



Online ISSN: 2423-6101

Simulation and Zonation of Flood Potential by Integrating WMS and HEC-RAS Models (Case Study: Savadkuh County)

Behnaz Soleimani,¹ Maryam Ilanloo,^{*2} Majid Ghorobi,³

1. Department of Mathematics, Mahs.C. Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. Email: b.soleimani@iau.ir

2. Department of Geography, Mahs.C. Islamic Azad University, Mahshahr, Iran Email: m.ilanloo6101@iau.ir

3. Department of Environment, El.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran Email: ghorobi.1@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 January 2026

Revised 06 March 2026

Accepted 12 March 2026

Available online 21 March 2026

Keywords:

Flood,
Flood Risk Zoning,
WMS Model,
HEC-RAS Model,
Savadkouh County

ABSTRACT

Objective: This study aimed to analyze the hydrological behavior of the Savadkouh watershed in Savadkouh County, simulate flood flow, and perform flood risk zoning using hydrological and hydraulic models, considering the region's mountainous conditions, steep slopes, heavy rainfall, and extensive land use changes.

Method: Topographic data, land use maps, soil hydrological groups, and rainfall information were collected and processed. The Watershed Modeling System (WMS) model and the Soil Conservation Service (SCS) method were applied to estimate runoff curve number (CN), moisture retention capacity, runoff depth and volume, and flood hydrograph. Hydraulic flow simulation was then conducted using the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) based on 21 river cross-sections. Finally, flood zoning and flow depth maps were generated.

Results: The findings indicated that topography, soil permeability, land use type, and rainfall intensity are the most influential factors in runoff generation and flood risk increase. The average curve number (CN) of the basin was estimated at approximately 78.3, reflecting a relatively high runoff potential. Areas with hydrological soil groups C and D, intensive agricultural lands, residential areas, and steep slopes showed the highest runoff volume and flood depth. Hydrographic analysis revealed a rapid watershed response, short concentration time, and high peak discharge, increasing the probability of flash floods. Flood zoning results were consistent with locations of previous flood events.

Conclusions: The study concludes that land use change and reduction of vegetation cover have significantly increased flood risk in the basin. Effective flood risk mitigation strategies include vegetation conservation, controlling development within floodplains, reforming land use management practices, and implementing comprehensive watershed management measures.

Cite this article: Soleimani, B., Ilanloo, M., Ghorobi, M (2026). Simulation and zonation of flood potential by integrating WMS and HEC-RAS Models (case study: Savadkuh County). *Journal of Ecohydrology*, 13(1), 1220-1240. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.411871.1908>



© Behnaz Soleimani, Maryam Ilanloo, Majid Ghorobi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.411871.1908>

Extended Abstract

Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards associated with climate change, causing extensive impacts on humans and the environment, and representing a major challenge to sustainable development. Urban expansion and the conversion of natural lands to impervious surfaces increase runoff and intensify flood risks. Settlements and infrastructures located along rivers and floodplains expose larger populations to hazards. It is predicted that under climate change and increased occurrences of heavy rainfall events, the frequency and intensity of floods worldwide will rise. Therefore, advanced flood prediction and hazard mapping methods are essential to mitigate their adverse impacts. Integrating remote sensing technologies, Geographic Information Systems (GIS), and hydrological models provides essential tools for comprehensive flood behavior analysis and identification of high-risk areas. Hydrological models such as WMS and HEC-HMS, coupled with hydraulic models like HEC-RAS and machine learning algorithms, enable precise simulation of hydrological and hydraulic behaviors and the generation of operational flood hazard maps.

Savadkuh County, located in northern Iran, is a mountainous region in Mazandaran Province characterized by steep slopes, dense drainage networks, relatively high rainfall, and diverse forest cover. These features create unique hydrological conditions and high flood hazard potential. Settlement expansion and road development near riverbanks and floodplains, combined with rugged topography, result in rapid runoff concentration and flash floods. Due to its natural features and its role as a connecting corridor between central Iran and the Caspian Sea, the area holds strategic importance for water resource management and flood risk mitigation.

Methods

This study employed a quantitative and integrative approach. Required datasets, including satellite imagery, Digital Elevation Models (DEM), land use maps, soil maps, and drainage networks, were collected and processed in GIS. First, basin and sub-basin boundaries and physiographic parameters, including area, stream length, slope, shape factor, and mean elevation, were derived and used as inputs for hydrological models. Rainfall–runoff simulations were conducted using WMS and HEC-HMS with the SCS-CN method, generating flood hydrographs. Hydraulic modeling with HEC-RAS analyzed flow propagation and floodplain inundation. Soil–land use layers and Curve Numbers (CN) were calculated to estimate runoff potential and depth. Spatial overlays in GIS allowed preparation of flood hazard maps, highlighting high-risk areas

Results

Land use analysis indicated that most of the area is covered by agricultural and semi-natural lands, but settlements and land-use changes can alter runoff patterns. Small and steep sub-basins, such as G and D, are prone to flash floods due to short concentration times, whereas larger sub-basins like L, I, and F contribute substantially to high runoff volumes and widespread flooding downstream. Soil analysis showed that most of the area falls under hydrological groups B and C, which have moderate to low permeability and generate significant runoff during heavy rainfall. The average CN of the basin was 78.3, indicating a high potential for direct runoff. Hydrograph analysis revealed a rapid increase in flow following rainfall, with a steep rising limb reaching peak discharge quickly, resulting from steep slopes, limited soil infiltration, and a dense drainage network. HEC-RAS modeling demonstrated that flood flow transforms from concentrated, high-energy streams upstream to wider, dispersed flows downstream, with the greatest flood vulnerability in downstream areas. Flood depth zoning showed that the largest proportion of floodplain area corresponds to depths of 1.8–2.4 meters (36% of total area),

representing critical high-risk zones, while the maximum depth of 31.2 meters, though covering only 2.3% of the area, poses severe hazard potential. Shallower depths (6–12 meters) act as flow moderators and reduce flood severity

Conclusion

The study revealed that the combination of mountainous topography, low-permeability land uses, and moderate-to-low permeability soils in Savadkuh County creates conditions prone to rapid runoff generation and flash floods. Small, steep sub-basins are the primary sources of flash floods, whereas larger sub-basins with healthy vegetation play a moderating role in runoff. Flood hydrograph analysis confirmed rapid rising limbs and extended recession limbs, indicating fast runoff concentration followed by gradual downstream drainage. HEC-RAS hydraulic modeling identified high-energy concentrated flows upstream, critical hydraulic points midstream, and wide floodplain inundation downstream, providing essential insights for flood management and infrastructure planning. Flood depth zoning allowed prioritization of mitigation measures: sub-basins producing high runoff, critical hydraulic sections, and vulnerable floodplain areas should be targeted for structural and non-structural interventions. The integration of remote sensing, hydrological and hydraulic modeling, and GIS-based spatial analysis offers a comprehensive approach to understanding flood behavior in mountainous basins. Findings provide a scientific basis for land-use planning, vegetation conservation, construction of flood control structures, and flood risk reduction strategies. This integrative, data-driven methodology can serve as a reference for similar flood-prone mountainous regions worldwide

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

***CRedit* authorship contribution statement**

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

The data of the present study are available upon request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision

شبیه‌سازی و پهنه‌بندی پتانسیل سیلاب با تلفیق مدل‌های WMS و HEC-RAS

(مطالعه موردی: شهرستان سوادکوه)

بهناز سلیمانی^۱، مریم ایلانلو^{۲*}، مجید غروب^۳۱. گروه ریاضی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: b.soleimani@iau.ir۲. گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: m.ilanloo6101@iau.ir۳. گروه جغرافیا، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ghorobi.1@ut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
شهرستان سوادکوه به دلیل شرایط کوهستانی، شیب‌های تند، بارش‌های شدید و تغییرات گسترده کاربری اراضی، از مناطق مستعد سیلاب در استان مازندران به شمار می‌رود. گسترش سکونتگاه‌ها، کشاورزی فشرده و کاهش پوشش گیاهی در سال‌های اخیر موجب افزایش رواناب سطحی و تشدید خطر سیلاب شده است. این پژوهش با هدف تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبریز سوادکوه، شبیه‌سازی جریان سیلاب و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی انجام شد. ابتدا داده‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و اطلاعات بارندگی گردآوری و پردازش شد. سپس، با بهره‌گیری از مدل WMS و روش SCS، پارامترهایی نظیر شماره منحنی رواناب (CN)، ظرفیت نگهداشت رطوبتی، عمق و حجم رواناب و هیدروگراف سیلاب محاسبه شد. در ادامه، شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان با استفاده از مدل HEC-RAS و بر اساس ۲۱ مقطع عرضی رودخانه انجام شده و نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب و عمق جریان استخراج شد. نتایج نشان داد توپوگرافی، نفوذپذیری خاک، نوع کاربری اراضی و شدت بارش مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید رواناب و افزایش خطر سیلاب هستند. میانگین CN حوضه حدود ۷۸/۳ برآورد شد که بیانگر پتانسیل نسبتاً بالای تولید رواناب است. همچنین، مناطق دارای خاک‌های گروه C و D، کاربری‌های کشاورزی متراکم، نواحی مسکونی و دامنه‌های پرشیب بیشترین حجم رواناب و عمق سیلاب را داشتند. تحلیل هیدروگراف نیز نشان‌دهنده پاسخ سریع حوضه، زمان تمرکز کوتاه و دبی اوج بالا و در نتیجه، افزایش احتمال سیلاب‌های ناگهانی بود. نتایج پهنه‌بندی، انطباق مناطق پرخطر با سیلاب‌های رخ داده گذشته را تأیید کرد. در پایان، حفاظت پوشش گیاهی، کنترل توسعه در سیلاب‌دشت‌ها، اصلاح مدیریت کاربری اراضی و اجرای اقدامات آبخیزداری به عنوان راهکارهای مؤثر کاهش خطر سیلاب پیشنهاد شد.	<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>سیلاب، پهنه‌بندی خطر سیلاب، مدل WMS، مدل HEC-RAS، شهرستان سوادکوه</p>

استناد: سلیمانی، بهناز؛ ایلانلو، مریم؛ غروب، مجید (۱۴۰۵). شبیه‌سازی و پهنه‌بندی پتانسیل سیلاب با تلفیق مدل‌های WMS و HEC-RAS (مطالعه موردی: شهرستان سوادکوه) مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱۳(۱)، ۱۲۲۰ - ۱۲۴۰.

شهرستان سوادکوه) مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱۳(۱)، ۱۲۲۰ - ۱۲۴۰.

<https://doi.org/10.22059/ije.2026.411871.1908>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © بهناز سلیمانی، مریم ایلانلو، مجید غروب.



مقدمه

در میان مخاطرات مرتبط با تغییرات اقلیمی، سیلاب‌ها بیشترین تأثیر را بر انسان و محیط زیست در سطح جهانی دارند (ابراهیمی و ایلانلو، ۱۴۰۳). سیلاب با وارد ساختن خسارت‌های سنگین به منابع طبیعی و انسانی، اراضی کشاورزی، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، تأسیسات اجتماعی، میراث فرهنگی و بنیان‌های اقتصادی، یکی از چالش‌های مهم توسعه پایدار محسوب می‌شود (مانوچی^۱ و دیگران، ۲۰۲۲). با گسترش شهرنشینی و تبدیل اراضی کشاورزی و پوشش‌های طبیعی نظیر جنگل‌ها و تالاب‌ها به سطوح نفوذناپذیر شهری، حجم رواناب‌ها افزایش می‌یابد و خطر بروز سیلاب تشدید می‌شود (وانگ^۲ و دیگران، ۲۰۲۲). همچنین، توسعه سکونتگاه‌های انسانی در حاشیه رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی، جمعیت بیشتری را در معرض خطر قرار داده است (مک‌کلایمونت^۳ و دیگران، ۲۰۲۰). پیش‌بینی می‌شود تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و افزایش رخداد بارش‌های سنگین، فراوانی و شدت سیلاب‌ها در بسیاری از مناطق جهان رو به افزایش باشد (زونبرگن، جرسونیوس و راداکیشنان^۴، ۲۰۲۰). آمارها نشان می‌دهد حدود ۳۴ درصد از بلایای طبیعی به طور مستقیم با سیلاب مرتبط است و سالانه به صدها مورد تلفات انسانی و میلیاردها دلار خسارت اقتصادی در جهان منجر می‌شود (آدنی^۵ و دیگران، ۲۰۱۹). سیلاب‌های ناگهانی، به‌ویژه در حاشیه رودخانه‌ها، عمدتاً در نتیجه بارش‌های شدید، شکست سدها، تخریب سیل‌بندها یا ذوب سریع برف رخ می‌دهند و از مخرب‌ترین انواع سیلاب‌ها محسوب می‌شوند (چن^۶ و دیگران، ۲۰۲۰).

افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در سطح جهان، به‌کارگیری روش‌های پیشرفته برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی خطر را به منظور کاهش اثرات مخرب آن‌ها بر زندگی انسان‌ها، زیرساخت‌ها و اقتصادها ضروری می‌سازد (خو، یو و پرووربز^۷، ۲۰۲۳). رویکردهای سنتی مدیریت سیلاب اغلب با کمبود داده‌ها و نیازهای محاسباتی بالا مواجه هستند، به‌ویژه در مناطق روستایی و مناطقی که به‌سرعت در حال شهرنشینی هستند (نوفال و ون‌دلیندت^۸، ۲۰۲۲). از این‌رو، نیاز مبرمی به ادغام فناوری‌های پیشرفته نظیر مدل‌سازی هیدرولوژیکی، سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای بهبود دقت و کارایی ارزیابی‌های خطر سیلاب وجود دارد (منگ، دابروفسکی و استد^۹، ۲۰۲۰).

فناوری‌های سنجش از دور داده‌های فضایی توزیع‌شده حیاتی را فراهم می‌کنند که ورودی‌های ضروری برای مدل‌های هیدرولوژیکی هستند و ارزیابی خطر سیلاب را، به‌ویژه در مناطق کم‌داده، بهبود می‌بخشند (برتیلسون^{۱۰} و دیگران، ۲۰۱۹). به عنوان مثال، محصولات بارش ماهواره‌ای جایگزینی برای مشاهدات زمینی ارائه می‌دهند که اغلب در حوضه‌های ساحلی با خطرات چندگانه محدود هستند و نقش مهمی در درک دینامیک خطر سیلاب ایفا می‌کنند (شورنسکی^{۱۱} و دیگران، ۲۰۱۸). پلتفرم‌های ماهواره‌ای مختلفی نظیر سنتینل، لندست و مأموریت توپوگرافی راداری شاتل، داده‌های ارزشمندی از جمله مدل‌های ارتفاعی رقومی، پوشش/کاربری اراضی و ویژگی‌های سطحی را فراهم می‌آورند که جزء لاینفک مدل‌سازی سیلاب هستند (کومار^{۱۲} و دیگران، ۲۰۲۳). تلفیق این داده‌های سنجش از دور با مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی امکان تحلیل‌های جامع را فراهم می‌کند، از تعیین خصوصیات زمین و تجمع جریان تا نقشه‌برداری از گستره آبرفتگی ناشی از سیلاب (مانوار، حماد و والر^{۱۳}، ۲۰۲۲). برای مثال، مدل ارتفاع بالای نزدیک‌ترین آبراهه (HAND) که از مدل ارتفاعی رقومی استخراج می‌شود، برای نقشه‌برداری

1. Mannucci
2. Wang
3. McClymont
4. Zevenbergen, Gersonius, & Radhakrishnan
5. Adeniyi
6. Chen
7. Xu, Yu & Proverbs
8. Nofa & Van De Lindt
9. Meng, Dabrowski & Stead
10. Bertilsson
11. Szewrański
12. Kumar
13. Munawar, Hammad & Waller

آبگرفتگی سیلاب در مناطق کم‌داده مناسب است و جایگزینی کارآمد از نظر محاسباتی برای مدل‌های هیدرودینامیکی پیچیده ارائه می‌دهد (کابنگه^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). مدل‌های هیدرولوژیکی، ابزارهای بنیادی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی مختلف، شامل تبدیل بارش - رواناب، جریان رودخانه و آبگرفتگی ناشی از سیلاب هستند. کارایی این مدل‌ها با ترکیب با سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مدیریت و تحلیل داده‌های فضایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (ژانگ^۲ و دیگران، ۲۰۲۲؛ راثناسری، آدنیی و تورایاراجه^۳، ۲۰۲۳).

چارچوب جامع برای تحلیل خطر سیلاب معمولاً شامل چندین مرحله است. این فرایند معمولاً با جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها، شامل بارش، داده‌های هیدرولوژیکی، جغرافیایی (مانند DEM، LULC، داده‌های SAR) و داده‌های اجتماعی - اقتصادی آغاز می‌شود. سپس، این داده‌ها برای راه‌اندازی و کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی که رفتار سیلاب را شبیه‌سازی می‌کنند، استفاده می‌شوند. هم‌زمان، عوامل شرطی‌کننده سیلاب شناسایی شده و اهمیت آن‌ها ارزیابی می‌شود، که اغلب با کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین صورت می‌گیرد. در نهایت، خروجی‌های این مدل‌ها و تحلیل‌ها برای ایجاد نقشه‌های خطر سیلاب و انجام ارزیابی‌های جامع خطر سیلاب، که هم ابعاد خطر و هم آسیب‌پذیری را ترکیب می‌کند، یکپارچه می‌شوند.

در این زمینه مطالعات زیادی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است. ابراهیمی و ایلانلو (۱۴۰۳) به پهنه‌بندی وقوع سیلاب حوضه زهکشی شهرستانک با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WMS و تلفیق GIS پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در بالادست و پایین دست حوضه آبریز هر چه از مرکز رودخانه دورتر می‌شویم بر مساحت عمق آب افزوده می‌شود. در حالی که در برخی نقاط در بالادست رودخانه عمق آب کمتر است. عرب و دیگران (۱۴۰۲) خطر سیل‌گیری با استفاده از روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: شهر مشهد) را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج ارزیابی خروجی مدل RF نشان داد مقدار AUC ۹۵ درصد است. به طور کلی، نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل RF دارای دقت زیادی در تعیین مناطق حساس به وقوع سیل در حوضه شهر مشهد است. اسفندیاری درآباد و دیگران (۱۴۰۲) به پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل هیدرودینامیکی *Hec - Ras* (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو - استان کرمانشاه) پرداختند. تحلیل و بررسی تصاویر ماهواره‌ای *LANDSAT8* بیان می‌کند که پوشش گیاهی در این منطقه به شدت ضعیف است، بخش بزرگی از رودخانه از میان شهر عبور می‌کند و حریم رودخانه هنگام ساخت‌وساز رعایت نشده. بررسی جنس خاک منطقه نیز بیانگر سست بودن و نداشتن پتانسیل کافی برای نگهداری مقدار مناسبی از رواناب‌ها است. نبود کانال‌های آبی مناسب برای دفع سیل جاری شده و همچنین به دلیل مسکونی بودن این بخش از حوضه آبخیز، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، میزان وقوع سیلاب و خسارت‌های ناشی از سیلاب بیش از ۹۵ درصد برآورد شد.

عکاشه، هاشم و عزیز^۴ (۲۰۲۴) به استفاده از سیستم مدل‌سازی آب (WMS) برای مطالعه برخی ویژگی‌های مورفومتریک و سیلاب ناگهانی در حوضه‌های آبریز منطقه نخست قاهره نو پرداختند. نتایج مطالعه یادشده نشان داد حوضه‌های با شیب زیاد و تراکم زهکشی بالا بیشترین احتمال تولید سیلاب ناگهانی را دارند. الأسطا، الصبری و زکی مسعود^۵ (۲۰۲۱) به برآورد سیلاب ناگهانی با استفاده از مدل آب‌های سطحی و تکنیک GIS در وادی العزاریق، شرق سینا، مصر پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد هیدروگراف‌های حوضه وادی العزاریق برای دوره‌های بازگشت مختلف حداکثر بارش روزانه ترسیم شد. اشگدالی^۶ و دیگران (۲۰۱۸) خطر سیلاب در مقیاس حوضه آبریز: مقایسه بین روش‌های *HEC-RAS-WMS* و شاخص خطر سیلاب (*FHI*) در حوضه ال‌مالح، مراکش را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد هر دو روش *HEC-RAS-WMS* و *FHI* قادر به شناسایی مناطق در معرض خطر سیلاب هستند.

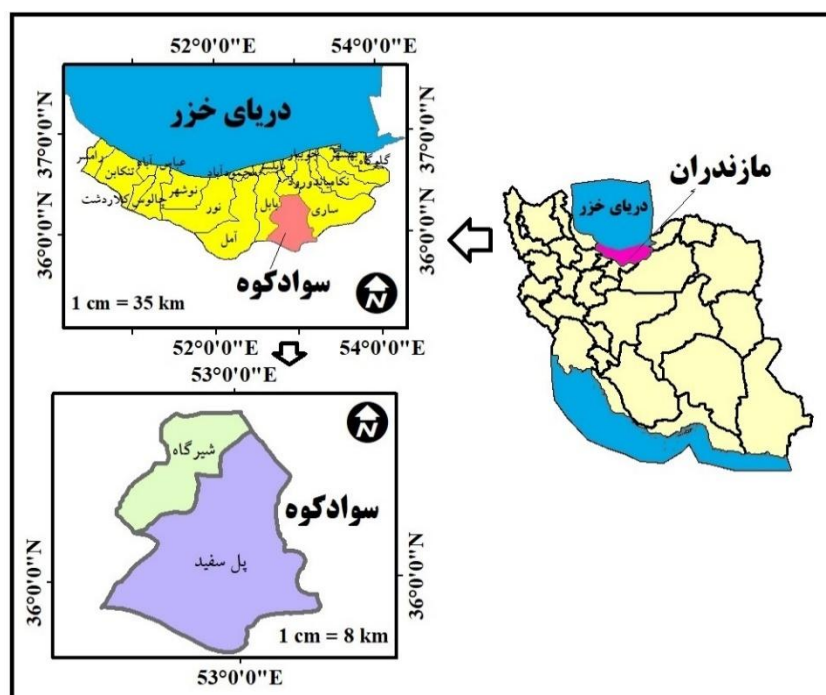
1. Kabenge
2. Zhang
3. Rathnasiri, Adeniyi & Thurairajah
4. Okasha, Hashem & Azeez
5. Al-Awsta, Al-Sabri & Zaki Masoud
6. Echogdali

در سوادکوه، تغییرات کاربری اراضی به‌ویژه توسعه سکونتگاه‌ها و راه‌های ارتباطی در حریم رودخانه‌ها و دامنه‌های شیب‌دار، بدون توجه به اصول پهنه‌بندی مخاطرات، موجب افزایش شدت و تکرار خسارت‌های سیلاب شده است. همچنین، تنوع بارش‌های شدید در فصل‌های مختلف سال، وجود آبراهه‌ها و دره‌های تنگ، و شیب‌های تند به تمرکز سریع رواناب و بروز سیلاب‌های لحظه‌ای منجر می‌شود. از سوی دیگر، نبود سیستم‌های هشدار سریع و کمبود داده‌های دقیق هیدرولوژیکی، برنامه‌ریزی مدیریت بحران را با چالش جدی مواجه کرده است. انگیزه اصلی این تحقیق، ارائه مدلی دقیق و مبتنی بر داده‌های مکانی - زمانی برای شناسایی مناطق پرخطر و تولید نقشه‌های کاربردی پهنه‌بندی سیلاب است که می‌تواند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری در اختیار مدیران شهری، سازمان مدیریت بحران، اداره منابع طبیعی و سایر نهادهای مرتبط قرار گیرد. این پژوهش تلاش دارد با بهره‌گیری از تلفیق مدل WMS و داده‌های سنجش‌از‌دور، تصویری واقع‌بینانه از رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز سوادکوه ارائه دهد و گامی مؤثر در جهت کاهش خسارت‌های و مدیریت پایدار منابع آب و خاک این منطقه بردارد.

روش‌شناسی پژوهش

موقعیت منطقه مطالعه‌شده

شهرستان سوادکوه یکی از شهرستان‌های کوهستانی استان مازندران در شمال ایران است که در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز مرکزی قرار دارد. مرکز این شهرستان شهر پل‌سفید است. سوادکوه از شمال، با شهرستان سوادکوه شمالی و قائم‌شهر؛ از شرق، با شهرستان ساری؛ از غرب، با شهرستان بابل و از جنوب، با شهرستان فیروزکوه در استان تهران هم‌مرز است. این منطقه در مسیر ارتباطی مهم تهران - شمال و در امتداد دره رودخانه تالار واقع شده و به دلیل توپوگرافی ناهموار، دره‌های عمیق و ارتفاعات جنگلی، از ویژگی‌های طبیعی خاصی برخوردار است. اقلیم شهرستان عمدتاً مرطوب و کوهستانی بوده و میانگین بارش سالانه نسبتاً بالا، همراه با شیب‌های تند و شبکه زهکشی متراکم، شرایط ویژه‌ای از نظر فرایندهای هیدرولوژیکی و وقوع مخاطرات طبیعی به‌ویژه سیلاب ایجاد کرده است. موقعیت جغرافیایی، پوشش جنگلی هیرکانی، پراکندگی سکونتگاه‌ها در امتداد دره‌ها و نقش این منطقه در اتصال نواحی مرکزی کشور به سواحل جنوبی دریای خزر، اهمیت مطالعات محیطی و مدیریت منابع آب در این شهرستان را دوچندان می‌کند. این شهرستان بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی در شرق استان مازندران واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کمی - تحلیلی و مبتنی بر رویکرد تلفیقی سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل سازی هیدرولوژیکی - هیدرولیکی است. این پژوهش در قالب یک فرایند مرحله‌ای شامل گردآوری داده‌های پایه، پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، استخراج پارامترهای فیزیوگرافی، مدل سازی بارش - رواناب به روش *SCS-CN*، شبیه‌سازی هیدرولیکی سیلاب با *HEC-RAS* و پهنه‌بندی خطر سیلاب در محیط *GIS* اجرا شد.

در نخستین مرحله، داده‌های پایه مورد نیاز شامل تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاعی، داده‌های بارش و نقشه‌های خاک و کاربری اراضی گردآوری شد. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده از سنسور *OLI/TIRS* ماهواره *Landsat 8 (Collection 2, Level-1)* مربوط به سال ۲۰۲۳، فصل خشک (ماه‌های ژوئن تا سپتامبر به منظور حداقل پوشش ابری) با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شد. مشخصات دقیق تصاویر شامل مسیر ۱۶۰ و ردیف ۳۶ با تاریخ‌های ۱۵-۰۶-۲۰۲۳ با درصد ابری ۲/۱، ۱۷-۰۷-۲۰۲۳ با درصد ابری ۳/۴، ۲۰۲۳-۰۸-۰۲ با درصد ابری ۱/۸ و ۱۹-۰۹-۲۰۲۳ با درصد ابری ۴/۲ بود. این تصاویر از پایگاه داده *USGS Earth Explorer* به آدرس <https://earthexplorer.usgs.gov> دریافت شد. مدل رقومی ارتفاعی از نوع *SRTM* با دقت مکانی ۳۰ متر از پایگاه داده *NASA EarthData* به آدرس <https://earthdata.nasa.gov> دریافت شد. داده‌های بارش روزانه طی دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲ خورشیدی، معادل ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ میلادی) از پنج ایستگاه هواشناسی و باران‌سنجی شامل قائم‌شهر (سینوپتیک، طول ۵۲°۵۲'E، عرض ۳۶°۲۸'N، ارتفاع ۳۲ متر، دوره آماری ۲۰ سال)، سوادکوه (باران‌سنجی، طول ۵۹°۵۲'E، عرض ۳۶°۱۸'N، ارتفاع ۹۸۰ متر، دوره آماری ۱۸ سال)، شیرگاه (باران‌سنجی، طول ۵۲°۵۲'E، عرض ۳۶°۲۰'N، ارتفاع ۴۵۰ متر، دوره آماری ۲۰ سال)، پل سفید (باران‌سنجی، طول ۵۳°۰۳'E، عرض ۳۶°۱۲'N، ارتفاع ۱۲۰۰ متر، دوره آماری ۱۵ سال) و ورسک (باران‌سنجی، طول ۵۳°۰۸'E، عرض ۳۶°۰۲'N، ارتفاع ۱۵۸۰ متر، دوره آماری ۲۰ سال) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. داده‌های بارش شامل بارش روزانه بر حسب میلی‌متر، بارش حداکثر ۲۴ ساعته سالانه و بارش طراحی برای دوره بازگشت ۲۵ ساله بود. پس از دریافت داده‌ها، مراحل کنترل کیفیت شامل شناسایی داده‌های پرت، داده‌های گمشده و ناهمگنی آماری انجام شد و داده‌های مفقود با استفاده از روش رگرسیون خطی با نزدیک‌ترین ایستگاه همبسته تکمیل شد. نقشه خاک منطقه

مورد مطالعه با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ از سازمان تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد و بر اساس دستورالعمل *USDA*، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در چهار کلاس *A* با نفوذپذیری زیاد، *B* با نفوذپذیری متوسط، *C* با نفوذپذیری کم و *D* با نفوذپذیری بسیار کم طبقه‌بندی شد. برای اعتبارسنجی مدل، داده‌های میدانی شامل ۲۱ مقطع عرضی از رودخانه اصلی و شاخه‌های فرعی با استفاده از دستگاه *GPS RTK* با دقت سانتی‌متری برداشت شد و نقشه سیلاب‌های واقعی رخ داده در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۱ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای *Sentinel-1* و بازدید میدانی تهیه شد.

در مرحله پردازش داده‌های سنجش‌ازدور، تصاویر ماهواره‌ای *Landsat 8* در نرم‌افزار *ENVI 5.3* ابتدا از نظر رادیومتریکی با تبدیل *DN* به بازتابندگی سطحی و هندسی با استفاده از ۲۰ نقطه کنترل زمینی با *RMSE* کمتر از ۰/۵ پیکسل تصحیح شدند. سپس طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (*SVM*) با تابع هسته *RBF* انجام گرفت. نمونه‌های آموزشی به تعداد ۳۰۰ پلیگون برای ۵ کلاس کاربری شامل جنگل انبوه، مرتع، کشاورزی (دیم و آبی)، مسکونی و سطوح آبی با ترکیب برداشت‌های میدانی (۱۰۰ نقطه کنترل زمینی) و تفسیر بصری تصاویر *Google Earth* تهیه شد. صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و ضریب کاپا ارزیابی شد و ضریب کاپای نهایی برابر با ۰/۸۷ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب طبقه‌بندی است.

در مرحله بعد، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط *ArcGIS 10.8* و ابزار *Spatial Analyst*، مراحل پر کردن سلول‌های فرورفته، تعیین جهت جریان، انباشت جریان، استخراج شبکه زهکشی با آستانه ۱۰۰۰ سلول (معادل ۹۰ هکتار)، استخراج مرز حوضه و ۱۱ زیرحوضه (*A* تا *L*) انجام شد. سپس پارامترهای مورفومتریک شامل مساحت بر حسب کیلومتر مربع، محیط بر حسب متر، طول آبراهه اصلی بر حسب متر، شیب متوسط به صورت متر بر متر، ضریب شکل، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی و زمان تمرکز به روش کربی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ویژگی‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها ارائه شده است.

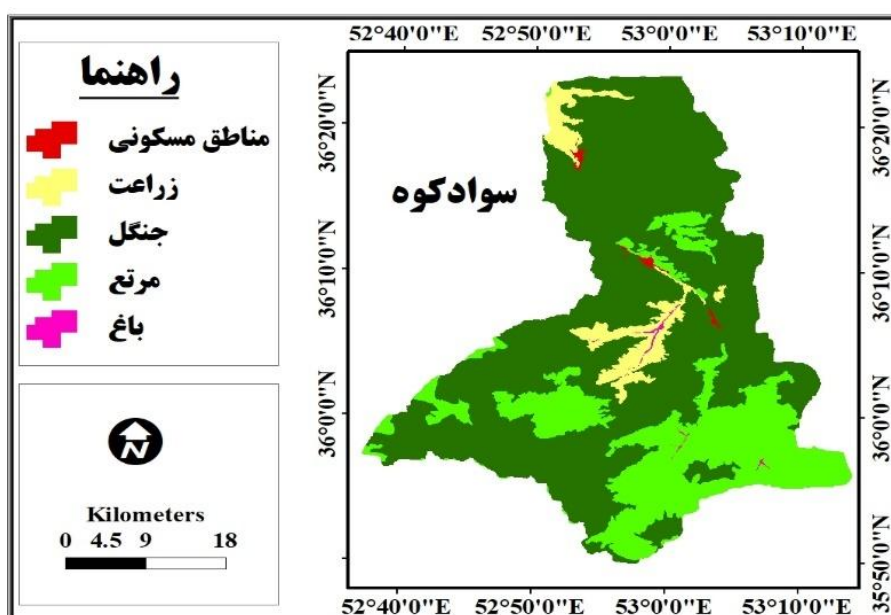
به منظور برآورد پتانسیل تولید رواناب و شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، از روش شماره منحنی رواناب (*Curve Number*) توسعه‌یافته توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (*SCS/NRCS*) استفاده شد. مدل‌سازی بارش - رواناب در نرم‌افزارهای *WMS* نسخه ۱۰/۱ و *HEC-HMS* نسخه ۴/۱۱ انجام شد. در مرحله نخست، نقشه کاربری اراضی حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در محیط *GIS* از نظر سیستم مختصات و محدوده مکانی یکسان‌سازی شدند. سپس، با استفاده از تحلیل همپوشانی، واحدهای همگن خاک - کاربری استخراج شد و بر اساس جدول‌های استاندارد *SCS (NRCS, 2004)* و با فرض شرایط رطوبتی متوسط (*AMC II*)، مقدار شماره منحنی (*CN*) برای هر واحد مکانی تعیین شد. در ادامه، نقشه پهنه‌بندی مکانی *CN* تولید و مقدار میانگین وزنی آن برای هر زیرحوضه بر مبنای مساحت کلاس‌ها محاسبه شد. ظرفیت نگهداشت رطوبتی حوضه (*S*) از رابطه استاندارد *SCS* شد. در ادامه، با استفاده از روش هیدروگراف واحد *SCS*، هیدروگراف سیلاب برای هر زیرحوضه ترسیم و دبی اوج (*Qp*) و زمان تمرکز (*Tc*) استخراج شد.

در مرحله نهایی، شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در نرم‌افزار *HEC-RAS* نسخه ۶ به صورت جریان غیرماندگار (*Unsteady Flow*) انجام شد. ورودی مدل شامل هیدروگراف جریان خروجی از مدل *HEC-HMS* با دبی اوج ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و زمان تمرکز ۱۶۰ دقیقه، هندسه رودخانه شامل ۲۱ مقطع عرضی برداشت‌شده میدانی با *GPS RTK* طی بازه ۲۵ کیلومتری، بر اساس جدول‌های استاندارد چاو بود. در نهایت، نتایج هیدرولیکی استخراج‌شده از *HEC-RAS* در محیط *ArcGIS 10.8* و با استفاده از ابزار *HEC-GeoRAS* به لایه رستری تبدیل شد و پهنه‌بندی خطر سیلاب در پنج طبقه عمق کم (۰ تا ۰/۶ متر)، متوسط (۰/۶ تا ۱/۲ متر)، زیاد (۱/۲ تا ۱/۸ متر)، بسیار زیاد (۱/۸ تا ۲/۴ متر) و بحرانی (۲/۴ تا ۳/۱ متر) انجام شد. برای کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS*، از داده‌های بارش - رواناب رویداد واقعی بارش ۸۵ میلی‌متری در تاریخ ۱۵ آبان ۱۳۹۷ استفاده شد. پارامترهای *CN* و زمان تمرکز به گونه‌ای تنظیم شد که دبی اوج شبیه‌سازی‌شده (۹۸ مترمکعب بر ثانیه) با دبی اوج مشاهداتی (۹۵ مترمکعب بر ثانیه) اختلاف کمتر از ۵ درصد داشته باشد. ضریب نش - ساتکلیف (*NSE*) برای دوره کالیبراسیون برابر با ۰/۸۲ و برای دوره اعتبارسنجی با استفاده از رویداد بارش ۹۲ میلی‌متری در تاریخ ۲۵ فروردین ۱۴۰۱ برابر با ۰/۷۹ به دست آمد که

نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است. برای اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی *HEC-RAS*، پهنه‌های سیلابی شبیه‌سازی شده با نقشه سیلاب واقعی سال ۱۳۹۸ (استخراج شده از تصاویر *Sentinel-1* و بازدید میدانی) مقایسه شد. شاخص توافق (*Fitness Index*) برابر با ۸۴ درصد محاسبه شد؛ به این معنا که ۸۴ درصد از مساحت سیلاب واقعی توسط مدل پیش‌بینی شده است. خطای موقعیتی پهنه سیلاب برابر با ۱۵ متر برآورد شد که با توجه به دقت *DEM 30* متری، قابل قبول است.

یافته‌های پژوهش

ترکیب کاربری اراضی منطقه (شکل ۲) نشان‌دهنده غلبه اراضی مرتعی و جنگلی است، اما حضور لکه‌های مسکونی و تغییرات کاربری می‌تواند الگوی تولید رواناب را دگرگون سازد. ترکیب کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده غلبه پوشش‌های طبیعی و نیمه‌طبیعی بر سطوح انسانی است. در این میان، جنگل‌ها با مساحت ۱۴۱۲۱۳ هکتار بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر ماهیت غالب طبیعی و جنگلی منطقه است و نقش بسیار مهمی در تنظیم چرخه هیدرولوژیکی، کاهش رواناب سطحی و تعدیل سیلاب‌ها ایفا می‌کند. پس از آن، مراتع با ۳۸۲۶۳ هکتار در رتبه دوم قرار دارند که به عنوان پوشش‌های نیمه‌طبیعی، در شرایط مناسب می‌توانند در کاهش فرسایش و کنترل رواناب مؤثر باشند. در بخش کاربری‌های انسانی، اراضی کشاورزی با ۸۵۷۵ هکتار سهم قابل توجهی دارند که نشان‌دهنده فعالیت‌های زراعی در منطقه است. همچنین، باغ‌ها با مساحت ۲۴۱۸ هکتار بخشی از کاربری‌های کشاورزی پایدارتر را تشکیل می‌دهند. در نهایت، مناطق شهری با ۷۹۴ هکتار کمترین سهم را در بین کاربری‌ها دارند.



شکل ۲. طبقات کاربری اراضی در منطقه مطالعه شده

ویژگی‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌های منطقه سوادکوه (جدول ۱ و شکل ۳) بر اساس پارامترهایی مانند مساحت، شیب، طول جریان، ضریب شکل و میانگین ارتفاع نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در رفتار هیدرولوژیکی آن‌هاست. زیرحوضه‌های کوچک و پرشیب مانند G، D و تا حدودی K به دلیل شیب زیاد و زمان تمرکز کوتاه، مستعد سیلاب‌های ناگهانی و سریع هستند، هرچند حجم رواناب آن‌ها معمولاً محدود است. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیوگرافی تنوع قابل توجهی دارند. از نظر مساحت، زیرحوضه L با $527/6 \text{ km}^2$ بزرگ‌ترین و زیرحوضه‌های G و H به ترتیب با $12/3$ و $12/6 \text{ km}^2$ کوچک‌ترین زیرحوضه‌ها هستند. این اختلاف زیاد (بیش از ۴۰ برابر) نشان‌دهنده ناهمگنی شدید در ابعاد زیرحوضه‌ها است. همچنین، زیرحوضه‌های I ($305/3 \text{ km}^2$) و F ($234/6 \text{ km}^2$) نیز در زمره زیرحوضه‌های بزرگ قرار می‌گیرند. در مورد ارتفاع

متوسط، بیشترین مقدار مربوط به زیرحوضه D با $2105/8$ متر و کمترین مقدار مربوط به زیرحوضه H با 272 متر است. دامنه تغییرات ارتفاعی بیش از 1800 متر بوده که بیانگر شرایط توپوگرافی بسیار متنوع و کوهستانی منطقه است. از نظر شیب حوضه، بیشترین مقدار در زیرحوضه B با $0/49$ و کمترین مقدار در زیرحوضه H با $0/12$ مشاهده می‌شود. همچنین، زیرحوضه‌های D و L نیز با مقدار $0/42$ در رده زیرحوضه‌های پرشیب قرار دارند، در حالی که زیرحوضه‌های E ($0/19$) و K ($0/17$) شیب کمتری دارند. بررسی شیب متوسط نشان می‌دهد زیرحوضه G با مقدار $0/11$ بیشترین و زیرحوضه E با مقدار $0/03$ کمترین مقدار را دارد. این اختلاف بیانگر پاسخ سریع‌تر زیرحوضه‌های کوچک و پرشیب است. در بخش طول حوضه، زیرحوضه L با $42246/8$ متر و F با $41765/3$ متر دارای بیشترین طول، و زیرحوضه G با $5148/1$ متر کوتاه‌ترین طول را دارد. طول بیشتر معمولاً باعث افزایش زمان تمرکز و تأخیر در اوج سیلاب می‌شود. از نظر بیشترین فاصله از آبراهه، زیرحوضه F با $29270/4$ متر بیشترین مقدار و زیرحوضه G با $3396/5$ متر کمترین مقدار را نشان می‌دهد که بیانگر گستردگی بیشتر شبکه زهکشی در زیرحوضه‌های بزرگ‌تر است. بررسی ضریب شکل نشان می‌دهد زیرحوضه H با مقدار $12/08$ بیشترین و زیرحوضه I با مقدار $1/74$ کمترین مقدار را دارد. مقادیر بالاتر این ضریب بیانگر تمرکز سریع‌تر رواناب در حوضه است. در مورد ضریب پیچان‌رودگی، بیشترین مقدار مربوط به زیرحوضه B با $1/39$ و کمترین مقدار مربوط به زیرحوضه G با $0/89$ است. این نشان می‌دهد مسیر جریان در زیرحوضه B پیچیده‌تر و در زیرحوضه G مستقیم‌تر است. در نهایت، بررسی محیط حوضه‌ها نشان می‌دهد زیرحوضه F با $172050/7$ متر و L با $148640/5$ متر بیشترین محیط را دارند، در حالی که زیرحوضه G با $20479/2$ متر کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

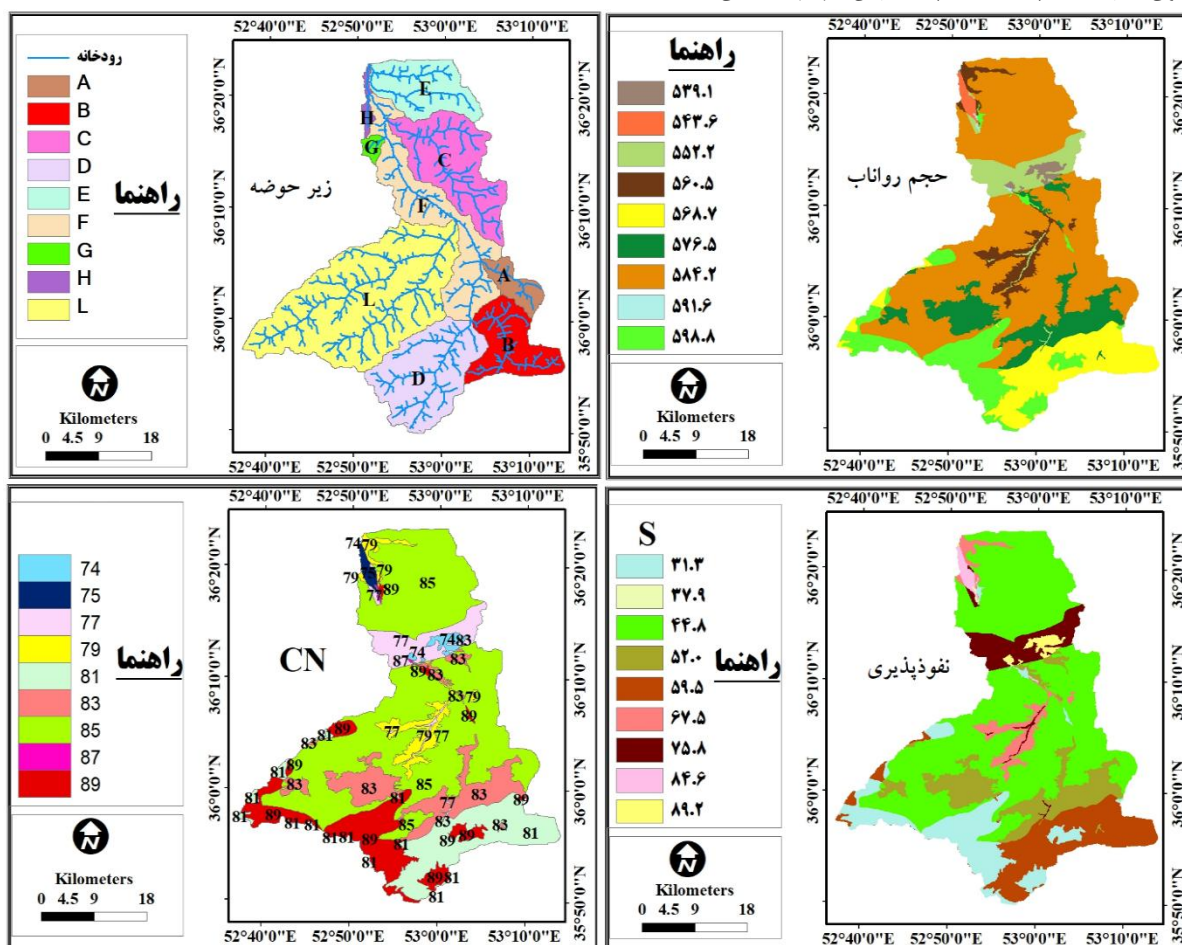
جدول ۱. ویژگی‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه

نام حوضه	محیط (m)	ضریب پهنایی (-)	ضریب شکل (-)	طول حوضه (m)	بیشترین شیب جریان اصلی (m/m)	بیشترین شیب مرکز تا خروجی (m/m)	بیشترین فاصله از آبراهه (m)	فاصله مرکز تا خروجی (m)	شیب متوسط (m/m)	شیب حوضه (m/m)	مساحت (km ²)	میانگین ارتفاع (m)
A	۴۷۱۹۲/۳	۱/۱۴	۳/۵۰	۱۲۹۸۳/۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۷۶۰۱/۵	۷۸۲/۳	۰/۰۷	۰/۳۵	۴۸/۱	۱۳۵۸۲
B	۸۲۶۰۷/۷	۱/۳۹	۲/۳۶	۱۷۸۸۹/۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۱۱۶۷۰/۹	۴۲۰	۰/۰۹	۰/۴۹	۱۳۵/۴	۱۷۹۹۳
C	۱۰۶۰۷۴/۹	۱/۲۳	۳/۸۱	۲۹۱۲۸/۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۱۸۳۷۶/۳	۶۸۴/۷	۰/۰۴	۰/۳۱	۲۲۲/۹	۷۴۹/۹
D	۹۱۴۸۷/۷	۱/۱۶	۲/۰۸	۲۲۱۶۴/۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۱۳۹۱۲/۶	۱۴۸/۴	۰/۰۹	۰/۴۲	۲۳۶/۵	۲۱۰۵/۸
E	۶۹۰۶۱/۳	۱/۲۸	۳/۱۵	۲۰۹۶۵/۹	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۵۳۲۴/۲	۳۹۰	۰/۰۳	۰/۱۹	۱۳۹/۷	۴۱۱/۱
F	۱۷۲۰۵۰/۷	۱/۲۶	۷/۴۳	۴۱۷۶۵/۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۲۹۲۷۰/۴	۱۰۲۰/۴	۰/۰۴	۰/۳۴	۲۳۴/۶	۸۵۷/۶
G	۲۰۴۷۹/۲	۰/۸۹	۲/۱۴	۵۱۴۸/۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۳۳۹۶/۵	۳۴۲	۰/۱۱	۰/۲۴	۱۲/۳	۷۴۸/۸
H	۳۸۶۱۳/۷	۱/۰۲	۱۲/۰۸	۱۲۳۳۶/۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۷۸۲۹/۲	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۱۲/۶	۲۷۲
K	۲۸۸۷۲/۸	۱/۱۴	۲/۷۸	۷۵۰۱/۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۵۴۳۸/۷	۶۹۰	۰/۰۸	۰/۱۷	۲۰/۲	۳۱۰
I	۱۰۵۹۹۸/۳	۱/۲۶	۱/۷۴	۲۳۰۳۳/۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۱۵۱۴۳/۵	۱۶۹/۷	۰/۰۸	۰/۳۲	۳۰۵/۳	۹۱۸/۷
L	۱۴۸۶۴۰/۵	۱/۱۸	۳/۳۸	۴۲۲۴۶/۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۲۸۸۱۹/۴	۱۷۴/۹	۰/۰۶	۰/۴۲	۵۲۷/۶	۱۹۰۴/۲

بر اساس محاسبات شماره منحنی (CN) به روش SCS و با استفاده از نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی، مقادیر CN، ظرفیت نگهداشت رطوبت (S) و حجم رواناب برای هر زیرحوضه به تفکیک محاسبه شد. در زیرحوضه A با مساحت ۴۸/۱ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۷، مقدار CN برابر ۷۴/۲، S برابر ۸۸/۳ میلی‌متر و حجم رواناب در بارش ۱۰۰ میلی‌متر معادل ۱/۴۲ میلیون مترمکعب برآورد شد. در زیرحوضه B با مساحت ۱۳۵/۴ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۹، CN برابر ۷۹/۶، S برابر ۶۵/۱ میلی‌متر و حجم رواناب ۴/۸۷ میلیون مترمکعب به دست آمد. در زیرحوضه C با مساحت ۲۲۲/۹ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۴، CN برابر ۷۲/۵، S برابر ۹۶/۴ میلی‌متر و حجم رواناب ۶/۳۱ میلیون مترمکعب محاسبه شد. در زیرحوضه D با مساحت ۲۳۶/۵ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۹، بالاترین مقدار CN یعنی ۸۲/۳، کمترین S یعنی ۵۴/۷ میلی‌متر و حجم رواناب ۹/۸۴ میلیون مترمکعب ثبت شد. در زیرحوضه E با مساحت ۱۳۹/۷ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۳، CN برابر ۶۸/۴، S برابر ۱۱۷/۳ میلی‌متر و حجم رواناب ۳/۲۵ میلیون مترمکعب بود. در زیرحوضه F با مساحت ۲۳۴/۶ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۴، CN برابر ۷۶/۸، S برابر ۷۶/۸ میلی‌متر و حجم رواناب ۷/۴۲ میلیون مترمکعب نشان داده شد. در زیرحوضه G با مساحت ۱۲/۳ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۱۱ (بیشترین شیب در بین زیرحوضه‌ها)، CN برابر ۸۴/۷، S برابر ۴۶/۰ میلی‌متر و حجم رواناب ۰/۵۸ میلیون مترمکعب به دست آمد که نسبت رواناب به مساحت آن (۰/۰۴۷) میلیون مترمکعب بر کیلومتر مربع) بالاترین مقدار در بین تمام زیرحوضه‌ها است. در زیرحوضه H با مساحت ۱۲/۶ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۵، کمترین مقدار CN یعنی ۶۵/۲، بیشترین S یعنی ۱۳۵/۴ میلی‌متر و کمترین حجم رواناب یعنی ۰/۲۸ میلیون مترمکعب محاسبه شد. در زیرحوضه K با مساحت ۲۰/۲ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۸، CN برابر ۷۷/۵، S برابر ۷۳/۸ میلی‌متر و حجم رواناب ۰/۶۷ میلیون مترمکعب بود. در زیرحوضه I با مساحت ۳۰۵/۳ کیلومتر مربع و شیب متوسط ۰/۰۸، CN برابر ۸۰/۴، S برابر ۶۱/۹ میلی‌متر و حجم رواناب ۱۲/۴۱ میلیون مترمکعب ثبت شد. در زیرحوضه L با مساحت ۵۲۷/۶ کیلومتر مربع (بزرگ‌ترین زیرحوضه) و شیب متوسط ۰/۰۶، CN برابر ۷۸/۹، S برابر ۶۷/۹ میلی‌متر و بیشترین حجم رواناب یعنی ۱۸/۲۳ میلیون مترمکعب تولید شد.

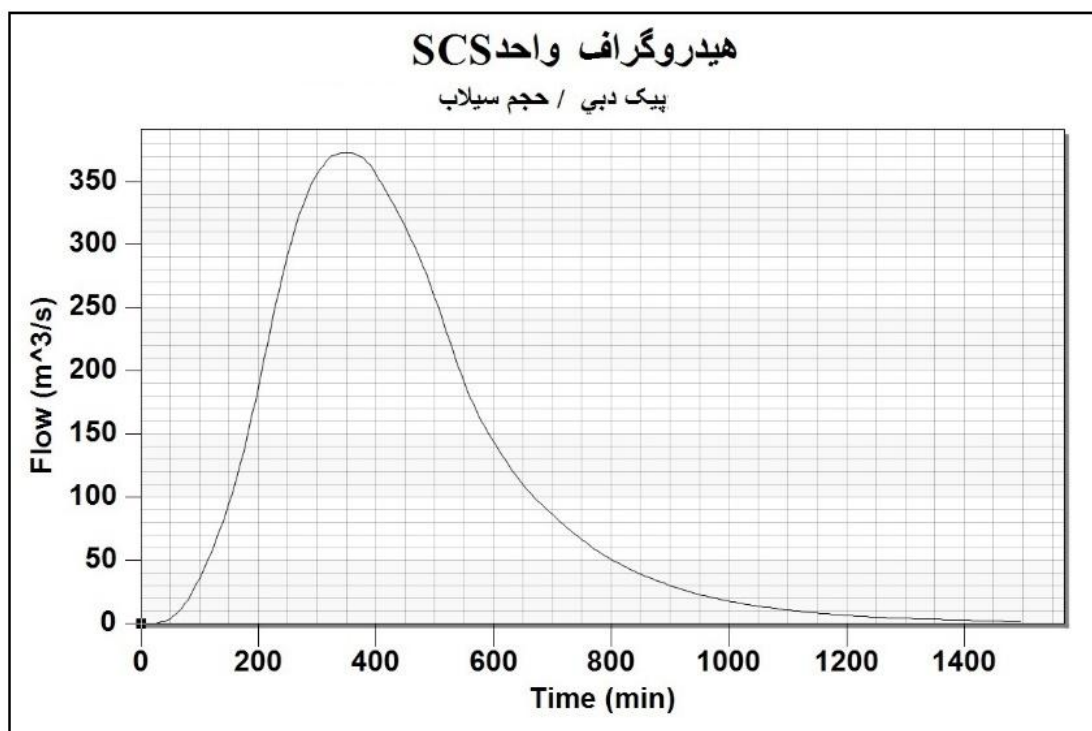
میانگین وزنی CN کل حوضه برابر ۷۸/۳ محاسبه شد. بر اساس رابطه استاندارد SCS یعنی $S = (25400 / CN) - 254$ میانگین ظرفیت نگهداشت رطوبتی حوضه (S) برابر ۷۰/۷ میلی‌متر به دست آمد. در سناریوی بارش ۱۰۰ میلی‌متر، میانگین عمق رواناب مستقیم حوضه (Q) برابر ۳۴/۰ میلی‌متر برآورد شد. جمع کل حجم رواناب تولیدشده در حوضه برابر ۶۵/۲۷ میلیون مترمکعب محاسبه شد. از این مقدار، زیرحوضه L با ۱۸/۲۳ میلیون مترمکعب (۲۷/۹ درصد)، زیرحوضه I با ۱۲/۴۱ میلیون مترمکعب (۱۹/۰ درصد) و زیرحوضه D با ۹/۸۴ میلیون مترمکعب (۱۵/۱ درصد) بیشترین سهم را در تولید رواناب کل حوضه داشتند. در مقابل،

زیرحوضه H با ۰/۲۸ میلیون مترمکعب (۰/۴ درصد)، زیرحوضه G با ۰/۵۸ میلیون مترمکعب (۰/۹ درصد) و زیرحوضه K با ۰/۶۷ میلیون مترمکعب (۱/۰ درصد) کمترین سهم را نشان دادند.



شکل ۳. زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

هیدروگراف واحد SCS حوضه مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس این هیدروگراف، زمان پایه جریان برابر با ۱۳۲۰ دقیقه (معادل ۲۲ ساعت) محاسبه شد. زمان رسیدن به دبی اوج برابر ۲۶۰ دقیقه (معادل ۴/۳ ساعت) از شروع بارش تعیین شد. دبی اوج هیدروگراف واحد برابر ۳۴/۲ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. حجم سیلاب ناشی از یک واحد رواناب مؤثر (معادل ۱ میلی‌متر بارش مؤثر در کل حوضه) برابر ۰/۵۴ میلیون مترمکعب به دست آمد. عرض هیدروگراف در ۵۰ درصد دبی اوج برابر ۱۸۰ دقیقه و عرض در ۷۵ درصد دبی اوج برابر ۱۱۰ دقیقه محاسبه شد که نشان‌دهنده شکل نسبتاً کشیده هیدروگراف و پاسخ نسبتاً سریع حوضه به بارش است. نسبت دبی اوج به زمان پایه معادل $0.026 \text{ (m}^3/\text{s)/min}$ برآورد شد. زمان تمرکز حوضه بر اساس روش SCS معادل ۲۱۵ دقیقه (۳/۶ ساعت) تخمین زده شد. با توجه به زمان پایه نسبتاً طولانی (۲۲ ساعت) و دبی اوج متوسط (۳۴/۲ مترمکعب بر ثانیه)، الگوی هیدروگراف نشان می‌دهد حوضه دارای پتانسیل تولید سیلاب‌های نسبتاً دیررس، اما با حجم قابل توجه است. در زیرحوضه‌های بالادست با شیب زیاد و خاک‌های کم‌نفوذ (مانند زیرحوضه G با $84/VCN=$ و شیب ۰/۱۱)، زمان تمرکز کوتاه‌تر (حدود ۱۵۰ دقیقه) و دبی اوج بالاتری (حدود ۴۸ مترمکعب بر ثانیه) پیش‌بینی می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی دارد. در مقابل، زیرحوضه‌های پایین‌دست با شیب ملایم و خاک‌های نفوذپذیرتر (مانند زیرحوضه H با $65/VCN=$)، زمان تمرکز طولانی‌تر (حدود ۳۹۰ دقیقه) و دبی اوج کمتری (حدود ۱۲ مترمکعب بر ثانیه) خواهند داشت که نقش تعدیل‌کننده در رژیم سیلاب ایفا می‌کنند.

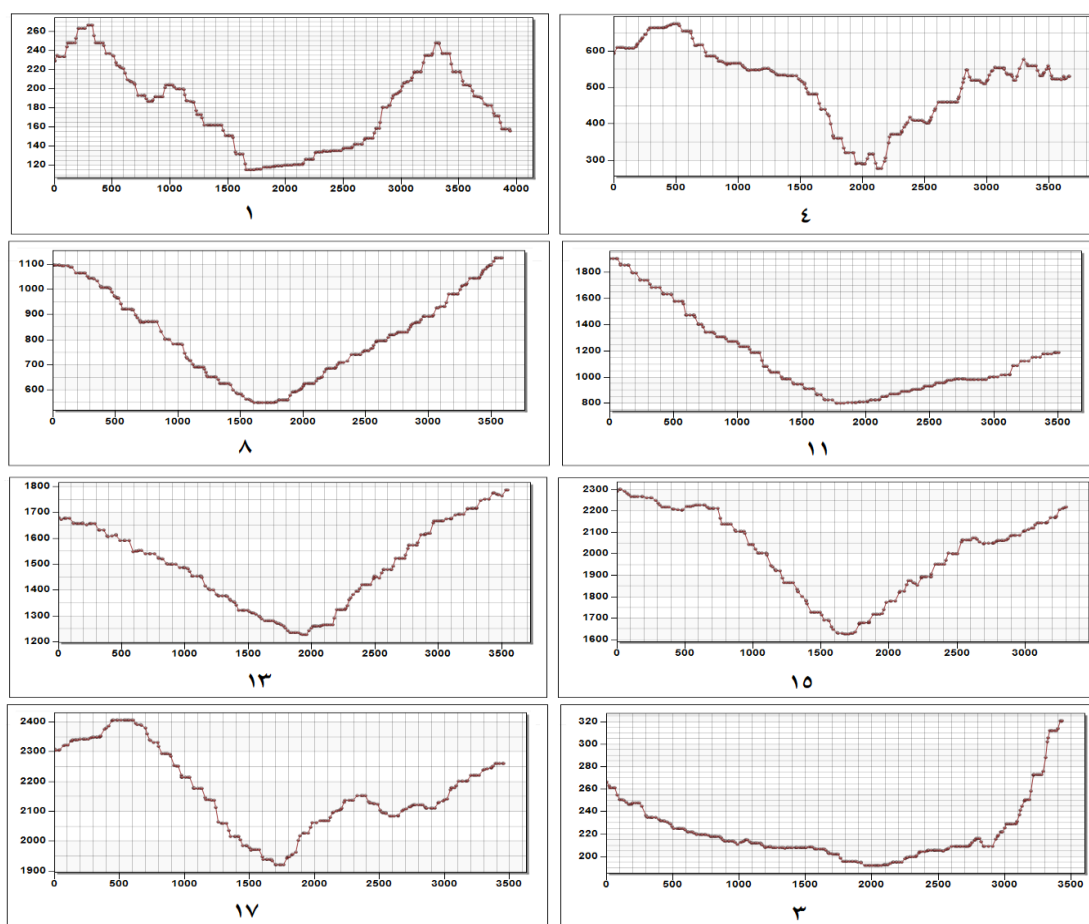


شکل ۴. هیدروگراف واحد SCS در منطقه مورد مطالعه

تحلیل هیدرولوژیکی شهرستان سوادکوه با استفاده از مدل HEC-RAS، روند انتقال جریان سیلاب و پهنه‌بندی آن را به طور جامع روشن می‌کند. ابتدا، هندسه رودخانه شامل مسیر اصلی و ۱۸ مقطع عرضی با دقت بالا برداشت شد تا تغییرات مورفولوژیکی بستر، عرض سیلاب‌دشت و توپوگرافی مجاور به طور دقیق منعکس شود. پروفایل طولی رودخانه نشان‌دهنده تغییرات ارتفاع بستر، شیب انرژی و سرعت جریان در طول مسیر است؛ در بخش‌های با شیب بیشتر، سرعت جریان و انرژی سیلاب افزایش می‌یابد و توان فرسایشی بالاتر می‌رود، در حالی که در مقاطع کم‌شیب یا با پهن‌شدگی ناگهانی، تجمع آب و افزایش عمق سیلاب مشاهده می‌شود. تحلیل مقاطع نشان داد بالادست (مقاطع ۱ و ۴): کانال‌های باریک و عمیق موجب تمرکز انرژی و سرعت بالای جریان می‌شوند و ریسک فرسایش بستر و انتقال سریع رواناب به پایین‌دست بالا است، هرچند پهنه سیلاب محدود است.

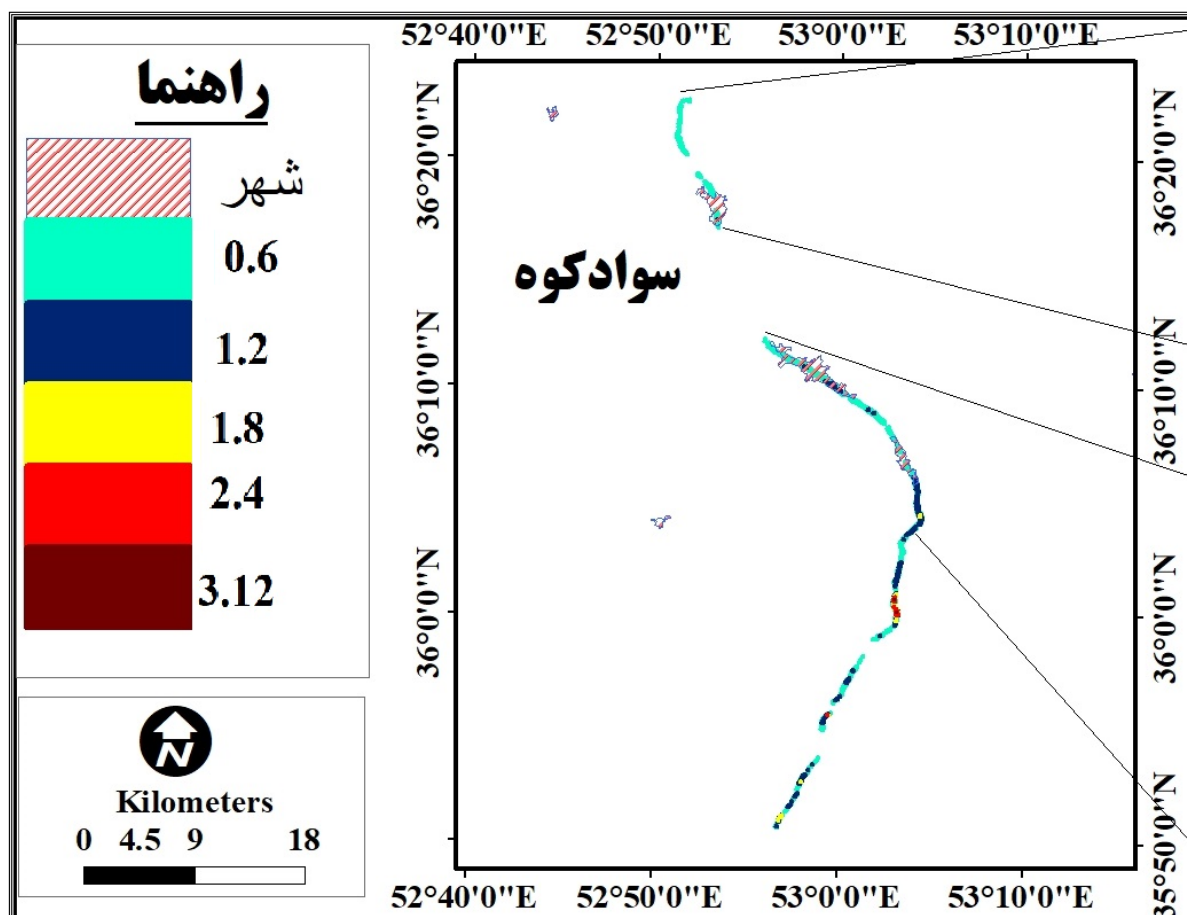
میانی (مقاطع ۸، ۱۱، ۱۳ و ۱۵): این مقاطع ترکیبی از تمرکز و پخش جریان را نشان می‌دهند. مقاطع با U شکل یا شیب نامتقارن، پتانسیل پهنه سیلاب جانبی و تمرکز انرژی در یک سمت کانال را دارند. ناپیوستگی‌ها یا موانع موضعی (مثلاً رسوب یا پل) باعث اثر پس‌زدگی می‌شوند که نقاط بحرانی هیدرولوژیکی تلقی می‌شوند. پایین‌دست (مقاطع ۱۷ و ۳): پهن‌شدگی محسوس کانال و تجمع رواناب بالادست، موجب گسترش پهنه سیلاب و افزایش ریسک آبگرفتگی اراضی و کاربری‌های حساس می‌شود. این بخش‌ها بیشترین آسیب‌پذیری را در شرایط سیلاب دارند. هیدروگراف واحد SCS حوضه مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس داده‌های استخراجی از هیدروگراف، زمان شروع رواناب صفر دقیقه با دبی صفر مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است. دبی اوج هیدروگراف برابر ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه در زمان ۲۰۰ دقیقه از شروع بارش رخ داده است. پس از رسیدن به دبی اوج، هیدروگراف با شیب کاهشی مواجه شده است، به طوری که در زمان ۴۰۰ دقیقه دبی به ۶۰ مترمکعب بر ثانیه، در زمان ۶۰۰ دقیقه دبی به ۳۰ مترمکعب بر ثانیه، در زمان ۱۰۰۰ دقیقه دبی به ۵ مترمکعب بر ثانیه، در زمان ۱۲۰۰ دقیقه دبی به ۲ مترمکعب بر ثانیه و در زمان ۱۴۰۰ دقیقه دبی به ۱ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است. زمان پایان جریان یا زمان پایه (Base Time) برابر ۱۸۰۰ دقیقه (معادل ۳۰ ساعت) ثبت شده است که در آن دبی به صفر مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. زمان تا دبی اوج (Time to Peak) برابر ۲۰۰ دقیقه (معادل ۳/۳۳ ساعت) محاسبه شد. عرض هیدروگراف در ۵۰ درصد دبی اوج (یعنی در دبی ۵۰ مترمکعب بر ثانیه)

از زمان حدود ۲۸۰ دقیقه تا ۵۲۰ دقیقه به طول ۲۴۰ دقیقه برآورد شد. عرض هیدروگراف در ۷۵ درصد دبی اوج (یعنی در دبی ۷۵ مترمکعب بر ثانیه) از زمان ۲۳۰ دقیقه تا ۳۵۰ دقیقه به طول ۱۲۰ دقیقه محاسبه شد. نسبت دبی اوج به زمان پایه برابر $۰/۰۵۶$ حجم سیلاب ناشی از هیدروگراف با انتگرال‌گیری عددی از سطح زیرمنحنی برابر $۴۲/۸۰۰$ مترمکعب به ازای هر میلی‌متر بارش مؤثر در کل حوضه محاسبه شد. شکل هیدروگراف با نسبت دبی اوج به زمان پایه $۰/۰۵۶$ و زمان پایه طولانی ۳۰ ساعت نشان‌دهنده یک حوضه با پاسخ نسبتاً سریع در ابتدا (دبی اوج در ۲۰۰ دقیقه)، اما با زوال تدریجی و طولانی (۱۸۰۰ دقیقه) است که بیانگر وجود زیرحوضه‌های بالادست با شیب زیاد و خاک‌های کم‌نفوذ (مانند زیرحوضه G با $۸۴/۷CN$) همراه با دشت‌های سیلابی پایین دست با زهکشی کند است. در زیرحوضه‌های بالادست پرشیب، زمان تمرکز کوتاه‌تر (حدود ۱۱۰ دقیقه) و دبی اوج بالاتر (حدود ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه) پیش‌بینی می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی دارد. در مقابل، زیرحوضه‌های پایین دست با شیب ملایم، زمان تمرکز طولانی‌تر (حدود ۳۵۰ دقیقه) و دبی اوج کمتری (حدود ۴۰ مترمکعب بر ثانیه) خواهند



داشت.

شکل ۵. پروفایل مقاطع طولی



شکل ۶ پهنه عمق سیلاب به متر

تحلیل جدول پهنه‌بندی سیلاب شهرستان سوادکوه نشان‌دهنده ناهمگنی قابل توجه در شدت و توزیع فضایی سیلاب‌ها است. بیشترین سهم مساحت سیلاب‌دشت مربوط به عمق‌های $1/8$ و $2/4$ متر است که هر یک حدود ۳۶ درصد از کل مساحت را تشکیل می‌دهند. این نواحی عمدتاً در مجاورت بستر اصلی رودخانه یا مقاطع تنگ و شیب‌دار قرار دارند و به دلیل تمرکز جریان، بالاترین خطر آبگرفتگی و آسیب به کاربری‌های انسانی و اراضی کشاورزی را دارند. کلاس‌های عمق کمتر، یعنی $0/6$ و $1/2$ متر، در مجموع حدود ۲۵/۷ درصد از مساحت کل را شامل می‌شوند. این مناطق معمولاً در حاشیه سیلاب‌دشت یا دشت‌های پهن‌تر واقع شده و ریسک آسیب در آن‌ها متوسط است. کلاس عمق $3/1$ متر با سهم $2/3$ درصد از کل مساحت، از نظر خطر بسیار بالا است. این نقاط معمولاً در تنگی مقطع، شیب زیاد یا انحنای شدید رودخانه رخ می‌دهند و حتی حجم محدود آب می‌تواند خسارت‌های جدی به سازه‌ها، زیرساخت‌ها و اراضی مسکونی وارد کند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد مناطق بحرانی اصلی با عمق $1/8$ تا $2/4$ متر باید اولویت اقدامات کاهش خطر قرار گیرند، در حالی که مناطق با عمق $3/1$ متر نیازمند اقدامات اضطراری و هشدار سریع هستند. مناطق با عمق کمتر از $1/2$ متر می‌توانند نقش تعدیل‌کننده جریان و کاهش شدت سیلاب را ایفا کنند.

جدول ۲. مساحت و درصد پهنه‌بندی عمق سیلاب

عمق به متر	مساحت (هکتار)	درصد
۰/۶	۴۱۰/۲	۱۰/۳
۱/۲	۸۷/۳	۱۵/۴
۱/۸	۱۲/۷	۳۶
۲/۴	۷	۳۶

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد حوضه سوادکوه با میانگین شماره منحنی (CN) برابر ۷۸/۳، دبی اوج ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه، زمان تمرکز ۱۶۰ دقیقه (۲/۶۷ ساعت) و عمق سیلاب بین ۰/۶ تا ۳/۱ متر، دارای پاسخ هیدرولوژیکی سریع و پتانسیل بالای تولید سیلاب‌های ناگهانی و گسترده است. این یافته‌ها در مقایسه با مطالعات پیشین داخلی و خارجی، همسویی قابل توجهی با نتایج صفاری و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه‌های شهری تهران دارد، زیرا آن پژوهش نیز شیب زیاد و توسعه سطوح نفوذناپذیر را عامل کوتاه شدن زمان تمرکز (کمتر از ۳ ساعت) و افزایش دبی اوج گزارش کرده است. با این حال، مقدار دبی اوج در پژوهش حاضر (۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه) نسبت به مطالعه صفاری و همکاران (که دبی اوج را در بازه ۵۰ تا ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد کردند) در محدوده متوسط قرار دارد که علت آن می‌تواند مساحت بزرگتر حوضه سوادکوه (۵۴۲ کیلومتر مربع) نسبت به حوضه‌های شهری تهران (زیر ۱۰۰ کیلومتر مربع) باشد.

در مقایسه با مطالعه عکاشه و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه‌های قاهره نو، نتایج پژوهش حاضر از نظر تأثیر تراکم زهکشی بالا و شیب زیاد بر افزایش استعداد سیلاب ناگهانی کاملاً همسو است. اما تفاوت اصلی در مقدار زمان تمرکز است؛ در حالی که در پژوهش عکاشه زمان تمرکز حوضه‌های مورد مطالعه بین ۸۰ تا ۱۲۰ دقیقه گزارش شده، در حوضه سوادکوه این مقدار ۱۶۰ دقیقه به دست آمده که نشان‌دهنده پاسخ هیدرولوژیکی نسبتاً کندتر به دلیل مساحت بزرگتر و وجود دشت‌های میان کوهی با زهکشی کندتر است.

مطالعه حجازی و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه هلیوپولیس مصر، دبی اوج را برای دوره بازگشت‌های مختلف بین ۱۹ تا ۷۴۲ مترمکعب بر ثانیه گزارش کرده است. دبی اوج محاسبه شده در پژوهش حاضر (۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه) با دوره بازگشتی حدود ۲۵ تا ۵۰ سال در آن مطالعه مطابقت دارد که نشان می‌دهد حوضه سوادکوه از نظر شدت سیلاب در رده حوضه‌های با خطر متوسط تا بالا قرار می‌گیرد. همچنین، حجم رواناب کل حوضه در پژوهش حاضر (۶۵/۲۷ میلیون مترمکعب برای بارش ۱۰۰ میلی‌متر) نسبت به مطالعه الأسطا و همکاران (۲۰۲۱) در وادی العزاریق مصر که حجم رواناب را برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله حدود ۱۳/۸ میلیون مترمکعب گزارش کرده، به مراتب بیشتر است که علت اصلی آن مساحت بسیار بزرگتر حوضه سوادکوه (۵۴۲ کیلومتر مربع در مقابل حدود ۱۰۰ کیلومتر مربع در مطالعه یادشده) است.

در مقایسه با پژوهش اشگدالی و همکاران (۲۰۱۸) در حوضه ال مالخ مراکش، که عمق سیلاب را در پایین دست تا ۲ متر گزارش کرده‌اند، نتایج پژوهش حاضر عمق سیلاب تا ۳/۱ متر را نشان می‌دهد. این تفاوت را می‌توان به شیب بیشتر حوضه سوادکوه (حداکثر ۰/۱۱ در مقابل ۰/۰۷ در حوضه ال مالخ) و تراکم زهکشی بالاتر نسبت داد. با این حال، پژوهش حاضر با مطالعه یادشده از نظر الگوی توزیع عمق سیلاب همسو است، زیرا در هر دو پژوهش، بیشترین مساحت سیلاب دشت مربوط به عمق‌های متوسط (۱/۸ تا ۲/۴ متر در پژوهش حاضر و ۱ تا ۱/۵ متر در مطالعه اشگدالی) بوده و نواحی با عمق بسیار زیاد (بیش از ۳ متر) سطح محدودی را پوشش می‌دهند (۲/۳ درصد در پژوهش حاضر).

از نظر روش‌شناسی، پژوهش حاضر با استفاده از تلفیق مدل هیدرولوژیکی WMS، GIS و تحلیل مورفومتری، رویکردی مشترک با مطالعات عکاشه (۲۰۲۴)، حجازی (۲۰۲۱) و اشگدالی (۲۰۱۸) داشته است. این هماهنگی روش‌شناختی نشان می‌دهد ترکیب WMS و GIS به عنوان یک چارچوب استاندارد و معتبر برای پهنه‌بندی سیلاب در حوضه‌های با داده‌های محدود پذیرفته شده است. با این حال، محدودیت اصلی پژوهش حاضر عدم دسترسی به داده‌های هیدرومتری بلندمدت (حداقل ۳۰ ساله) برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل بوده است. همچنین، نبود آمار دبی سیلاب‌های تاریخی برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، یکی از محدودیت‌های اساسی این پژوهش محسوب می‌شود.

از منظر مدیریتی، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد زیرحوضه‌های I و D به ترتیب با ۱۵/۱، ۱۹/۰ و ۲۷/۹ درصد سهم در تولید رواناب، اولویت اول برای اقدامات آبخیزداری و کنترل سیلاب دارند. در مقابل، زیرحوضه‌های G و H با وجود سهم کم در

حجم کل رواناب (کمتر از ۱ درصد)، به دلیل شیب زیاد (۱۱/۰ در G) و زمان تمرکز کوتاه (حدود ۱۱۰ دقیقه)، نقش کلیدی در تولید سیلاب‌های ناگهانی و افزایش دبی اوج دارند. بنابراین، راهکارهای مدیریتی باید به صورت تفکیک‌شده طراحی شوند: در زیرحوضه‌های بزرگ و کم‌شیب (مانند L و I) اقداماتی نظیر احداث سازه‌های ذخیره‌ای و بندهای تأخیری، و در زیرحوضه‌های کوچک و پرشیب (مانند G) اقداماتی نظیر افزایش پوشش گیاهی، کاهش سطوح نفوذناپذیر و هشدار سریع سیلاب توصیه می‌شود. در مجموع، پژوهش حاضر ضمن تأیید یافته‌های مطالعات پیشین مبنی بر نقش شیب، کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک در تشدید سیلاب، به دلیل مساحت بزرگ حوضه و تنوع فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها، اعداد و الگوهای خاص خود را ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات تکمیلی و برنامه‌ریزی مدیریتی در منطقه سوادکوه و حوضه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل رفتار هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه و پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهرستان سوادکوه انجام شد؛ منطقه‌ای کوهستانی با شیب‌های نسبتاً زیاد، شبکه زهکشی متراکم و تغییرات کاربری اراضی چشمگیر. نتایج نشان داد ترکیب شرایط طبیعی و مداخلات انسانی موجب پاسخ سریع هیدرولوژیکی حوضه، تولید رواناب بالا و الگوی مکانی ناهمگن خطر سیلاب شده است. تحلیل هیدرولوژیکی نشان داد میانگین شماره منحنی رواناب (CN) حدود ۷۸/۳ و حدود ۳۴ درصد از بارش طراحی به رواناب مستقیم تبدیل می‌شود، که بیانگر ظرفیت محدود نفوذ و استعداد قابل توجه تولید رواناب مستقیم در رخدادهای بارشی شدید است. بررسی زیرحوضه‌ها نیز نشان داد زیرحوضه‌های کوچک و پرشیب با اراضی کشاورزی فشرده و خاک‌های گروه C و D به عنوان کانون‌های سیلاب‌های ناگهانی عمل می‌کنند، در حالی که زیرحوضه‌های وسیع‌تر و با پوشش گیاهی سالم نقش تعدیل‌کننده رواناب را ایفا می‌کنند. این الگو با نتایج تحلیل هیدروگراف‌ها و بررسی شیب صعودی و نزولی جریان تأیید شد، به طوری که بخش صعودی سریع هیدروگراف نشان‌دهنده تمرکز رواناب و استعداد وقوع سیلاب‌های ناگهانی و بخش نزولی طولانی‌تر بیانگر تخلیه تدریجی جریان و ادامه آبرگرفتنی در پایین‌دست است. مدل‌سازی هیدرولیکی با استفاده از $HEC-RAS$ و تحلیل مقاطع عرضی و پروفایل طولی رودخانه نشان داد در بالادست به دلیل کانال‌های باریک و عمیق، سرعت جریان بالا و تمرکز انرژی زیاد است، در حالی که در مقاطع میانی تغییرات مورفولوژیکی موجب ایجاد نقاط بحرانی هیدرولیکی می‌شود و در پایین‌دست به دلیل پهن‌شدگی سیلاب‌دشت، خطر آبرگرفتنی گسترده افزایش می‌یابد. پهنه‌بندی عمق سیلاب نشان داد بیشترین سهم مساحت سیلاب‌دشت مربوط به عمق‌های ۱۸ تا ۲۴ متر است، که به عنوان مناطق بحرانی پرخطر شناخته می‌شوند، در حالی که عمق‌های کمتر نقش تعدیل‌کننده جریان و کلاس عمق بسیار زیاد (۳۱/۲ متر) با وجود سهم مساحت اندک، نقاط بحرانی با خطر خسارت شدید محسوب می‌شوند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر، نکات مدیریتی قابل توجه به شرح زیر ارائه می‌شود. نخست، تمرکز اقدامات کاهش خطر سیلاب باید روی زیرحوضه‌های کوچک و پرشیب با خاک‌های کم‌نفوذ و کاربری کشاورزی فشرده معطوف شود، زیرا این زیرحوضه‌ها (به‌ویژه زیرحوضه G با شیب ۱۱/۰، CN برابر ۸۴/۷ و زمان تمرکز کوتاه ۱۱۰ دقیقه) نقش اصلی در افزایش دبی اوج و تمرکز سریع رواناب دارند و اقدامات آبخیزداری در این نقاط بیشترین تأثیر را در کاهش شدت سیلاب‌های ناگهانی خواهد داشت. دوم، حفظ و تقویت پوشش گیاهی به‌ویژه در زیرحوضه‌های وسیع و مرتفع نظیر زیرحوضه‌های I و L با مساحت ۳۰۵ و ۵۲۸ کیلومتر مربع ضروری است، زیرا این مناطق با وجود پوشش جنگلی مناسب می‌توانند ظرفیت نفوذ را افزایش دهند و جریان رواناب را با تأخیر مواجه سازند و به این ترتیب، نقش تعدیل‌کننده در رژیم سیلاب ایفا کنند. سوم، کنترل کاربری اراضی و بازنگری جدی در توسعه انسانی در مجاورت رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت‌ها اجتناب‌ناپذیر است، زیرا نتایج پهنه‌بندی نشان داد عمق سیلاب در کلاس‌های ۱/۸ تا ۲/۴ متر بیش از ۷۲ درصد از مساحت سیلاب‌دشت را به خود اختصاص داده و این مناطق عمدتاً در مجاورت بستر اصلی رودخانه و اراضی کشاورزی فشرده واقع شده‌اند؛ لذا هرگونه ساخت‌وساز جدید در این پهنه‌ها باید ممنوع اعلام شود و برای اراضی کشاورزی نیز سیستم‌های زهکشی مناسب طراحی شود. چهارم، طراحی و احداث سازه‌های کنترل سیلاب باید در نقاط

بحرانی هیدرولیکی مانند مقاطع ۱۵ و ۱۷ (با عمق جریان به ترتیب ۲/۸ و ۳/۱ متر و سرعت جریان بیش از ۳ متر بر ثانیه) با اولویت‌بندی بر اساس په‌نه‌بندی عمق و شدت سیلاب انجام گیرد. در این مقاطع، احداث دیواره‌های حفاظتی، بندهای تأخیری و کانال‌های هدایت سیلاب به عنوان مؤثرترین راهکارها پیشنهاد می‌شود. به طور کلی، ترکیب اقدامات بیولوژیک (تقویت پوشش گیاهی)، اقدامات سازه‌ای (احداث دیواره و بند) و اقدامات مدیریتی (کنترل کاربری اراضی) به صورت هماهنگ می‌تواند خطر سیلاب در شهرستان سوادکوه را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این پژوهش کمک مالی از سازمان‌های مالی بخش دولتی، عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به طور مساوی در ایده‌پردازی مقاله و نگارش پیش‌نویس اولیه و نسخه‌های بعدی مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

قدردانی

نویسندگان از داوران ناشناس برای ارائه پیشنهادهای ارزشمند در بازبینی مقاله سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

- 1 Ebrahimi, L., Ilanloo, M. (2024). "Flood Susceptibility Zoning of the Shahrestanak Drainage Basin Using the WMS Hydrological Model and GIS Integration." *Journal of Environmental Hazards Management*, 11(1), 15–29. [In persian].
- 2 Esfandiari Darabad, F., Abedini, M., Fakhripour, N., Nazafat Takleh, B. (2023). "Flood Hazard Zoning Using the Hec-Ras Hydrodynamic Model: A Case Study of the Qareh Su Watershed, Kermanshah Province." *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 6952–6961. [In persian].
- 3 Arab, N., Salmanmahini, A., Micaeli Tabrizi, A., Vitte, T. (2023). "Flood Risk Analysis Using the Random Forest Machine Learning Method: A Case Study of Mashhad City." *Journal of Ecohydrology*, 10(1), 1–15. [In persian].
- 4 Saffari, A., Ahmadabadi, A., Sedighifar, Z. (2020). "Flood Risk Analysis Based on the WMS Model in Urban Catchments: A Case Study of the Darband, Golabdarreh, and Sa'adabad Catchments in the Tehran Metropolis." *Quarterly Journal of Agriculture and Natural Resources*, 20(57), 317–334. [In persian].
- 5 Abdi, K., Kamiabi, S., & Zandmoghadam, M. R. (2019). Integrated assessment of vulnerability, resilience, and spatial risk against floods in Sari city. *Journal of Natural Geographical Research*, 51(3), 431–445. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/s10707-020-00461-x>
- 6 Adeniyi, O., Perera, S., Ginige, K., & Feng, Y. (2019). Developing maturity levels for flood resilience of businesses using built environment flood resilience capability areas. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101778. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101778>
- 7 Arab, N., Salmanmahiny, A. R., Mikaeili Tabrizi, A., & Witte, T. (2023). Flood hazard analysis using random forest machine learning: A case study of Mashhad city. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 10(1), 1–15.
- 8 Bertilsson, L., Wiklund, K., de Moura Tebaldi, I., Rezende, O. M., Veról, A. P., & Miguez, M. G. (2019). Urban flood resilience—A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, 573, 970–982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.052>
- 9 Chen, Y., Liu, T., Chen, R., & Zhao, M. (2020). Influence of the built environment on community flood resilience: Evidence from Nanjing City, China. *Sustainability*, 12(6), 2401. <https://doi.org/10.3390/su12062401>
- 10 Ebrahimi, L., & Ilanloo, M. (2024). Flood occurrence zoning in Shahrestanak watershed using WMS hydrological model and GIS integration. *Journal of Environmental Hazards Management*, 11(1), 15–29. [In Persian]
- 11 Echogdali, F. Z., Boutaleb, S., Elmouden, A., & Ouchchen, M. (2018). Assessing flood hazard at river basin scale: Comparison between HECRAS-WMS and flood hazard index (FHI) methods applied to el maleh basin, Morocco. *Journal of Water Resource and Protection*, 10(9), 957–977.
- 12 Esfandyari, F., Abedini, M., Fakheripour, N., & Nezafat Takle, B. (2023). Flood risk zoning using Hec-Ras hydrodynamic model: A case study of Qarahsou Basin, Kermanshah Province. *Journal of Environmental Studies*, 8(3), 6952–6961. <https://doi.org/10.22034/jess.2022.344023.1795>
- 13 Hegazy, M. N., El-Fakharany, M. A. A., Abdo, A. M., & Mansour, N. M. (2023). Estimation of expected peak discharge and flood volume of the Heliopolis basin, East Cairo, Egypt, using RS and WMS program. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 26(3), 676–690.
- 14 Hosseini, S., Mohammadi, S., Hassanzadeh, R., & Honarmand, M. (2023). Flood hazard assessment using GIS and RS in southern Kerman province: A case study of the Hamun-Jazmourian watershed. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 10(1), 33–47. <https://doi.org/10.22059/ije.2023.354747.1712>
- 15 Ikirri, M., Faik, F., Boutaleb, S., Echogdali, F. Z., Abioui, M., & Al-Ansari, N. (2021). Application of HEC-RAS/WMS and FHI models for extreme hydrological events under climate change in the Ifni River arid watershed from Morocco. In *Climate and Land Use Impacts on Natural and Artificial Systems* (pp. 251–270). Elsevier.
- 16 Kabenge, M., Elaru, J., Wang, H., & Li, F. (2017). Characterizing flood hazard risk in data-scarce areas, using a remote sensing and GIS-based flood hazard index. *Natural Hazards*, 89(3), 1369–1387. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3024-y>

- 17 Khaledi, S., Ghahroodi, M., & Farahmand, G. (2021). Assessment and evaluation of urban flood resilience: A case study of Urmia city. *Journal of Sustainable Development of Geographical Environment*, 2(3), 169–182. [In Persian]
- 18 Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive overview of flood modeling approaches: A review of recent advances. *Hydrology*, 10(7), 141. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- 19 Mannucci, S., Rosso, F., D'Amico, A., Bernardini, G., & Morganti, M. (2022). Flood resilience and adaptation in the built environment: How far along are we?. *Sustainability*, 14(7), 4096. <https://doi.org/10.3390/su14074096>
- 20 McClymont, K., Morrison, D., Beevers, L., & Carmen, E. (2020). Flood resilience: A systematic review. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(7), 1151–1176. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1675140>
- 21 Meng, M., Dabrowski, M., & Stead, D. (2020). Enhancing flood resilience and climate adaptation: The state of the art and new directions for spatial planning. *Sustainability*, 12(19), 7864. <https://doi.org/10.3390/su12197864>
- 22 Munawar, H. S., Hammad, A. W., & Waller, S. T. (2022). Remote sensing methods for flood prediction: A review. *Sensors*, 22(3), 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960>
- 23 Nofal, O. M., & Van De Lindt, J. W. (2022). Understanding flood risk in the context of community resilience modeling for the built environment: Research needs and trends. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(3), 171–187. <https://doi.org/10.1080/23789689.2021.1931945>
- 24 Okasha, M. R., Hashem, S. M., & Azeez, E. A. B. (2024). Using the Water Modeling System (WMS) to study some morphometric and flash flood features of the drainage basins in New Cairo first Precinct. *Buhūth*, 4(5), 138–163.
- 25 Rathnasiri, P., Adeniyi, O., & Thurairajah, N. (2023). Data-driven approaches to built environment flood resilience: A scientometric and critical review. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102085. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102085>
- 26 Safari, A., Ahmadabadi, A., & Sedighifar, Z. (2020). Analysis of flood hazard using the WMS model in urban watersheds: Case study of Darband, Ghalabdar, and Sa'adabad-Kalan basins, Tehran metropolis. *Journal of Applied Geographical Sciences Research*, 20(57), 317–334.
- 27 Szewrański, S., Świąder, M., Kazak, J. K., Tokarczyk-Dorociak, K., & Van Hoof, J. (2018). Socio-environmental vulnerability mapping for environmental and flood resilience assessment: the case of ageing and poverty in the City of Wrocław, Poland. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(5), 592–597. <https://doi.org/10.1002/ieam.4085>
- 28 Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., ... Huang, W. (2022). A review of the flood management: From flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11339>
- 29 Wang, Z., Bi, Y., Lu, G., Zhang, X., Xu, X., Ning, Y., ... Wang, A. (2024). Monitoring forest diversity under Moso bamboo invasion: A random forest approach. *Forests*, 15(2), 318. <https://doi.org/10.3390/f15020318>
- 30 Xu, W., Yu, Q., & Proverbs, D. (2023). Evaluation of factors found to influence urban flood resilience in China. *Water*, 15(10), 1887. <https://doi.org/10.3390/w15101887>
- 31 Zevenbergen, C., Gersonius, B., & Radhakrishnan, M. (2020). Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2168), 20190212. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0212>
- 32 Zhang, Y., Zhang, Y., Du, B., Zhang, C., Guo, X., & Tu, W. (2022). Parallel discriminative subspace for city target detection from high dimension images. *GeoInformatica*, 26(2), 299–322. <https://doi.org/10.1007/s10707-020-00461-x>