

Research Paper



Identification of Flood-Prone Areas in the Sefidrud River Basin Using Remote Sensing-Based Hydraulic Models and Geomorphological Evidences



Khabat Amani¹, Seiyed Mossa Hosseini^{2*}, Mojtabi Yamani³, Mehran Maghsoudi⁴

1- PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. khabat.amani@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. smhosseini@ut.ac.ir

3- Professor of Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. myamani@ut.ac.ir

4- Professor of Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. maghsoud@ut.ac.ir

Keywords

Flood, Hydraulic Modeling, Geomorphology, Digital Elevation Models (DEMs), Sefidrud River Northern Iran.

Received: 2024/10/29

Accepted: 2025/01/18

Published: 2025/07/21

ABSTRACT

Flood is one of the most pervasive natural hazards, and given its significance, various strategies have been implemented to mitigate its risks. Among these strategies is the creation of flood zoning maps, which identify vulnerable areas at risk. There are various methods for determining flood-prone areas, including hydraulic and geomorphological approaches. Due to the extensive nature of flood-prone watersheds, 1:1000 scale maps are either not available in all regions or require significant time and resources to produce. This study aims to identify optimal methods for determining flood-prone areas in regions lacking topographic data. It examines three separate 25-kilometer segments of the Sefidrud River: Yasavol in Kurdistan Province, Gilvan in Zanjan Province, and Astaneh in Gilan Province, using hydraulic and geomorphological approaches. The hydraulic method was implemented using a 1:1000 scale topographic map and two freely available remote sensing DEMs: SRTM (30 meters) and ALOS PALSAR (12/5 meters) in the HEC-RAS software. The geomorphological identification of flood-prone areas was conducted based on aerial photographs, both old and new satellite images, field visits, and evidence of past flooding. The results indicate that in mountainous areas, in the absence of high-resolution spatial data, the use of 30-meter SRTM and 12/5-meter ALOS PALSAR DEMs provides acceptable accuracy for delineating flood-prone areas, provided that the modeling results are refined and adjusted based on expert opinions and field observations. The comparison of the 30-meter SRTM and 12/5-meter ALOS PALSAR DEMs indicates that in mountainous and hilly areas, both DEMs yield relatively similar results. However, the 30-meter SRTM DEM, particularly in mid-term and long-term return periods, produces more favorable outcomes. In flat and lowland areas, both remote sensing DEMs do not provide satisfactory results, and the use of geomorphological methods for delineating flood-prone areas yields higher accuracy.

* Corresponding Author: Seiyed Mossa Hosseini

E-mail: smhosseini@ut.ac.ir

How to cite this article:: Amani, Khabat; Hosseini, Seiyed Mossa; Yamani, Mojtabi; Maghsoudi, Mehran (2025). Identification of Flood-Prone Areas in the Sefidrud River Basin Using Remote Sensing-Based Hydraulic Models and Geomorphological Evidences. *Hydrogeomorphology*, 12(43): 58 – 80.

DOI [10.22034/hyd.2025.64251.1762](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64251.1762)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Introduction

Flood is one of the most destructive natural hazards, causing extensive financial and human losses (Perucca & Angilieri, 2011; Tierney et al., 2001). This hazard has the potential to disrupt civilizations and alter livelihoods (Dehnhardt et al., 2022). Various strategies have been implemented to mitigate flood risks; one such approach is the development of flood susceptibility maps, which identify vulnerable and flood-prone areas (Mukherjee & Singh, 2020). The present study aims to identify optimal methods for flood zoning in areas lacking 1:1000 topographic maps and to delineate flood-prone zones along segments of the Sefidrud River, one of the major rivers in the country, using hydraulic and geomorphological approaches.

Methodology

To conduct this study, hydraulic modeling of the study reaches was initially performed using three digital elevation models (DEMs) as follows: (1) a DEM based on a 1:1000 topographic scale obtained from regional water companies in the respective provinces; (2) a DEM with a 12/5-meter pixel resolution from the ALOS satellite's PALSAR sensor, sourced from the VERTEX ALASKA website; (3) a DEM with a 30-meter pixel resolution from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), sourced from the USGS website. The resulting flood zones were then validated based on the hydraulic modeling derived from the 1:1000 scale topographic data. Subsequently, using a geomorphological approach that considered river course changes, past flood inundation zones, channel and bank morphology, and alluvial terraces, flood-prone areas were identified. These geomorphologically derived flood zones were compared with the hydraulic zones from the 1:1000 scale maps, and the results were presented quantitatively and in graphical form.

Results and Discussion

This study applied both hydraulic and geomorphological methods for flood zoning across three distinct segments of the Sefidrud River, each with varying topography, flood discharge rates, and morphology. The hydraulic method itself relied on three different bases, with a 1-meter resolution DEM used to validate the results. This research is significant for several reasons. First, it employs various hydraulic and geomorphological approaches to delineate flood-prone areas. Second, it examines DEMs with varying pixel resolutions and, interestingly, finds that in some reaches and for certain return periods, larger pixel-sized DEMs produce better results. Third, with access to 1:1000 scale maps, the study validates the results of the various methods, quantifying the degree of alignment of each with reality. Finally, the research investigates segments with differing morphology and topography, concluding which method yields lower error rates for different river types when mapping data is unavailable.

Conclusions

The results indicate that in mountainous areas, the use of 30-meter SRTM and 12/5-meter ALOS PALSAR DEMs provides acceptable accuracy for floodplain delineation in the absence of topographic data, provided that results are refined and corrected based on expert opinions and field observations. However, in flat areas, where even a 1-meter elevation difference can significantly affect floodplain extent, the use of low-accuracy DEMs is not recommended. In lowland and plain regions, such as the Astaneh reach in this study, freely available DEMs do not yield satisfactory results. In the absence of topographic data, geomorphological methods for floodplain delineation are more effective in these areas.

مقاله پژوهشی



شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر حوضه رودخانه سفیدرود با مدل هیدرولیکی مبتنی بر داده‌های سنجش از دوری و شواهد ژئومورفولوژیکی



خبات امانی^۱، سید موسی حسینی^{۲*}، مجتبی یمانی^۳، مهران مقصودی^۴

۱- دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. khabat.amani@ut.ac.ir

۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. smhosseini@ut.ac.ir

۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. myamani@ut.ac.ir

۴- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. maghsood@ut.ac.ir

چکیده

کلیدواژه‌ها

سیلاب یکی از فراگیرترین مخاطرات طبیعی است و با توجه به اهمیت آن راهکارهای مختلفی برای کاهش خطر آن اتخاذ شده است؛ از جمله این راهکارها تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیل است که مناطق آسیب‌پذیر و مستعد خطر را شناسایی می‌کند. روش‌های متعددی برای تعیین پهنه‌های سیل‌گیر وجود دارند که از آن جمله می‌توان روش‌های هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی را نام برد. به دلیل وسعت بالای حوضه عملکرد سیلاب‌ها، تهیه نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰ در تمامی نواحی وجود ندارد یا هزینه و زمان زیادی را می‌طلبد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی روش‌های بهینه تعیین پهنه‌های سیل‌گیر در نواحی فاقد داده‌های نقشه‌برداری شده، سه بازه ۲۵ کیلومتری مجزا از رودخانه سفیدرود به نام‌های یساول در استان کردستان، گیلوان در استان زنجان و آستانه در استان گیلان را با استفاده از روش‌های هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی مورد مطالعه قرار داده است. روش هیدرولیکی با مبنا قرار دادن نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ و دو DEM سنجش از دوری رایگان SRTM (۳۰ متر) و ALOS PALSAR (۱۲/۵ متر) در نرم افزار HEC-RAS انجام شد. شناسایی ژئومورفولوژیکی پهنه‌های سیلابی نیز با اتکا بر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای قدیم و جدید، بازدیدهای میدانی و آثار سیلاب‌های گذشته انجام شد. نتایج حاصل مؤید آن است که در نواحی کوهستانی در صورت عدم وجود داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا، استفاده از DEM های ۳۰ متر SRTM و ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR دقت قابل قبولی در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر دارد؛ به شرطی که نتایج مدل‌سازی با استناد به نظرات کارشناسی و بازدیدهای میدانی تدقیق و اصلاح گردد. مقایسه DEM های ۳۰ متر SRTM و ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR نشان می‌دهد که در نواحی کوهستانی و تپه‌ماهوری هر دو DEM نتایج نسبتاً یکسانی را به دست داده‌اند اما DEM ۳۰ متر SRTM به ویژه در دوره بازگشت‌های میان‌مدت و بلندمدت نتایج مطلوب‌تری را دارا می‌باشد. در نواحی دشتی و جلگه‌ای، دو DEM سنجش از دوری نتایج مطلوب ارائه نداده و استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی در تعیین پهنه‌های سیلابی دقت بالاتری دارد.

سیلاب، مدل‌سازی هیدرولیکی، ژئومورفولوژی، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، رودخانه سفیدرود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

*نویسنده مسئول: سید موسی حسینی
رایانامه: smhosseini@ut.ac.ir

رجاع به این مقاله: امانی، خبات؛ حسینی، سید موسی؛ یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران (۱۴۰۳).

شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر حوضه رودخانه سفیدرود با مدل هیدرولیکی مبتنی بر داده‌های سنجش از دوری و شواهد ژئومورفولوژیکی. هیدروژئومورفولوژی، ۱۲(۴۳): 80-34.

شناسه دیجیتال مقاله: [hyd.2025.64251.1762/10.22034](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64251.1762)



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

سیل یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی با خسارات مالی و جانی گسترده است (تیرنی^۱ و همکاران، ۲۰۰۱: ۲۲۲؛ پروکا و آنجیلیری^۲، ۲۰۱۱: ۸۳). در دهه گذشته، سیلاب‌ها میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار داده‌اند و بیش از ۴۰۰ میلیارد دلار خسارت به بار آورده‌اند (آرتس^۳، ۲۰۲۰: ۲۹۳). به عبارتی این مخاطره ممکن است تمدن‌ها را مختل کند و معیشت را تغییر دهد (دهنهارد^۴ و همکاران، ۲۰۲۲: ۵۵). راهکارهای مختلفی برای پیشگیری از خطرات سیل اتخاذ شده است؛ یکی از این استراتژی‌ها تهیه نقشه حساسیت سیل است که مناطق آسیب‌پذیر و مستعد سیل را شناسایی می‌کند (موخرجی و سینگ^۵، ۲۰۲۰: ۶۵۹). نقشه خطر سیل مناطقی را نشان می‌دهد که ممکن است در معرض سطوح مختلف خطر سیل قرار داشته باشند و می‌تواند به عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیری‌های فضایی و برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گیرد (گریونگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۶: ۷۴۵). این نقشه همچنین به شناسایی زودهنگام خطرات، افزایش آگاهی عمومی (دموئل^۷ و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۹۲) و به‌طور کلی به عنوان ابزاری مهم در رابطه با ریسک سیل و مبنای علمی برای مدیریت بلایای سیل به کار می‌رود. از این رو، در حوزه‌های مختلفی مانند مدیریت دشت‌های سیلابی، بیمه سیل و سیستم‌های هشداردهنده به طور گسترده‌ای کاربرد دارد (وانگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۱۳۴). سیلاب‌ها تحت تأثیر چندین پارامتر محیطی مختلف به وجود می‌آیند (جانی‌زاده^۹ و همکاران، ۲۰۲۱: ۲)؛ این پارامترها شامل پارامترهای ژئومورفولوژیکی، هواشناسی و هیدرولوژیکی هستند و می‌توانند توسط فعالیت‌های انسانی تشدید شوند (روی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۴۱۱). مدلسازی دقیق سیلاب‌ها نقش مهمی در مدیریت بهتر و صحیح‌تر سیلاب‌ها و کاهش ریسک‌های مرتبط با آن‌ها ایفا می‌کند (موثوسامی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۱: ۶۵۰). پیشرفت‌های اخیر در محاسبات کارآمد، روش‌های نوآورانه نقشه‌برداری توپوگرافی و روش‌های عددی قابل اعتمادتر به‌طور قابل توجهی مدلسازی سیلاب‌ها را بهبود بخشیده است (کستابیل^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). اما آنچه مسلم است این که کیفیت و به روز بودن مدل‌ها و محاسبات مربوطه زمانی می‌تواند نتایج مطلوبی را به دست دهد که ورودی‌های مناسب نیز به آن‌ها داده شود؛ در غیر اینصورت نتایج بسته به میزان خطا و اشکال ورودی‌ها می‌تواند با واقعیت مغایر باشد. چرا که سیلاب یک پدیده پیچیده است که توسط بسیاری از عوامل فیزیکی کنترل می‌شود و به همین دلیل، پیش‌بینی آن هم‌چنان چالش برانگیز بوده (کلانتری و همکاران، ۲۰۱۴: ۷۱؛ کائو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۶: ۱) و مستلزم به کارگیری روش‌های کارآمد و انجام تحلیل‌های مناسب می‌باشد (کلاک و پاپنبرگر^{۱۴}، سیل‌گیر در نواحی فاقد داده‌های نقشه‌برداری یک چالش مهم در مدیریت خطرات سیلاب است، به‌ویژه در مناطق ۲۰۰۹: ۱۲۹).

تعیین پهنه‌های

دورافتاده یا کشورهای در حال توسعه که اطلاعات توپوگرافی دقیقی در دسترس نیست. برای غلبه بر این چالش، از روش‌های جایگزین و تکنیک‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) است که با داده‌های ماهواره‌ای به دست می‌آید. علاوه بر DEM، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی نیز می‌توانند اطلاعاتی درباره تغییرات ژئومورفولوژیک

¹ Tierney

² Perucca and Angilieri

³ Aerts

⁴ Dehnhardt

⁵ Mukherjee & Singh

⁶ Greiving

⁷ De Moel

⁸ Wang

⁹ Janizadeh

¹⁰ Roy

¹¹ Muthusamy

¹² Costabile

¹³ Cao

¹⁴ Cloke and Pappenberger

و الگوهای آب‌گرفتگی در سیلاب‌های قبلی را ارائه دهند. بررسی این تصاویر با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به تحلیل‌گران کمک می‌کند تا الگوهای سیلاب و مناطق مستعد سیلاب‌گیری را شناسایی کنند.

برای درک بهتر ریسک سیلاب، تهیه نقشه‌های پهنه‌های آب‌گرفتگی سیل^۱ از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و ارزیابی عمق‌های مختلف سیل برای واسنجی و محاسبه شدت خطرات آن کمک می‌کند (یو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱: ۹۰۷). مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)^۳ به عنوان یک عنصر مهم در کنترل دقت مدل‌های هیدرودینامیکی شناخته شده‌اند (کنوارد^۴ و همکاران، ۲۰۰۰: ۴۳۶؛ کابی^۵ و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۲۳).

DEM‌های با امکان دسترسی آزاد به‌طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی و پهنه‌بندی سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند (پدروزو آکیونا و همکاران^۶، ۲۰۱۵: ۱۷۸)؛ با این حال، دقت و قدرت تفکیک مکانی نسبتاً ضعیف آن‌ها در حال حاضر به‌طور قابل توجهی توانایی تخمین مناطق تحت تأثیر سیل و ریسک‌های مرتبط را محدود می‌کند (سامپسون^۷ و همکاران، ۲۰۱۶: ۳). از دیگر سو هزینه بالای انجام عملیات نقشه‌برداری و تهیه نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰ و ۱/۲۰۰۰ و همچنین زمان بر بودن تهیه آن، استفاده از DEM‌های با دسترسی آزاد را در برخی نواحی توجیه می‌کند.

مدل‌سازی سیل می‌تواند با استفاده از روش‌های متعددی انجام شود که به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های زمین‌شناسی - ژئومورفولوژیکی و روش‌های هیدرولوژیکی - هیدرولیکی (لاسترا^۸ و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۷۹). دسته اول مبتنی بر بررسی عکس‌های هوایی و انجام عملیات میدانی برای شناسایی شواهد سیلابی است (بیکر^۹ و همکاران، ۱۹۸۸: ۱۸)؛ در حالی که روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، جریان‌های اوج را برای رویدادهای خاص یا برای دوره‌های بازگشت‌های مختلف محاسبه می‌کنند و به این ترتیب وسعت سطح آب را به دست می‌آورند (وتر^{۱۰}، ۲۰۰۲: ۱۴۱۴).

مدل‌های هیدرولیکی معمولاً با استفاده از معادلات حاکم بر جریان آب، مانند معادلات ناویر-استوکس، برای شبیه‌سازی جریان‌های آبی و توزیع سیلاب در مناطق مختلف توسعه داده می‌شوند. یکی از رایج‌ترین این مدل‌ها، مدل HEC-RAS است که به‌واسطه ساختار کاربرپسند و مبتنی بر GIS از محبوبیت و کاربرد زیادی بین محققین و مهندسين برخوردار می‌باشد (عزیزیان، ۱۳۹۷: ۲۰۱۴). با توجه به محدودیت‌های مدل یک بعدی (فالتز و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۳: ۱۳۳۴؛ هوریت و باتس^{۱۲}، ۲۰۰۲: ۹۰) و به‌منظور اجتناب از این محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌ها، مطالعات اخیر پیشنهاد می‌کنند که از مدل‌های دو بعدی کامل با جزئیات فنی مناسب استفاده شود (شوستیکووا^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۷۷۲؛ مورسی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۳۵؛ نقل از پاریزی و همکاران، ۲۰۲۲: ۳).

در نواحی که اطلاعات تاریخی از سیلاب‌های گذشته نیز در دسترس نیست، می‌توان از شواهد ژئومورفولوژیک مانند تراس‌های رودخانه‌ای، رسوبات سیلابی و کانال‌های قدیمی برای شناسایی مناطق با پتانسیل سیلاب‌گیری استفاده کرد. این شواهد به‌ویژه در مناطقی که از نظر علمی کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی از وقوع سیلاب‌های گذشته به کار گرفته شوند و پهنه‌های خطر را مشخص کنند. به‌کارگیری این رویکردهای ترکیبی در نواحی فاقد داده‌های نقشه‌برداری، امکان ارزیابی و مدیریت سیلاب را فراهم کرده و به برنامه‌ریزی‌های محلی کمک می‌کند.

¹ Flood Inundation Map

² Xu

³ Digital Elevation Model

⁴ Kenward

⁵ Cobby

⁶ Pedrozo-Acuña

⁷ Sampson

⁸ Lastra

⁹ Baker

¹⁰ Wheater

¹¹ Falter

¹² Horritt and Bates

¹³ Shustikov

¹⁴ Morsy

روش های ژئومورفولوژیکی برای مطالعه سیلاب ها به تجزیه و تحلیل شکل و ساختار ریخت شناسی مناطق سیلابی و بررسی تعاملات آن ها با جریان آب می پردازند. این روش ها بر اساس ویژگی های فیزیوگرافیک مانند طول دامنه، شکل آن و جهت شیب، پوشش گیاهی، نوع خاک و الگوی زهکشی بر سیلاب حوضه های آبریز تأثیر می گذارند (نیری و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۶). لذا تغییر در هر یک از این عناصر چه به صورت طبیعی (سیلاب ها) و چه به صورت دخالت های انسانی می تواند با واکنش همراه باشد (اسماعیلی و نوری زاده نشلی، ۱۴۰۳: ۴۴). از آنجا که هیدرولوژی و ژئومورفولوژی به شدت با یکدیگر در تعامل هستند، استفاده از روش های ترکیبی می تواند به درک بهتر فرکانس و شدت سیلاب ها کمک کند. تحقیقات نشان داده است که در مناطق با شرایط ژئومورفولوژیک متفاوت، روش های هیدرولوژیکی مطالعات سیلاب به تنهایی ممکن است با عدم قطعیت همراه باشد؛ بنابراین، رویکرد ترکیبی موسوم به روش هیدروژئومورفولوژیک پیشنهاد شده است که می تواند در تهیه نقشه های خطر سیلاب و بهبود دقت پیش بینی ها موثر باشد (سیدله و اونها^۱، ۲۰۰۴: ۵۹۹).

در ایران نیز در سال ۲۰۱۹، رویدادهای سیلابی ۲۵ استان از ۳۱ استان کشور را تحت تأثیر قرار داده و بیش از ۷۷ کشته و خسارتی به ارزش ۲۲ میلیارد دلار به همراه داشته است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۴۶)؛ با این وجود درصد قابل توجهی از رودخانه ها و مسیل های آن فاقد نقشه های با دقت بالا و مقیاس ۱/۱۰۰۰ و ۱/۲۰۰۰ هستند. بعلاوه با افزایش جمعیت و به تبع آن نیاز به فضا برای توسعه کاربری های مختلف، بستر رودخانه ها نیز مورد توجه قرار گرفته و کاربری های مختلفی برای آن در نظر گرفته شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۷). بنابراین لزوم مطالعه خطر سیل و تهیه نقشه های ریسک آن با استفاده از روش های جایگزین، بیش از پیش احساس می شود که از آن جمله می توان به استفاده از DEM های رایگان در دسترس عموم و همچنین استفاده از روش های بصری نظیر عکس های هوایی و تصاویر ماهواره ای قدیم و جدید را برشمرد.

رویدادهای سیلابی در حوضه رودخانه سفیدرود به طور تاریخی خسارات قابل توجهی به زیرساخت ها، کشاورزی و سکونتگاه های انسانی وارد کرده اند، که این امر نیاز فوری به بهبود قابلیت های پیش بینی سیلاب را برجسته می کند (چفجیری^۲ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). با این وجود تاکنون مطالعات اندکی در مورد سیلاب این رودخانه انجام شده است. لذا توسعه یک روش ارزیابی مؤثر خطر سیل با خروجی هایی به صورت نقشه های تصویری خطر سیل بسیار ضروری به نظر می رسد (چن^۳، ۲۰۲۲: ۲۳). بعلاوه به دلیل گذر این رودخانه از محدوده های مختلف کوهستانی خشن، ملایم و تپه ماهوری و همچنین ورود به محدوده جلگه ای و هموار موجب شده تا نتایج پژوهش حاضر بتواند بر بسیاری از نواحی جغرافیایی دیگر تعمیم یابد. لذا پژوهش حاضر با اهدافی از جمله شناسایی روش های بهینه پهنه بندی سیلاب در نواحی فاقد نقشه های توپوگرافی ۱/۱۰۰۰، مقایسه DEM های با اندازه پیکسل متفاوت در تهیه نقشه پهنه های سیل گیر و تعیین پهنه های سیل گیر بازه هایی از رودخانه سفیدرود به عنوان یکی از رودخانه های مهم کشور با استفاده از روش های هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی انجام می شود.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه سفیدرود دومین رودخانه پرآب ایران است که از کوه های چهل چشمه در استان کردستان سرچشمه می گیرد و در استان کردستان پس از دریافت شاخه تروال که آب های سطحی شهرستان های قروه و دهگلان را زهکشی می کند در جهت شرقی به سمت استان زنجان امتداد می یابد. در بدو ورود به استان زنجان به سمت شمال غربی تغییر جهت داده و به سمت استان آذربایجان غربی متمایل می شود. در میانه رودهای دیگری به نام قرانقوش چای، میانه چای، هشت رودچای، جریانات سطحی کوه سهند و همچنین بزغوش به آن می پیوندند و سپس به سمت جنوب شرقی تغییر جهت می دهد. پس از دریافت شاخه زنجان رود به تنگه منجیل می رسد؛ تا این

¹ Sidle and Onda

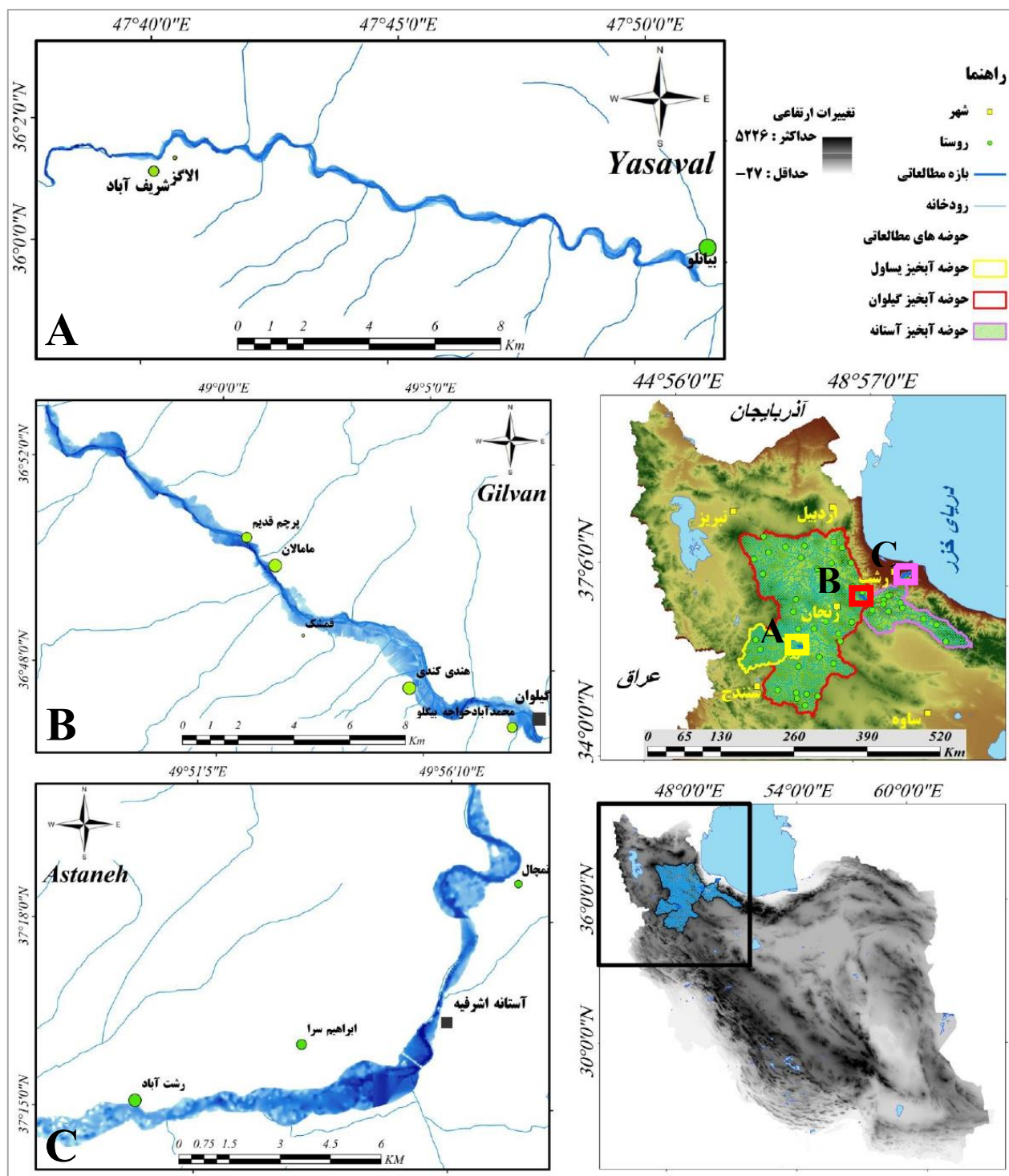
³ Chen

² Chafjiri

نقطه رودخانه مذکور با نام قزل اوزن شناخته می‌شود. در این محل شاخه دیگری به نام شاهرود که از کوه‌های طالقان سرچشمه می‌گیرد و طول تقریبی آن تا منجیل حدود ۲۳۰ کیلومتر است را دریافت می‌نماید.

از محل تلاقی رودخانه‌های شاهرود از جنوب شرقی و قزل اوزن از شمال غربی در محل تنگ منجیل به بعد رودخانه سفیدرود نامیده می‌شود. در مجاورت شهر منجیل و ۷۵ کیلومتری جنوب شهر رشت سد مخزنی سفیدرود در سال ۱۳۴۰ بر روی این رودخانه ساخته شده که دارای ارتفاع ۸۶ متر از بستر رودخانه بوده و مساحت حوضه آبریز بالادست آن ۵۶۲۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان). سد سفیدرود از نوع سدهای بتنی پایه‌دار است که در زمان بهره‌برداری، حجم مخزن تقریباً ۱/۸ میلیارد متر مکعب بوده که به دلیل رسوب‌گذاری تا حدود ۱/۱۶ میلیارد متر مکعب رسیده است (ترکمانزاد و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۸). پس از سد، رودخانه با پیوستن شاخه‌هایی که اصلی‌ترین آن‌ها عبارتند از آبرود، سیاه رودبار، تویسن و آبراهه شلی به منطقه تجمعی می‌شود. در نهایت شعبه اصلی این رود از طریق صدها کانال و آبراه زراعی در منطقه حسن کیاده به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه با میانگین آبدهی ۵۲۰۰ میلیون متر مکعب در سال به عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه در پهنه جنوبی دریای خزر شناخته می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۳) که طول آن از دریای خزر تا بلندترین خط‌الرأس در استان کردستان حدود ۸۰۰ کیلومتر می‌باشد.

در پژوهش حاضر سه بازه مجزا از رودخانه سفیدرود مورد بررسی قرار گرفته است؛ در انتخاب این سه بازه ملاک‌هایی از جمله تنوع مورفولوژیک و توپوگرافیک بارز آن‌ها، مساحت‌های متفاوت حوضه‌های آبخیز بالادست آن‌ها، تنوع کاربری‌های اراضی، وجود ایستگاه هیدرومتری و همچنین تکمیل و طولانی بودن آمار آن‌ها و غیره مد نظر بوده است. ایستگاه‌های هیدرومتری عبارتند از یساول - بیانلو و گیلوان بر روی رودخانه قزل اوزن و ایستگاه آستانه در محدوده استان گیلان بر روی رودخانه سفیدرود (شکل ۱). لذا مجموع بازه‌های انتخابی رودخانه سفیدرود در پژوهش حاضر ۷۵ کیلومتر در سه بازه مجزا واقع در استان‌های کردستان، زنجان و گیلان می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت حوضه سفیدرود و سه بازه مورد بررسی در شمال غرب کشور

Figure (1): Location of the Sefidrud Basin and the three study reaches in the northwest of the country.

مواد و روش‌ها

داده‌ها، مواد و متغیرهای مورد بررسی پژوهش حاضر شامل آمار ایستگاه‌های هیدرومتری یساول - بیانلو، گیلوان و آستانه تهیه شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران، عکس‌های هوایی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ مربوط به سال ۱۳۴۷ بازه‌های مطالعاتی تهیه شده از سازمان نقشه برداری کشور، تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال ۱۹۶۴ ماهواره CRONA متعلق به نیروی هوایی ایالات متحده که تصاویر مربوط

به سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۷۲ نواحی‌ای از شمال، غرب و مرکز ایران را با میانگین قدرت تفکیک مکانی مکانی ۷/۵ متر دارا هستند؛ بعلاوه سه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) بشرح ذیل می‌باشد:

۱: مدل برگرفته از توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ تهیه شده در دهه ۸۰ شمسی از شرکت‌های آب منطقه‌ای استان‌های کردستان، زنجان و گیلان.

۲: مدل رقومی ارتفاع با پیکسل سایز ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS سنجنده PALSAR برگرفته از سایت VERTEX ALASKA مربوط به سال ۲۰۱۲ میلادی. ماهواره آلوس ALOS (نام دیگر آن به ژاپنی دایچی^۱) جز سری ماهواره‌های مشاهدات زمینی دسته‌بندی شده که به وسیله سازمان JAXA اکتشافات هوافضای ژاپن به فضا پرتاب شده است. این ماهواره دارای سه سنجنده AVNIR, PRISM و PALSAR است که DEM‌های مورد استفاده پژوهش حاضر متعلق به سنجنده PALSAR می‌باشند که با اندازه پیکسل ۱۲/۵ متر در دسترس است. هرچند این ماهواره DEM‌های با سطح پوششی نسبتاً خوب و قدرت تفکیک مکانی بالایی را تهیه می‌کند و رایگان نیز در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد؛ اما تمامی نواحی را پوشش نمی‌دهد و در مطالعات با محدوده مکانی با مقیاس بزرگ ممکن است کل محدوده را شامل نشود.

۳: مدل رقومی ارتفاع با پیکسل سایز ۳۰ متر مربوط به ماهواره SRTM^۲ برگرفته از سایت USGS مربوط به سال ۲۰۱۲ میلادی. ماهواره SRTM که توسط ناسا و آژانس ملی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی آمریکا در سال ۲۰۰۰ با هدف تهیه‌ی مدل ارتفاعی دیجیتالی از سطح زمین ارسال شد. SRTM از فناوری رادار دهانه ترکیبی^۳ استفاده کرد که قابلیت اندازه‌گیری ارتفاع سطح زمین با دقت بالا را دارد. DEM‌های ۳۰ متری SRTM به دلیل وضوح بالا و پوشش گسترده کاربرد بسیار زیادی در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های مختلف دارند. در پژوهش حاضر DEM‌های ۳۰ متر SRTM برای هر سه بازه مورد مطالعه موجود بود که به عنوان یکی از مبنای مدل‌سازی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت.

جهت انجام مدل‌سازی‌های هیدرولیکی ابتدا با استفاده از الحاقیه HEC GEO RAS در نرم افزار ARC GIS اقدام به ترسیم موارد لازم برای مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب از جمله مسیر رودخانه، سیلاب‌دشت‌ها، جهت جریان و مقاطع عرضی شد. میانگین فاصله مقاطع عرضی بسته به تکامل یافتگی کانال رودخانه و تغییرات مورفولوژی بستر و کناره‌ها در بازه یساول ۲۵ متر، در بازه گیلوان ۵۰ متر و در بازه آستانه ۱۲۷ متر در نظر گرفته شد. سپس لایه‌های تهیه شده به نرم افزار HEC-RAS منتقل شده و با وارد نمودن سایر پارامترهای لازم از جمله دبی سیلابی در دوره بازگشت‌های مورد نظر، ضریب زبری مانینگ و شرایط مرزی کانال اقدام به تهیه مدل هیدرولیکی شده است. حداکثر دبی سیلابی در دوره بازگشت‌های مختلف در نرم افزار Easy fit و بر مبنای توزیع آماری GEV^۴ برآورد شد. ضرایب زبری مانینگ نیز با استفاده از روش Cowan برای کانال رودخانه و سیلاب‌دشت‌های سمت راست و چپ آن تخمین زده شد و شرایط مرزی کانال برای بالادست و پائین‌دست در شرایط عمق نرمال و با استفاده از نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰ تهیه شده از شرکت‌های آب منطقه‌ای منظور شد. سپس مدل‌سازی هیدرولیکی در سه مرحله برای DEM‌های مورد استفاده به تفکیک بازه‌های مطالعاتی انجام شد و نتایج به صورت پهنه‌های سیلابی در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰۰ ساله به نرم افزار ARC GIS منتقل شد و مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پهنه‌های حاصل از DEM با دقت ۱ متری به عنوان مبنای صحت‌سنجی دو نوع DEM دیگر مورد استفاده قرار گرفت؛ همچنین

^۱ DAICHI^۲ Shuttle Radar Topography Mission^۳ SAR^۴ Generalize Extreme Value

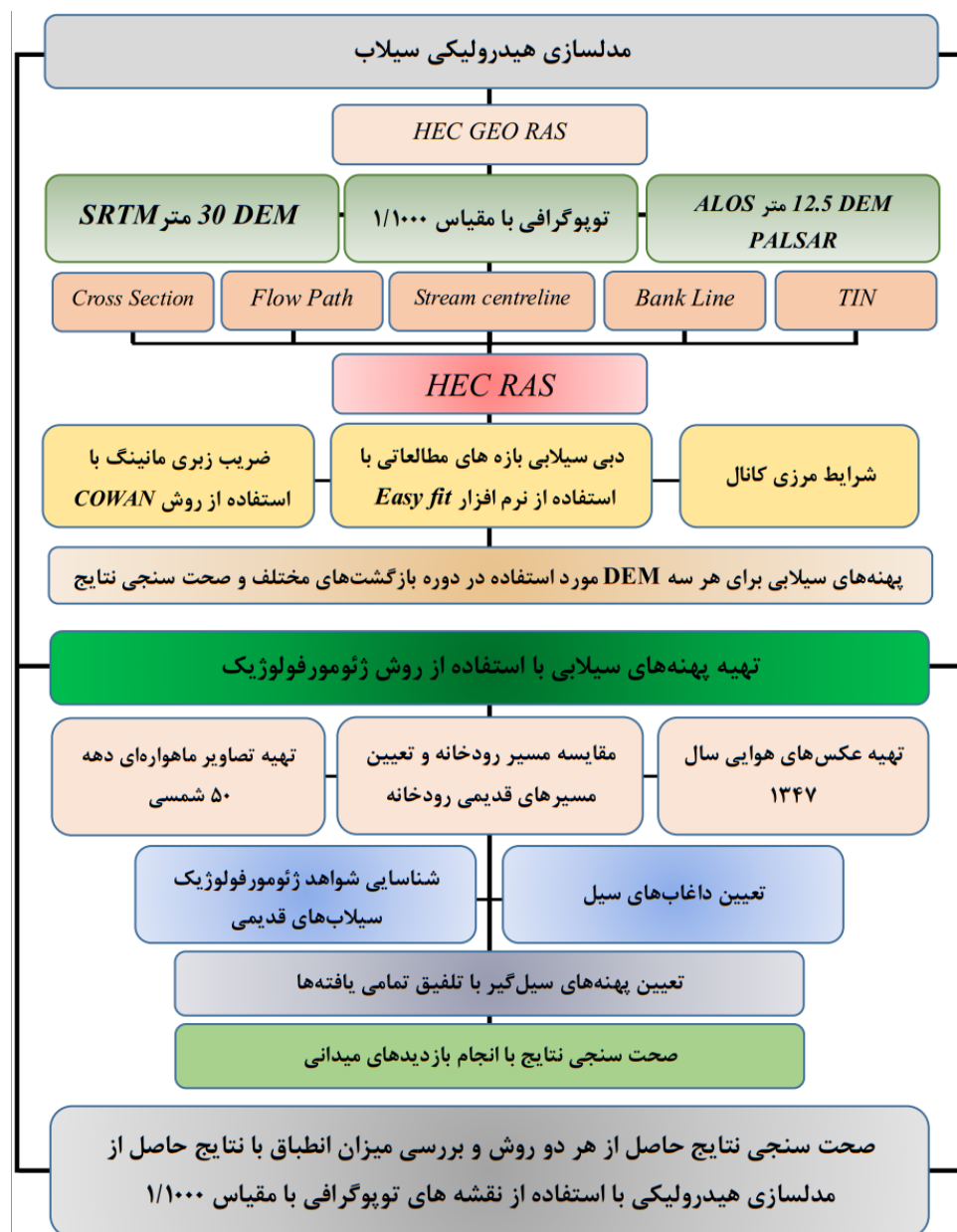
برای محاسبه پهنه‌های مشترک با آن از دستور Intersect استفاده شد. به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از پهنه‌بندی بر مبنای DEM‌های مختلف از شاخص F استفاده شد:

$$F = \frac{A_c \times 2}{A_m \times A_o} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن A_c مساحت پهنه مشترک بین پهنه مورد نظر و پهنه حاصل از نقشه مبنای A_m مساحت پهنه حاصل از پهنه شبیه‌سازی شده و A_o مساحت پهنه سیلابی مشاهده شده می‌باشد؛ مقدار F بین ۰ و ۱ است، که مقدار ۱ نشان‌دهنده هم‌پوشانی کامل بین نتایج مدل و داده‌های واقعی است و مقدار نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت پایین مدل است.

برای تهیه پهنه‌های سیلاب‌گیر با مبنای قرار دادن روش ژئومورفولوژیک نیز چند فاکتور مدنظر بود؛ از جمله تغییرات مسیر رودخانه‌های مطالعاتی، داغاب‌های سیلاب‌های گذشته، مورفولوژی بستر و کناره‌ها و پادگانه‌های آبرفتی. برای شناسایی مسیرهای قدیمی رودخانه از عکس‌های هوایی مربوط به سال ۱۳۴۷ و تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال ۱۹۶۴ استفاده شده است. بدین ترتیب عکس‌ها و تصاویر قدیمی در نرم افزار ARC GIS زمین‌مرجع شده و با مسیر و موقعیت کنونی رودخانه مطابقت داده شده و تغییرات رخ داده در فاصله بین سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۴۰۳ رقمی گردیده است. مسیر و موقعیت داغاب‌های کنونی و مورفولوژی بستر و کناره‌ها نیز با اتکا بر تصاویر ماهواره‌ای جدید مربوط به سال ۱۴۰۳ و همچنین تصاویر نرم افزار Google Earth مشخص شده و در ادامه با انجام بازدیدهای میدانی از هر سه بازه مطالعاتی، صحت‌سنجی و تدقیق شده است. در نهایت با ادغام تمامی یافته‌ها و منابع موجود اقدام به تهیه پهنه سیلابی شده است و پهنه به دست آمده با پهنه‌های حاصل از مدل با مقیاس ۱/۱۰۰۰ هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج به صورت کمی و نمودار ارائه گردیده است. شکل ۲ فلوجارت مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.

طول تقریبی هر کدام از بازه‌های مطالعاتی پژوهش ۲۵ کیلومتر بوده که بازه یساول با توپوگرافی کوهستانی - تپه‌ماهوری در استان کردستان و حدود ارتفاعی ۱۵۰۰ متر از سطح دریا و میانگین عرض ۱۵۰ متر، بازه گیلوان با توپوگرافی کوهستانی در استان زنجان و میانگین ارتفاع ۳۲۰ متر از سطح دریا و میانگین عرض ۳۸۰ متر و بازه آستانه در محدوده جلگه‌ای و هموار استان گیلان و میانگین ارتفاعی ۷- متر از سطح دریا و میانگین عرض ۸۰۰ متر می‌باشد. لازم به توضیح است که انتخاب بازه‌های مطالعاتی تحقیق به گونه‌ای بوده که سه نوع توپوگرافی متفاوت کوهستانی، تپه‌ماهوری و جلگه‌ای را در طول یک رودخانه داشته باشند تا معایب و مزایای هر کدام از DEM‌های مورد استفاده و روش‌های مورد بحث پژوهش در تعیین پهنه‌های سیلابی بهتر مورد بررسی و واسنجی قرار گیرد.



شکل (۲): فلوچارت مراحل تحقیق

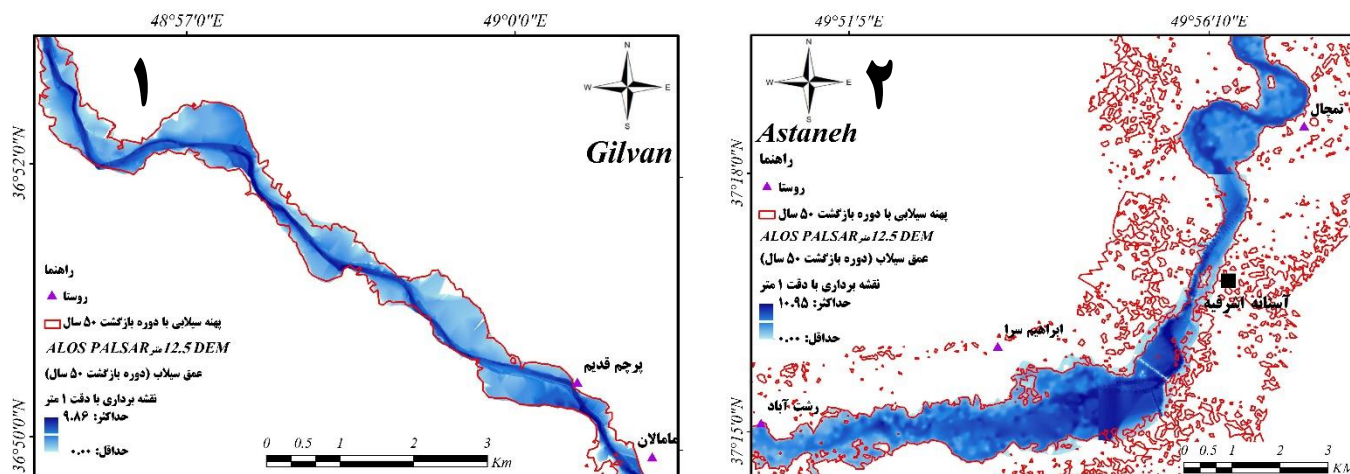
Figure (2): Flowchart of the research considered in this study.

یافته‌ها

پهنه‌بندی سیلاب مبتنی بر DEM با دقت ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR

محدوده DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR در بازه‌های مطالعاتی پژوهش حاضر برای دو بازه گیلوان و آستانه دارای پوشش مناسب بود اما بازه یساول را به طور کامل پوشش نمی‌داد. لذا در این بازه صرفاً DEM ۳۰ متر SRTM مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با داده‌های نقشه‌برداری شده با مقیاس ۱/۱۰۰۰ مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۳ نقشه‌های مقایسه پهنه سیلابی با دوره بازگشت ۵۰ ساله بازه‌های گیلوان و آستانه تهیه شده با DEM با اندازه پیکسل ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR را با داده‌های نقشه‌برداری شده با مقیاس ۱/۱۰۰۰ نشان می‌دهد؛ جهت نمایش بهتر تغییرات در نقشه مبنا به صورت رستر عمق سیلاب را در دوره بازگشت ۵۰ ساله نشان می‌دهد. در مورد بازه یساول چون DEM تهیه شده از ماهواره ALOS نمی‌باشد امکان مقایسه وجود ندارد؛ البته به دلیل توپوگرافی این بازه و محدود شدن کرانه‌ها به وسیله کوهستان و دامنه‌های پرشیب در ابتدای بازه مطالعاتی و سپس به وسیله دامنه‌های کم‌شیب تر در میانه

و انتهای مسیر (شکل ۴) می‌توان در صورت ضرورت DEM‌های با پیکسل سایز بزرگ‌تر را به عنوان مبنای مدل‌سازی‌های هیدرولیکی قرار داد. بازه گیلوان نیز تطابق نسبتاً بالایی دارد؛ اما در بازه جلگه‌ای آستانه این تطابق کاهش می‌یابد و به دلیل هموار بودن کناره‌های رودخانه پهنه سیلابی به صورت نامنظم به کرانه‌های راست و چپ رودخانه سرایت نموده است. جهت کمی‌سازی نتایج و همچنین مقایسه DEM‌های مورد استفاده، در جدول ۱ نتایج به صورت عددی ارائه شده است.



شکل (۳): نقشه‌های مقایسه پهنه‌های سیل‌گیر با استفاده از توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ و DEM با دقت ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR (دوره بازگشت ۵۰ سال) در بازه‌های گیلوان و آستانه

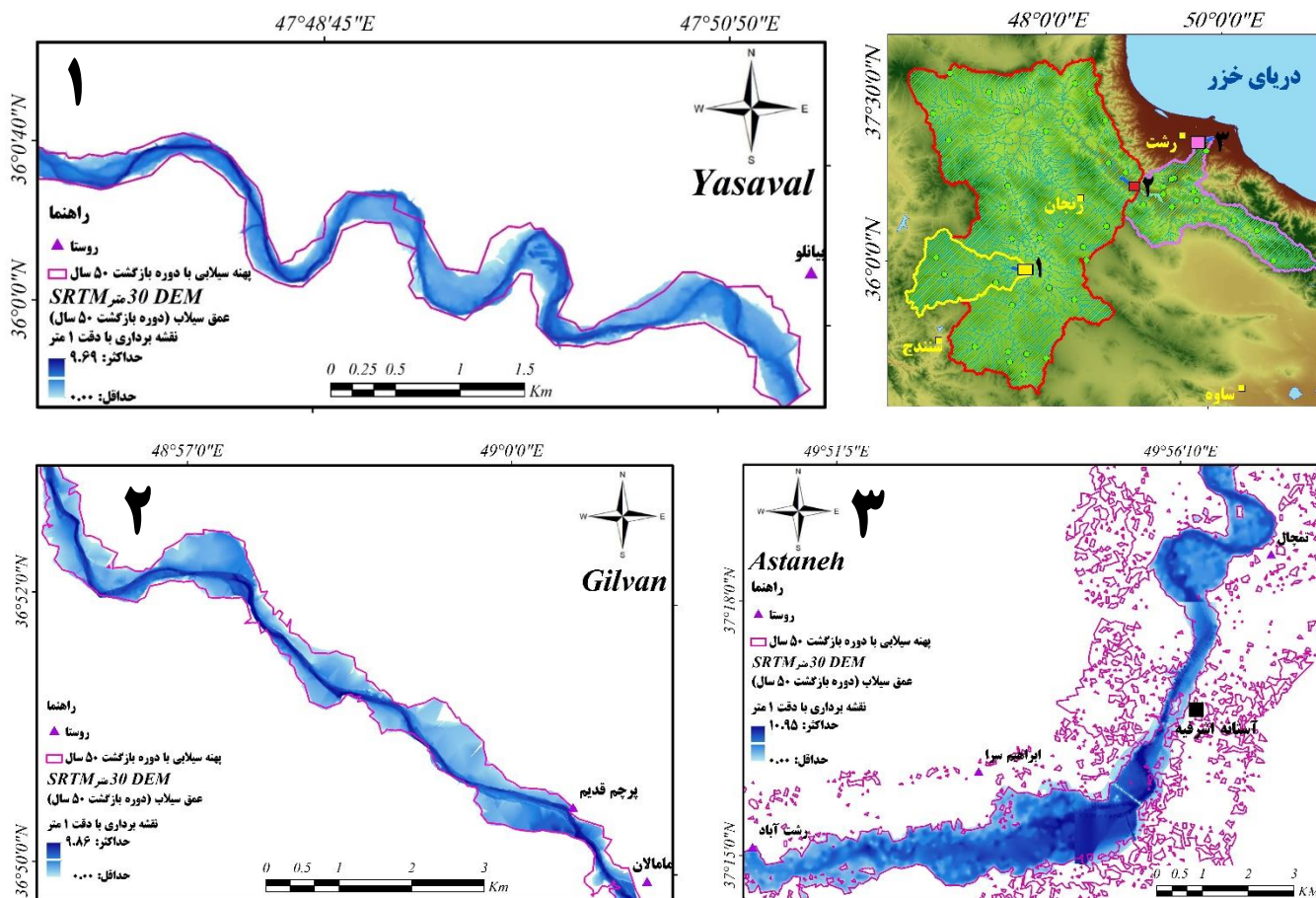
Figure (3): Maps of flood-prone areas using a 1:1000 scale topography and a 12.5-meter resolution DEM (for flood with 50-year return period) in Gilvan and Astaneh segments.

پهنه‌بندی سیلاب مبتنی بر SRTM DEM 30 متر

شکل ۵ مقایسه نقشه‌های پهنه‌های سیلابی با دوره بازگشت ۵۰ ساله حاصل از SRTM DEM را با نقشه مبنای با مقیاس ۱/۱۰۰۰ نشان می‌دهد. مقایسه پهنه‌های حاصل از SRTM DEM بازه یساول با DEM مبنا نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات و قوس‌های رودخانه شبیه به هم است اما در وسعت پهنه‌ها گاهی تفاوت‌های بارزی به چشم می‌خورد. ابتدای بازه مطالعاتی یساول که کوهستانی شدید بوده تطابق پهنه‌ها بیشتر می‌باشد. در بازه گیلوان نیز پهنه‌ها تطابق بالایی را با هم دارند. دلیل اصلی این امر را باید در توپوگرافی کناره‌های رودخانه در بازه گیلوان بررسی نمود؛ زیرا در این بازه پس از دشت سیلابی که هموار می‌باشد، رودخانه به وسیله دامنه‌های نسبتاً پرشیب احاطه شده و پهنه‌های سیلابی را حتی در دوره بازگشت‌های بلندمدت نیز محدود می‌نماید (شکل ۶). اما در بازه آستانه همانند DEM ۱۲/۵ متر ALOS DEM، SRTM DEM نیز نتایج مطلوبی را به دست نمی‌دهد.



شکل (۴): محدود شدن کناره‌های رودخانه به وسیله تپه ماهورهای کم شیب در منتهی الیه بازه مطالعاتی یساول
Figure (4): Restriction of the riverbanks by gently sloping hills at the downstream of the Yasaval study reach.



شکل (۵): نقشه‌های مقایسه پهنه‌های سیل گیر با استفاده از توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ و ۳۰ متر SRTM (دوره بازگشت ۵۰ سال)

Figure (5): Maps of flood-prone areas using a 1:1000 scale topography and a 30-meter SRTM DEM (for flood with 50-year return period).



شکل (۶): شیب زیاد دامنه‌ها در منتهی‌الیه سیلاب‌دشت رودخانه در بازه گیوان

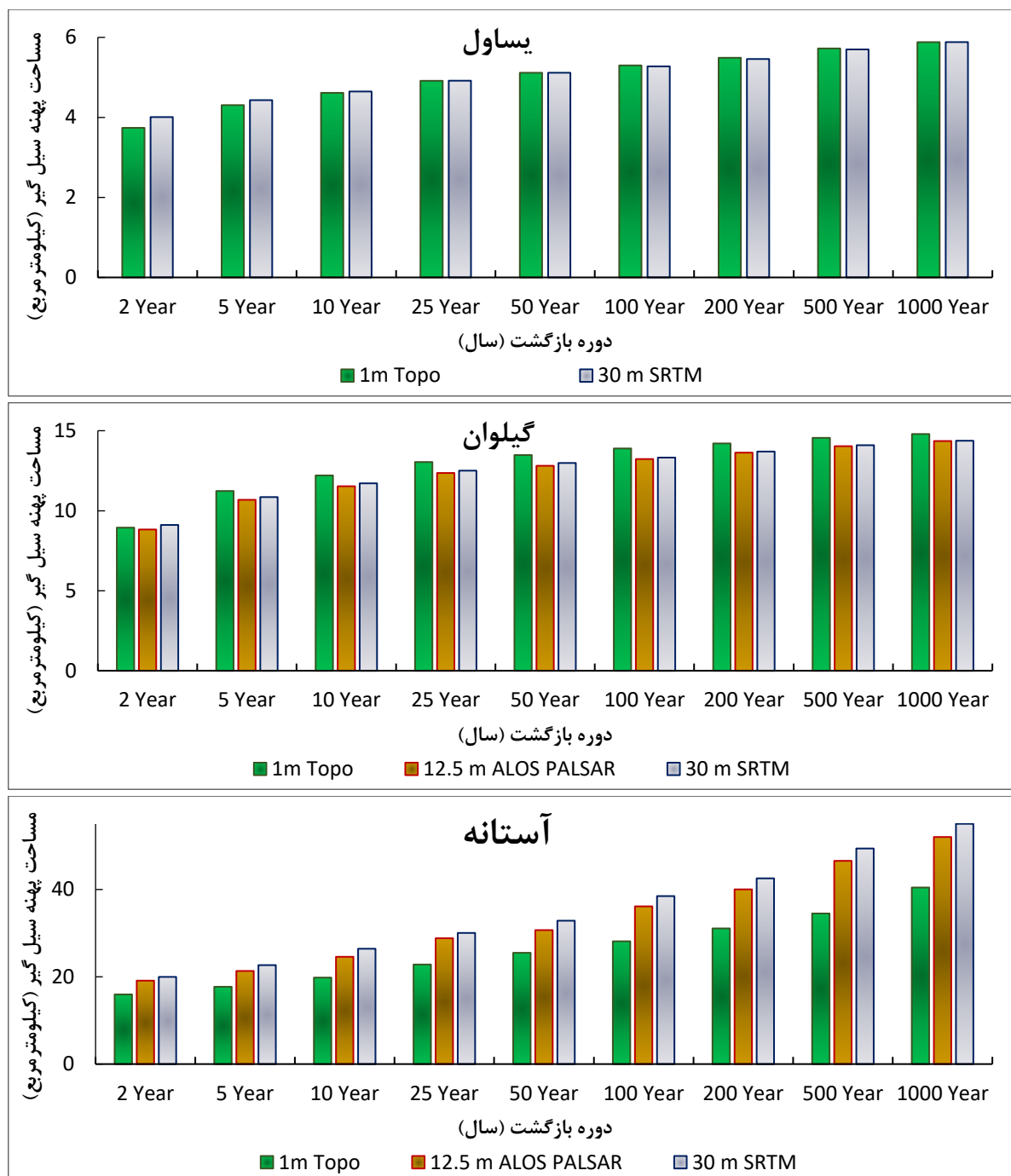
Figure (6): Steep slopes of the banks at the downstream floodplain of the Gilvan study reach.

جهت صرفه‌جویی در فضا نقشه‌های ارائه شده تنها به دوره بازگشت ۵۰ ساله بازه‌هایی از رودخانه‌های مطالعاتی بسنده نموده است؛ اما برای مقایسه بهتر نتایج جدول ۱ مساحت پهنه‌های سیلابی به دست آمده از هر سه مبنای نقشه توپوگرافی با دقت ۱ متر، DEM با پیکسل سائز ۱۲/۵ متر و همچنین DEM با پیکسل سائز ۳۰ متر را نشان داده که جهت نمایش بهتر نتایج، نمودار شکل ۷ نیز ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه‌های یساول و گیوان هر دو DEM ۱۲/۵ و ۳۰ متر نتایج تقریباً مشابهی را به دست آورده‌اند و به جز دوره بازگشت ۲ ساله، در سایر دوره بازگشت‌ها اختلاف بسیار اندکی دارند. در بازه آستانه در تمامی دوره بازگشت‌های مورد بررسی DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR نتایج مطلوب‌تری را دارا می‌باشد؛ که دلیل آن را می‌توان در جلگه‌ای بودن منطقه و در نتیجه هموار بودن توپوگرافی آن بعلاوه پیکسل سائز کم‌تر ALOS PALSAR DEM جست‌وجو کرد. هرچند در این بازه هر دو نوع DEM مورد استفاده تفاوت‌های زیادی را با نقشه مبنا دارند.

جدول (۱): مساحت پهنه‌های سیل‌گیر بازه‌های مطالعاتی با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف (برحسب کیلومتر مربع)

Table (1): Area of flood-prone zones in the study segments using various digital elevation models (Km²).

آستانه			گیوان			یساول		دوره بازگشت (سال)
DEM ۳۰ متر SRTM	DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR	توپوگرافی با دقت ۱ متر	DEM ۳۰ متر SRTM	DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR	توپوگرافی با دقت ۱ متر	DEM ۳۰ متر SRTM	توپوگرافی با دقت ۱ متر	
۱۹/۹۷	۱۹/۱۱	۱۵/۹۶	۹/۱۱	۸/۸۳	۸/۹۴	۴/۰۱	۳/۷۴	۲
۲۲/۶۷	۲۱/۳۳	۱۷/۷۱	۱۰/۸۵	۱۰/۶۸	۱۱/۲۳	۴/۴۳	۴/۳۱	۵
۲۶/۴۳	۲۴/۵۸	۱۹/۸۱	۱۱/۷۱	۱۱/۵۳	۱۲/۲۰	۴/۶۵	۴/۶۱	۱۰
۳۰/۰۴	۲۸/۸۲	۲۲/۸۱	۱۲/۵۰	۱۲/۳۶	۱۳/۰۴	۴/۹۲	۴/۹۱	۲۵
۳۲/۸۵	۳۰/۶۹	۲۵/۴۹	۱۲/۹۸	۱۲/۸۱	۱۳/۴۸	۵/۱۲	۵/۱۱	۵۰
۳۸/۴۹	۳۶/۱۳	۲۸/۱۳	۱۳/۳۲	۱۳/۲۳	۱۳/۸۹	۵/۲۸	۵/۳۰	۱۰۰
۴۲/۵۵	۴۰/۰۳	۳۱/۰۷	۱۳/۷۰	۱۳/۶۳	۱۴/۲۰	۵/۴۶	۵/۴۹	۲۰۰
۴۹/۴۰	۴۶/۵۷	۳۴/۵۱	۱۴/۰۹	۱۴/۰۳	۱۴/۵۵	۵/۷۰	۵/۷۲	۵۰۰
۵۵/۰۶	۵۲/۰۲	۴۰/۴۵	۱۴/۳۷	۱۴/۳۶	۱۴/۷۹	۵/۸۸	۵/۸۸	۱۰۰۰



شکل (۷): مقایسه مساحت پهنه‌های سیل‌گیر بازه‌های مطالعاتی با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف با پهنه‌های حاصل از توپوگرافی با دقت ۱/۱۰۰۰
 Figure (7): Flood-prone Areas in the study reaches using various digital elevation models with areas derived from 1:1000 scale topography.

یکی دیگر از راه‌های صحت‌سنجی نتایج به دست آمده محاسبه شاخص F می‌باشد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. در بازه یساول DEM ۱۲/۵ متر سطح مشترک بیشتری با مقادیر واقعی دارد که دلیل عمده آن ورودی مشترک هر دو نوع DEM مورد استفاده و تفاوت در پیکسل‌سایز است؛ اما در DEM ۳۰ متر SRTM نیز به ویژه در دوره بازگشت‌های بالا نتایج قابل قبولی را به دست آورده است. در بازه گیلوان DEM ۱۲/۵ ALOS PALSAR نیز نتایج نزدیک به واقعیت را به دست داده و به جز دوره بازگشت ۲ ساله در سایر دوره بازگشت‌ها معیار F آن بالای ۰/۹ می‌باشد. نتایج حاصل از DEM ۳۰ متر SRTM نیز در این بازه قابل قبول است. در بازه

آستانه برخلاف دو بازه دیگر هر چه دوره بازگشت افزایش می یابد مقدار F کاهش می یابد؛ مقایسه DEM ها نیز نشان می دهد که DEM ۱۲/۵ ALOS PALSAR با اختلاف بسیار اندکی نتایج بهتری را به دست داده است.

جدول (۲): صحت سنجی نتایج حاصل از پهنه بندی سیل با استفاده از مدل های رقومی ارتفاعی مختلف بر مبنای آزمون آماری F

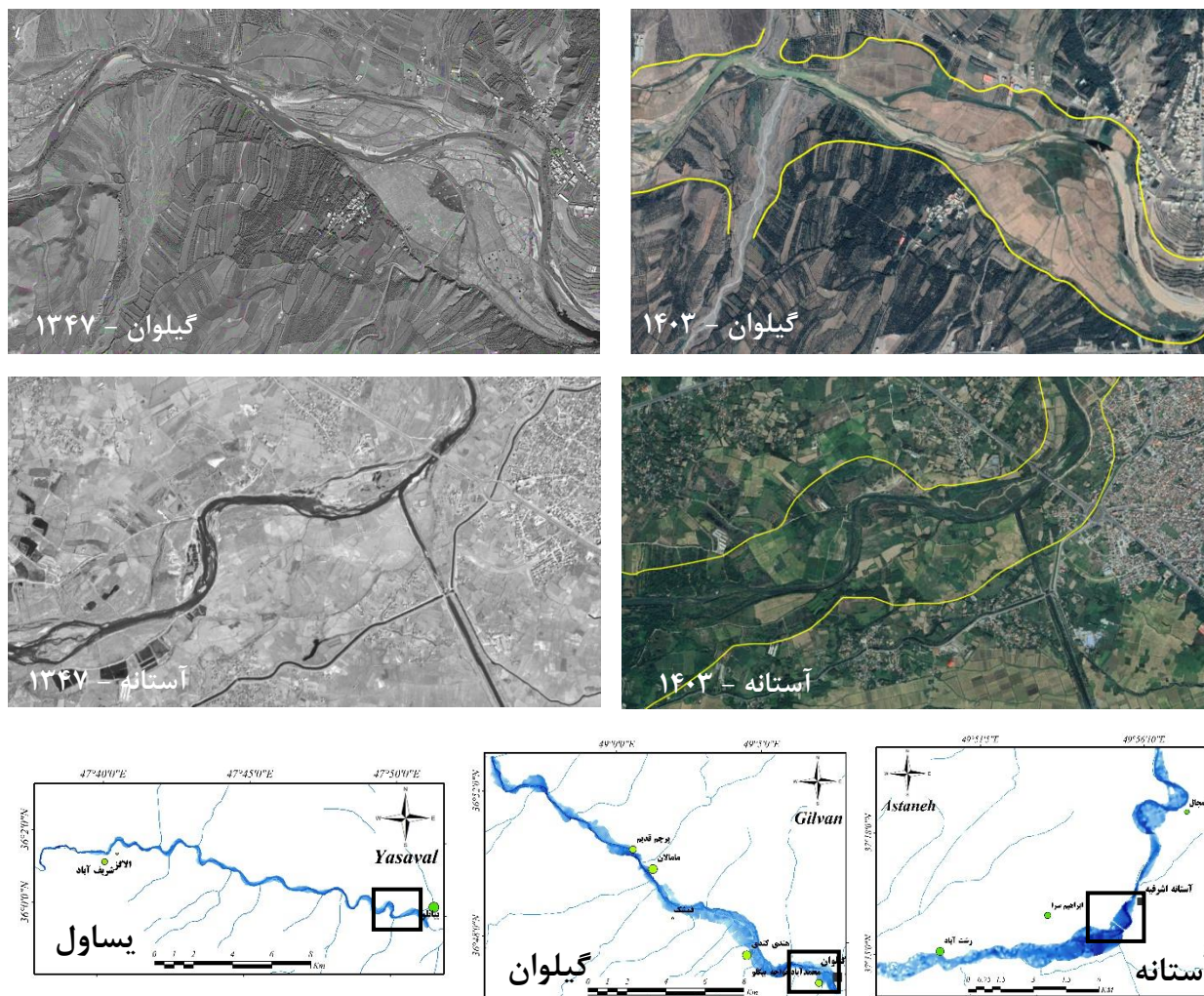
Table (2): Validation of flood inundation areas using different DEMs based on the F criterion

آستانه		گیلوان		یساول	دوره
DEM ۳۰ متر SRTM	DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR	DEM ۳۰ متر SRTM	DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR	DEM ۳۰ متر SRTM	بازگشت (سال)
۰/۸۰۵	۰/۸۱۳	۰/۷۷	۰/۸۵۸	۰/۷۹۹	۲
۰/۸	۰/۸۱۷	۰/۸۴۹	۰/۹۰۲	۰/۸۳۵	۵
۰/۷۵۷	۰/۷۷۷	۰/۸۸۶	۰/۹۲۲	۰/۸۵۶	۱۰
۰/۷۲۷	۰/۷۳۴	۰/۹۰۹	۰/۹۳۷	۰/۸۷۵	۲۵
۰/۷	۰/۷۱۱	۰/۹۱۹	۰/۹۴۳	۰/۸۸۵	۵۰
۰/۶۵۶	۰/۶۶۵	۰/۹۲۶	۰/۹۴۸	۰/۸۹۵	۱۰۰
۰/۶۴	۰/۶۴۴	۰/۹۳۴	۰/۹۵۴	۰/۹	۲۰۰
۰/۶۲۷	۰/۶۲۷	۰/۹۴۱	۰/۹۶	۰/۹۱۲	۵۰۰
۰/۶۳۲	۰/۶۳۰	۰/۹۴۴	۰/۹۶۳	۰/۹۱۸	۱۰۰۰

تعیین پهنه سیلاب گیر با استفاده از شواهد ژئومورفولوژیک

در پژوهش حاضر سعی شده تمامی شواهد ژئومورفولوژیک مؤثر در تعیین پهنه های سیلابی رودخانه اعم از اثر داغاب های سیلاب های گذشته، مسیرهای قدیمی رودخانه، پادگانه های آبرفتی، تغییرات بافت رسوبی از طریق انجام بازدیدها و اندازه گیری های میدانی و بررسی های مقایسه ای بین بافت و اندازه ذرات رسوب در سیلاب دشت ها در نظر گرفته شود و نتایج با استناد به بازدیدهای به عمل آمده از بازه های مطالعاتی تدقیق گردد. شکل ۸ مقایسه بازه هایی از رودخانه های مورد مطالعه را با استفاده از عکس های هوایی سال ۱۳۴۷ و تصاویر ماهواره ای جدید نشان می دهد؛ تغییرات به وقوع پیوسته به ویژه در کاربری اراضی بازه های گیلوان و آستانه در فاصله زمانی مورد بررسی ملموس است. آنچه مسلم است در مواقع سیلابی و طغیان رودخانه، پس از سرریز شدن آب از مجاری فعال، مسیرهای قدیمی آبراهه اولویت دوم هستند که گاهی تحت تأثیر فعالیت های انسانی یا تغییرات طبیعی رودخانه به صورت بسترهای متروک درآمده اند (۹)؛ بنابراین تشخیص و شناسایی این نواحی با استفاده از عکس های هوایی قدیمی و شواهد رسوب شناسی بسیار حائز اهمیت است.





شکل (۸): تعیین پهنه سیلابی در بازه‌های مورد بررسی با استفاده مقایسه ای از عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۷ و تصاویر ماهواره‌ای جدید

Figure (8): Determination of flood-prone areas in the study reaches using a comparative analysis of aerial photographs from 1968 and recent satellite images.



شکل (۹): دشت‌های سیلابی عریض حاشیه رودخانه سفیدرود و شواهد بستر متروکه در ساحل سمت راست در محدوده شهر آستانه اشرفیه

Figure (9): Wide floodplains along the Sefidrud River and evidence of abandoned riverbed on the right bank close to the Astaneh Ashrafiyeh city.

در ادامه مساحت پهنه سیل‌گیر بازه‌های مطالعاتی با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی محاسبه شده و با نتایج حاصل از روش هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۳). از آنجا که در مدل هیدرولیکی توپوگرافی به عنوان مهم‌ترین پارامتر در مساحت پهنه‌های سیل‌گیر ایفای نقش می‌کند در روش ژئومورفولوژیکی پارامترهای دیگری نیز مؤثر هستند و می‌توان گفت انتظار نمی‌رود بین نتایج حاصل از این دو روش ارتباط خاصی برقرار باشد. اما هدف از ارائه جدول ذیل بررسی ارتباط پهنه سیل‌گیر بازه‌های مطالعاتی در روش ژئومورفولوژیک با دوره بازگشت‌های مختلف روش هیدرولیک و شناسایی ارتباط بین این دو است. مساحت پهنه ژئومورفولوژیک بازه یساول در محدوده دوره بازگشت‌های ۲۰۰ و ۵۰۰ ساله قرار دارد و این مقدار برای بازه گیلوان ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله می‌باشد. اما نکته جالب توجه این که در بازه آستانه مساحت پهنه سیل‌گیر ژئومورفولوژیک با دوره بازگشت ۱۰ و ۲۵ ساله روش هیدرولیک همسان است. لذا می‌توان نتیجه گرفت این مورد با مورفولوژی و توپوگرافی رودخانه ارتباط مستقیم دارد؛ به گونه‌ای که هرچه مورفولوژی رودخانه تکامل یافته‌تر و توپوگرافی آن هموارتر باشد با سیلاب‌های با دوره بازگشت کم‌تری تحت تأثیر قرار می‌گیرد و تغییر می‌یابد و بالعکس هرچه رودخانه جوان‌تر و توپوگرافی کرانه‌های آن خشن‌تر باشد سیلاب‌های بزرگ‌تر و به عبارتی با دوره بازگشت بیش‌تری خواهد ژئومورفولوژیک و داغاب‌های سیلابی را بر پیکره آن بر جای می‌گذارند.

جدول (۳): مقایسه مساحت پهنه‌های سیل‌گیر بازه‌های مطالعاتی با استفاده از روش‌های هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی**

Table (3): Comparison of the of flood-prone area in the study reaches obtained by hydraulic and geomorphological methods.

بازدهای مورد مطالعه						دوره بازگشت (سال)	روش پهنه بندی
آستانه		گیلوان		یساول			
مساحت مشترک پهنه هیدرولیکی سیلاب با پهنه ژئومورفولوژیک (km ²)	مساحت پهنه سیلابی (km ²)	مساحت مشترک پهنه هیدرولیکی سیلاب با پهنه ژئومورفولوژیک (km ²)	مساحت پهنه سیلابی (km ²)	مساحت مشترک پهنه هیدرولیکی سیلاب با پهنه ژئومورفولوژیک (km ²)	مساحت پهنه سیلابی (km ²)		
۱۴/۸۲	۱۵/۹۶	۸/۸۶	۸/۹۴	۳/۶۳	۳/۷۴	۲	روش هیدرولیکی
۱۶/۱۲	۱۷/۷۱	۱۰/۸۲	۱۱/۲۳	۴/۱۲	۴/۳۱	۵	
۱۷/۳۶	۱۹/۸۱	۱۱/۴۹	۱۲/۲۰	۴/۳۷	۴/۶۱	۱۰	
۱۸/۶۱	۲۲/۸۱	۱۱/۹۳	۱۳/۰۴	۴/۵۹	۴/۹۱	۲۵	
۱۹/۴۹	۲۵/۴۹	۱۲/۰۹	۱۳/۴۸	۴/۷۴	۵/۱۱	۵۰	
۲۰/۱۰	۲۸/۱۳	۱۲/۲۱	۱۳/۸۹	۴/۸۸	۵/۳۰	۱۰۰	
۲۰/۴۲	۱۳/۰۷	۱۲/۲۹	۱۴/۲۰	۵/۰۱	۵/۴۹	۲۰۰	
۲۰/۶۵	۳۴/۵۱	۱۲/۳۸	۱۴/۵۵	۵/۱۶	۵/۷۲	۵۰۰	
۲۰/۷۵	۴۰/۴۵	۱۲/۴۳	۱۴/۷۹	۵/۲۵	۵/۸۸	۱۰۰۰	
-	۲۰/۸۲	-	۱۴/۰۶	-	۵/۶۴	روش ژئومورفولوژیکی	

** موارد رنگی بیانگر دوره بازگشت‌های مشابه روش هیدرولیکی و روش ژئومورفولوژیکی از نظر مساحت پهنه سیلابی هستند.

بحث

رودخانه سفیدرود با وجود اینکه یکی از رودخانه‌های بزرگ کشور می‌باشد؛ متأسفانه تاکنون مطالعات زیادی بر روی آن در زمینه تعیین پهنه‌های سیل‌گیر صورت نگرفته و مطالعات محدودی نیز که در این زمینه وجود دارد غالباً از منظر حوضه‌ای ابعادی از جریانات سیلابی را مورد مطالعه قرار داده است. برای نمونه می‌توان به مطالعات دودانگه و همکاران (۱۳۹۰) در مورد بررسی روند مقادیر حدی جریان

(جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود؛ رضایی و همکاران (1384) در ارتباط با اثر ارتفاع بر بارندگی‌های یک روزه سیل‌زا برای برآورد دبی اوج در حوضه آبخیز سد سفیدرود و چفجیری¹ و همکاران (2024) توسعه مدل‌های تخمین دقیق‌تر و قابل اعتمادتر، ریسک سیل را در حوضه سفیدرود با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین اشاره نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمرکز مطالعات انجام شده بر روی حوضه است و کم‌تر رودخانه مورد توجه گرفته است. اما پژوهش حاضر علاوه بر اینکه رودخانه را مورد بررسی قرار داده نتایج آن نیز به تهیه نقشه‌های بصری منجر شده است.

در ارتباط با کارایی مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان در دسترس در مطالعات سیلاب و پهنه‌بندی آن نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که این مدل‌های رقومی ارتفاعی به ویژه در مطالعات اولیه کارایی قابل قبولی دارند؛ از این نظر نتایج پژوهش با نتایج مطالعات پاترو² و همکاران (2009) که مدل‌سازی سیلاب در یکی از رودخانه‌های کشور هندوستان را با استفاده از DEMهای SRTM 90 متری انجام دادند؛ همچنین مطالعات تساو و فورکو³ (2013) که با استفاده از DEMهای سنجنش از دوری ASTER پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه سوسان در کشور غنا را شبیه‌سازی نمودند و همچنین پاریزی و حسینی (1402) میزان که دقت مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سیلاب رودخانه اترک را بررسی نمودند؛ در یک راستا است و می‌توان نتیجه گرفت که در صورت عدم دسترسی به نقشه‌های توپوگرافی با دقت بالا می‌توان در مطالعات سیلاب از مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان در دسترس استفاده نمود منوط به اینکه نتایج با انجام بازدیدهای میدانی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای مختلف تدقیق گردد. بعلاوه دقت این مدل‌ها در نواحی کوهستانی بیشتر از نواحی دشتی و هموار است که در رابطه با مورفولوژی رودخانه مطالعات آرش و همکاران (1399) دریافتند که دقت DEMهای مورد مطالعه در پهنه‌بندی رودخانه‌های عریض و مستقیم بهتر از رودخانه‌های باریک و پیچان‌رودی است.

در زمینه مقایسه مدل‌های رقومی ارتفاعی نتایج بیان‌گر آن است که هرچه قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی افزایش یابد، پهنه سیلگیر شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد؛ در این رابطه علی⁴ و همکاران (2015) با ارزیابی چهار منبع ارتفاعی ASTER، SRTM، LIDAR و نقشه‌های توپوگرافی به‌دست آمده از برداشت‌های زمینی در رودخانه جوهور واقع در کشور مالزی به این نتیجه رسیدند که استفاده از منابع ارتفاعی مختلف تأثیر معنی‌داری بر خروجی مدل‌های هیدرولیکی دارد. بعلاوه پاریزی و همکاران (2022) که در پژوهشی کاربرد DEM و نقشه‌های تهیه شده با پهپادها را در مدل‌سازی سیلاب حوضه رودخانه اترک بررسی نمودند؛ دریافتند زمانی که وضوح DEM تهیه شده با پهپاد از 1 متر به 30 متر کاهش یافت، سطح آبگرفتگی و عمق جریان نیز افزایش می‌یابد؛ بدین ترتیب از این منظر نیز نتایج حاصل از پژوهش دارای هم‌خوانی با نتایج پژوهش‌های مشابه است.

آرش و همکاران (1399) نیز در مقایسه سه DEM با قدرت تفکیک مکانی 30 متری ALOS، SRTM و ASTER دریافتند که DEM ALOS در تعیین تراز سطح آب دقت بالاتری دارد. همچنین اختلاف بسیار اندک نتایج حاصل از مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM نسبت به DEMهای ALOS PALSAR بیان‌گر آن است که در صورت عدم وجود DEMهای ALOS PALSAR می‌توان از DEMهای SRTM بهره جست؛ در این مورد، کوهی و عزیزیان (1400) با مقایسه کارایی مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با توجه به داده‌های GPS دو فرکانسه به‌عنوان مبنا در استان‌های قزوین و مازندران دریافتند که مدل رقومی ارتفاعی SRTM نسبت به ASTER قابلیت به مراتب مناسب‌تری در تخمین رقوم ارتفاعی دارد. در ارتباط به وجوه تمایز پژوهش حاضر با سایر مطالعات مشابه نیز همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بیش‌تر موارد روش کار پژوهش‌های انجام شده به گونه‌ای بوده که DEMهای با اندازه پیکسل یکسان چند سنجنده را مورد بررسی قرار داده‌اند یا صرفاً به یک یا چند روش ژئومورفولوژیک پرداخته‌اند. از دیگر سو غالب پژوهش‌های صورت گرفته یک بازه رودخانه را مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج را صرفاً برای آن ارائه نموده‌اند. اما پژوهش حاضر

¹ Chafjiri² Patero³ Forkuo And Tsawo⁴ Ali

از چند جنبه حائز اهمیت است؛ اول اینکه روش‌های مختلف هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر را به کار گرفته است. دوم DEM‌های با اندازه پیکسل متفاوت را مورد مطالعه قرار داده و با در دسترس بودن نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰ نتایج حاصل از روش‌های مختلف را صحت‌سنجی نموده و میزان انطباق هر کدام را با واقعیت به صورت کمی محاسبه و ارائه نموده است و چهارم اینکه در مورد بازه‌های با مورفولوژی و توپوگرافی متفاوت این بررسی‌ها را انجام داده و نهایتاً نتیجه‌گیری نموده که در کدام نوع رودخانه در صورت عدم وجود داده‌های نقشه‌برداری استفاده از کدام روش ضریب خطای کم‌تری دارد.

نتیجه‌گیری

سیلاب پدیده پیچیده‌ای است و این امر مطالعه پیرامون آن و پیش‌بینی ریسک خطر ناشی از آن را با مشکل مواجه می‌کند؛ به ویژه به دلیل وسعت بالای حوضه عملکرد آن‌ها امکان مطالعه دقیق بر روی آن‌ها و تهیه نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰ در تمامی نواحی وجود ندارد یا بسیار هزینه‌بردار و زمان‌بر است. بنابراین با توجه به مسائل و موانع موجود در برخی موارد ناگزیر باید به روش‌های دیگر در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر اتکا نمود. پژوهش حاضر پهنه‌بندی سیلاب را با دو روش هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی در مورد سه بازه مجزا از رودخانه سفیدرود که توپوگرافی، دبی سیلابی و مورفولوژی متفاوتی داشتند مورد بررسی قرار داد؛ البته روش هیدرولیکی خود متکی بر سه مبنای توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰، DEM‌های ۳۰ متر SRTM و ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR بود که DEM با دقت یک متر برای صحت‌سنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل مؤید آن است که در نواحی کوهستانی در صورت عدم وجود داده‌های نقشه‌برداری شده، استفاده از DEM‌های ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR و ۳۰ متر SRTM دقت قابل قبولی در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر به ویژه در دوره بازگشت‌های بالا دارد؛ به شرطی که نتایج با استناد به نظرات کارشناسی و بازدیدهای میدانی تدقیق و اصلاح گردد. اما در نواحی دشتی که اختلاف ارتفاع ۱ متر نیز گاهی موجب تغییرات قابل توجهی در وسعت پهنه‌های سیل‌گیر می‌شود استفاده از DEM‌های با دقت پایین توصیه نمی‌گردد. مقایسه DEM‌های ۳۰ متر SRTM و ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR نشان می‌دهد که هر دو DEM مبتنی بر سنجش از دور نتایج نسبتاً یکسانی را به دست داده‌اند؛ اما DEM ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR که در بازه گیلوان دارای پوشش بود نتایج به مراتب مطلوب‌تری را دارا می‌باشد. در بازه آستانه هرچند هر دو DEM اختلاف نسبتاً بالایی را با واقعیت دارند اما نتایج بسیار به هم شبیه بوده و تفاوت معیار F آن‌ها در حد چند صدم می‌باشد. نکته‌ای که در مورد ALOS PALSAR DEM وجود دارد این است که پوشش آن به صورت فراگیر نبوده و در مواقعی که منطقه مورد مطالعه دارای مقیاس بزرگ است بهتر است DEM ۳۰ متر SRTM مورد استفاده قرار گیرد.

در نواحی دشتی و جلگه‌ای مانند بازه آستانه پژوهش حاضر که DEM‌های رایگان در دسترس عموم نتایج قابل قبولی را به دست نمی‌دهد استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیک در تعیین پهنه‌های سیلابی در صورت عدم وجود داده‌های نقشه‌برداری شده نتایج بهتری را به دست می‌دهد؛ زیرا رودخانه در این نواحی معمولاً بر پیکره دشت‌های رسوبی جریان دارد و رسوبات جلگه و دشت به خوبی شواهد سیلاب‌های گذشته را با خود به همراه دارند و می‌توان حدود آن‌ها را شناخت. از دیگر سو رودخانه در این نواحی آزادی عمل بیشتری در تغییر مسیر خود دارد و شواهد تغییر مسیر به آسانی از روی مقایسه عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای قدیم و جدید میسر است.

بدیهی است در تمامی موارد پهنه‌بندی سیلاب در صورت عدم وجود نقشه‌های توپوگرافی با دقت بالا، ارائه نتایج قابل اطمینان منوط به انجام بازدیدهای میدانی و تدقیق نتایج در محل است و این مهم با تجارب کارشناسی بالا تحقق می‌یابد. زیرا مقایسه پهنه‌های حاصل از DEM‌های مورد استفاده پژوهش با نقشه ۱/۱۰۰۰ نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد محدوده‌ای وسیع در پهنه سیل‌گیر قرار گرفته اما در واقعیت آن گونه نیست و لازم است اصلاح گردد.

References

- Aerts, J.C., (2020). Integrating agent-based approaches with flood risk models: a review and perspective. *Water Secur.* 11, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100076>.
- Arash, A. M., Yasi, M., & Azizian, A. (2020). Accuracy assessment of RS-based DEMs in flood inundation mapping of different morphological types of rivers. *Journal of Hydraulics*, 15(3), 15-31. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.231744.1460>
- Baker, V. R., Kochel, R. C., & Patton, P. C. (1988). Flood geomorphology.
- Cao, C., Xu, P., Wang, Y., Chen, J., Zheng, L., & Niu, C. (2016). Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas. *Sustainability*, 8(9), 948. <https://doi.org/10.3390/su8090948>
- Chaffjiri, A. S., Gheibi, M., Chahkandi, B., Eghbalian, H., Waclawek, S., Fathollahi-Fard, A. M., & Behzadian, K. (2024). Enhancing flood risk mitigation by advanced data-driven approach. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37758>.
- Chen, Y. (2022). Flood hazard zone mapping incorporating geographic information system (GIS) and multi-criteria analysis (MCA) techniques. *Journal of Hydrology*, 612, 128268. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128268>
- Cloke, H. A. N. N. A. H., Thielen, J. U. T. T. A., Pappenberger, F. L. O. R. I. A. N., Nobert, S. É. B. A. S. T. I. E. N., Bálint, G. Á. B. O. R., Edlund, C. R. I. S. T. I. N. A., ... & Buizza, R. O. B. E. R. T. O. (2009). Progress in the implementation of Hydrological Ensemble Prediction Systems (HEPS) in Europe for operational flood forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 13, 125-140.
- Cobby, D. M., Mason, D. C., & Davenport, I. J. (2001). Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(2), 121-138. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(01\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(01)00039-9)
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., Petaccia, G., (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: comparison with a state-of-the art model. *Water* 12 (9), 2326. <https://doi.org/10.3390/w12092326>.
- De Moel, H. D., van Alphen, E. J., & Aerts, J. C. (2009). Flood maps in Europe—methods, availability and use. *Natural hazards and earth system sciences*, 9(2), 289-301. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009>.
- Dehnhardt, A., Grothmann, T., & Wagner, J. (2022). Cost-benefit analysis: What limits its use in policy making and how to make it more usable? A case study on climate change adaptation in Germany. *Environmental Science & Policy*, 137, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.005>
- Dodangeh, S., Soltani, S., Sarhadi, A. (2011). Trend Assessment of Extream Flows (Low Flow and Flood) in Sefid-Roud Basin. *jwss* (2012); 15 (58) :215-230. URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2065-fa.html>
- Esmaili, R., & Nourizadeh Nesheli, N. (2024). Evaluation of the morphological changes of Haraz river following human pressures in the Amol city, Mazandaran. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 40-57. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61151.1733>
- Falter, D., Vorogushyn, S., Lhomme, J., Apel, H., Gouldby, B., Merz, B., (2013). Hydraulic model evaluation for large-scale flood risk assessments. *Hydrol. Process.* 27 (9), 1331–1340. <https://doi.org/10.1002/hyp.9553>.
- Forkuo, E. K., & Tsawo, V. A. (2013). The use of digital elevation models for water-shed and flood hazard mapping.
- Gilan Regional Water Company; Sefidrud Reservoir Dam. [www. https://www.glrw.ir/](https://www.glrw.ir/)
- Greiving, S., Fleischhauer, M., & Wanczura, S. (2006). Management of natural hazards in Europe: The role of spatial planning in selected EU member states. *Journal of environmental planning and management*, 49(5), 739-757. <https://doi.org/10.1080/09640560600850044>.
- Horritt, M.S., Bates, P.D., (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *J. Hydrol.* 268 (1–4), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X).

- Janizadeh, S., Pal, S.C., Saha, A., Chowdhuri, I., Ahmadi, K., Mirzaei, S., Tiefenbacher, J. P., (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future. *J. Environ. Manag.* 298, 113551 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113551>.
- Karimi M, Vali Samani J M, Mazaheri M. (2018). Evaluating the Hydrodynamic and Morphology of Sefidroud River Delta Using 2D Simulation and Remote Sensing Data. *Journal of Oceanography*; 9 (33) :1-12 URL: <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1266-fa.html>.
- Kalantari, Z., Nickman, A., Lyon, S. W., Olofsson, B., & Folkeson, L. (2014). A method for mapping flood hazard along roads. *Journal of environmental management*, 133, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.032>.
- Kenward, T., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Fielding, E. (2000). Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 432-444. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00136-X)
- Khosravi, K., Pham, B.T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., Bui, D.T., (2018). A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Sci. Total Environ.* 627, 744–755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.266>.
- Koohi, S., & Azizian, A. (2021). Assessing vertical accuracy of remotely sensed DEMs in different land uses. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(118), 7-24. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246102>
- Lastra, J., Fernández, E., Díez-Herrero, A., & Marquínez, J. (2008). Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, 45, 277-293. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9164-8>
- Md Ali, A., Solomatine, D. P., & Di Baldassarre, G. (2015). Assessing the impact of different sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 631-643. <https://doi.org/10.5194/hess-19-631-2015>
- Morsy, M.M., Goodall, J.L., O'Neil, G.L., Sadler, J.M., Voce, D., Hassan, G., Huxley, C., (2018). A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems. *Environ. Model. Software* 107, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.007>.
- Muthusamy, M., Casado, M.R., Butler, D., Leinster, P., (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *J. Hydrol.* 596, 126088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>.
- Mukherjee, F., & Singh, D. (2020). Detecting flood prone areas in Harris County: A GIS based analysis. *GeoJournal*, 85(3), 647-663. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-09984-2>
- Nayyeri, H., Amani, K., & Ganjaeian, H. (2016). Survey the Tarval Drainage Watershed Hydro Geomorphology and Hydrology Indicators. *Hydrogeomorphology*, 3(7), 19-38.
- Parizi, E., Khojeh, S., Hosseini, S. M., & Moghadam, Y. J. (2022). Application of Unmanned Aerial Vehicle DEM in flood modeling and comparison with global DEMs: Case study of Atrak River Basin, Iran. *Journal of Environmental Management*, 317, 115492. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115492>
- Parizi, E. & Hosseini, S. M. (2023). Estimation of Tandem-X Digital Elevation Model precision in Simulation of Flood Hydraulic Characteristics (Case Study: Atrak River Basin). *Geography and Environmental Planning*, 34 (2), 1 -4. <https://10.22108/gep.2022.134293.1533>
- Patro, S., Chatterjee, C., Singh, R., & Raghuwanshi, N. S. (2009). Hydrodynamic modelling of a large flood-prone river system in India with limited data. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(19), 2774-2791. <https://doi.org/10.1002/hyp.7375>

- Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez-Rincón, J. P., Arganis-Juárez, M., Domínguez-Mora, R., & González Villareal, F. J. (2015). Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: P ánuco River, México. *Journal of Flood Risk Management*, 8(2), 177-192. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12067>
- Perucca, L. P., & Angilieri, Y. E. (2011). Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina. *Quaternary International*, 233(1), 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.08.007>
- Rezaei, A; Mahdavi, M; Lux, K; Faiznia, S; Mahdian, M; (2005). Effect of Altitude on Daily Flooding Rainfall for Estimation of Peak Flow. *Iranian Journal of Natural Resources*, 58(1).
- Roy, P., Pal, S.C., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., Das, B., (2020). Threats of climate and land use change on future flood susceptibility. *J. Clean. Prod.* 272, 122757 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122757>.
- Sampson, C. C., Smith, A. M., Bates, P. D., Neal, J. C., & Trigg, M. A. (2016). Perspectives on open access high resolution digital elevation models to produce global flood hazard layers. *Frontiers in Earth Science*, 3, 85. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00085>
- Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in water resources*, 30(8), 1831-1843. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005>
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J. C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, 64(14), 1769-1782. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>.
- Sidle, R. C., & Onda, Y. (2004). Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological processes*, 18(4), 597-602. <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>
- Tierney, K.J., Lindell, M.K. and Perry, R.W. (2002), "Facing the Unexpected: Disaster Preparedness and Response in the United States", *Disaster Prevention and Management*, Vol. 11 No. 3, pp. 222-222. <https://doi.org/10.1108/dpm.2002.11.3.222.1>
- Torkamanzad, N., Mohammadnezhad, B. A., & Behmanesh, J. (2014). The Effect of Dam Bottom Outlet Gates on Venting of Turbidity Current (Case Study: Sefid-Rud Dam). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44.1(74), 25-40.
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130-1141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.008>
- Wheater, H. S. (2002). Progress in and prospects for fluvial flood modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1409-1431. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1007>
- Yamani, M., Maghsoudi, M., Nayyeri, H., & Amani, K. (2018). Zonation of Gheshlagh river bed using perilous parameters Vahdat Dam to Zhavh Dam. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(1), 90-105.
- Yan, X., Xu, K., Feng, W., & Chen, J. (2021). A rapid prediction model of urban flood inundation in a high-risk area coupling machine learning and numerical simulation approaches. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 903-918. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00384-0>.