



Numerical Assessment of the Impact of Kani Goozhan and Chouman Dams on Floodplain Mapping and Flood Hazard in the Chouman Watershed

Kiyoumars Roushangar^{1✉} | Faezeh Shabani² | Aydin Panahi³ | Javad Taherpour⁴

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: roshangari@tabrizu.ac.ir
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran. E-mail: faezeshabani1997@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: aydinpanahi@tabrizu.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: jtaherpour@outlook.com

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 4, 2026

Revised: Feb. 11, 2026

Accepted: Apr. 16, 2026

Published online: April. 2026

Keywords:

Remote Sensing,
HEC-HMS,
HEC-RAS,
Risk Management.

Floods are among the most destructive natural hazards, and accurate flood hazard zoning plays a crucial role in reducing human and economic losses. In this study, a combined approach based on remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and numerical modeling was used to identify and map flood-prone areas in the Chouman watershed, located between the upstream Kani Goozhan Dam and the downstream Chouman Dam. Land-use maps were extracted and used to determine the runoff curve number in the HEC-HMS hydrological model and Manning roughness coefficients in the two-dimensional HEC-RAS hydraulic model. Based on rainfall data from the Baneh station, flood hydrographs were generated for different return periods. The results showed that, for the 200-year return period flood, the peak discharge decreased from about 420 to 210 cubic meters per second, and the Kani Goozhan Dam caused about a 50% reduction in flood magnitude and a delay of approximately 4.5 hours in the peak flow time. Downstream, the maximum flow velocity at critical locations reached about 19 meters per second, which was reduced to nearly 13 meters per second through the simultaneous operation of the spillway and two bottom outlets. From an innovation perspective, this study integrates multi-source RS data, a digital elevation model, and coupled hydrological-hydraulic modeling within a GIS environment to not only delineate high-risk flood zones, but also, for the first time, to quantify the impact of two cascade dams on peak discharge, flood timing, and flood hazard patterns in a data-scarce mountainous basin.

Cite this article: Roushangar, K., Shabani, F., Panahi, A., & Taherpour, J. (2026). Numerical Assessment of the Impact of Kani Goozhan and Chouman Dams on Floodplain Mapping and Flood Hazard in the Chouman Watershed., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 409-430. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408826.670078>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408826.670078>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Floods represent one of the most devastating natural hazards, posing severe threats to human lives and infrastructure, particularly in mountainous regions where data scarcity complicates accurate risk assessment. Effective floodplain delineation is vital for informed flood risk management and mitigation strategies. In areas with limited ground-based observations, integrating remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) with advanced numerical modeling provides a robust alternative for generating reliable hazard maps. This approach leverages satellite-derived datasets to supply essential inputs, such as high-resolution land cover and topographic information, for hydrological and hydraulic simulations. The present investigation centers on the Chouman Watershed in Kurdistan Province, Iran, situated between the upstream Kani Goozhan Dam and the downstream Chouman Dam. The core objective is to evaluate the dams' influence on flood routing characteristics while delineating vulnerable zones in the inter-reservoir reach, thereby supporting enhanced decision-making in flood-prone rural settings.

Method

Encompassing roughly 860 km² of predominantly rugged terrain, the study area required spatially detailed inputs to overcome observational constraints. High-resolution (10 m) land use classification from the ESRI global dataset was employed to estimate runoff curve numbers (CN) via the Soil Conservation Service (SCS) methodology in hydrological modeling, alongside distributed Manning's roughness values for hydraulic computations. The ALOS digital elevation model (30 m resolution) facilitated basin delineation and reservoir geometry extraction. Intensity-duration-frequency relationships were derived from long-term records at the nearby Baneh synoptic station. Hydrological simulations were conducted using HEC-HMS v4.8, partitioning the watershed into 77 sub-basins and incorporating storage routing for the dams under multiple release scenarios. Two-dimensional unsteady hydraulic modeling in HEC-RAS v6.1 solved the shallow water equations, applying outflow hydrographs from HEC-HMS as upstream boundaries. Model calibration and validation utilized statistical frequency analysis (including log-Pearson Type III distributions) of available hydrometric data. Post-processing in ArcGIS yielded detailed inundation extents for return periods of 25, 50, 100, and 200 years.

Results

Validation efforts indicated strong model performance, with peak flow discrepancies typically under 20%. Key findings underscored the substantial attenuating effect of the upstream Kani Goozhan reservoir: for the 200-year event, peak outflows dropped markedly by around 50% (420 to 210 m³/s), accompanied by a notable 4.5-hour lag in hydrograph timing. Downstream hydraulic analyses showed peak velocities reaching 19 m/s in unregulated conditions, but manageable to approximately 13 m/s—or lower through phased releases—via coordinated spillway and bottom outlet activation. Reservoir levels at the Chouman Dam fluctuated between 30 and 40 m across simulated events, affording extended response windows. Inundation mapping exposed several rural communities positioned directly within high-hazard zones during extreme floods, emphasizing elevated vulnerability along the river corridor.

Conclusions

By fusing remote sensing products (including ESRI land cover and ALOS topography) with coupled HEC-HMS and 2D HEC-RAS frameworks, this work establishes a practical, resource-efficient pipeline for flood hazard delineation in challenging, data-poor terrains. The tandem dam system proves instrumental in moderating flood peaks, curtailing velocities, and prolonging lead times for evacuation and intervention, ultimately bolstering community resilience. The resulting hazard maps furnish actionable insights for synchronized reservoir operations, early warning infrastructure, and targeted protective measures in exposed settlements. This integrated methodology holds broad applicability for sustainable water resource stewardship and disaster preparedness in comparable mountainous contexts.

Funding

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

Authorship contribution

Kiomars Roshangar: Project management, study design, and result interpretation. Faezeh Shabani: Methodology development, data analysis, and result interpretation. Aydin Panahi: Data collection, and manuscript drafting and manuscript review. Javad Taherpour: Methodology development, data analysis, and result interpretation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the authors used ChatGPT in order to rewrite and edit the Persian and English text. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

Data used in this study are available from the corresponding author upon request.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی عددی تأثیر سدهای کانی گوژان و چومان بر پهنه‌بندی سیلاب و مخاطره سیلابی در حوضه آبریز چومان

کیومرث روشننگر^۱ | فائزه شبانی^۲ | آیدین پناهی^۳ | جواد طاهرپور^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه:

roshangari@tabrizu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه:

faezehshabani1997@gmail.com۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: aydinpanahi@tabrizu.ac.ir۴. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: jtaherpour@outlook.com

چکیده

اطلاعات مقاله

سیلاب‌ها از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند و پهنه‌بندی دقیق مخاطره سیلاب، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش خسارات جانی و مالی دارد. در بسیاری از حوضه‌های کوهستانی ایران، کمبود داده‌های هیدرومتری و محدودیت مطالعات میدانی، مدل‌سازی و ارزیابی خطر سیلاب را با چالش مواجه کرده است. در این پژوهش، از رویکرد ترکیبی سنجش‌ازدور (RS)، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌سازی عددی برای شناسایی و نقشه‌برداری مناطق مستعد سیلاب در حوضه آبریز چومان، واقع بین سد کانی‌گوژان (بالادست) و سد چومان (پایین‌دست) استفاده شد. نقشه‌های کاربری اراضی استخراج و برای تعیین شماره منحنی رواناب در مدل هیدرولوژیکی (HEC-HMS) و ضرایب مانینگ در مدل هیدرولیکی دوبعدی (HEC-RAS 2D) به کار رفتند. بر اساس داده‌های بارش ایستگاه بانه، هیدروگراف‌های سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف تولید گردید. نتایج نشان داد که در سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله، دبی اوج از حدود ۴۲۰ به ۲۱۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته و سد کانی‌گوژان موجب کاهش ۵۰ درصدی شدت سیلاب و تأخیر حدود ۴/۵ ساعته در زمان اوج سیلاب شده است. در پایین‌دست، بیشینه سرعت جریان در نقاط بحرانی تا حدود ۱۹ متر بر ثانیه مشاهده شد که با بهره‌برداری هم‌زمان از سرریز و دو تخلیه‌کننده تحتانی، به حدود ۱۳ متر بر ثانیه کاهش یافت. از منظر نوآوری، این پژوهش با ادغام داده‌های سنجش‌ازدور، مدل رقومی ارتفاع و مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی در محیط GIS، نه تنها پهنه‌های پرخطر را شناسایی می‌کند، بلکه برای نخستین بار تأثیر دو سد متوالی را بر دبی اوج، زمان‌بندی سیلاب و الگوی پهنه‌بندی خطر در یک حوضه کوهستانی کم‌داده کمی‌سازی می‌نماید.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

سنجش‌ازدور،

HEC-HMS،

HEC-RAS،

مدیریت ریسک

استناد: روشننگر، کیومرث؛ شبانی، فائزه؛ پناهی، آیدین و طاهرپور، جواد (۱۴۰۵) ارزیابی عددی تأثیر سدهای کانی‌گوژان و چومان بر پهنه‌بندی سیلاب و مخاطره سیلابی در حوضه آبریز چومان، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۲)، ۴۳۰-۴۰۹.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408826.670078>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408826.670078>

مقدمه

سیلاب‌ها از پرتکرارترین و ویرانگرترین پدیده‌های طبیعی به شمار می‌آیند و آثار جانی و اقتصادی چشمگیری بر جوامع انسانی برجای می‌گذارند (Ceola et al., 2022). ایران نیز همانند بسیاری از کشورهای جهان، بارها شاهد خسارات شدید ناشی از وقوع سیلاب بوده است. در دهه‌های اخیر، افزایش خسارات ناشی از سیلاب‌ها بیش از آنکه ناشی از تغییرات بارش باشد، به تغییرات کاربری اراضی، توسعه شهری و دخالت‌های انسانی در بستر رودخانه‌ها مرتبط است (Jain et al., 2022). این امر بیانگر نقش عوامل انسانی و تغییرات کاربری اراضی در تشدید خطر سیلاب است و لزوم برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر آن را آشکار می‌سازد. یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت سیلاب و کاهش خسارات آن، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر است (Hidayah et al., 2023). اهمیت این نقشه‌ها زمانی بیشتر می‌شود که زیرساخت‌های حساسی مانند سدها، سکونتگاه‌های روستایی و اراضی کشاورزی در مسیر جریان‌های بالقوه سیلاب قرار گرفته باشند.

با این وجود، محدودیت داده‌های هیدرومتری و کمبود مطالعات میدانی دقیق، به‌ویژه در بسیاری از حوضه‌های کشور ایران، مانع بزرگی بر سر راه مدل‌سازی و تحلیل جریان‌های سیلابی محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، فناوری‌های سنجش‌ازدور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان رویکردی کارآمد و جایگزین، امکان برآورد داده‌های مکانی و زمانی گسترده و نسبتاً دقیق را فراهم می‌سازد (Heimhuber et al., 2015). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اپتیکی و راداری (مانند Sentinel، MODIS و Landsat) برای شناسایی مناطق سیل‌گرفته، استخراج دینامیک مکانی-زمانی سیلاب و تولید نقشه‌های خطر تأکید کرده‌اند (Agrawal et al., 2025; Sekine et al., 2024). این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب تصاویر چندزمانه با تحلیل‌های GIS می‌تواند دقت شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر و طبقه‌بندی شدت خطر را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Gumindoga et al., 2024).

سنجش‌ازدور با مزایایی همچون هزینه‌ی پایین، پوشش وسیع مکانی و زمانی و قابلیت پایش مداوم، به‌ویژه در مناطق فاقد داده‌های کافی، به ابزاری مؤثر در شبیه‌سازی جریان و پهنه‌بندی سیلاب تبدیل شده است. داده‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، در کنار مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) و ضرایب هیدرولیکی همچون ضریب زبری مانینگ، می‌توانند ورودی مناسبی برای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نظیر HEC-HMS و HEC-RAS فراهم کنند و نهایتاً در محیط GIS به نقشه‌های خطر سیلاب تبدیل شوند (Peker et al., 2024). در این زمینه، مطالعات متعددی استفاده از مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS را برای شبیه‌سازی بارش-رواناب، تولید هیدروگراف سیلاب و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه‌های مختلف جهان و ایران گزارش کرده‌اند (Ansarifard et al., 2024; Renu et al., 2025). این پژوهش‌ها عموماً نشان داده‌اند که کالیبراسیون مناسب مدل با استفاده از داده‌های بارش و دبی، و بهره‌گیری از DEM‌های با دقت بالا، می‌تواند دقت نقشه‌های inundation را بهبود بخشد.

در سال‌های اخیر، طیف وسیعی از روش‌های GIS-محور برای پهنه‌بندی خطر سیل از روش‌های ساده‌ی همپوشانی وزنی و تصمیم‌گیری چندمعیاره گرفته تا مدل‌های آماری و یادگیری ماشین توسعه یافته‌اند (Khodaei et al., 2025; Khoso et al., 2025). در این روش‌ها، عواملی مانند ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، نوع کاربری اراضی و بارش به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در نظر گرفته شده و نقشه‌های حساسیت یا خطر سیل تولید شده‌اند. برخی پژوهش‌ها، مدل‌های یادگیری ماشین (نظیر جنگل تصادفی، شبکه‌های عصبی و SVM) را برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب به‌کار گرفته و نشان داده‌اند که این رویکردها می‌توانند عملکرد قابل‌قبولی در طبقه‌بندی مناطق پرخطر داشته باشند (S. Khan et al., 2025; Xafoulis et al., 2026). با وجود این پیشرفت‌ها، بسیاری از این مطالعات صرفاً به برآورد «حساسیت» یا «آسیب‌پذیری» سیلاب پرداخته و کمتر به شبیه‌سازی دینامیک جریان و عمق آب در چارچوب مدل‌های هیدرولیکی عددی توجه کرده‌اند (Binns, 2023).

در این میان، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) از مهم‌ترین داده‌های ورودی برای مدل‌سازی جریان و پهنه‌بندی سیلاب به شمار می‌روند. عدم دسترسی به نقشه‌های دقیق زمینی، به‌ویژه در حوضه‌های فاقد آمار، یکی از چالش‌های اساسی این مطالعات است که با توسعه فناوری سنجش‌ازدور تا حد زیادی برطرف شده است. پژوهش‌های متعددی کارایی انواع مدل‌های رقومی ارتفاعی را در بازسازی توپوگرافی و برآورد پهنه‌های سیلاب بررسی کرده‌اند (Courty et al., 2019; Kaya & Üneş, 2025; Uuemaa et al., 2020). به‌طور مثال عزیزیان در ایران، مدل رقومی ارتفاعی ALOS را در مقایسه با SRTM و ASTER مناسب‌تر برای استخراج مقاطع عرضی و مدل‌سازی سیلاب معرفی کرد (عزیزیان، ۱۳۹۷). این یافته‌ها اهمیت انتخاب مناسب DEM در مطالعات سیلاب، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، را برجسته می‌کند.

افزون بر توپوگرافی، ضریب زبری مانینگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل‌های هیدرودینامیک نقش بسزایی در شبیه‌سازی جریان‌های سطحی دارد. برآورد دقیق این ضریب همواره با عدم قطعیت همراه بوده است، اما استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و

شاخص‌های پوشش گیاهی (مانند NDVI) امکان تهیه نقشه‌های مکانی ضریب زبری را فراهم ساخته است (Mtamba et al., 2015). بهره‌گیری از این نقشه‌ها در مدل‌های عددی موجب بهبود دقت شبیه‌سازی سیلاب نسبت به استفاده از مقادیر ثابت زبری شده است. ترکیب این داده‌ها با GIS و مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، ابزار مؤثری برای پهنه‌بندی و مدیریت خطر سیلاب فراهم کرده است. چنانکه مطالعات متعددی در ایران و جهان بر کارایی این رویکرد تأکید داشته‌اند (Elkhrachy, 2015; S. I. Khan et al., 2011; Mehrpourbernety et al., 2025; Youssef et al., 2011).

در سطح ملی و بین‌المللی، پژوهش‌های متعددی به بررسی اثر احداث سد بر رژیم جریان، شاخص‌های سیلاب و کم‌آبی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که سدها می‌توانند الگوی دبی اوج، جریان‌های کم‌دبی و شاخص‌های تغییرپذیری جریان را به‌طور معناداری دگرگون کنند (Dang & Pokhrel, 2024). با این حال، بخش عمده‌ای از این مطالعات به تحلیل آماری قبل و بعد از احداث سد محدود شده و کمتر از چارچوب‌های تلفیقی RS-GIS-مدل‌سازی عددی برای کمی‌سازی اثر سدها بر پهنه خطر سیلاب در حوضه‌های کوهستانی استفاده کرده‌اند. از سوی دیگر، بیشتر پژوهش‌هایی که به پهنه‌بندی سیلاب بر پایه RS و GIS پرداخته‌اند، حوضه‌های بدون سازه‌های عمده کنترلی را بررسی کرده و نقش سدهای متوالی در تغییر الگوی پهنه سیلاب را نادیده گرفته‌اند.

با توجه به چالش‌های موجود در داده‌های میدانی و موفقیت پژوهش‌های پیشین در استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، این پژوهش با تمرکز بر حوضه آبریز چومان (استان کردستان) تلاش کرده است با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های عددی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و تحلیل‌های GIS، نقشه پهنه‌بندی سیلاب تهیه کند. آنچه این حوضه را متمایز می‌کند، قرارگیری دو سد متوالی کانی‌گوژان و چومان در مسیر جریان است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان بر دبی اوج، زمان‌بندی سیلاب و پهنه‌ی تحت‌تأثیر در پایین‌دست اثرگذار باشد. با وجود تعدد سدها در کشور، تاکنون مطالعه‌ای جامع که اثر سدهای متوالی را با رویکرد ترکیبی سنجش‌ازدور، GIS و مدل‌سازی عددی در یک حوضه کوهستانی کم‌داده‌ای مانند چومان ارزیابی کند، گزارش نشده است. هدف نهایی این پژوهش، ارائه نقشه‌های خطر قابل‌اعتماد برای مدیریت بحران و کاهش خسارات سیلاب در این منطقه است. در این راستا، نوآوری اصلی مطالعه در ادغام سنجش‌ازدور، GIS و مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی با هدف تعیین کمی تأثیر سدهای متوالی بر بزرگی و زمان‌بندی سیل و ارائه چارچوبی کم‌هزینه و تکرارپذیر برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه‌های کوهستانی کم‌داده نهفته است.

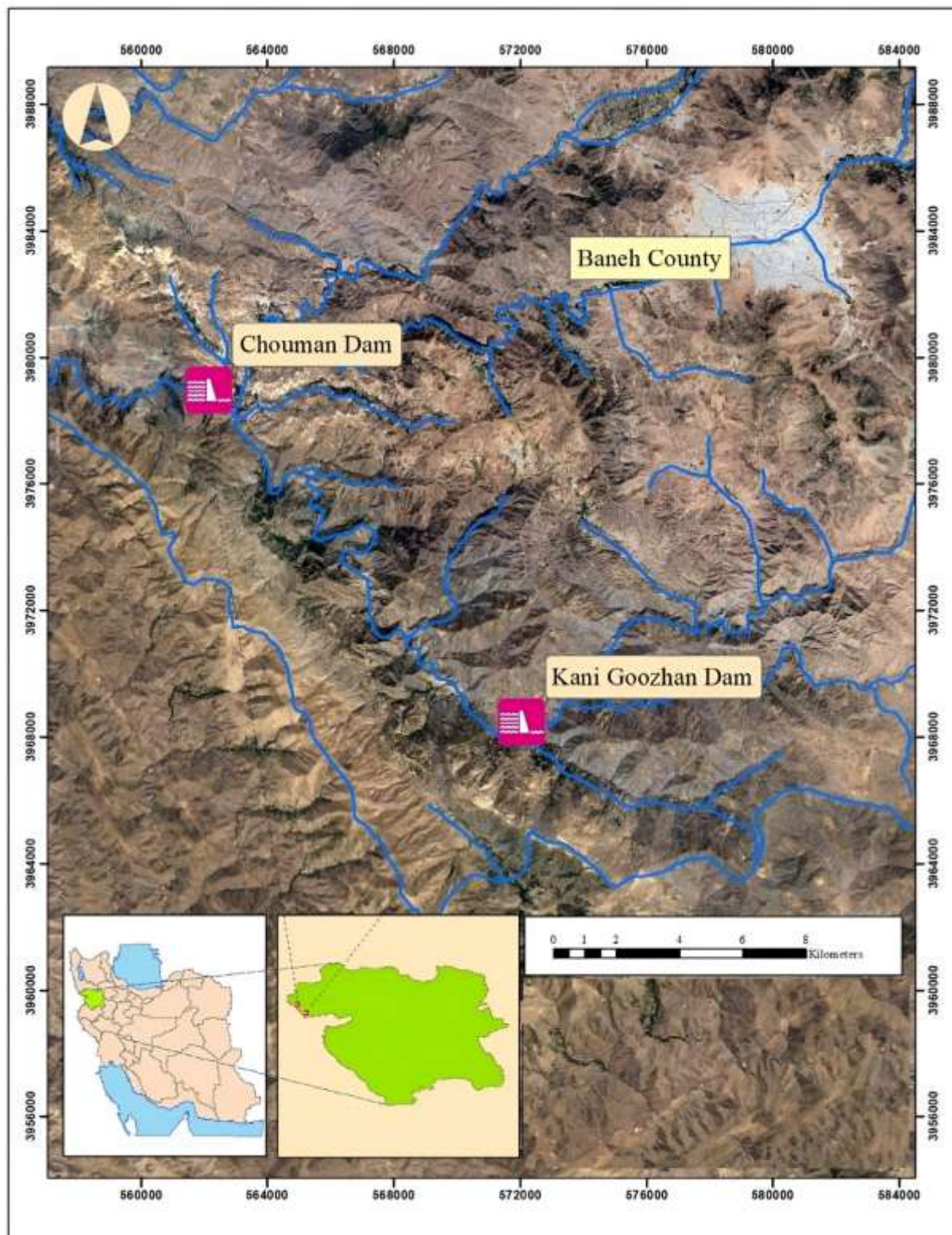
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز چومان با مساحتی حدود ۸۶۰ کیلومتر مربع در غرب ایران و در استان کردستان واقع شده و در فاصله تقریبی ۱۷ کیلومتری شهر بانه و ۳ کیلومتری مرز ایران و عراق قرار دارد. در این حوضه، دو سد متوالی کانی‌گوژان (بالادست) و چومان (پایین‌دست) با فاصله‌ای در حدود ۱۶ کیلومتر احداث شده‌اند که هدف اصلی آن‌ها کنترل رواناب‌های سطحی و تنظیم جریان سیلاب است.

سد کانی‌گوژان با ارتفاع ۵۵ متر دارای سرریز اوجی با طول تاج ۱۶ متر بوده و به دو تخلیه‌کننده تحتانی مجهز است. در پایین‌دست، سد چومان با ارتفاع ۳۰ متر دارای سرریز اوجی با طول ۱۰ متر و یک تخلیه‌کننده تحتانی است که در تنظیم و عبور جریان‌های سیلابی نقش مکمل ایفا می‌کند.

در محدوده میان دو سد، روستاهای کوخ رستم، سوره‌بان و نیروان قرار دارند. توپوگرافی عمدتاً کوهستانی منطقه، با تشدید تمرکز و افزایش شدت رواناب‌ها، سطح مخاطره سیلاب را افزایش داده و در عین حال، عملیات امداد رسانی و مدیریت بحران را در شرایط وقوع سیلاب با محدودیت‌های جدی مواجه می‌سازد. از سوی دیگر، بافت روستایی و آسیب‌پذیر منطقه خطرپذیری در برابر سیلاب را افزایش می‌دهد. بر این اساس، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب برای محدوده بین دو سد کانی‌گوژان و چومان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز و محل محور دو سد نمایش داده شده است.

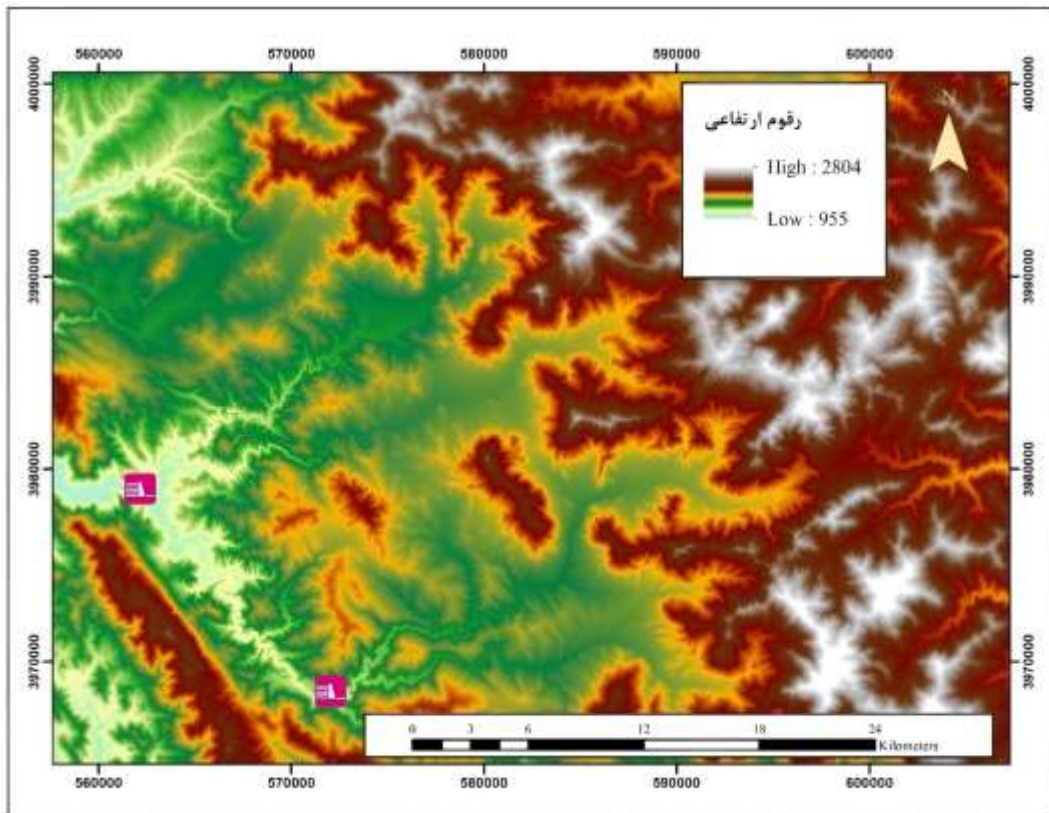


شکل ۱. موقعیت محور سدهای کانی گوزان و چومان

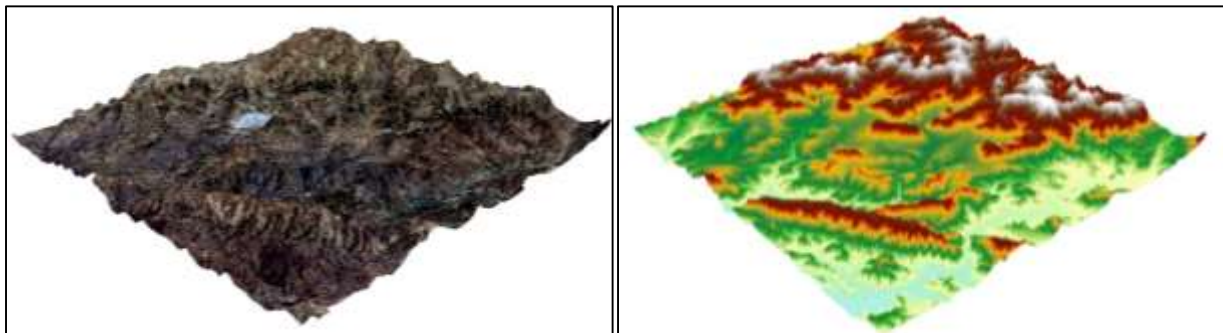
سنجش از دور

برای تحلیل پوشش اراضی و آماده‌سازی ورودی مدل هیدرولوژیکی، از تصویر سنجنده OLI ماهواره Landsat 8 به تاریخ ۲۶ مرداد ۱۴۰۰ استفاده شد. این تصویر از وب‌سایت USGS دریافت شده است و توان تفکیک مکانی آن ۳۰ متر می‌باشد. علاوه بر این، به منظور انجام مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، از مدل رقومی ارتفاعی ALOS با رزولوشن ۳۰ متر استفاده شد که از وب‌سایت EORC تهیه شده است. در شکل (۲-الف) تصویر دوبعدی و در شکل (۲-ب) تصویر سه‌بعدی این مدل نمایش داده شده است. همچنین

در شکل (۲-پ)، تصویر دوبعدی ماهواره Landsat 8 که به وسیله مدل ALOS به صورت سه بعدی مدل سازی شده است، نمایش داده می شود.

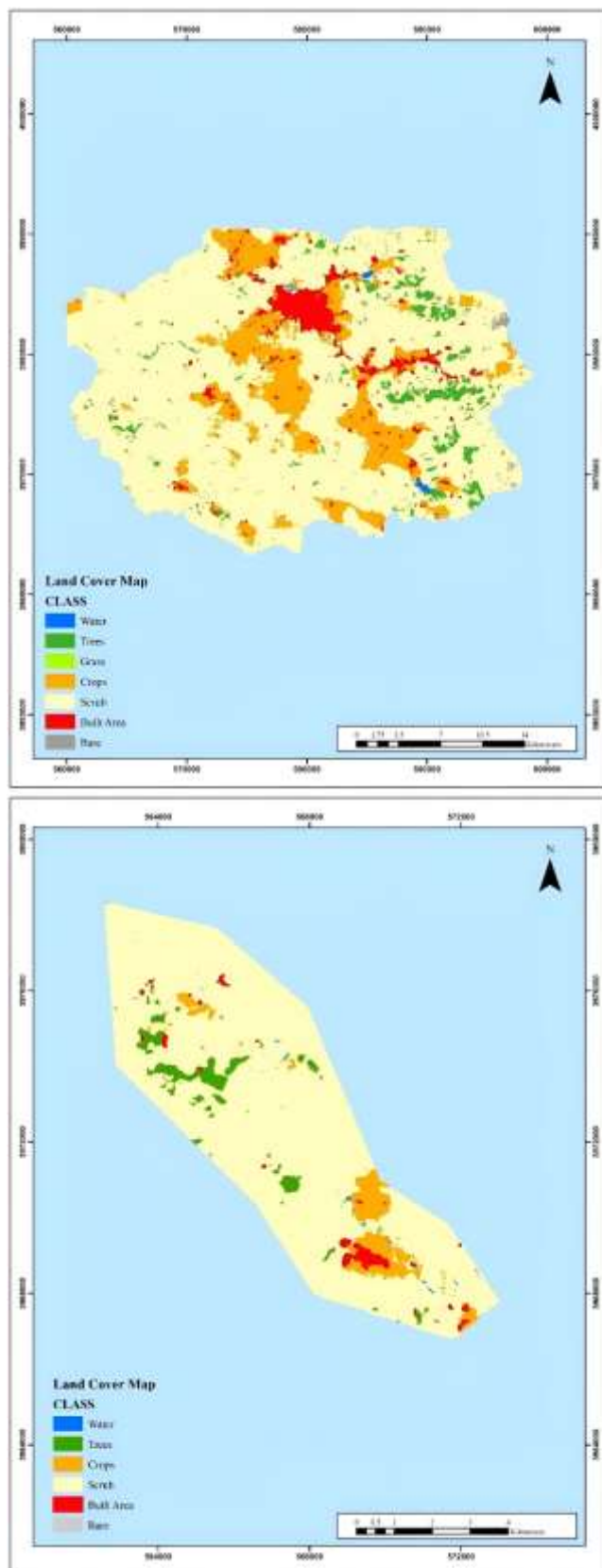


شکل ۲. الف) مدل رقومی ارتفاعی محدوده مورد مطالعه به صورت دوبعدی



شکل ۲. ب) تصویر سه بعدی مدل و پ) رندر تصویر سه بعدی شده Landsat 8 با لایه DEM

انجام صحت سنجی برای تهیه نقشه های کاربری اراضی که به روش طبقه بندی نظارت نشده به دست می آید، امری زمان بر و درجه اعتبار پایینی دارد، بدین منظور برای صحت سنجی و دقت بالاتر، از نقشه کاربری اراضی ESRI استفاده شد (Zhang et al., 2019). شرکت ESRI در تهیه این نقشه ها، نه تنها از داده های زمینی، بلکه از هوش مصنوعی نیز استفاده کرده است و توانسته است نقشه های کاربری اراضی را برای تمام سطح کره زمین با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر، دقت کلی ۸۶ درصد و در ۱۰ کلاس طبقه بندی تولید و به صورت رایگان به کاربران ارائه کند (Venter et al., 2022). شکل (۳)، نقشه کاربری اراضی را برای حوضه آبریز مورد مطالعه و محدوده بین دو سد نمایش می دهد.

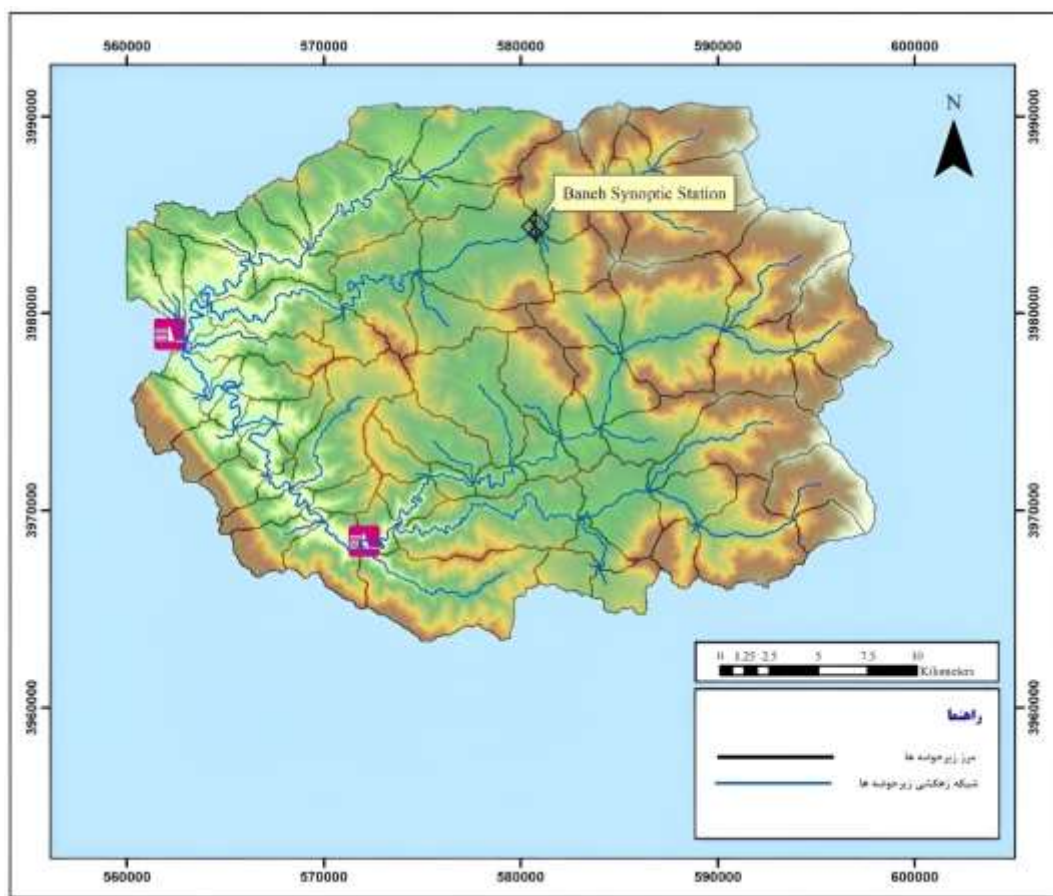


شکل ۳. نقشه کاربری اراضی در حوضه آبریز و در محدوده بین دو سد

مدل سازی هیدرولوژیکی

برای طراحی مدل بارش-رواناب حوضه آبریز مورد مطالعه، از نرم افزار مدل سازی عددی HEC-HMS نسخه ۴٫۸ استفاده گردید. داده های مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ماهواره ALOS وارد نرم افزار شده و بر اساس آن با روش آزمون و خطا، نقاط شکست (۵ نقطه) تعیین شد

که منجر به ایجاد ۷۷ زیر حوضه با مساحت متوسط ۱۱٫۲ کیلومترمربع شد که از نظر وسعت به مقدار قابل قبولی رسیدند. در شکل (۴)، نقشه حوضه‌بندی محدوده مورد مطالعه، مسیر زهکشی و موقعیت سد‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۴. حوضه‌بندی حوضه آبریز چومان

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ALOS و ابزارهای موجود در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی ArcGIS 10.8 و همچنین استخراج مشخصات حوضه‌ها از نرم‌افزار HEC-HMS، مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های آبریز به دست آمد که نتایج آن به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

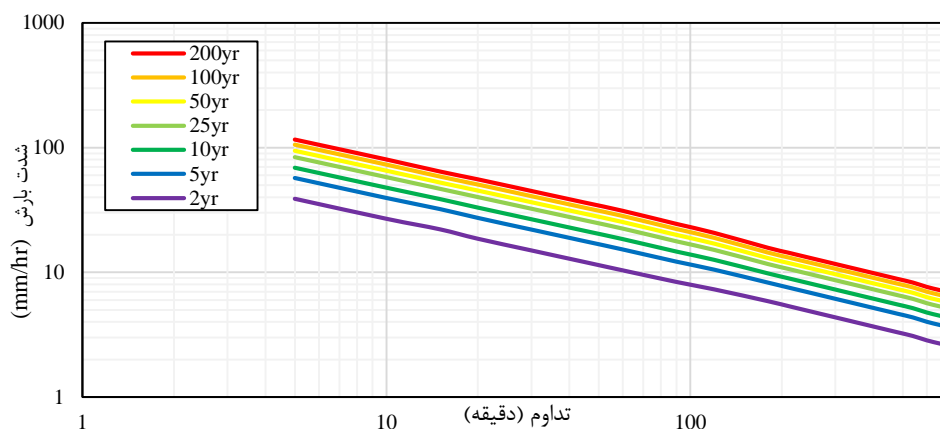
جدول ۱. خلاصه مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های آبریز چومان

پارامتر	دامنه مقادیر	میانگین
مساحت (کیلومترمربع)	۰٫۱ - ۳۴٫۱	۱۱٫۲
طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	۰٫۶ - ۱۹٫۰	۶٫۳
شیب آبراهه اصلی	۰٫۰۲ - ۰٫۲۸	۰٫۰۹
شیب حوضه	۰٫۱۶ - ۰٫۴۹	۰٫۳۴
اختلاف ارتفاع حوضه (متر)	۸۳ - ۱۱۵۷	۵۹۵
تراکم زهکشی (کیلومتر/کیلومترمربع)	۴٫۱۰ - ۰٫۰۰	۰٫۵۱

داده‌های اقلیمی منطقه از ایستگاه سینوپتیک بانه دریافت شد. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا ۱۶۰۰ متر می‌باشد که با توجه به ارتفاع متوسط حوضه آبریز که برابر با ۱۶۳۰ متر است و فاصله حدوداً ۱۸ کیلومتری آن از محور سد‌های کانی‌گوژان و چومان، می‌تواند انتخاب مناسبی برای طراحی مدل بارش- رواناب این حوضه آبریز باشد. متوسط بارندگی سالیانه حدود ۶۶۰ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین بارش ثبت شده ۸۸۷ میلی‌متر و کمترین ۳۷۹ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای روزانه ۱۰٫۳ درجه سانتی‌گراد و حداکثر مطلق دما به ترتیب ۱۶٫۴ و ۳۳٫۲ درجه سانتی‌گراد است. بیشتر بارندگی این حوضه در نیمه دوم سال اتفاق می‌افتد و نیمه اول سال، سهم کمی را از بارش سالیانه به خود اختصاص می‌دهد. شایان ذکر است که بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه در زمره اقلیم‌های

مرطوب محسوب می‌شود.

پس از بررسی داده‌های بارش، جهت طراحی دقیق‌تر مدل بارش- رواناب، نیاز است تا توزیع زمانی بارش در ایستگاه سینوپتیک بانه مشخص گردد. به‌طور کلی، هرچه مدت بارش کوتاه‌تر باشد، شدت آن بیشتر خواهد بود و برعکس. منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش با استفاده از روابط قهرمان و آبخضر (Ghahraman & Abkhezr, 2004) و داده‌های ایستگاه بانه استخراج شدند (شکل ۵). با توجه به تغییرات مکانی بارش، تبدیل بارش نقطه‌ای ایستگاه به بارش میانگین سطح حوضه نیز با استفاده از ضریب کاهش بر اساس مساحت و مدت‌زمان بارش (ضریب ۰/۸۵ برای بارش ۱۲ ساعته و مساحت ۸۶۰ کیلومتر مربع) انجام شد.



شکل ۵- منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی ایستگاه سینوپتیک بانه

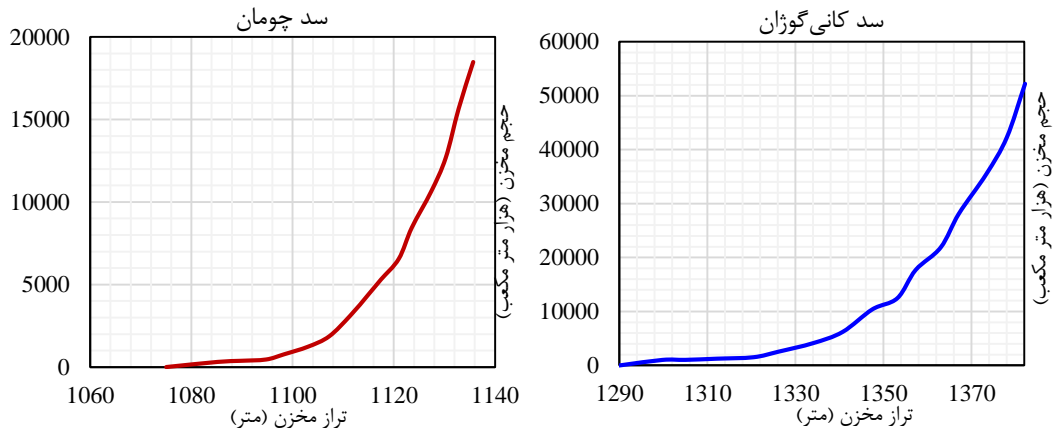
برای برآورد رواناب در زیر حوضه‌های مطالعاتی، از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد که یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شود. در این روش، شاخص شماره منحنی (CN) به‌عنوان نمایه‌ای از خصوصیات نفوذپذیری و پتانسیل تولید رواناب، بر اساس جداول استاندارد SCS و با توجه به کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک تعیین می‌گردد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از نقشه کاربری اراضی منتشرشده توسط ESRI و جداول استاندارد USDA-SCS، مقادیر CN برای هر زیر حوضه استخراج شد. در جدول ۲، مقادیر شماره منحنی برای کلاس‌های مختلف کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک ارائه شده است. همچنین، زمان‌های تأخیر و تمرکز زیر حوضه‌ها با استفاده از روابط پیشنهادی SCS و بر مبنای پارامترهای فیزیوگرافی محاسبه گردیدند. نتایج نشان داد که در تعدادی از زیر حوضه‌ها، زمان تمرکز بیش از ۶ ساعت است. بر این اساس و مطابق دستورالعمل SCS، مدت بارندگی طراحی برای مدل بارش-رواناب برابر با ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد.

جدول ۲. مقادیر شماره منحنی بر اساس کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک

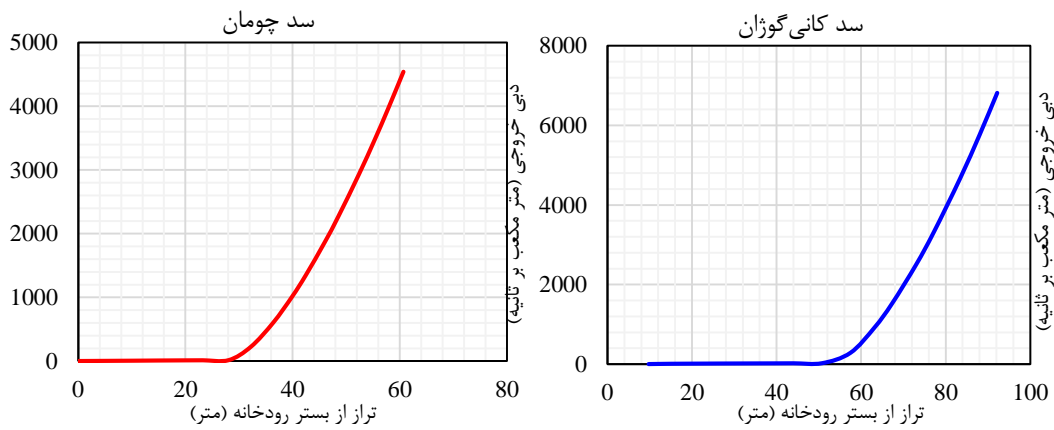
گروه هیدرولوژیکی				پوشش زمین
D	C	B	A	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	آب
۸۳	۷۷	۶۶	۴۵	جنگل پراکنده
۸۸	۸۵	۷۷	۶۳	زمین خاکی
۹۳	۹۰	۸۵	۷۶	زمین کشاورزی
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	منطقه شهری متراکم
۹۴	۹۱	۸۶	۷۷	زمین بکر

برای انجام محاسبات روند یابی مخازن سد در نرم‌افزار HEC-HMS، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ALOS در محیط GIS، منحنی‌های حجم-ارتفاع برای مخازن سدهای کانی‌گوزان و چومان استخراج گردید (شکل ۶). این منحنی‌ها امکان شبیه‌سازی سیلاب در زمان واقعی و بررسی نقش سدها در کنترل و تسکین سیلاب را فراهم می‌کنند. پس‌از آن، مشخصات هندسی سدها شامل ارتفاع، تراز نرمال، ارتفاع آزاد، نوع و تراز سرریز، تعداد و ابعاد تخلیه‌کننده‌های تحتانی معرفی شدند تا منحنی‌های دبی-اشل خروجی سدها محاسبه

گرد (شکل ۷).

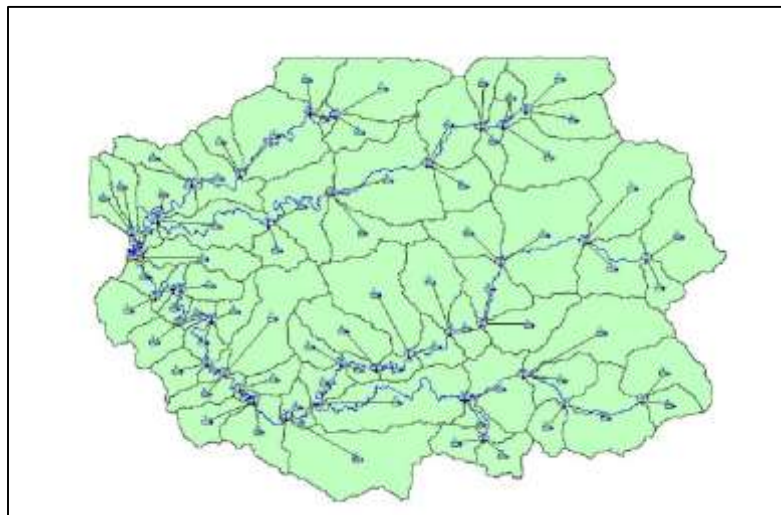


شکل ۶. منحنی‌های حجم - ارتفاع مخزن سدهای کانی گوژان و چومان



شکل ۷. منحنی دبی - اشل خروجی از محور سدهای کانی گوژان و چومان

با انجام پروسه‌های فوق و تعیین مشخصات مدل هیدرولوژیکی مانند زمان اجرای مدل و گام‌های زمانی، می‌توان مدل عددی هیدرولوژیکی HEC-HMS را اجرا کرد و از نتایج آن برای مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS استفاده کرد. شکل (۸) تصویر مدل عددی هیدرولوژیکی حوضه آبریز چومان را نمایش می‌دهد.



شکل ۸. مدل عددی هیدرولوژیکی حوضه آبریز چومان

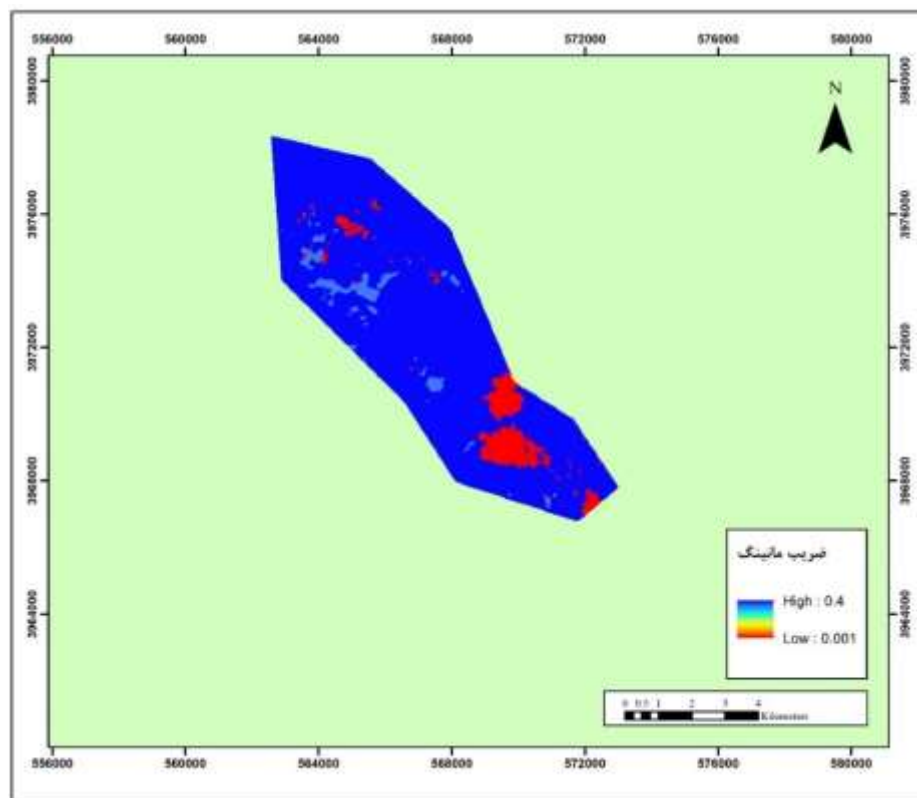
مدل سازی هیدرولیکی

برای تحلیل دقیق پهنه بندی سیلاب، از مدل دوبعدی نرم افزار HEC-RAS نسخه ۶٫۱ استفاده شد. انتخاب مدل دوبعدی به دلیل ویژگی های خاص منطقه مانند گستردگی پهنه سیلاب، عرض زیاد بستر رودخانه و نیز دقت بالاتر این مدل نسبت به مدل یک بعدی صورت گرفت. شایان ذکر است که معادلات حاکم بر جریان غیر ماندگار شبیه سازی شده در این نرم افزار برای مدل سازی دوبعدی، معادلات آب های کم عمق و معادلات پخش موج بودند که مؤلفه های سرعت و عمق جریان در راستاهای مختلف را مدل سازی می کردند (Mustafa & Szydłowski, 2021). در انتخاب گام های زمانی و مکانی مناسب، با فرض سرعت متوسط جریان حدود ۴ متر بر ثانیه، گام زمانی پنج ثانیه و گام مکانی ۲۰ متر انتخاب شدند تا عدد کورانت در محدوده یک قرار گیرد و پایداری مدل حفظ شود. هم چنین، از آنجایی که سرریزهای اوجی سدهای کانی گوژان و چومان برای تخلیه سیلاب های مازاد طراحی شده اند، جهت برآورد دبی عبوری از این سرریزها از معادله $Q = CLH_d^3$ استفاده شد (روشنگر و همکاران، ۱۴۰۴). در این رابطه ضریب C بر اساس ارتفاع ستون آب و هد انرژی روی سرریز تعیین گردید (روشنگر و پناهی، ۱۴۰۴).

با توجه به اینکه معادلات جریان با یک ضریب مانینگ ثابت حل نمی شوند، برای افزایش دقت مدل دوبعدی نسبت به حالت استفاده از ضریب زبری مانینگ ثابت، با بهره گیری از نقشه کاربری اراضی، نقشه تغییرات مکانی ضریب زبری مانینگ تهیه و در مدل وارد شد. جدول ۳ مقادیر ضرایب مانینگ در نظر گرفته برای کاربری اراضی محدوده دو سد و شکل (۹)، نقشه تغییرات مکانی ضریب زبری مانینگ را نمایش می دهد.

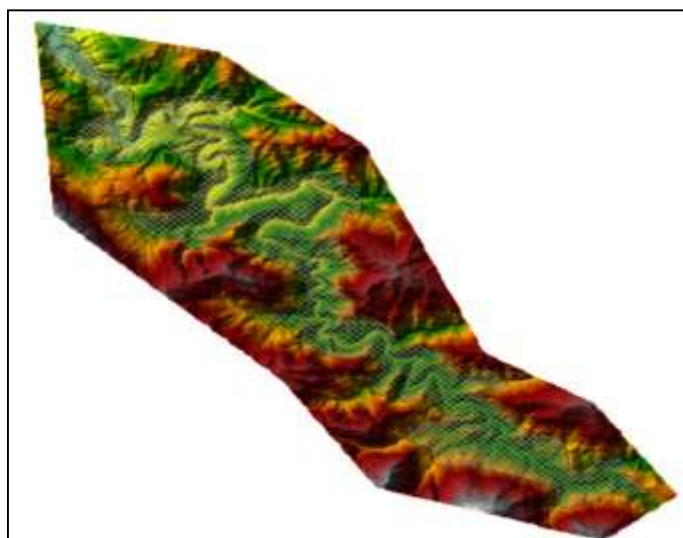
جدول ۳. مقادیر ضریب مانینگ برای کاربری اراضی

پوشش زمین	ضریب زبری
جنگل پراکنده	۰/۳۶۰
زمین خاکی	۰/۴۰۰
زمین کشاورزی	۰/۰۳۷
منطقه شهری متراکم	۰/۱۰۰
زمین بکر	۰/۰۱۱



شکل ۹- نقشه تغییرات مکانی ضریب زبری مانینگ در محدوده دو سد

شرایط مرزی مدل عددی در HEC-RAS نیز به گونه‌ای تعریف شدند که در بالادست، هیدروگراف سیلاب خروجی از محور سد کانی گوژان (به دست آمده از نرم افزار HEC-HMS) تأمین شود و مرز پایین دست به صورت $S0=Sf$ فرض شده است. بعلاوه، جهت مشاهده بهتر تأثیر سد و پهنه سیلاب، فرض می‌شود که سد کانی گوژان در تراز نرمال قرار دارد. نهایتاً، با تعریف مدت زمان اجرای مدل و گام‌های زمانی نمایش نتایج، مدل اجرا خواهد شد که در شکل (۱۰) مدل دوبعدی مسئله، برای محدوده بین دو سد در محیط HEC-RAS نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. مدل دوبعدی از محدوده مورد مطالعه در نرم افزار مدل عددی HEC-RAS

همچنین به منظور بررسی تأثیر سد و تخلیه کننده‌های تحتانی آن بر سیلابی که از سد کانی گوژان به سمت سد چومان جاری خواهد شد، چهار سناریوی متفاوت طراحی شد. همان طور که در جدول ۴ قابل مشاهده است در سناریوی اول، سد کانی گوژان در نظر گرفته نمی‌شود و سیلاب بدون تسکین به سمت سد چومان حرکت خواهد کرد. در سناریوی دوم سد کانی گوژان در تراز نرمال قرار دارد و جریان سیلاب به وسیله سرریز و هر دو تخلیه کننده تحتانی از سد کانی گوژان به سمت سد چومان می‌رود. در سناریوی سوم، سرریز و تخلیه کننده تحتانی شماره ۱ سیلاب را به پایین دست هدایت خواهند کرد. نهایتاً در سناریوی چهارم، تخلیه کننده تحتانی شماره ۲ سیلاب را از سد کانی گوژان به سمت سد چومان هدایت خواهد کرد. این سناریوها امکان ارزیابی حساسیت هیدروگراف پایین دست به ترکیب‌های مختلف رهاسازی سرریز و تخلیه کننده‌ها را فراهم می‌کنند و با اصول فیزیکی مسیریابی سیلاب در سدهای متوالی همخوانی دارند (Joo & Ryu, 2025; Khaddor et al., 2021; Tavakoly et al., 2021).

جدول ۴. سناریوهای تحلیل مسئله

نام سناریو	وضعیت سرریز	وضعیت تخلیه کننده شماره ۱	وضعیت تخلیه کننده شماره ۲
H1	-	-	-
H2	فعال	فعال	فعال
H3	فعال	فعال	غیرفعال
H4	فعال	غیرفعال	فعال

نتایج و بحث

ابتدا مدل هیدرولوژیکی با نرم افزار HEC-HMS اجرا شد تا هیدروگراف سیلاب خروجی از سد کانی گوژان و ورودی به سد چومان برای سیلاب‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برآورد شود. سپس با استفاده از این هیدروگراف‌ها، مدل هیدرولیکی دوبعدی سیلاب در نرم افزار HEC-RAS برای مدت ۴۸ ساعت اجرا و پهنه بندی سیلاب‌ها در هر سناریو مشخص گردید.

صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی

برای صحت‌سنجی مدل HEC-HMS، نتایج شبیه‌سازی سناریوی H1 معرف وضعیت موجود منطقه می‌باشد با داده‌های مشاهداتی

ایستگاه‌های هیدرومتری گرماب بله‌کی (محل سد کانی‌گوژان) و تازبان چومان (محل سد چومان) مقایسه شد. در این راستا، مقادیر دبی اوج سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف ابتدا در نرم‌افزار EasyFit با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب (لوگ-لجستیک سه‌پارامتری، لوگ-پیرسون سه‌پارامتری، لوگ نرمال سه‌پارامتری و گاما) محاسبه گردید. سپس این مقادیر در کنار نتایج مدل HEC-HMS ارائه و مقایسه شد (جدول ۵). همچنین، به‌منظور ارزیابی دقت مدل، اختلاف نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهداتی محاسبه و در قالب این جدول ارائه گردید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تنها در دو مورد اختلاف بالای ۲۰ درصد مشاهده می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن این مطلب که معمولاً از توزیع لوگ پیرسون سه پارامتری در محاسبات سیلاب استفاده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که محاسبات عددی بارش- رواناب نرم‌افزار HEC-HMS قابل اعتماد است. از سوی دیگر، این امر دقت داده‌های تهیه‌شده به روش سنجش‌ازدور را به طور غیر مستقیم تایید می‌کند. زیرا در مدل‌سازی هیدرولوژیکی از لایه DEM و نقشه کاربری اراضی استفاده شد که به روش سنجش‌ازدور به دست آمده بودند.

جدول ۵. دبی حداکثر سیلاب حاصل از مدل HEC-HMS و برازش آماری داده‌های مشاهداتی

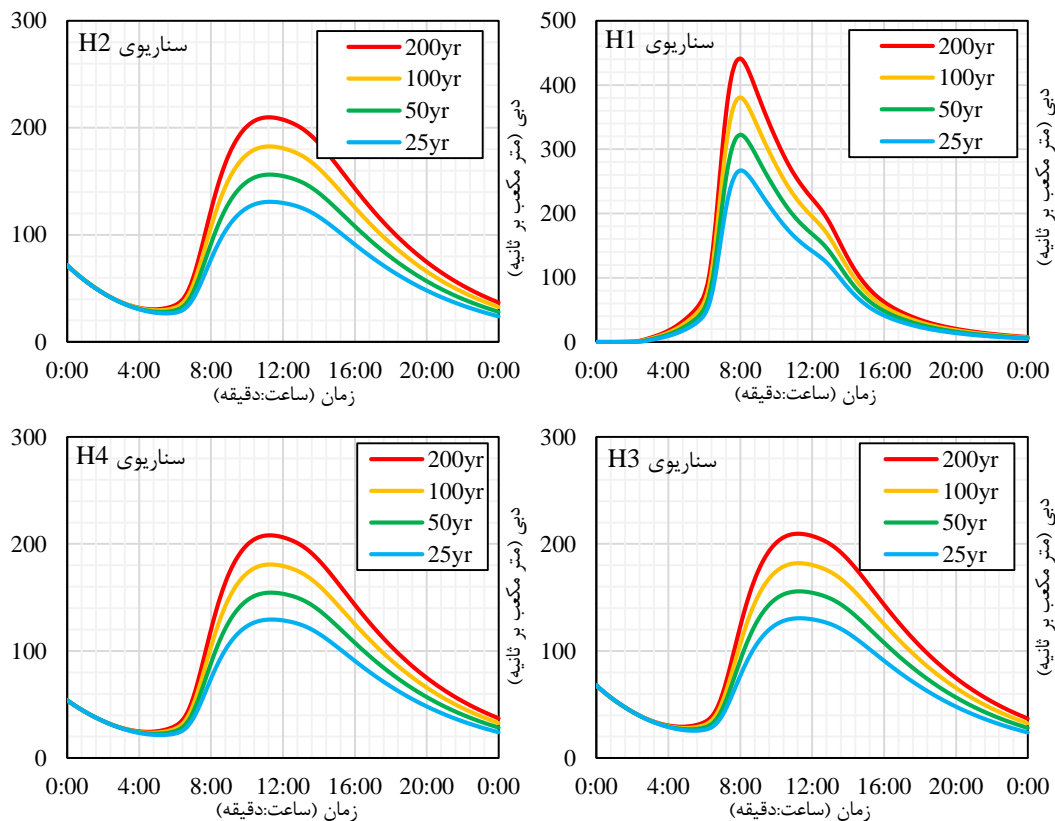
میانگین خطا	دبی حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه)				روش	محل
	۲۰۰ ساله	۱۰۰ ساله	۵۰ ساله	۲۵ ساله		
	۴۴۱٫۰۳	۳۷۹٫۰۰	۳۲۲٫۱۵	۲۶۶٫۱۴	مدل HEC-HMS	سد کانی‌گوژان
۴٫۹۵٪	۵۰۰٫۶۰	۳۸۰٫۷۷	۲۸۹٫۷۹	۲۲۰٫۱۰	لوگ-لجستیک سه پارامتری	ایستگاه گرماب بله‌کی
۱٫۱۶٪	۴۸۴٫۸۵	۳۸۸٫۶۱	۳۰۷٫۴۰	۲۳۹٫۰۰	لوگ-پیرسون سه پارامتری	ایستگاه گرماب بله‌کی
۱۵٫۴۳٪	۳۹۵٫۴۰	۳۳۲٫۵۰	۲۷۵٫۳۰	۲۲۳٫۳۵	لوگ نرمال سه پارامتری	ایستگاه گرماب بله‌کی
۲۴٫۰۳٪	۳۴۱٫۲۶	۳۰۲٫۳۲	۲۶۳٫۰۹	۲۲۳٫۴۸	گاما	ایستگاه گرماب بله‌کی
	۱۴۶۳٫۷۰	۱۲۹۷٫۰۰	۱۱۳۵٫۲۰	۹۷۵٫۹۰	مدل HEC-HMS	سد چومان
-۲۰٫۷۸٪	۲۳۳۱٫۸۰	۱۷۶۸٫۰۰	۱۳۴۰٫۸۰	۱۰۱۵٫۸۰	لوگ-لجستیک سه پارامتری	ایستگاه تازبان چومان
-۵٫۳۵٪	۱۶۸۳٫۵۰	۱۴۱۱٫۵۰	۱۱۶۸٫۴۰	۹۵۰٫۹۱	لوگ-پیرسون سه پارامتری	ایستگاه تازبان چومان
-۳٫۷۹٪	۱۶۳۲٫۲۰	۱۳۸۲٫۹۰	۱۱۵۵٫۰۰	۹۴۶٫۶۱	لوگ نرمال سه پارامتری	ایستگاه تازبان چومان
-۲٫۴۳٪	۱۳۹۹٫۳۰	۱۲۵۲٫۵۰	۱۱۰۳٫۱۰	۹۵۰٫۵۱	گاما	ایستگاه تازبان چومان

برآورد هیدروگراف سیلاب‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله

پس از صحت‌سنجی مدل، می‌توان تمامی سناریوهای مورد نظر را در نرم‌افزار تعریف کرد. تفاوت اصلی سناریوی H1 با سایر سناریوها، عدم تاثیر سد می‌باشد. بنابراین باید برای تعریف سایر سناریوها، مدل هیدرولوژیکی از مخزن در حوضه آبریز طراحی شود. پس از طراحی این مدل و تعریف هندسه مخزن و منحنی دبی- اشل در محل سد، هیدروگراف سیلاب‌ها در بازگشت‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال و در چهار سناریوی H1، H2، H3 و H4 به دست می‌آید. شکل (۱۲)، این هیدروگراف‌ها را نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، تاثیر ساخت سد کانی‌گوژان انکارناپذیر است. به‌طوری‌که برای سیلاب ۲۰۰ ساله، دبی اوج از حدود ۴۲۰ مترمکعب بر ثانیه به ۲۱۰ مترمکعب کاهش یافته که نشان‌دهنده تسکین ۵۰ درصدی سیلاب توسط این سد می‌باشد. همچنین از مقایسه هیدروگراف سناریوهای H3 و H4، مشخص می‌شود که دریچه‌های تحتانی در صورتی تاثیری چشمگیر بر سیلاب خواهند داشت که هر دو به صورت هم‌زمان باز باشند و حتی پیشنهاد افزایش قطر تخلیه‌کننده‌ها منطقی به نظر می‌رسد. البته بدیهی است که تاثیر سیستم تخلیه‌کننده تحتانی در هنگام وقوع سیلاب‌های متناوب‌تر که دبی حداکثر کمتر و زمان‌های کوتاه‌تری دارند بیشتر نمایان است و در سیلاب‌های بزرگ، عملکرد آن‌ها تحت تاثیر عملکرد سرریز قرار خواهد گرفت.

افزون بر نتایج فوق، از مقایسه هیدروگراف سناریوهای H2، H3 و H4 مشاهده می‌شود که کاهش دبی سیلاب خروجی عمدتاً در ساعات ابتدایی وقوع سیلاب رخ می‌دهد. علت این پدیده آن است که در آغاز سیلاب، حجم ورودی به مخزن پایین بوده و سرریز هنوز وارد عمل نمی‌شود؛ در نتیجه، مقدار آبی که از طریق تخلیه‌کننده‌ها خارج می‌شود بیشتر از حجم ورودی است و تراز آب در مخزن افت می‌کند. کاهش تراز، هد هیدرولیکی ورودی به تخلیه‌کننده‌ها را کاهش داده و در پی آن دبی خروجی نیز کمتر می‌شود. با افزایش تدریجی دبی و حجم ورودی سیلاب، تراز آب مخزن دوباره بالا رفته و جریان خروجی نیز افزایش می‌یابد. این رفتار دو نکته کلیدی را آشکار می‌سازد: نخست، نقش مؤثر تخلیه‌کننده‌های تحتانی در ساعات اولیه وقوع سیلاب پیش از فعال شدن سرریز است. به‌عنوان نمونه، در سد کانی‌گوژان، فعال بودن تخلیه‌کننده‌ها از ابتدای سیلاب، امکان تخلیه حدود ۷۱۲ هزار متر مکعب آب را طی ۴٫۵ ساعت فراهم

کرده و با آزادسازی بخشی از ظرفیت مخزن، عملکرد سد در کنترل سیلاب بهبود می‌یابد. دوم، این بازه زمانی فرصت مناسبی برای صدور هشدار به مناطق پایین‌دست و فراهم‌سازی تمهیدات ایمنی فراهم می‌آورد که می‌تواند در کاهش تلفات انسانی نقش حیاتی داشته باشد. این امر در واقع بیانگر اهمیت شناخت سد، مخزن و سیستم‌های هدایت سیلاب آن برای متولیان امر می‌باشد که در مواقع وقوع سیلاب‌های سهمگین و بروز بحران، در سریع‌ترین زمان ممکن تصمیمات لازم را اتخاذ و اجرا کنند.



شکل ۱۱. هیدروگراف سیلاب‌ها در دوره‌های بازگشت و سناریوهای مختلف

تعیین پهنه سیلاب‌ها

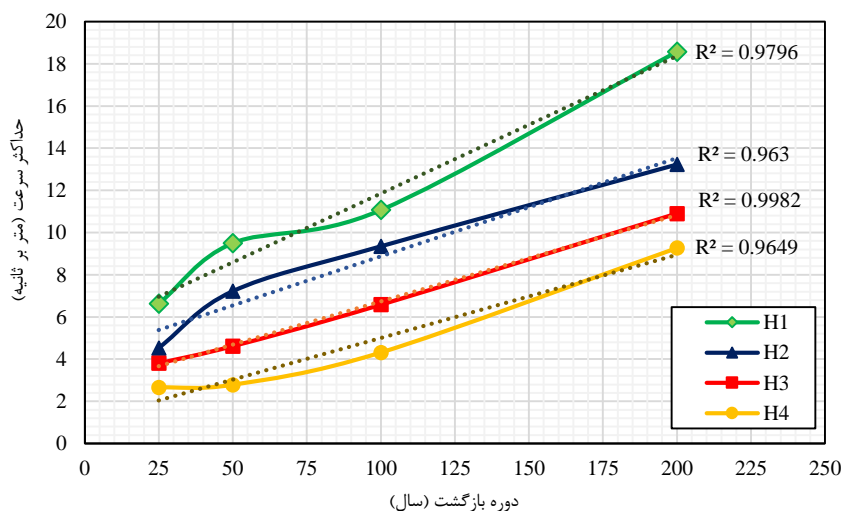
پس از برآورد هیدروگراف سیلاب‌های خروجی از سد کانی‌گوزان و اعمال آن به‌عنوان شرط مرزی بالادست در مدل دوبعدی HEC-RAS، معادلات جریان کم‌عمق به‌صورت عددی حل شدند و مقادیر عمق و دبی جریان در سلول‌های شبکه محاسبه گردید. با پردازش گرافیکی داده‌ها، نقشه‌های دوبعدی تغییرات مکانی و زمانی پهنه سیلاب‌های با دوره بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در سناریوهای H1 تا H4 تولید شدند. جدول ۶ مقادیر حداقل و حداکثر عمق و سرعت جریان را برای هر سناریو و دوره بازگشت ارائه می‌کند. بر اساس این نتایج، عمق آب در محل سد چومان هنگام وقوع سیلاب‌های ۲۵ تا ۲۰۰ ساله از حدود ۳۰ تا ۴۰ متر متغیر است. با استفاده از منحنی حجم-ارتفاع مخزن سد چومان، حجم مخزن متناظر در ارتفاع‌های ۳۰ و ۴۰ متر به ترتیب برابر با ۱/۵۶ و ۴/۳۷ میلیون مترمکعب محاسبه شد. باین‌وجود، با توجه به اینکه سرریز این سد در تراز ۲۸ متری از بستر رودخانه قرار دارد، می‌توان حجم ذخیره سیلاب حداکثر در مخزن سد چومان را ۱/۲۴ میلیون مترمکعب برآورد کرد و باقی‌مانده حجم سیلاب از طریق سرریز و تخلیه‌کننده‌های تحتانی از مخزن خارج می‌شوند. با توجه به هیدروگراف سیلاب‌ها در سناریوهای H2، H3 و H4، این حجم سیلاب، پیش از رسیدن هیدروگراف به دبی اوج وارد رودخانه خواهد شد. بنابراین لازم است که همانند سناریوهای H2 تا H4 در سد کانی‌گوزان، در سد چومان نیز از ابتدای ورود سیلاب نسبت به باز کردن دریچه تخلیه‌کننده تحتانی و مدیریت سیلاب از ابتدای ورود آن به مخزن اقدام کرد تا سد بتواند عملکرد بهتری در تسکین سیلاب داشته باشد. نتایج جدول ۶ همچنین بیانگر نقش قابل‌توجه سد کانی‌گوزان در افزایش ایمنی پایین‌دست است. در صورت وقوع سیلاب ۲۰۰ ساله، سرعت جریان در برخی مقاطع به حدود ۱۹ متر بر ثانیه می‌رسد که با توجه به شیب تند آبراهه (متوسط ۰،۰۹ و حداکثر تا ۰،۲۸) و ویژگی‌های کوهستانی رودخانه چومان در سناریوی بدون کنترل سد (H1) از منظر هیدرولیکی

واقع‌بینانه است. پایداری عددی مدل با رعایت عدد کورانت ~ 1 (گام زمانی ۵ ثانیه، گام مکانی ۲۰ متر) تأیید شده و هیچ ناپایداری مشاهده نشد. باین‌حال، بهره‌برداری هم‌زمان از سرریز و دو تخلیه‌کننده تحتانی سرعت را تا حدود ۱۳ متر بر ثانیه کاهش می‌دهد و با مدیریت مرحله‌ای جریان تا حدود ۹ متر بر ثانیه نیز قابل کاهش است. این نتایج اهمیت کنترل هم‌زمان دبی ورودی و خروجی سدها را در سیستم‌های زنجیره‌ای حوضه‌های کوهستانی نشان می‌دهد. این نتایج اهمیت کنترل هم‌زمان دبی ورودی و خروجی سدها را در سیستم‌های زنجیره‌ای حوضه‌های کوهستانی نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج تحلیل مدل دوبعدی HEC-RAS

سناریو	دوره بازگشت (سال)	عمق جریان (متر)		سرعت جریان (متر بر ثانیه)	
		حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
H1	۲۵	۰٫۰۰	۲۹٫۸۶	۲٫۱۴	۶٫۶۳
	۵۰	۰٫۰۰	۳۲٫۹۲	۲٫۳۱	۹٫۵۰
	۱۰۰	۰٫۰۰	۳۶٫۲۵	۳٫۲۰	۱۱٫۰۷
	۲۰۰	۰٫۰۰	۳۹٫۲۳	۳٫۷۲	۱۸٫۵۷
H2	۲۵	۰٫۰۰	۲۹٫۶۶	۱٫۳۷	۴٫۵۲
	۵۰	۰٫۰۰	۲۵٫۵۲	۱٫۴۷	۷٫۲۲
	۱۰۰	۰٫۰۰	۳۶٫۱۷	۲٫۰۶	۹٫۳۵
	۲۰۰	۰٫۰۰	۳۸٫۸۲	۵٫۳۲	۱۳٫۲۳
H3	۲۵	۰٫۰۰	۲۹٫۲۸	۱٫۱۷	۳٫۸۱
	۵۰	۰٫۰۰	۳۲٫۷۴	۱٫۳۱	۴٫۶۲
	۱۰۰	۰٫۰۰	۳۵٫۸۱	۲٫۰۰	۶٫۵۸
	۲۰۰	۰٫۰۰	۳۸٫۸۵	۴٫۵۳	۱۰٫۹۰
H4	۲۵	۰٫۰۰	۲۸٫۸۵	۱٫۱۴	۲٫۶۵
	۵۰	۰٫۰۰	۳۲٫۲۷	۱٫۴۶	۲٫۷۸
	۱۰۰	۰٫۰۰	۳۵٫۴۱	۱٫۵۷	۴٫۳۱
	۲۰۰	۰٫۰۰	۳۸٫۳۵	۴٫۶۷	۹٫۲۷

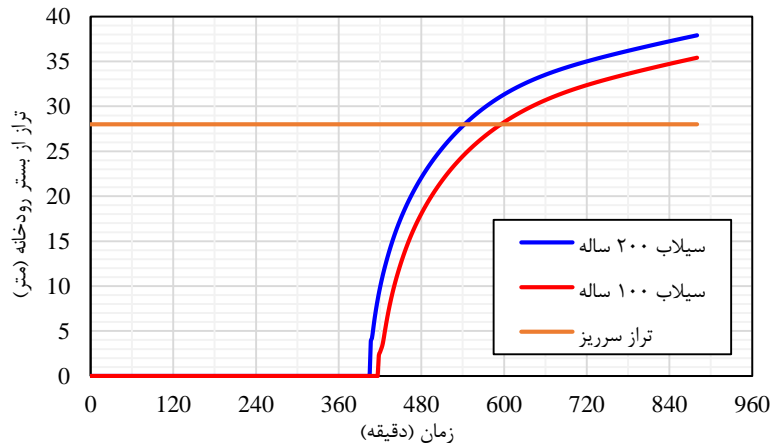
مقایسه سناریوهای مختلف در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر سرعت جریان با روابط خطی و ضریب همبستگی بالاتر از ۹۵ درصد قابل پیش‌بینی هستند. روابط به‌دست‌آمده در جدول ۷ ارائه شده و می‌توانند به‌عنوان ابزاری ساده برای تخمین سریع شرایط هیدرولیکی پایین‌دست سد مورد استفاده قرار گیرند. در روابط ارائه‌شده، T دوره بازگشت برحسب سال و V سرعت مورد انتظار سیلاب برحسب متر بر ثانیه خواهد بود.



شکل ۱۲. مقادیر حداکثر سرعت جریان در بازگشت‌ها و سناریوهای مختلف

جدول ۷. روابط پیش‌بینی سرعت حداکثر جریان در سناریوهای وقوع سیلاب

نام سناریو	ضریب همبستگی	رابطه
H1	0.98	$V=0.0652T+ 5.3339$
H2	0.96	$V= 0.0466T+ 4.2165$
H3	0.99	$V= 0.0409T+ 2.6417$
H4	0.97	$V= 0.0394T+ 1.0583$



شکل ۱۳. تغییرات تراز مخزن سد چومان هنگام وقوع سیلاب‌های ۱۰۰ ساله و ۲۰۰ ساله در سناریوی H4

شکل (۱۳) تغییرات تراز مخزن سد چومان را در سناریوی H4 هنگام وقوع سیلاب‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله نمایش می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که حدود ۴۰۰ دقیقه پس از ورود سیلاب ۲۰۰ ساله به مخزن سد کانی‌گوژان، سد چومان آغاز به آبرگیری کرده و پس از حدود سه ساعت به تراز نهایی خود می‌رسد. در حالت وقوع سیلاب ۱۰۰ ساله، آبرگیری با تأخیر حدود ۱۵ دقیقه‌ای و با نرخ کمتر انجام می‌شود. در نتیجه، سرریز سد چومان در سیلاب ۱۰۰ ساله تقریباً یک ساعت دیرتر نسبت به سیلاب ۲۰۰ ساله فعال خواهد شد. این رفتار زمانی نشان می‌دهد که عملکرد متوالی سدهای کانی‌گوژان و چومان، در صورت مدیریت هماهنگ، می‌تواند ظرفیت تعدیل قابل توجهی در برابر سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا ایجاد کند و ریسک هیدرولیکی پایین‌دست را به‌طور مؤثری کاهش دهد.

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب

پس از اجرای مدل هیدرولیکی دوبعدی در نرم‌افزار HEC-RAS، نتایج رستری استخراج و به محیط ArcGIS منتقل گردید. نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب که هدف اصلی این پژوهش هستند با تلفیق خروجی‌های مدل، تصاویر Landsat-8 و مدل رقومی ارتفاعی ALOS تولید شدند. این نقشه‌ها امکان شناسایی دقیق نواحی در معرض آب‌گرفتگی را برای دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله فراهم می‌کنند (شکل ۱۴).

تطابق پلان جریان شبیه‌سازی‌شده با بستر واقعی رودخانه در تصاویر ماهواره‌ای، دقت بالای داده‌های سنجش‌ازدور و کارایی مدل را تأیید می‌کند. در تراز آب ۲۸ متری مخزن سد چومان، طول مخزن حدود ۱۵۰۰ متر است و با توجه به عدم وجود سکونتگاه روستایی در این محدوده، خطر سیل‌گیری مستقیم مخزن وجود ندارد. با این حال، در سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله، چهار روستای پایین‌دست در مسیر حدود ۱۶ کیلومتری رودخانه در معرض خطر مستقیم قرار می‌گیرند (شکل ۱۵).

تأخیر ۴،۵ ساعته ایجادشده توسط سد کانی‌گوژان در زمان اوج سیلاب، فرصت مناسبی برای صدور هشدار سریع و اقدامات اضطراری در روستاهای پایین‌دست فراهم می‌آورد. علاوه بر این، اجرای عملیات ساماندهی و پایدارسازی سواحل رودخانه می‌تواند احتمال ورود سیلاب به مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی را کاهش دهد.

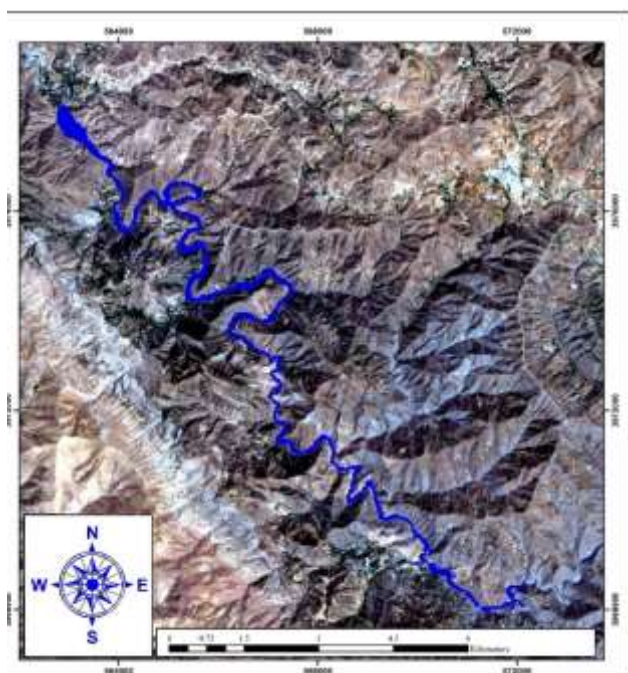
در مجموع، یافته‌ها نقش مؤثر سدهای کانی‌گوژان و چومان را در کاهش دبی اوج، تعدیل سیلاب‌های مخرب و افزایش تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی نشان می‌دهد. این پژوهش بر اهمیت تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با مدل‌سازی عددی به عنوان رویکردی سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق کوهستانی کم‌داده تأکید دارد.



شکل ۱۴. ب- نقشه پهنه‌بندی سیلاب ۵۰ ساله (محدوده جغرافیایی: $35^{\circ}46'08''$ - $35^{\circ}35'18''$ شمالی، $46^{\circ}18'00''$ - $46^{\circ}18'00''$ شرقی، WGS84)



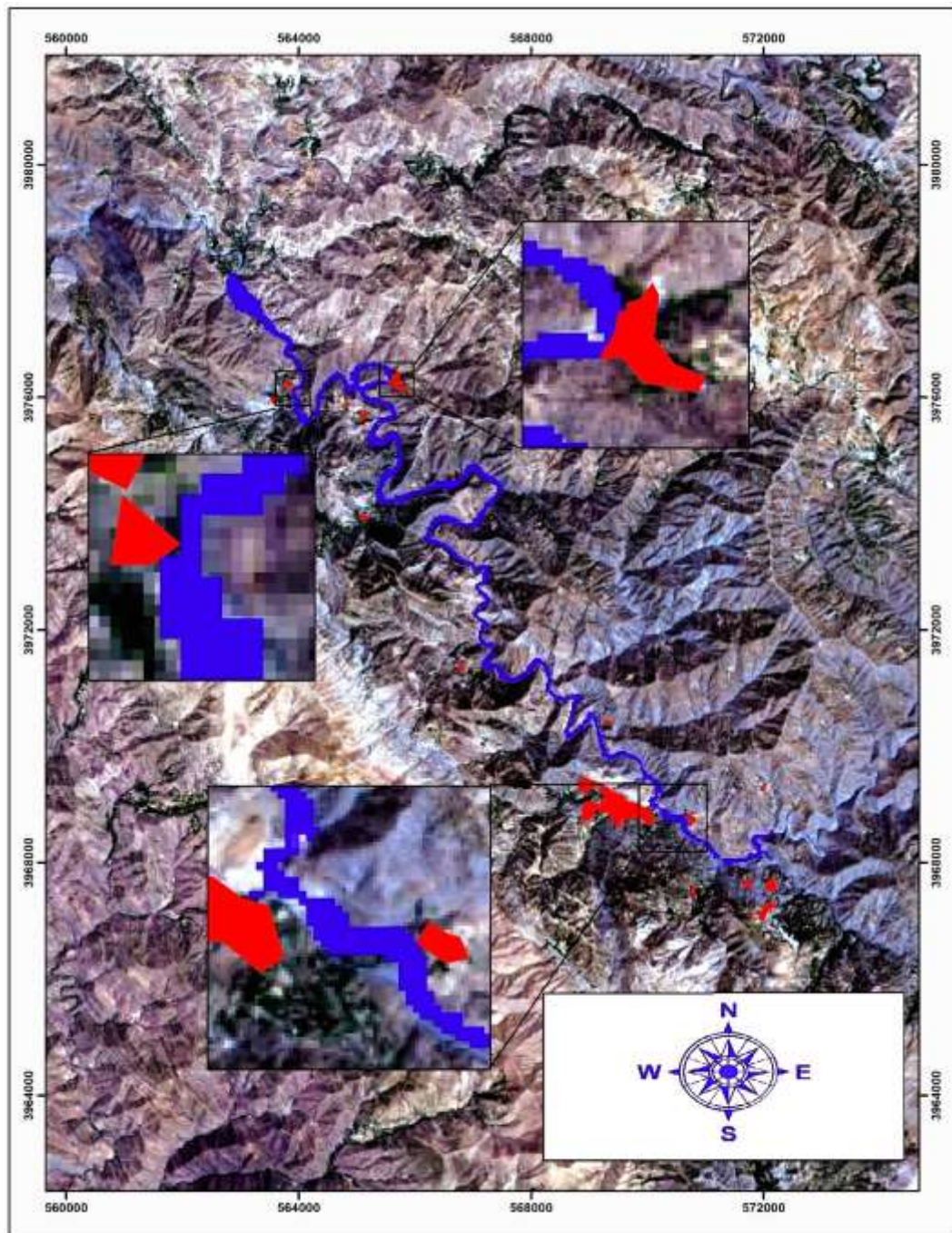
شکل ۱۴. الف- نقشه پهنه‌بندی سیلاب ۲۵ ساله (محدوده جغرافیایی: $35^{\circ}46'08''$ - $35^{\circ}35'18''$ شمالی، $46^{\circ}18'00''$ - $46^{\circ}18'00''$ شرقی، WGS84)



شکل ۱۴. ت- نقشه پهنه‌بندی سیلاب ۲۰۰ ساله (محدوده جغرافیایی: $35^{\circ}46'08''$ - $35^{\circ}35'18''$ شمالی، $46^{\circ}18'00''$ - $46^{\circ}18'00''$ شرقی، WGS84)



شکل ۱۴. پ- نقشه پهنه‌بندی سیلاب ۱۰۰ ساله (محدوده جغرافیایی: $35^{\circ}46'08''$ - $35^{\circ}35'18''$ شمالی، $46^{\circ}18'00''$ - $46^{\circ}18'00''$ شرقی، WGS84)



شکل ۱۵. موقعیت مناطق سیل گیر در هنگام وقوع سیلاب های ۱۰۰ ساله و ۲۰۰ ساله (محدوده جغرافیایی: ۴۶/۰۸-۴۶/۱۸° شرقی، ۳۵/۸۰-۳۵/۹۷° شمالی (WGS84))

نتیجه گیری

در این پژوهش، پهنه بندی سیلاب در محدوده بین سد های کانی گوژان و چومان در حوضه آبریز چومان با بهره گیری از داده های سنجش از دور، مدل های عددی HEC-HMS و HEC-RAS و تحلیل در محیط ArcGIS انجام شد. نتایج نشان داد تصاویر ماهواره ای Landsat-8 و مدل رقومی ارتفاعی ALOS با دقت مناسب، امکان استخراج کاربری اراضی و تعیین شماره منحنی رواناب را برای مدل سازی هیدرولوژیکی فراهم می کنند. شبیه سازی ها بیانگر آن است که در سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله، سد کانی گوژان موجب کاهش حدود ۵۰ درصدی دبی اوج (از ۴۲۰ به ۲۱۰ مترمکعب بر ثانیه) و ایجاد تأخیر زمانی حدود ۴/۵ ساعت در رسیدن به اوج سیلاب می شود. از سوی دیگر، نتایج مدل هیدرولیکی نشان داد که احداث سد کانی گوژان در بالادست، باعث افزایش حدود شش ساعته در زمان پر شدن مخزن سد چومان و تأخیر در فعال شدن سرریز آن می شود. به بیان دیگر، وجود این سد نقش مؤثری در کاهش سرعت آبریزی، کنترل

جریان‌های ورودی و فراهم‌سازی فرصت واکنش و مدیریت بهتر سیلاب در سد پایین‌دست دارد. همچنین، در شرایط بهره‌برداری هم‌زمان از سرریز و تخلیه‌کننده‌های تحتانی، سرعت جریان از حدود ۱۹ به ۱۳ متر بر ثانیه کاهش یافته و در صورت مدیریت مرحله‌ای خروجی‌ها، تا ۹ متر بر ثانیه نیز قابل کاهش است. تراز سطح آب در مخزن سد چومان بسته به دوره بازگشت، بین ۳۰ تا ۴۰ متر متغیر بوده که نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر شرایط مرزی بالادست بر رفتار هیدرولیکی مخزن است.

این نتایج در مجموع، نقش کلیدی سد بالادست را در کاهش انرژی جریان، تسکین پیک سیلاب، افزایش ایمنی پایین‌دست و بهبود زمان هشدار سیلاب نشان می‌دهد. افزون بر این، نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از مدل دوبعدی HEC-RAS بیانگر آن است که چهار روستای پایین‌دست در محدوده خطر مستقیم سیلاب قرار دارند و مدیریت اضطراری در این مناطق باید در اولویت برنامه‌های حفاظتی قرار گیرد. به‌طور کلی، تلفیق داده‌های سنجش‌از‌دور با مدل‌سازی عددی در این پژوهش، رویکردی مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و قابل‌تعمیم برای پهنه‌بندی سیلاب در مناطق کوهستانی با داده‌های محدود ارائه می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در زمینه بهره‌برداری هماهنگ از دو سد متوالی، طراحی سامانه‌های هشدار سریع سیلاب، و اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه در مناطق پرخطر باشد. با این حال، نتایج مدل‌سازی ممکن است تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ذاتی پارامترهای ورودی مانند شماره منحنی (CN)، ضریب زبری مانینگ و دقت مدل رقمی ارتفاعی (DEM) قرار گیرد. بنابراین، تفسیر نتایج باید با احتیاط انجام شود و مطالعات آینده می‌تواند با اعمال تحلیل عدم قطعیت و حساسیت سیستماتیک (مانند روش‌های مونت کارلو یا تحلیل حساسیت جهانی) دقت و اعتبار خروجی‌ها را بیشتر افزایش دهد. برای بهبود برآورد عددی در مطالعات آینده، رویکردهای هیبریدی تلفیق مدل فیزیکی HEC-HMS/HEC-RAS با الگوریتم‌های فراکوشی (مانند GA، PSO یا DE) برای بهینه‌سازی پارامترهای CN و مانینگ، ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین (LSTM یا Random Forest) با خروجی‌های HEC برای پیش‌بینی هیدروگراف‌های سیلابی در حوضه‌های داده‌کم و استفاده از روش‌های ensemble هیبریدی (فیزیکی + داده‌محور) برای کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت پهنه‌بندی در مناطق کوهستانی پیشنهاد می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

کیومرث روشنگر: مدیریت پروژه، طراحی مطالعه و تحلیل نتایج؛ فائزه شبانی: روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و تحلیل نتایج؛ آیدین پناهی: جمع‌آوری داده‌ها، نگارش پیش‌نویس مقاله و بازبینی مقاله؛ جواد طاهرپور: روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و تحلیل نتایج.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از ChatGPT به منظور بازنویسی و ویرایش متن فارسی و انگلیسی استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان مطالب را بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال می‌باشد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

روشنگر، کیومرث؛ پناهی، آیدین و علیرضا زاده صدقیانی، آرمان (۱۴۰۴). پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای جانبی نیم‌دایره‌ای با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر توابع کرنل: رویکردی مقایسه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶(۱۰)، ۲۷۳۵-۲۷۵۰.

روشنگر، کیومرث و پناهی، آیدین (۱۴۰۴). مقایسه تأثیر هندسه کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای بر ضریب دبی سرریزهای جانبی

مستطیلی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بهینه‌شده. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱۵(۲)، ۱-۱۲.

روشنگر، کیومرث و پناهی، آیدین (۱۴۰۴). برآورد ضریب دبی در سرریزهای جانبی مثلثی و دوزنقه‌ای با استفاده از مدل یادگیری ترکیبی SVM بهینه‌شده با الگوریتم‌های HOA و RSA. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۹(۶)، ۸۸۵-۸۹۷.

عزیزیان، اصغر (۱۳۹۷). ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور جهت کاربرد در مدلسازی هیدرولیکی سیلاب. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲)، ۲۱۹-۲۳۱.

REFERENCES

- Agrawal, A., Khan, A., & Raman, B. (2025). Multi-View Data Fusion in Feature and Decision Spaces for Flood Inundation Mapping. *IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2663–2667. <https://doi.org/10.1109/IGARSS55030.2025.11242749>
- Ansarifard, S., Eyvazi, M., Kalantari, M., Mohseni, B., Ghorbanifard, M., Moghaddam, H. J., & Nouri, M. (2024). Simulation of floods under the influence of effective factors in hydraulic and hydrological models using HEC-RAS and MIKE 21. *Discover Water*, 4(1), 92. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00155-0>
- Azizian, A. (2018). Investigating the Application of Remote-Sensing Based DEMs in Hydraulic Simulation of Flood. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 219–231. (In Persian).
- Binns, A. D. (2023). Preparing for severe flooding: Flood risk management research leading to better flood preparedness. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3), e12936. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12936>
- Ceola, S., Domeneghetti, A., & Schumann, G. J. P. (2022). Unraveling Long-Term Flood Risk Dynamics Across the Murray-Darling Basin Using a Large-Scale Hydraulic Model and Satellite Data. *Frontiers in Water*, Volume 3-. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.797259>
- Courty, L. G., Soriano-Monzalvo, J. C., & Pedrozo-Acuña, A. (2019). Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S1), e12550. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12550>
- Dang, H., & Pokhrel, Y. (2024). Evolution of river regimes in the Mekong River basin over 8 decades and the role of dams in recent hydrological extremes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28(14), 3347–3365. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3347-2024>
- Elkhrachy, I. (2015). Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261–278. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>
- Ghahraman, B., & Abkhezh, H. (2004). Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *JSTNAR*, 8(2), 1–14. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-420-en.html>
- Gumindoga, W., Liwonde, C., Rwasoka, D. T., Kowe, P., Maviza, A., Magidi, J., Chikwiramakomo, L., Mavaringana, M. de J. P., & Tshitende, E. (2024). Urban flash floods modeling in Mzuzu City, Malawi based on Sentinel and MODIS data. *Frontiers in Climate*, Volume 6-2024. <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2024.1284437>
- Heimhuber, V., Hannemann, J.-C., & Rieger, W. (2015). Flood Risk Management in Remote and Impoverished Areas—A Case Study of Onaville, Haiti. *Water*, 7(7), 3832–3860. <https://doi.org/10.3390/w7073832>
- Hidayah, E., Halik, G., Indarto, I., & Khaulan, D. W. (2023). Flood hazard mapping of the Welang river, Pasuruan, East Java, Indonesia. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(3), 333–344. <https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2114025>
- Jain, S. K., Beevers, L., Anandhi, A., & Kumar, D. N. (2022). Editorial: Flood Management: Multi-Disciplinary Approaches for Data Observation, Analysis, Forecasting, and Management. *Frontiers in Environmental Science*, Volume 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.888906>
- Joo, J., & Ryu, Y. (2025). Assessment of Downstream Flood Safety Based on Dam Operation Strategies for Extreme Rainfall Events. *J. Korean Soc. Hazard Mitig*, 25(3), 209–215. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2025.25.3.209>
- Kaya, Y. Z., & Üneş, F. (2025). Comparison of three different satellite data on 2D flood modeling using HEC-RAS (5.0.7) software and investigating the improvement ability of the RAS Mapper tool. *Journal of Flood Risk Management*, 18(1), e13046. <https://doi.org/10.1111/jfr3.13046>
- Khaddor, I., Achab, M., Soumali, M. R., Benjbara, A., & Alaoui, A. H. (2021). The impact of the construction of a dam on flood management. *Civil Engineering Journal*, 7(2), 343–356.
- Khan, S. I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K. K., Gourley, J. J., Adler, R. F., Brakenridge, G. R., Policelli, F., Habib, S., & Irwin, D. (2011). Satellite Remote Sensing and Hydrologic Modeling for Flood Inundation Mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 85–95. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2057513>
- Khan, S., Khan, A. U., Alodah, A., Azeem, A., Waqas, M., Nahas, F., Rebouh, N. Y., & Youssef, Y. M. (2025). Climate-driven flood hazard assessment in data-scarce mountainous basins using a GIS-based machine learning and hydrodynamic modelling under CMIP6 SSP scenarios. *Scientific Reports*, 16(1), 1800. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31390-7>
- Khodaei, H., Nasiri Saleh, F., Nobakht Dalir, A., & Zarei, E. (2025). Future flood susceptibility mapping under climate

- and land use change. *Scientific Reports*, 15(1), 12394. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97008-0>
- Khoso, W. A., Waseem, M., Tanoli, M. A., & Baig, F. (2025). Flood risk susceptibility analysis in Larkana district Pakistan using multi criteria decision analysis and geospatial techniques. *Scientific Reports*, 15(1), 13633. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96107-2>
- Mehrpourberney, F., Fazloul, R., Emadi, A., Javaheri, N., & Gholami Sefidkouh, M. A. (2025). Flood Forecasting of the Tajan Watershed Using the Output of the Numerical Weather Prediction Model (GFS) and the HEC-HMS Hydrological Model. *Jwmr*, 16(1), 59–70. <https://doi.org/10.61882/jwmr.2024.1279>
- Mtamba, J., der Velde, R., Ndomba, P., Zoltán, V., & Mtalo, F. (2015). Use of Radarsat-2 and Landsat TM Images for Spatial Parameterization of Manning's Roughness Coefficient in Hydraulic Modeling. *Remote Sensing*, 7(1), 836–864. <https://doi.org/10.3390/rs70100836>
- Mustafa, A., & Szydłowski, M. (2021). Application of different building representation techniques in HEC-RAS 2-D for urban flood modeling using the Toce River experimental case. *PeerJ*, 9, e11667. <https://doi.org/10.7717/peerj.11667>
- Peker, İ. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. *Sustainability*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- Renu, S., Reddy, B. S., Santhosh, S., Sreelekshmi, Lekshmi, V., Pramada, S. K., & Sridhar, V. (2025). Hydrologic and Hydraulic Modeling for Flood Risk Assessment: A Case Study of Periyar River Basin, Kerala, India. In *Climate* (Vol. 13, Issue 6, p. 129). <https://doi.org/10.3390/cli13060129>
- Roushangar, K., Panahi, A. & Alirezazadeh Sadaghyani, A. (2025). Kernel-driven prediction of discharge coefficient in semi-circular side weirs: a comparative machine learning perspective. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(10), 2735-2750. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.399575.669986> (In Persian).
- Roushangar, K. & Panahi, A. (2025). Comparison of Channel Geometry Effects on Discharge Coefficient of Rectangular Side Weirs in Rectangular and Trapezoidal Channels Using Optimized Machine Learning Models. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 15(2), 1-12. (In Persian).
- Roushangar, K. and Panahi, A. (2025). Hybrid learning-based estimation of discharge coefficient in triangular and trapezoidal side weirs using SVM optimized by HOA and RSA. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(6), 885-897. <https://doi.org/10.22034/idj.2025.537571.2616> (In Persian).
- Sekine, T., Yamanaka, A., Eda, T., Udagawa, T., & Busto, M. (2024). A GAN-Based SAR-Optical Data Fusion Approach for Enhanced Flood Mapping. *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 8958–8962. <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10641093>
- Tavakoly, A. A., Gutenson, J. L., Lewis, J. W., Follum, M. L., Rajib, A., LaHatte, W. C., & Hamilton, C. O. (2021). Direct Integration of Numerous Dams and Reservoirs Outflow in Continental Scale Hydrologic Modeling. *Water Resources Research*, 57(9), e2020WR029544. <https://doi.org/10.1029/2020WR029544>
- Uuemaa, E., Ahi, S., Montibeller, B., Muru, M., & Kmoch, A. (2020). Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/rs12213482>
- Venter, Z. S., Barton, D. N., Chakraborty, T., Simensen, T., & Singh, G. (2022). Global 10 m Land Use Land Cover Datasets: A Comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover. *Remote Sensing*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/rs14164101>
- Xafoulis, N., Farsiroto, E., Kotsopoulos, S., & Psilovikos, A. (2026). Evaluation of a Computational Simulation Approach Combining GIS, 2D Hydraulic Software, and Deep Learning Technique for River Flood Extent Mapping. In *Hydrology* (Vol. 13, Issue 1, p. 26). <https://doi.org/10.3390/hydrology13010026>
- Youssef, A. M., Pradhan, B., & Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 611–623. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0551-1>
- Zhang, X., Shi, W., & Lv, Z. (2019). Uncertainty Assessment in Multitemporal Land Use/Cover Mapping with Classification System Semantic Heterogeneity. *Remote Sensing*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/rs11212509>