، در نظر گرفتن عوامل مختلف تأثیرگذار در طراحی و جانمایی این سازه‌ها به منظور بهبود عملکرد آن‌ها ضروری است. بر این اساس پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر دبی طراحی و عملکرد سازه‌های آبی تقاطعی جاده‌ای در بحران سیل در تعدادی از حوزه‌های آب‌خیز منتخب استان یزد انجام گرفت. در این راستا پس از جمع‌آوری و اخذ اطلاعات و آمارهای مورد نیاز مشخصات دقیق زیرآب‌گذرها بررسی شده سپس با استفاده از مدل HEC-HMS اقدام به تعیین مقدار و حجم سیلاب شد و رفتار جریان در مقاطع این زیرآب‌گذر مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که ظرفیت هیدرولیکی زیرآب‌گذرهای منتخب در برابر افزایش دوره بازگشت رفتار غیرخطی داشته به طوری که با افزایش شدت و فراوانی بارش نسبت Q_c/Q_d به سرعت کاهش یافته و منجر به ورود سازه مورد نظر به شرایط بحرانی می‌شود. بر این اساس در تعداد نه سازه مورد بررسی در شش حوزه آب‌خیز منتخب فقط زیرآب‌گذر جدیدالاحداث قوام‌آباد ایمن بوده و سایر زیرآب‌گذرها بر اساس دوره بازگشت‌های مختلف بررسی شده در شرایط بحرانی قرار داشتند. بنابراین، به منظور مدیریت و پیشگیری از تخریب و آسیب‌های احتمالی لازم است نسبت به ایمن‌سازی این سازه‌ها (ارتقای ظرفیت عبور جریان) بر اساس دوره بازگشت‌های استاندارد اقدامات مورد نیاز انجام شود.

واژه‌های کلیدی: سیل، مدل‌سازی هیدرولیکی، زیرآب‌گذر، مدل HEC-HMS، استان یزد

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

استناد: آتشی، سیدمحسن، ملکی‌نژاد، حسین، هادیان، محمدرضا، و زارع‌چاهوکی، اصغر (۱۴۰۵). تأثیر دبی طراحی و عملکرد زیرآب‌گذرها در بحران طبیعی سیل در تعدادی از حوزه‌های آب‌خیز منتخب استان یزد. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۶(۳)، ۱۶۲-۱۸۰.

doi: 10.22098/mmws.2026.19278.1778

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۱۶۲ تا ۱۸۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

آب و خاک از منابع طبیعی و مهم ترین زیربنای تمدن هر کشوری محسوب می شوند و از محورهای توسعه پایدار به ویژه در مناطق روستایی بوده و مسیر پیشرفت هر جامعه را چگونگی بهره برداری از آن ها تعیین می کند. در مناطق خشک و نیمه خشک، مدیریت منابع آب به ویژه در مواجهه با پدیده های هیدرولوژیکی مانند سیلاب ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است (عسگری و نوری، ۱۳۹۹).

ساخت شهرها در حاشیه رودخانه ها و مسیل ها، همراه با توسعه زیرساخت هایی مانند پل ها و زیرآب گذرها، تأثیرات قابل توجهی بر چرخه هیدرولوژیکی و رفتار هیدرولوژیکی جریان های سطحی داشته است. پوشش های نفوذناپذیر مانند بتن و آسفالت در مناطق شهری، مانع از نفوذ آب به زمین شده و ارتباط هیدرولوژیکی بین بستر رودخانه و سفره های آب زیرزمینی را مختل می کند. این امر باعث می شود بخش عمده ای از رواناب به صورت مستقیم به سیستم های انتقال سیلاب (مانند رودخانه ها و مسیل ها) هدایت شود، که خطر وقوع سیلاب های شهری را افزایش می دهد (نوری و رضایی، ۱۴۰۲). این سیلاب ها، یکی از مهم ترین چالش های زیرساخت جاده ای هستند. زیرآب گذرها به عنوان گذرگاه های آب زیر مسیره ای ارتباطی، نقش کلیدی در ایمن بودن و عملکرد مداوم راه ها ایفا می کنند. در شرایط سیلابی، اگر طراحی دبی طرح، ظرفیت هیدرولوژیکی یا نگهداری زیرآب گذرها مناسب نباشد، اثرات آن می تواند شامل شستگی بستر، فروپاشی جاده و قطع ارتباط حیاتی باشد. این سازه های تقاطعی مانند پل ها و زیرآب گذرها، که به منظور تسهیل ارتباط بین دو سوی رودخانه ها و مسیل ها احداث می شوند، نقش مهمی در مدیریت ترافیک شهری و دسترسی ساکنان دارند (Yazdi et al., 2018).

زیرآب گذرها از جمله رایج ترین و مهم ترین سازه های انتقالی هستند که برای عبور جریان آب، مصالح، یا تأسیسات مدفون در زیر خاک به کار می روند. این سازه ها معمولاً دارای مقطعی جعبه ای^۱ یا قوسی شکل^۲ و دایره ای شکل^۳ هستند. بر اساس نحوه عملکرد و پاسخ به بارگذاری، زیرآب گذرها به دو گروه کلی صلب^۴ و انعطاف پذیر^۵ تقسیم می شوند (جعفری، ۱۳۹۱). سازه های مورد نظر باید به گونه ای طراحی و اجرا شوند که در شرایط محیطی متنوع، ایمنی، پایداری و کارایی مورد انتظار خود را حفظ نمایند. با این حال، در بسیاری موارد، ضعف درک طراحان از رفتار متقابل خاک و سازه، همراه با آگاهی ناکافی نسبت به پارامترهای زمانی و محیطی و تأثیر آن ها در فرآیند تحلیل سازه، منجر به بروز

مشکلاتی در مراحل ساخت و بهره برداری می شود (جعفری، ۱۳۹۱). احداث جاده ها، در کنار پیامدهای مثبت و نقش مهم آن ها در بهبود ارتباطات و توسعه مناطق، می تواند اثرات منفی قابل توجهی بر محیط زیست بر جای گذارد. یکی از مهم ترین این اثرات، تقاطع مسیر جاده با آبراهه های طبیعی و رودخانه ها است که موجب برهم زدن نظم هیدرولوژیکی منطقه و تغییر الگوهای جریان آب می شود. در این میان، نوع خاک و سیستم زهکشی به عنوان دو عامل کلیدی در طراحی جاده ها مطرح اند. از این رو، به کارگیری زهکش های مناسب و هماهنگ با ویژگی های طبیعی منطقه، از مهم ترین راهکارها برای کاهش اثرات مخرب زیست محیطی و هیدرولوژیکی جاده ها به شمار می رود (دانشور و دانائیان، ۱۳۹۰؛ محمدحسینی، ۱۴۰۴).

عوامل متعددی از جمله الگوی جریان در محل سازه، حداکثر دبی لحظه ای سیل، جریان برگشتی ناشی از انسداد، پایداری مورفولوژیکی رودخانه، و اثرات شستگی و فرسایش، در عملکرد هیدرولوژیکی سازه های تقاطعی تأثیرگذار هستند. متأسفانه، در بسیاری از موارد در ایران، این عوامل در طراحی و جانمایی سازه ها به طور کامل مورد توجه قرار نگرفته اند. علاوه بر این، تغییرات مورفولوژیکی رودخانه ها، مانند رسوب گذاری و فرسایش کناری، می توانند عملکرد این سازه ها را تحت تأثیر قرار داده و خطر تخریب آن ها را افزایش دهند (باباخانی و مرسلی، ۱۴۰۲؛ اصغری سراسکانرود و پیروزی، ۱۴۰۳).

مدل های هیدرولوژیکی ابزاری کارآمد برای شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی و زیرسطحی در حوزه های آبخیز به شمار می روند و به طور گسترده به منظور ارتقای مدیریت منابع آب به کار گرفته می شوند (فضل اولی و آقایی کهلیک بالغی، ۱۴۰۳؛ Rinsema, 2014). مدل های بارش-رواناب به عنوان یکی از رویکردهای ارزیابی عملکرد، ابزار مؤثری برای برآورد رواناب و مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی محسوب می شوند و نقش مهمی در تحلیل و ارزیابی ویژگی های حوزه های آبخیز دارند (Harlan et al., 2010). پیش بینی رخداد سیلاب و شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه های آبخیز دو کاربرد اساسی مدل های بارش-رواناب هستند که نقش مهمی در برنامه ریزی و مدیریت منابع آب ایفا می کنند (Gautam and Holz, 2001).

مهم ترین نقش مدل های کامپیوتری در حوزه های آبخیز، ایجاد بستری برای برقراری ارتباط منطقی میان فرآیندهای هیدرولوژیکی، هیدرولوژیکی، کیفیت آب و مؤلفه های اقتصادی-اجتماعی، آن هم با صرف هزینه ای معقول، است. انتخاب مدل

⁴ Rigid⁵ Flexible¹ Box² Arch³ Circular

مناسب باید پس از ارزیابی همه‌جانبه نیازها، شناسایی امکانات موجود و بررسی مدل‌های در دسترس صورت گیرد. به‌کارگیری مدل‌های کامپیوتری در سیستم‌های جمع‌آوری و تخلیه آب‌های مازاد، غالباً با هدف بررسی وضعیت موجود، شناسایی مشکلات و ارائه راهکارهای مناسب جهت حل این مشکلات انجام می‌شود (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶؛ میرزایی‌ارجنکی و همکاران، ۱۴۰۴). در سال‌های اخیر، استفاده از رایانه برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب به دلیل سرعت بالای انجام محاسبات و افزایش دقت نتایج، به‌طور گسترده رواج یافته است. در این راستا، سازمان‌ها و نهادهای متعددی اقدام به توسعه نرم‌افزارها و مدل‌های کامپیوتری ویژه این حوزه کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین این نهادها، گروه مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا^۱ است که مجموعه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را تحت عنوان سری HEC^۲ ارائه نموده است. که در این میان مدل HEC-HMS^۳ به‌طور ویژه برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مقیاس‌های مختلف و تحت شرایط گوناگون هیدرولوژیکی طراحی شده است. این مدل، به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت به‌کارگیری در حوزه‌های آب‌خیز با ویژگی‌های متنوع، در پژوهش حاضر به‌عنوان ابزار اصلی مدل‌سازی به‌منظور تحلیل و ارزیابی حوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی و تعیین رفتار هیدرولوژیکی آن‌ها در مواجهه با بارش‌های شدید استفاده شده است. با توجه به این‌که مطالعات هیدرولوژی و هیدرولیک رودخانه‌ها و سازه‌های تقاطعی از جمله موضوعات کلیدی در مهندسی عمران و مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که با چالش‌های ناشی از بارش‌های رگباری و سیلاب‌های مخرب مواجه‌اند؛ هستند (بهین‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۷؛ رشیدی و همکاران، ۱۴۰۴). لذا مطالعات مختلفی در زمینه هیدرولوژی، هیدرولیک، عملکرد سازه‌های تقاطعی (زیرآب‌گذرها و پل‌ها) و تأثیر اقدامات آب‌خیزداری با استفاده از ابزارهای مختلف مدل‌سازی انجام شده است. که در ادامه به مرور تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود.

با هدف ارزیابی طرح کنترل سیل در حوزه آب‌خیز جعفرآباد استان گلستان، مصطفی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) به شبیه‌سازی اثرات هیدرولوژیک و اقتصادی اجرای سناریوهای سازه‌ای کنترل سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS پرداخته و دریافتند که در بازه‌های زمانی پیش و پس از احداث سازه‌ها، تفاوت معناداری در پارامترهای هیدرولوژیک در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده نمی‌شود. بر اساس معیارهای صرفاً فیزیکی، سناریوی برگزیده شامل افزایش ۱۱ سازه به تعداد موجود در اولویت نخست قرار گرفت؛ و با در نظر گرفتن معیارهای فیزیکی و اقتصادی به‌طور هم‌زمان، سناریوی

وضعیت بدون سازه و سناریوی وجود ۱۵ سازه در بالادست حوزه آب‌خیز به‌ترتیب در بیش‌تر دوره‌های بازگشت، به‌عنوان گزینه‌های اول و دوم انتخاب شدند. در مطالعه‌ای که با هدف تعیین مناطق حساس به سیلاب‌های آبی در حوزه آب‌خیز سد جیرفت با استفاده از مدل HEC-HMS انجام گرفت، در پژوهشی در حوزه آب‌خیز نهند بررسی اثر اقدامات آب‌خیزداری مکانیکی و بیولوژیکی بر میزان رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS توسط میکائیل‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) مورد بررسی قرار گرفت و پس از واسنجی و اعتبارسنجی داده‌های ۹ رخداد مشاهداتی و شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب برای دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ سال، یافته‌ها نشان داد که اقدامات مکانیکی تأثیر ناچیزی در افزایش زمان تمرکز حوضه داشته‌اند. در مقابل، اقدامات بیولوژیکی به‌طور میانگین باعث کاهش ۸/۴۷ درصدی شماره منحنی (CN) در کل حوضه شده و نیز با افزایش دوره بازگشت، میزان تأثیر اقدامات آب‌خیزداری بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب کاهش می‌یابد. قرمزچشمه و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر اقدامات آب‌خیزداری بر مشخصات سیلاب در حوزه آب‌خیز هفتان را با استفاده از مدل HEC-HMS بررسی کردند. نتایج نشان داد که این اقدامات در سیلاب‌های کوچک تأثیر بیش‌تری دارند و با افزایش شدت بارش، تأثیر آن‌ها بر کاهش دبی اوج کاهش می‌یابد. همچنین، کاهش دبی اوج (۲۰-۲۳ درصد) نسبت به کاهش حجم سیلاب (۲۹-۳۳ درصد) مؤثرتر بود. این یافته‌ها برای تحلیل اثربخشی اقدامات آب‌خیزداری در یزد مفید است. نتایج مطالعه یوسفی و همکاران (۱۳۹۹) در ارزیابی هیدرولیکی زیرآب‌گذرهای موجود در محور تهران-فیروزکوه در برابر سیلاب‌های شدید؛ نشان داد که در اکثر مقاطع، دبی طراحی مورد استفاده کم‌تر از دبی محتمل حداکثر (PMF) بوده و پیشنهاداتی برای افزایش تاب‌آوری سازه‌ها ارائه شد. تحلیل هیدرولیکی و شبیه‌سازی عملکرد زیرآب‌گذرهای جاده‌ای در غرب استان گلستان در برابر سیلاب‌های ناگهانی با استفاده از مدل SWMM و HEC-RAS توسط احمدی و سلیمانی (۱۴۰۱) انجام گرفت و مشخص شد که انسداد ناشی از رسوبات و پوشش گیاهی باعث کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی ظرفیت هیدرولیکی می‌شود. عابدی و همکاران (۱۴۰۲) به ارزیابی ظرفیت هیدرولیکی زیرآب‌گذرهای جاده‌ای در محور چالوس-کرج با استفاده از مدل HEC-RAS و داده‌های سیلابی ۳۰ ساله پرداخته و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بیش از ۴۰ درصد زیرآب‌گذرها توان عبور سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله را ندارند و نیاز به بازطراحی یا افزایش قطر دارند. در پژوهشی شفیی‌کیگاسری و همکاران (۱۴۰۳) نقش طراحی و نگهداری زیرآب‌گذرها را در وقوع لغزش و

^۳ Hydrologic Modeling System^۱ US Army Corps of Engineers^۲ Hydrologic Engineering Center

رانش جاده های جنگلی منطقه برنجستانک بررسی کردند و یافته های آن ها نشان داد که عدم رعایت استانداردها در طراحی و نصب و همچنین نبود حفاظ و نگهداری مناسب، منجر به انسداد و کاهش کارایی این سازه ها شده است.

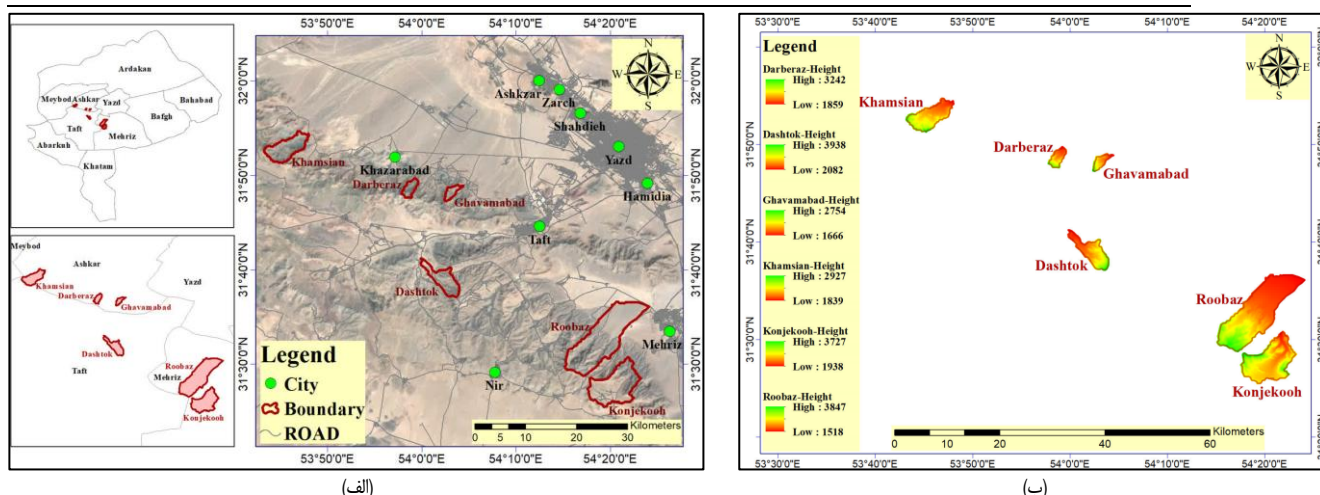
García-Lorenzo و Conesa-García (۲۰۱۲) روشی برای ارزیابی اثربخشی سازه های زهکشی تقاطعی جاده در مسیرهای موقت ارائه کردند. در پژوهش آن ها ظرفیت هیدرولیکی زیرآب گذرها، ویژگی های هیدرولوژیکی سطح رودخانه، عوامل ژئومورفولوژیکی تأثیرگذار نظیر پایداری بستر، حمل رسوب و انسداد احتمالی بررسی شده است. شاخصی برای ریسک انسداد زیرآب گذرها نیز معرفی شده که می تواند در ارزیابی عملکرد سازه ها در سیلاب های شدید بسیار کاربردی باشد. Miller و همکاران (۲۰۱۷) در آمریکا تأثیر تغییر کاربری زمین و سازه های مهندسی کنترل سیلاب را با HEC-HMS ارزیابی کردند. ساختارهای کنترلی رواناب اوج را کاهش دادند و مدل ابزاری مناسب برای ارزیابی مدیریت منابع آب معرفی شد. Šraj و همکاران (۲۰۲۳) حادثه سیل شدید سال ۲۰۲۳ در منطقه اسلوانی را بررسی کردند و دریافتند که سیلاب های بسیار شدید می توانند دبی طراحی موجود را به طور قابل توجهی دستخوش تغییر کنند؛ بنابراین به روزرسانی مکرر دبی های طراحی و لحاظ کردن ریسک شکست و فاکتورهای ایمنی اقلیمی برای سازه های هیدرولیکی در طراحی الزامی است. Amatya و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه ای در جنگل های ملی ایالات متحده عوامل هیدرولوژیکی طراحی و دبی های پیک بر اساس داده های بارش و جریان آب با دقت بالا بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن ها، پیشنهاد های کاربردی برای اصلاح اندازه گیری و استانداردهای طراحی سازه های زهکشی شهری و روستایی، بهبود ظرفیت تحمل زیرآب گذرها در برابر سیلاب های شدید و افزایش مقاومت آن ها در شرایط تغییرات اقلیمی ارائه دارد. در مطالعه ای چندمنظوره که در ایالات متحده انجام شد Mukherjee و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی جامع خطر هیدرولوژیکی برای سازه های تقاطع جاده ها در آبراهه های جنگلی کوچک بر اساس داده های هیدرولوژیکی کوتاه مدت و تحلیل های فرانسیل پرداختند. آن ها دبی های طراحی و ظرفیت هیدرولیکی زیرآب گذرها با استفاده از روش های آماری پیشرفته و مدل های هیدرولیکی بررسی نموده و نشان داده شده که بسیاری از زیرآب گذرها توان مقابله با سیلاب های ۱۰۰ ساله را نداشته اند و پیشنهاد شده است که اندازه های جدید زیرآب گذرها حداقل ۰/۷۵ متر قطر داشته باشند تا ایمنی ساختار و مدیریت سیلاب بهبود یابد.

با توجه به پژوهش های انجام شده در این زمینه مشخص شد که مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در ایران و جهان پیشرفت های قابل توجهی داشته اند، اما همچنان چالش هایی در زمینه تحلیل سازه های تقاطعی و مدیریت سیلاب به خصوص در مناطق خشک مثل استان یزد وجود دارد. به ویژه این که مطالعه جامع ای نیز در زمینه عملکرد سازه های تقاطعی در مناطق خشک مثل استان یزد تاکنون انجام نشده است. از سوی دیگر استفاده از ابزارهای مدل سازی مانند HEC-HMS، همراه با داده های میدانی و ArcGIS، می تواند به بهبود تحلیل های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی کمک کند و امکان شبیه سازی دقیق رفتار هیدرولوژیکی حوزه های آبخیز و تحلیل عملکرد هیدرولیکی سازه ها را فراهم نماید. با این حال، کمبود داده های هیدرومتری و تمرکز ناکافی بر مناطق خشک مانند استان یزد، ضرورت انجام پژوهش حاضر را برجسته نموده و نوآوری آن محسوب می شود و پژوهش حاضر با تمرکز بر عملکرد سازه های تقاطعی در برابر سیلاب های اخیر یزد، به دنبال ارائه راهکارهای عملی به منظور کاهش خسارات حاصل از سیلاب ها است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در حوزه های آبخیز منتخب خمسیان، درب رز، دشتک، روباز، قوام آباد، و کنج کوه در شهرستان های تفت، اشکذر و مهریز، شامل حوزه های آبخیز در استان یزد انجام شد. این حوزه های آبخیز به دلیل وجود سازه های تقاطعی متعدد و سابقه تخریب در سیلاب های سال ۱۴۰۱ انتخاب شدند. شش منطقه مطالعاتی، در محدوده طول جغرافیایی "۱۲/۰۴'۵۳° تا "۲۳/۰۹'۵۴° و عرض جغرافیایی "۳۱/۳۹'۳۹° تا "۳۱/۲۴'۵۵° واقع شده اند. جهت انجام این مطالعات از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح استفاده شد. به منظور بررسی صحت و دقت مرز محدوده مطالعاتی و تدقیق نمودن خطوط تقسیم آب از شبیه سازی سه بعدی بر مبنای مدل رقومی ارتفاعی زمین با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر، به همراه بررسی نهایی آن با انطباق مرز حوزه بر روی تصاویر Google Earth استفاده شد که در شکل ۱ موقعیت حوزه های آبخیز مورد مطالعه در استان یزد و شهرستان های مختلف و در جدول ۱ برخی از خصوصیات و ویژگی های فیزیکی و ژئومتری این حوزه های آبخیز ارائه شده است.



شکل ۱- (الف) موقعیت حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در استان یزد و شهرستان‌های مختلف این استان، (ب) نقشه مدل رقمی ارتفاعی حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه.

Figure 1- (a) Location of the studied watersheds in Yazd province and various counties in this province, (b) Digital elevation model map of the studied watersheds.

جدول ۱- برخی از خصوصیات و ویژگی‌های فیزیکی و ژئومتری حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

Table 1- Some physical and geometric characteristics and features of the studied watersheds

Characteristics/ Watershed	Ghavam-Abad	Darberaz	Khamsian	Dashtak	Roobaz	Konjekoo
Area (ha)	448.11	591.46	2306.42	1838.84	8319.76	4638.26
Circumference (km)	10.41	10.71	23.79	24.37	46.21	33.83
Main waterway length (km)	4.63	4.44	9.29	10.39	21.64	14.68
Maximum elevation (m)	2606	3152	2927	3918	3832	3716
Minimum elevation (m)	1679	1880	1850	2095	1525	1946
Rainfall (mm)	149.1	193.5	182.3	243.5	180.2	220.7
Maximum slope	172.9	329.5	215.1	357.3	635.1	477.1
Minimum slope	0	0	0	0	0	0
Average slope	43.2	55.1	33.9	50.8	37.08	48.03
Time of concentration (Kirpich equation) (h)	0.32	0.28	0.63	0.63	1.16	0.96
Compaction coefficient	1.38	1.23	1.39	1.59	1.42	1.39
Elongation coefficient	0.52	0.65	0.39	0.39	0.49	0.51

می‌شود. بدین ترتیب، این داده‌ها به‌عنوان ورودی اصلی تحلیل‌های نرم‌افزاری و مدل‌سازی هیدرولیکی، نقش کلیدی در ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد سازه‌های تقاطعی ایفا می‌کنند. با توجه به عملکرد ناکارآمد برخی از زیرآب‌گذرهای موجود برخی از حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در جریان سیلاب‌های سال ۱۴۰۱، اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای در سال ۱۴۰۴ اقدام به نصب زیرآب‌گذر جدید در مجاورت زیرآب‌گذرهای قبلی در این حوزه‌ها نموده است که هدف از این اقدام، افزایش ظرفیت عبور جریان و کاهش خطر آسیب‌های ناشی از وقوع سیلاب در مقاطع مورد نظر بوده است. در این راستا در جداول ۲ تا ۷ مشخصات زیرآب‌گذرهای موجود در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه و نیز تصاویر آن‌ها در شکل‌های ۲ تا ۷ ارائه شده است.

۲-۲- روش پژوهش

پس از جمع‌آوری و اخذ اطلاعات مورد نیاز درباره رویدادهای متناظر بارش-رواناب از شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد و اداره کل هواشناسی استان یزد بررسی و تجزیه و تحلیل این اطلاعات انجام شد. ارائه مشخصات دقیق سازه‌های تقاطعی نظیر زیرآب‌گذرها و پل‌های کوچک، به‌منظور ایجاد دیدگاه جامع نسبت به شرایط فیزیکی، هیدرولیکی و سازه‌ای آن‌ها انجام می‌شود. این اطلاعات، مبنای ارزیابی ظرفیت عبور جریان، تحلیل عملکرد هیدرولیکی در هنگام وقوع سیلاب و سنجش میزان کارایی سیستم زهکشی مسیر مورد مطالعه است. همچنین، با ثبت ویژگی‌هایی همچون ابعاد، شکل مقطع، جنس مصالح و وضعیت نگهداری، امکان شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات بهسازی یا جایگزینی فراهم

جدول ۲- مشخصات زیرآب گذرهای حوزه آبخیز قوام آباد

Table 2- Specifications of culverts in the Ghavam-Abad watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Box culvert (Old Ghavam-Abad culvert)	1.7*1.7	1	Concrete	8	223014-3523625
Box culvert (newly constructed Ghavam-Abad culvert)	1.5*4	1	Concrete	14	223014-3523625



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲- (الف) تصویر زیرآب گذر قدیم، (ب) تصویر زیرآب گذر جدیدالاحداث و (ج) تصویر ماهواره ای محل قرارگیری زیرآب گذرهای حوزه آبخیز قوام آباد

Figure 2- (a) Image of the old culvert, (b) image of the newly constructed culvert, and (c) satellite image of the location of the culverts in the Ghavam-Abad watershed.

جدول ۳- مشخصات زیرآب گذر حوزه آبخیز درب رز

Table 3 - Specifications of culvert in the Darbe Raz watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Box culvert	1.9*2.3	1	Concrete	13	782719-3525282



(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) تصویر زیرآب گذر و (ب) تصویر ماهواره ای محل قرارگیری زیرآب گذر حوزه آبخیز درب رز

Figure 3- (a) Image of the culvert and (b) satellite image of the location of the culvert in the Darbe Raz watershed.

جدول ۴- مشخصات زیرآب‌گذرهای حوزه آب‌خیز خمسیان

Table 4 - Specifications of culverts in the Khamsian watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Pipe culvert (Old Khamsian culvert)	1*1	2	Concrete	11	764731-3533663
Box culvert (newly constructed Khamsian culvert)	1.5*3	2	Concrete	14	764808-3533458



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴- (الف) تصویر زیرآب‌گذر قدیم، (ب) تصویر زیرآب‌گذر جدیدالاحداث و (ج) تصویر ماهواره‌ای محل قرارگیری زیرآب‌گذرهای حوزه آب‌خیز خمسیان

Figure 4- (a) Image of the old culvert, (b) image of the newly constructed culvert, and (c) satellite image of the location of the culverts in the Khamsian watershed.

جدول ۵- مشخصات زیرآب‌گذرهای حوزه آب‌خیز دشتک

Table 5 - Specifications of culverts in the Dashtak watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Pipe culvert (Old Dashtak culvert)	1*1	2	Concrete	14	784188-3509611
Box culvert (newly constructed Dashtak culvert)	2*3	1	Concrete	14	784188-3509611



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵- (الف) تصویر زیرآب گذر قدیم، (ب) تصویر زیرآب گذر جدیدالاحداث و (ج) تصویر ماهواره ای محل قرارگیری زیرآب گذر های حوزه آب خیز دشتک

Figure 5- (a) Image of the old culvert, (b) image of the newly constructed culvert, and (c) satellite image of the location of the culverts in the Dashtak watershed.

جدول ۶- مشخصات زیرآب گذر حوزه آب خیز روباز

Table 3 - Specifications of culvert in the Roobaz watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Box culvert	1*3	1	Concrete	20	253485-3499186



(ب)



(الف)

شکل ۶- (الف) تصویر زیرآب گذر و (ب) تصویر ماهواره ای محل قرارگیری زیرآب گذر های حوزه آب خیز روباز

Figure 6- (a) Image of culvert and (b) satellite image of the location of culverts in the Roobaz watershed.

جدول ۷- مشخصات زیرآب گذر حوزه آب خیز کنج کوه

Table 7 - Specifications of culvert in the Konjkuh watershed

Structure type	Internal dimensions (m)	Number of openings	Material of structure	Length of structure (m)	Coordinates
Arched culvert	2*3	1	Concrete	10	249255-3489171



(ب)



(الف)

شکل ۷- (الف) تصویر زیرآب گذر و (ب) تصویر ماهواره ای محل قرارگیری زیرآب گذر های حوزه آب خیز کنج کوه

Figure 7- (a) Image of culvert and (b) satellite image of the location of culverts in the Konjkuh watershed.

۱-۲-۲- مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوزه‌های آبخیز طراحی شده است و با بهره‌گیری از قابلیت‌های نمایشی خود، توانایی حل مسائل متنوع هیدرولوژیکی را دارد. این قابلیت‌ها شامل مطالعات حوزه‌های آبرسانی، تحلیل هیدرولوژی رودخانه‌های بزرگ، ارزیابی سیلاب‌ها، بررسی توزیع مکانی-زمانی بارش و برآورد تلفات آن است (رحیم‌زاده و حبیبی، ۱۳۹۷؛ حیدری‌چناری و همکاران، ۱۴۰۱). مدل HEC-HMS یک مدل کامپیوتری جامع برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز است که متشکل از زیرمدل‌هایی در بخش‌های جریان سطحی، جریان پایه و جریان کانالی است. این مدل با سه مؤلفه اصلی شامل مدل حوزه آبخیز^۱، مدل اقلیمی^۲ و شاخص‌های کنترلی^۳، سازمان‌دهی شده است. علاوه بر این، HEC-HMS دارای قابلیت بهینه‌سازی پارامترها بوده و امکان کالیبراسیون دقیق مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی را فراهم می‌کند. مهم‌ترین محاسبات داخلی در مدل HEC-HMS شامل برآورد تلفات^۴، تبدیل بارش مازاد به رواناب^۵، محاسبه دبی پایه حوزه^۶ و روندیابی جریان در بازه‌ها و مخازن^۷ است (Chu et al., 2009; Asadi and Boustani, 2013). در مدل حوزه آبخیز ویژگی‌های فیزیکی حوزه آبخیز شامل زیرحوزه‌ها، رودخانه‌ها و کلیه تأسیسات وابسته به آن‌ها به نرم‌افزار معرفی می‌شود. عوامل هیدرولوژیکی موجود در مدل حوضه در قالب هفت عنصر اصلی زیرحوزه^۸، مسیر یا بازه^۹، تقاطع^{۱۰}، انحراف^{۱۱}، چشمه^{۱۲}، مخزن^{۱۳} و چاه^{۱۴} تعریف می‌گردند. محاسبات مدل همواره از عناصر بالادست حوزه آغاز شده و به‌صورت پیوسته تا عناصر پایین‌دست و در نهایت تا نقطه خروجی حوزه ادامه می‌یابد (میراندزادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ بهیمان‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۷).

به‌منظور روش تعیین مقدار و حجم سیل با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS در اولین مرحله مؤلفه‌های حوزه آبخیز برای مدل تعریف شد. به دلیل عدم وجود داده‌های حوزه‌های غیرمستقل و همچنین وجود حوزه‌های تجمعی امکان تعریف Reach و Junction در مدل وجود ندارد. بنابراین، تمام حوزه‌های مستقل و تجمعی با استفاده از Subbasin Creation Tool تعریف و ایجاد شد. در بخش تلفات روش SCS Curve Number که بر مبنای مقدار CN هر حوضه است استفاده شد. در بخش شبیه‌سازی بارش-رواناب نیز از روش SCS Unit Hydrograph استفاده شد. به‌طوری که این مدل برای هر کدام از احوزه‌های

آبخیز مجزا استاده شده و شبیه‌سازی شد. برای طراحی مدل هواشناسی از حداکثر بارش شش ساعته با دوره بازگشت‌های مختلف استفاده شد. با توجه به تفاوت در مقادیر بارندگی در ایستگاه‌های مختلف ایستگاه نزدیک به هر حوزه مبنای اندازه‌گیری قرار گرفت به‌طوری که هر کدام از حوزه‌ها دارای مقدار خاصی از این مقادیر بودند. در اولین مرحله توزیع زمانی حداکثر بارش شش ساعته با استفاده از روش توزیع بارش SCS تیپ II (که به دلیل توزیع حداکثر بارش شش و ۲۴ ساعته در نیمه زمان بارندگی رخ داده و و این بارش‌ها با این تیپ مطابقت مناسب‌تری نسبت به سایر تیپ‌ها داشته) استفاده شد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰؛ شکری و همکاران، ۱۳۹۱؛ یوسفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ وکیلی و مقدم‌نیا، ۱۴۰۱؛ باقرزاده و نوبخت، ۱۴۰۳؛ عزیزی و حافظ‌پرست‌مودت، ۱۴۰۳).

در ادامه ظرفیت عبور زیرآب‌گذرهای انتخابی و مقایسه آن‌ها با دبی سیلاب طرح محاسبه شد. به‌طوری که پس از برآورد دبی‌های سیلاب طرح در دوره‌های بازگشت مختلف و تعیین پارامترهای فیزیوگرافی حوزه، در این بخش به بررسی و تحلیل عملکرد هیدرولیکی زیرآب‌گذرهای موجود در مسیر رودخانه‌ها و آبراهه‌های اصلی حوزه پرداخته می‌شود. هدف، تعیین میزان تطابق ظرفیت عبور این سازه‌ها با دبی طرح حاصل از مدل HEC-HMS و تشخیص گلوگاه‌های احتمالی در سیستم عبور جریان است. ظرفیت عبور زیرآب‌گذرها تابعی از هندسه دهانه (شکل و ابعاد)، ارتفاع خاکریز روی سازه، شیب خط انرژی، زبری مصالح و وضعیت جریان (آزاد یا مستغرق) است. در این بررسی، ابتدا مشخصات هندسی سازه‌ها (طول، قطر یا عرض دهانه، ارتفاع تاج، و جنس لوله یا باکس) از برداشت میدانی استخراج شد و سپس ظرفیت هیدرولیکی هر زیرآب‌گذر با استفاده از روابط استاندارد و دستورالعمل طراحی آبروها محاسبه شد. ظرفیت نظری (Qc) هر زیرآب‌گذر برای هر حالت جریان بر اساس معادله برنولی (Bodhaine, 1982) به صورت رابطه (۱) برآورد می‌شود:

$$Q_c = C \times A \times \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که در آن: Q_c : ظرفیت عبور جریان (m^3/s)، C : ضریب تخلیه وابسته به نوع دهانه و شرایط جریان (بین ۰/۶ الی ۰/۹ و اصولاً ۰/۷ بر اساس SCS)، A : سطح مقطع مؤثر عبور جریان (m^2)، H : هد هیدرولیکی (m) و g : شتاب گرانش ($9/81 m/s^2$) است.

⁸ Sub-basin

⁹ Reach

¹⁰ Junction

¹¹ Diversion

¹² Source

¹³ Sink

¹⁴ Reservoir

¹ Basin Model

² Meteorologic Model

³ Control Specifications

⁴ Losses

⁵ Transform Process

⁶ Baseflow

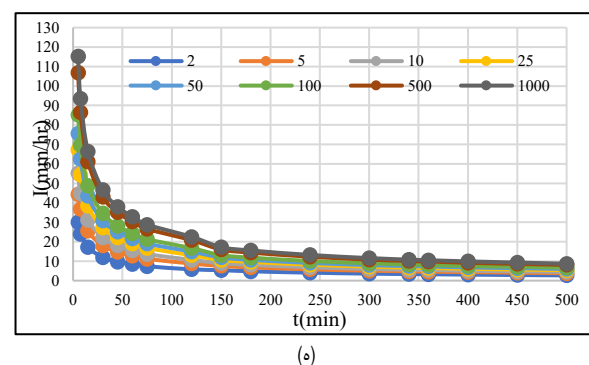
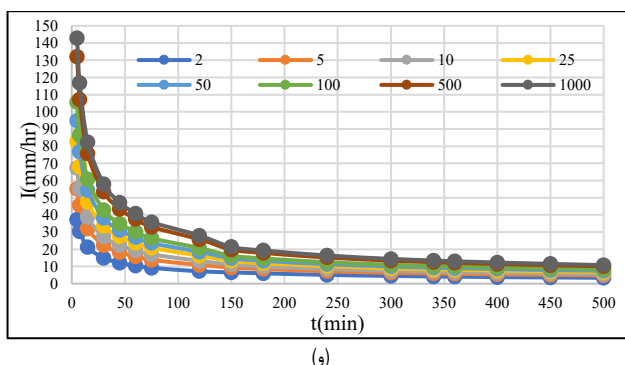
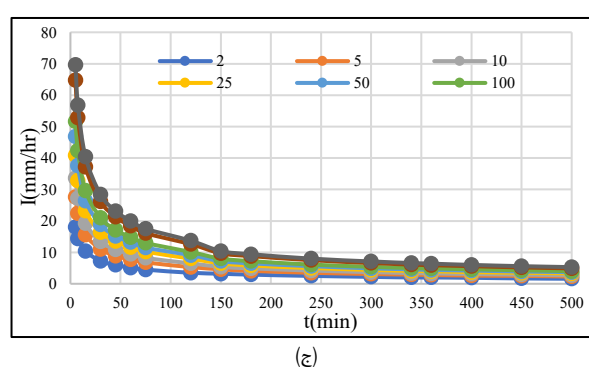
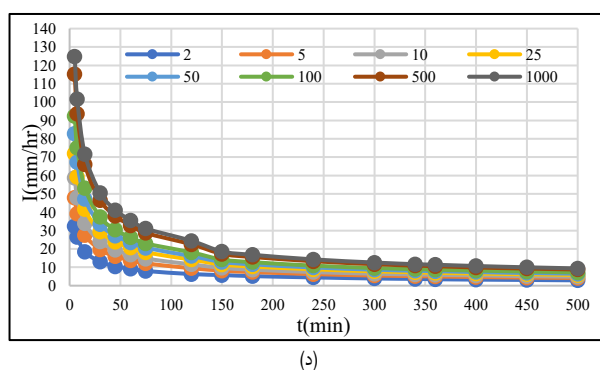
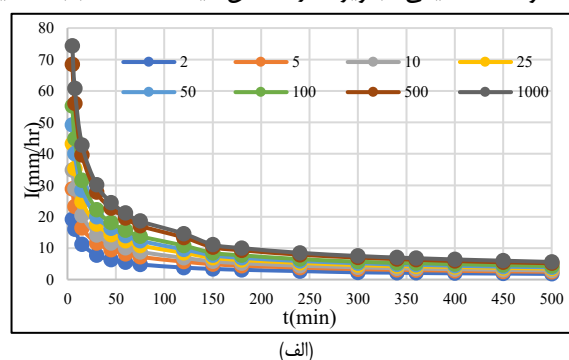
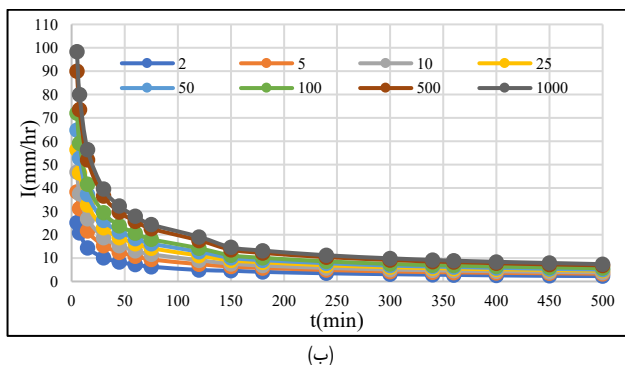
⁷ Routing

رواناب‌های سطحی و افزایش بار هیدرولیکی بر سازه‌های عبوردهنده جریان شده است. در این میان، زیرآب‌گذرها به‌عنوان یکی از سازه‌های اصلی عبور سیلاب در مسیرهای بین‌حوزه‌ای نقشی کلیدی در کنترل و انتقال جریان دارند. از این‌رو پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی عملکرد زیرآب‌گذرها و تعیین میزان انطباق ظرفیت عبوری آن‌ها با دبی سیلاب محاسبه‌شده از مدل HEC-HMS، ابتدا پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه استخراج شده و سپس رفتار جریان در مقاطع زیرآب‌گذر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج این تحلیل‌ها، میزان نارسایی سازه‌ها را بر اساس شرایط هیدروگراف بحرانی، مشخص نموده و مبنای پیشنهادات اصلاحی برای ارتقای ظرفیت عبور جریان در مطالعات آتی است.

ظرفیت محاسبه‌شده هر زیرآب‌گذر (Q_c) با دبی سیلاب طرح (Q_d) متناظر با دوره بازگشت مشابه از نتایج مدل HEC-HMS مقایسه شد. در صورتی که نسبت $(Q_c/Q_d) < 1$ ، سازه قادر به عبور ایمن سیلاب طرح نبوده و خطر سرریز یا انسداد وجود دارد، ولی در صورت $(Q_c/Q_d) \geq 1$ ، ظرفیت سازه کفایت لازم برای عبور جریان دارد (Akan & Houghtalen, 2016; Teng et al., 2017; Kadam et al., 2021).

۳- نتایج و بحث

یکی از عوامل مؤثر در بروز خسارات ناشی از سیلاب، عدم توانایی زیرآب‌گذرها در عبور آب متناسب با دبی یا حجم واقعی سیلاب است. از سوی دیگر در سال‌های اخیر، تغییر الگوی بارش و نوسانات اقلیمی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، سبب تشدید



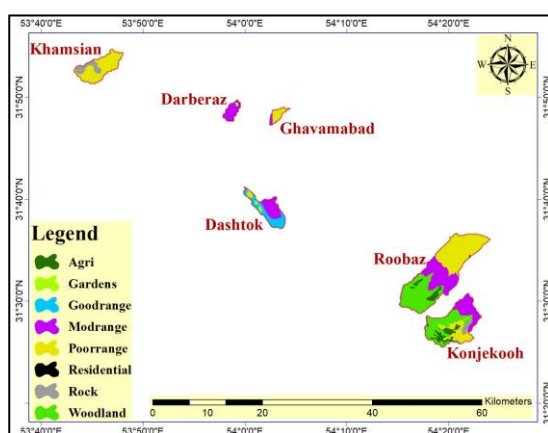
شکل ۸- منحنی شدت مدت فراوانی (IDF) بارندگی‌های کوتاه مدت حوزه‌های آب‌خیز (الف) قوام‌آباد، (ب) درب‌رز، (ج) خمسیان، (د) دشتک، (ه) روباز و (و) کنج‌کوه

Figure 8- Intensity-Duration-Frequency (IDF) curve of short-term rainfall in the watersheds of (a) GhvamAbad, (b) Darbe Raz, (c) Khamsian, (d) Dashtak, (e) Rubaz, and (f) Konjukh

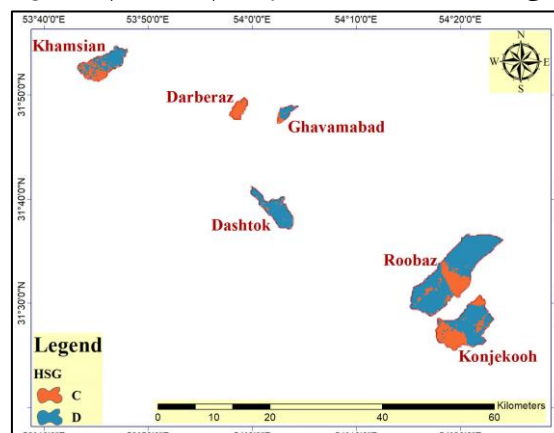
سادگی محاسبات، قابلیت تطبیق با شرایط مختلف زمینی و امکان استفاده از داده‌های حداقلی، کاربرد فراوانی در مطالعات سیلاب‌نگاری دارد. در پژوهش حاضر نیز، با توجه به خصوصیات فیزیکی و کاربری اراضی حوزه، روش SCS CN برای محاسبه حجم رواناب، هیدروگراف و دبی اوج جریان استفاده شد. بدین منظور، ابتدا بر اساس نتایج حاصل از بازدهی‌های میدانی، نقشه‌های پوشش گیاهی، زمین‌شناسی و داده‌های کاربری اراضی، حوزه مورد مطالعه به گروه‌های هیدرولوژیکی مختلف تقسیم شد. سپس با بهره‌گیری از جداول استاندارد SCS، مقادیر اولیه شماره منحنی (CN) در هر گروه هیدرولوژیکی تعیین و برای اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش نیز، نتایج حاصل از تعیین شماره منحنی (CN) مبنای اصلی برآورد بارش مؤثر و محاسبه حجم رواناب قرار گرفت. همچنین با بهره‌گیری از مقادیر به‌دست‌آمده، هیدروگراف سیلاب طراحی در مدل HEC-HMS تولید و دبی اوج جریان برای هر دوره بازگشت استخراج شد.

از سوی دیگر برآورد سیلاب طرح یکی از ارکان اصلی سازه‌های هیدرولیکی و عملیات کنترل سیلاب و آب‌خیزداری است. از این رو در مجموعه شکل ۸ منحنی‌های شدت مدت فراوانی (IDF) بارندگی‌های کوتاه مدت حوزه‌های آب‌خیز مورد مطالعه که با استفاده از آمار سه ایستگاه معرف مهریز، خودسلفی و فیض‌آباد تهیه شده ارائه شده است.

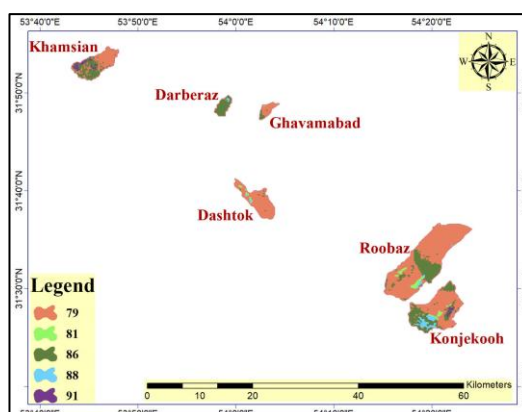
به‌منظور ارزیابی مقدماتی ظرفیت سازه‌های کنترل و تخلیه سیلاب شامل سرریز سدها، شبکه‌های پخش سیلاب و کانال‌های آبگیر؛ برآورد دبی حداکثر لحظه‌ای سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف الزامی است. در پروژه‌های عمرانی، زیست‌محیطی و تفرجگاهی نیز آگاهی از دبی و حجم سیلاب در بازه‌های زمانی متنوع، نقش کلیدی در برنامه‌ریزی بهینه استفاده از رواناب‌های فصلی دارد. در سال‌های اخیر، روش‌های گوناگونی برای برآورد سیلاب در حوزه‌های آب‌خیز به‌کار گرفته شده است که تفاوت اصلی آن‌ها در مقادیر برآوردی دبی حداکثر لحظه‌ای مشاهده می‌شود. در میان روش‌های تجربی و تحلیلی موجود، روش شماره منحنی خدمات حفاظت خاک آمریکا^۱ (SCS CN)، به‌دلیل



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۹- نقشه (الف) گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، (ب) کاربری اراضی و (ج) CN حوزه‌های آب‌خیز مورد مطالعه

Figure 9- Map of (a) soil hydrological groups, (b) land use, and (c) CN of the studied watersheds.

¹ The Soil Conservation Service (SCS) Curve Number (CN)

مقایسه این مقادیر با ظرفیت هیدرولیکی سازه های موجود از جمله زیرآب گذرها و سرریزها، امکان ارزیابی عملکرد فعلی و تحلیل نارسایی های احتمالی را فراهم می سازد. در شکل ۹ نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک، کاربری اراضی و نقشه های CN تهیه شده برای حوزه های مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین در جدول ۸

جدول ۸- مقادیر CN محاسبه شده برای حوزه های آب خیز مورد مطالعه

Table 8- Calculated CN values for the studied watersheds

Rank	Watershed	CN value
1	Ghvam-Abad	80.5
2	Darbe Raz	86
3	Khamsian	82.9
4	Dashtak	79.4
5	Rubaz	80.5
6	Konjkuh	82.4

جدول ۹- دبی حداکثر لحظه ای متناسب با بارش ۶ ساعته مستخرج از نرم افزار HEC-HMS

Table 8- The peak instantaneous discharge corresponding to a 6-hour rainfall event, as derived from the HEC-HMS hydrological modeling software.

Watershed	Instantaneous peak flow (m ³ /s) proportional to 6-hour rainfall with different return periods							
	2	5	10	25	50	100	500	1000
Ghvam-Abad	0	0.2	0.5	1.2	1.8	2.6	4.8	5.9
Darbe Raz	1	3.6	5.8	9	11.6	14.4	21.3	24.5
Khamsian	0.1	1.3	2.8	5.4	7.8	10.4	17.7	21.3
Dashtak	1.3	5.4	9.1	14.9	19.7	24.9	38.4	44.7
Rubaz	3.7	14.6	24.2	38.7	50.8	36.6	96.5	111.8
Konjkuh	8.5	23.3	35.2	51.7	65	78.9	113	128.7

جدول ۱۰- حجم سیلاب متناسب با بارش ۶ ساعته مستخرج از نرم افزار HEC-HMS

Table 8- The flood volume corresponding to a 6-hour rainfall event, as derived from the HEC-HMS hydrological modeling software

Watershed	Flood volume (1000m ³) proportional to 6-hour rainfall with different return periods							
	2	5	10	25	50	100	500	1000
Ghvam-Abad	0	2.1	4.9	10	14.5	19.7	33.5	40.2
Darbe Raz	8.3	24.2	37.1	55.1	69.7	84.7	122.6	139.8
Khamsian	0.9	15.7	33.1	61.4	86.5	113.6	186.5	222.5
Dashtak	16	62.9	103	163.1	211.9	264.5	398	460.2
Rubaz	60.4	243.3	402	641	838.3	1047	1577.8	1824.9
Konjkuh	122.4	327	486.3	705.4	81.3	1063.4	1510.8	1714/7

ظرفیت محاسبه شده ی هر زیرآب گذر (Qc) با دبی سیلاب طرح (Qd) متناظر با دوره بازگشت مشابه از نتایج مدل HEC HMS مقایسه شد. در صورتی که نسبت $Qc/Qd < 1$ ، سازه قادر به عبور ایمن سیلاب طرح نبوده و خطر سرریز یا انسداد وجود دارد، ولی در صورت $Qc/Qd \geq 1$ ، ظرفیت سازه کفایت لازم برای عبور جریان دارد (Akan & Houghtalen, 2016; Teng et al., 2017; Kadam et al., 2021). که نتایج مقایسه ظرفیت عبور زیرآب گذرها با دبی سیلابها در جدول (۱۱) ارائه شده است.

پس از محاسبه ظرفیت عبور زیرآب گذرهای انتخابی و مقایسه آنها با دبی سیلاب طرح در دوره های بازگشت مختلف و تعیین پارامترهای فیزیوگرافی حوزه بررسی و تحلیل عملکرد هیدرولیکی زیرآب گذرهای موجود در مسیر رودخانه ها و آبراهه های اصلی حوزه نشان داد که ظرفیت عبور زیرآب گذرها تابعی از هندسه دهانه (شکل و ابعاد)، ارتفاع خاکریز روی سازه، شیب خط انرژی، زبری مصالح و وضعیت جریان (آزاد یا مستغرق) است.

جدول ۱۱- مقایسه ظرفیت عبور زیرآب‌گذرها (Q_c) با دبی سیلاب طرح (Q_d) در دوره‌های بازگشت مختلفTable 11- Comparison of culvert passage capacity (Q_c) with design flood discharge (Q_d) in different return periods

Watershed	$Q_c(m^3/s)$	$Q_c/Q_d.2$	$Q_c/Q_d.5$	$Q_c/Q_d.10$	$Q_c/Q_d.25$	$Q_c/Q_d.50$	$Q_c/Q_d.100$	$Q_c/Q_d.500$	$Q_c/Q_d.1000$	Performance status (safe/critical)
Ghvam-Abad	4	0	20	8	3.33	2.22	1.53	0.83	0.67	A crisis in 500 years
Ghvam-Abad*	8.31	0	41.55	16.62	6.92	4.61	3.19	1.73	1.4	safe
Darbe Raz	6.05	6.05	1.68	1.04	0.67	0.52	0.42	0.28	0.24	A crisis in 25 years
Khamsian	2.17	21.7	1.66	0.77	0.4	0.27	0.2	0.12	0.1	A crisis in 10 years
Khamsian*	12.47	124.7	9.59	4.45	2.3	1.59	1.19	0.7	0.58	A crisis in 500 years
Dashtak	2.17	1.66	0.4	0.23	0.14	0.11	0.08	0.05	0.04	A crisis in 5 years
Dashtak*	8.31	6.39	1.53	0.91	0.55	0.42	0.33	0.21	0.18	A crisis in 10 years
Rubaz	4.15	1.12	0.28	0.17	0.1	0.08	0.06	0.04	0.03	A crisis in 5 years
Konjkuh	6.52	0.7	0.27	0.18	0.12	0.1	0.08	0.05	0.05	A crisis in 2 years

The * watershed have been redesigned and their capacity increased in 2024 and 2025, and they have newly constructed culverts.

آستانه‌ی ظرفیت نهایی است. با توجه به پتانسیل وقوع بارش‌های شدید اخیر با دوره بازگشت بیش از ۵۰۰ ساله در سال ۱۴۰۱ (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۱) لازم است این سازه نیز در محدوده طراحی بازنگری شود. در مقابل، زیرآب‌گذر حوزه کنج‌کوه ضعیف‌ترین عملکرد را داراست و از همان دوره بازگشت ۲ ساله در وضعیت بحرانی قرار می‌گیرد؛ این یعنی حتی بارش‌های نرمال سالانه می‌توانند موجب انسداد جریان و افزایش سطح آب بالادست شوند. چنین شرایطی معمولاً در سازه‌های با شیب ورودی کم و یا تراز کف پایین‌تر از بستر طبیعی رخ می‌دهد (Zhang et al., 2019).

۴- نتیجه‌گیری

در میان رخدادهای حدی اخیر، بارش‌های سیلابی فروردین‌ماه سال ۱۴۰۱ در استان یزد به‌عنوان یکی از شدیدترین بارش‌های ثبت‌شده در دوره آماری معاصر شناخته شد. طبق گزارش‌های رسمی سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو، حجم بارش تجمعی در برخی زیرحوزه‌های مرکزی و جنوبی استان (از جمله شهرستان‌های یزد، مهریز و تفت) در مدت‌زمان کمتر از ۴۸ ساعت، بین ۷۰ تا ۹۰ میلی‌متر بوده است. این واقعه نه‌تنها به ایجاد رواناب‌های شدید و آبگرفتگی گسترده در مناطق شهری منجر شد، بلکه از دیدگاه تحلیل هیدرولوژیکی به‌عنوان یک رخداد مرجع حدی برای واسنجی مدل‌های بارش-رواناب و ارزیابی ظرفیت سازه‌های عبور آب (مانند زیرآب‌گذرها و پل‌ها) مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، چنین بارشی در مقیاس ۲۴ ساعته دارای احتمال وقوع کم‌تر از ۰/۲ درصد ($T > 500$) بوده و به‌طور فنی در رده‌ی وقایع نادر یا فراتر از

نتایج مقایسه‌ی ظرفیت هیدرولیکی زیرآب‌گذرهای منتخب با دبی سیلاب طرح در دوره‌های بازگشت مختلف نشان داد که رفتار هیدرولیکی سازه‌ها در برابر افزایش دوره بازگشت رفتار غیرخطی و حساس دارد؛ به‌گونه‌ای که در بیش‌تر موارد با افزایش شدت و فراوانی بارش، نسبت (Q_c/Q_d) به‌سرعت کاهش یافته و باعث ورود سازه به محدوده‌ی بحرانی می‌شود. زیرآب‌گذرهای حوزه‌های خمسیان، دشتک و روباز دارای حداقل ظرفیت نسبی هستند و از دوره‌های ۵ تا ۱۰ ساله وارد وضعیت ناپایدار می‌شوند. مقدار $Q_c/Q_d < 0.5$ در این حوزه‌ها نشان‌دهنده نارسایی شدید مقطع هیدرولیکی، افت انرژی زیاد در دهانه و خطر سرریز جریان از تاج زیرآب‌گذر است. چنین وضعیتی عموماً در سازه‌های قدیمی با افت عملکرد هیدرولیکی به‌دلیل رسوب‌گذاری، زبری افزایش‌یافته و اشکال هندسی نامناسب مشاهده می‌شود (Akan & Houghtalen, 2016). در حوزه‌های آب‌خیز درب‌رز و دشتک* وضعیت سازه تا حدود دوره‌های بازگشت ۱۰ تا ۲۵ ساله قابل قبول است، اما در بازه‌های فراتر از ۲۵ سال احتمال آبگرفتگی و برگشت جریان به سمت بالادست وجود دارد. نرخ کاهش ظرفیت نسبت به Q_d از ۰/۹ به زیر ۰/۵ در بازه‌ی ۲۵ تا ۵۰ ساله بیانگر عبور سیلاب به شرایط ناپایدار و شروع مستغرق شدن دهانه است. در حوزه آب‌خیز قوام‌آباد نسبت (Q_c/Q_d) در تمامی دوره‌های بازگشت بزرگ‌تر از ۱ باقی مانده و این سازه تنها موردی است که از دیدگاه طراحی هیدرولیکی ایمن ارزیابی می‌شود. مقدار ($Q_c/Q_d = 4.61$) نشان‌دهنده مازاد ظرفیت قابل‌توجهی است که ناشی از ابعاد بزرگ‌تر دهانه و شیب طولی مناسب کانال ورودی است. با این حال، در رخدادهای حدی بالای ۵۰۰ ساله نسبت یادشده به حدود ۱/۴ کاهش می‌یابد که بیانگر رسیدن جریان به

منابع:

- طراحی معمول (فراتر از معیارهای نشریه ۴۱۵) طبقه بندی می شود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۱). تحلیل نسبت های (Qc/Qd) نشان داد که با افزایش دوره بازگشت از ۵ تا ۵۰۰ سال، میانگین نسبت ظرفیت به دبی طراحی از حدود ۰/۷۵ به کم تر از ۰/۲۰ درصد کاهش می یابد. که این مورد یافته با نتایج پژوهش های مصطفی زاده و همکاران (۱۳۸۹)، قرمزچشمه و همکاران (۱۳۹۸)، احمدی و سلیمانی (۱۴۰۱) و شفیع کیگاسری و همکاران (۱۴۰۳) که تأثیر عوامل ارتباطی مثل زیرآب گذرها، خطوط ارتباطی و سازه های آبی تقاطعی را به عنوان یک عامل تأثیرگذار در فرآیندهای هیدرولوژیک حوزه های آبخیز و حرکات توده های عنوان کردند هم راستا و هم سو است. از سازه های موجود در حوزه های آبخیز بررسی شده، تنها ۱ سازه به عنوان ایمن (قوم آباد) ارزیابی شده و ۸ سازه در شرایط بحرانی در یکی از دوره های بازگشت کم تر و برابر از ۲۵ سال قرار دارند. که این الگو نشان می دهد که طراحی اولیه ی زیرآب گذرها بر مبنای دوره های بازگشت پایین تر از معیار نشریه ۴۱۵ (۱۵ تا ۲۵ سال) انجام شده است. که این بحث در یافته های پژوهش های یوسفی و همکاران (۱۴۰۱)، احمدی و سلیمانی (۱۴۰۱)، عابدی و همکاران (۱۴۰۱)، Sraji و همکاران (۲۰۲۳) و Amataya و همکاران (۲۰۲۴) مبنی بر طراحی و احداث زیرآب گذرها بر اساس دوره بازگشت های مناسب و دبی محتمل حداکثر نیز تاکید شده است که این موضوع لزوم توجه به دوره بازگشت های متناسب با هر منطقه و حوزه آبخیز را در طراحی سازه های مختلف بیش از پیش نشان می دهد.
- سپاسگزاری**
- مقاله حاضر از بخشی از نتایج رساله دوره دکتری تخصصی رشته علوم و مهندسی آبخیز در دانشگاه یزد استخراج شده است. لذا نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مسئولان این دانشگاه به عمل آورند.
- تضاد منافع نویسندگان**
- نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.
- دسترسی به داده ها**
- داده ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.
- مشارکت نویسندگان**
- سیدمحسن آتشی:** مفهوم سازی، انجام تحلیل های آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **حسین ملکی نژاد:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **محمد رضا هادیان:** مشاوره، مفهوم سازی، بازبینی متن مقاله؛ **اصغر زارع چاهوکی:** مشاوره، بازبینی متن مقاله
- اصغری سراسکانرود، صیاد، و پیروزی، الناز (۱۴۰۳). برآورد دبی حداکثر جریان و تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه مطالعه موردی: بخش کوهستانی رودخانه قرانقوچای. *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۶(۱)، ۴۰-۲۵. doi: 10.22059/jphgr.2024.367818.1007793
- باباخانی، علی، و مرسلی، مجتبی (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی تأثیر هیدرولیک جریان عبوری بر آبستتگی پائین دست سرریزکنگره های مثلی بدون کفبند، مهندسی آبیاری و آب/ایران، (مقاله آماده انتشار). doi: 10.22125/iwe.2022.254669.1433
- باقرزاده، سهیلا، و نوبخت، مسعود (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی مدل HEC-GeoHMS در برآورد و پیش بینی سیلاب در حوضه های آبریز-مطالعه موردی حوضه آبریز رودخانه تجن. *پیشرفت ها در علوم و مهندسی آب*، ۱۸(۲)، ۱-۱۸.
- بهیان مطلق، سودابه، پژوهش، مهدی، هنربخش، افشین، و صالحی هفشجانی نگار (۱۳۹۷). سنجش عملکرد مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای حوزه های نیمه تزیعی و یکپارچه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کوه سوخته). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۹(۱۷)، ۳۹-۴۸. doi: 10.29252/jwmr.9.17.39
- جعفری، تیمور (۱۳۹۱). روش های سازه های مدیریت سیلاب با توجه به قابلیت های ژئومورفولوژیک در مناطق روستایی مطالعه موردی: روستای فرطان از توابع شهرستان اسفراین. *سپهر*، ۸۲، ۲۷-۳۵.
- حیدری چناری، فاطمه، فضل اولی، رامین، و نیکزادتهرانی، اسماعیل (۱۴۰۱). واسنجی و ارزیابی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه سازی وقایع منفرد بارش رواناب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تجن). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۳(۲۶)، ۸۱-۶۹. http://dx.doi.org/10.52547/jwmr.13.26.69
- دانشور، محمدرضا، و دانائیان، محمدرضا (۱۳۹۰). بررسی رابطه میزان دبی طراحی و وسعت عرصه پخش سیلاب در ایستگاه پخش سیلاب میان کوه استان یزد. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۳(۱)، ۴۰-۳۳.
- رحیم زاده، زهرا و حبیبی، مینا (۱۳۹۷). شبیه سازی هیدروگراف سیلاب با مدل هیدرولوژیک HEC-HMS و پیش بینی دوره بازگشت در حوضه روانسیر کرمانشاه. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۶(۵۳)، ۱۹۴-۱۷۵. doi: 10.22111/gdij.2018.4186
- رشیدی، نگین، موسوی، وحید و وفاخواه، مهدی (۱۴۰۴). پیش بینی رواناب روزانه با استفاده از مدل های یادگیری ماشین. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۹(۷۰)، ۹۰-۷۳. doi: 10.22034.19.70.5
- شفیعی، مجتبی و قراری، شروان (۱۳۹۶). مروری بر مفاهیم مدل سازی هیدرولوژی در حوضه های آبریز: بخش اول معرفی فرآیند مدل سازی. *آب و توسعه پایدار*، ۴(۲)، ۹۵-۱۰۲. doi: 10.22067/jwsd.v4i2.62154
- شفیعی کیگاسری، نیما، حسینی، سید عطاله، و پورقاسمی حمیدرضا (۱۴۰۳). ارزیابی حساسیت پذیری وقوع زمین لغزش و همبستگی آن با شبکه جاده های جنگلی (مطالعه موردی: شهرستان رامسر) *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۵(۱)، ۷۷-۶۳. doi: 10.61186/jwmr.15.1.63

- جنگل و فرآورده‌های چوب، ۶۸(۳)، ۶۳۹-۶۲۵. doi: 10.22059/jfwp.2015.55594
- مصطفی‌زاده، رئوف، سعدالدین، امیر، بهره‌مند، عبدالرضا، شیخ، واحدبردی و نظرنژاد، حبیب (۱۳۸۹). ارزیابی اثرات هیدرولوژیک طرح آب‌خیزداری جعفرآباد استان گلستان با استفاده از مدل HEC-HMS. *مهندسی و مدیریت آب‌خیز، ۲*(۲)، ۹۳-۸۳. doi: 20.1001.1.22519300.1389.2.2.3.2
- میرزایی‌ارجنکی، سیدیچی، امیری، رقیه، و چیت‌سازان، منوچهر (۱۴۰۴). بررسی برتری مدل‌های هوش مصنوعی بر مدل‌های هیدرولوژیکی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی خرم‌آباد). *مهندسی آبیاری و آب ایران،* (مقاله آماده انتشار). doi: 10.22125/iwe.2025.555667.1905
- میکائیل‌زاده، حدیث، طالبی، علی، کریمیان، علی‌اکبر، و مختاری، ابوالفضل (۱۳۹۳). بررسی اثر اقدامات آب‌خیزداری مکانیکی بر کاهش دبی اوج سیلاب با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS مطالعه موردی: حوضه آب‌خیز نهند آذربایجان شرقی، اولین همایش ملی توسعه پایدار منابع طبیعی تجدید شونده، ۲۴ مهر ۱۳۹۳، همدان، ایران، ۱۰-۱.
- نوری، محبوبه، و رضایی، محمدرضا (۱۴۰۲). کاربرد فناوری‌های زیست‌محیطی در ایجاد روسازی بوم‌شهر اسفنجی (نمونه موردی: شهر شیراز). *برنامه‌ریزی فضایی، ۱۱۳*(۴)، ۱۱۴-۹۷. doi: 10.22108/sppl.2024.139409.1752
- وکیلی، شبنم، مقدم‌نیا، علیرضا (۱۴۰۱). بررسی مقایسه‌ای مدل بارش-رواناب HEC-HMS با روش‌های تجربی مختلف برآورد سیلاب. *علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، ۱۶*(۵۸)، ۴۱-۳۲. doi: 20.1001.1.20089554.1401.16.58.2.3
- یوسفی، حسین، گلشن، محمد و پیرنیا، عبدالله (۱۳۹۷). ارزیابی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در تخمین هیدروگراف سیل مناطق خشک و مرطوب. *اکوهیدرولوژی، ۱۵*(۱)، ۳۳۰-۳۱۹. doi: 10.22059/ije.2018.240802.715
- شکری، سعید، بهنیا، علی‌اصغر، رادمنش، فرهاد، و آخوندعلی، علی‌محمد (۱۳۹۱). تخمین آینمود سیلاب حوزه آب‌خیز با استفاده از مدل HEC-HMS و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز آیدنک). *پروژه‌نامه مدیریت حوزه آب‌خیز، ۳*(۵)، ۸۰-۶۳.
- عزیزی، کامران و حافظ‌پرست‌مودت، مریم (۱۴۰۳). شبیه‌سازی رواناب با مدل HEC-HMS و آنالیز حساسیت پارامترهای روندیابی هیدروگراف سیل با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه مرک). *تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵*(۴)، ۵۱۹-۵۳۶. doi: 10.22059/ijswr.2024.371600.669656
- عسگری، ابراهیم، نوری، محبوبه (۱۳۹۹). ارزیابی پایداری خاک و فرسایش مجاز در راستای مدیریت پایدار محیط ساحلی علوم و فنون آب‌خاک، ۱(۲)، ۵۵-۳۳.
- فضل‌اولی، رامین و آقایی‌کهلیک‌بالغی، الناز (۱۴۰۳). مروری بر مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب. بیست و سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمانشاه، (۱۳-۱).
- قرمزچشمه، باقر، نیکچه‌فراهانی، شمس‌الله، و آقارضا، حشمت (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر اقدامات مدیریتی آب‌خیزداری در تغییر برخی از مشخصات سیلاب حوزه آب‌خیز هفتان. *پروژه‌نامه مدیریت حوزه آب‌خیز، ۱۰*(۱۹) ۱۰۶-۱۱۶. doi: 10.29252/jwmr.10.19.106
- کریمی، مریم، ملکی‌نژاد، حسین، عبقری، هیراد و عزیزیان، محمدصادق (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم‌افزاری HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آب‌خیز چهل‌گری). *پژوهش آب ایران، ۵*(۲)، ۳۸-۲۹.
- محمدحسنی، احسان (۱۴۰۴). بررسی توسعه پایدار در بخش حمل‌ونقل جاده‌ای بار: چالش‌ها و راهکارها در ایران. *زیست سپهر،* (مقاله آماده انتشار).
- مرادنژادی، مریم، جورغلامی، مقداد، و ملکیان، آرش (۱۳۹۴). بررسی کارایی مدل هیدرولوژیک HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب حوضه‌های آب‌خیز جنگلی (مطالعه موردی: جنگل خیرود). *Climate-Responsive Water Infrastructure, 2*(1), 1-22.
- Asadi, A. & Boustani, F. (2013). Performance evaluation of the HEC-HMS hydrologic model for lumped and semi-distributed stormflow simulation (Study Area: Delibajak Watershad). *American Journal of Engineering Research, 2*(11), 115-121.
- Asgari, E., & Noori, M. (2021). Evaluation of Soil Sustainability and Soil Loss Tolerance to Sustainable Management of Soil Resources. *Journal of Amphibious Science and Technology, 1*(2), 33-55. [In Persian].
- AsghariSaraskanroud, S., & Pirooz, E. (2024). Estimating the peak discharge and analyzing the hydrological changes of the river case study: The mountainous section of the Qaranqoo Chay river. *Physical Geography Research, 56*(1), 25-40. doi: 10.22059/jphgr.2024.367818.1007793. [In Persian].
- Abedi, M., Moradi, S., & Karimi, A. (2023). Hydraulic capacity assessment of highway culverts along the Chalus-Karaj route using HEC RAS and long-term flood data. *River Engineering Research, 5*(1), 70-89. [In Persian].
- Ahmadi, M., & Soleimani, R. (2022). Hydraulic performance analysis of road culverts in western Golestan using SWMM and HEC RAS models. *Flood Engineering Journal, 4*(2), 50-68. [In Persian].
- Akan, A. O., & Houghtalen, R. J. (2016). Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: Engineering applications and computer modeling (2nd ed.). Wiley.
- Amatya, D. M., Trettin, C., & Williams, T. (2024). Updated design flows and climate-resilient culvert sizing for rural and urban drainage systems in forested environments. *Journal of*

- Azizi, K., & HafezparastMavedat, M. (2024). Runoff simulation with HEC-HMS model and sensitivity analysis of flood hydrograph trending parameters using differential evolution algorithm (case study: Merck River catchment). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 519-536. doi: 10.22059/ijswr.2024.371600.669656.
- Babakhani, A., & Morsali, M. (2024). Laboratory investigation of the hydraulic flow's impact on underwash at the downstream of a triangular weir without a bottom plate. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, doi: 10.22125/iwe.2022.254669.1433. [In Persian].
- BagherZadeh, S., & Nobakht, M. (2024). Assessment of HEC-GeoHMS Model Efficiency in Flood Estimation and Prediction in Watersheds - Case Study: Tajen River Watershed. *Advances in Water Science and Engineering*, 1(2), 1-18. [In Persian].
- BehyanMotlagh, S., Pajooresh, M., Honarbakhsh, A., & SalehiHafshejani, N. (2018). Assessment performance of HEC-HMS hydrological model for the lumped and semi-distributive watershed (case study: Kohsukhteh Catchment). *Journal of Watershed Management Research*. 9(17), 39-48. doi:10.29252/jwmr.9.17.39. [In Persian].
- Bodhaine, G.L. (1982). Techniques of water resources investigations of the United States geological survey chapter A3: Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods, USGS Publications. 361-614.
- Chu, X., ASCE, A.M. & Steinman, A., (2009). Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135, 119-125. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119).
- Conesa-García, C., & García-Lorenzo, R. (2012). Hydraulic performance and blockage risk assessment of roadway cross-drainage culverts in temporary streams. *Geomorphological Hydraulics Review*, 6(2), 145-162.
- Daneshvar, M.R. & Danaeian, M.R. (2011). Investigating the relationship between design discharge and floodwater spreading area in the Miankoh Staion, Yazd province. *Watershed Engineering and Management*, 3(1), 33-40. doi: 10.22092/ijwmse.2011.101786. [In Persian].
- Fazlola, R., & Aghayee Kahlikbalighi, E. (2024). A Review of Hydrologic Models Used in Rainfall-Runoff Process Simulation, 23rd Iranian Hydraulic Conference, Iran, Kermanshah, 1-13. [In Persian].
- Gautam, D. K., & Holz, P. (2001). Rainfall runoff modeling using adaptive neuro fuzzy system. *Journal of Hydrologic Information*, 3, 3-100.
- Ghermermezcheshmeh, B., Nikchehfrahani, S.O., & Agha-Razi, H. (2019). Effects of Watershed Management Practices on Some of Flood Characteristics Change in Haftan Watershed. *J Watershed Manage Res.* 10(19), 106-116. doi:10.29252/jwmr.10.19.106. [In Persian].
- Harlan, D., Wangsadipura, M., & Munajat, C.M. (2010). Rainfall-runoff modeling of Citarum Hulu river basin by using GR4J. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2(1-5). 1607-1611.
- HeidariChenari, F., Fazloul, R., & NikzadTehrani, E. (2022). Calibration and evaluation of HEC-HMS hydrological model parameters in simulation of single rainfall-runoff events (Case study: Tajan watershed). *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 69-81. doi:10.52547/jwmr.13.26.69. [In Persian].
- Jafari, T. (2012). Flood management instrument methods considering geomorphological capabilities in rural areas: A case study: Fartan village, Asfarin county, *SEPEHR*, 21(82), 27-35. [In Persian].
- Kadam, A.K., Wagh, V.M., Tanpure, P.B., Kanade, R.S., & Umrikar, B.N. (2021). Hydrologic response of an urbanizing watershed to extreme rainfall events using HEC HMS and GIS. *Urban Water Journal*, 18(3), 207-217.
- Karimi, M., Malekinejad, H., Abghari, H., & Azizian, M.S. (2011). Evaluating the methods of flood hydrograph simulation using HEC-HMS software (A case study, Chelgazi watershed). *Iranian Water Research Journal*, 5(2), 29-38. [In Persian].
- Mikaelzadeh, H., Talebi, A., Karimian, A.A., & Mokhtari, A. (2014). Investigating the effect of mechanical watershed management measures on reducing peak flood discharge using the HEC-HMS model, case study: Nahand watershed of East Azerbaijan, 1st National Conference on Sustainable Development of Renewable Natural Resources, October 14, 2014, Hamadan, Iran, 1-10. [In Persian].
- Miller, T., Johnson, K., & Carter, B. (2017). Evaluating the effects of land-use change and flood-control structures on runoff using HEC-HMS in the United States. *Water Resources Systems Engineering*, 14(3), 120-139.
- MirzaeiArjanki, S.Y., Amiri, R., & Chitsazan, M. (2025). Comparison of Artificial Intelligence Models' Superiority to Hydrological Models in Rainfall-Runoff Modeling (Case Study: Khorram-Abad River Basin). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, doi: 10.22125/iwe.2025.555667.1905. -. [In Persian].
- MohammadHassani, E. (2025). Investigating sustainable development in the road freight transportation sector: Challenges and solutions

- in Iran. *Zist Sepehr Student Magazine*, [In Persian].
- Moradi, S., Karimi, A., & Yousefi, H. (2021). Vulnerability assessment of roadway culverts during the 2019 Gorgan Rud flood using GIS. *Journal of Water and Soil Studies*, 29(4), 110-128. [In Persian].
- Moradnezahadi, M., Jourgholami, M., & Malekian, A. (2015). Evaluating the HEC-HMS hydrologic model in order to simulating flood hydrograph in forest basin (Case study: Kheyroud Forest). *Forest and Wood Products*, 68(3), 625-639. doi: 10.22059/jfwp.2015.55594. [In Persian].
- Mostafazadeh, R., Sadoddin, A., Bahremand, A., Sheikh, V., & Nazarnejad, H. (2010). Assessing hydrological effects of Jafar-Abad watershed management project in Golestan province using HEC-HMS model. *Watershed Engineering and Management*, 2(2), 83-93. doi: 20.1001.1.22519300.1389.2.2.3.2 [In Persian].
- Mukherjee, S., Thompson, J., & Walker, D. (2024). Hydrologic hazard assessment for roadway-stream crossings in small forested watersheds: Design discharges and culvert hydraulic capacity under flood risk. *Journal of Hydrologic Infrastructure Engineering*, 9(1), 33-58.
- Noori, M. & Rezaei, M. R. (2024). Application of Environmental Technologies in the Creation of the Pavement of the Sponge Eco-City (Case Study: Shiraz City). *Spatial Planning*, 13(4), 97-114. doi: 10.22108/sppl.2024.139409.1752. [In Persian].
- Rahimzadeh, Z., & Habibi, M. (2018). Simulation of hydrograph of flood with hydrological model HEC-HMS and prediction of return period in Kermanshah Ravansar Basin. *Geography and Development*, 16(53), 175-194. doi: 10.22111/gdij.2018.4186. [In Persian].
- Rashidi, N., Moosavi, V., & Vafakhah, M. (2025). Daily runoff prediction using artificial intelligence models. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 19(70), 73-90. doi: 10.22034.19.70.5. [In Persian].
- Rinsema, J.G. (2014). Comparison of rainfall-runoff models for the Florentine Catchment. University of Tasmania, 1-54
- Shafieekigasari N, Hosseini A O, & Pourghasemi H R. (2024). Spatial Assessment of the Sensitivity of Landslide Occurrence and their Correlation with the Forest Road Network (Case study: Ramsar County). *Journal of Watershed Management Research*, 15(1), 63-77. doi:10.61186/jwmr.15.1.63
- Shafiei, M. & Gharari, S. (2018). A Review on Hydrological Modelling Concepts: Part 1 - Introduction of Modelling Process. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 95-102. doi: 10.22067/jwsd.v4i2.62154.
- Shokri, S., Behnia, A.A., Radmanesh, F., & AkhondAli, A.M. (2012). Watershed flood hydrograph estimation using HEC-HMS and geographic information system (Case study: Idanak watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 3(5), 63-80. [In Persian].
- Soleimani, F., Soltani, S., & Salajegheh, A. (2011). Identification of areas sensitive to flash floods in Jiroft Dam Watershed using the HEC-HMS model. In Proceedings of the 7th National Conference on Watershed Science and Engineering, Isfahan University of Technology. [In Persian].
- Šraj, M., Rusjan, S., & Petkovšek, G. (2023). Lessons from the 2023 extreme flood in Slovenia: Implications for updating design discharges and safety factors in hydraulic structures. *Hydrology and Extreme Events Journal*, 5(3), 200-218.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201-216.
- Vakili, S., & Moghaddamnia, A. (2022). Comparative study of HEC-HMS rainfall-runoff model with different experimental methods of flood estimation. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 16(58), 32-41. doi: 20.1001.1.20089554.1401.16.58.2.3.
- Yazdi, J., Moghaddam, M. S., & Saghafian, B. (2018). Optimal design of check dams in mountainous watersheds for flood mitigation. *Water Resources Management*, 32(14), 4793-4811.
- Yousefi, H., Ahmadi, M., & Soleimani, R. (2020). Hydraulic evaluation of culverts along the Tehran-Firuzkuh corridor under extreme flood events. *Road and Hydraulic Structures Engineering Journal*, 3(2), 90-108. [In Persian].
- Yousefi, H., Golshan, M., & Pirnia, A. (2018). Performance of HEC-HMS hydrological model in simulation of flood hydrograph in arid and humid watersheds. *Journal of Ecohydrology*, 5(1), 319-330. doi: 10.22059/ije.2018.240802.715. [In Persian].
- Zhang, L., Chen, Y., & Wu, H. (2019). Assessing culvert discharge capacity under changing rainfall patterns in urban catchments. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(6), 04019018.