

Identification of flash flood-prone areas in arid and semi-arid regions using optical and radar imagery (Case study: Semnan province)

Zahra Sheikh ^{1,2*}, Ali Asghar Zolfaghari ³

¹ Postdoctoral Researcher, Department of Combatting Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

² Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Combatting Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Flash floods are among the most destructive natural disasters, causing substantial financial and human losses worldwide each year. These phenomena primarily occur in arid and semi-arid regions and have exhibited increased frequency and intensity in recent years due to climate change and intensified human activities. The application of satellite data and imagery within advanced analytical platforms such as Google Earth Engine provides precise, near-real-time information and robust cloud computing capabilities for rapidly processing large datasets. Sentinel satellite imagery represents one of the most advanced sources of earth observation data available. Despite the effectiveness of radar imagery, accurately distinguishing between water and sandy areas in arid regions remains challenging due to the similar backscatter signatures of these surfaces in radar wavelengths. This research aims to identify flood-prone areas in Semnan Province, located within Iran's central desert basin, using Sentinel-1, -2, and -3 imagery combined with multiple image processing techniques, including composite analysis, NDWI (Normalized Difference Water Index), automated thresholding, and band differencing, to determine the optimal approach for delineating flood zones in arid mountainous environments.

Materials and Methods

This study focuses on identifying and evaluating flood-affected areas following the flash flood events recorded in May 2021, using an integrated remote sensing and hydrological analysis framework. The approach was initiated with the acquisition of Sentinel-1, Sentinel-2, and Sentinel-3 satellite imagery, which facilitated the high-precision delineation of flood-prone zones. A suite of image processing techniques was subsequently applied, including Automatic Thresholding using OTSU's method to optimize pixel classification by maximizing inter-class variance within intensity histograms. To further enhance water body detection, the Normalized Difference Water Index (NDWI) was employed, leveraging the reflectance contrast between green (560 nm) and near-infrared (842 nm) bands. Additionally, spectral band composite techniques were utilized—particularly combinations such as RGB, NIR-SWIR-Red—to improve the differentiation of land surface features including vegetation, soil moisture, water bodies, and mineralogical attributes. Complementary to the remote sensing analysis, ground-based precipitation and peak instantaneous discharge data from hydrometric stations were extracted and analyzed for validation purposes. The flood mapping results were then compared with an existing flood susceptibility map generated through machine learning models, enabling an assessment of spatial accuracy. Finally, the effectiveness of each method was evaluated to identify the most suitable approach for mapping flood extents in arid and semi-arid mountainous regions.

Results and Discussion

Utilizing multi-sensor satellite imagery from Sentinel-1, Sentinel-2, and Sentinel-3, this study delineated flood-affected areas within Semnan Province with high spatial and temporal precision. Sentinel-1, operating with C-band microwave radar in VH polarization, proved particularly effective for flood mapping under persistent cloud cover. Through band differencing and thresholding techniques, this sensor enabled the identification of approximately 431,835 hectares of inundated land, primarily concentrated in the northern, central, and southern parts of the province. In parallel, Sentinel-2 optical imagery, processed through rigorous cloud masking and NDWI analysis, detected around 268,000 hectares of flooding, predominantly located within depressions and low-lying terrain. Although Sentinel-3, equipped with advanced multispectral sensors such as SLSTR and OLCI, offered extensive spatial coverage—encompassing an estimated 1,005,045 hectares—its lower spatial resolution (300 m) and heightened sensitivity to clouds and atmospheric interference limited its ability to capture smaller, discrete flood patches. To enhance delineation accuracy, automated OTSU thresholding was applied to the Sentinel-1 dataset, which improved boundary detection and reduced classification noise, resulting in a refined flood estimate of approximately 467,379 hectares. Validation against hydrometric station data revealed that over 60% of flash flood events recorded during the 2020–2021 hydrological year occurred in May 2021, showing strong temporal alignment with satellite-derived flood extents. Moreover, spatial comparison with flood susceptibility maps generated from machine learning models demonstrated substantial overlap in high-risk zones, reinforcing the reliability of the remote sensing-based mapping approach. Collectively, these findings underscore the complementary strengths and inherent limitations of both radar and optical sensors in capturing flood dynamics across arid and topographically complex regions. The integration of multi-source satellite data with advanced image processing

techniques significantly enhances the accuracy and credibility of flash flood detection, thereby contributing valuable insights for disaster risk mitigation in data-scarce environments.

Conclusion

Exacerbated, extreme events such as flash floods, driven by climate variability and human activities, pose serious hazards in arid and semi-arid regions where complex environmental, climatic, and geological conditions—combined with low infiltration capacities and limited historical data—complicate hydrological assessments. In dry mountainous zones, the prevalence of gypsum and limestone soils further reduces permeability, accelerating surface runoff and intensifying flood risks. This study demonstrated that advanced cloud computing platforms such as Google Earth Engine, integrated with multispectral and radar data from Sentinel satellites, provide accurate, rapid, and cost-effective means for identifying flood-prone areas in data-scarce environments. Among the evaluated techniques, automated Otsu thresholding applied to Sentinel-1 imagery proved the most effective for delineating flood extents, yielding refined estimates of approximately 467,379 hectares.

Keywords: Sentinel; Image Processing; NDWI; OTSU; Semnan

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

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

Data Availability Statement:

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

Authors' contribution

Zahra Sheikh: Conceptualization, Writing, Original draft preparation, Software, Manuscript editing, Methodology, Project administration, Review; **Ali Asghar Zolfaghari:** Supervision, Review

*Corresponding Author, E-mail: zahra.sheikh03@semnan.ac.ir

Citation: Sheikh, Z., & Zolfaghari, AA. (2025). Identification of Flash Flood-Prone Areas in Arid and Semi-Arid Regions Using Optical and Radar Imagery (Case Study: Semnan Province). *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 328-350.
doi: 10.22098/mmws.2025.17843.1628

Received: 16 July 2025, Received in revised form: 12 August 2025, Accepted: 12 August 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 328-350.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





شناسایی پهنه‌های سیلاب آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر اساس تصاویر اپتیک و راداری (مطالعه موردی: استان سمنان)

زهرا شیخ^{۱*}، علی اصغر ذوالفقاری^۲

^۱ محقق پسادکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ محقق، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

کمبود مشاهدات زمینی و عدم قطعیت داده‌ها از مشکلات اساسی مناطق خشک جهان و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه برای شناسایی سریع مناطق درگیر با سیلاب‌های آبی محسوب می‌شود. هدف مطالعه حاضر، ارزیابی عملکرد تصاویر راداری و اپتیک سنتینل-۱، ۲ و ۳ در شناسایی مناطق سیلابی در استان سمنان به‌عنوان یکی از مناطق درگیر در وقوع سیلاب‌های آبی است. به‌دلیل دقت، قابلیت تکرارپذیری بالا و دسترسی راحت، تصاویر ماهواره سنتینل انتخاب شد و الگوریتم‌های پردازش تصویر مختلف شامل تفاضل باندی، آستانه‌گذاری، کامپوزیت، شاخص اختلاف آب نرمال شده (NDWI) و OTSU اعمال شد. یافته‌ها نشان داد، وسعت پهنه‌های شناسایی شده سیلابی بر اساس تصاویر سنتینل-۱ و روش تفاضل باندی و آستانه‌گذاری در حدود ۴۳۱۸۳۵ هکتار برآورد شده است. این در حالی است که بر اساس تصاویر سنتینل-۲ و ۳ و به‌کارگیری شاخص NDWI وسعت این مناطق به‌ترتیب کمتر (در حدود ۲۶۸۰۰۰ هکتار) و بیش‌تر (در حدود ۱۰۰۵۰۴۵ هکتار) از برآوردهای سنتینل-۱ تعیین شد. با به‌کارگیری روش آستانه‌گذاری خودکار OTSU بر پایه تصاویر راداری سنتینل-۱، وسعت پهنه‌های سیلابی برابر با ۴۶۷۳۷۹ هکتار برآورد شد. در ادامه، اعتبارسنجی نتایج، با بررسی مقادیر بارش‌ها و سیلاب‌های ثبت شده در منطقه طی دوره منتخب به‌عنوان معرف و همچنین نقشه حساسیت سیلاب استان سمنان انجام شد. نتایج بیانگر قابلیت بالای تصاویر راداری سنتینل-۱ و همچنین عملکرد بهتر روش OTSU در مقایسه با سایر روش‌ها بود. این نتایج نشان داد، ترکیب داده‌های چندزمانه و بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصویر، می‌تواند دقت شناسایی سیلاب‌ها را افزایش دهد. شناسایی دقیق و سریع سیلاب‌های آبی در مناطق خشک، به بهبود مدیریت بحران و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای کمک شایانی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: سنتینل، پردازش تصویر، NDWI، OTSU، سمنان.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zahra.sheikh03@semnan.ac.ir

استناد: شیخ، زهرا، و ذوالفقاری، علی اصغر (۱۴۰۴). شناسایی پهنه‌های سیلاب آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر اساس تصاویر اپتیک و راداری (مطالعه موردی: استان سمنان). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۳۲۸-۳۵۰.

doi: 10.22098/mmws.2025.17843.1628

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۲۸ تا ۳۵۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

سیلاب‌های آبی به دلیل ماهیت ناگهانی و تخریب‌گر خود، یکی از پرهزینه‌ترین، مخرب‌ترین و پرتکرارترین بلایای طبیعی به شمار می‌آیند که سالانه خسارات مالی و جانی بسیاری در سراسر جهان به بار می‌آورند (Sheikh et al., 2025; Mirzaei et al., 2025). این پدیده که عمدتاً با وقوع بارش‌های قابل توجه در مناطق خشک و نیمه‌خشک رخ می‌دهد؛ در سال‌های اخیر، به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش مداخلات انسانی، با افزایش فراوانی و شدت مواجه شده است؛ به‌ویژه در مناطق خشک کوهستانی، این تشدید به دلیل ساختارهای پیچیده مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی این مناطق، بیش تر رخ می‌دهد (Ghoneim and Foody, 2013).

استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای در محیط‌های تحلیل قدرتمند مانند گوگل ارث انجین با فراهم کردن شرایط ارائه داده‌های دقیق و آبی و قابلیت پردازش حجم عظیمی از داده‌ها در زمان کوتاه، رویکرد نوینی در پردازش و شناسایی مناطق درگیر با سیلاب فراهم کرده است (Mehmood et al., 2021). تصاویر سنتینل به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین منابع تصویربرداری زمین شناخته می‌شود. این تصاویر از سال ۲۰۱۴، به لطف آژانس فضایی اروپا و برنامه کوپرنیک، به‌طور رایگان در اختیار عموم قرار گرفته که سبب رشد و پیشرفت سریع پژوهش‌های مرتبط با شناسایی مناطق سیلابی شده است. مجهز بودن به حسگرهای رادار دیافراگم مصنوعی، وضوح تصاویر سنتینل را ارتقا داده است. این حسگرهای فعال قادر به پردازش در شرایط مختلف آب و هوایی بوده و می‌توانند اطلاعات پیوسته پوشش زمین را ارائه دهند. برخلاف حسگرهای نوری غیرفعال، داده‌های SAR^۱ را می‌توان هم در روز و هم در شب به‌دست آورد و نقشه‌برداری جامع و به موقع سیل را امکان‌پذیر می‌سازد. این ماهواره با دارا بودن بازه‌های زمانی کوتاه مدت امکان نظارت تقریباً در زمان واقعی را نیز فراهم نموده است (Tarpanelli et al., 2022).

با وجود توانایی‌های قابل توجه تصاویر راداری، تفکیک دقیق مناطق آبی و شنی در مناطق خشک همچنان چالش برانگیز است (Garg et al. 2024). این امر به دلیل مشابهت بازتابندگی این دو نوع سطح در طول موج‌های مورد استفاده در سنجنده‌های راداری است. با توجه به چالش شباهت پس‌پراکندگی رادار بر روی سطوح آب‌های آزاد و سطوح شنی در مناطق بیابانی، (et al. 2018) Martinis رویکرد نوینی برای شناسایی مناطق سیلابی بر اساس تصاویر راداری در مناطق خشک ارائه کردند. در این روش آن‌ها

به‌منظور بهبود دقت نتایج و حذف تخمین‌های بیش برآوردی مقادیر آب از سطوح شنی و ماسه یک لایه حذف شنی (Sand Exclusion Layer) بر اساس سری‌های زمانی توسعه دادند. در ادامه این تلاش‌ها، رویکرد جدیدی برای تعیین سریع وسعت سیل در مناطق وسیع و نیمه‌خشک با شرایط محیطی چالش برانگیز، بر اساس داده‌های چند زمانه (SAR) سنتینل-۱ توسط Zhang et al. (2020) ارائه شد. این روش با بهره‌گیری از ترکیب پیش‌پردازش‌های هندسی، آستانه‌گذاری خودکار، پالایش مبتنی بر منطق فازی و عملیات پس‌پردازشی، موفق به بهبود چشم‌گیر دقت نقشه‌های سیلابی در سه منطقه آزمایشی در پاکستان شد. در ایران نیز، Panahi et al. (2022) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱، اقدام به توسعه مدل‌های هیبریدی یادگیری ماشین برای تعیین مناطق سیلابی در اهواز کردند. این مدل ترکیبی از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) و روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری شامل بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۳ (GWO)، تکامل دیفرانسیل^۴ و الگوریتم رقابتی امپریالیستی^۵ بوده است. در نهایت مدل SVM-GWO به‌عنوان دقیق‌ترین مدل برای طبقه‌بندی مناطق آب گرفته معرفی شد. مطالعه جامع دیگری توسط Garg et al. (2024) به بررسی توانمندی‌های سنتینل-۱ در شناسایی سیلاب مناطق خشک در سه رویداد مجزا در ایران، پاکستان و ترکمنستان پرداخت. نتایج این مطالعه آشکار کرد که قطبش VV، اطلاعات زمانی و انسجام تداخل‌سنجی مهم‌ترین منابع اطلاعاتی برای شناسایی دقیق سیلاب‌ها در مناطق خشک هستند و ترکیب این داده‌ها، مناسب‌ترین رویکرد است. در پژوهش‌های داخلی اخیر، (Faraji and Rahimi 2024)، با بهره‌گیری از تصاویر راداری سنتینل-۱ و استفاده از الگوریتم درخت تصمیم، نقشه‌های دقیقی از پهنه‌های آب‌گرفته ناشی از سیلاب خرداد ۱۴۰۲ استان زنجان تهیه کردند. همچنین Mesvari and Shah-Hoseini (2024)، با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و شبکه‌های یادگیری عمیق کدگذار-کدگشا، موفق به شناسایی دقیق پهنه‌های سیلابی در پنج ناحیه مختلف در سطح جهان شدند که این رویکرد دقت شناسایی در محیط‌های چالش‌برانگیز را به‌طور چشم‌گیری ارتقاء داده است.

مطالعات مختلف نشان می‌دهد ادغام داده‌های راداری سنتینل در زمان‌های مختلف و بهره‌گیری از روش‌های هوشمند تحلیل، می‌تواند دقت نقشه‌برداری و شناسایی سیلاب در مناطق خشک را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

^۴ Differential Evolution^۵ Imperialist Competitive Algorithm^۱ Synthetic Aperture Radar^۲ Support Vector Machine^۳ Grey Wolf Optimization

مدیریت و کنترل بحران و همچنین استحصال و بهره‌برداری از سیلاب‌ها کمک شایان توجهی نماید.

پژوهش حاضر با توسعه چارچوب پردازشی نوآورانه، به ادغام داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱، ۲ و ۳، همراه با ترکیب روش‌های پردازشی نظیر کامپوزیت باندی^۱، شاخص NDWI^۲، تفاضل باندی^۳ و آستانه‌گذاری خودکار^۴، اقدام نموده و گامی مؤثر در ارتقاء دقت شناسایی و تفکیک پهنه‌های سیلابی در مناطق خشک و نیمه‌خشک برداشته است. افزون بر این، رویکرد اعتبارسنجی سه سطحی مبتنی بر داده‌های میدانی، مقادیر بارش‌های ثبت شده و نقشه حساسیت سیلاب^۵، مدل ارزیابی جامع و عملیاتی برای محیط‌های فاقد یا دارای محدودیت داده ارائه کرده است. اجرای این رویکرد در مناطق کوهستانی خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های منحصربه‌فرد و خصوصیات ژئومورفولوژیکی پیچیده، آن را به الگویی کارآمد و قابل تعمیم برای بهبود سامانه‌های پایش و مدیریت سیلاب در مناطق مشابه تبدیل کرده است.

به‌طور خاص، پژوهش حاضر اهداف زیر را دنبال می‌کند: (۱) استخراج تصاویر پیش و پس از وقوع سیلاب بر اساس تصاویر سنتینل-۱، ۲ و ۳، (۲) به‌کارگیری رویکردهای مختلف پردازش تصاویر شامل کامپوزیت باندی، NDWI، آستانه‌گذاری خودکار و تفاضل باندی در شناسایی مناطق سیلابی، (۳) استخراج پهنه‌های سیلابی بر اساس تصاویر راداری و اپتیک، (۴) ارزیابی عملکرد مناطق شناسایی شده با تحلیل و بررسی توزیع زمانی-مکانی بارش، سیلاب‌های ایستگاهی مشاهداتی در منطقه در بازه مد نظر و همچنین نقشه حساسیت سیلاب منطقه و (۵) شناسایی بهترین رویکرد در تعیین پهنه‌های سیلابی در مناطق خشک کوهستانی.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان سمنان با مساحت ۹۶۸۱۶ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی ۳۴° ۱۵' تا ۳۷° ۲۰' عرض شمالی و ۵۱° ۵۰' تا ۵۷° ۰۳' طول شرقی در فلات مرکزی ایران قرار گرفته است (شکل ۱). در نتیجه وجود رشته کوه‌های البرز در حاشیه مرز شمالی و وجود کویر مرکزی در بخش جنوبی آن، تغییرات شدید ارتفاعی در منطقه حاکم شده که این امر سبب تنوع در شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه شده است. به‌طوری که، میانگین بارش سالانه ۱۴۰ میلی‌متر بوده و حداقل و حداکثر مقادیر آن به‌ترتیب ۷۰ و ۴۲۰ میلی‌متر ثبت شده و توزیع مقادیر آن از شمال به جنوب رو به کاهش است. بر همین اساس، متوسط دمای سالانه استان برابر با ۱۷ درجه سانتی‌گراد و تغییرات

محصولات فعلی نقشه‌برداری جهانی سیلاب، با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر، مناطق خشک را به‌دلیل سردرگمی میان عرصه‌های شن و آب از تجزیه و تحلیل خود حذف می‌کنند، که این امر منجر به فقدان اساسی مشاهدات و مانع از واکنش و بازایابی به هنگام در این مناطق آسیب‌پذیر شده است. عدم وجود داده‌های کافی از سیلاب‌های گذشته در نتیجه پراکندگی جمعیتی و عدم ثبت دقیق حوادث گذشته و همچنین پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در این مناطق، نیازمند پژوهش‌های بیش‌تر و توسعه مدل‌های دقیق‌تر است. از سوی دیگر، مناطق خشک و نیمه‌خشک کوهستانی به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد اقلیمی (کمبود بارش، نوسانات شدید دما و بارندگی‌های ناگهانی و کوتاه‌مدت)، شرایط خاک (ظرفیت نفوذ پایین)، پوشش گیاهی (پراکنده و ناچیز) و همچنین توپوگرافی‌های پیچیده، مستعدترین مناطق جهان برای وقوع سیلاب‌های آبی هستند (Ghoneim and Foody, 2013; Sheikh et al., 2020; Sheikh et al., 2024). این نوع سیلاب‌ها به‌دلیل شدت و سرعت بالا، در زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند که این امر پیش‌بینی و شناسایی دقیق آن‌ها را به شدت دشوار ساخته است (Mahmoud and Gan, 2018; Kiyani Majd et al., 2023). مطالعات مختلف نشان می‌دهد ادغام داده‌های راداری سنتینل-۱ در زمان‌های مختلف و بهره‌گیری از روش‌های هوشمند پردازش تصویر، می‌تواند دقت نقشه‌برداری و شناسایی سیلاب در مناطق خشک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. همچنین استفاده از تصاویر اپتیک سنتینل-۲ و تصاویر ترکیبی چند طیفی سنتینل-۳ به‌عنوان مکمل داده‌های راداری سنتینل-۱ می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص پوشش زمین، رطوبت خاک و خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه فراهم کند (Ma et al., 2020; Lian et al., 2022).

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان سمنان واقع در حوزه آبخیز کویر مرکزی ایران است. محدوده انتخابی در نتیجه تغییرات شدید توپوگرافی (کوهستان تا کویر)، شرایط اقلیمی و محیطی متنوعی را تجربه می‌کند. وجود سازندهای مارنی و خاک‌های گچی در این منطقه، آن را به یکی از مناطق درگیر در وقوع سیلاب‌های آبی مهلک مبدل ساخته است. در چنین شرایطی، دستیابی به سریع‌ترین، دقیق‌ترین و کم هزینه‌ترین رویکردهای شناسایی مناطق درگیر با سیلاب می‌تواند به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران منطقه‌ای و ملی در پیشگیری،

⁴ Automated Thresholding

⁵ Flood Susceptibility Map

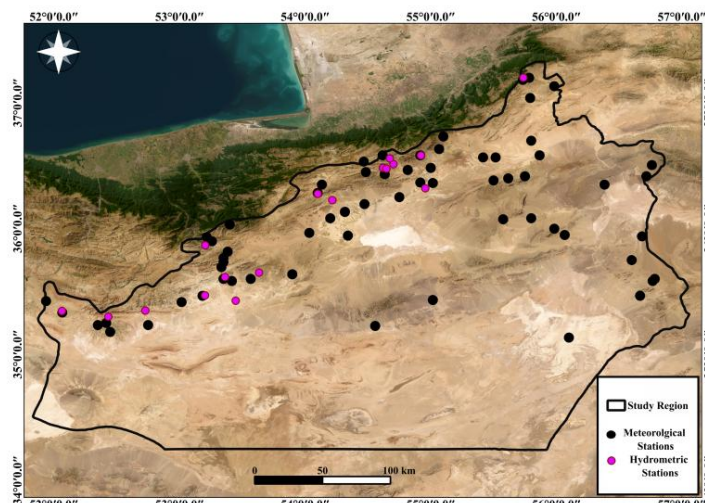
¹ Composite Spectral

² Normalized Difference Water Index

³ Band Differencing

اراضی همگام با نوسانات اقلیمی و وقوع بارش های شدید و رگباری منطقه مورد مطالعه را در معرض سیلاب های آبی قرار داده است.

شدیدی تجربه می کند. به طوری که کم ترین و بیش ترین مقادیر آن به ترتیب برابر با ۱۴ و ۲۵ درجه سانتی گراد است. حاکم بودن اقلیم خشک و نیمه خشک، وجود سازندهای گچی و نمکی، پوشش گیاهی ضعیف و پراکنده، وجود خاک های فرسایش پذیر و تغییر کاربری



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه های منتخب آب سنجی و هواشناسی

Fig. 1. The study area and the spatial distribution of selected hydrometric and meteorological stations

و اثربخش نظیر کامپوزیت باندی، شاخص NDWI، تفاضل باندی و آستانه گذاری خودکار برای استخراج پهنه های سیلابی بهره برداری شد. انتخاب این الگوریتم ها با استناد به مطالعات پیشین و اثبات کارایی آن ها در تفکیک دقیق نواحی مرطوب و آب گرفته، به ویژه در شرایط چالش برانگیز نظیر پوشش ابری و فقدان داده های میدانی گسترده مناطق خشک و نیمه خشک، انجام شد.

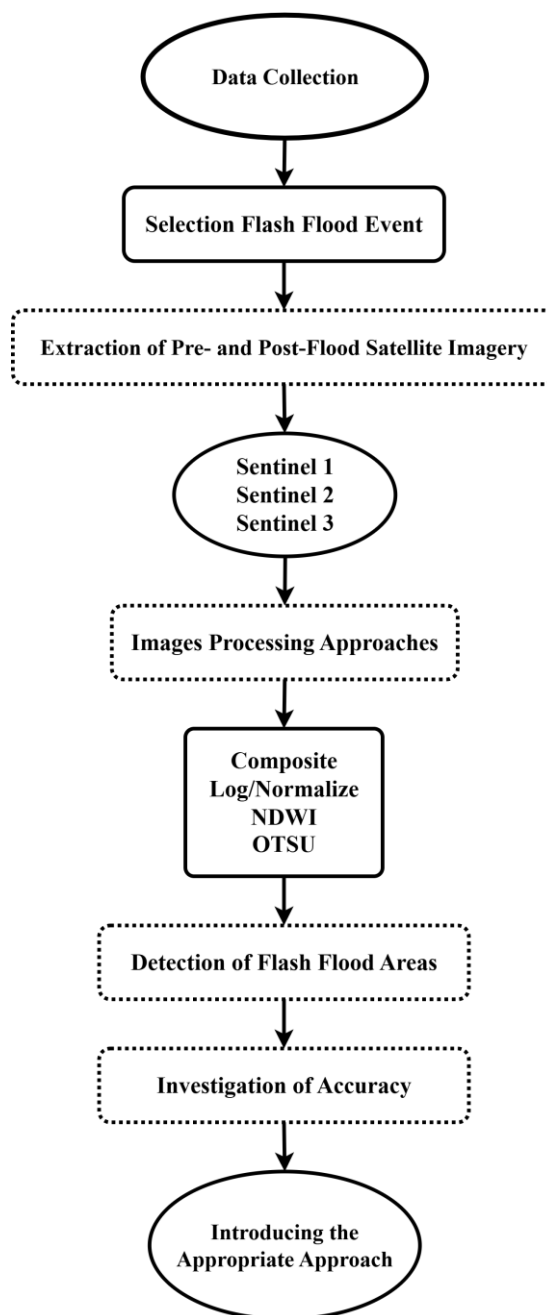
در گام سوم، برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ای، یک رویکرد سه سطحی شامل موارد زیر به کار گرفته شد: (۱) تحلیل و تطبیق نتایج با داده های زمینی بارش تجمعی ثبت شده در ایستگاه های هواشناسی منطقه؛ (۲) بررسی تطابق زمانی و مکانی نتایج با مقادیر دبی حداکثر لحظه ای ثبت شده در ایستگاه های آب سنجی؛ (۳) مقایسه نتایج با نقشه حساسیت سیلاب منطقه که بر اساس مدل های آماری و یادگیری ماشین برای منطقه هدف تولید شده و به عنوان لایه مرجع در پژوهش های مشابه شناخته می شود. در گام چهارم، با تحلیل تطبیقی نتایج حاصل از داده های ماهواره ای و زمینی و همچنین بررسی صحت مکانی نتایج در قیاس با نقشه حساسیت سیلاب، روش منتخب به عنوان یک چارچوب عملیاتی دقیق و قابل اتکا برای شناسایی سریع پهنه های سیلابی در مناطق خشک و نیمه خشک کوهستانی معرفی شد. مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۲، ارائه شده است.

۲-۲- روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و ارزیابی دقت پهنه های متأثر از سیلاب های آبی در مناطق خشک و نیمه خشک کوهستانی، با تمرکز بر رویدادهای سیلاب اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، طراحی و اجرا شده است. روند انجام پژوهش در قالب چهار گام اصلی به شرح زیر سازمان دهی شده است:

در گام نخست، شناسایی و انتخاب رویداد سیلاب هدف با بهره گیری از تصاویر روزانه NASA Worldview در بازه زمانی اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، مربوط به ماهواره های NOAA-20 حسگر VIIRS و ماهواره های Aqua و Terra حسگر MODIS صورت پذیرفت. با تحلیل توالی زمانی تصاویر و پایش تغییرات مرتبط با پوشش ابری و رطوبت سطحی زمین، بازه زمانی وقوع سیلاب با دقت تعیین شد. در ادامه، به منظور پایش و تفکیک دقیق پهنه های سیل گیر، مجموعه ای از تصاویر سنتینل-۱ (راداری SAR)، سنتینل-۲ (اپتیکال چندطیفی) و سنتینل-۳ (ترکیبی اپتیکال-حرارتی) متناسب با بازه زمانی رویداد و خصوصیات فیزیوگرافی منطقه گردآوری شد. انتخاب داده های راداری و اپتیکال با هدف پوشش دهی ضعف های موجود و بهره گیری از توانمندی های آن ها نظیر عدم تأثیرپذیری داده های SAR از پوشش ابری و حساسیت بالای داده های اپتیکال به تغییرات سطحی آب و رطوبت انجام شد.

در گام دوم، داده های گردآوری شده مورد پیش پردازش و پردازش تصویر قرار گرفتند. در این مرحله، از الگوریتم ها و تکنیک های متداول



شکل ۲- نمودار جریانی شناسایی پهنه‌های سیل با استفاده از تصاویر راداری و اپتیکی

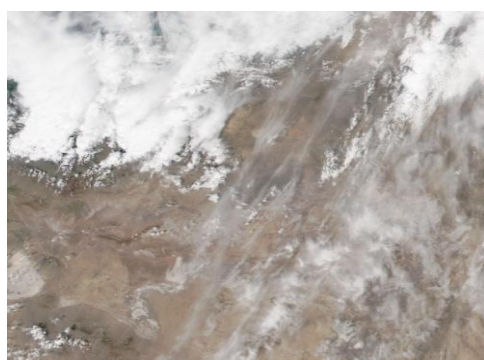
Fig. 2. Flowchart of flood area detection using radar and optical imagery

می‌کنند. وجود تفاوت در دوره‌های بازگشت ماهواره‌ای و وقوع چندین رویداد سیلاب در بازه انتخابی، سبب شد پس از بررسی زمان وقوع هر یک از رویدادهای سیلابی و همچنین تصاویر در دسترس، یکی از مهم‌ترین رویدادهای سیلاب بوقوع پیوسته در منطقه با بیش‌ترین فراوانی، خسارت و گستردگی، انتخاب و پهنه‌های سیلابی بر اساس این رویداد انتخاب شود. در نهایت، واقعه سیلاب ۱۴۰۰/۰۲/۱۸ به‌منظور بازه زمانی منتخب در نظر گرفته شد.

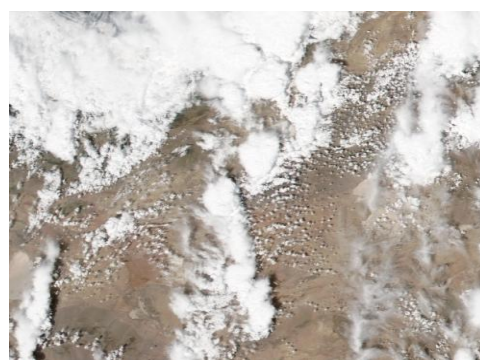
۳-۲- تعیین بازه زمانی منتخب برای تعیین پهنه‌های سیلابی

شکل‌های ۳ و ۴، وضعیت پوشش ابری و همچنین پهنه‌های آبیگری شده در سطح منطقه مورد مطالعه را بر پایه تصاویر روزانه NASA Worldview طی بازه زمانی ۱۴۰۰/۰۲/۱۲ تا ۱۴۰۰/۰۲/۲۵ مربوط به ماهواره‌های NOAA-20، حسگر VIIRS^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰۰ متر و ماهواره‌های Aqua و Terra حسگر MODIS با رزولوشن ۲۵۰-۱۰۰۰ متر ارائه

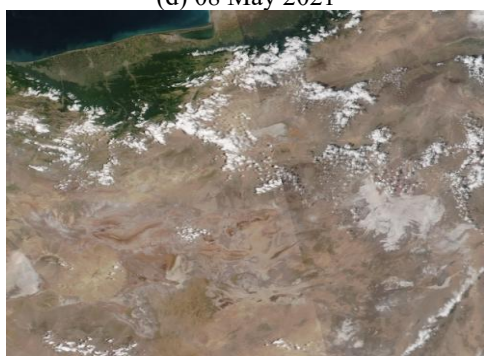
^۱ Visible Infrared Imaging Radiometer Suite



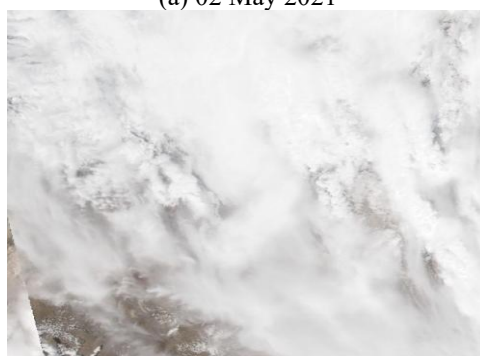
(d) 08 May 2021



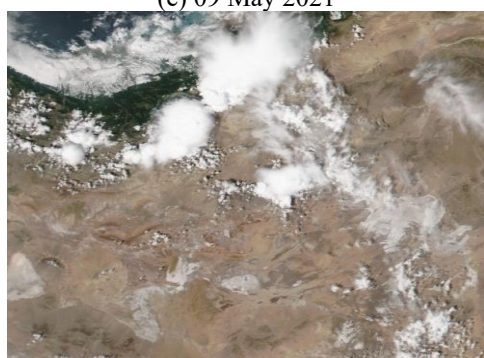
(a) 02 May 2021



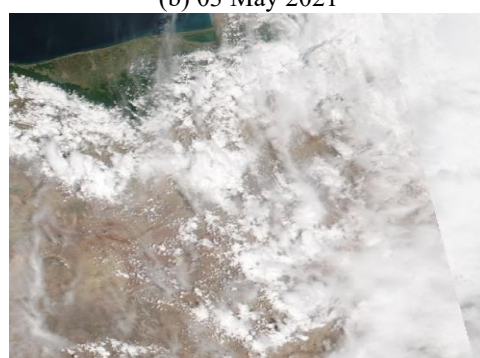
(e) 09 May 2021



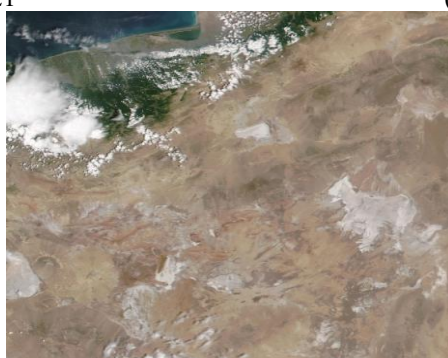
(b) 03 May 2021



(f) 13 May 2021



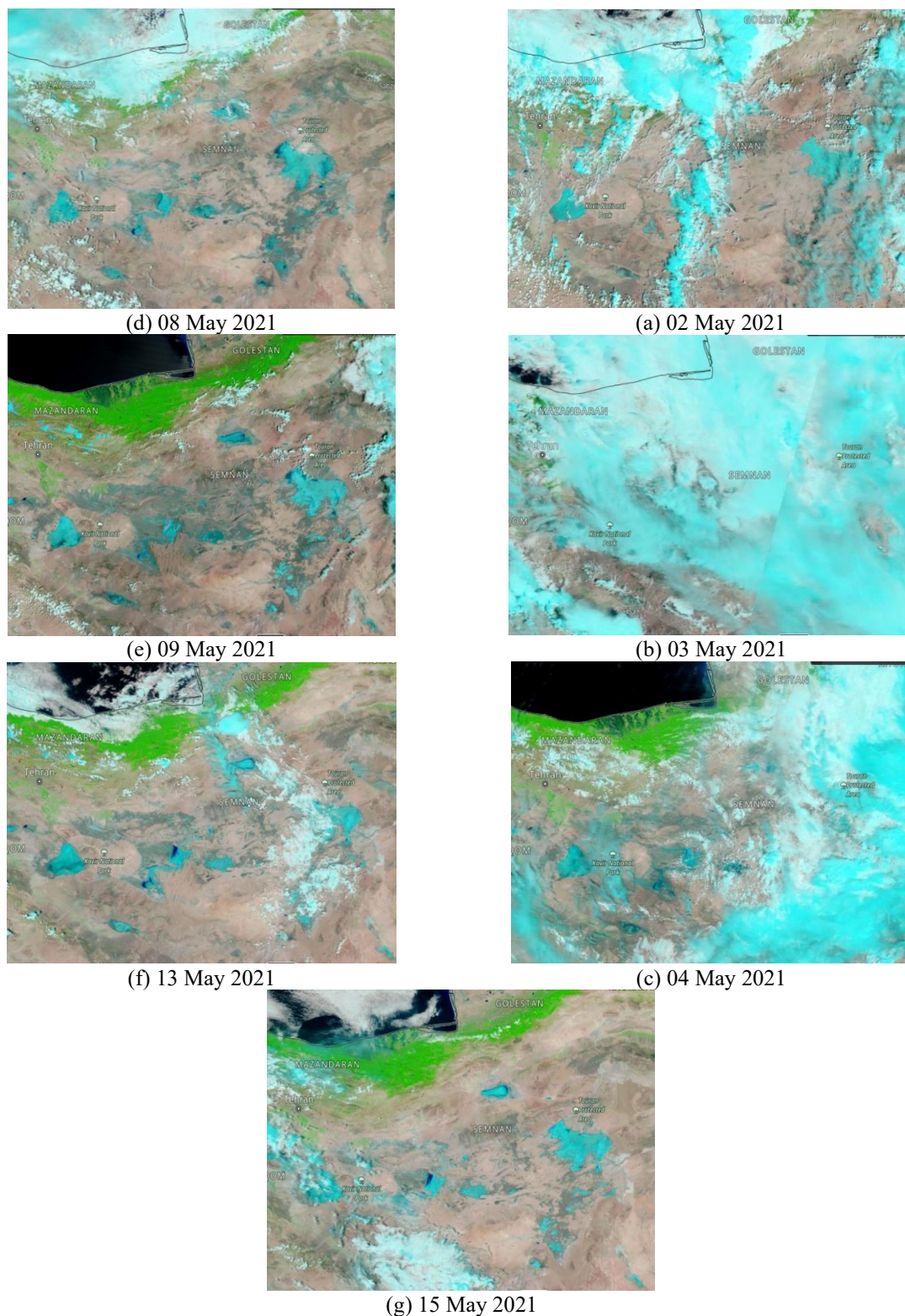
(c) 04 May 2021



(g) 15 May 2021

شکل ۳- وضعیت پوشش ابری در سطح منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی مورد بررسی بر اساس تصاویر ماهواره NOAA-20 و حسگر VIIRS

Fig. 3. Cloud cover status over the study area during the selected period based on NOAA-20 satellite imagery and the VIIRS sensor



شکل ۴- وضعیت رطوبت سطحی منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی مورد بررسی بر اساس تصاویر ماهواره‌های Aqua و Terra و حسگر MODIS

Fig. 4. Soil moisture status of the study area during the investigated time period based on Aqua and Terra Satellites and MODIS Sensor

۲-۴- پایگاه داده‌های مورد استفاده و منابع اطلاعاتی

۲-۴-۱- داده‌های مشاهداتی زمینی (ایستگاهی)

سری زمانی روزانه داده‌های بارش و مقادیر حداکثر دبی لحظه‌ای ثبت شده ایستگاه‌های واقع در سطح استان سمنان از شرکت مدیریت منابع آب و سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. برای این منظور، مقادیر بارش روزانه ۶۸ ایستگاه سینوپتیک، باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی موجود در سطح استان سمنان جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت.

۲-۴-۲- داده‌ها و محصولات سنجنش از دور (ماهواره‌ای)

ماهواره‌های سنتینل مجموعه‌ای از ماهواره‌های رصد زمین هستند که توسط آژانس فضایی اروپا^۱ (ESA) به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک^۲ با هدف دسترسی به موقع، آسان و دقیق اطلاعات توسعه یافته‌اند. این ماهواره‌ها دارای طیف وسیعی از فناوری‌ها نظیر رادار و ابزارهای تصویربرداری چند طیفی برای نظارت بر زمین، اقیانوس‌ها و جو هستند. خانواده سنتینل شامل چندین مأموریت سنتینل-۱، ۲، ۳، ۴، ۵p، ۶ است؛ که هر یک برای اهداف خاصی توسعه یافته‌اند. مهم‌ترین اهداف این پروژه نظارت بر پارامترهای مختلف محیطی و ارائه داده‌های حیاتی تغییر اقلیم و بهبود مدیریت محیط زیست بیان شده است. جدول ۱، ویژگی‌های ماهواره‌های سنتینل-۱، ۲ و ۳ را ارائه می‌کند.

علاوه بر این، نقشه جهانی پوشش زمین^۳ ماهواره PROBA-V، مدل رقومی ارتفاع^۴ ماهواره ALOS و نقشه پهنه‌های دائمی منابع آب^۵ بر اساس ماهواره لندست نیز مورد استفاده قرار گرفته است. پردازش‌های لازم بر روی این تصاویر در محیط سامانه Google Earth Engine صورت گرفته است.

۲-۴-۱- ماهواره سنتینل-۱

به منظور تعیین مناطق درگیر با سیلاب بر اساس تصاویر سنتینل-۱، از تصاویر قبل و بعد از وقوع سیلاب استفاده شد. فرآیندهای پیش پردازش بر روی تصاویر اعمال و پس از تعیین تاریخ تصاویر، منطقه مورد مطالعه محدود شد. برای این منظور، از فیلتر مکانی بر اساس محدوده مورد مطالعه استفاده شد. به دلیل بازتاب اندک آب و توانایی پولاریزاسیون VH در شناسایی این بازتاب‌ها، این پولاریزاسیون برای منطقه مناسب ارزیابی و اعمال شد. پولاریزاسیون VH به خصوص در شناسایی سطوح آب‌های کم عمق و یا در حال تغییر بسیار مؤثر شناخته شده است (Carreño Conde and De Mata Muñoz, 2019). به منظور

کالبراسیون و اطمینان از دقت و کارامدی داده‌ها، مقادیر raw backscatter values به σ_0 تبدیل شدند. این تبدیل، دقت تصاویر را افزایش داده و تأثیرات احتمالی عامل‌های محیطی، از جمله دما و رطوبت، را کاهش می‌دهد. Speckle Filtering فیلتر بعدی اعمال شده بر روی تصاویر بود تا مقادیر نویز (اغتشاش) در تصاویر SAR به حداقل برسد. علاوه بر این، فیلتر focal mean filter بر روی تصاویر اعمال شد. فیلترهای متداول در این زمینه شامل Lee filter و Frost filter هستند که در حذف نویز مؤثرند. اگرچه تصاویر راداری نسبت به تصاویر اپتیکال حساسیت کمتری به پوشش ابری دارند، اما هر گونه مصنوعات احتمالی حذف شد. به منظور تخمین شاخص سیلاب، با استفاده از روش تفاضل بانندی و آستانه‌گذاری، میزان اختلاف تصاویر پیش و پس از وقوع سیلاب محاسبه و در نهایت یک آستانه برای طبقه‌بندی مناطق سیلابی از غیر سیلابی اعمال شد.

۲-۴-۲- ماهواره سنتینل-۲

یکی از محدودیت‌های اصلی تصاویر اپتیک، پوشش ابر و همچنین عدم عبور ماهواره اپتیک در زمان وقوع سیلاب است. فیلترهایی بر اساس تاریخ، مکان و شرایط جوی (پوشش ابری) بر روی تصاویر اعمال شد. برخلاف تصاویر سنتینل-۱ که نسبت به پوشش ابری حساسیت کمی دارند، یکی از فیلترهای مهم در تصاویر سنتینل-۲ حذف پوشش ابری است. پس از اعمال فیلترهای لازم، با استفاده از ترکیب باندهای ۳-۴-۸ تصویر RGB Composite سه بانده از منطقه مورد مطالعه ایجاد شد. با هدف آشکارسازی بهتر تغییرات در تصاویر اپتیک، از رویکرد Log و نرمالایز بر اساس رابطه ۱:

$$Changes = \frac{(post - pre)}{(post + pre)} \quad (1)$$

هر چند که این روش نتایج مطلوبی ارائه نکرد. در ادامه، برای شناسایی دقیق‌تر، مناطق سیلابی از شاخص (NDWI) (رابطه ۲) استفاده شد.

۲-۴-۳- ماهواره سنتینل-۳

ماهواره سنتینل-۳ با ظرفیت‌های پیشرفته‌ای که از ابزارهای چندطیفی SLSTR^۶ و OLCI^۷ برخوردار است، به عنوان ابزاری کاربردی در نظارت بر اقیانوس‌ها، زمین و جو عمل می‌کند. SLSTR امکان اندازه‌گیری دماهای سطح دریا و زمین را با دقت بالا فراهم می‌کند و اطلاعات ارزشمندی درباره پهنه‌های آبی و سیلابی ارائه می‌دهد (Halder et al., 2024). به همین ترتیب،

⁴ ee.ImageCollection("JAXA/ALOS/AW3D30/V3_2")

⁵ ee.Image("JRC/GSW1_0/GlobalSurfaceWater")

⁶ Sea and Land Surface Temperature Radiometer

⁷ Ocean and Land Colour Instrument

¹ European Space Agency

² Copernicus

³ ee.ImageCollection("COPERNICUS/Landcover/100m/Proba-VC3/G")

تصویر RGB Composite سه بانده از منطقه مورد مطالعه قبل و بعد از وقوع سیلاب ایجاد شد. هم‌چنین به‌منظور آشکارسازی بهتر تغییرات از روش NDWI استفاده شد. پس از تعیین مقادیر NDWI پیش و پس از وقوع سیلاب، از رویکرد اختلاف NDWI برای شناسایی پهنه‌های سیلابی استفاده شد.

OLCI با تولید تصاویر چندطیفی در ۲۱ باند طیفی، رویکرد مؤثری برای تحلیل پوشش گیاهی، آب‌های سطحی و تغییرات زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود (Tan et al., 2023).

با استفاده از تکنیک کامپوزیت چند طیفی، می‌توان باند‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی را برای شناسایی دقیق‌تر نواحی آب‌گرفته به کار برد. پس از اعمال فیلترهای لازم،

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای منتخب به‌منظور شناسایی پهنه‌های سیل

Table 1. Characteristics of the selected satellite imagery for flood area identification

Feature	Sentinel-1	Sentinel-2	Sentinel-3
Launch Date	Sentinel-1A: 2014 Sentinel-1B: 2016	Sentinel-2A: 2015 Sentinel-2B: 2017	Sentinel-3A: 2016 Sentinel-3B: 2018
Temporal Resolution	6–12 days	5 days	1–2 days
Spatial Resolution	5–20 m	10, 20, 60 m	300 m
Technology Used	Equipped with C-band Synthetic Aperture Radar (SAR)	Multispectral Imager (MSI) with 13 spectral bands	Equipped with Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR), Ocean and Land Colour Instrument (OLCI), radar altimeter, and multispectral bands for ocean and land monitoring
Strengths	Ability to capture images in various weather conditions, day or night; suitable for monitoring floods, surface movements, forests, oil pollution, and polar glaciers	High-resolution multispectral imagery, suitable for monitoring agriculture, forestry, soil, surface waters, land cover classification, and natural disaster management	Suitable for monitoring sea surface topography, accurate land and sea surface temperature, and ocean color
Weaknesses	Limited optical imaging due to radar usage; difficulty distinguishing water from dry land due to similar radar backscatter	Sensitive to weather conditions and cloud cover	Lower spatial resolution compared to Sentinel-1 and Sentinel-2

است. این روش به‌دلیل سادگی محاسباتی و کارایی در بسیاری از سناریوها، غیرپارامتریک بودن و عدم نیاز به تعیین پارامترهای خارجی، قابلیت استفاده گسترده در تصاویر چندطیفی را دارا است. با این حال OTSU معایبی نیز دارد که شامل عملکرد ضعیف در تصاویر چند کلاسه و حساسیت به نویز است، به‌طوری که در تصاویر با نویز بالا یا پیچیده ممکن است نتایج دقیقی ارائه ندهد (Liao et al., 2001).

در پژوهش حاضر به‌منظور به‌کارگیری روش OTSU، نخست، تصاویری راداری سنتینل-۱ پیش و پس از وقوع سیلاب انتخاب و پردازش شدند. برای محدود کردن منطقه مورد مطالعه، از منطق بولین و لایه‌های اطلاعاتی مکانی شامل پوشش زمین، شیب زمین و آب‌های دائمی استفاده شد. به‌منظور برآورد شیب و اعمال شیب‌های کمتر از ۵ درصد از تصاویر ماهواره ALOS استفاده شد. لایه مربوط به آب‌های دائمی بر اساس تصاویر لندست تهیه شد و همراه با نقشه جهانی پوشش زمین ماهواره PROBA-V به‌عنوان عامل‌های محدودکننده اعمال شدند. اختلاف پیکسل به پیکسل میان تصاویر پیش و پس از وقوع سیلاب تهیه شد. سپس، هیستوگرام اختلاف شدت این تصاویر استخراج شد. روش آستانه‌گذاری OTSU به‌طور خودکار، آستانه

۲-۵- روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای

۲-۵-۱- روش آستانه‌گذاری OTSU برای شناسایی خودکار مناطق سیل‌گیر در تصاویر راداری

آستانه‌گذاری تصویر یکی از تکنیک‌های کلیدی و پرکاربرد در پردازش تصویر است که بخش‌های مختلف تصویر بر اساس شدت روشنایی آن‌ها تفکیک می‌شود. روش OTSU، یکی از معروف‌ترین و مؤثرترین روش‌های آستانه‌گذاری تصاویر است؛ که به‌صورت خودکار آستانه بهینه‌ای برای جداسازی پیکسل‌های بین دو گروه بر پایه بیشینه کردن واریانس بین کلاس‌ها، تعیین می‌کند (OTSU, 1979). هدف اصلی این روش، کمینه‌سازی واریانس درون کلاسی و حداکثرسازی واریانس بین کلاسی است. در این روش فرض می‌شود که هیستوگرام تصویر به‌طور تقریبی دو قله‌ای است، که نمایانگر دو دسته متمایز از پیکسل‌ها است. مراحل اصلی اجرای این روش شامل ایجاد هیستوگرام تصویر بر اساس شدت پیکسل‌های تصویر، برآورد واریانس بین کلاسی، انتخاب آستانه بهینه بر اساس واریانس بین کلاسی و تقسیم پیکسل‌ها است.

روش OTSU از مزایای متعددی برخوردار است که آن را به یکی از روش‌های محبوب در آستانه‌گذاری خودکار تبدیل کرده

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر با استفاده از

تصاویر سنتینل-۱، ۲ و ۳

پهنه‌های متأثر از سیل در منطقه مورد مطالعه با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱، ۲ و ۳ و با به‌کارگیری روش‌های منتخب پردازش تصاویر در شکل‌های ۵ تا ۸، نمایش داده شده است. بر اساس تصاویر سنتینل-۱ و با استفاده از روش تفاضل باندی و آستانه‌گذاری، وسعت کل مناطق سیلابی در حدود ۴۳۱۸۳۵ هکتار برآورد شد (شکل ۵). بخش اعظم این پهنه‌ها در نواحی شمالی و همچنین بخش‌های مرکزی و جنوبی استان که عمدتاً مناطق کویری و فروچاله‌ها را شامل می‌شوند، واقع شده است. این مناطق به دلیل شرایط خاص ژئومورفولوژیکی و اقلیمی، استعداد بالایی در وقوع سیلاب‌های گسترده دارند و عمدتاً خالی از سکنه و فاقد داده‌های میدانی دقیق هستند. در مقابل، پهنه‌های سیلابی شناسایی شده در نوار شمالی استان که ارتفاعات بالاتری دارند، عمدتاً مناطق تولید رواناب بوده و شکل‌گیری سیلاب در آن‌ها کمتر محتمل است. یافته‌های این بخش با نتایج مطالعه Carreño Conde and De Mata Muñoz (2019) و مطابق دارد که استفاده ترکیبی از روش‌های کامپوزیت RGB و آستانه‌گذاری بر روی تصاویر سنتینل-۱ را به‌عنوان رویکردی مؤثر در شناسایی دقیق پهنه‌های سیلابی معرفی کردند.

پهنه‌های سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر سنتینل-۲ و روش NDWI در شکل ۶ با رنگ آبی متمایز شده‌اند و وسعتی در حدود ۲۶۸۰۰۰ هکتار را به خود اختصاص داده‌اند. این پهنه‌ها محدود به فروچاله‌ها و نواحی پست واقع در سطح منطقه، از جمله بخش شرقی دریاچه نمک (در جنوب غربی استان سمنان)، دریاچه نمک حاج علیقلی دامغان (واقع در بخش مرکزی استان) و سایر فروافتادگی‌های واقع در جنوب شرق و جنوب استان متمرکز بوده است. این نتایج، عدم توانایی این رویکرد در شناسایی دقیق پهنه‌های سیلابی در منطقه مورد مطالعه را آشکار کرد. این نتایج با پژوهش Santeccchia et al. (2023) هم‌خوانی دارد، که در مطالعه‌ای در آرژانتین بر روی آب‌بندان‌های کم‌عمق در آرژانتین، همبستگی ضعیفی میان NDWI استخراج شده از تصاویر سنتینل-۲ و وسعت واقعی سیلاب گزارش کردند. در این پژوهش، حساسیت NDWI به نوع سنجنده و شاخص انتخابی مورد تأکید قرار گرفت.

در تضاد با این یافته‌ها، Singh and Kansal (2002) در منطقه Chamoli هند، با بهره‌گیری از تصاویر اپتیکی سنتینل-۲ و شاخص NDWI، پهنه‌های سیلابی با دقت بالایی شناسایی

پهنه‌های را بر اساس توزیع فراوانی پیکسل‌ها در هیستوگرام تعیین کرد. این آستانه، نقطه‌ای را مشخص می‌کند که به بهترین وجه مناطق سیلابی (با اختلاف شدت بالا) را از مناطق غیرسیلابی (با اختلاف شدت پایین) جدا می‌کند. پس از اعمال آستانه OTSU، برای حذف نویز و بهبود مرزهای مناطق سیلابی از فیلتر استفاده شد. این مرحله به حذف نقاط پراکنده و کوچک ناشی از نویز در تصویر کمک می‌کند و نقشه پهنه‌های سیلابی را دقیق‌تر می‌کند.

۲-۵-۲ روش Normalized Difference Water Index (NDWI)

شاخص NDWI نخستین شاخص شناسایی منابع آبی است که توسط McFeeters (۱۹۹۶) توسعه یافت. هدف اصلی این شاخص، شناسایی و آشکارسازی منابع آبی بر اساس اطلاعات سنجش از دور با به‌کارگیری باند مادون قرمز نزدیک^۱ (NIR) با طول موج ۸۴۲ نانومتر و باند سبز (GREEN) با طول موج ۵۶۰ نانومتر است (رابطه ۲):

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (2)$$

بر اساس این شاخص، مقادیر ارزش بازتابی پیکسل‌ها بین ۱- تا +۱ بوده که مقادیر (+۱ تا ۰) بیانگر پهنه‌های سیلابی و مقادیر (۰- تا ۱-) بیانگر مناطق غیرسیلابی است. این شاخص تفاوت‌های بین پوشش گیاهی و آب را به خوبی نشان می‌دهد (McFeeters, 1996).

۲-۵-۳ روش کامپوزیت باندی

در سامانه‌های سنجش از دور، هر باند طیفی حامل اطلاعاتی خاص از بازتاب یا گسیل سطح زمین در یک محدوده طول موج مشخص است. با این حال، اطلاعات منفرد یک باند، اغلب برای تحلیل‌های دقیق کافی نیست. از این‌رو، روش کامپوزیت باندی، با ادغام چند باند منتخب (معمولاً RGB یا NIR-SWIR-Red) در قالب تصویر ترکیبی، امکان استخراج ویژگی‌های سطح زمین از جمله پوشش گیاهی، رطوبت خاک، منابع آبی و حتی کانی‌شناسی را فراهم می‌سازد (Richards and Jia, 2006). روش کامپوزیت باندی یکی از روش‌های مهم در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که با ترکیب و ادغام باندهای مختلف طیفی از یک یا چند تصویر، هدف آن بهبود توان تفکیک و تشخیص ویژگی‌های سطح زمین است، تا اطلاعات بیش‌تر و دقیق‌تری از سطح زمین به‌دست آید (Halder et.al., 2024).

¹ Near Infra Red

۱۰۰۵۰۴۵ هکتار برآورد شد که معادل تقریباً ۱۱ درصد از کل وسعت منطقه مورد مطالعه (۹ میلیون هکتار) است. این برآورد به‌طور آشکاری بیش‌برآورد بوده و با واقعیت‌های میدانی منطبق نیست. این نتایج با پژوهش‌های Yang, Wang et al. (2019) و Jiang et al. (2020) هم‌راستا است.

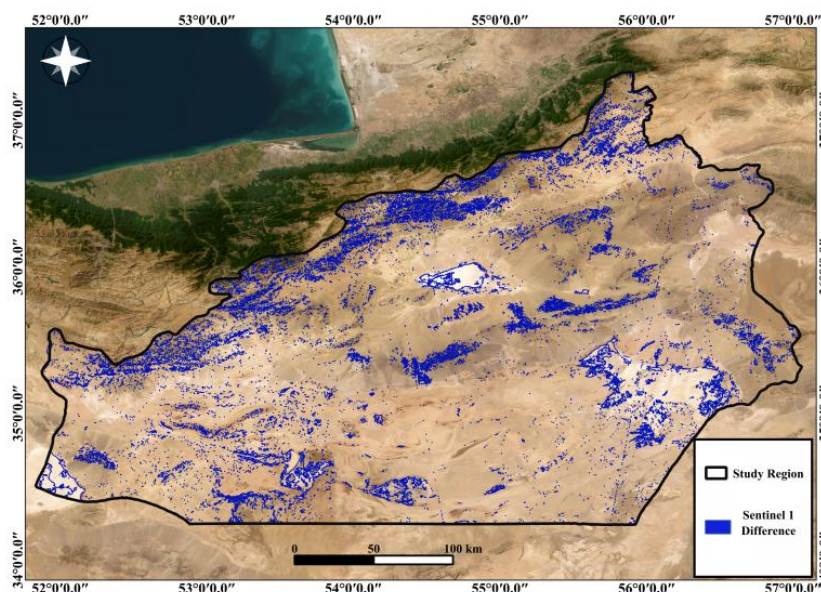
آن‌ها بیان داشتند، وضوح مکانی پایین (۳۰۰ متری) سنتینل-۳، منجر به همپوشانی پیکسل‌های آب و خشکی و در نتیجه بیش‌برآورد سطح سیلاب می‌شود. به عبارت دیگر، اگر یک پیکسل شامل مقادیر قابل توجهی از آب باشد، شاخص NDWI کل آن پیکسل را به‌عنوان آب طبقه‌بندی می‌کند که موجب ایجاد خطای مثبت در برآورد مساحت سیلاب می‌شود.

پهنه‌های سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر راداری سنتینل-۱ و روش آستانه‌گذاری خودکار OTSU در شکل ۸، نمایش داده شده است. بر این اساس وسعت مناطق سیلابی در حدود ۴۶۷۳۷۹ هکتار برآورد شد. جزئیات کامل مربوط به پهنه‌های سیلابی استخراج شده از هر یک از تصاویر و روش‌های پردازش منتخب در جدول ۲، ارائه شده است.

شد. همچنین، روش NDWI را به‌عنوان ابزاری سریع و مؤثر برای شناسایی اولیه نواحی آبی معرفی کردند. همچنین، Petropoulos et al. (2024) از دو شاخص NDWI و MNDWI برای تعیین پهنه‌های سیلاب در حوضه‌ای در ایتالیا استفاده کردند.

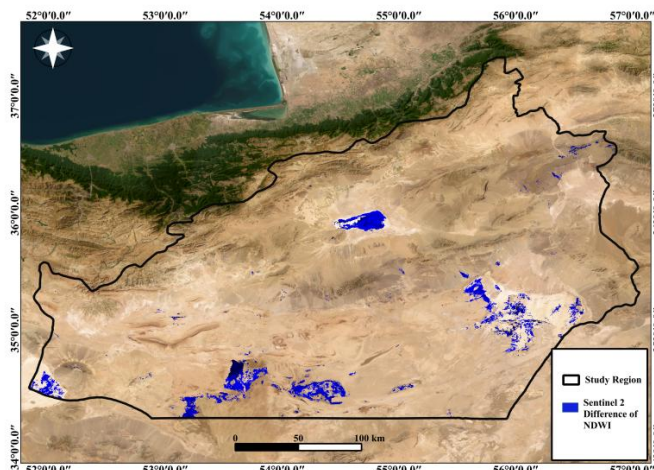
نتایج نشان داد که شاخص‌های NDWI و MNDWI هر دو در تعیین پهنه‌های سیلابی عملکرد مناسبی داشته و شاخص NDWI دقت کمی بالاتری در تفکیک آب از خاک و پوشش گیاهی ارائه می‌کند. مناطق سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر سنتینل-۳ و شاخص NDWI در شکل ۷، ارائه شده است. در تصاویر سنتینل-۳، شاخص NDWI با استفاده از باندهای OLCI تولید و برای شناسایی پهنه‌های آبی و مناطق سیلابی بسیار مؤثر است.

این شاخص با تقویت آب و سرکوب پوشش گیاهی و خاک، به تشخیص دقیق‌تر آب‌های سطحی مؤثر است (Jiang et al., 2020). بر اساس نتایج کسب شده پهنه‌های سیلابی شامل مناطق گسترده و پراکنده غیرمتمرکز در سطح منطقه بوده است؛ به‌طوری‌که تقریباً تمام بخش‌های محدوده را پوشش می‌دهد. وسعت پهنه‌های سیلابی شناسایی شده با این روش بالغ بر

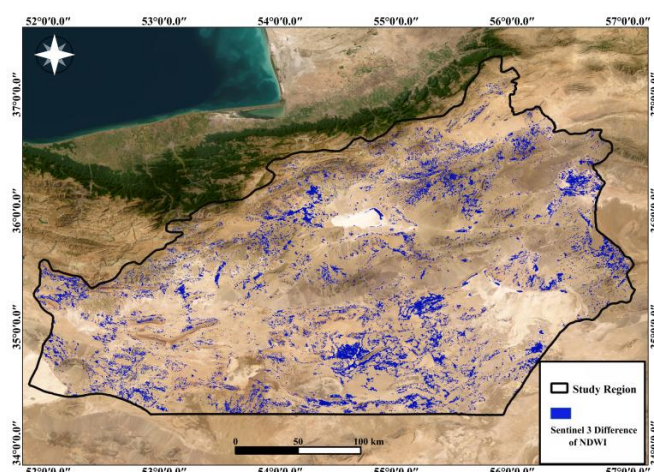


شکل ۵- پهنه‌های سیلابی شناسایی شده در تصاویر راداری سنتینل-۱ و روش تفاضل باندی و آستانه‌گذاری

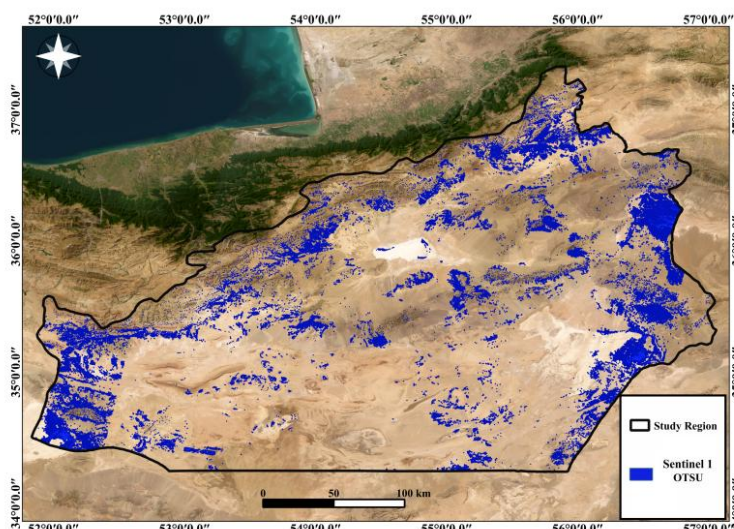
Fig. 5. Flood-prone areas identified in Sentinel-1 radar imagery using band-difference and thresholding method



شکل ۶- پهنه‌های سیل گیر شناسایی شده در تصاویر اپتیکی سنتینل-۲ و روش اختلاف NDWI
Fig. 6. Flood-prone areas identified in Sentinel-2 optical imagery employing NDWI differencing technique



شکل ۷- پهنه‌های سیل گیر شناسایی شده در تصاویر اپتیکی سنتینل-۳ و روش اختلاف NDWI
Fig. 7. Flood-prone areas identified in Sentinel-3 optical imagery and using NDWI differencing



شکل ۸- پهنه‌های سیل گیر شناسایی شده در تصاویر راداری سنتینل-۱ بر اساس روش خودکار OTSU
Fig. 8. Flood-prone areas identified in Sentinel-1 radar imagery based on the automated OTSU thresholding method.

جدول ۲- جزئیات پهنه‌های سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های منتخب پردازش تصویر

Satellite Images	Selected Method for Floodplain Identification	Detected Floodplain Area (ha)
Sentinel-1 radar images	Band differencing and thresholding	431,835
	Automatic OTSU thresholding	467,379
Sentinel-2 optical images	NDWI difference	268,000
Sentinel-3 optical images	NDWI difference	1,005,045

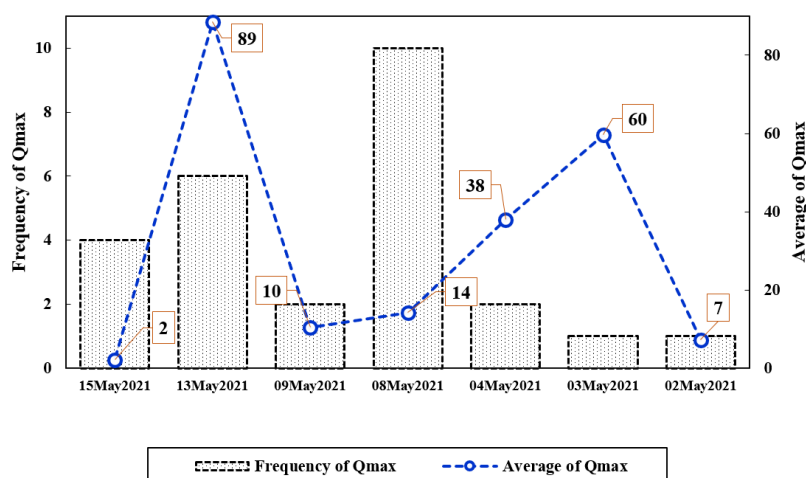
متوسط دبی حداکثر لحظه‌ای طی بازه زمانی منتخب را ارائه می‌کند. بر اساس این نمودار، روزهای ۱۸ و ۲۳ اردیبهشت ماه به ترتیب با ۱۰ و ۶ واقعه سیلاب ثبت شده در سطح ایستگاه‌های آب‌سنجی بیش‌ترین فراوانی سیلاب‌های مشاهداتی را داشتند. این در حالی است که بیش‌ترین مقادیر متوسط دبی حداکثر لحظه‌ای به ترتیب به تاریخ‌های ۲۳ و ۱۳ اردیبهشت ماه و با مقادیر متناظر ۸۹ و ۶۰ مترمکعب بر ثانیه اختصاص یافته است. باید در نظر داشت، پراکنش و توزیع ایستگاه‌های آب‌سنجی در سطح منطقه مورد مطالعه یکنواخت نبوده و بر اساس موقعیت قرارگیری آن‌ها، ایستگاه‌های موجود فقط قادر به پوشش نسبی بخش‌های شمالی منطقه هستند. از سوی دیگر با توجه به وسعت قابل توجه منطقه مورد مطالعه (۹ میلیون هکتار) تعداد ۲۳ ایستگاه آب‌سنجی پوشش‌دهی کافی از کل منطقه را نخواهند داشت. اگر چه به دلیل حاکمیت اقلیم خشک و نیمه‌خشک و قرارگیری بخش‌هایی از کویر مرکزی در سطح استان، اغلب رودخانه‌های منطقه، فصلی و غیردائمی هستند، اما با توجه به وقوع سیلاب‌های آنی و روند رو به رشد این رویدادهای حدی طی دهه‌های اخیر، تکمیل و گسترش شبکه پایش آب‌سنجی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باید مورد تجدیدنظر قرار گرفته تا اطلاعات دقیق‌تر از میزان آبدهی و توزیع زمانی-مکانی سیلاب‌های آنی در اختیار قرار گیرد.

بر اساس نتایج جدول ۲، بیش‌ترین و کم‌ترین وسعت پهنه‌های سیلابی شناسایی شده به ترتیب مربوط به تصاویر اپتیک سستینل-۳ و سستینل-۲ با مقادیر متناظر ۱۰۰۵۰۴۵ و ۴۶۸۰۰۰ هکتار است. هم‌چنین، وسعت مناطق سیلابی تفکیک شده بر پایه تصاویر راداری سستینل-۱، بر اساس دو روش پردازش تصویر تفاضل باندی و آستانه‌گذاری خودکار، بسیار به هم نزدیک و به ترتیب برابر با ۴۳۱۸۳۵ و ۴۶۷۳۷۹ هکتار برآورد شد.

۲-۳- ارزیابی صحت نتایج

۳-۲-۱- بررسی رویدادهای سیلاب ایستگاهی رخ داده در منطقه

بازه زمانی مورد نظر (اردیبهشت ۱۴۰۰)، ۲۶ واقعه سیلاب از مجموع کل ۴۲ سیلاب روی داده را به خود اختصاص داده است. به عبارت دیگر، بیش از ۶۰ درصد سیلاب‌های مربوط به سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در این بازه زمانی بوقوع پیوسته است و این امر نشان‌دهنده فراوانی قابل توجه و فراگیری سیلاب در سطح کل منطقه مورد مطالعه بوده است. بر پایه این داده‌ها، بیش‌ترین دبی حداکثر لحظه‌ای ثبت شده با ۳۱۱ متر مکعب بر ثانیه مربوط به ایستگاه بنکوه و بیش‌ترین فراوانی رویدادهای سیلاب با ۱۰ واقعه مربوط به تاریخ ۱۴۰۰/۰۲/۱۸ شناسایی شد که گزارش‌های متعددی از وقوع خسارت و آسیب طی بازه زمانی نیز ارائه شده است. شکل ۹، فراوانی رویدادهای سیلاب ثبت شده و مقادیر



شکل ۹- توزیع فراوانی و مقادیر میانگین حداکثر دبی سیلابی در سطح استان سمنان طی سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

Fig. 9 – Frequency distribution and maximum discharge values across Semnan Province during the 2020-2021 hydrological year

۳-۲-۲- بررسی وضعیت بارش در سطح منطقه مورد مطالعه

شکل ۱۰، مقادیر فراوانی، حداکثر و مجموع رویدادهای بارش به وقوع پیوسته طی بازه ۱۴۰۰/۰۲/۱۱ تا ۱۴۰۰/۰۲/۲۵ در سطح استان سمنان را ارائه می کند. طی این دوره، مجموع تعداد رویدادهای بارش ثبت شده در سطح کل ایستگاههای منطقه برابر با ۳۴۱ واقعه و مجموع مقادیر بارش دریافتی برابر با ۲۵۶۱ میلی متر برآورد شد. توزیع مکانی بارش ها نیز بیانگر گستردگی اثر و پراکنش آن ها در سطح تمام ایستگاههای دایر بوده است. بر اساس این نتایج مشخص شد، بخش های شمالی و مرکزی منطقه بیشترین مقادیر بارش را به دلیل شرایط توپوگرافی، وجود ارتفاعات و نفوذ توده هوای مرطوب به خود اختصاص داده اند. لازم به ذکر است، با توجه به نحوه پراکنش ایستگاههای باران سنجی در سطح منطقه مورد مطالعه، اطلاعات دقیقی از میزان بارش دریافتی بخش های جنوبی منطقه در دسترس نبوده است.

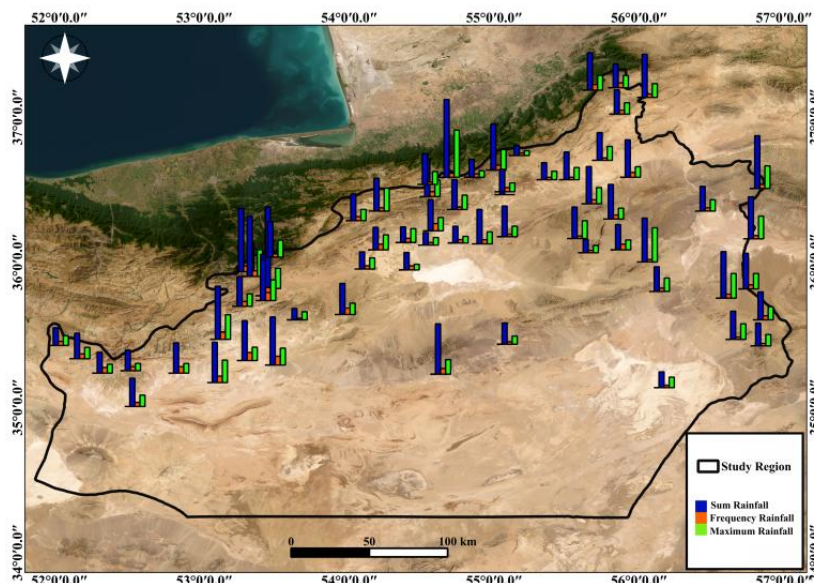
در پژوهش حاضر، بررسی الگوی مکانی و زمانی بارش به عنوان یک شاخص اولیه در تعیین نواحی مستعد وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. در تحلیل همبستگی میان پهنه های سیلابی استخراج شده از تصاویر ماهواره ای و توزیع بارش زمینی، مشخص شد که تصاویر سنتینل-۲ ضعیف ترین انطباق را نشان داده و محدوده های سیلابی شناسایی شده بر اساس این داده ها، کمترین همبستگی مکانی با الگوی بارش ثبت شده داشتند. در مقابل، پهنه های سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر سنتینل-۱ و روش آستانه گذاری OTSU و همچنین تصاویر سنتینل ۳ مبتنی بر روش NDWI انطباق قابل قبولی با بارش های ثبت شده در ایستگاه های زمینی را نشان دادند. باید توجه داشت، بهره گیری از داده های بارش ماهواره ای (با پوشش شبکه ای پیوسته در سطح منطقه) نسبت به داده های نقطه ای ایستگاهی می تواند دیدگاه دقیق تر و کامل تری از پراکنش بارش فراهم آورد. با این وجود، به دلیل عدم قطعیت های موجود در داده های بارش ماهواره ای و نیاز به کالیبراسیون دقیق با داده های مشاهداتی زمینی، در این پژوهش داده های ایستگاهی به عنوان مرجع استفاده شده اند.

از سوی دیگر، باید تأکید کرد که میزان بارش و الگوی مکانی آن تنها یکی از عوامل مؤثر در تعیین پهنه های سیلابی است و فاکتورهای محیطی متعددی نظیر خصوصیات خاک، پوشش گیاهی، شیب زمین و کاربری اراضی نیز در وقوع و گسترش سیلاب نقش اساسی ایفا می کنند. لذا تحلیل سیلابی جامع نیازمند

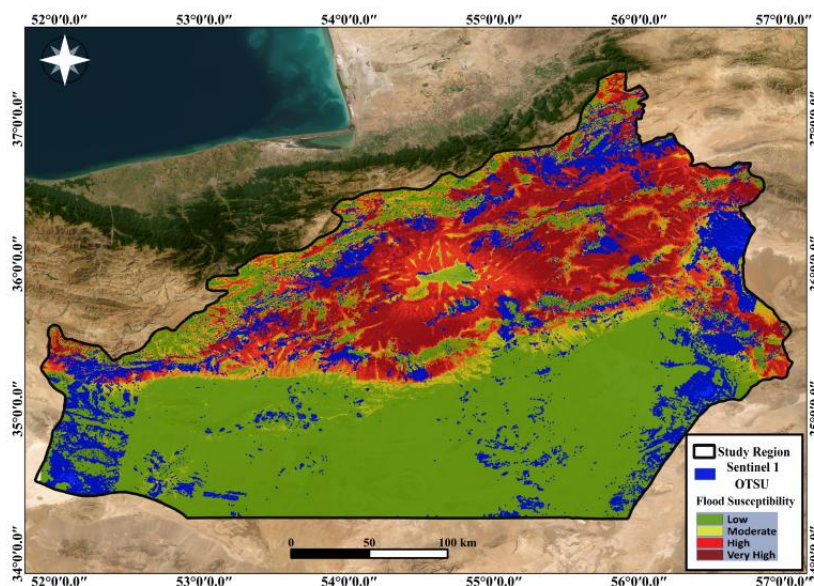
تلفیق داده های بارش با سایر متغیرهای محیطی و مدل های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی دقیق خواهد بود.

۳-۲-۳- بررسی نقشه حساسیت سیلاب استان سمنان
به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از روش OTSU، نتایج با نقشه حساسیت سیلاب ارائه شده در مطالعه (Sheikh et al. (2025) مقایسه شد (شکل ۱۱). این نقشه با استفاده از مشاهدات زمینی نقاط سیلابی و ۱۹ پارامتر مؤثر و یک مدل ترکیبی مبتنی بر نتایج چهار روش یادگیری ماشین Random Forest، Support Vector Regression (SVR)، GLMnet و TreeBag تهیه شده است. این نقشه با توجه به محدودیت در داده های مشاهداتی سیلاب در دسترس که بخش جنوبی استان را به دلیل وجود کویر پوشش نمی دهد و برای نیمه شمالی استان تهیه شده است. مقایسه نتایج پهنه های سیلابی حاصل از روش OTSU و نقشه حساسیت سیلاب نشان داد که همپوشانی قابل توجهی بین مناطق سیلابی شناسایی شده توسط روش OTSU و کلاس های با خطر بسیار بالا و بالا در نقشه حساسیت سیلاب وجود دارد. این یافته ها با مطالعه (Li et al. (2023) مطابقت دارد. در پژوهش Li et al. (2023) روش آستانه گذاری OTSU برای پردازش تصاویر ماهواره ای به منظور شناسایی مناطق سیلابی معرفی شد. این روش، که به صورت خودکار آستانه های بهینه را برای تفکیک آب از زمین انتخاب می کند، در تحلیل تصاویر ماهواره ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲ برای شناسایی سیلاب ها استفاده شد. نتایج نشان داد که این تکنیک در مقایسه با روش های سنتی پردازش تصویر، بالاترین دقت در شناسایی مناطق سیلابی، به ویژه در مناطق خشک، دارد. ارزیابی سایر روش های مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که پهنه های سیلابی استخراج شده بر اساس تصاویر سنتینل-۱ و تکنیک تفاضل باندی، غالباً با کلاس های حساسیت سیلاب متوسط و پایین مطابقت داشته اند. همچنین تصاویر سنتینل-۲ ضعیف ترین عملکرد را در شناسایی محدوده های سیلابی نشان دادند؛ به طوری که وسعت پهنه های آشکار شده محدود بوده و عمدتاً با کلاس های حساسیت سیلاب پایین و متوسط انطباق داشته است.

در مقابل، تحلیل عملکرد تصاویر سنتینل-۳ با استفاده از شاخص NDWI نتایج مطلوب تری را نشان داد. پهنه های سیلابی شناسایی شده در این روش، همپوشانی قابل توجهی با کلاس های حساسیت بالا و بسیار بالا در نقشه حساسیت سیلاب داشتند. این یافته نشان دهنده توانایی بالاتر داده های سنتینل-۳ در تفکیک دقیق نواحی تحت تأثیر سیلاب است.



شکل ۱۰- مقادیر فراوانی، حداکثر و مجموع بارش بوقوع پیوسته در سطح استان سمنان (طی بازه ۱۴۰۰/۰۲/۱۱ تا ۱۴۰۰/۰۲/۲۵)
 Fig. 10. Frequency, maximum, and cumulative precipitation values recorded across Semnan Province (during the period of 11/02/1400 to 25/02/1400)



شکل ۱۱- همپوشانی پهنه‌های سیلابی شناسایی شده در تصویر سنتینل-۱ با استفاده از روش آستانه‌گذاری OTSU و نقشه حساسیت

سیلاب حاصل از پژوهش Sheikh et al. (2025)

Fig. 11. Overlay of flood-prone areas identified in Sentinel-1 imagery using the OTSU thresholding method and the flood susceptibility map from Sheikh et al. (2025)

سیلابی بود که با نتایج Tran et al. (2022) و Li et al. (2023) منطبق است.

اگرچه شاخص NDWI در شناسایی مناطق آبی مؤثر است، اما در برخی موارد ممکن است تحت تأثیر پوشش گیاهی مرطوب یا خاک‌های مرطوب قرار گرفته و منجر به نتایج اشتباه شود. همچنین، دقت این شاخص در مناطقی که سیلاب‌ها به سرعت گسترش می‌یابند، ممکن است به دلیل محدودیت وضوح مکانی

۳-۲-۴- ارزیابی تفاوت در عملکرد روش‌های مورد بررسی یافته‌های اخیر نشان داده‌اند، روش‌های آستانه‌گذاری خودکار، به‌ویژه آستانه‌گذاری OTSU، به بهبود دقت در شناسایی مناطق سیلابی کمک کرده‌اند. این روش‌ها به‌طور خودکار به تحلیل تصاویر پرداخته و مناطق سیلابی را تفکیک می‌کنند (Li et al., 2023). نتایج کسب شده در پژوهش حاضر نیز، بیانگر دقت قابل قبول روش آستانه‌گذاری OTSU در شناسایی پهنه‌های

تصاویر (مانند تصاویر سنتینل-۳) کم‌تر باشد. باید در نظر داشت، شاخص NDWI قادر به شناسایی آب‌های کدر و گل‌آلود نیز نیست (McFeeters, 1996) و بر عملکرد آن در شناسایی سیلاب‌های آبی که مشخصه بارز آن‌ها گل‌آلودگی است، مؤثر است.

عملکرد متفاوت در سنتینل‌های ۱، ۲ و ۳ را می‌توان به خصوصیات متمایز آن‌ها نسبت داد. تصاویر راداری (SAR) که معمولاً برای شناسایی سیلاب در شرایط ابری و شبانه استفاده می‌شوند، در مناطق خشک با پوشش گیاهی کم ممکن است با چالش‌های زیادی در تفکیک آب از زمین مواجه شوند. به‌ویژه، شباهت بازتاب آب و خاک خشک می‌تواند دقت شناسایی را کاهش دهد. همچنین، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی نظیر سنتینل-۲ نیاز به مدل‌سازی دقیق دارد که به شرایط منطقه‌ای و زمانی وابسته است (Li et al., 2023). سنتینل-۲ به ارائه تصاویر چندطیفی در طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک با وضوح مکانی بالا تمرکز دارد، که اغلب برای پایش پوشش گیاهی و تحلیل اراضی به کار می‌رود.

کاربرد تصاویر سنتینل-۱ و روش تفاضل باندی در این پژوهش، علی‌رغم سادگی پیاده‌سازی، عدم نیاز به داده‌های آموزشی و تشخیص سریع پهنه‌های سیلابی با چالش‌های جدی به‌علت حساسیت به نویز و خطا در مناطق با بازتاب غیرمنتظره (مانند تپه‌ها یا زمین‌های با بافت متفاوت و بایر) مواجه است که سبب عدم قطعیت پهنه‌های شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بر اساس این روش، اغلب پهنه‌های مسطح مانند فروچاله‌های کویری مستعد سیلاب هستند که منطبق با پژوهش‌های Zhang et al. (2020) و Huang and Jin (2022) است. به‌دلیل شرایط اقلیمی و فیزیکی این مناطق و همچنین نوع بافت خاک بستر این فروچاله‌ها و دریاچه‌ها، آب فرصت بیشتری برای ماندگاری داشته و به‌تدریج نفوذ می‌کند. اما شناسایی مناطق مرتفع و کوهستانی استان به‌عنوان پهنه‌های سیلابی که محل اولیه تشکیل و جاری شدن سریع رواناب محسوب می‌شوند از جمله این خطاهای شناسایی شده محسوب می‌شود.

بازتاب آینه‌ای از سطوح غیرآبی یکی از عوامل مهم محیطی و زمینی منجر به خطا در تشخیص یا ناهمگنی مرز مناطق سیلابی است. برخی از سطوح در مقیاس طول موج اندازه‌گیری با بازتاب سیگنال رادار از حسگر، رفتاری مشابه سطوح آب دارند که منجر به مثبت کاذب و شناسایی مناطق غیرآبی می‌شود (Henry et al., 2006). عامل دیگر وجود سایه‌های زمین در زمین‌های ناهموار با شیب‌های تندتر از زاویه فرورفتگی حسگر است که می‌تواند سبب پدیدار شدن مناطق سایه‌دار مشابه به مناطق

سیلابی شوند. از سوی دیگر، تکنیک آستانه، که برای تمایز مناطق سیل‌زده از غیرسیل‌زده استفاده می‌شود، به ویژگی‌های سطح مورد نظر و پارامترهای خاص اخذ تصویر بستگی دارد. این بدان معناست که آستانه بهینه ثابت و قابل تعمیم نیست. باید برای هر منطقه مورد مطالعه محاسبه شود و در صورت عدم تعیین دقیق، احتمال خطا وجود دارد (Ezzine et al., 2018). بنابراین تفاوت در پهنه‌های شناسایی شده در تصاویر سنتینل-۱ بر اساس روش تفاضل باندی با روش آستانه‌گذاری OTSU به‌طور مشخص بیانگر اهمیت به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته‌تر در تعیین آستانه است. این عوامل اهمیت پیش‌پردازش دقیق، انتخاب‌های روش‌شناختی مناسب و اعتبارسنجی با داده‌های واقعیت زمینی را برای به حداقل رساندن عدم قطعیت در تشخیص سیل با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ را برجسته می‌کند.

پهنه‌های سیلابی شناسایی شده بر اساس تصاویر سنتینل-۲ و روش NDWI که کم‌ترین مساحت پهنه‌های سیلابی را در بین سایر روش‌ها به خود اختصاص داده‌اند، محدود به فرونشست‌ها و چاله‌های طبیعی (دریاچه نمک و گودال‌ها) در سطح منطقه مورد مطالعه شد. این نتایج با یافته‌های Jahangir et al. (2025) هم‌راستا است که بیان داشتند روش NDWI در سیلاب شهری چابهار تنها ۲۹ درصد مساحت سیلاب را شناسایی کرده است. در مقابل، Singh and Kansak (2022)، دقت قابل توجه این روش را در شناسایی سیلاب منطقه کوهستانی Chamoli گزارش کردند. پژوهش انجام شده به‌منظور شناسایی سیلاب در منطقه مدیترانه بر اساس تصاویر سنتینل-۲ و روش NDWI نیز نشان داد که کیفیت تصویر قبل و بعد وقوع سیلاب، به‌دلیل حساسیت به ابر بر دقت نتایج اثرگذار است (Yang et al., 2020). اختلاف‌های مشاهده شده اغلب ناشی از تفاوت‌های اقلیمی- منطقه‌ای و پارامترهای پردازشی است. استان سمنان به‌دلیل حاکمیت اقلیم خشک و نیمه‌خشک، پوشش گیاهی فقیر و نرخ بالای هدررفت و فرسایش خاک، سیلاب‌های آبی آن اغلب با گل‌آلودگی بالایی همراه است؛ در چنین شرایطی بازتاب باند سبز و مادون‌قرمز نزدیک آبی و خاک ممکن است مشابه شود و توان تشخیص NDWI را کاهش دهد. به عبارتی، مشابه با یافته‌های Jahangir et al. (2025) مشابهت بازتاب آب و خاک خشک و شرایط ابری-مرطوب موجب کاهش دقت NDWI می‌شود.

تمایل به برآورد بیش‌تر از واقعیت مناطق سیلابی منطقه مورد مطالعه بر اساس تصاویر سنتینل-۳ و روش NDWI را می‌توان تحت تأثیر دو عامل اصلی، وضوح مکانی پایین تصاویر سنتینل-۳ و تمایل شاخص NDWI به بزرگ‌نمایی دانست. تفکیک‌پذیری ۳۰۰ متری سنتینل-۳ باعث پرکردن فضای پیکسلی و یکپارچگی بیش از حد پهنه‌های آبی می‌شود. همچنین حساسیت ابر و پوشش

سازد. اگرچه انتخاب نوع سنجنده‌ها در افزایش دقت نتایج حائز اهمیت است، اما تکنیک‌های پردازش تصویر و به‌ویژه بهره‌گیری از الگوریتم‌های آستانه‌گذاری خودکار، نقشی کلیدی در ارتقاء قابلیت اطمینان نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب ایفا می‌کنند. با این حال، توجه به محدودیت‌های ذاتی این رویکرد، از جمله دقت مکانی و زمانی داده‌های سنجش از دور، فقدان داده‌های میدانی جامع برای اعتبارسنجی نتایج و همچنین ناهمگنی‌های هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی محلی، امری اجتناب‌ناپذیر است. رفع این چالش‌ها مستلزم پژوهش و توسعه مدل‌های ترکیبی پیشرفت‌های است که با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی (اپتیک، راداری و مشاهدات زمینی) و ارتقاء الگوریتم‌های طبقه‌بندی خودکار بر پایه رویکردهای نوین یادگیری ماشین، سطح دقت و کارایی این مدل‌ها را بهبود بخشند. از منظر اجرایی، ادغام نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای در سامانه‌های هشدار سریع و به‌کارگیری آن‌ها در طراحی راهبردهای مدیریت سیلاب در مقیاس حوزه آبخیز، می‌تواند گامی مؤثر در کاهش مخاطرات سیل و همچنین بهره‌برداری هدفمند از پتانسیل‌های سیلاب، در زمینه تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و مدیریت پایدار منابع آب در مناطق آسیب‌پذیر محسوب شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان سمنان و به‌ویژه جناب آقای مهندس شریعت‌پناهی به‌دلیل همکاری‌ها و حمایت‌های ارزشمند ایشان در فراهم‌سازی داده‌ها و تسهیل فرایند اجرای این پژوهش ابراز می‌دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

زهرا شیخ: ایده‌پردازی، نگارش، تهیه پیش‌نویس اولیه، نرم‌افزار، ویرایش نسخه نهایی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، بازنگری؛ علی اصغر ذوالفقاری: نظارت، بازنگری

سطحی سبب شده تصاویر OLCI در شرایط صاف آسمان عملکرد خوبی داشته باشند؛ ولی نسبت به ابر یا مه حساس بوده و در صورت وجود ابر، برآورد سطح آب مختل می‌شود. از سوی دیگر وجود پیکسل‌های ترکیبی و آستانه‌گذاری کم دقت سبب هم‌پوشانی بیش از حد نواحی آب و خشکی شده و سبب اغراق در برآوردهای NDWI شده است. شاخص NDWI بر اساس تفاوت نور سبز و NIR طراحی شده تا آب را برجسته کند و پوشش گیاهی و خاک را تضعیف نماید. بر پایه منابع، NDWI ممکن است مناطق با پوشش گیاهی کم یا خاک نمناک را هم به‌عنوان آب تشخیص دهد. این پدیده می‌تواند باعث شود که نسبت سطح شناسایی شده به‌عنوان آب و سیلاب بیش‌تر از واقعیت شود.

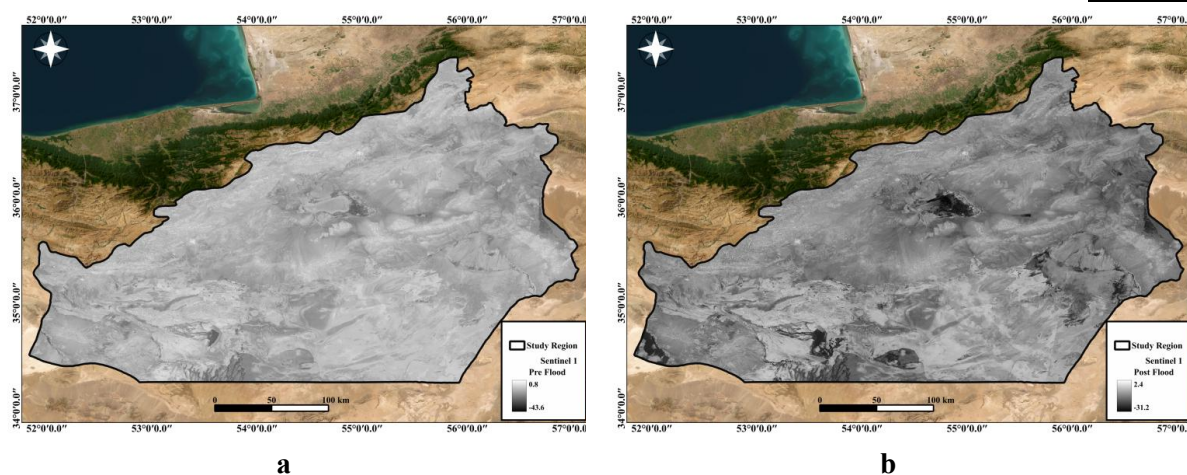
بنابراین، با وجود مزایای فراوان، سنتینل-۳ در شناسایی مناطق سیلابی با چالش‌هایی نیز مواجه است. تصاویر OLCI، اگرچه در شرایط آسمان صاف عملکرد عالی دارند، اما نسبت به ابر و مه حساس هستند و این موضوع می‌تواند دقت تصاویر را کاهش دهد (Halder et al., 2024). همچنین، با توجه به میزان وضوح مکانی سنتینل-۳ (۳۰۰ متر در برابر ۱۰ متر در برخی باندها)، تشخیص دقیق مناطق کوچک‌تر سیلابی را با مشکل مواجه می‌کند و اغلب برای پهنه‌های سیلابی گسترده در مقیاس جهانی مؤثرتر است (Jiang et al., 2020).

باید در نظر داشت، مناطق کوهستانی خشک، از پیچیده‌ترین سیستم‌های هیدرولوژیکی برخوردار هستند. در مناطقی با توپوگرافی پیچیده، جریانات سطحی ناشی از بارندگی ناگهانی به سرعت به سمت مناطق پایین‌دست حرکت کرده و سیلاب‌های شدیدی را به وجود می‌آورند. وجود تپه‌ها، دره‌ها و رودخانه‌های فصلی باعث پیچیدگی بیش‌تر در پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد سیلاب می‌شود. به‌ویژه، تغییرات ژئومورفولوژیکی ناشی از سیلاب‌های قبلی می‌تواند به سختی در تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شود و استفاده از مدل‌های دقیق‌تر هیدرولوژیکی برای تحلیل این پدیده‌ها ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

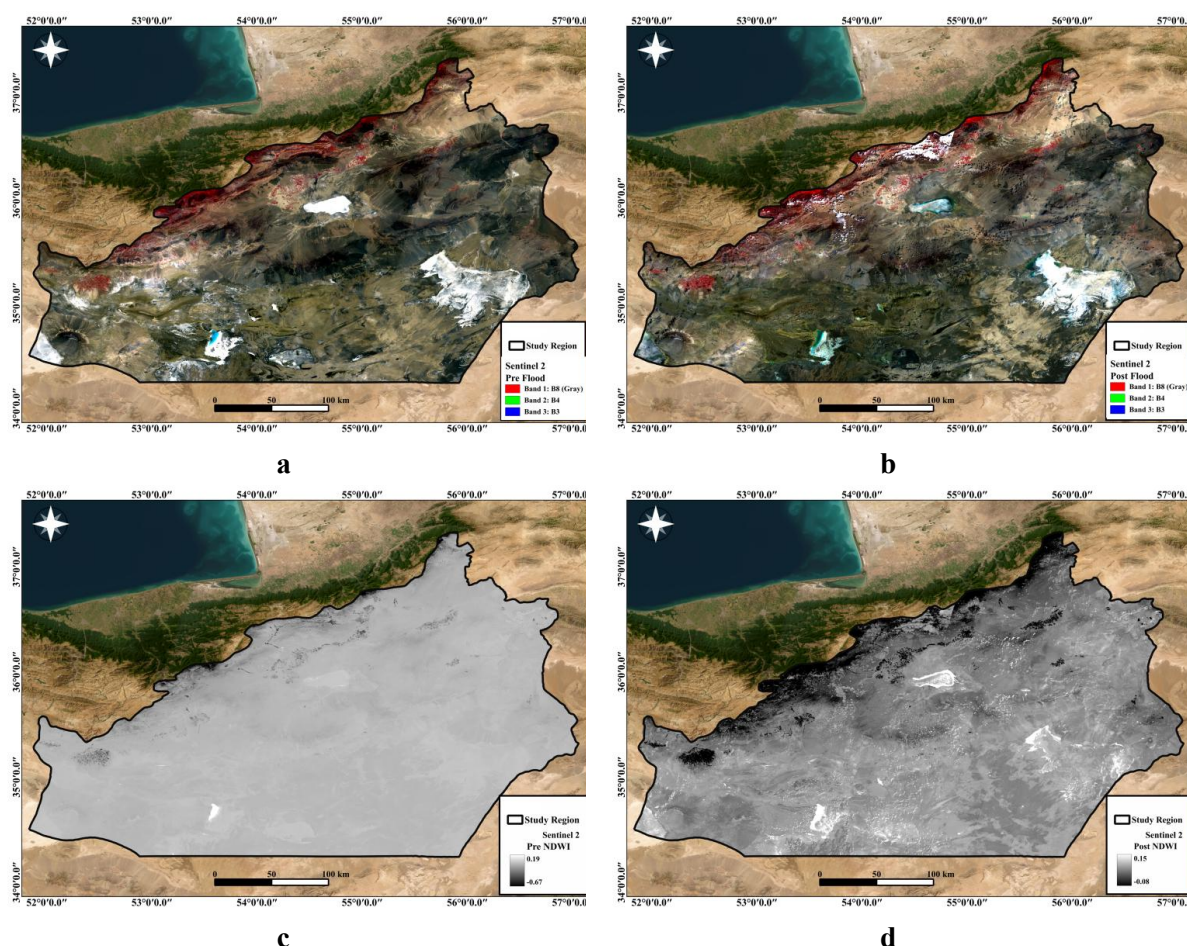
افزایش فراوانی رخداد‌های سیلاب‌های آبی در نواحی خشک و نیمه‌خشک، ضرورت توسعه و بهره‌گیری از روش‌های سریع، دقیق و مقرون به‌صرفه برای پهنه‌بندی سیلاب، به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت‌های داده‌ای را بیش از پیش برجسته ساخته است. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که تلفیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل با پلتفرم‌های پردازش ابری (GEE) می‌تواند رویکردی کارآمد برای شناسایی سریع و نسبتاً دقیق مناطق سیل‌گیر فراهم

پیوست ۱



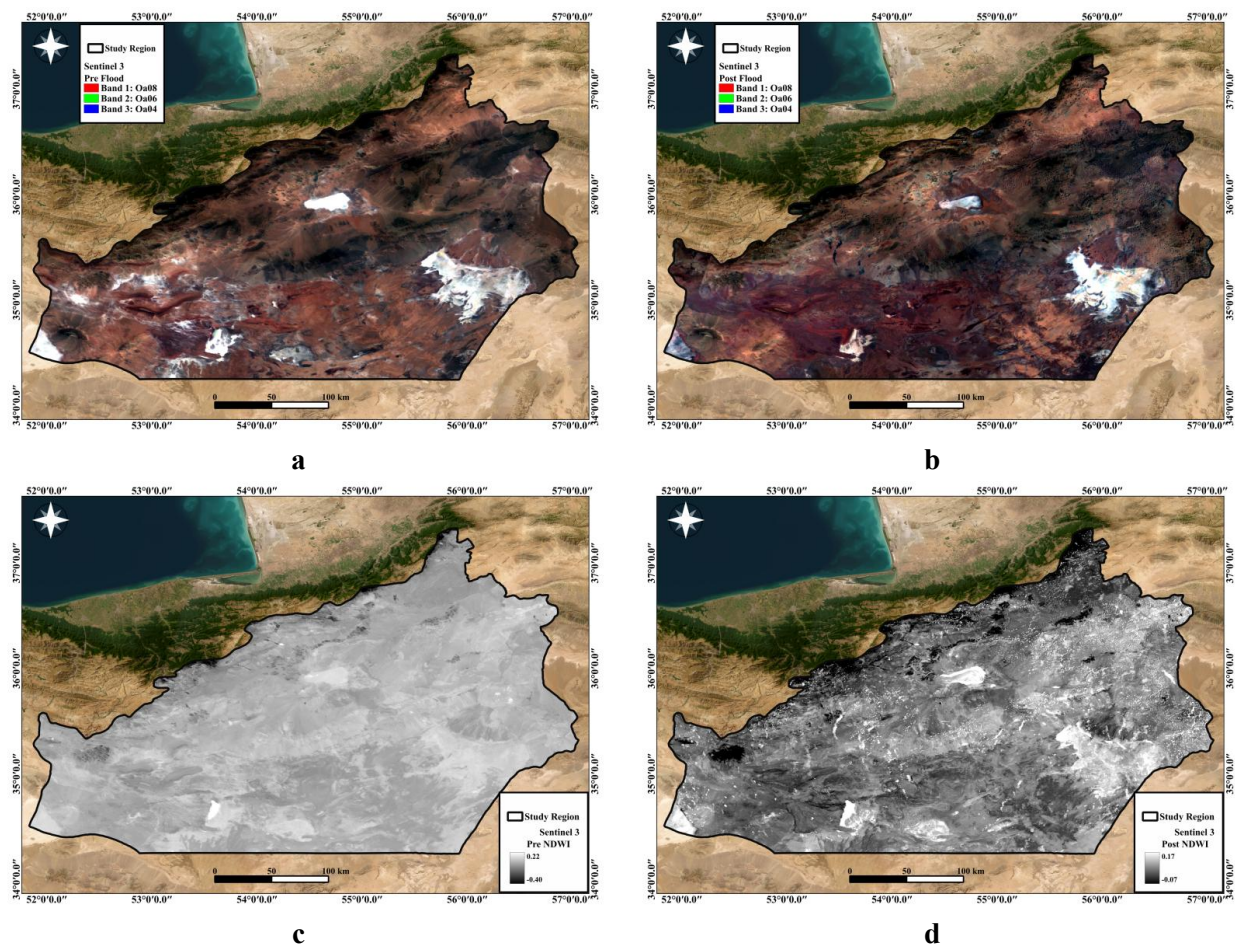
شکل ۱- پهنه‌های سیل گیر شناسایی شده بر اساس تصاویر راداری سنتینل-۱ با استفاده از روش‌های تفاضل باندی و آستانه گذاری؛ (a) تصویر قبل از وقوع سیل، (b) تصویر بعد از وقوع سیل

Fig. 1. Flood-prone areas identified based on Sentinel-1 radar imagery using band difference and thresholding methods: (a) pre-flood image, (b) post-flood image



شکل ۲- پهنه‌های سیل گیر شناسایی شده بر اساس تصاویر اپتیکی سنتینل-۲ با استفاده از روش اختلاف NDWI؛ (a) تصویر کامپوزیت قبل از وقوع سیل، (b) تصویر کامپوزیت بعد از وقوع سیل، (c) تصویر شاخص NDWI قبل از وقوع سیل، (d) تصویر شاخص NDWI بعد از وقوع سیل

Fig. 2. Flood-prone areas identified based on Sentinel-2 optical imagery using the NDWI difference method: (a) pre-flood composite image, (b) post-flood composite image, (c) pre-flood NDWI image, (d) post-flood NDWI image



شکل ۳- پهنه‌های سیل‌گیر شناسایی شده بر اساس تصاویر اپتیکی سنتینل-۳ با استفاده از روش اختلاف NDWI؛ (a) تصویر کامپوزیت قبل از وقوع سیل، (b) تصویر کامپوزیت بعد از وقوع سیل، (c) تصویر شاخص NDWI قبل از وقوع سیل، (d) تصویر شاخص NDWI بعد از وقوع سیل

Fig. 3. Flood-prone areas identified based on Sentinel-3 optical imagery using the NDWI difference method: (a) pre-flood composite image, (b) post-flood composite image, (c) pre-flood NDWI image, (d) post-flood NDWI image

یادگیری عمیق. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۴ (۳): ۳۵۷-۳۴۲.
doi: 10.22125/iwe.2023.398951.1721
میرزایی، شهناز، سعدالدین، امیر، بهره‌مند، عبدالرضا، اونق، مجید، و
مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۴۰۴). هزینه‌های مستقیم-ملموس در
پهنه‌های سیلابی شبیه‌سازی شده با مدل هیدرولیکی دو بعدی
HEC-RAS رودخانه ارازکوسه استان گلستان. مدل‌سازی و
مدیریت آب و خاک، ۵ (۱): ۵۷-۷۴.
doi:10.22098/MMWS.2024.14501.1410

References

Carreño Conde, F., & De Mata Muñoz, M. (2019). Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR images: The Ebro River case study. *Water, 11*(12), 2454. doi: 10.3390/w11122454

منابع

فرجی، عبدالله و رحیمی، نفیسه. (۱۴۰۳). پایش خطر سیل خرداد ۱۴۰۲ استان زنجان با استفاده از تصاویر سنتینل-۱. *سنجش از دور و GIS/ایران*، 2024.234929.1210. doi: 10.48308/gisj.
کیانی مجد، مهناز، نهتانی، محمد، دهمرده قلعه‌نو، محمدرضا، و شیخ زهرا. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های آبخیز مناطق خشک در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لار). *مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۴ (۲۷): ۱۳۵-۱۴۵.
doi:10.61186/jwmr.14.27.135
مسواری، محدثه و شاه حسینی، رضا. (۱۴۰۳). شناسایی و قطعه‌بندی مناطق متأثر از سیلاب به کمک تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های Ezzine, A., Darragi, F., Rajhi, H., & Ghatassi, A. (2018). Evaluation of Sentinel-1 data for flood mapping in the upstream of Sidi Salem dam (Northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences, 11*(8), 170. doi:10.1007/s12517-018-3505-7

- Faraji, A. & Rahimi, N. (2024). Flood risk Monitoring of June 1402 in Zanjan province using Sentinel-1 images. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. doi: 10.48308/gisj.2024.234929.1210 [In Persian]
- Garg, S., Dasgupta, A., Motagh, M., Martinis, S., & Selvakumaran, S. (2024). Unlocking the full potential of Sentinel-1 for flood detection in arid regions. *Remote Sensing of Environment*, 315, 114417. doi: 10.1016/j.rse.2024.114417
- Ghoneim, E., & Foody, G. M. (2013). Assessing flash flood hazard in an arid mountainous region. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1191–1202. doi: 10.1007/s12517-011-0411-7
- Halder, T., Chakraborty, D., Pal, R., Sarkar, S., Mukhopadhyay, S., Roy, N., & Karforma, S. (2024). A hybrid approach for water body identification from satellite images using NDWI mapping and histogram of gradients. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 1–10. doi: 10.1007/s11334-021-00414-6
- Henry, J. B., Chastanet, P., Fellah, K., & Desnos, Y. L. (2006). Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 1921–1929. doi:10.1080/01431160500486724
- Huang, M., & Jin, S. (2022). Backscatter characteristics analysis for flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 images. *Remote Sensing*, 14(15), 3838. doi:10.3390/rs14153838
- Jahangir, E., Faryadras, F., & Derakhshan, H. (2025). Detection of Flood Affected Areas Using Radar and Optical Images in the January 2020 Flood in Chabahar City. *Quarterly Scientific Journal of Rescue and Relief*, 17(3), 138–142.
- Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., He, G., Fu, J., Lu, J., ... & Lei, T. (2020). A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 33–38. doi: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020
- Kiyani, M. M., Nohtani, M., Dehmardeh, G. N. M. R., & Shikh, Z. (2023). Simulating the runoff of watersheds in dry areas on a monthly scale using the SWAT model (Case study: Lar Watershed). *Journal of watershed Management Research*, 135–145. doi: 10.61186/jwmr.14.27.135 [In Persian]
- Li, W., Li, D., & Fang, Z. N. (2023). Intercomparison of automated near-real-time flood mapping algorithms using satellite data and DEM-based methods: A case study of 2022 Madagascar flood. *Hydrology*, 10(1), 17. doi: 10.3390/hydrology10010017
- Lian, T., Xin, X., Peng, Z., Li, F., Zhang, H., Yu, S., & Liu, H. (2022). Estimating evapotranspiration over heterogeneous surface with Sentinel-2 and Sentinel-3 data: A case study in Heihe River Basin. *Remote Sensing*, 14(6), 1349. doi: 10.3390/rs14061349
- Liao, P. S., Chen, T. S., & Chung, P. C. (2001). A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*, 17(5), 713–727. doi: 10.6688/JISE.2001.17.5.1
- Ma, C., Li, X., & McCabe, M. F. (2020). Retrieval of high-resolution soil moisture through combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(14), 2303. doi: 10.3390/rs12142303
- Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2018). Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, 196, 216–229. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.047
- Martinis, S., Plank, S., & Ćwik, K. (2018). The use of Sentinel-1 time-series data to improve flood monitoring in arid areas. *Remote Sensing*, 10(4), 583. doi: 10.3390/rs10040583
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. doi:10.1080/01431169608948714
- Mehmood, H., Conway, C., & Perera, D. (2021). Mapping of flood areas using Landsat with Google Earth Engine cloud platform. *Atmosphere*, 12(7), 866. doi: 10.3390/atmos12070866
- Mesvari, M. & Shah-Hoseini, R. (2024). Detection and segmentation of flood-affected areas using satellite images and deep learning methods. *Irrigation and Water Engineering*, 14(3), 342–357. doi: 10.22125/iwe.2023.398951.1721 [In Persian]
- Mirzaei, Sh., Sadoddin, A., Bahremand, A., Ownegh, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Direct-tangible costs in flood zones simulated using the HEC-RAS 2-D hydraulic model – the Arazkuseh River, Golestan Province, *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 57–74. doi:10.22098/MMWS.2024.14501.1410 [In Persian]
- OTSU, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Panahi, M., Rahmati, O., Kalantari, Z., Darabi, H., Rezaie, F., Moghaddam, D. D., ... & Lee, S. (2022). Large-scale dynamic flood monitoring in an arid-zone floodplain using SAR data and hybrid machine-learning models. *Journal of Hydrology*, 611, 128001. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128001
- Petropoulos, G. P., Georgiadi, A., & Kalogeropoulos, K. (2024). Leveraging Sentinel-2 and Geographical Information Systems in Mapping Flooded Regions around the Sesia River, Piedmont, Italy. *GeoHazards*, 5(2), 485–503. doi:10.3390/geohazards5020025

- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: An introduction* (4th ed.). Springer.
- Santecchia, G. S., Revollo Sarmiento, G. N., Genchi, S. A., Vitale, A. J., & Delrieux, C. A. (2023). Assessment of Landsat-8 and Sentinel-2 Water Indices: A Case Study in the Southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of imaging*, 9(9), 186. doi:10.3390/jimaging9090186
- Sheikh, Z., Nia, A. M., & Ganjali, M. (2024). Climate change and anthropogenic effects on the drying of a saline lake in an arid region (Namak Lake, Iran). *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 715–734. doi: 10.1007/s00704-023-04622-x
- Sheikh, Z., Yazdani, M. R., & Moghaddam Nia, A. (2020). Spatiotemporal changes of 7-day low flow in Iran's Namak Lake Basin: Impacts of climatic and human factors. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1), 57–73. doi: 10.1007/s00704-018-02501-1
- Sheikh, Z., Zolfaghari, A. A., Raeesi, M., & others. (2025). Enhancing flash flood susceptibility modeling in arid regions: Integrating digital soil mapping and machine learning algorithms. *Environmental Earth Sciences*, 84, 170. doi: 10.1007/s12665-025-12140-4
- Singh, S., & Kansal, M. L. (2022). Chamoli flash-flood mapping and evaluation with a supervised classifier and NDWI thresholding using Sentinel-2 optical data in Google earth engine. *Earth Science Informatics*, 15(2), 1073-1086. doi: 10.1007/s12145-021-00651-4
- Tan, J., Tang, Y., Liu, B., Zhao, G., Mu, Y., Sun, M., & Wang, B. (2023). A self-adaptive thresholding approach for automatic water extraction using Sentinel-1 SAR imagery based on OTSU algorithm and distance block. *Remote Sensing*, 15(10), 2690. doi: 10.3390/rs15102690
- Tarpanelli, A., Mondini, A. C., & Camici, S. (2022). Effectiveness of Sentinel-1 and Sentinel-2 for flood detection assessment in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(8), 2473-2489. doi:10.5194/nhess-22-2473-2022
- Tran, K. H., Menenti, M., & Jia, L. (2022). Surface water mapping and flood monitoring in the Mekong Delta using sentinel-1 SAR time series and Otsu threshold. *Remote Sensing*, 14(22), 5721. doi:10.3390/rs14225721
- Wang, X., Ling, F., Yao, H., Liu, Y., & Xu, S. (2019). Unsupervised Sub-Pixel Water Body Mapping with Sentinel-3 OLCI Image. *Remote Sensing*, 11(3), 327. doi: 10.3390/rs11030327
- Yang, X., Li, Y., Wei, Y., Chen, Z., & Xie, P. (2020). Water body extraction from sentinel-3 image with multiscale spatiotemporal super-resolution mapping. *Water*, 12(9), 2605. doi: 10.3390/w12092605
- Yilmaz, O. S., Gulgen, F., Balik Sanli, F., & Ates, A. M. (2023). The performance analysis of different water indices and algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 images in determining water surface: Demirkopru dam case study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(6), 7883–7903. doi: 10.1007/s13369-022-07583-x
- Zhang, M., Chen, F., Liang, D., Tian, B., & Yang, A. (2020). Use of Sentinel-1 GRD SAR images to delineate flood extent in Pakistan. *Sustainability*, 12(14), 5784. doi: 10.3390/su12145784