

# Spatiotemporal Monitoring of Flood Inundation Using Multi-Source Satellite Data and the Google Earth Engine Environment

Mohammad Abaforoushan<sup>1</sup>, Mohamad Azizipour<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.  
2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*[azizipour@scu.ac.ir](mailto:azizipour@scu.ac.ir)

Received: 10 December 2025  
Revised: 7 February 2026  
Accepted: 19 February 2026  
Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.  
Iranian Hydraulic Association  
Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Floods are among the most frequent and destructive natural hazards worldwide, causing extensive socio-economic damage, infrastructure failures, and long-term environmental degradation. Recent studies highlight a substantial rise in flood frequency and severity due to climate variability and anthropogenic changes (Pralle 2019; Tellman et al. 2021). Although remote sensing has greatly improved flood monitoring, each sensor type has notable limitations. Optical imagery provides long-term spectral information but fails under cloud cover conditions and cannot detect inundation beneath vegetation. Conversely, Sentinel-1 SAR imagery enables all-weather monitoring but struggles to distinguish water from smooth urban surfaces or shadowed areas. These challenges underscore the need for integrated radar–optical approaches supported by cloud-based geospatial platforms capable of rapid and large-scale processing. The Dez River Basin in southwest Iran experienced an extreme flood event in spring 2019 following prolonged drought, making it an important natural laboratory for assessing flood dynamics in data-scarce regions. The main objective of this study is to analyze the spatiotemporal evolution of the 2019 flood by integrating Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 multispectral imagery, and Google Earth Engine (GEE), to quantify flood extent progression, identify lag time relative to peak discharge, and compare flood conditions with normal river states.

**Methodology:** This study integrates multi-source satellite data within GEE to delineate and analyze the 2019 flood in the Dez River Basin. Pre- and post-flood Sentinel-1 GRD images (VV polarization, IW mode, 10 m resolution) were selected based on acquisition date, orbit parameters, and data consistency, as documented in the main manuscript. Radar backscatter differences between pre-flood and post-flood images were computed to detect changes attributable to inundation. Pixels with a backscatter reduction greater than 7 dB were classified as flooded, generating a binary inundation mask. Flood polygons were then extracted, filtered, and their areas computed. To establish the natural river extent for comparison, Sentinel-2 imagery from March 2019 was processed. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was calculated using the green (B03) and near-infrared (B08) bands. Unsupervised K-means clustering with three classes was applied in GEE to separate surface-water pixels from vegetation and soil. The resulting polygons represented baseline water coverage under normal conditions (Figure 6). The derived flood extents were compared temporally with the discharge hydrograph obtained from the Dez Dam (Figure 7). Spatial overlays of flood layers for multiple dates enabled tracking of inundation expansion, peak flood conditions, recession phases, and long-term water

retention in low-lying agricultural areas. All computational workflows were implemented in GEE to ensure reproducibility and large-scale processing efficiency.

**Results and Discussion:** The integrated workflow revealed significant spatial temporal variability in inundation during the 2019 event. Under normal conditions, Sentinel-2 analysis showed that the river covered 36.16 km<sup>2</sup>. Flood mapping from Sentinel-1 demonstrated an early-stage inundation of 51.8 km<sup>2</sup> on 1 April, corresponding to the initial rise in discharge. As discharge increased, flood extent expanded rapidly, reaching 143.99 km<sup>2</sup> on 2 April. Although the hydrograph peaked above 3,200 m<sup>3</sup>/s on 4 April, maximum inundation occurred several days later on 6 April (422.08 km<sup>2</sup>). This lag, consistent with hydrological findings in other floodplain systems, highlights the limited conveyance capacity of the Dez channel and the time-dependent lateral spreading of flow across the floodplain. Compared with previous studies in which SAR-only or optical-only techniques were used, the combined radar-optical approach in this study achieved superior delineation of waterlogged agricultural areas and inundated zones beneath vegetation. The methodology also resolved misclassification issues commonly reported in SAR-based flood mapping particularly over smooth urban surfaces and shadowed terrain by referencing optical NDWI-derived baseline conditions. The temporal stacking of flood layers (Figures 7–8) showed that recession was slow; even by 26 April, inundation remained at 146.87 km<sup>2</sup>, nearly four times the normal river extent. This persistent waterlogging aligns with earlier research emphasizing the difficulty of post-flood drainage in topographically trapped lowlands. The results demonstrate clear similarities with global SAR-optical fusion studies, yet this work provides new insight into flood lag time, floodplain storage processes, and long-term inundation persistence in a major Iranian basin.

**Conclusion:** This article demonstrates that the integration of Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 multispectral data, and Google Earth Engine (GEE) offers a rapid and accurate framework for mapping flood extent in data-limited basins. In the Dez River Basin, the 2019 flood expanded from 51.8 km<sup>2</sup> to over 422 km<sup>2</sup> after peak discharge, indicating a marked temporal lag between the hydrological peak and maximum inundation. Floodwater remained for several weeks, likely due to limited natural drainage and local topographic depressions. These results underscore the need to strengthen floodplain management and to incorporate hydraulic modeling and high-resolution elevation datasets in future flood-risk assessments.

**Keywords:** Flood inundation mapping, Remote sensing, Sentinel-1, Sentinel-2, Google Earth Engine (GEE), Dez River, Iran, Flood Event 2019

**Conflict of Interest:** The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

**Funding:** The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Data Availability Statements:** All information and results are presented in the text of the article.

**Authors' contribution:**

**First Author:** Principal researcher, Data analyst, Author of the introduction, Author of the discussion.

**Second Author:** Secondary researcher, Data analyst, Author of the discussion.

# تحلیل زمانی و مکانی تغییرات سطح آب گرفتگی سیلاب با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و Google Earth Engine

محمد عباغروشان<sup>۱</sup>، محمد عزیزی پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*azizipour@scu.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده: سیلاب‌ها از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی محسوب می‌شوند و مدیریت آن‌ها با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. در سال‌های اخیر، گسترش دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای امکان بررسی نحوه پخش سیل را تسهیل کرده است. این پژوهش با هدف تحلیل تغییرات مکانی- زمانی سیلاب سال ۱۳۹۸ رودخانه دز، از تلفیق داده‌های راداری Sentinel-1، تصاویر چندطیفی Sentinel-2 و به‌کارگیری سامانه پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) بهره گرفته است. در این چارچوب، تصاویر SAR قبل و بعد از وقوع سیلاب با قطبش VV (Vertical-Vertical Polarization) با استفاده از تحلیل اختلاف بازتاب راداری و تعیین آستانه مناسب برای شناسایی نواحی آب‌گرفته پردازش شدند و پهنه طبیعی رودخانه نیز با به‌کارگیری شاخص NDWI و الگوریتم طبقه‌بندی بدون نظارت K-Means از تصاویر Sentinel-2 استخراج شد. نتایج نشان داد سیلاب مورد بررسی در تاریخ ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ که به اوج خود با بده بیش از ۳۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه رسید و وسعت پهنه سیلابی از ۵۱/۸ کیلومترمربع در ابتدای رویداد (۱۲ فروردین) به بیش از ۴۲۲ کیلومترمربع در دو روز بعد از اوج سیلاب (۱۷ فروردین) افزایش یافت که بیانگر گسترش بیش از ۱۱ برابری نسبت به حالت طبیعی رودخانه است. یک تأخیر زمانی مشخص میان اوج بده خروجی سد و بیشترین گسترش آب‌گرفتگی مشاهده شد که نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت عبور جریان در آبراهه اصلی و زمان‌بر بودن فرآیند پخش سیلاب در دشت سیلابی است. همچنین، ماندگاری طولانی‌مدت آب در اراضی پست منطقه حتی پس از کاهش بده، نشان‌دهنده ضعف زهکشی طبیعی و پتانسیل بالای ماندآبی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های راداری و نوری در محیط پردازش ابری GEE چارچوبی سریع، دقیق و قابل اتکا برای پهنه‌بندی سیلاب در مناطق داده کم‌دسترس فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بحران، ارزیابی خسارت و توسعه مدل‌های پیشرفته پیش‌بینی سیلاب در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌گان:** پهنه‌بندی سیلاب، سنجش از دور، ماهواره Sentinel-1، ماهواره Sentinel-2، Google Earth Engine (GEE)، رودخانه دز، سیلاب ۱۳۹۸ ایران.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش یافته و پیش‌بینی‌ناپذیرتر شده‌اند (Pralle, 2019). هزینه برآورد شده آسیب و زیان‌های سیل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، سالانه ۶۵۱ میلیارد دلار در سطح جهانی بوده است (Tellman et al., 2021). با افزایش فراوانی و شدت رویدادهای سیلابی، نگرانی‌های جهانی نیز

سیل یکی از رایج‌ترین پدیده و رویدادهای طبیعی جهان است و آسیب و زیان‌های آن تأثیرهای گسترده‌ای بر زندگی انسان‌ها، تولید محصول‌های کشاورزی و زیرساخت‌ها داشته است. به‌دلیل تغییرپذیری‌های اقلیمی، رویدادهای سیلابی

زمان تا حدودی واقعی و دقیق را ارائه دهند (Mosavi et al., 2018). روش‌های مختلفی برای تهیه این نقشه‌ها وجود دارد که یکی از جدیدترین روش‌ها، استفاده از سامانه‌های (سیستم) اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ترکیب آن با مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است (Rezaei Moghaddam and Esmaili, 2005). داده‌های مشاهده زمین از ماهواره‌ها نمای جامع و تکراری از ناحیه‌های سیلابی فراهم کرده‌اند که به طور فزاینده‌ای در سامانه‌های مهار پدیده‌ها و رویدادها استفاده می‌شود (Martinis et al., 2014). برای نقشه‌برداری گستره سیلاب، پژوهشگران بیشتر از اطلاعات طیفی حسگرهای نوری مانند Landsat یا اطلاعات بازتابی از تصویرهای راداری مصنوعی مانند SAR<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند (Konapala et al., 2021; Shen et al., 2019a). به دلیل همبستگی بالای اطلاعات طیفی در داده‌های نوری با آب‌های آزاد و همچنین در دسترس بودن داده‌های بلندمدت، داده‌های نوری در نقشه‌برداری منطقه‌ها و دورنمای آبی در شرایط بدون ابر ترجیح داده می‌شوند (Irwin et al. 2017; Pekel et al. 2014). توانایی‌های نقشه‌برداری سیلاب با افزایش دسترسی به تصویرهای نوری با وضوح فضایی و زمانی به نسبت بالا مانند Landsat، MODIS و شاخص‌های مختلف مبتنی بر آب مانند AEWI<sup>۳</sup>، MNDWI<sup>۴</sup>، و NDWI<sup>۵</sup> و دیگر شاخص‌های همانند که توسط پژوهشگران استخراج شده‌اند (Feyisa et al., 2006; McFeeters, 1996; Xu, 2014) بهبود یافته است. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در پایش سیلاب با بهره‌گیری از تصویرهای نوری، پوشش ابر است (Li et al., 2018). در نتیجه، پایش ناحیه‌های سیلابی در شرایط جوئی نامساعد با استفاده از تصویرهای نوری در عمل دشوار و ناممکن است. مسئله دیگری که پژوهشگران هنگام استفاده از سنجنش از دور چندطیفی سنتی برای نقشه‌برداری گسترش احتمالی سیلاب زیر پوشش درختان با آن روبه‌رو هستند، دشواری در تشخیص سیلاب در جنگل‌ها است، زیرا این منطقه‌ها به عنوان پیکسل‌های آبی دیده نمی‌شوند بلکه

در مورد تلفات جانی و دیگر آسیب و زیان‌های اقتصادی در حال افزایش است (Kuldeep et al., 2016). اطلاعات مربوط به گستره و پهنه‌بندی سیلاب<sup>۱</sup> برای ارزیابی در معرض خطر قرار گرفتن جامعه، آسیب و زیان‌های زیرساختی، آسیب و زیان‌های اقتصادی، آسیب به محصولات کشاورزی، سیلاب‌های شهری، حجم ذخیره سیلاب، کاهش موج‌های سیلاب و خطرهای سیلابی آینده ضروری است (Cohen et al., 2017; Nalini and Pekkat, 2018). در دهه‌های اخیر، ایران با افزایش نوسان‌های سالانه بارش ریزش‌های جوئی روبه‌رو بوده است، به طوری که رویدادهای خشکسالی و سیلاب شدید تأثیرپذیری‌های چشمگیری بر جامعه‌های محلی گذاشته است. در سال ۲۰۱۹، شمارچندی از رویدادهای سیلابی شدید در سراسر ایران منجر به یک ناهنجاری و رویداد انسانی و از دست دادن قابل توجه دارایی‌ها و زیرساخت‌ها شد. این سیلاب بی‌سابقه به‌دون فاصله زمانی پس از یک خشکسالی چندساله و ویرانگر رخ داد (Alborzi et al., 2022). با این حال، شناسایی دقیق ناحیه‌های متأثر از سیلاب با طرح نقشه‌برداری گسترش احتمالی سیلاب و برآورد عمق آن برای کاهش زیان و آسیب‌های مرتبط با سیلاب و واکنش‌های اضطراری، به‌ویژه در رویدادهای سیلابی بزرگتر، حیاتی است. نقشه‌های سیلابی قابل اعتماد همچنین برای شناسایی خطرهای سیلاب برای افراد آسیب‌پذیر جامعه، ارزیابی زیان و آسیب‌های وارده و اولویت‌بندی تلاش‌های امدادی اهمیت زیادی دارند (Pralle, 2019; Rosser et al., 2017). افزون بر این، نقشه دقیق گسترش احتمالی سیلاب از رویدادهای پیشین به دانشمندان کمک خواهد کرد تا مدل‌سازی و تحلیل پیش‌بینی سیلاب را بهبود بخشند و همچنین به تصمیم‌گیرندگان در تصمیم‌های آگاهانه و دقیق یاری رساند (Hostache et al., 2009; Revilla-Romero et al., 2015). برای مدت درازی، پژوهشگران به طور پیوسته به مطالعه نقشه‌برداری و نظارت بر سیلاب پرداخته‌اند تا اطلاعات سیلابی قابل اعتماد، به‌روزرسانی در

1. Flood Extent Area
2. Synthetic Aperture Radar
3. Automated Water Extraction Index
4. Modified Normalized Difference Water Index
5. Normalized Difference Water Index

ارزیابی و نظارت دقیق بر تالاب‌ها را فراهم کند (Rebelo et al., 2018). شناسایی و تجزیه و تحلیل وضعیت تالاب‌ها با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای بیشتر بر مبنای میزان طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده و تعریف شاخص‌های آب و آنگاه طبقه‌بندی آن‌ها با استفاده از آستانه‌ها انجام می‌شود (Fisher et al., 2016; Zhou et al., 2017). بسیاری از پژوهشگران شاخص‌های طیفی مختلفی را برای شناسایی منابع آب سطحی مانند شاخص NDWI (McFeeters, 1996) و MNDWI (Xu, 2006)، و شاخص استخراج خودکار آب AWEI (Feyisa et al., 2014) پیشنهاد و تاکید کرده‌اند. (Gudelj et al., 2018) دقت شناسایی منابع آب داخلی با استفاده از شاخص‌های مختلف آب AWEI، NDWI و MNDWI را آزمایش کردند. نتایج نشان می‌دهد که MNDWI در دقت شناسایی منابع آب داخلی بهتر از دیگر شاخص‌های طیفی آب عمل کرده است. امروزه نویسندگان و پژوهشگران، روش‌های زیادی برای استخراج منابع آب از تصویرهای سنجش از دور را چه طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده (Bangira et al., 2019; Zhou et al., 2017) دریافت‌اند. شاخص‌های طیفی آب و روش‌های مبتنی بر آستانه (threshold-base) (Gašparović and Singh, 2023; Ji et al., 2015; Li et al., 2016; Li et al., 2013; Xie et al., 2014; Xu, 2006) شناسایی و برای نقشه‌برداری منابع آب، استفاده کرده‌اند. از روش‌های مختلف یادگیری ماشین نظارت‌شده می‌توان جنگل تصادفی (Wangchuk and Bolch, 2020)، SVM (Liu et al., 2020) و XGBoost (Chatufale et al., 2022) را نام برد. از سوی دیگر، روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌نشده نیازی به نمونه‌های آموزشی ندارند و برای گسترش الگوریتم‌های خودکار بیشتر مناسب هستند. روش K-Means یکی از پرکاربردترین روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌نشده در سنجش از دور است که توسط Hartigan and Wong (1979) معرفی شد. در پژوهش (Gaikwad et al., 2021)، از الگوریتم K-Means برای دسته‌بندی پوشش گیاهی منطقه با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای Sentinel-2 استفاده شد. این الگوریتم خوشه‌بندی غیرنظارتی ۱۴ خوشه ایجاد کرد که پس از ترکیب، به ۵ خوشه اصلی تقسیم شدند: آب،

به عنوان پیکسل‌های درختی شناسایی می‌شوند (Munasinghe et al., 2018). تصویرهای راداری مانند ماهواره Sentinel-1 می‌توانند این دشواری‌ها را برطرف کنند، زیرا می‌توانند کیفیت تصویر عالی را بدون توجه به شرایط جوی، در روز و شب ارائه دهند (DeVries et al., 2020) و می‌توانند به طور جزئی یا کامل از پوشش گیاهی عبور کنند. یکی از محدودیت‌های استفاده از تصویرهای راداری مانند Sentinel-1 برای نقشه‌برداری سیلاب، دشواری در تمایز بین آب و سطح‌های همسان آب است (Shen et al., 2019b)، همچنین در منطقه‌های شهری که سطح صاف و نفوذناپذیر بازتاب همانندی دارند. تصویرهای راداری تنها راه‌حل مناسب برای نقشه‌برداری از گسترش احتمالی سیلاب در منطقه‌های گسترده در هر شرایط جوی هستند. در چندی پیش تصویرهای راداری به دلیل دسترسی رایگان به آن‌ها با وضوح بالای Sentinel-1 برای نقشه‌برداری سیلاب به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Martiniš et al., 2013; Zhang et al., 2020). در یک وضعیت اضطراری، مانند سیلاب، سرعت عمل حیاتی است و تصویرهای Sentinel-1 همراه با دیگر تصویرهای راداری تجاری برای نقشه‌برداری سیلاب در زمان تا حدودی واقعی بسیار سودمند هستند. GEE به عنوان یک پلتفرم پردازش جغرافیایی است که امکان انجام محاسبه‌های سریع را برای کار با مقدرهای گوناگون داده‌های پیوسته در مقیاس جهانی فراهم کرده است (Cian et al., 2018; Li et al., 2013; Yue et al., 2013; Yang et al., 2018). افزون بر ارائه قدرت پردازشی پیشرفته رایگان به دانشمندان، پژوهشگران و توسعه‌دهندگان برای تجزیه و تحلیل موقعیت سطح زمین، GEE این امکان را به کاربران داده است که به مجموعه گسترده‌ای از تصویرهای سری زمانی از ماهواره‌های مختلف دسترسی داشته باشند (Gorelick et al., 2017) مانند داده‌های Sentinel-1 که از زمان آغاز آن در سال ۲۰۱۴ تاکنون در دسترس هستند. در گذشته سنجش از دور به عنوان ابزاری سودمند برای به دست آوردن اطلاعات مکانی و زمانی درباره تالاب‌ها اثبات شده است (Glasgow et al., 2004; Guo et al., 2017) و این قابلیت را دارد که اطلاعات مورد نیاز برای فهرست‌برداری،

مدل‌سازی دوبعدی HEC-RAS و مقایسه مدل‌های رقومی ارتفاعی ناشی از داده‌های ماهواره‌ای ALOS و تصویرهای پهپادی<sup>۳</sup> نشان دادند که دقت داده‌های (توپوگرافی) تأثیر مستقیمی بر شبیه‌سازی گسترش سیلاب، زمان رخداد اوج جریان و میزان کاهش دبی دارد. نتایج آن‌ها بیانگر این است که استفاده از داده‌های ارتفاعی با توان جداسازی (تفکیک) مکانی بالاتر، منجر به بازنمایی واقع‌بینانه‌تر پهنه‌های سیلابی و تأخیر زمانی اوج سیلاب می‌شود.

یافته‌های این بررسی و ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که هر چند مدل‌های هیدرولیکی ابزار توانمندی برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای سیلاب هستند، اما برای پایش مکانی-زمانی سیلاب‌های گسترده، به‌ویژه در شرایط نبود داده‌های مشاهده‌شده میدانی، نیاز به رویکردهای مکمل وجود دارد. در این چارچوب، داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصویرهای راداری SAR به دلیل استقلال از شرایط جوی و ترکیب آن‌ها با تصویرهای چندطیفی امکان استخراج پیوسته و سریع پهنه‌های آب‌گرفتگی را فراهم می‌کنند. تلفیق این داده‌ها با بسترهای پردازش نوین، چارچوبی کارآمد برای تجزیه و تحلیل تغییرپذیری‌های مکانی-زمانی سیلاب و ارزیابی رفتار سیلاب‌دشت‌ها در رخدادهای سیلابی با شدت و گستره بالا فراهم می‌سازد.

هدف این پژوهش، تجزیه و تحلیل تغییرپذیری‌های مکانی و زمانی سیلاب سال ۱۳۹۸ در حوضه رودخانه دز در جنوب‌غرب ایران با استفاده از تلفیق تصویرهای راداری و چندطیفی Sentinel-1، Sentinel-2 و سامانه پردازش تحت وب GEE است. این رویکرد، امکان پایش سریع، دقیق و نزدیک به زمان واقعی سیلاب را فراهم کرده و می‌تواند به تصمیم‌گیران در مدیریت خطر و برنامه‌ریزی اقدام‌های پیشگیرانه یاری رساند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد بررسی و ارزیابی

رودخانه دز از دو شاخه اصلی به نام‌های سزار و بختیاری تشکیل شده است. این شاخه‌ها از رشته‌کوه‌های زاگرس

سکونتگاه، غیرگیاهی، پوشش گیاهی پراکنده و پوشش گیاهی سالم. نتایج تحقیق آنان نشان داد که در سال ۲۰۱۸، به دلیل کاهش بارش‌ها، پوشش گیاهی سالم کاهش یافت و به پوشش گیاهی پراکنده تبدیل شد.

Gašparović and Singh (2023) با استفاده از الگوریتم AUWM<sup>۱</sup> برای نقشه‌برداری خودکار آب‌های سطحی شهری با استفاده از تصویرهای Sentinel-2 و الگوریتم-K Means توسعه دادند. این الگوریتم با استفاده از شاخص MNDWI روش‌های (تکنیک) Pansharpening، توانست آب‌های سطحی را با دقت بالا (دقت ۰/۹۹۷) شناسایی کند. بهترین شمار کلاس‌ها برای الگوریتم چهار کلاس بود و نتایج آن دقت بیشتری نسبت به داده‌های GSWD<sup>۲</sup> داشت.

همچنین رفتار جریان و گسترش سیلاب در رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت‌ها تابع برهم‌کنش پیچیده میان هندسه مقطع رودخانه، زبری بستر، شرایط هیدرولیکی و تبادل مومنتوم بین آبراهه اصلی و پهنه‌های سیلابی است. در شرایط سیلابی، پر شدن مقطع اصلی رودخانه و سرریز جریان به سیلاب‌دشت‌ها موجب تغییر الگوی جریان، افزایش گستردگی آب‌گرفتگی و ایجاد تأخیر زمانی میان اوج دبی و بیشینه گسترش پهنه سیلاب می‌شود. در این زمینه، (Rostami et al. (2024) با توسعه یک مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی در مقطع‌های مرکب چند سیلاب‌دستی نشان دادند که نادیده گرفتن برهم‌کنش جریان بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌تواند منجر به برآورد نادرست ظرفیت انتقال جریان و الگوی گسترش سیلاب شود. نتایج این پژوهش بر نقش بنیادین تبادل مومنتوم و جریان‌های ثانویه در تعیین رفتار سیلاب، به‌ویژه در شرایط دبی‌های بالا، تأکید دارد. با وجود توانمندی بالای مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی و سه‌بعدی در شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی جریان، کاربرد آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ مکانی و در رخدادهای سیلابی گسترده همواره با محدودیت‌هایی مانند نیاز به داده‌های ورودی دقیق، بدون دسترسی به اطلاعات میدانی و هزینه‌های محاسبه‌شدنی همراه است. در این راستا، (Sohrabi et al. (2025) با استفاده از

1. Automatic urban surface water bodies mapping

2. Global surface water data

3. UAV

که این منطقه نقش کلیدی در تأمین منابع آبی و کشاورزی استان خوزستان ایفا می‌کند، بررسی و تحلیل سیلاب‌های احتمالی در این ناحیه به‌ویژه در بندقیق، برای پیشگیری از بحران‌های همانند و همسان در آینده ضروری است.

## ۲-۲- ماهواره Sentinel-1

Sentinel-1 یک ماهواره راداری است که بخشی از برنامه Copernicus می‌باشد و با استفاده از فناوری SAR تصاویرهای با دقت بالا از سطح زمین تهیه می‌کند. این ماهواره‌ها که شامل Sentinel-1A و Sentinel-1B هستند، به‌طور همزمان عمل کرده و داده‌هایی با دقت و پوشش بسیاری ارائه می‌دهند (DeVries et al., 2020).

سامانه راداری Sentinel-1 از C-band (۵/۴۰۵ گیگاهرتز) استفاده می‌کند، که قادر است از شرایط جوی نامساعد مانند ابرها و بارش عبور کند و برای پایش تغییرپذیری‌های سطح زمین، از جمله سیلاب‌ها، زمین‌لرزه‌ها و تغییرپذیری‌های زمین‌شناسی، مناسب است. داده‌های Sentinel-1 شامل دو حالت قطبش اصلی VV<sup>۱</sup> و VH<sup>۲</sup> هستند که به تحلیل ویژگی‌های سطح زمین مانند آب، پوشش گیاهی و ساختار سطحی کمک می‌کنند. افزون بر این، این ماهواره‌ها توانایی گردآوری داده‌های (VV+VH)<sup>۳</sup> دارند که اطلاعات دقیق‌تری از تغییرپذیری‌های سطح زمین به‌ویژه در ناحیه‌های سیلابی ارائه می‌دهد (Islam and Meng, 2022). همچنین، حالت IW<sup>۴</sup>، که با استفاده از روش و تکنیک TOPS<sup>۵</sup> انجام می‌شود، امکان تصویربرداری گسترده تا ۲۵۰ کیلومتر را فراهم می‌آورد و برای شبیه‌سازی دقیق‌تر تغییرپذیری‌های سطح زمین و شناسایی ناحیه‌های سیلابی کاربرد دارد. در این تحقیق، داده‌های VV برای شناسایی نواحی سیلابی و جداسازی ناحیه‌های آبگرفته استفاده شد. ویژگی‌های کلیدی داده‌های Sentinel-1 شامل دقت فضایی ۱۰ متر در هر پیکسل، پوشش گسترده‌ی احتمالی، و داده‌های زمانی دقیق است که این داده‌ها را برای تجزیه و تحلیل‌های سریع و دقیق، مانند سیلاب‌ها، بسیار مناسب

سرچشمه گرفته و به سمت خلیج فارس جریان دارند. رودخانه دز، شاخه اصلی رودخانه کارون است و پیوستن آن‌ها به یکدیگر در محلی به نام بندقیق، رودخانه کارون بزرگ را تشکیل می‌دهد. اهمیت رودخانه کارون به عنوان یک منبع اصلی آب برای فعالیت‌های کشاورزی و اقتصادی قابل توجه است و بیشترین برداشت آب از هر سامانه تغییرپذیری‌های رودخانه‌ای در ایران را دارد (Ashraf et al., 2019). موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دز از طول جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی بین ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۷ دقیقه شمالی است (Sharifazari et al., 2023) که منطقه مورد بررسی و ارزیابی در این تحقیق، در محل بندقیق که در بازه طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه و ۱۰ ثانیه شرقی و در بازه عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۲ درجه و صفر دقیقه و صفر ثانیه شمالی است (شکل ۱). در بخش جنوب غربی ایران با گستردگی زیرحوضه‌ای در حدود ۱۶,۲۰۰ کیلومتر مربع گسترش یافته است و جریانی سالانه میانگین حدود ۷,۶۰۰ میلیون مترمکعب به مخزن دز وارد می‌شود (Sharifazari et al., 2023). سد دز امکان آبیاری حدود ۱۲۵,۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی در استان خوزستان را فراهم می‌کند و ۵۲۰ مگاوات برق آبی تولید می‌کند (Felfelani et al., 2013). این سد همچنین به عنوان منبع اصلی آب شرب برای بیش از ۴/۷ میلیون نفر در منطقه‌های مرکزی و جنوبی استان خوزستان پیشنهاد شده است (Majedi et al., 2019). با توجه به ویژگی‌های خاص این منطقه و حساسیت بالای آن در برابر تغییرپذیری‌های هیدرولوژیکی، در سال ۱۳۹۸ سیلاب عظیمی در منطقه بندقیق رخ داد که تأثیرپذیری‌های شدیدی بر بوم‌سامانه (اکوسیستم) و منابع آبی منطقه گذاشت. این سیلاب می‌تواند به عنوان یک نمونه بارز از آسیب‌پذیری منطقه نسبت به تغییرهای ناگهانی در جریان رودخانه‌ها و وضعیت بارندگی‌ها در نظر گرفته شود. از آنجا

1. Vertical-Vertical Polarization
2. Vertical-Horizontal Polarization
3. Dual-Polarization
4. Interferometric Wide Swath
5. Terrain Observation by Progressive Scans

می‌سازد (Yagüe-Martínez et al., 2016). شکل ۲ تفاوت دو نوع قطبش VV و VH در داده‌های فرمت GRD را نشان می‌دهد.

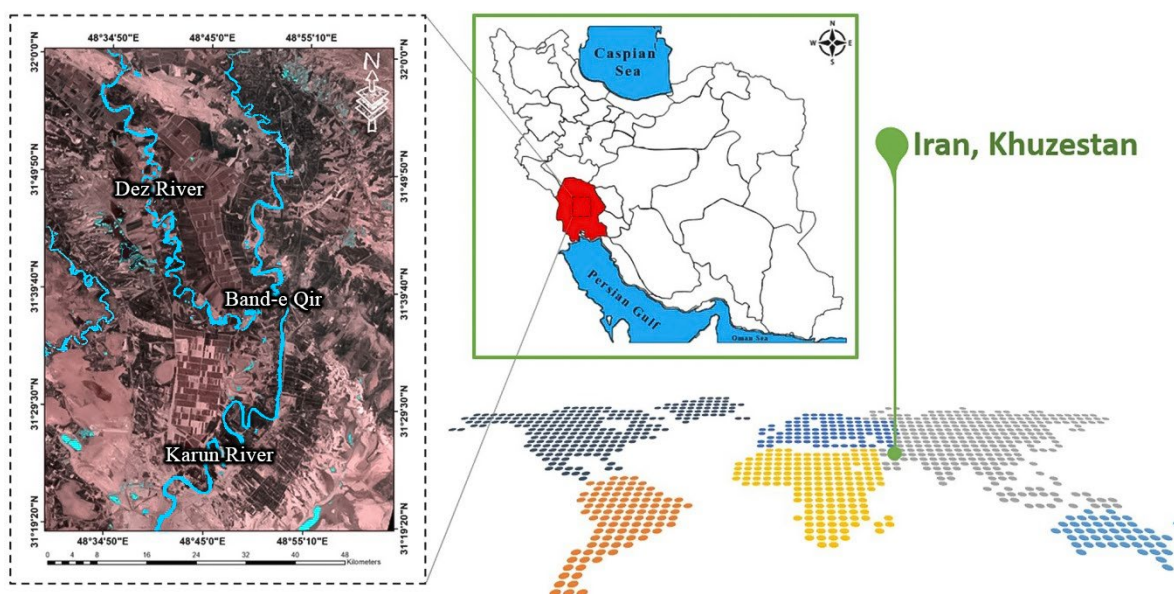


Fig. 1 Geographical Location of the Study Area

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

را ممکن می‌سازد (Gorelick et al. 2017). در ادامه هر یک از مرحله‌های تحقیق توضیح داده خواهد شد. پس از بهره‌مندی از ماهواره Sentinel-1، برای شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های سیلابی، از ماهواره Sentinel-2 به‌منظور بررسی رودخانه در هنگام جریان سطحی و دبی معمول و عادی (ترمال) استفاده شد.

### ۲-۳-۱- تعریف سطح آب‌گرفتگی

در آغاز منطقه مورد نظر با استفاده از ابزار Polygon برای جلوگیری از به‌وجود آمدن خطا و تشخیص به اشتباه نقطه‌های سایه به عنوان آب‌گرفتگی، جداسازی شد. این مرحله به عنوان ورودی و مرز تجزیه و تحلیل برای همه‌ی مرحله‌های پردازش داده‌ها عمل کرد.

### ۲-۳-۲- شناسایی تصویرهای پیش و پس از رخداد سیلاب

در این پژوهش و ارزیابی برای شناسایی منطقه‌های سیل‌زده با کمک GEE نقشه منطقه‌های سیل‌زده با استفاده از

### ۲-۳- روش تحقیق

در این پژوهش حاضر از تصویرهای راداری Sentinel-1 فرمت GRD و مقیاس پردازش پیکسل ۱۰ متری به عنوان داده‌های تحقیق و همچنین از سامانه GEE برای تهیه نقشه ناحیه‌های آب‌گرفتگی در هنگام سیلاب برای شناسایی ناحیه‌های آسیب‌پذیر استفاده شد. GEE یک پلتفرم پردازش جغرافیایی تحت وب است که امکان دسترسی آزاد به مجموعه‌های زیاد تصویرهای دوره زمانی ماهواره‌ها و ابزار سنجش از دور، به صورت رایگان فراهم می‌کند و پردازش‌ها را بدون نیاز به نرم‌افزارهای پیچیده و دانلود داده‌ها انجام می‌دهد (Amani et al., 2019; Tamiminia et al., 2020). این سامانه با استفاده از الگوی برنامه‌نویسی API<sup>۱</sup> و محیط تحت وب، امکان تحلیل سریع و دقیق تغییرپذیری‌های احتمالی سطح زمین را فراهم می‌کند و در پژوهش‌های محیطی مانند پایش سیلاب‌ها کاربرد دارد. از سودمندی و برتری‌های آن، توانایی پردازش داده‌های بزرگ و پیچیده است که دسترسی به ابزار پیشرفته و پردازش سریع داده‌ها

به حسگر (سنسور) راداری بازمی‌گردد. این بازتاب بستگی به ویژگی‌های سطح زمین و قطبش راداری دارد. در قطبش VH، بازتاب بیشتر در ناحیه‌های با پراکندگی حجمی مانند پوشش گیاهی مشاهده می‌شود، در حالی که در قطبش VV، بازتاب بیشتر در ناحیه‌های با پراکندگی مشخص مانند سطح‌های صاف و ساختمان‌ها مشاهده می‌شود. در این تحقیق، برای شناسایی تغییرپذیری و دگرگونی‌های احتمالی سطح زمین ناشی از سیلاب، از تفاوت بازتاب راداری بین تصویرهای پیش و پس از رخداد سیلاب استفاده شد. این ترکیب‌ها به شناسایی ناحیه‌های سیلابی کمک کرده و ویژگی‌های سطحی مانند ساختمان‌ها، آب‌گرفتگی‌ها و جاده‌ها را برجسته می‌سازند.

#### ۲-۳-۵- شناسایی ناحیه‌های سیلابی<sup>۴</sup> و ماسک کردن تصویرها<sup>۵</sup>

برای شناسایی ناحیه‌های سیلابی، از یک آستانه تفاوت بازتاب راداری (Threshold Value) استفاده شد. تفاوت بین داده‌های راداری پیش از سیلاب و پس از سیلاب محاسبه و سپس لایه باینری رستری ایجاد شد. آستانه تعیین شده برای این تفاوت برابر با ۷ دسی‌بل (db) تعیین شد، به این معنی که پیکسل‌هایی که تغییر بازتاب آن‌ها بیشتر از ۷ دسی‌بل باشد به عنوان ناحیه‌های سیلابی شناسایی و به آن‌ها مقدار ۱ اختصاص داده می‌شود، در حالی که

تصویرهای راداری Sentinel-1 پیش از رخداد سیلاب (3/01/2019 – 3/30/2019) و تصویرهای پس از رخداد سیلاب (4/01/2019 – 4/26/2019) تهیه شده است. این تصویرهای از نوع SAR هستند که به‌طور خاص برای بررسی تغییرپذیری و دگرگونی‌های احتمالی سطح زمین و تغییرپذیری و دگرگونی‌های احتمالی ناشی از آب‌گرفتگی استفاده می‌شوند.

#### ۲-۳-۳- فیلتر کردن داده‌ها<sup>۱</sup>

پس از گردآوری تصویرهای راداری از سنجنده Sentinel-1، داده‌ها در شرایط فرآیند فیلتر کردن قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که تنها تصویرهای معتبر و مناسب برای تحلیل تغییرپذیری و دگرگونی‌های احتمالی سطح زمین ناشی از سیلاب استفاده شوند. این فرآیند فیلترینگ شامل انتخاب تصویرهای بر مبنای تاریخ‌گذاری، حالت راداری IW و قطبش VV است. انتخاب تاریخ‌گذاری یکی از مرحله‌های اولیه فیلتر کردن است که به انتخاب تصویرهای پیش و پس از رخداد سیلاب کمک می‌کند. تصویرهای انتخاب شده باید با فاصله زمانی مناسب از تاریخ رخداد سیلاب باشند تا تغییرپذیری و دگرگونی‌های احتمالی ناشی از سیلاب به‌طور دقیق شناسایی شوند.

#### ۲-۳-۴- محاسبه تفاوت بازتاب راداری<sup>۲</sup>

بازتاب راداری<sup>۳</sup> به سیگنالی اطلاق می‌شود که از سطح زمین



Fig. 2 The Difference Between Two Polarizations (VV and VH)

شکل ۲ تفاوت دو قطبش VH و VV

1. Data Filtering
2. Radar Backscatter Difference
3. Backscatter
4. Flooded Areas
5. Masking Images

رودخانه در شرایط همسان و عادی برای مقایسه استفاده شد. شکل ۳ چارچوب عملکرد GEE در Sentinel-1 را به تصویر می‌کشد.

#### ۲-۴- ماهواره Sentinel-2

ماموریت Sentinel-2 که توسط برنامه نظارت جهانی بر محیط زیست و امنیت (GMES)<sup>۱</sup> سازماندهی شده است، مشاهده‌های اپتیکی چندطیفی با وضوح بالا از سطح‌های زمینی جهانی با فرکانس بازدیدی بالا (نزدیک به هر ۵ روز یکبار) با استفاده از سامانه (سیستم) دوماهواره‌ای به دست می‌آورد. چنین سامانه‌ای برای نقشه‌برداری و به‌روزرسانی پوشش زمین دینامیک اهمیت دارد (Drusch et al. 2012). ماهواره Sentinel-2 مجهز به یک ابزار چندطیفی (MSI)<sup>۲</sup> است که ۱۳ باند طیفی را از طیف مرئی و NIR<sup>۳</sup> تا SWIR<sup>۴</sup> در وضوح‌های مختلف فضایی از ۱۰ متر تا ۶۰ متر و با زاویه دید ۲۹۰ کیلومتر پوشش می‌دهد. با داشتن وضوح زمانی و طیفی بالا، Sentinel-2 برتری و سودمندی نظارت پیوسته و فشرده بر سطح زمین را ارائه می‌دهد. تصویرهای MSI ماهواره Sentinel-2 شامل باندهای SWIR با وضوح ۲۰ متر و باندهای سبز و NIR با وضوح ۱۰ متر هستند، که امکان نقشه‌برداری از آب بر مبنای شاخص‌های آب با وضوح ۱۰ متر را فراهم می‌کند (Yang et al. 2017). در حال حاضر، ماهواره Sentinel-2 دیگر تصویرهای باند پانکروماتیک ارائه نمی‌دهد و به‌جای آن تصویرهای باندهای طیف مرئی و مادون قرمز خود را به وضوح فضایی نسبی بالای ۱۰ متر ارتقاء داده است (Yang et al. 2017).

#### ۲-۴-۱- شاخص NDWI

شاخص معروف NDWI نخستین بار توسط McFeeters (1996) بر مبنای باندهای سبز و NIR برابر رابطه (۱) ارائه شد تا بازتاب سطح آب را در باند سبز به بیشینه رسانده و آن را در باند NIR به کمینه برساند. این شاخص معیاری است برای اندازه‌گیری مولکول‌های آب مایع در تاج گیاهان که با تابش خورشیدی ورودی تعامل دارند و سبب برجسته

پیکسل‌هایی که تغییرپذیری و گوناگونی‌های احتمالی آن‌ها کمتر از ۷ دسی‌بل باشد به عنوان ناحیه‌های بدون شرایط سیلابی با مقدار صفر شناسایی شدند.

این فرآیند به‌طور مؤثر ناحیه‌های بدون شرایط سیلابی را از تحلیل‌های بعدی حذف می‌کند و باعث می‌شود که تحلیل‌ها تنها بر روی ناحیه‌های آب‌گرفته‌شده متمرکز شوند.

#### ۲-۳-۶- گستردگی پهنه سیلاب

پس از فرآیند ماسک‌کردن تصویرها و شناسایی نواحی سیلابی، مرحله بعدی محاسبه گستردگی ناحیه‌های سیلابی است. در این مرحله، تصویرهای راداری به نقشه پهنه سیلاب تبدیل شده و ناحیه‌های سیلابی به‌صورت Polygon شناسایی می‌شوند. هر Polygon همسان با موقعیت جغرافیایی خود، گستردگی خاصی دارد. مساحت هر پیکسل در تصویرهای راداری به مترمربع محاسبه شده و سپس با گردآوری گستردگی‌های پیکسل‌های سیلابی، گستردگی کل ناحیه‌های سیلابی استخراج می‌شود. این فرآیند محاسبه گستردگی، به‌ویژه برای ارزیابی دقیق گستره ناحیه‌های سیلابی و استخراج اطلاعات ضروری برای مدیریت بحران‌ها و برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه اهمیت بسیاری دارد. پس از محاسبه گستردگی به مترمربع، این گستردگی به کیلومترمربع تبدیل شد تا مقیاس‌های مختلف برای تجزیه و تحلیل‌ها و گزارش‌دهی‌های نهایی فراهم شود. تبدیل واحدها به هکتار و کیلومترمربع، اطلاعاتی با مقیاس‌های بزرگتر ارائه می‌دهد که در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های بحران‌های سیلابی بسیار سودمند است و ارائه اندازه‌گیری‌های دقیق از گستردگی ناحیه‌های سیلابی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا اقدام‌های پیشگیرانه مناسبی را برنامه‌ریزی کنند.

#### ۲-۳-۷- خروجی نهایی پهنه‌بندی سیلاب

در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر سیلاب منطقه مورد نظر، از داده‌های GeoTIFF ناحیه‌های سیلابی و وضعیت

1. Global Monitoring for Environment and Security  
2. Multispectral Imager  
3. Near Infra-red  
4. Short Wave Infrared RGB

همه‌ی مقدارهای همانند و همسان داده‌های خوشه‌ها است. اگر الگوریتم‌ها خوشه‌های کمتری تشکیل دهند، مقدارهای همانند و همسان درون خوشه همانند و همسان خواهند بود، در حالی که خوشه‌های بیشتر نشان‌دهنده ناهمگنی مقدارهای همانند و همسان داده‌ها هستند (Hamada et al., 2019). در این پژوهش و ارزیابی‌ها، تصویرهای NDWI برای طبقه‌بندی آب‌های سطحی با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means و تعیین ۳ کلاس در محیط تحت وب GEE دستور ee.Clusterer.wekaKMeans() استفاده شد (رابطه ۳).

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K W_{ik} \|x^i - \mu_k\|^2 \quad (3)$$

که در آن  $W_{ik} = 1$  برای داده در نقطه  $x^i$  اگر به خوشه  $k$  تعلق داشته باشد، در غیر این صورت  $W_{ik} = 0$  است و همچنین  $\mu_k$  نشان‌دهنده مرکز خوشه  $x^i$  است. افزون بر این  $M$  و  $K$  به ترتیب نشان‌دهنده شمار نمونه‌ها و شمار خوشه است. اگرچه روش K-Means مدت‌ها پیش در سنجش از دور معرفی شد (Jain 2010; Wang 1990)، اما بسیاری از نویسندگان هنوز از آن به عنوان مبنای توسعه روش‌های طبقه‌بندی بدون نظارت (Gašparović et al., 2019; Tang et al., 2019; Yu et al., 2017; Zhong et al., 2017) یا روش‌های به‌کلی خودکار برای نقشه‌برداری از وضعیت محیط زیست (Kusak et al., 2021; Guo et al., 2021; Ren et al., 2020; Sinaga and Yang, 2020) استفاده می‌کنند. شکل ۴ چارچوب کلی مرحله‌های استخراج گستردگی رودخانه در شرایط عادی (نرمال) را در محیط GEE نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۵ تغییرپذیری‌های بده رودخانه در سیلاب بهاری سال ۱۳۹۸ را در بازه زمانی ۷ فروردین تا ۶ اردیبهشت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تاریخ ۱۵ فروردین، جریان رودخانه به اوج خود یعنی بیش از ۳۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه رسیده است. از تاریخ ۲۱ فروردین به بعد، جریان به تدریج به سطحی بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه رسیده

شدن آب‌های سطحی می‌شوند. این شاخص نسبت به اثرگذاری‌های احتمالی پراکندگی جوی حساسیت کمتری نسبت به NDVI<sup>۱</sup> دارد (Gao 1996).

$$NDWI = \frac{(Green-NIR)}{(Green+NIR)} \quad (1)$$

در اینجا Green باندی است که شامل نور سبز بازتاب‌شده می‌باشد و NIR نمایانگر تابش بازتاب‌شده نزدیک به مادون قرمز است. انتخاب این طول‌موج‌ها به منظور انجام سه هدف انجام شد: (الف) بیشینه کردن بازتاب معمولی ویژگی‌های آبی با استفاده از طول‌موج‌های نور سبز، (ب) کمینه کردن بازتاب کم NIR توسط ویژگی‌های آبی و (پ) بهره‌برداری از بازتاب بالای NIR توسط پوشش گیاهی زمینی و ویژگی‌های خاک (McFeeters 1996). در بیشتر موارد می‌تواند اطلاعات مربوط به آب را به‌طور مؤثر تقویت کند با این حال، به زمین‌های ساخته‌شده حساس است و اغلب باعث برآورد بیش از حد گستردگی‌های آبی می‌شود (Du et al., 2016). در این پژوهش و ارزیابی‌ها جهت محاسبه گستردگی رودخانه در شرایط همسان و عادی، از ماهواره Sentinel-2 و با بهره‌گیری از شاخص NDWI برای تاریخ 3/09/2019 الی 3/22/2019 با کمک مدل خوشه‌بندی K-Means به دست آمد. در ماهواره Sentinel-2 (<https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndwi>) برای محاسبه شاخص NDWI از باندهای B03 و B08 (Pena-Regueiro et al., 2020) استفاده شده است (رابطه ۲).

$$Sentinel - 2 NDWI = \frac{(B03-B08)}{(B03+B08)} \quad (2)$$

#### ۲-۴-۲- مدل خوشه‌بندی بدون نظارت K-Means

K-Means یک الگوریتم طبقه‌بندی بدون نظارت است (Vibhute and Gawali, 2013). که برای تولید خوشه‌هایی از مقدارهای همانند و همسان طیفی برای تصویرها استفاده می‌شود (Hamada et al., 2019). با محاسبه فاصله مربعی بین مقدارهای همانند و همسان داده و مرکز خوشه در دست‌کم، خوشه‌های درون‌گروهی را تولید می‌کند (Burrough et al., 2001). مرکز خوشه بر مبنای میانگین

ممکن است نیاز به اقدام‌های مدیریت سیلاب برای کاهش آسیب‌ها و ریسک باقی‌مانده باشد. در این تحقیق، با استفاده از هیدروگراف (آب‌نگار) سیلاب سال ۱۳۹۸ و تصویرهای پهنبندی سیلاب به دست آمده از GEE، رابطه بین بده و بازده احتمالی خروجی از سد در هنگام سیلاب و گستردگی آبگیر و نسبت آن‌ها بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از برآورد مساحت پهنبندی سیلاب در جدول ۱ ارائه شده است.

که نشان‌دهنده فروکش سیلاب و بازگشت شرایط به حالت طبیعی است با این حال، هنوز این جریان باعث آب‌گرفتگی در منطقه‌های پایین‌دست شده است، هرچند که نسبت به اوج سیلابی کاهش شایان توجهی داشته است. این امر نشان می‌دهد که هرچند وضعیت جریان به حالت معمول و عادی‌تر نزدیک می‌شود، اما اثرگذاری‌های احتمالی سیلاب همچنان در منطقه‌های پایین‌دست رودخانه ادامه دارد و

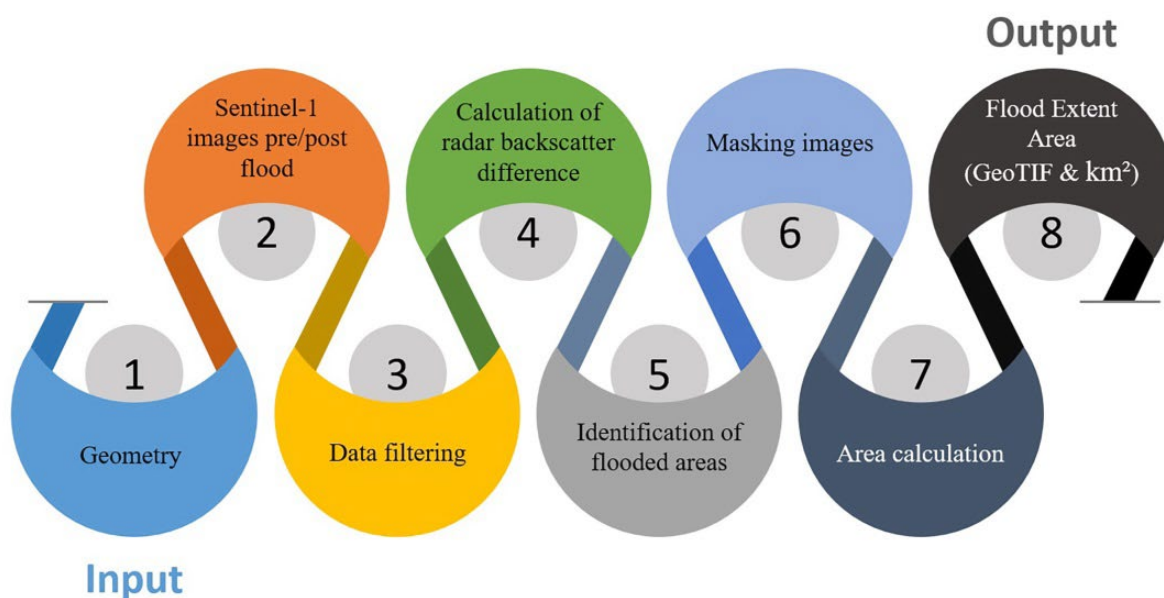


Fig. 3 Flowchart of the Steps Involved in the Study Using Sentinel-1

شکل ۳ روندنمای مرحله‌های انجام مطالعه و ارزیابی‌ها بر روی Sentinel-1

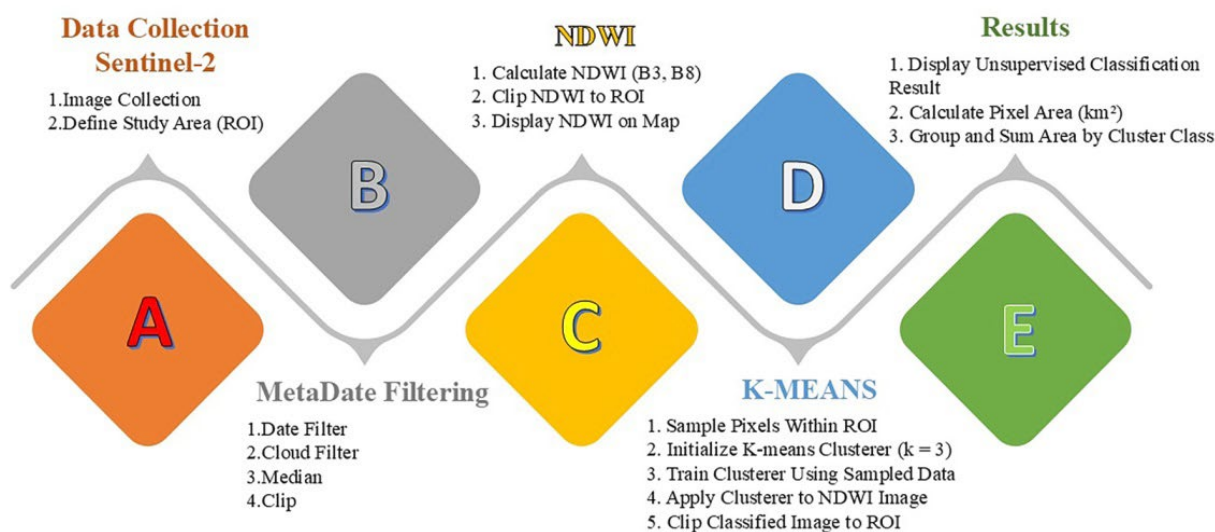


Fig. 4 Flowchart of the Steps Involved in the Study Using Sentinel-2

شکل ۴ روندنمای مرحله‌های انجام مطالعه و ارزیابی‌ها بر روی Sentinel-2

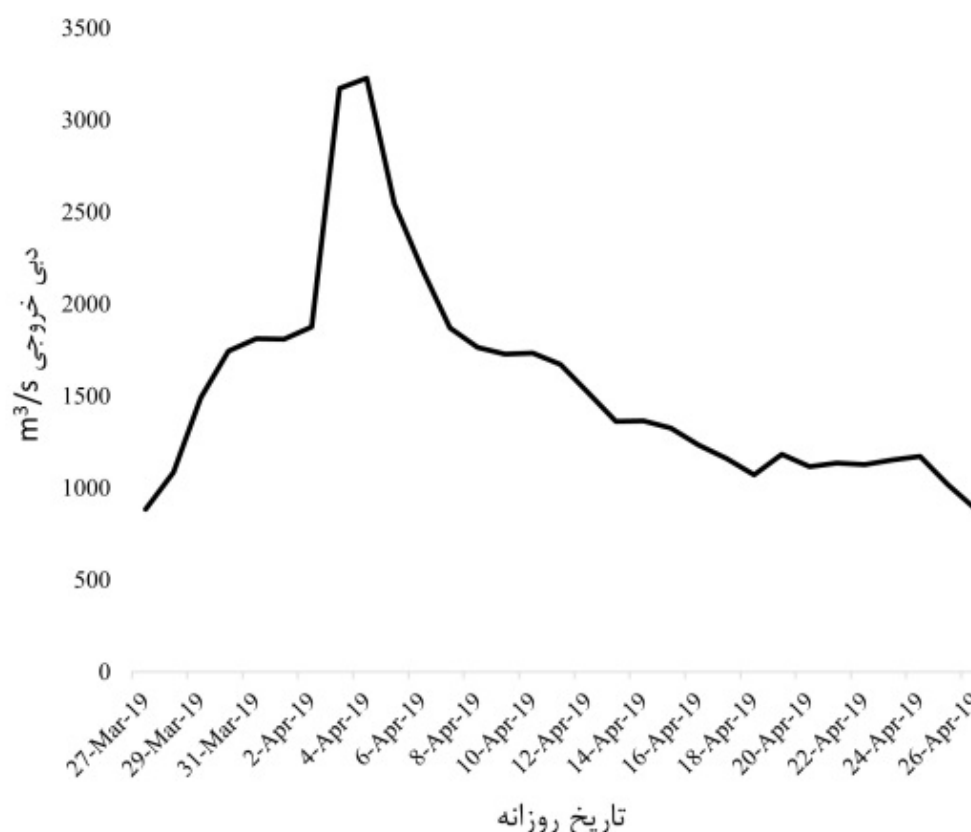


Fig. 5 Discharge Output from Dez Dam in 2019

شکل ۵ بده خروجی از سد دز در سال ۱۳۹۸

تاریخ ۱۷ فروردین پهنه سیلابی ۴۲۲/۰۸ کیلومتر مربع ثبت شده و بده و بازده احتمالی خروجی افزایش شایان توجهی (بیش از ۱۱ هزار متر مکعب بر ثانیه) نسبت به پیش داشته است. در این تاریخ، نسبت گستردگی پهنه همانند و همسان سیلابی معمول و عادی به رودخانه سیلابی ۰/۰۹ نشان‌دهنده گسترش بیش از ۱۱ برابری پهنه آب‌گرفته در مقایسه با حالت عادی است.

در ادامه و با وجود نوسان‌های مقطعی، همچنان روند کلی خروجی بده سد به گسترش پهنه سیلابی منجر شده است. بیشترین گستردگی پهنه سیلابی در تاریخ ۲۳ فروردین با مقدار ۴۳۷/۹۴ کیلومترمربع مشاهده می‌شود. این گسترش بیشترین پهنه سیلابی به دلیل پیوسته بودن بده بالای خروجی سد پس از عبور اوج (پیک) سیلاب است. در این تاریخ نسبت گستردگی رودخانه در شرایط عادی به رودخانه سیلابی کمترین مقدار دوره بوده و نشان‌دهنده بیشترین میزان گسترش سطحی آب و اشباع‌شدگی دشت سیلابی است. پس از نیمه فروردین، با کاهش تدریجی بده خروجی

نتایج بیانگر آن است که گستردگی پهنه سیلابی در طی دوره رخداد سیلاب به‌طور پیوسته افزایش یافته و همبستگی روشنی با افزایش بده خروجی سد دارد. در تاریخ ۱۲ فروردین مساحت پهنه سیلابی برابر با ۵۱/۸ کیلومتر مربع بوده، در حالی که گستردگی رودخانه دز در حالت معمول و عادی (نرمال) با استفاده از ماهواره Sentinel-2 ۳۶/۱۶ کیلومترمربع اندازه‌گیری شده است (شکل ۶). نسبت این دو مقدار ۰/۷ نشان می‌دهد که در این تاریخ پهنه سیلابی حدود ۰/۴۰ بزرگ‌تر از حالت معمول و عادی بوده و هنوز وارد موج اصلی سیلاب نشده است. این نسبت هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد گویای وضعیت زیانبار و آسیب‌های احتمالی بیش از انتظار است. با افزایش بده خروجی سد، پهنه سیلابی نیز به‌شدت گسترش یافته است، به‌طوری‌که در ۱۳ فروردین گستردگی سیلابی به ۱۴۳/۹۹ کیلومتر مربع رسیده و نسبت به آب‌نگار (هیدروگراف) پیشین افزایش اندکی داشته است. آغاز روند افزایشی از ۱۲ فروردین آغاز شده و در ۱۵ فروردین به اوج می‌رسد، و در

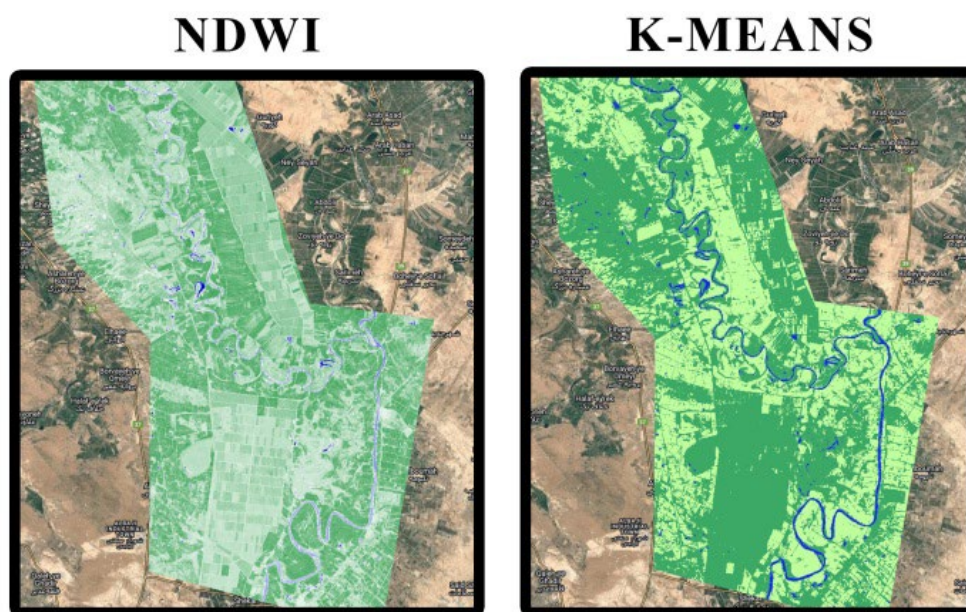


Fig. 6 NDWI Index Image and K-Means Clustering Model

شکل ۶ تصویر شاخص NDWI و خوشه‌بندی مدل K-Means

منطقه به تغییرپذیری‌های بده و ظرفیت پایین رودخانه برای عبور حجم‌های بالای آب است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است می‌توان گستره‌ی سیلاب را در مقایسه با رودخانه نرمال و شناسایی سطح‌های سیل‌گیر به‌صورت گرافیکی نشان داد و همچنین منطقه‌های مستعد خطر را شناسایی کرد. بررسی روند زمانی-مکانی رویداد سیلاب با توجه به شکل ۷ در بازه ۱۲ فروردین تا ۶ اردیبهشت نشان می‌دهد که رابطه میان بده جریان و سطح آب‌گرفتگی خطی نبوده و دارای یک تأخیر فاز (Lag Time) مشخص است. برابر شکل ۵، اگرچه هیدروگراف جریان در روزهای ۱۳ تا ۱۵ فروردین به بده اوج خود رسیده، اما بیشترین گسترش پهنه سیلاب در تاریخ ۱۷ تا ۱۹ فروردین رخ داده است که بیانگر ظرفیت محدود آبراهه اصلی و زمان‌بر بودن فرآیند پخش سیلاب در دشت‌های حاشیه‌ای است. افزون بر این، تصویرهای مربوط به دوره فروکش (۲۳ تا ۲۵ فروردین) نشان می‌دهند که با وجود کاهش چشمگیر بده رودخانه و ورود هیدروگراف به شاخه نزولی، تخلیه آب از اراضی کشاورزی و منطقه‌های پست با کندی صورت گرفته و پدیده ماندآبی<sup>۱</sup> تا روزهای پایانی رویداد ادامه داشته است، که لزوم توجه به مدیریت

سد، گسترش پهنه سیلابی نیز روند کاهشی پیدا می‌کند. این موضوع در جدول به‌طور کامل قابل مشاهده است، به‌طوری‌که گسترش پهنه سیلابی از ۳۲۰/۰۲ کیلومترمربع در ۲۵ فروردین به ۲۴۷/۶۴ کیلومترمربع در ۳۱ فروردین و در نهایت به ۱۴۶/۸۷ کیلومترمربع در ۶ اردیبهشت کاهش می‌یابد. در ۶ اردیبهشت، با وجود اینکه روند آب‌نگار نشان می‌دهد سیلاب به‌کلی پایان یافته و بده خروجی سد به شرایط پایدار نزدیک شده است، گستردگی عادی احتمالی پهنه سیلابی همچنان حدود چهار برابر گستردگی عادی احتمالی رودخانه در این حالت (۳۶/۱۶ کیلومترمربع) است. این موضوع نشان می‌دهد که آب‌گرفتگی سطحی با تأخیر زمانی نسبت به کاهش بده و بازده احتمالی فروکش می‌کند و اثرگذاری‌های سیلاب تا روزهای پایانی همچنان در پهنه‌های پایین‌دست باقی مانده است. به‌طور کلی نتایج جدول نشان می‌دهد میان بده خروجی سد و گستردگی پهنه سیلابی رابطه مستقیم و شایان توجهی وجود دارد. کمترین نسبت گستردگی نرمال/سیلابی در زمان بالاترین بده‌ها مشاهده شده است که نشانگر افزایش ناگهانی و شدید بده خروجی نقش اصلی را در گسترش پهنه آب‌گرفتگی و رخداد سیلاب داشته است. این الگو نشان‌دهنده حساسیت

1. Waterlogging

بنفش تا زرد) در نقطه‌های گودافتاده و انتهای حوضه، گویای وجود تله‌های ناهمواری و عوارضی (توپوگرافیکی) و ضعف زهکشی طبیعی اراضی است، پدیده‌ای که منجر به پیوسته‌شدن ماندآبی درازمدت و افزایش توان بالقوه (پتانسیل) زیان و آسیب به اراضی کشاورزی، حتی پس از بازگشت رودخانه به شرایط جریان پایه شده است. این نقشه، منطقه‌های مستعد خطر، در هنگام سیلاب رودخانه دز در محل حومه بندقییر را نمایش می‌دهد. شایان یادآوری است که نقشه ارائه شده، پهنه‌های آبیگر را فقط بر اساس سیلاب تاریخی ۱۳۹۸ در مدیریت آب بر روی سد دز نشان می‌دهد. پهنه‌بندی سیلاب در شرایط خاص و بر مبنای هیدروگراف‌های مختلف و تغییرپذیری‌های ذخیره مخزن سد، می‌تواند تغییر کند. این موضوع اهمیت به‌روزرسانی مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های سیلاب در زمان‌های مختلف و برای شرایط متغیر را به‌ویژه برای مدیریت بهتر منابع آبی و پیش‌بینی دقیق‌تر خطرهای سیلاب آشکار می‌سازد. بنابراین، شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر با در نظر گرفتن وضعیت مخزن سد در زمان‌های مختلف، می‌تواند به مدیریت مؤثرتر سیلاب‌ها و کاهش خطرهای ناشی از آن کمک کند.

زهکشی پس از رخداد سیلاب را در این منطقه برجسته می‌سازد. این اطلاعات به طراحی زیرساخت‌های مقاوم‌تر، تخلیه در زمان ساکنان و جلوگیری از آسیب و زیان‌های اقتصادی کمک می‌کند. همچنین، با شبیه‌سازی اثرگذاری‌های تغییرپذیری‌های اقلیمی و افزایش بارش‌ها، مدل هیدرودینامیکی می‌تواند پیش‌بینی‌های قابل ملاحظه‌ای برای آینده ارائه دهد که به مسئولان در برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب و اقدام‌های پیشگیرانه کمک می‌کند. توزیع لایه‌های زمانی در شکل ۸ در چارچوب یک نقشه خطر نشان می‌دهد که اگرچه طغیان اولیه در تاریخ‌های ۱۲ و ۱۳ فروردین (رنگ‌های سبز و آبی) محدود به حاشیه بستر و شکستگی‌های موضعی دیواره‌ها بوده است، اما در تاریخ ۱۷ فروردین (رنگ قرمز) با رخداد بیشینه گستردگی مکانی، رژیم جریان تغییر یافته است. در این مرحله، حجم بسیار زیاد سیلاب با نادیده گرفتن ریخت‌شناسی (مورفولوژی) پیچان‌رودی<sup>۱</sup> و بستر اصلی، مسیر مستقیم‌تری را در دشت سیلابی طی کرده که بیانگر چیرگی رفتار هیدرولیکی میان‌بر زدن جریان<sup>۲</sup> در بده‌های بالا است. افزون بر این، پایداری لکه‌های مربوط به فاز فروکش در بازه ۲۳ فروردین تا ۶ اردیبهشت (رنگ‌های

جدول ۱ گستردگی پهنه‌بندی توسط GEE

Table 1 Flood Extent Area Generated by GEE

Flood Image Date	Normal River Extent (km <sup>2</sup> )	Flood Extent (km <sup>2</sup> )	Ratio of Normal River Extent to Flood Extent
4/01/2019	36.16	51.8	0.70
4/02/2019		143.99	0.25
4/06/2019		422.08	0.09
4/08/2019		419.27	0.09
4/12/2019		437.94	0.08
4/14/2019		320.02	0.11
4/20/2019		247.64	0.15
4/26/2019		146.87	0.25

چندطیفی Sentinel-2 و سامانه پردازش ابری Google Earth Engine انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از داده‌های SAR و شاخص‌های نوری مبتنی بر NDWI، همراه با الگوریتم‌های طبقه‌بندی بدون نظارت،

#### ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش و ارزیابی‌ها با هدف تحلیل تغییرپذیری‌های مکانی - زمانی پهنه سیلاب سال ۱۳۹۸ رودخانه دز با بهره‌گیری از تلفیق داده‌های راداری Sentinel-1، تصویرهای

2. Flow Short-circuiting

1. Meandering

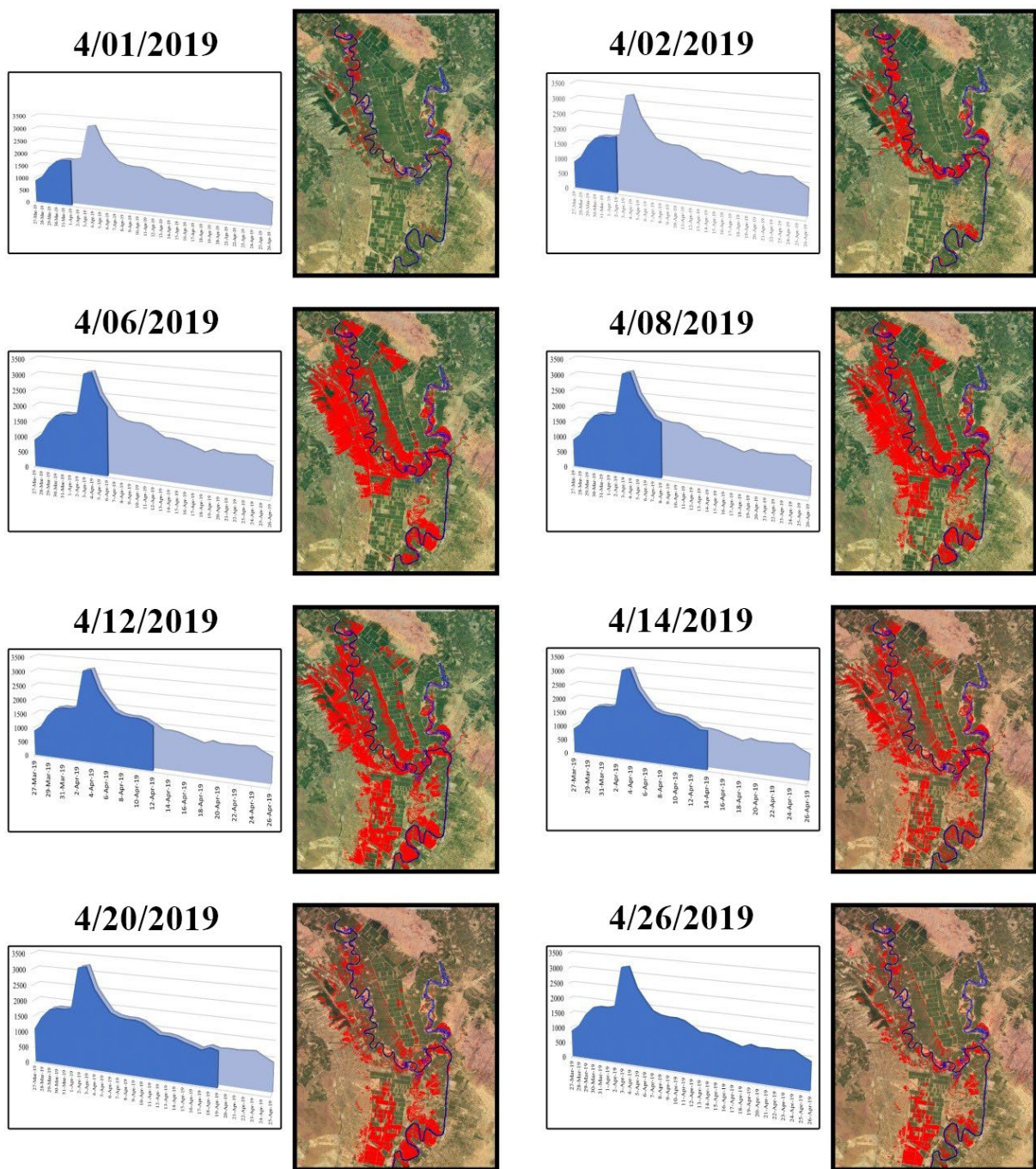


Fig. 7 Flooded Areas during the 2019 Flood Period

شکل ۷ منطقه‌های آب‌گرفتگی در بازه زمانی سیلاب ۱۳۹۸

حدود ۱۴۶ کیلومتر مربع در ۶ اردیبهشت رسید. این تغییرپذیری‌ها نشان‌دهنده رابطه مستقیم و قوی میان بده و بازده‌های احتمالی خروجی و گستردگی آب‌گرفتگی بوده و حساسیت شدید دشت سیلابی دز نسبت به افزایش ناگهانی جریان را تأیید می‌کند. مقایسه منحنی بده و گستردگی سیلاب بیانگر وجود تأخیر زمانی مشخص

چارچوبی کارآمد برای استخراج سریع و دقیق محدوده آب‌گرفتگی فراهم می‌کند. بر مبنای پهنه‌بندی انجام‌شده، گستردگی سیلابی از ۵۱/۸ کیلومتر مربع در ابتدای رخداد رویداد (۱۲ فروردین) به بیش از ۴۲۲ کیلومتر مربع در دو روز پس از اوج بالای سیلاب (۱۷ فروردین) افزایش یافت و در نهایت با کاهش تدریجی بده خروجی سد، مقدار آن به

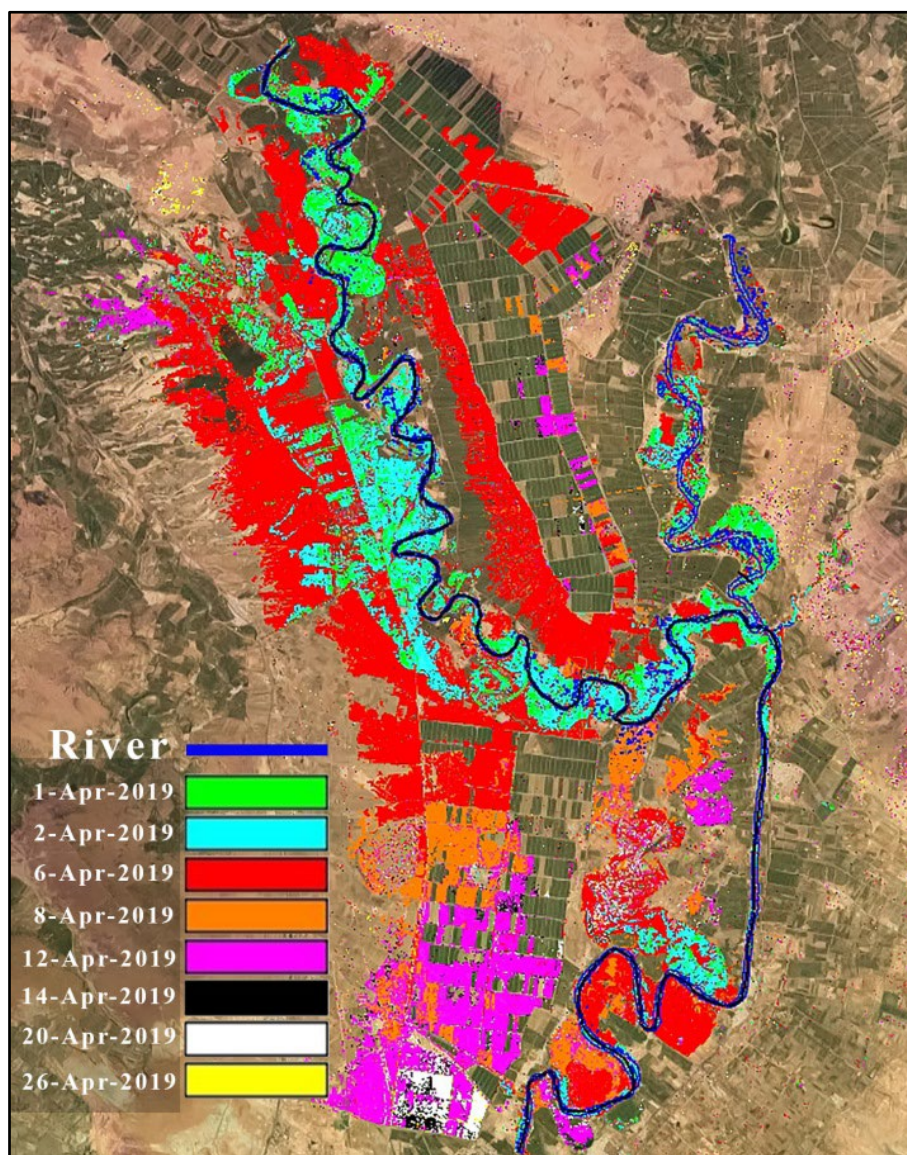


Fig. 8 Flood Prone Areas during the 2019 Flood

شکل ۸ منطقه‌های مستعد خطر در سیلاب ۱۳۹۸

عادی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابر پیشنهاد و تاکید می‌شود در آینده از مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی برای برآورد عمق و حجم سیلاب، از داده‌های ارتفاعی دقیق برای تحلیل زهکشی، و از پیش‌فرض‌های مختلف بهره‌برداری سد برای تهیه نقشه‌های آسیب و خطرگریزی (ریسک) پیشرفته استفاده شود.

#### تضاد منافع نویسندگان

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

(Lag Time) میان اوج بالای جریان و بیشترین گسترش پهنه آب‌گرفتگی است، به‌گونه‌ای که بیشترین گستردگی سیلاب در فاصله چند روز پس از زمان اوج بالای آب‌نگار (هیدروگراف) رخ داده است. این تأخیر ناشی از محدودیت ظرفیت عبور جریان در آبراهه اصلی و زمان‌بر بودن فرآیند پخش آب در سیلاب‌دشت رودخانه است. افزون بر این، پایداری لکه‌های ماندآبی تا روزهای پایانی فروردین و اوایل اردیبهشت نشان می‌دهد که اراضی پست و گودافتاده منطقه دارای زهکشی طبیعی ناکارآمد بوده و مستعد نگهداشت درازمدت آب هستند، موضوعی که می‌تواند آسیب و زیان‌های احتمالی کشاورزی و سرعت بازگشت به شرایط

Chatufale, A.P., Rege, P.P. & Bhatt, A. (2022). Extraction of Waterbody Using Object-Based Image Analysis and XGBoost. In: *Advanced Machine Intelligence and Signal Processing*, 341–350, Springer.

Cian, F., Marconcini, M. & Ceccato, P. (2018). Normalized Difference Flood Index for Rapid Flood Mapping: Taking Advantage of EO Big Data. *Remote Sensing of Environment*, 209, 712–730.

Cohen, S., Brakenridge, G.R., Kettner, A., Bates, B., Nelson, J., McDonald, R., Huang, Y.F., Munasinghe, D. & Zhang, J. (2018). Estimating Floodwater Depths from Flood Inundation Maps and Topography. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), 847–858.

DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J.W. & Lang, M.W. (2020). Rapid and Robust Monitoring of Flood Events Using Sentinel-1 and Landsat Data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111664. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P. & Martimort, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W. & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.

Felfelani, F., Jalali Movahed, A. & Zarghami, M. (2013). Simulating Hedging Rules for Effective Reservoir Operation by Using System Dynamics: A Case Study of Dez Reservoir, Iran. *Lake and Reservoir Management*, 29(2), 126–140. <https://doi.org/10.1080/10402381.2013.801542>

Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. & Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35.

Fisher, A., Flood, N. & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat Water Index Methods for Automated Water Classification in Eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>

Gaikwad, S.V., Vibhute, A.D., Kale, K.V. & Mane, A.V. (2021). Vegetation Cover Classification Using Sentinel-2 Time-Series Images and K-Means Clustering. In: 2021 IEEE Bombay Section Signature Conference (IBSSC), 1–6, IEEE.

## منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: پژوهشگر اصلی، تحلیلگر داده‌ها، نگارنده مقدمه، نگارنده بحث.

نویسنده دوم: پژوهشگر فرعی، تحلیلگر داده‌ها، نگارنده بحث.

## ۵- منابع‌ها

Alborzi, A., Zhao, Y., Nazemi, A., Mirchi, A., Mallakpour, I., Moftakhari, H., Ashraf, S., Izadi, R. & AghaKouchak, A. (2022). The Tale of Three Floods: From Extreme Events and Cascades of Highs to Anthropogenic Floods. *Weather and Climate Extremes*, 38, 100495. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100495>.

Amani, M., Mahdavi, S., Afshar, M., Brisco, B., Huang, W., Mirzadeh, S.M.J., White, L., Banks, S., Montgomery, J. & Hopkinson, C. (2019). Canadian Wetland Inventory Using Google Earth Engine: The First Map and Preliminary Results. *Remote Sensing*, 11(7), 842. <https://doi.org/10.3390/rs11070842>

Ashraf, S., AghaKouchak, A., Nazemi, A., Mirchi, A., Sadegh, M., Moftakhari, H.R., Hassanzadeh, E., Miao, C.Y., Madani, K., Mousavi Baygi, M., Anjileli, H., Arab, D.R., Norouzi, H., Mazdiyasn, O., Azarderakhsh, M., Alborzi, A., Tourian, M.J., Mehran, A., Farahmand, A. & Mallakpour, I. (2019). Compounding Effects of Human Activities and Climatic Changes on Surface Water Availability in Iran. *Climatic Change*, 152(3), 379–391. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2336-6>

Bangira, T., Alfieri, S.M., Menenti, M. & Van Niekerk, A. (2019). Comparing Thresholding with Machine Learning Classifiers for Mapping Complex Water. *Remote Sensing*, 11(11), 1351. <https://doi.org/10.3390/rs11111351>.

Burrough, P.A., Wilson, J.P., Van Gaans, P.F.M. & Hansen, A.J. (2001). Fuzzy K-Means Classification of Topo-Climatic Data as an Aid to Forest Mapping in the Greater Yellowstone Area, USA. *Landscape Ecology*, 16(6), 523–546.

- Irwin, K., Beaulne, D., Braun, A. & Fotopoulos, G. (2017). Fusion of SAR, Optical Imagery and Airborne LiDAR for Surface Water Detection. *Remote Sensing*, 9(9), 890. <https://doi.org/10.3390/rs9090890>.
- Islam, M.T. & Meng, Q. (2022). An Exploratory Study of Sentinel-1 SAR for Rapid Urban Flood Mapping on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002>.
- Jain, A.K. (2010). Data Clustering: 50 Years beyond K-Means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651–666.
- Ji, L., Geng, X., Sun, K., Zhao, Y. & Gong, P. (2015). Target Detection Method for Water Mapping Using Landsat 8 OLI/TIRS Imagery. *Water*, 7(2), 794–817.
- Konapala, G., Kumar, S.V. & Ahmad, S.K. (2021). Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 Diversity for Flood Inundation Mapping Using Deep Learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 163–173.
- Kuldeep, Garg, P.K. & Garg, R.D. (2016). Geospatial Techniques for Flood Inundation Mapping. In: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 4387–4390, IEEE.
- Kusak, L., Unel, F.B., Alptekin, A., Celik, M.O. & Yakar, M. (2021). Apriori Association Rule and K-Means Clustering Algorithms for Interpretation of Pre-Event Landslide Areas and Landslide Inventory Mapping. *Open Geosciences*, 13(1), 1226–1244.
- Li, P., Jiang, L. & Feng, Z. (2013). Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote Sensing*, 6(1), 310–329.
- Li, Y., Tao, C., Tan, Y., Shang, K. & Tian, J. (2016). Unsupervised Multilayer Feature Learning for Satellite Image Scene Classification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(2), 157–161.
- Li, Z., Wang, C., Emrich, C.T. & Guo, D. (2018). A Novel Approach to Leveraging Social Media for Rapid Flood Mapping: A Case Study of the 2015 South Carolina Floods. *Cartography and Geographic Information Science*, 45(2), 97–110.
- Liu, Q., Huang, C., Shi, Z. & Zhang, S. (2020). Probabilistic River Water Mapping from Landsat-8 Using the Support Vector Machine Method. *Remote Sensing*, 12(9), 1374. <https://doi.org/10.3390/rs12091374>.
- Gao, B.C. (1996). NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gašparović, M. & Singh, S.K. (2023). Urban Surface Water Bodies Mapping Using the Automatic K-Means Based Approach and Sentinel-2 Imagery. *Geocarto International*, 38(1), 2148757. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2148757>
- Gašparović, M., Zrinjski, M. & Gudelj, M. (2019). Automatic Cost-Effective Method for Land Cover Classification (ALCC). *Computers, Environment and Urban Systems*, 76, 1–10.
- Glasgow, H.B., Burkholder, J.M., Reed, R.E., Lewitus, A.J. & Kleinman, J.E. (2004). Real-Time Remote Monitoring of Water Quality: A Review of Current Applications, and Advancements in Sensor, Telemetry, and Computing Technologies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 300(1–2), 409–448.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Gudelj, M., Gašparović, M. & Zrinjski, M. (2018). Accuracy Analysis of the Inland Waters Detection. SGEM Vienna Green.
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J. & Wu, L. (2017). A Review of Wetland Remote Sensing. *Sensors*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- Guo, Z., Shi, Y., Huang, F., Fan, X. & Huang, J. (2021). Landslide Susceptibility Zonation Method Based on C5.0 Decision Tree and K-Means Cluster Algorithms to Improve the Efficiency of Risk Management. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101249. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101249>.
- Hamada, M.A., Kanat, Y. & Abiche, A.E. (2019). Multi-Spectral Image Segmentation Based on the K-Means Clustering. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(2), 1016–1019.
- Hartigan, J.A. & Wong, M.A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series c (Applied Statistics)*, 28(1), 100–108.
- Hostache, R., Matgen, P., Schumann, G., Puech, C., Hoffmann, L. & Pfister, L. (2009). Water Level Estimation and Reduction of Hydraulic Model Calibration Uncertainties Using Satellite SAR Images of Floods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2), 431–441.

- The Use of Earth Observation for Wetland Inventory, Assessment and Monitoring.
- Ren, Z., Sun, L. & Zhai, Q. (2020). Improved K-Means and Spectral Matching for Hyperspectral Mineral Mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102154. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102154>.
- Revilla-Romero, B., Hirpa, F.A., Thielen-del Pozo, J., Salamon, P., Brakenridge, R., Pappenberger, F. & De Groeve, T. (2015). On the Use of Global Flood Forecasts and Satellite-Derived Inundation Maps for Flood Monitoring in Data-Sparse Regions. *Remote Sensing*, 7(11), 15702–15728.
- Rezaei Moghaddam, M.H. & Esmaili, R. (2005). Geomorphological Effects of Flooding in Rayis Kola Basin: Northern Alborz. *Journal of Modares Human Sciences*, 4(9), 1–18.
- Rosser, J.F., Leibovici, D.G. & Jackson, M.J. (2017). Rapid Flood Inundation Mapping Using Social Media, Remote Sensing and Topographic Data. *Natural Hazards*, 87(1), 103–120. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2755-0>
- Rostami, M., Amini, R. & Zahiri, A.R. (2024). Developed Three-dimensional model for extracting stage-discharge relationship in straight multi-stage compound channels. *Journal of Hydraulics*, 19(2), 119–138. (In Persian)
- Sharifazari, S., Palmer, J.G., Higgins, P.A., Rao, M.P., Johnson, F., Turney, C.S.M., Martín-Benito, D. & Andersen, M.S. (2023). 500-Year Reconstruction of Dez River Discharge in Southwestern Iran from Tree Rings. *Journal of Hydrology*, 624, 129895. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129895>.
- Shen, X., Anagnostou, E.N., Allen, G.H., Brakenridge, G.R. & Kettner, A.J. (2019a). Near-Real-Time Non-Obstructed Flood Inundation Mapping Using Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing of Environment*, 221, 302–315.
- Shen, X., Wang, D., Mao, K., Anagnostou, E. & Hong, Y. (2019b). Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review. *Remote Sensing*, 11(7), 879. <https://doi.org/10.3390/rs11070879>.
- Sinaga, K.P. & Yang, M.S. (2020). Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. *IEEE Access*, 8, 80716–80727.
- Sohrabi, M., Zolghadr, M. & Kargar, M.R. (2025). Two-dimensional flood simulation and investigating the effect of control structures on the hydraulic characteristics of the flow in the Koran Gate basin of Shiraz using UAV and satellite data. *Journal of Hydraulics*, 20(2), 117–129. (In Persian)
- Majedi, H., Fathian, H., Nikbakht-Shahbazi, A. & Zohrabi, N. (2019). Integrated Surface and Groundwater Resources Allocation Simulation to Evaluate Effective Factors on Greenhouse Gases Production. *Water Supply*, 20(2), 652–665. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.194>
- Martinis, S., Twele, A., Strobl, C., Kersten, J. & Stein, E. (2013). A Multi-Scale Flood Monitoring System Based on Fully Automatic MODIS and TerraSAR-X Processing Chains. *Remote Sensing*, 5(11), 5598–5619.
- Martinis, S., Twele, A., Voigt, S. & Strunz, G. (2014). Towards a Global SAR-Based Flood Mapping Service. In: 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2355–2358, IEEE.
- 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.
- Mosavi, A., Ozturk, P. & Chau, K.W. (2018). Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review. *Water*, 10(11), 1536. <https://doi.org/10.3390/w10111536>.
- Munasinghe, D., Cohen, S., Huang, Y.F., Tsang, Y.P., Zhang, J. & Fang, Z. (2018). Intercomparison of Satellite Remote Sensing-Based Flood Inundation Mapping Techniques. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), 834–846.
- Nalini, S.S. & Pekkat, S. (2017). Development of Flood Inundation Maps and Quantification of Flood Risk in an Urban Catchment of Brahmaputra River. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering* 3(1), A4015001. <https://doi.org/10.1061/AJRU6.0000822>.
- Pekel, J.F., Vancutsem, C., Bastin, L., Clerici, M., Vanbogaert, E., Bartholomé, E. & Defourny, P. (2014). A Near Real-Time Water Surface Detection Method Based on HSV Transformation of MODIS Multi-Spectral Time Series Data. *Remote Sensing of Environment*, 140, 704–716.
- Pena-Regueiro, J., Sebastiá-Frasquet, M.T., Estornell, J. & Aguilar-Maldonado, J.A. (2020). Sentinel-2 Application to the Surface Characterization of Small Water Bodies in Wetlands. *Water*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051487>.
- Pralle, S. (2019). Drawing Lines: FEMA and the Politics of Mapping Flood Zones. *Climatic Change*, 152(2), 227–237. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2287-y>
- Rebelo, L.M., Finlayson, C.M., Strauch, A., Rosenqvist, A., Perennou, C., Tottrup, C., Hilarides, L., Paganini, M., Wielaard, N. & Siegert, F. (2018).

- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Rodríguez González, F., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M. & Bamler, R. (2016). Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220–2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>.
- Yang, C., Xu, Y. & Nebert, D. (2013). Redefining the Possibility of Digital Earth and Geosciences with Spatial Cloud Computing. *International Journal of Digital Earth*, 6(4), 297–312.
- Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N. & Liang, L. (2017). Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening. *Remote Sensing*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/rs9060596>
- Yu, Z., Hao, H., Zhang, W. & Dai, H. (2017). A Classifier Chain Algorithm with K-Means for Multi-Label Classification on Clouds. *Journal of Signal Processing Systems*, 86(2), 337–346.
- Yue, P., Zhou, H., Gong, J. & Hu, L. (2013). Geoprocessing in Cloud Computing Platforms—a Comparative Analysis. *International Journal of Digital Earth*, 6(4), 404–425.
- 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. <https://doi.org/10.3390/su12145784>.
- Zhong, K., Guo, R., Kumar, S., Yan, B., Simcha, D. & Dhillon, I. (2017). Fast Classification with Binary Prototypes. In: *Artificial Intelligence and Statistics*, 1255–1263, PMLR.
- Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z. & Qin, Y. (2017). Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. *Water*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/w9040256>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S. & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for Geo-Big Data Applications: A Meta-Analysis and Systematic Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
- Tang, T., Chen, S., Zhao, M., Huang, W. & Luo, J. (2019). Very Large-Scale Data Classification Based on K-Means Clustering and Multi-Kernel SVM. *Soft Computing*, 23(11), 3793–3801.
- Tellman, B., Sullivan, J.A., Kuhn, C., Kettner, A.J., Doyle, C.S., Brakenridge, G.R., Erickson, T.A. & Slayback, D.A. (2021). Satellite Imaging Reveals Increased Proportion of Population Exposed to Floods. *Nature*, 596(7870), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>.
- Vibhute, A.D. & Gawali, B.W. (2013). Analysis and Modeling of Agricultural Land Use Using Remote Sensing and Geographic Information System: A Review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(3), 81–91.
- Wang, F. (1990). Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(8), 1163–1169.
- Wangchuk, S. & Bolch, T. (2020). Mapping of Glacial Lakes Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data and a Random Forest Classifier: Strengths and Challenges. *Science of Remote Sensing*, 2, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>.
- Xie, H., Luo, X., Xu, X., Tong, X., Jin, Y., Pan, H. & Zhou, B. (2014). New Hyperspectral Difference Water Index for the Extraction of Urban Water Bodies by the Use of Airborne Hyperspectral Images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 085098. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.085098>.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.

© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

