



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آب‌مخزرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مجله تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

## پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه

زینب حزباوی\*<sup>۱</sup>، مرضیه قشمشمی<sup>۲</sup>

۱- دانشجویار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کویرشناسی سمنان، سمنان، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

بر اساس آمار جهانی، سیلاب بر بیش از ۴۰٪ از جمعیت جهان اثرگذار است و سبب خسارت جانی و مالی قابل توجهی می‌شود. در ایران، بیش از ۸۰٪ از شهرها در معرض خطر سیلاب هستند. از این‌رو، سرمایه‌گذاری برای انجام اقدامات پیشگیرانه و فناوری‌های پیشرفته برای مبارزه با سیلاب بیش از هر زمان دیگری ضروری است. آمادگی داشتن و کاهش خطر پیش از رویداد بلافاصله سبب کاهش معنادار هزینه بازسازی پس از آن می‌شود. نقشه‌برداری دقیق و پایش بلندمدت سیلاب نقش مهمی در برنامه‌ریزی و پیشگیری دارد. یکی از ابزارهای کارآمد برای پایش و نقشه‌برداری سیلاب در مدیریت بهینه بلافاصله، استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای است. اگرچه تصویرهای راداری با دیافراگم مصنوعی (SAR) سنتینل-۱ در شرایط ابری برای شناسایی مناطق سیلابی مفید هستند، اما این روش نیز محدودیت‌هایی دارد. حساسیت داده‌های راداری به پوشش گیاهی متراکم و سازه‌های عمودی ممکن است باعث برآورد کم یا زیاد مناطق آب‌گرفته شود. همچنین، شاخص آب تفاضلی بهنجار شده (NDWI)، شاخص آب تفاضلی بهنجار شده اصلاح شده (MNDWI) و شاخص استخراج خودکار آب (AWEI) به‌دست آمده از داده‌های نوری در شرایط ابری یا سایه گیاهان ممکن است خطا داشته باشند و باعث شناسایی ناقص یا اشتباه مناطق سیلابی شوند. از این‌رو، نتایج به‌دست آمده از هر دو روش باید با دقت تفسیر شوند و با ترکیب داده‌های راداری و نوری می‌توان این محدودیت‌ها را کاهش داد، ولی آن‌ها را به‌طور کامل از بین نمی‌برد. از این‌رو، در این پژوهش داده‌های رادار و نوری با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور مرتبط با طیف آب، تحلیل و مقایسه شدند و مناطق سیلابی در آبخیز کرخه در استان خوزستان شناسایی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: [hazbavi.zeinab@gmail.com](mailto:hazbavi.zeinab@gmail.com)

استناد: حزباوی، ز.، قشمشمی، م. ۱۴۰۵. پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۱۰۷-۸۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370814.1635

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۸۴ تا ۱۰۷.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



## مواد و روش‌ها

در آبخیز کرخه در ماه‌های فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۸ سیلاب گسترده و غیرقابل پیش‌بینی رخ می‌دهد که منجر به خسارت قابل توجهی می‌شود. بر این اساس، منطقه‌ای به مساحت  $3838/3$  کیلومترمربع انتخاب شد. در این پژوهش، از سه روش مختلف برای شناسایی و تحلیل آب‌های سطحی ناشی از سیلاب استفاده شد: (۱) در راستای آشکارسازی تغییرات، از داده‌های سه بازه زمانی شامل پیش از فصل کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷)، پس از فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) و هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) استفاده شد. (۲) تصویرهای SAR به‌دست آمده از ماهواره سنتینل-۱ با قطبش‌های VV و VH با استفاده از فیلتر Refined Lee و الگوریتم آستانه Otsu به‌منظور شناسایی پهنه‌های سیلابی، پردازش شدند. (۳) برای استخراج دقیق‌تر آب‌های سطحی از تصویرهای نوری، شاخص‌های طیفی آب شامل NDWI، MNDWI و AWEI به‌دست آمده از ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. شایان ذکر است که AWEI در دو نسخه بدون سایه برای مناطق باز و با سایه برای کاهش اثر سایه در نواحی شهری و کوهستانی وجود داشت که در این پژوهش از نسخه بدون سایه استفاده شد. در پایان، با تلفیق نتایج به‌دست آمده از روش‌های راداری و نوری و تحلیل تغییرات چندزمانه، نقشه‌های جامعی از گسترش سیلاب تولید و اعتبارسنجی شد.

## نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد عملکرد قطبش VH با اندازه ۲۵۴ کیلومترمربع در تشخیص مناطق سیلابی کمی بهتر از قطبش VV با اندازه ۲۵۲ کیلومترمربع بود. با یک روش ترکیبی و استفاده از هر دو قطبش و فقط با انتخاب مناطقی با پراکندگی بازگشتی کم در هر دو قطبش، ۲۳۹ کیلومترمربع از مناطق سیلابی، شناسایی شد. ترکیب قطبش‌ها دقت و قابلیت اطمینان نقشه‌برداری سیلاب را بهبود بخشید و به‌دلیل حساس نبودن رادار به پوشش ابر و شرایط روشنایی، نسبت به داده‌های نوری، برتری داشت. نتایج تجزیه و تحلیل زمانی آب‌های دائمی و موقت در روش ترکیبی (VV+VH) در سه دوره نشان داد که پوشش آب پیش از فعالیت‌های کشاورزی زیاد (۱۵۶۰ کیلومترمربع) بود، در اواخر زمستان به اندازه ۸۴۷ کیلومترمربع کاهش یافت. سپس، در طول رویداد سیلاب به تقریباً ۹۷۴ کیلومترمربع افزایش یافت. با وجود آب کمتر در مقایسه با دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی، سیلاب گسترده‌ای به‌دلیل بارندگی شدید، ناگهانی و ظرفیت محدود زمین و زیرساخت‌ها رخ داد. با استفاده از MNDWI با اندازه ۲۲۷ کیلومترمربع بیشترین مساحت پوشیده از آب، شناسایی شد. در حالی که با استفاده از AWEI، با اندازه ۱۲۶ کیلومترمربع با رویکردی محافظه‌کارانه‌تر، فقط مناطق با احتمال بسیار زیاد وجود آب‌های سطحی، شناسایی شد. با ترکیب هر سه شاخص طیفی، مساحتی معادل ۶۲ کیلومترمربع به‌عنوان مناطق مستعد سیلاب، شناسایی شد. تغییرات میان شاخص‌ها به‌دلیل تفاوت در باندهای طیفی و حساسیت به وجود آب است. نتایج تحلیل NDWI، MNDWI و AWEI، نشان داد تغییرات گستردگی آب دائمی و موقت در طول سیلاب قابل توجه بود به‌طوری که از ۹۸ کیلومترمربع به ۳۲۴ کیلومترمربع افزایش یافت. روش آستانه‌گذاری Otsu به‌طور مؤثر برای استانداردسازی و طبقه‌بندی مناطق آبی در میان شاخص‌ها به‌کار گرفته شد.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق داده‌های راداری و نوری منجر به شناسایی ۵۸ کیلومترمربع از مناطق سیلابی شد و میان نتایج دو ماهواره ۳۹٪ هم‌پوشانی بود. استفاده از این تلفیق، سبب افزایش چشم‌گیر دقت و قابلیت اطمینان شناسایی مناطق سیلابی شد. از آنجایی که تغییرات در گستره آب فقط نشان‌دهنده رویداد یا شدت سیلاب نیست و بیانگر آن است که عامل‌های آب‌شناختی و مدیریتی نقش مهمتری در رویداد سیلاب دارند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود به‌منظور توسعه سامانه‌های هشدار اولیه و برنامه‌ریزی مدیریت بحران، از داده‌های ترکیبی همراه با تجزیه و تحلیل عامل‌های محیطی، استفاده شود. افزون بر این، با بهره‌گیری از این روش امکان پهنه‌بندی دوره‌ای از

سیلاب فراهم شده است که پیشنهاد می‌شود در توسعه اقدام‌های پیشگیرانه، مدیریت بهینه سیلاب و برنامه‌ریزی کشاورزی از آن استفاده شود.

## واژگان کلیدی

الگوریتم Otsu، پهنه‌بندی سیل، تصویرهای SAR، شاخص‌های سنجش از دور، مدیریت سیل

### مقدمه

توسعه به‌شدت تأثیر می‌گذارد. از دلایل مهم این رویداد، آسیب‌پذیری بسیار زیاد ناشی از کمبود مسکن و زیرساخت‌ها، وجود سامانه‌های هشداردهی ناکارآمد، کمبود بودجه و آمادگی نداشتن است (بورا و همکاران ۲۰۱۸). نیاز روز افزون به تأمین مسکن به‌دلیل افزایش جمعیت، مهاجرت به شهرها و گسترش شهرنشینی، به‌طور پیوسته دامنه اثرگذاری و نابودکنندگی بلایای طبیعی را تشدید می‌کنند. افراد غالباً در مناطقی مستقر می‌شوند که بسیار مستعد خطر است، که این موضوع آسیب‌پذیری آن‌ها را افزایش داده و بر کارایی اقدامات لازم برای آمادگی و کاهش خطر اثرگذار است (کونامی و همکاران ۲۰۲۱؛ کرونگتائو و همکاران ۲۰۲۱). سنجش از دور<sup>۱</sup> یک روش کارآمد برای جمع‌آوری داده‌ها در زمینه‌های مختلف و مهم، مانند برنامه‌ریزی شهری، ارزیابی خطر و کاهش خطرات بلایای طبیعی، تاب‌آوری بوم‌سازگان (الهداد و همکاران ۲۰۲۴) و تغییر جهانی اقلیم (تران و لاکشمی ۲۰۲۴) است. رویکردهای سنجش از دور در مقایسه با روش‌های سنتی ارزیابی سیلاب، کارایی و سرعت بیشتر و هزینه کمتر دارند (غفاریان و همکاران ۲۰۱۸). ماهواره‌های پرشمار زمین (EO)<sup>۲</sup> حجم گسترده‌ای از داده‌های سنجش از دور را جمع‌آوری می‌کنند که این موضوع امکان تهیه نقشه و پایش بلادرنگ غرقاب‌شدگی آب را فراهم می‌آورد (پاریدا و همکاران ۲۰۲۲). داده‌های ماهواره‌ای ابزار کارآمدی برای ارزیابی و بررسی شرایط پیش، هنگام و بعد از رویداد سیلاب است. این داده‌ها برای تعیین گستردگی و شدت سیلاب به‌کاربرده می‌شوند. برای تهیه نقشه

رویدادهای حدی، از جمله سیل، به‌دلیل تغییرات سریع در شرایط آب و هوایی و اقلیمی، روزبه‌روز شدیدتر و پرتکرارتر می‌شوند. این پدیده‌ها همراه با تهدیدهای جدی برای زندگی انسان‌ها و زیرساخت‌های موجود، باعث بروز مشکلات فراوانی شده‌اند (رایکس و همکاران ۲۰۱۹). پدیده سیل، به‌طور پیوسته جوامع و اقتصادها را درگیر مشکلات کرده و توجه جهانی را به خود جلب کرده است. زیرا، پیامدهای آن هم در کشورهای توسعه‌یافته و هم در کشورهای در حال توسعه احساس می‌شود (اچندو ۲۰۲۳). هر سال، سیلاب اثرات وحشتناکی بر زندگی میلیون‌ها نفر می‌گذارد و به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی شناخته می‌شود که بیشترین خطر را برای جان انسان‌ها در سراسر جهان به‌همراه دارد (آنوشا و بهاراتی ۲۰۲۰). سیلاب همراه با بارش‌های شدید و بلندمدت سبب جریان یافتن حجم زیادی از آب به سمت پایین‌دست شده و بر منطقه مد نظر اثرات بلندمدتی به‌جای می‌گذارد (رحمان و تاکور ۲۰۱۸). امروزه، با افزایش تغییرات اقلیمی، پذیرفته شده است که خطر سیلاب کاهش نخواهد یافت؛ بلکه انتظار می‌رود سیلاب نه اندازه شایع‌تر، بلکه شدیدتر شود و به‌عنوان تهدیدی جدی برای مناطق مختلف جهان باقی بماند (تاوارس و همکاران ۲۰۱۹).

کشور ایران در بسیاری از مناطق به‌واسطه شرایط اقلیمی، پستی‌بلندی و زمین‌ریخت‌شناسی آسیب‌پذیر، همه‌ساله در معرض خطر بلایای طبیعی است، به‌طوری که بیش از ۸۰٪ مساحت شهرهای ایران در معرض رویداد سیلاب است (امینی و همکاران ۲۰۲۲). در گذشته سیل‌های ویرانگر یک‌بار در هر صد سال رخ می‌دادند، اما اکنون هر ساله بر کشورهای در حال

1- Remote Sensing  
2- Earth Observation

دقیق سیلاب و پایش آن، پژوهشگران پرشماری ظرفیت مجموعه‌های داده‌ای و رویکردهای مختلف سنجش از دور را بررسی کرده‌اند (گائو و همکاران ۲۰۱۸). پوشش مکانی و زمانی بهبودیافته که به‌وسیله نسل جدید ماهواره‌های مشاهده زمین ارائه شده‌اند، به‌طور قابل توجهی ظرفیت تهیه نقشه و پایش سیلاب را افزایش داده‌اند (کومار ۲۰۱۹). استفاده از الگوریتم‌های کارآمد برای تهیه نقشه سیل، ضروری است (بوکور و همکاران ۲۰۱۸). یکی از چالش‌های اصلی در پایش مناطق سیلابی با استفاده از روش‌های سنجش از دور نوری، حساسیت زیاد این روش به شرایط نامساعد آب و هوایی است (سیان و همکاران ۲۰۱۸). وجود ابرها و کمبود نور خورشید موجب محدود شدن بازیابی داده‌ها در طول موج‌های مرئی و نزدیک به مادون قرمز می‌شود (عطارچی ۲۰۱۹). داده‌های مایکروویو، به‌ویژه داده‌های رادار با آنتن ترکیبی (SAR) <sup>۳</sup> افزون بر داده‌های نوری، به‌طور معمول برای تهیه نقشه مناطق سیلابی استفاده می‌شوند (دومنگتی و همکاران ۲۰۱۹). به‌رغم حسگرهای نوری که به انرژی الکترومغناطیسی خورشیدی وابسته‌اند، رادار با آنتن ترکیبی SAR از انرژی خود برای ارسال یک پیام استفاده می‌کند و پراکنش بازتابی از اشیاء سطح زمین را دریافت می‌کند (کوی و همکاران ۲۰۲۰)، که این ویژگی کمک زیادی به پایش مؤثر رویدادهای سیلاب می‌کند. اگرچه تصویرهای SAR سنتینل-۱ در شرایط ابری برای شناسایی مناطق سیلابی مفید است. اما، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد. برای مثال، برزنیک و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند سنجه‌های سنجنده مانند قطبش و زاویه دید، در کنار ویژگی‌های سطح زمین، به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی متراکم، موجب دشواری شناسایی دقیق مناطق آب‌گرفته و در نتیجه، برآورد کم یا زیاد گستردگی سیلاب به‌وسیله داده‌های سنتینل-۱ شد. هم‌چنین، آمیترانو و همکاران (۲۰۲۴) دریافتند که بازتاب‌های پیچیده ناشی از پوشش گیاهی و مناطق شهری، دقت

استخراج نواحی آب‌گرفته را کاهش داد. تصویرهای ماهواره‌ای گستردگی سیلاب را در مناطق جغرافیایی پهناور (مناطق غیرقابل دسترس) در فاصله‌های زمانی منظم تعیین می‌کنند (بهات و راثو ۲۰۱۶). افزون بر این، مناطق غرقاب‌شده اغلب به‌دلیل داشتن سطحی آرام و زمینه آبی، سبب بازتاب کمتر به ماهواره‌ها می‌شوند. در نتیجه، بخش‌های سیلابی در تصویرهای راداری در مقایسه با دیگر مناطق خشک به‌شکل تیره‌تر قابل مشاهده‌اند (آمارنات و راجا ۲۰۱۶). این ویژگی‌های رادار با آنتن ترکیبی SAR به‌طور قابل توجهی در تهیه نقشه‌های گستردگی سیلاب و انجام اندازه‌گیری‌های دقیق از رودها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها مؤثر است (اوهکی و همکاران ۲۰۱۶). به‌طور معمول، تصویرهای SAR با قطبش‌های (VV) <sup>۴</sup> و (VH) <sup>۵</sup> برای پایش سیلاب استفاده می‌شوند و کاربرد این تصویرها در تهیه نقشه غرقاب‌شدگی بررسی می‌شود (آگنیهورتری و همکاران ۲۰۱۹). تصویرهای SAR ماهواره (سنتینل-۱) <sup>۶</sup> در تهیه نقشه‌های سیلاب اولویت دارند. زیرا، بلافاصله پس از جمع‌آوری داده‌ها به راحتی با شبکه در دسترس هستند و مشاهده‌های نسبتاً منظمی ارائه می‌دهند (اودین و همکاران ۲۰۲۱). از سوی دیگر، استفاده از تصویرهای سنتینل-۱ برای مقایسه وضعیت پیش و بعد از رویداد سیل، و تهیه نقشه تغییرات با تحلیل این دو تصویر، یکی از روش‌های پرکاربرد و مطرح در زمینه استخراج محدوده‌های تحت تأثیر سیلاب به‌شمار می‌آید (دودانگه و همکاران ۲۰۲۱).

در مقایسه با روش‌های سنتی که مستلزم دریافت و پردازش داده‌های سنتینل-۱ بر دستگاه‌های محلی است، استفاده از فناوری‌های مبتنی بر محاسبات ابری مانند گوگل‌ارث‌انجین (GEE) <sup>۷</sup> تحولی شگرف در دسترسی و تحلیل داده‌ها به‌وجود آورده است (گورلیک و همکاران ۲۰۱۷). هم‌چنین، تصویرهای لندست <sup>۸</sup>

4- Vertical Transmit, Vertical Receive

5- Vertical Transmit, Vertical-Horizontal

6- Sentinel-1

7- Google Earth Engine

8- Landsat

3- Synthetic Aperture Radar

تغییر، امکان استخراج سطوح آبی را فراهم آورده است و می‌توان همزمان تداخل ناشی از مناطق شهری توسعه‌یافته را کاهش داد. قابل توجه است که برخی ویژگی‌های شهری (مانند سایه‌ها، جاده‌ها و دیگر اشیاء تیره) باعث می‌شوند تا MNDWI و NDWI برای تشخیص دقیق توده‌های آبی در تصویرهای شهری با وضوح زیاد که بازتاب‌های قوی در این دو شاخص تولید می‌کنند، مناسب نباشند (اوزون ۲۰۲۴). با شاخص استخراج خودکار آب AWEI به‌عنوان یک روش جدید، اندازه‌آستانه اطمینان و ثابتی برای استخراج آب ارائه شد. هدف اصلی توسعه AWEI بهینه‌سازی تفکیک‌پذیری پیکسل‌های آبی و غیرآبی با تفاوت باندها، جمع‌بندی و استفاده از ضریب‌های مختلف بود (فیسو و همکاران ۲۰۱۴). روش‌های آستانه‌گذاری مختلفی از جمله آستانه‌گذاری دستی و روش‌های خودکار برای جداسازی سطوح آبی از عناصر دیگر وجود دارد (بیلماز ۲۰۲۳). در میان روش‌های تقسیم‌بندی آستانه خودکار، الگوریتم Otsu<sup>۹</sup> یکی از قوی‌ترین و محبوب‌ترین‌ها است (محمدی‌آذر و همکاران ۲۰۲۴). الگوریتم آستانه‌گذاری Otsu با شناسایی بیشترین پراکنش میان طبقه‌ها در هیستوگرام داده‌ها، آستانه پویا را به‌طور خودکار تعیین می‌کند (ساری و همکاران ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران ۲۰۲۳). این کار با بیشینه‌سازی پراکنش میان‌گروهی و کمینه‌سازی پراکنش درون‌گروهی میان پیکسل‌های پیش‌زمینه و پس‌زمینه انجام می‌شود (اوتسو ۱۹۷۹). روش Otsu محدودیت آستانه یکنواخت در الگوریتم‌های سنتی را برطرف می‌کند (ژانگ و همکاران ۲۰۲۱).

در مجموع، می‌توان گفت تهیه نقشه سریع سیلاب بر پایه فناوری ابری نیازمند ویژگی‌های خاصی از جمله دسترسی آسان و رایگان به داده‌ها، کارایی و دقت زیاد در تحلیل‌ها، و نیز سهولت استفاده برای تصمیم‌گیران و سودبران است. وجود چنین ویژگی‌هایی می‌تواند به‌طور قابل توجهی سرعت و دقت پاسخ‌گویی به بلایای طبیعی مثل سیلاب را بهبود بخشد. بر این اساس، در این پژوهش، از سامانه ابری GEE،

به‌طور گسترده در بستر GEE استفاده می‌شوند؛ ماهواره‌های لندست برای بیش از ۵۰ سال داده‌های ضروری فراهم آورده‌اند. کاربران می‌توانند با استفاده از فناوری‌های سنجنش از دور، سطوح آبی را به‌طور دقیق شناسایی کنند (چن و همکاران ۲۰۲۴). زیرساخت محاسباتی GEE با بهره‌گیری از پردازش موازی، کارایی فرآیند تحلیل داده‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. این قابلیت هم اندازه فرآیند پردازش را سریع‌تر کرده و هم برای کاربران امکان استفاده از روش‌ها و ابزارهای مختلف برای تحلیل داده‌ها را فراهم آورده است (کومار و موتانگا ۲۰۱۸). همچنین، برنامه‌ریزان می‌توانند ظرفیت مناطق پرخطر را به‌طور سریع ارزیابی کنند. این ابزار محیطی فراهم آورده که در آن غالب اطلاعات جهانی از قبیل بارندگی، دما، تبخیر-تعرق، جمعیت، کاربری زمین و مدل رقومی ارتفاع زمین به‌شکل پردازش‌شده و آماده، قابل استفاده برای عموم است (تمیمی‌نیا و همکاران ۲۰۲۰).

شاخص‌های استخراج طیفی توده‌های آبی مانند شاخص آبی بهنجار شده (NDWI)؛ شاخص آبی بهنجار شده اصلاح شده (MNDWI)؛ و شاخص استخراج خودکار آب (AWEI)<sup>۱۱</sup> به‌طور معمول برای تعیین دقیق مساحت سطح توده‌های آبی استفاده می‌شوند. باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک (NIR)<sup>۱۲</sup> برای تعیین ویژگی‌های آب و محاسبه NDWI به‌کار می‌روند (مک‌فیتز ۱۹۹۶). با این حال، با بهره‌گیری از NDWI نمی‌توان تداخل ناشی از مناطق شهری تیره‌ای که با توده‌های آبی ترکیب شده‌اند را به‌طور کامل حذف کرد. معمولاً، با استفاده از یک شاخص آبی می‌توان فقط یک نوع از اشیاء مداخله‌گر را برطرف کرد. برای حل این مشکل، نسخه اصلاح‌شده‌ای از NDWI پیشنهاد شد (ژو ۲۰۰۶). در این نسخه، باند مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR)<sup>۱۳</sup> به‌جای باند مادون قرمز نزدیک NIR استفاده شده در NDWI به‌کار گرفته شده است. این

- 
- 9- Normalized Difference Water Index  
 10- Modified Normalized Difference Water Index  
 11- Automated Water Extraction Index  
 12- Near-Infrared  
 13- Short-Wave Infrared

---

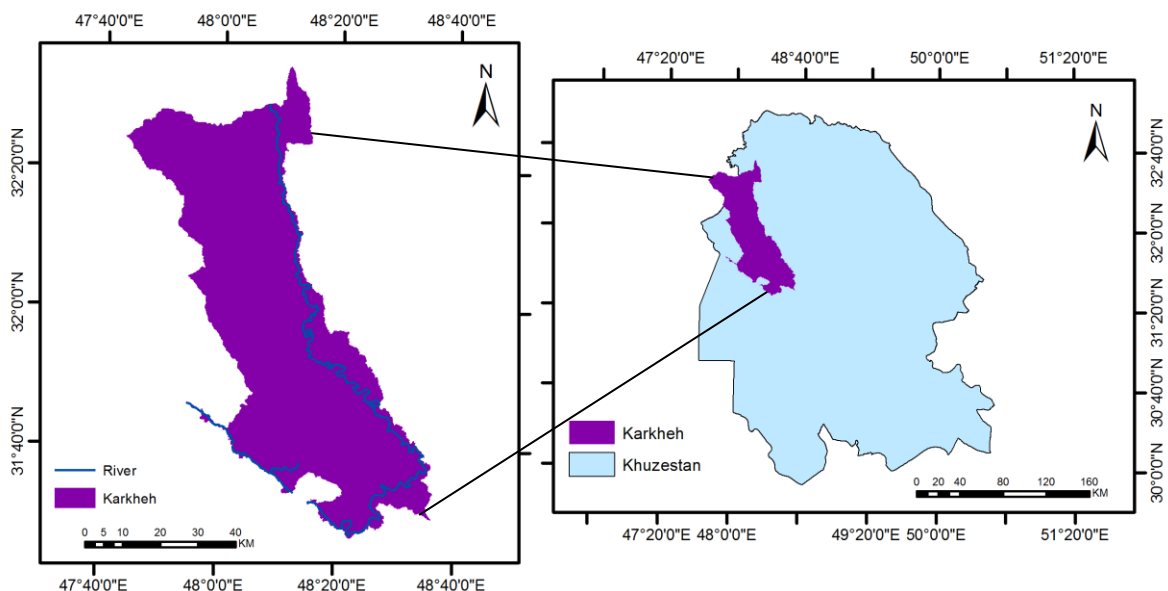
14- Otsu threshold

## مواد و روش‌ها

## معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز کرخه در جنوب غربی کشور و شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان میان ۳۱ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ است (شکل ۱). مساحت آن ۳۸۳۸/۳ کیلومتر مربع است. این آبخیز از شمال تا شمال غربی با شهرستان شوش، از شمال شرقی با شهرستان دزفول، از غرب با شهرستان دشت آزادگان، از شرق با شهرستان شوشتر و از جنوب با شهرستان‌های اهواز و حمیدیه همسایه است.

داده‌های نوری سنتینل-۲ و داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ برای پهنه‌بندی سیلاب در آبخیز کرخه استفاده شد. دیگر اهداف این پژوهش شامل تحلیل و مقایسه ترکیب‌های مختلف قطبش VH و VV و یافتن قطبش بهینه برای تمایز مناطق آبی و غیرآبی، اعتبارسنجی نقشه‌های غرقاب‌شدگی سیلاب با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI که از تصویرهای نوری ماهواره سنتینل-۲ استخراج شده‌اند، بود. سرانجام داده‌های راداری و نوری به منظور تشخیص دقیق‌تر مناطق سیلابی با یکدیگر تلفیق شدند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته پردازش تصویر و ترکیب داده‌های ترکیبی راداری و نوری، می‌توان برای مدیریت بهتر مخاطره‌های طبیعی نظیر سیلاب گام موثری برداشت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز کرخه در استان خوزستان.

Figure 1- Geographical location of Karkheh watershed in the Khuzestan Province.

سنتینل-۱ شامل دو ماهواره مدار قطبی راداری است که در محدوده باند C تصویربرداری می‌کند و در سه سطح ۰، ۱ و ۲ ارائه می‌شوند. سطح ۱ در دو نوع SLC<sup>۱۵</sup> و GRD<sup>۱۶</sup> است و در چهار حالت مختلف

## روش پژوهش

تصویرهای ماهواره سنتینل-۱ با قدرت مکانی ۱۰ متر و تصویرهای ماهواره سنتینل-۲ با قدرت مکانی ۱۰ و ۲۰ متر (باقری‌هارونی و همکاران ۲۰۲۲)، برای تهیه نقشه‌های سیلاب در آبخیز کرخه استفاده شد.

15- Single Look Complex  
16- Ground Range Detected

به‌دست آمده از این قطبی‌سازی تفسیر شد. سپس، حالتی به‌عنوان بهینه انتخاب شد که در آن اندازه‌های بازتاب مربوط به سطوح آبی به‌خوبی از سطوح غیرآبی متمایز شده بودند (اتچیوت و همکاران ۲۰۲۳).

برای تهیه نقشه شاخص‌های طیفی آب و اعتبارسنجی نقشه‌های سیلاب (اتچیوت و همکاران ۲۰۲۳) دو بازه زمانی پایان فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) و هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸)، استفاده شد. داده‌های سنتینل-۲ برای سال ۲۰۱۸ در بازه زمانی مد نظر در دسترس نبود، به‌ناچار از نزدیک‌ترین بازه زمانی در سال ۲۰۱۹ (۲۸ فوریه تا ۲۵ مارس) به‌عنوان دوره پیش از سیلاب استفاده شد (جدول ۲). در این مرحله از کار از فیلتر ابر استفاده شد و برای بهبود کیفیت داده‌ها، اندازه تصاویری با درصد پوشش ابری کمتر از ۲۰٪ انتخاب شد (پفلوم و همکاران ۲۰۲۵).

برای محاسبه شاخص‌های سنجش از دور، از روش ریاضی استفاده شد تا داده‌های طیفی به‌دست آمده از دو یا چند باند را به گونه‌ای تبدیل کند که پیکسل‌هایی با اندازه‌های طیفی مشابه در یک بازه خاص به‌شکل چشمی برجسته شوند. این موضوع باعث شد تا به ویژگی‌های جغرافیایی خاص توجه ویژه شود. الگوی هر نوع پوشش زمین و نیز پاسخ طیفی ویژگی‌های مشخص، پایه و اساس تعریف یک شاخص را تشکیل می‌دهند (بوهناش و همکاران ۲۰۱۹). بررسی ویژگی‌های طیفی عناصر مختلف، نشان‌دهنده اهمیت باندهای منفرد در شناسایی و تفکیک پوشش‌های سطح زمین است. به‌طور ویژه، آب در نواحی طیفی مرئی با بازتاب زیاد و در باندهای مادون قرمز نزدیک NIR و مادون قرمز کوتاه‌موج SWIR با بازتاب بسیار کم است. در باند NIR، اندازه بازتاب آب حتی کمتر از باند قرمز گزارش شده است. به‌جز در شرایطی مانند آب‌های گل‌آلود، که آب به‌طور معمول پرتوهای NIR و SWIR را جذب می‌کند.

(SM) ۱٪، (IW) ۱/۴، (EW) ۱/۹ و (WV) ۲۰ قابل دسترسی است. به‌جز از حالت WV که به‌شکل تک قطبی است، محصول دیگر حالت‌ها به دو شکل تک قطبی (VV, HH) و دو قطبی (HH+HV) یا (VV+VH) موجود است (امینی و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، برای شناسایی مناطق سیلابی از دو تصویر سنتینل رادار با قالب GRD و حالت IW و مسیر نزولی اِبا قطبش‌های VV و VH و ترکیب دو قطبش (VH+VV) استفاده شد (جدول ۱). دوره‌های زمانی استفاده‌شده شامل (۱) پیش از فعالیت‌های کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) با هدف ارزیابی شرایط پایه و وضعیت منابع آب منطقه پیش از آغاز فعالیت‌های کشاورزی، (۲) پایان فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) برای بررسی تغییرات آب منطقه در دوره‌ای که مصرف آب کشاورزی افزایش می‌یابد و برای شناسایی نقاط حساس به سیلاب و (۳) هنگام رویداد سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) برای تحلیل دقیق اندازه و گستره سیلاب و شرایط واقعی منطقه در زمان رویداد سیلاب، بود. این نوع تفکیک زمانی، امکان مقایسه دقیق‌تری میان تغییرات ناشی از سیلاب و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی را فراهم آورد.

در قطبی‌سازی VH، انتقال بازتاب به‌شکل عمودی و بازگشت آن به‌شکل افقی انجام می‌شود که منجر به پاسخ‌های قوی‌تری در مناطقی با پراکندگی حجمی می‌شود. از سوی دیگر، در قطبی‌سازی VV، هر دو انتقال و بازگشت بازتاب به‌شکل عمودی انجام می‌شود که باعث ایجاد پاسخ‌های بیشتر در مناطقی که پراکندگی آینه‌ای دارند، می‌شود (منجوسری و همکاران ۲۰۱۲). در این پژوهش، از قطبی‌سازی‌های VH و VV داده‌های راداری SAR استفاده شد تا چگونگی استفاده از این داده‌ها را در پهنه‌بندی سیلاب در آبخیز کرخه را بررسی کند. اندازه‌های بازتاب

- 
- 17- StripMap mode
  - 18- Interferometric Wide Swath mode
  - 19- Extra Wide Swath mode
  - 20- Wave mode
  - 21- Descending

جدول ۱- مشخصات تصاویرهای سنتینل-۱ استفاده شده برای پهنه‌بندی سیل.

Table 1- Characteristics of Sentinel-1 images used for flood zoning.

No.	Time period	Gregorian calendar	Solar calendar	Data type	Beam mode	Direction of sensor movement	Polarization
1	Pre-agriculture season	2018.09.28- 2018.10.25	1397.07.06- 1397.08.03	Ground range detected (GRD)	Interferometric wide swath (IW)	Descending	Vertical transmit-vertical receive (VV), Vertical transmit-horizontal receive (VH)
2	Post-agriculture season	2019.02.28- 2019.03.25	1397.12.09 1398.01.05				
3	During the flood	2019.03.28- 2019.04.25	1398.01.08 1398.02.05				

جدول ۲- مشخصات تصاویرهای سنتینل-۲.

Table 2- Sentinel-2 image specifications.

No.	Time period	Gregorian calendar	Solar calendar	Data type	Sensor	Used spectral bands
1	Post-agriculture season	2019.02.28- 2019.03.25	1397.12.09 1398.01.05	Surface reflectance (SR)	Multispectral Imager (MSI)	B3, B8, B11, B12
2	During the flood	2019.03.28- 2019.04.25	1398.01.08 1398.02.05			

(۱۹۹۶)، MNDWI (ژو ۲۰۰۶) و AWEI (فیسو و همکاران ۲۰۱۴) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۳ محاسبه شدند.

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

$$MNDWI = \frac{\text{Green} - \text{SWIR}}{\text{Green} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

$$AWEI = 4(\text{Green} - \text{SWIR1}) - (0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR2}) \quad (3)$$

برای محاسبه شاخص‌های آب از داده‌های نوری سنجنده سنتینل-۲ (محصول سطح بازتاب تصحیح شده جوی S2\_SR) استفاده شد. در شاخص NDWI از باند سبز GREEN (B3) و باند فرورسرخ نزدیک NIR (B8) استفاده شد. در شاخص MNDWI از باندهای سبز GREEN (B3) و فرورسرخ کوتاه ۱ SWIR1 (B11) استفاده شد و در شاخص AWEI از باند سبز GREEN (B3)، فرورسرخ نزدیک NIR (B8)، فرورسرخ کوتاه ۱ SWIR1 (B11) و فرورسرخ کوتاه ۲ SWIR2 (B12) استفاده شد.

این ویژگی موجب ایجاد تضاد زیاد میان باندهای مادون قرمز نزدیک NIR و سبز، و نیز مادون قرمز کوتاه موج SWIR و سبز می‌شود (راجندایران و کومار ۲۰۲۳).

این تغییرات بازتابی به وسیله شاخص‌های طیفی، از جمله شاخص آبی بهنجار شده NDWI، در بررسی‌های مختلف گزارش شده است. به بیان دیگر، این شاخص در تفکیک آب از زمین‌های ساخته شده و پوشش گیاهی مرطوب دقت کمتری دارد و در برخی شرایط پوشش زمین و نوردهی، خطای بیشتری دارد (آلبرتینی و همکاران ۲۰۲۲). شاخص آبی بهنجار شده اصلاح شده MNDWI و شاخص آبی بهبود یافته AWEI نسخه فاقد سایه برای تمایز میان پیکسل‌های حاوی آب و پیکسل‌های فاقد آب استفاده می‌شوند. از آنجایی که اشیاء ناهمگن مانند سایه‌های کوهستان، ابرها با ضخامت کم و سایه‌های ساختمان در برخی باندها انعکاس مشابه آب دارند (خالد و همکاران ۲۰۲۱؛ گونن و آتاسور ۲۰۲۴)، شاخص‌های طیفی آب مختلف استفاده شد که هر یک به منظور تفکیک دقیق‌تر مناطق آبی به کار رفته‌اند. در این پژوهش، شاخص‌های طیفی NDWI (مک‌فیترز

مجموعه داده‌های (آب‌های سطحی جهانی JRC) آتچدا شد (پیمان‌خواه و همکاران ۲۰۲۳). کلیه مراحل پردازش داده‌ها با کدنویسی در محیط GEE انجام شد. در این کدها، مراحل بارگذاری تصاویر، فیلتر زمانی و مکانی، اعمال فیلتر Refined Lee بر داده‌های سنتینل-۱، محاسبه شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI از داده‌های سنتینل-۲، و تعیین آستانه با روش Otsu پیاده‌سازی شد. همچنین، از توابع داخلی GEE برای ترکیب نتایج راداری و نوری و تولید نقشه نهایی سیلاب استفاده شد.

### نتایج و بحث

تصویرهای منطقه سیلابی با قطبش‌های VV و VH بعد از اعمال فیلتر Refined Lee و بدون تعیین آستانه به شکل جداگانه استخراج شدند که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این نقشه‌ها نشان‌دهنده تغییرات آب در سه دوره متفاوت بودند اما نقشه نهایی مناطق سیلابی نبودند. بر اساس قطبش VV، شکل ۲ (a) در محدوده پیش از کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) در دو رنگ که مناطق با بازتاب کمتر به رنگ سبز، آب یا سطوح صاف و رنگ فیروزه‌ای، نشان‌دهنده زمین‌های خشک یا زیرساخت‌ها است. شکل ۲ (b) در محدوده بعد فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) در دو رنگ که رنگ زرد، آب و سطوح صاف و رنگ سبز ملایم، نشان‌دهنده مناطق خشکی است. شکل ۲ (c) در محدوده هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) در دو رنگ که رنگ زرد نشان‌دهنده مناطقی است که بازگشت راداری در آنها پس از سیلاب کاهش یافته است (این مناطق آب هستند)؛ همچنین می‌تواند نشان‌دهنده مناطقی باشد که رطوبت خاک در آنها افزایش یافته است. رنگ مشکی نشان‌دهنده مناطقی است که بازگشت راداری در آنها افزایش یافته است. نتایج به دست آمده می‌تواند با تغییرات رطوبت خاک یا خشک شدن مناطق آب‌گرفته، تغییرات پوشش گیاهی یا کاربری زمین مرتبط باشد. پیشنهاد

برای استخراج نقشه دقیق سیل، نیاز به آستانه‌گذاری و فیلترگذاری بود. نویز لکه‌ای<sup>۲۲</sup> معمولاً ناشی از تداخل امواج الکترومغناطیسی است، به شکل الگوهای نامنظم و دانه‌ای در تصویرهای SAR ظاهر شد. این نویز باعث کاهش قدرت تفکیک رادیومتریک تصویرهای SAR می‌شود (آرجنتی و همکاران ۲۰۱۳) و تفسیر آن‌ها را دشوار می‌سازد. برای غلبه بر این مشکل، از روش‌های فیلتر لکه استفاده شد که الگوریتم Refined Lee یکی از بهترین این روش‌ها به شمار می‌آید (سینگ و سینگ‌راوات ۲۰۲۴) که با حفظ لبه‌ها و جزئیات، لکه‌ها را حذف می‌کند. برای کاهش نویز لکه‌ای در تصویرهای راداری از این فیلتر استفاده شد. نتایج به دست آمده، پس از پیش‌پردازش و فیلتر Refined Lee، با استفاده از روش آستانه‌گذاری Otsu به منظور تفکیک مناطق سیلابی از دیگر عارضه‌ها، تحلیل شدند. آستانه‌گذاری Otsu روش نوبویوکی Otsu بهترین رویکرد برای تعیین آستانه در بخش‌بندی تصویر است (یو و همکاران ۲۰۲۳). ایده اصلی این روش استفاده از بیشترین اندازه پراکنش میان خوشه‌ها برای جدا کردن شیء هدف از پس‌زمینه پس از انتخاب یک آستانه مناسب است (هو و وانگ ۲۰۲۲). روش آستانه‌گذاری Otsu با کمینه‌سازی پراکنش درون طبقه‌ای و بیشینه‌سازی پراکنش میان طبقه‌ای، تصویر را به دو بخش (آب و غیرآب) تقسیم می‌کند به گونه‌ای که تفاوت میان این دو طبقه بیشترین اندازه ممکن باشد و اندازه آستانه بهینه را به شکل خودکار تعیین می‌کند که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (کیم و همکاران ۲۰۱۳).

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (4)$$

آستانه بهینه با روش Otsu روی تصویرهای مربوط به راداری و شاخص‌های طیفی آب NDWI، MNDWI و AWEI اعمال می‌شود. برای حذف آب‌های دائمی از نقشه نهایی سیل، توده‌های آبی دائمی با استفاده از

جدول ۳- مساحت پهنه آبی به دست آمده از ترکیب دو قطبش VV و VH در سه بازه زمانی مختلف.

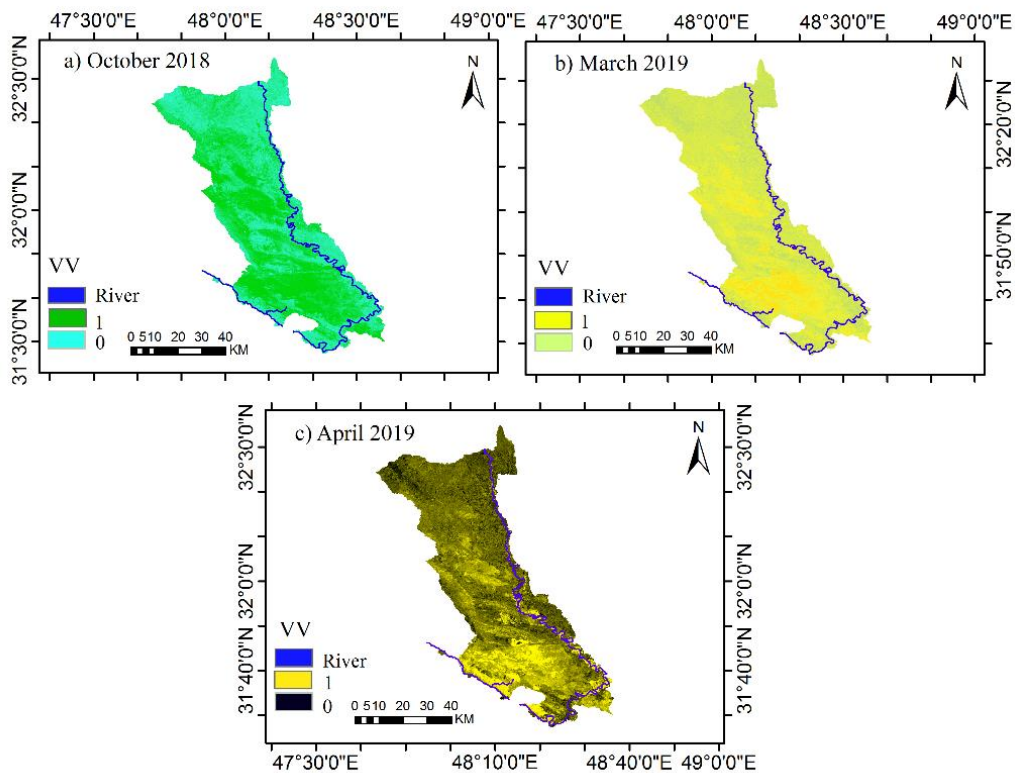
**Table 3- Area of water bodies extracted from a combination of VV and VH polarization in three different time periods.**

Time period	Flooded area (km <sup>2</sup> )	Flooded area (%)
Pre-agriculture season	1560	40.7
Post-agriculture season	847	22.07
During the flood	974	25.37

در دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی، مساحت آب منطقه ۱۵۶۰ کیلومترمربع ثبت شده است که احتمالاً دلیل آن بارندگی‌های پیشین یا سطح بالای آب پشت سد یا رود است. اما در اسفند به دلیل فعالیت‌های کشاورزی، تبخیر، کاهش بارش یا مدیریت منابع آب، سطح آب به اندازه ۸۴۷ کیلومترمربع کاهش یافت. دوباره در دوره هنگام سیل، سطح آب تا حد ۹۷۴ کیلومترمربع افزایش یافت که به احتمال زیاد ناشی از پر شدن رودها و سدها پس از بارش شدید است. نتایج نشان داد به رغم اینکه مساحت آب در دوره سیلاب کمتر از دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی بود، اما باز هم پدیده سیلاب به شکل گسترده رخ داد. این یافته دلایل متفاوتی دارد. در پاییز (پیش از فعالیت‌های کشاورزی)، افزایش آب به شکل تدریجی و پایدار رخ داده و ذخیره‌سازی در سدها و رودها انجام شده است. از سوی دیگر، بارش‌های سیل‌آسا در فروردین (هنگام سیل)، با شدت زیاد و در زمان کوتاه رخ داده‌اند که زمین و سازه‌ها تحمل این رواناب ناگهانی را نداشتند.

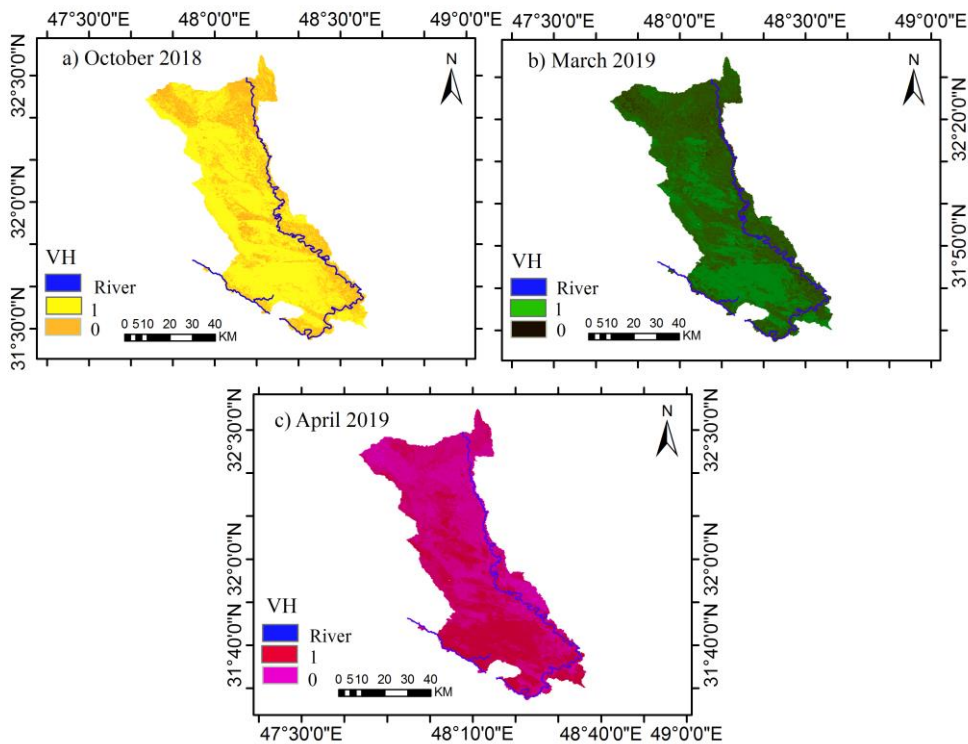
می‌شود در آینده پژوهش‌های بیشتری در ارتباط با دلایل احتمالی نامبرده انجام شود. در مجموع، تصویرهای SAR با قطبش VV نسبت به رطوبت حساس‌تر بودند و می‌توان با استفاده از این ترکیب انواع پوشش زمین مانند باتلاق‌ها و شالیزارها را تفکیک کرد (باثو و همکاران ۲۰۱۸).

بر اساس شکل ۳ (a) (قطبش VH) در محدوده پیش از فعالیت‌های کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) مناطق در دو رنگ زرد با بازتاب کمتر نشان‌دهنده آب در مناطق مسطح بود. رنگ قهوه‌ای با بازتاب بیشتر نشان‌دهنده مناطق خشکی یا ساخته شده بود. در شکل ۳ (b) در محدوده بعد کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) مناطق در دو رنگ سبز نشان‌دهنده مناطق آبی و مسطح و رنگ مشکی نشان‌دهنده خشکی بود. در شکل ۳ (c) در محدوده هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) مناطق در دو رنگ قرمز نشان‌دهنده کاهش بازگشت راداری پس از سیلاب و احتمال مناطق آبی بود و رنگ بنفش نشان‌دهنده افزایش بازگشت راداری پس از سیلاب که می‌تواند نشانه مناطقی باشد که از حالت آبی به خشکی تبدیل شده‌اند یا در پوشش گیاهی و کاربری زمین تغییراتی رخ داده است. در مناطق با پوشش گیاهی انبوه، توانایی قطبش VH در استخراج نواحی سیلابی بیشتر بود (امینی و همکاران ۱۴۰۱). برای درک بهتر وضعیت مناطق آبی و ارتباط آن با رویداد سیل، مساحت مناطق آبی (دائمی و موقت) با ترکیب قطبش (VV+VH) در سه دوره زمانی تحلیل شد (جدول ۳).



شکل ۲- تغییرات پهنه‌های آب در سه دوره متفاوت بر اساس قطبش VV.

Figure 2- Changes in the water bodies in three different periods based on VV polarization.



شکل ۳- تغییرات پهنه‌های آب در سه دوره متفاوت بر اساس قطبش VH.

Figure 3- Changes in the water bodies in three different periods based on VH polarization.

این‌که قطبش متقاطع VH از دید فیزیکی، معمولاً حساسیت بیش‌تری به بازتاب دولبه و آب‌گرفتگی‌های زیر پوشش گیاهی دارد، می‌توان با استفاده از آن نواحی آب‌گرفته را که در زیر پوشش گیاهی یا در مجاورت سازه‌های عمودی هستند را دقیق‌تر شناسایی کرد. از این‌رو، تفاوت اندک در نتایج به‌دست‌آمده برای قطبش VH در مقایسه با VV را می‌توان به حساسیت بیشتر آن به تغییرات سطح و بافت زمین در شرایط رطوبتی نسبت داد. در روش ترکیبی (VV+VH)، اندازه پیکسل‌هایی به‌عنوان مناطق سیلابی در نظر گرفته شدند که در هر دو قطبش کاهش بازتاب قابل‌توجهی را نشان داده‌اند و موجب حذف نواحی‌ای شدند که اندازه پیکسل در یکی از قطبش‌ها تغییر بازتاب داشت؛ در نتیجه مساحت نهایی مناطق شناسایی‌شده به ۲۳۹ کیلومتر مربع که معادل ۶/۲۳٪ از کل محدوده مطالعه‌شده بود، کاهش یافت. دلیل تفاوت قطبش‌ها با ترکیب آن‌ها ناشی از تفاوت حساسیت فیزیکی دو قطبش به نوع پراکندگی سطحی و حجمی و نیز تفاوت در آستانه‌گذاری بود. از آنجایی که هر دو تصویر از سنجنده SAR و در زمان مشابه دریافت شدند، اثر عامل‌های جوی و نوری در این تفاوت ناچیز بود. در این پژوهش نتایج این بخش نشان داد که استفاده از ترکیب داده‌های قطبش VV و VH انسجام و همپوشانی میان نواحی سیلابی شناسایی‌شده را افزایش داد. افزون بر این، نتایج در مقایسه با روش استفاده از هر قطبش به‌شکل جداگانه قابل‌اعتمادتر بود. توزیع مکانی مناطق سیلابی شناسایی‌شده بر اساس هر قطبش در شکل ۴ ارائه‌شده است.

در این پژوهش، برای تشخیص بهتر مناطق سیلابی از آستانه Otsu استفاده شد و برای حذف نویز و بهبود دقت استخراج نواحی سیل، از رویکرد ریخت‌شناختی فرسایش و گسترش استفاده شد. این رویکرد باعث کاهش لکه‌های کوچک نویز و پر کردن حفره‌های کوچک در نواحی واقعی سیلابی شد و در نتیجه کیفیت نقشه نهایی بهبود یافت (یامادا ۲۰۰۸). بر اساس آستانه‌های جدول ۴، نواحی با کاهش شدید در اندازه‌های بازتاب به‌عنوان مناطق پوشیده از آب در نظر گرفته شدند. زیرا، سطوح آبی باعث کاهش شدید بازتاب در رادار شدند. مساحت مناطق سیلابی از داده‌های VV، VH و ترکیب هر دو استخراج شد که در جدول ۴ ارائه‌شده است.

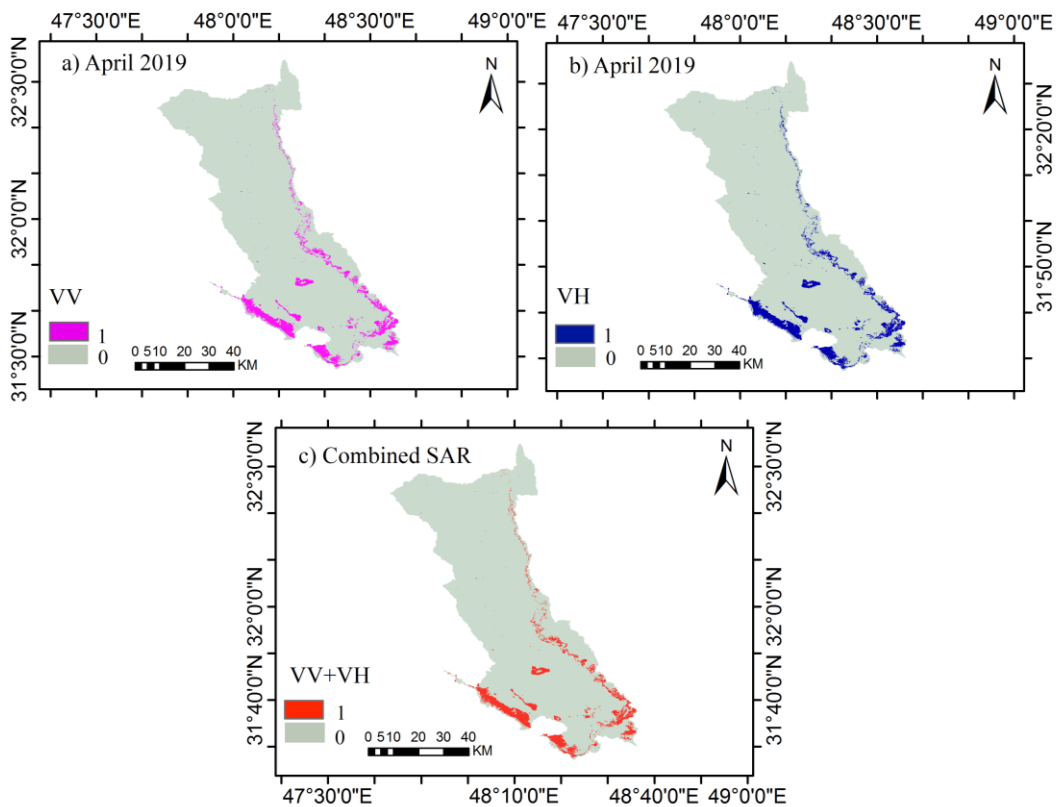
#### جدول ۴- مساحت پهنا سیلابی با استفاده از

قطبش‌های VV و VH و روش ترکیبی.

**Table 4- Area of flooded bodies using VV and VH polarizations and combined method.**

Method	Threshold	Flooded area (km <sup>2</sup> )
Vertical transmit-vertical receive (VV)	-14.87	252
Vertical transmit-horizontal receive (VH)	-22.87	254
Combined	-	239

بر اساس نتایج به‌دست آمده از آستانه‌گذاری، مساحت نواحی سیلابی شناسایی‌شده با استفاده از قطبش VV برابر با ۲۵۲ کیلومتر مربع و با قطبش VH برابر با ۲۵۴ کیلومتر مربع برآورد شد. تفاوت بسیار اندک میان این دو قطبش نشان داد نتایج راداری در هر دو قطبش و نقشه‌ها تقریباً مشابه هستند. با توجه به



شکل ۴- نمایی از سیلاب در قطبش‌های VV و VH و ترکیب آن‌ها.  
**Figure 4- View of flood in VV and VH polarizations and their combination**

حجم ذخیره سد کرخه در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۱ برابر با ۳/۸۶۵/۰۰۰ مترمکعب معادل ۷۳٪ حجم آبگیر بود. این رقم تا تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۵ به ۸۲٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده روند سریع ذخیره‌سازی در این آبخیز بود. با توجه به پیش‌بینی بارندگی‌های شدید در اسفند و فروردین، متولیان سد تلاش کردند با کاهش ذخایر، فضای خالی برای مهار سیل‌های آتی ایجاد کنند. با این حال، به دلیل تداوم بارش‌ها و محدودیت ظرفیت عبور جریان در پایین‌دست، این اقدامات موفقیت‌آمیز نبود و تا تاریخ ۱۳۹۸/۰۱/۲۰ آبگیر سد کرخه به‌طور کامل پر شد (رجبی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹).

تغییر پوشش زمین‌ها از درختان، درختچه‌های طبیعی و پوشش مرتعی به کاربری کشاورزی (سعدیان و شفیع‌زاده مقدم ۲۰۲۱) و کاهش پوشش گیاهی در پیرامون رود کرخه (کریمی و همکاران ۲۰۲۰) منجر به کاهش توان جذب آب شد و در نتیجه بخش زیادی از بارش به‌شکل رواناب سطحی باقی ماند و مستقیماً

در هفته نخست فروردین ۱۳۹۸ به دلیل افزایش آب خروجی از سد‌های دز و کرخه، روستاهای همجوار این سدها و رودها با مشکلات جدی مواجه شدند. بر اساس گزارش‌ها، در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۱/۰۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۳۱، مجموعاً ۷/۹۱۹/۰۰۰ مترمکعب آب وارد آبگیر سد کرخه شد و ۵/۹۵۰/۰۰۰ مترمکعب از آن تخلیه شد. در نتیجه، ۱/۹۶۹/۰۰۰ مترمکعب آب در آبگیر ذخیره شد و با در نظر گرفتن ذخیره پیشین، حجم آب موجود در آبگیر در پایان این دوره (۱۳۹۸/۰۱/۳۱) به ۵/۸۲۲/۰۰۰ مترمکعب رسید. شایان ذکر است که از ۷/۹۱۹/۰۰۰ مترمکعب آب واردشده به آبگیر سد کرخه در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین، حدود ۶۰٪ آن از سیل‌های فروردین بود. از این‌رو، بهره‌برداری از سد باید به گونه‌ای انجام می‌شد که در دوره‌های بارندگی شدید با تخلیه پیشگیرانه بخشی از آبگیر، ظرفیت کافی برای مهار سیلاب فراهم آید. با توجه به بارش‌های گسترده از ابتدای سال آبی،

مقایسه با دوره پیشین، نشان‌دهنده افزایش سطح آب در منطقه بود. پس از لحاظ کردن آستانه‌ها، مساحت نواحی آبی برای هر شاخص محاسبه شد. مساحت‌ها بر اساس تعداد پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده به‌عنوان «آب» پس از آستانه‌گذاری نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- آستانه‌های محاسبه‌شده با روش Otsu برای شاخص‌های طیفی آب و مساحت پهنه‌های آبی استخراج‌شده.

**Table 6- Thresholds calculated by Otsu method for spectral water indices and area of extracted water bodies.**

Index	Threshold post-agriculture season	Threshold during the flood	Area of water bodies without permanent water during floods (km <sup>2</sup> )
NDWI	-0.47	0.05	214
MNDWI	0.12	0.10	227
AWEI	0.14	0.19	126
Combined	-	-	62

ترکیب شاخص‌ها نشان داد که ۶۲ کیلومترمربع از آبخیز کرخه (معادل ۱/۱۶٪ از مساحت کل منطقه) در اثر سیلاب دچار آب‌گرفتگی شده است. هر شاخص حساسیت متفاوتی نسبت به آب سطحی دارد و شرایط جوی بر آن تأثیرگذار است. در شکل ۵، نمایی از سیلاب بر اساس هر شاخص نمایش داده شده است. بر اساس نتایج، بیشترین مساحت منطقه آبی هنگام سیل، به‌وسیله شاخص MNDWI با اندازه ۲۲۷ کیلومترمربع شناسایی شد. از سوی دیگر، عملکرد شاخص AWEI در این منطقه به‌گونه‌ای دیگر بود و اندازه نواحی با احتمال بسیار زیاد از وجود آب را شناسایی کرد. این تفاوت به‌دلیل نوع باندهای استفاده شده در شاخص‌ها است؛ MNDWI به‌دلیل جایگزینی باند SWIR به‌جای NIR حساسیت بیشتری به سطوح آبی در مجاورت خاک و پوشش گیاهی دارد، در حالیکه AWEI نواحی با بازتاب ضعیف یا سایه‌دار را حذف می‌کند و مساحت کمتری را به‌عنوان آب شناسایی می‌کند. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که

وارد رودها و کانال‌ها شد، که باعث سرریز و طغیان آب شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که صرفاً حجم یا گستره آب در زمان رویداد سیلاب نمی‌تواند فقط شاخص مناسبی برای ارزیابی خطر سیلاب باشد؛ بلکه شدت بارش، ویژگی‌های آب‌شناختی خاک، وضعیت زیرساخت‌ها و رفتار رواناب، عامل‌های پستی‌بلندی و ریخت‌شناسی زمین و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی، از مؤلفه‌های اصلی در شکل‌گیری و شدت‌یافتن سیلاب به‌شمار می‌آیند (برزنیک و همکاران ۲۰۲۵؛ کاراکوس ۲۰۲۵).

برای درک بهتر وضعیت نواحی آبی و ارتباط آن با رویداد سیل، مساحت مناطق آبی (دائمی و موقت) با استفاده از ترکیب سه شاخص طیفی (NDWI، MNDWI و AWEI) در دو بازه زمانی (پیش از سیلاب و هنگام رویداد سیل) تحلیل شد. نتایج این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که پیش از رویداد سیلاب (در پایان فصل کشاورزی)، مساحت نواحی آبی حدود ۹۸ کیلومترمربع بود؛ در حالی‌که در زمان رویداد سیل، این اندازه به حدود ۳۲۴ کیلومترمربع افزایش یافت. این افزایش بیش از سه‌برابری در سطح پوشیده از آب، بیانگر تأثیر بارش‌های شدید و ناگهانی بر گسترش پهنه‌های آبی و رویداد سیلاب در منطقه مطالعه‌شده بود.

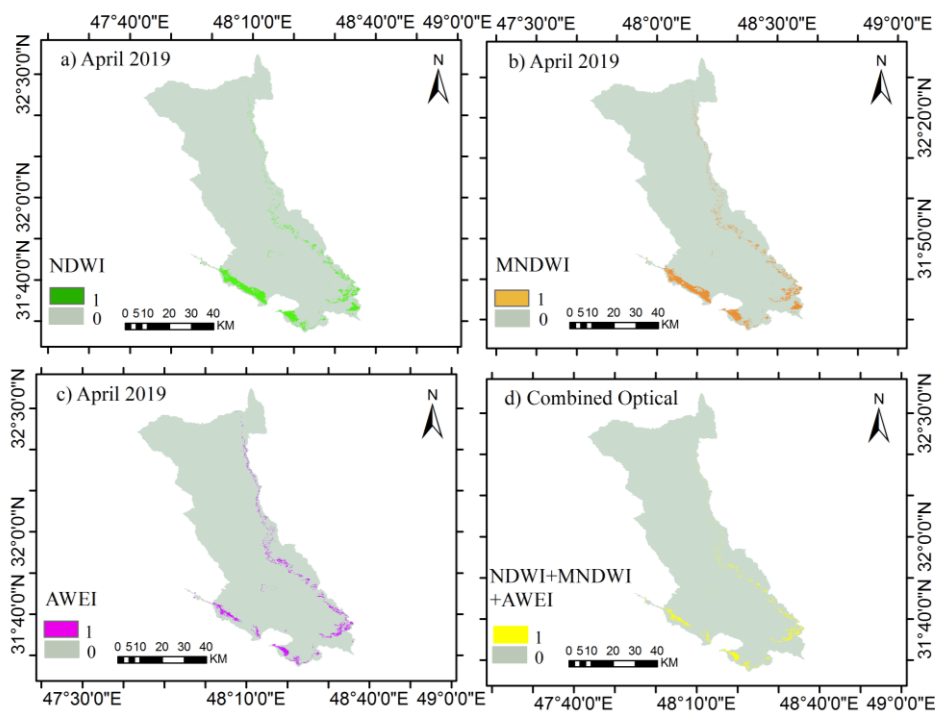
جدول ۵- مساحت پهنه آبی به‌دست آمده از ترکیب NDWI، MNDWI و AWEI در دو بازه زمانی مختلف.

**Table 5- Area of water body extracted from combination of NDWI, MNDWI, and AWEI in two different time periods.**

Time period	Flooded area (km <sup>2</sup> )	Flooded area (%)
Post-agriculture season	98	2.55
During the flood	324	8.44

نتایج محاسبه اندازه‌های آستانه برای سه شاخص NDWI، MNDWI و AWEI برای استخراج نواحی با آب سطحی در دو بازه زمانی (پس از پایان فصل کشاورزی و هنگام رویداد سیل) در جدول ۶ ارائه شده است. افزایش اندازه آستانه‌ها در بازه سیلاب در

انتخاب شاخص طیفی مناسب برای آشکارسازی آب، وابسته به شرایط مکانی، نوع پوشش زمین و ویژگی‌های طیفی منطقه مطالعه شده بود.



شکل ۵- نمایی از منطقه سیلابی بر اساس شاخص‌های طیفی آب.

Figure 5- View of the flooded area based on the spectral water indices.

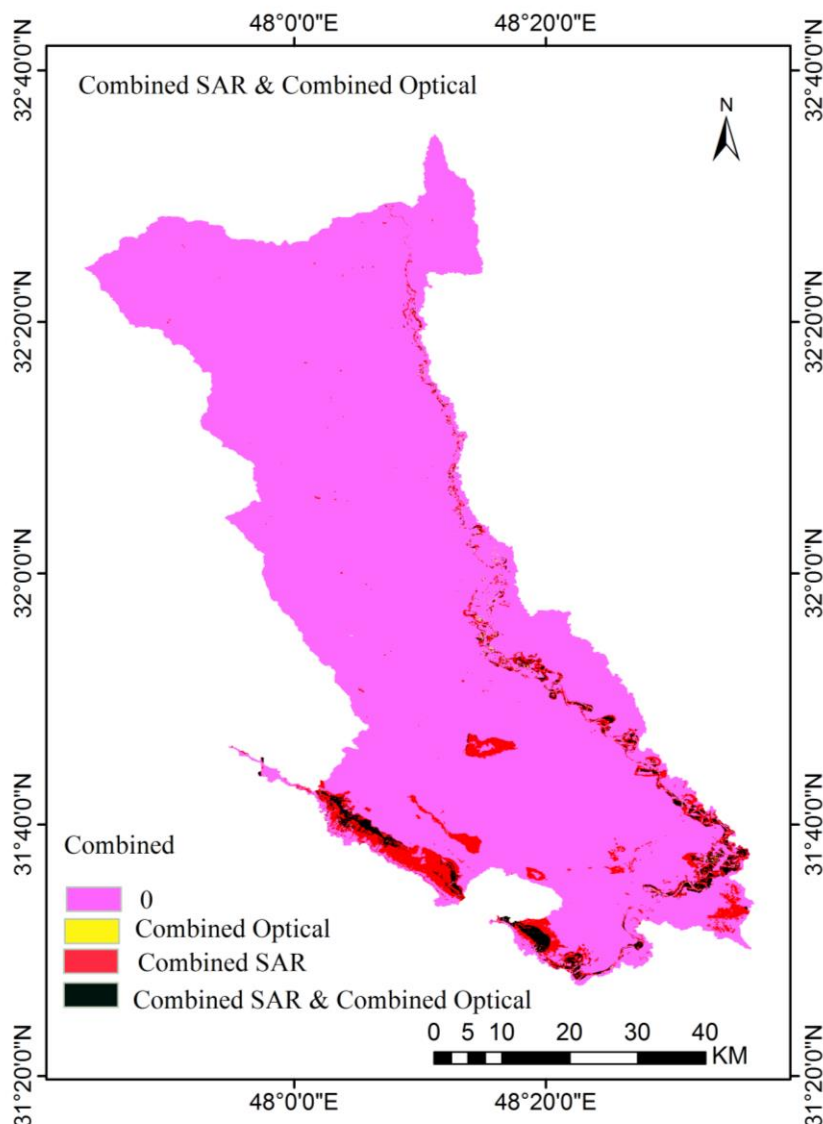
کیلومترمربع به دست آمد که معادل ۱/۵۱٪ از مساحت کل منطقه بود. نتایج به دست آمده از ترکیب داده‌های راداری و نوری در شکل ۶ ارائه شده است؛ به طوری که رنگ قرمز بیانگر مناطق سیلابی شناسایی شده به وسیله داده‌های راداری، رنگ زرد نشان‌دهنده نتایج داده‌های نوری و رنگ مشکی بیانگر نواحی مشترک دو روش (هم‌پوشانی) بود.

به منظور افزایش دقت شناسایی نواحی سیلابی، ترکیب نتایج به دست آمده از داده‌های راداری سنتینل-۱ با قطبش‌های VV و VH و داده‌های نوری سنتینل-۲ با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI بررسی شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج این پژوهش بیشترین مساحت سیلاب شناسایی شده با استفاده از روش راداری ۲۳۹ کیلومترمربع و با روش داده‌های نوری ۶۲ کیلومترمربع و با ترکیب هر دو روش (راداری و نوری) ۵۸

جدول ۷- مقایسه پهناهای سیلابی بر اساس ترکیب داده‌های راداری و نوری.

Table 7- Comparison of the flooded areas based on the combination of radar and optical data.

No.	Comibination used	Identified area (km <sup>2</sup> )
1	Combined radar	239
2	Combined optical	62
3	Common flood area in both methods	58
4	Agreement level between both methods	39 %



شکل ۶- نقشه سیلاب به‌دست آمده از ترکیب تصویرهای ماهواره‌ای رادار و نوری.  
**Figure 6- Flood map obtained from combining radar and optical satellite images.**

راداری، نوری و ترکیبی انجام شد تا اندازه همخوانی الگوهای مکانی میان آن‌ها مشخص شود. اندازه هم‌پوشانی نواحی شناسایی شده در داده‌های راداری و نوری برابر با ۵۸ کیلومترمربع بود که حدود ۳۹٪ تطابق را نشان داد. این اندازه تطابق، با در نظر گرفتن تفاوت در حساسیت طیفی و هندسی میان داده‌های راداری و نوری، قابل قبول بود و نشان‌دهنده سازگاری نسبی روش‌ها در استخراج نواحی سیلابی بود و مؤید قابلیت اطمینان روش‌های ترکیبی در تحلیل و پایش نواحی آسیب‌پذیر و افزایش دقت در پهنه‌بندی سیلاب بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد می‌توان با استفاده از

نتایج مقایسه داده‌ها نشان داد که داده‌های راداری، به‌دلیل حساسیت زیاد به بازتاب از سطح آب و مستقل بودن از شرایط نوری و پوشش ابر، توانایی بیشتری در آشکارسازی نواحی سیلابی داشتند. عملکرد این داده‌ها حتی در مناطق با پوشش گیاهی یا شرایط جوی نامساعد نیز در مقایسه با داده‌های نوری بهتر بود. به‌طوری که مساحت شناسایی شده به‌وسیله ترکیب راداری برابر با ۲۳۹ کیلومترمربع بود، در حالی که این اندازه برای ترکیب نوری ۶۲ کیلومترمربع به‌دست آمد. به‌دلیل نبود داده‌های زمینی، ارزیابی تطبیقی با مقایسه نتایج به‌دست آمده از داده‌های

ترکیبی برابر با ۵۸ کیلومتر مربع برآورد شد، که ۳۹٪ با نواحی شناسایی شده به وسیله هر دو سنجنده هم‌پوشانی داشت. این همپوشانی قابل توجه بیانگر ظرفیت زیاد تلفیق داده‌های راداری و نوری در افزایش دقت پهنه‌بندی و تحلیل مخاطرات طبیعی مانند سیلاب است. نتایج بررسی سه بازه زمانی مطالعه شده (پیش از فعالیت‌های کشاورزی، بعد از پایان فصل کشاورزی و هنگام سیل) نشان داد که تغییرات مساحت پهنه آبی بیانگر اندازه آب‌گرفتنی در دوره‌های بررسی شده است و نمی‌تواند فقط شاخصی برای رویداد سیلاب باشد. شایان ذکر است که عامل‌های آب‌شناختی (شدت بارش، شرایط رطوبتی خاک و رفتار رواناب سطحی) بر گسترش پهنه‌های آبی اثرگذارند. بررسی دقیق این عامل‌ها نیازمند پژوهش‌های جداگانه و داده‌های میدانی است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با توسعه سامانه پایش برخط در محیط GEE، تغییرات پهنه‌های آبی و مناطق مستعد سیلاب به شکل دوره‌ای پایش شوند. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود با همکاری میان مراکز پژوهشی و سازمان‌های اجرایی از جمله سازمان مدیریت بحران و وزارت نیرو، بستری برای استفاده از داده‌های سنجنده از دور در مدیریت سد کرخه و بهبود سامانه‌های هشدار سیلاب زمینه‌سازی شود. با ترکیب داده‌های سنجنده از دور با مدل‌های آب‌شناختی و اقلیمی، تحلیل فرآیند رویداد سیلاب و پیش‌بینی آن دقیق‌تر خواهد بود. در نتیجه می‌توان گفت با توجه به اینکه عامل‌های انسانی از جمله تغییرات کاربری زمین و مدیریت نادرست منابع آب در تشدید سیل‌های منطقه مؤثر هستند؛ لحاظ کردن این عامل‌ها در برنامه‌ریزی‌های آتی مدیریت سیلاب ضروری است.

### سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی دانشگاه محقق اردبیلی (قرارداد ۱۴۰۴/د/۹/۱۳۹۲۷) انجام شد. نویسندگان این مقاله از همکاری دانشگاه محقق اردبیلی به دلیل حمایت مالی و معنوی قدردانی می‌کنند.

روش آستانه‌گذاری Otsu و ترکیب سنجنده‌ها نواحی تحت تأثیر سیلاب را با دقت قابل‌قبولی (۳۹٪ تطابق) شناسایی کرد. در پژوهشی، رجبی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند رویداد سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در استان خوزستان ناشی از ترکیب عامل‌های مختلف از جمله مد دریا و ورود آب آن به رودها و طغیان نهرهای روستاها بود. نتیجه شدت بارندگی در این منطقه و گستردگی آن در تمام آبخیزهای منطقه قابل مشاهده بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های آچیوت و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ و روش آستانه‌گذاری Otsu، هم‌راستا است. این پژوهشگران نواحی سیلابی در آبخیز بایتارانی با دقت بیش از ۸۰٪ شناسایی کردند. همچنین، از تصویرهای سنتینل-۲ برای محاسبه شاخص NDWI و بررسی دقت نقشه‌های سیلاب، استفاده کردند. این پژوهشگران نشان دادند که با استفاده از ترکیب داده‌های راداری و نوری می‌توان شناسایی نواحی سیلابی را بهبود داد. کاراکوس (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI و روش Otsu در دریاچه وان، عملکرد شاخص AWEI را برتر گزارش کرد؛ در حالیکه در این پژوهش، با استفاده از شاخص MNDWI بیشترین مساحت نواحی آبی شناسایی شد. دلیل این تفاوت احتمالاً ناشی از شرایط مکانی، ویژگی‌های پوشش گیاهی و تفاوت در زمان تصویربرداری است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش قابلیت داده‌های راداری سنتینل-۱ با قطبش VV و VH و داده‌های نوری سنتینل-۲ با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI در شناسایی نواحی سیلابی با بهره‌گیری از روش آستانه‌گذاری Otsu بررسی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد می‌توان با استفاده از هر کدام از این داده‌ها مناطق سیلابی را به شکل قابل‌قبولی شناسایی کرد، اما با استفاده از روش ترکیبی راداری و نوری، می‌توان مناطق آب‌گرفته را به طور جامع‌تری شناسایی کرد. مساحت نهایی ناحیه سیلاب شناسایی شده در روش

### تضاد منافع نویسندگان

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

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج  
نویسنده دوم: روش کار، تحلیل نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله

### فهرست منابع

- Agnihotri A. K, Ohri A, Gaur S, Das N, Mishra S. 2019. Flood inundation mapping and monitoring using SAR data and its impact on Ramganga River in Ganga Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191:1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7903-4>
- Amarnath G, Rajah A. 2016. An evaluation of flood inundation mapping from MODIS and ALOS satellites for Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 7(5):1526–1537. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084953>
- Albertini C, Gioia A, Iacobellis V, Manfreda S. 2022. Detection of surface water and floods with multispectral satellites. *Remote Sensing*. 14(23):1-24. <https://doi.org/10.3390/rs14236005>
- Amini L, Argany M, Abdollahi Kakroodi A. 2022. Detection of flooded areas in Golestan Province using VV, VH and VV + VH polarizations of Sentinel-1 and Landsat-8 images. *Journal of Geography and Environmental Studies*. 11(43):94-107. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.20087845.1401.11.43.6.7>
- Amitrano D, Di Martino G, Di Simone A, Imperatore P. 2024. Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. *Remote Sensing*. 16(4):38p. <https://doi.org/10.3390/rs16040656>
- Anusha N, Bharathi B. 2020. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 23(2):207–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.01.001>
- Argenti F, Lapini A, Bianchi T, Alparone L. 2013. A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 1(3):6-35. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2277512>
- Atchyuth BAS, Swain R, Das P. 2023. Near Real-time Flood Inundation and Hazard Mapping of Baitarani River Basin using Google Earth Engine and SAR Imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*. 10 p. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3113777/v1>
- Attarchi S. 2019. Efficiency evaluation of SAR-derived indices in urban impervious surfaces extraction using full polarimetric image. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*. 7(4):837-854. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2019.288561.1162>
- Bagheri Harooni M. H, Farzaneh M, Rayegani B. 2022. Development of remote sensing-based flood estimation methodology in Google Earth Engine. *Environment and Interdisciplinary Development*. 7(76):12-26. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/envj.2022.154826>
- Bao Y, Lin L, Wu S, Deng KAK, Petropoulos G.P. 2018. Surface soilmoisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 72:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.026>
- Breznik J, Oštir K, Rak G. 2025. The potential of Sentinel-1 imagery for flood event detection: A satellite vs. hydraulic model comparison. *Journal of Hydrology*. 651: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132587>
- Bhatt C.M, Rao G.S. 2016. Ganga floods of 2010 in Uttar Pradesh, north India: A perspective analysis using satellite remote sensing data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 7(2):747-763. [doi/full/10.1080/19475705.2014.949877](https://doi.org/10.1080/19475705.2014.949877)
- Borah SB. 2018. Flood inundation mapping and monitoring in Kaziranga National Park, Assam using Sentinel-1 SAR data. *Environmental Monitoring and Assessment*.

- 190(9):9p. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6893-y>
- Bouhennache R, Bouden T, Taleb-Ahmed A, Cheddad A. 2019. A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*. 34(10):32p. <https://dx.doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>
- Bucur A, Wagner W, Elefante S, Naeimi V, Briebe C. 2018. Development of an earth observation cloud platform in support to water resources monitoring. *Earth Observation Open Science and Innovation*. pp. 275–283.
- Chen M, Zhang R, Jia M, Cheng L, Zhao C, Li H, Wang Z. 2024. Accurate and rapid extraction of aquatic vegetation in the China side of the Amur River Basin Based on landsat imagery. *Remote Sensing*. 16(654):16 p. <https://doi.org/10.3390/rs16040654>
- 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. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.006>
- Cui J, Zhang X, Wang W. 2020. Integration of optical and SAR remote sensing images for crop-type mapping based on a novel object-oriented feature selection method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 13(1):178–190. <https://dx.doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.5285>
- Dodange P, Ebadi H, Kayani A. 2021. Identification of flood areas with time series statistical calculations based on combining radar and optical data. *Ecohydrology*. 8(3):639–623. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2021.322145.1495>
- Domeneghetti A, Schumann GJP, Tarpanelli A. 2019. Preface: Remote sensing for flood mapping and monitoring of flood dynamics. *Remote Sensing*. 11(8):943. <https://doi.org/10.3390/rs11080943>
- Echendu AJ. 2023. Human factors vs climate change; experts' view of drivers of flooding in Nigeria. *Natural Hazards Research*. 3(2):240–246. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.04.002>
- Elhaddad H, Sultan M, Yan E, Abdelmohsen K, Mohammad AT, Badawy A, Hadi K, Hassan S, Mustafa M. 2024. Optimization of floodwater redistribution from Lake Nasser could recharge Egypt's aquifers and mitigate its excessive floods. *Communications Earth and Environment*. 5(385):11p. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01532-2>
- Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R, Proud SR. 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 140:23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- GAO W, Shen Q, Zhou Y, Li X. 2018. Analysis of flood inundation in ungauged basins based on multi-source remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 190(3):13p. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-018-6499-4>
- Ghaffarian S, Kerle N, Filatova T. 2018. Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: A review. *Remote Sensing*. 10(11):30p. <https://doi.org/10.3390/rs10111760>
- 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>
- Günen MA, Atasever UH. 2024. Remote sensing and monitoring of water resources: A comparative study of different indices and thresholding methods. *Science of The Total Environment*. 926:30 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172117>
- Hu X, Wang Y. 2022. Monitoring coastline variations in the Pearl River Estuary from 1978 to 2018 by integrating Canny edge detection and Otsu methods using long time series Landsat dataset. *Catena*. 209(2):16 p. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105840>
- Karakus P. 2025. Detection of water surface using Canny and Otsu threshold methods with machine learning algorithms on Google Earth Engine: A case study of Lake Van. *Applied Science*. 15:22p. <https://doi.org/10.3390/app15062903>
- Karimi M, Shahedi K, Razinei T, Miryaghoobzadeh M. 2020. Analysis of Performance of vegetation indices on agricultural drought using remote sensing technique in Karkheh Basin. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 11(4):29–46. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/gisj.11.4.29>
- Khalid HW, Khalil R, Qureshi MA. 2021. Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 24(3):619–634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003>

- Konami T, Koga H, Kawatsura A. 2021. Role of pre-disaster discussions on preparedness on consensus-making of integrated flood management (IFM) after a flood disaster, based on a case in the Abukuma River Basin, Fukushima. Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 53:12p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.102012>
- Kim B, Han Y, Kim Y, Kim Y. 2013. Generation of cloud-free imagery using Landsat-8. In: Paper SC02-0828 in the 34<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Proceedings. ACRS. pp. 20–24.
- Krongthao S, Piaseu N, Junda T, Wall B. M. 2021. Community-based flood preparedness for Thai dependent older adults. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 63:10p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102460>
- Kumar L, Mutanga O. 2018. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*. 10(10):15p. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
- Kumar R. 2019. Flood inundation and hazard mapping of 2017 floods in the rapti river basin using sentinel-1a synthetic aperture radar images. *Applications and Challenges of Geospatial Technology*. 77–98. [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-99882-4\\_6](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-99882-4_6)
- Manjusree P, Prasanna Kumar L, Bhatt C. M, Rao GS, Bhanumurthy V. 2012. Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. *International Journal of Disaster Risk Science*. 3(2):113–122. <https://dx.doi.org/10.1007/s13753-012-0011-5>
- McFeeters SK. 1996. Theuse of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*. 17:1425–1432. <https://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mohamadiazar N, Ebrahimian A, Hosseiny H. 2024. Integrating deep learning, satellite image processing, and spatial-temporal analysis for urban flood prediction. *Journal of Hydrology*. 639:13 p. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131508>
- Ohki M, Watanabe M, Natsuaki R, Motohka T, Nagai H, Tadono T, Suzuki S, Ishii K, Itoh T, Yamanokuchi T. 2016. Flood area detection using ALOS-2 PALSAR-2 data for the 2015 heavy rainfall disaster in the Kanto and Tohoku Area. *The Remote Sensing Society of Japan*. 36(4):348–359. <https://dx.doi.org/10.11440/rssj.36.348>
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9(1):62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Parida B. R, Tripathi G, Pandey A. C, Kumar A. 2022. Estimating floodwater depth using SARderived flood inundation maps and geomorphic model in kosi river basin (India). *Geocarto International*. 37(15):4336–4360. <https://dx.doi.org/10.1080/10106049.2021.1899298>
- Peymankhah P, Attarchi S, Moharrami M. 2023. Rapid Flood Monitoring Using Sentinel-1 and Landsat-8 Images (Case study: Kashkan River, Poldakhter City). *Nivar*. 47(122-123):82-94. (In Persian). <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.417413.1265>
- Pflumm L, Kang H, Wilting A, Niedballa J. 2025. GEE-PICX: Generating cloud-free Sentinel-2 and Landsat image composites and spectral indices for custom areas and time frames—a Google Earth Engine web application. *Ecography*. 7 p. <https://doi.org/10.1111/ecog.07385>
- Rahman R, Thakur P. 2018. Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 27:S37-S41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.10.002>
- Raikes J, Smith TF, Jacobson C, Baldwin C. 2019. Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38:10p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101207>
- Rajabizadeh Y, Ayyoubzadeh SA, Ghomeshi M. 2019. Flood Survey of Khuzestan Province in 97-98 and Providing Solutions for its Control and Management in the Future. *Journal of Ecohydrology*. 6(4):1069-1084. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2020.285854.1166>
- Rajendiran N, Kumar LS. 2023. Pixel level feature extraction and machine learning classification for water body extraction. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 48(1):9905–9928 <https://dx.doi.org/10.1007/s13369-022-07389-x>
- Sadian A, Shafizadeh-Moghadam H. 2021. Investigation of land use changes in Karkheh Watershed during 1990 and 2020 using Google Earth Engine platform and Landsat satellite images. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(10):2569-2580. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.330075.669068>

Sari Y, Prakoso PB, Baskara AR. 2019. Road crack detection using support vector machine (SVM) and OTSU algorithm. In Proceedings of the 2019 6<sup>th</sup> International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Bali, Indonesia. 18–21 November. pp. 349–354. <https://dx.doi.org/10.1109/ICEVT48285.2019.8993969>

Singh G, Singh Rawat K. 2024. Mapping flooded areas utilizing Google Earth Engine and open SAR data: a comprehensive approach for disaster respons. Discover Geoscience. 2(5):13 p. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00006-4>

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>

Tavares PA, Beltrão NES, Guimarães US, Teodoro AC. 2019. Integration of sentinel-1 and sentinel-2 for classification and LULC mapping in the urban area of Belém, Eastern Brazilian Amazon. Sensors. 19(5):11 p. <https://dx.doi.org/10.3390/s19051140>

Tran T, Lakshmi V. 2024. Enhancing human resilience against climate change: Assessment of hydroclimatic extremes and sea level rise impacts on the Eastern Shore of Virginia, United States. Science of the Total Environment, 947:12 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174289>

Uddin K, Matin MA, Thapa RB. 2021. Rapid flood mapping using multi-temporal SAR images: An example from Bangladesh. In: Bajracharya, B., Thapa, R.B., Matin, M.A. (eds) Earth Observation Science and Applications for Risk Reduction and Enhanced Resilience in Hindu Kush Himalaya Region. Springer, Cham., 201-211. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-73569-210>

Uzun M. 2024. Analysis of Manyas Lake surface area and shoreline change over various periods with DSAS tool. Turkish Journal of Remote Sensing. 6(1):35–56. <https://doi.org/10.51489/tuzal.1443490>

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.

<https://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>

Yamada Y. 2008. Morphological analysis of flood inundated regions in paddy areas using ALOS/PALSAR data and its distribution on the Google Earth–Design of the Future Disaster Management System (FDMS). In The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 37, Part B4,6p. Beijing. <https://isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4pdf/195.pdf>

Yılmaz OS. 2023. Automatic detection of water surfaces using K-means++ clustering algorithm with Landsat-9 and Sentinel-2 images on the Google Earth Engine platform. Bilge International Journal of Science and Technology Research. 7(2):105–111. <https://dx.doi.org/10.30516/bilgesci.1262550>

You N, Han L, Liu Y, Zhu D, Zuo X, Song W. 2023. Research on Wavelet Transform modulus maxima and OTSU in edge detection. Applied Sciences. 13(16):15p. <https://doi.org/10.3390/app13074454>

Zhang G, Wu M, Wei J, He Y, Niu L, Li H, Xu G. 2021. Adaptive threshold model in google earth engine: A case study of Ulva prolifera extraction in the south yellow sea, China. Remote Sensing. 13(16):25p. <https://doi.org/10.3390/rs13163240>

Zhu D, Zhou C, Zhu Y, Wang T, Zhang C. 2023. Monitoring of supraglacial lake distribution and full-year changes using multisource time-series satellite imagery. Remote Sensing. 15(24):16p <https://doi.org/10.3390/rs15245726>



## Monitoring Flood-induced Surface Waters Using Different Remote Sensing-based Polarizations and Spectral Water Indices in the Karkheh Watershed

Zeinab Hazbavi<sup>1\*</sup>, Marzieh Ghashamshami<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Former M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

According to global statistics, floods affect more than 40 % of the world's population and cause significant loss of life and property. In Iran, more than 80 % of cities are at risk of flooding. Therefore, investing in preventive measures and advanced technologies to combat floods is more necessary than ever. Preparedness and risk reduction before disasters could significantly reduce the cost of post-disaster recovery. Accurate mapping and long-term monitoring of floods play a key role in planning and prevention. One of the efficient tools for monitoring and mapping floods in optimal disaster management is the use of satellite imagery. Although Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) images are useful for identifying flood areas in cloudy conditions, this method also has limitations. The sensitivity of radar data to dense vegetation and vertical structures may lead to under- or over-estimation of flooded areas. Besides, the Normalized Differential Water Index (NDWI), Modified Normalized Differential Water Index (MNDWI), and Automatic Water Extraction Index (AWEI) obtained from optical data in cloudy or plant shadows may have errors and cause incomplete or incorrect identification of flood areas. Therefore, the results obtained from both methods should be interpreted carefully, and combining radar and optical data can reduce these limitations, but does not completely eliminate them. Therefore, in this study, radar and optical data were analyzed and compared using remote sensing indices related to the water spectrum, and flooded areas were identified in the Karkheh watershed in Khuzestan Province.

#### Materials and Methods

In the Karkheh watershed, widespread and unpredictable flood occur in the months of March and April 2019, which resulted in significant damage. Accordingly, an area of 3838.3 km<sup>2</sup> was selected. In this study, three different methods were used to identify and analyze surface water caused by flooding: (1) to detect changes, data from three time periods were used, including pre-agriculture season (September 28 to October 25, 2018), post-agriculture season (February

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** hazbavi.zeinab@gmail.com

**Citation:** Hazbavi, Z., Ghashamshami, M. 2026. Monitoring Flood-induced Surface Waters Using Different Remote Sensing-based Polarizations and Spectral Water Indices in the Karkheh Watershed. *Watershed Management Research*. 39(1): 84-107.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2025.370814.1635

**Received:** 24 September 2025, **Received in revised form:** 13 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 21 March 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 84-107.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



28 to March 25, 2019), and during the flood (March 28 to April 25, 2019). (2) SAR images obtained from the Sentinel-1 satellite with VV and VH polarizations were processed using the Refined Lee filter and the Otsu threshold algorithm to identify flooded areas. (3) To more accurately extract surface water from optical images, spectral water indices including NDWI, MNDWI, and AWEI obtained from the Sentinel-2 satellite were used. It is worth noting that AWEI was available in two versions: shadowless for open areas and shaded to reduce the effect of shadow in urban and mountainous areas, and the shadowless version was used in this study. Finally, by combining the results from radar and optical methods and analyzing multi-temporal variations, comprehensive maps of flood spread were produced and validated.

### Results and Discussion

The results of this study showed that the performance of the VH polarization with a value of 254 km<sup>2</sup> was slightly better in detecting flood areas than the VV polarization with a value of 252 km<sup>2</sup>. With a combined method using both polarizations and only selecting areas with low backscatter in both polarizations, 239 km<sup>2</sup> of flooded regions were identified. The Combination of polarizations improved the accuracy and reliability of flood mapping and was superior to optical data because the radar was insensitive to cloud cover and lighting conditions. The results of temporal analysis of permanent and temporary water in the combined method (VV+VH) in three periods revealed that water coverage was high (about 1560 km<sup>2</sup>) pre-agricultural activities, decreased to 847 km<sup>2</sup> in late winter. Then increased to approximately 974 km<sup>2</sup> during the flood event. Despite lower water compared to the pre-agriculture period, a widespread flood occurred due to intense, sudden rainfall and the limited land and infrastructure capacity. The largest area covered by water was identified using MNDWI with an area 227 km<sup>2</sup>. While the AWEI, with a value of 126 km<sup>2</sup>, with a more conservative approach, only areas with a very high probability of surface water were identified. By combining all three spectral indices, an area of 62 km<sup>2</sup> was identified as flood-prone areas. The variations between the indices are due to the differences in spectral bands and sensitivity to water. Analysis of the results of the NDWI, MNDWI and AWEI showed that the changes in permanent and temporary water extent during the flood were significant, increasing from 98 km<sup>2</sup> to 324 km<sup>2</sup>. The Otsu thresholding method was effectively applied to standardize and classify water areas across indices.

### Conclusion and Suggestions

Based on the results of this study, it concluded that combining radar and optical data led to the identification of 58 km<sup>2</sup> of flood areas, and there was a 39% overlap between the results of the two satellites. Using this combination significantly increased the accuracy and reliability of identifying flood-affected areas. Since changes in water extent do not only indicate the occurrence or severity of floods, it indicates that hydrological and management factors play a more important role in flood occurrence. Therefore, it is suggested that combined data, along with environmental factor analysis, be used to develop early warning systems and crisis management planning. In addition, using this method allows for periodic zoning of floods, which is recommended for use in developing preventive measures, optimal flood management, and agricultural planning.

**Keywords:** Flood management, flood mapping, Otsu algorithm, remote sensing indices, SAR images

**Article Type:** Research Article

**Acknowledgement**

This research was supported by the University of Mohaghegh Ardabili (Research grant number 1404/d/9/13927). The authors of this article would like to acknowledge to the University of Mohaghegh Ardabili for its financial and logistical support.

**Conflicts of interest**

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

**Data Availability Statement**

All information and results are provided in the article.

**Authors' Contribution**

Author 1: Conceptualization, Supervision, Manuscript editing and review, Results control.

Author 2: Methodology, Software analysis, Writing - original draft preparation