

مقدمه

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی با خسارات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجه است [۵، ۳۷ و ۴۱]. این پدیده در اثر بارش شدید، ذوب برف، طغیان رودخانه، شکست سد یا افزایش سطح آب دریا رخ می‌دهد [۳۳]. شهرنشینی، تغییر کاربری، تخریب پوشش گیاهی و تغییر اقلیم، شدت و فراوانی سیلاب‌ها را افزایش داده‌اند. سیلاب‌ها به انواع رودخانه‌ای، ناگهانی (با بیش‌ترین تلفات جانی) و ساحلی تقسیم می‌شوند [۴، ۱۲، ۲۶، ۲۹، ۴۲ و ۴۴]. شناسایی دقیق سیلاب مبنای مدیریت بحران، امداد و کاهش خسارت می‌باشد [۶ و ۲۳]. روش‌های زمینی پوشش محدود و زمان‌بر بوده و مشاهدات هوایی در شرایط نامساعد ممکن نیست [۱۳ و ۱۹]. تصاویر ماهواره‌ای با پوشش وسیع و تکرارپذیری بالا، ابزاری کارآمد هستند [۱۶]. تصاویر اپتیکی دقیق اما وابسته به نور و هوا هستند، درحالی‌که تصاویر راداری مستقل از شرایط جوی و نوری عمل می‌کنند [۷، ۲۴، ۲۵، ۳۱ و ۳۵]. هم‌چنین دستیابی به نمای کلی از رخداد سیل برای پیش‌بینی روندهای آینده ضروری است [۳۶]. مطالعات مختلف با هدف شناسایی مناطق سیلابی با استفاده از تصاویر راداری در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است؛ از جمله در مطالعاتی با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و تصاویر لندست ۸ که روشی عملیاتی برای نقشه‌برداری دقیق، از نواحی سیل‌زده و آسیب‌دیده در بنگلادش توسعه دادند. نتایج آنان نشان داد که در ماه آگوست ۲۰۱۷ حدود هفت درصد از کل منطقه زیر سیل رفته و بیش‌ترین خسارت به زمین‌های کشاورزی وارد شده است [۴۰]. در مطالعه دیگر با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ به پایش و شناسایی خودکار مناطق سیل‌زده در شهر ربه دانمارک پرداختند. روش پیشنهادی آن‌ها با اعمال تکنیک‌هایی مانند تجزیه درخت چهارتایی و مدل‌سازی مخلوط گاوسی، موفق به جداسازی پهنه‌های آبی از سایر عوارض شده و درنهایت دقت کلی ۹۸/۵ درصد را در نقشه‌برداری سیلاب به دست آورد [۴۷]. در مطالعه‌ای که در شهرستان آق‌قلا را با استفاده از تصاویر راداری به‌صورت تک زمانه موردبررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد در محدوده مورد مطالعه در تاریخ ۲۳ مارس، ۱۱۵ کیلومترمربع و در تاریخ ۲۹ مارس، ۱۰۷ کیلومترمربع در اثر سیل فروردین ۹۸ به زیر آب رفته است. هم‌چنین نتایج بررسی تصاویر راداری و بازپیدهای میدانی نشان داد دلایل اصلی سیلابی شدن منطقه، بارندگی شدید طی چند روز، پر شدن سد وشمگیر، شیب کم منطقه، عدم لایروبی رودخانه، وجود پل‌های زیاد بر روی رودخانه و ارتفاع کم پل‌ها و درصد بالای رس در خاک منطقه

پایش و تحلیل ماندگاری سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ شهر آق‌قلا با استفاده از تصاویر راداری

پویا صفایی انارکی^۱ و نیکروز مستوفی^{۲*}

تاریخ دریافت ۱۴۰۵/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

DOI:10.22034/WMJ.2026.2090221.1138

چکیده

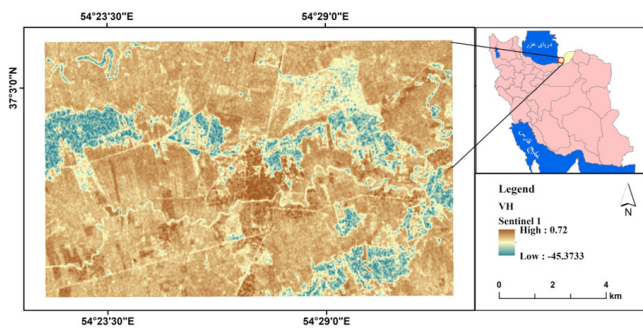
پایش سریع و دقیق پهنه‌های سیلابی برای مدیریت بحران و کاهش خسارات اقتصادی، به‌ویژه در مناطق جلگه‌ای با ماندگاری بالای آب، اهمیت دارد. هدف این پژوهش، تحلیل پویای زمانی-مکانی سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ در شهر آق‌قلا با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ و بستر گوگل ارث انجین است. در این مطالعه، شش بازه زمانی از اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ با پلاریزاسیون‌های VH و VV بررسی شد و نقشه کاربری اراضی با تصاویر سنتینل-۲ و الگوریتم SVM تهیه گردید. نتایج اعتبارسنجی ضریب کاپا ۰/۸۵ و صحت کلی ۹۱ درصد را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد منطقه چرخه کامل سیلاب ناگهانی تا تخلیه تدریجی را تجربه کرده و بیشینه آب‌گرفتگی در تاریخ چهارم با ۲۷/۹۴ کیلومترمربع رخ داده است. اراضی کشاورزی با ۱۹/۶۰ کیلومترمربع بیش‌ترین پهنه سیل را داشتند. هم‌چنین ۱/۳۶ کیلومترمربع هسته پایدار آب‌گرفتگی تا تاریخ ششم (۲۰ تا ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۸) باقی ماند که نشان‌دهنده ضعف زهکشی است. در مقابل، اراضی شهری با حداکثر درگیری ۰/۰۴ کیلومترمربع، زهکش سریع بیش‌تری نشان دادند. نتایج، کارایی داده‌های SAR را در پایش سیلاب و مدیریت بحران تأیید می‌کند.

کلید واژه: آب‌گرفتگی، گوگل ارث انجین، کاربری اراضی، سنتینل-۱.

۱- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۲- گروه مهندسی نقشه‌برداری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ایمیل نویسنده مسئول، Email: n_mostofi@iau.ac.ir

قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع متوسط منطقه ۱۵/۴۷ - متر، شیب متوسط منطقه ۲/۵۰ درجه و کاربری غالب کشاورزی می‌باشد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه، شهر آق‌قلا

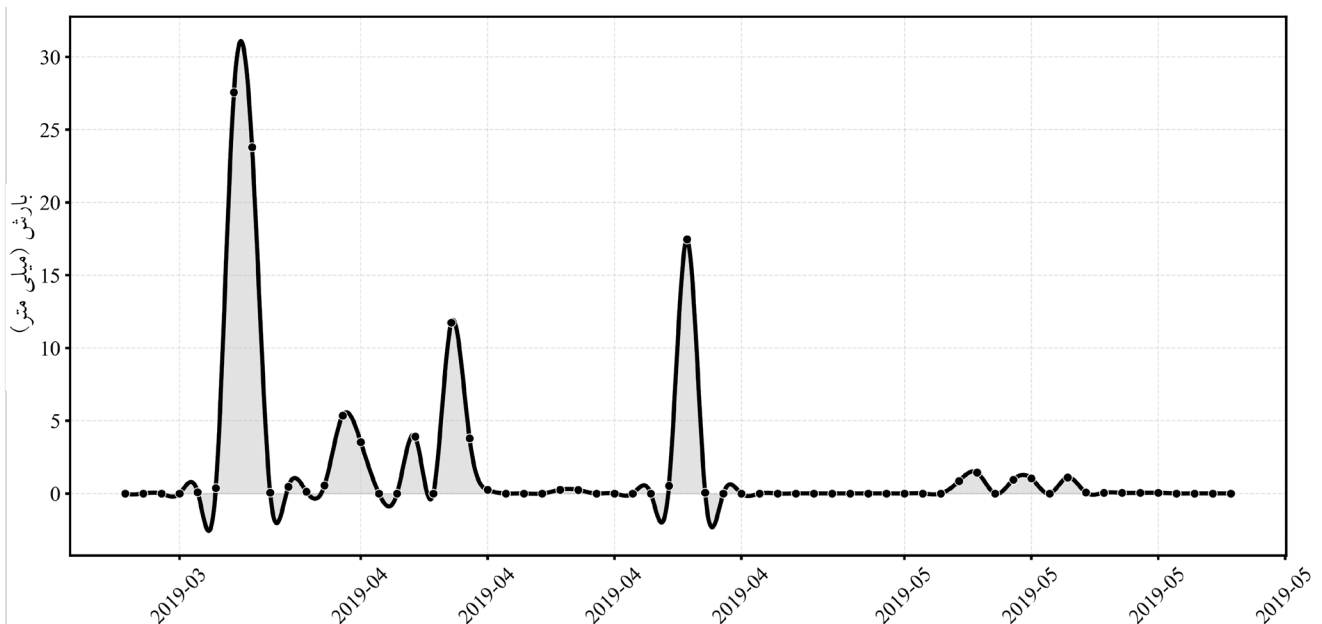
با توجه به توپوگرافی تخت منطقه، احتمال ماندگاری سیلاب در داخل منطقه بسیار زیاد است. از این رو، بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۲/۱۰ تا ۱۳۹۸/۰۲/۳۰ به صورت سری زمانی مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲)، داده‌های بارش روزانه مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای چریپس^۱ را نشان می‌دهد، چریپس یک مجموعه داده بارش با تفکیک مکانی بالا است که از تلفیق مشاهدات ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های زمینی تولید می‌شود. اعتبار این تصاویر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است [۳۰ و ۵۳]. بر اساس این داده‌ها، حداکثر بارش با مقدار ۲۷ میلی‌متر در روز ۱۳۹۸/۰۱/۰۵ رخ داده است. اوج‌های متعدد بارش در نمودار مشاهده می‌شوند که می‌توانند باعث تشدید مساحت و سطح پوشش سیلاب شوند.

بوده است [۵۲]. مطالعات نشان می‌دهد که در دو دهه اخیر، داده‌های SAR به طور گسترده برای پایش هیدرولوژیکی و نقشه برداری سیل با روش آستانه‌ای استفاده شده‌اند [۴۳، ۲۱، ۸، ۲۸، ۲۲، ۱۱، ۹، ۴۰، ۳۴، ۴۵، ۲۷، ۳۹، ۳، ۱۴، ۲۰، ۳۲ و ۱۷]. هم‌چنین بعضی از مطالعات با هدف تحلیل مکانی و زمانی سیلاب برای کاهش خسارت حیاتی، تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های میدانی برای برآورد خسارت به کار گرفته‌اند [۲، ۱۵ و ۱۸]. عمده مطالعات به شناسایی تک زمانه سیلاب بسنده کرده‌اند و کم‌تر به ماندگاری آب در کاربری‌های مختلف توجه شده است؛ بنابراین، هدف این پژوهش، شناسایی تاریخ زمانی سیلاب، بررسی ماندگاری آن در کاربری‌های مختلف و برآورد خسارت است. نوآوری این مطالعه نیز در دو جنبه است: اول رویکرد تاریخ زمانی برای پایش گسترش و پس‌روی سیلاب و دوم تلفیق نقشه ماندگاری آب با نقشه کاربری اراضی برای شناسایی مناطق سیل گیر می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی در مدیریت بحران، برنامه‌ریزی اقدامات امدادی، اولویت‌بندی مناطق آسیب‌دیده و تصمیم‌گیری برای کاهش خسارات ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی، شهر آق‌قلا در استان گلستان، ایران است. این منطقه به دلیل موقعیت جلگه‌ای، شیب کم و مجاورت با رودخانه گرگان‌رود، از مناطق مستعد سیلاب‌های رودخانه‌ای محسوب می‌شود. محدوده جغرافیایی آن بین طول‌های $54^{\circ}21'54''$ تا $54^{\circ}32'09''$ شرقی و عرض‌های $36^{\circ}58'46''$ تا $37^{\circ}03'56''$ شمالی



شکل ۲: مقدار بارش در داخل منطقه مورد مطالعه

معادله تابع شعاعی

از آنجایی که پدیده‌های زمینی و کلاس‌های تفکیکی در تصاویر سنجش‌ازدور معمولاً تداخل دارند و به‌صورت خطی جداپذیر نیستند، داده‌ها با استفاده از تابع هسته به یک فضای ابعاد بالاتر منتقل می‌شوند. استانداردترین تابع هسته در سنجش‌ازدور، تابع پایه شعاعی (RBF) است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad \text{رابطه (۲):}$$

در این معادله: $K(x_i, x_j)$ تابع هسته که میزان شباهت و فاصله بین پیکسل‌ها را در فضای جدید بسنجد و γ : پارامتر تنظیم‌کننده شعاع اثر و میزان پهنای تابع هسته که میزان نرمی یا پیچیدگی مرزهای طبقه‌بندی را کنترل می‌کند [۳۷]. پس از دریافت تصویر سنتینل-۲ نوری از سایت کوپرنیکوس در بستر نرم‌افزار ENVI نسخه ۵/۳ فرآیند طبقه‌بندی انجام شده است. تصاویر سطح دو داندلود شده که نیازی به پیش‌پردازش ندارد، سپس نمونه‌های تعلیمی از روی تصویر برداشت و نمونه تست از روی تصاویر گوگل ارث برای کاربری‌های مختلف برداشت شده و فرآیند طبقه‌بندی و اعتبارسنجی گزارش شده است.

به‌منظور شناسایی سیلاب نیز در این مطالعه از تصاویر راداری سنتینل-۱ استفاده شده است. تصاویر سنتینل-۱ موجود در GEE، پیش‌پردازش‌های رادیومتریک، هندسی، کاهش نویز اسپیکل و تبدیل به σ^0 (سیگما نات) را گذرانده‌اند. تمامی این پردازش‌ها در بستر گوگل ارث انجین انجام شده است و خیلی از موارد از قبل تصحیح شده است. جهت شناسایی و استخراج پهنه‌های سیلابی، تصاویر راداری با پلاریزاسیون‌های VV و VH به‌طور جداگانه با استفاده از تکنیک آستانه‌گذاری^۱ پردازش شدند. پلاریزاسیون VV برای استخراج گستره کلی سیلاب و آستانه‌گذاری مناسب‌تر بوده، درحالی‌که VH در مناطق دارای پوشش گیاهی و ساختارهای پیچیده عملکرد بهتری دارد؛ از این‌رو استفاده هم‌زمان از هر دو پلاریزاسیون به بهبود دقت نتایج کمک می‌کند [۵۱]. مبنای فیزیکی و اصول تفکیک پهنه‌های آبی در تصاویر رادار باند میکروویو (SAR)، بر پایه تفاوت رفتار بازپخش^۲ در سطوح صاف و زیر استوار است؛ سطوح آبی صاف به دلیل وقوع «انعکاس آینه‌ای»، سیگنال بسیار ناچیزی را به سمت سنجنده بازمی‌گردانند و در نتیجه با مقادیر پس پراکنش پایین، به رنگ تیره (سیاه) در تصویر ظاهر می‌شوند. به‌منظور ساختاردهی ریاضی به این فرآیند، تفکیک پیکسل‌های سیلاب از سایر پدیده‌ها بر اساس تابع باینری (دوتایی) زیر فرموله‌سازی شد:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) \leq T \\ 0 & \text{if } I(x, y) > T \end{cases} \quad \text{رابطه (۳):}$$

در این معادله: $I(x, y)$ معادل میزان ضریب پس‌پراکنش پیکسل در

به دلیل پوشش ابری گسترده در زمان سیلاب، تصاویر اپتیکی قابل‌استفاده نبودند؛ بنابراین در این مطالعه از تصاویر راداری سنتینل-۱ استفاده شد. سنتینل-۱، اولین ماهواره از برنامه کوپرنیکوس اتحادیه اروپا، شامل دو ماهواره فعال می‌باشد. این ماهواره‌ها دارای سنجنده راداری با باند C (فرکانس مرکزی ۵/۴۰۵ گیگاهرتز) هستند که در هر شرایط آب‌وهوایی و در شب و روز داده‌برداری می‌کنند [۱۰]. در این پژوهش از سری زمانی تصاویر سنتینل-۱ مطابق با تاریخ‌های مندرج در جدول (۱) استفاده شده است.

جدول ۱: تاریخ‌های زمانی اخذ تصاویر سنتینل-۱

شماره تاریخ زمانی	زمان شروع	زمان پایان
تاریخ اول	۲۰۱۹/۰۳/۰۱	۲۰۱۹/۰۳/۲۱
تاریخ دوم	۲۰۱۹/۰۳/۲۱	۲۰۱۹/۰۴/۱۱
تاریخ سوم	۲۰۱۹/۰۴/۱۱	۲۰۱۹/۰۴/۲۰
تاریخ چهارم	۲۰۱۹/۰۴/۲۰	۲۰۱۹/۰۴/۳۰
تاریخ پنجم	۲۰۱۹/۰۴/۳۰	۲۰۱۹/۰۵/۱۰
تاریخ ششم	۲۰۱۹/۰۵/۱۰	۲۰۱۹/۰۵/۲۰

برای تهیه نقشه کاربری اراضی، از تصاویر اپتیکی سنتینل-۲ استفاده گردید. نقشه پوشش زمین سال ۱۳۹۸ با روش طبقه‌بندی SVM استخراج شد. تصاویر سنتینل-۲ با دارا بودن باندهای ۱۰ متری، برای تهیه نقشه پوشش سطح زمین کارآمد هستند [۳۸].

روش پژوهش

در این مطالعه برای تهیه نقشه پوشش سطح زمین از روش یادگیری ماشین استفاده شد است. یک تکنیک یادگیری نظارت‌شده و ناپارامتریک در آمار و یادگیری ماشین است که به‌طور گسترده در طبقه‌بندی تصاویر سنجش‌ازدور استفاده می‌شود. هدف اصلی این الگوریتم، یافتن یک ابرصفحه جداکننده بهینه در فضای ویژگی‌هاست تا بتواند نمونه‌های آموزشی متعلق به کلاس‌های مختلف را با بیش‌ترین فاصله ممکن از یکدیگر تفکیک کند. در این میان، تنها بخش کوچکی از داده‌های آموزشی که دقیقاً روی مرزهای این فاصله قرار می‌گیرند و ابرصفحه را تعریف می‌کنند، «بردارهای پشتیبان» نامیده می‌شوند. این روش به دلیل عدم نیاز به فرض پیش‌دانسته درباره توزیع آماری داده‌ها و توانایی بالا در تعمیم‌دهی مناسب، حتی باوجود تعداد محدود نمونه‌های آموزشی، کارایی بسیار بالایی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای دارد [۳۷]. در زیر فرمول یادگیری ماشین ارائه شده است:

معادله ابرصفحه جداکننده

$$w \cdot x + b = 0$$

رابطه (۱):

در این معادله: x : بردار ویژگی‌های پیکسل، w : بردار وزن‌ها و b :

**جدول ۲: مساحت سیلاب در تاریخ‌های مختلف (کیلومترمربع)
رویداد مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ شهر آق‌قلا**

وضعیت نسبی	اختلاف	VH	VV	بازه زمانی
بدون سیلاب	0	0	0	تاریخ اول
سیلاب گسترده	۴/۷۷	۱۳/۱	۱۷/۸۷	تاریخ دوم
فروکش نسبی	۲/۹۱	۵/۵۶	۸/۴۷	تاریخ سوم
اوج بحران (پیک)	۸/۷۹	۱۹/۱۵	۲۷/۹۴	تاریخ چهارم
تخلیه تدریجی	۲/۸۶	۶/۳۷	۹/۲۳	تاریخ پنجم
سیلاب باقی‌مانده	-۱/۰۴	۳/۷۲	۲/۶۸	تاریخ ششم

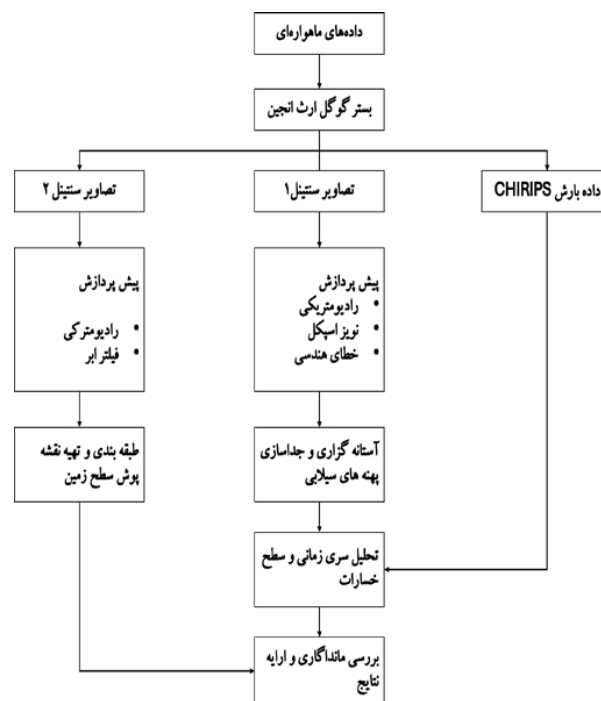
رسید. در این مرحله، اختلاف ۸/۷۹ کیلومترمربعی بین VH و VV نشان‌دهنده غلبه سطوح آبی صاف و باز است، چراکه پلاریزاسیون VV نسبت به ناهمواری‌های سطح آب حساسیت بیشتری دارد و مساحت بیشتری را به‌عنوان آب تشخیص می‌دهد.

در تاریخ ششم، رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود؛ برای اولین بار مقدار VH (۳/۷۲ کیلومترمربع) از VV (۲/۶۸ کیلومترمربع) پیشی گرفته است. این تغییر رفتار سیگنال راداری احتمالاً به دلیل فروکش کردن آب و باقی ماندن رطوبت در مناطق پوشیده از گیاه یا زمین‌های گل‌آلود است که باعث افزایش بازپخش در کانال VV شده است. در مجموع، نوسانات بین تاریخ اول، چهارم و ششم نشان‌دهنده یک رخداد سیلابی کوتاه‌مدت اما بسیار وسیع است که در تاریخ چهارم به حداکثر توان تخریبی رسیده و در تاریخ ششم به مراحل پایانی تخلیه رسیده است.

در این پژوهش، پلاریزاسیون VV به دلیل حساسیت بیشتر به انعکاس آینه‌ای از سطوح صاف آبی و ایجاد تضاد رادیومتریکی بالاتر بین آب و خشکی، به‌عنوان مبنای اصلی استخراج پهنه‌های سیلابی انتخاب شد. این ویژگی موجب شناسایی دقیق‌تر و گسترده‌تر آب‌های آزاد نسبت به پلاریزاسیون VH می‌شود. در مقابل، پلاریزاسیون متقاطع VH به دلیل تأثیرپذیری بیشتر از بازپخش حجمی و پدیده بازپخش چندگانه در مناطق دارای پوشش گیاهی یا ناهمواری‌های سطحی، معمولاً مساحت کم‌تری را به‌عنوان آب خالص شناسایی می‌کند؛ ازاین‌رو، برای پایش مستقیم پهنه‌های سیلابی نسبت به VV کارایی کم‌تری دارد [۵۱].

شکل (۶)، مناطق سیلابی را در تاریخ‌های مختلف نمایش می‌دهد. تحلیل زمانی پهنه‌های سیلابی استخراج‌شده از پلاریزاسیون VV نشان‌دهنده روند کاهشی منظم در مساحت غرقابی با افزایش تداوم سیلاب است. بیش‌ترین مساحت درگیر مربوط به سیلاب‌های آبی و گذرا در یک تاریخ با مقدار ۱۰/۱۳ کیلومترمربع است که حدود ۴۱ درصد از کل اراضی متأثر را شامل می‌شود. با افزایش تداوم به دو تاریخ، مساحت به ۷/۴۹ کیلومترمربع کاهش یافت. در تاریخ‌های سه و چهار، به ترتیب مقادیر ۲/۹۰ و ۲/۳۱ کیلومترمربع

مختصات (x, y) تصویر رادار برحسب دسی‌بل، T معادل مقدار آستانه مرزی بهینه برای جداسازی آب از خشکی است و $f(x, y)$ نقشه باینری خروجی است که در آن، مقدار یک نشان‌دهنده کلاس سیلاب (آب) و مقدار صفر نشان‌دهنده سایر عوارض (خشکی) می‌باشد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده برای پلاریزه VV مقادیر کم‌تر از منفی ۲۰ دسیبل مناطق سیلابی و برای پلاریزه VH مقادیر کم‌تر از منفی ۲۵ دسیبل برای شناسایی سیلاب استفاده شده است. شکل (۳)، روند نمای کلی مراحل روش تحقیق را نشان می‌دهد. بر اساس این روند نمای نحوه اخذ داده‌ها و پردازش آن‌ها در محیط گوگل ارث انجین و استخراج پهنه سیل و طبقه‌بندی نمایش داده شده است.



شکل ۳: روند نمای روش تحقیق

نتایج

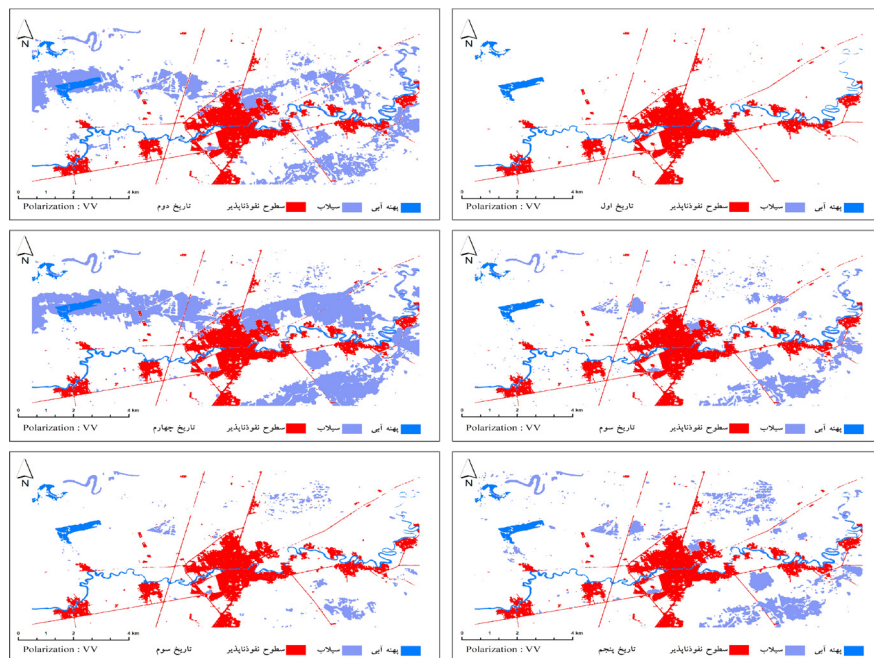
تغییرات زمانی و مکانی سیلاب بر اساس پلاریزه‌های VV و VH در شکل (۴) و (۵) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیش‌ترین سطح سیلاب در تاریخ چهارم رخ داده است. در جدول (۲) مساحت سیلاب در تاریخ‌های مختلف نمایش داده شده است.

بررسی تاریخ زمانی نشان می‌دهد منطقه مورد مطالعه چرخه‌ای از خشکی تا بحران سیلابی و سپس بازگشت به پایداری را تجربه کرده است. در تاریخ اول، منطقه فاقد آب‌گرفتگی بود، اما در تاریخ دوم مساحت سیلاب در کانال VV به ۱۷/۸۷ کیلومترمربع رسید که نشان‌دهنده آغاز یک پدیده شدید جوی یا محیطی است. نقطه اوج رخداد در تاریخ چهارم مشاهده می‌شود که مساحت سیلاب در هر دو پلاریزاسیون به بیشینه خود (۲۷/۹۴ کیلومترمربع در VV)

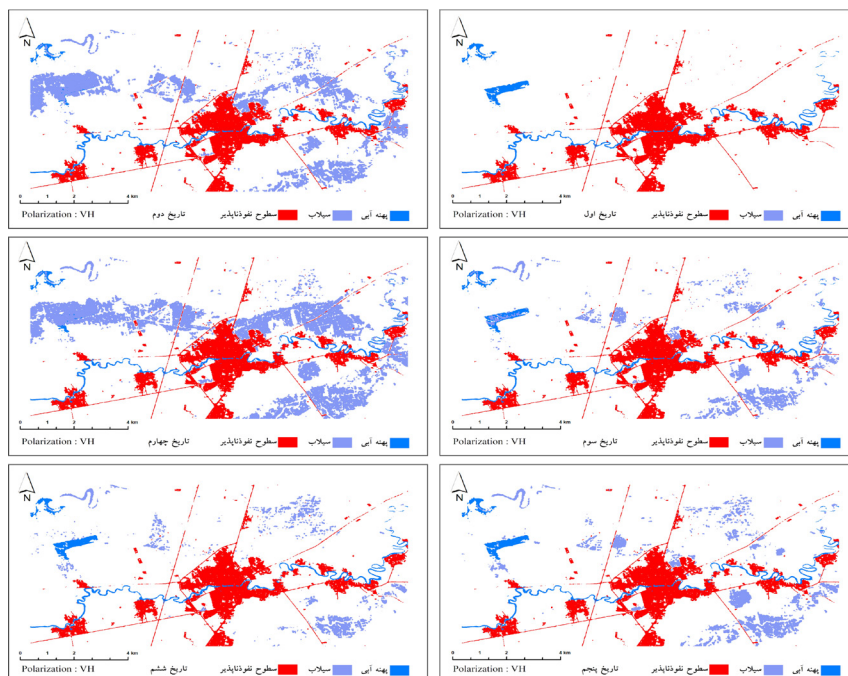
زمانی مطالعه است.

شکل (۷)، نقشه پوشش سطح زمین مستخرج از تصاویر سنتینل-۲ را نشان می‌دهد، نتایج اعتبارسنجی ضریب کاپا ۰/۸۵ و صحت کلی ۹۱ درصد را نشان می‌دهد. تحلیل دینامیک غرقابی در اراضی کشاورزی و بایر با استفاده از تقاطع لایه‌ها نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی با مجموع درگیری ۱۹/۶۰ کیلومترمربع در طول تاریخ‌های پنج‌گانه بحران (تاریخ ۲ تا ۶)، اصلی‌ترین سیل‌گیری منطقه

ثبت گردید. درنهایت، هسته پایدار و بحرانی سیلاب که در تمام پنج تاریخ غرقاب مانده است، مساحتی معادل ۱/۷۲ کیلومترمربع را به خود اختصاص داد. انطباق این آمار با ویژگی‌های بازپخش در باند VV نشان‌دهنده دقت این پلاریزاسیون در تفکیک آب از عوارض پیچیده است؛ کاهش مساحت به ۱/۷۲ کیلومترمربع در تاریخ پنجم، بیانگر شناسایی دقیق مناطقی با کم‌ترین بازپخش حجمی و بیش‌ترین پایداری آب (مانند اراضی پست و کانال‌های اصلی) در کل بازه



شکل ۴: تغییرات زمانی و مکانی سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ بر اساس پلاریزه VV در شهر آق‌قلا



شکل ۵: تغییرات زمانی و مکانی سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ بر اساس پلاریزه VH در شهر آق‌قلا

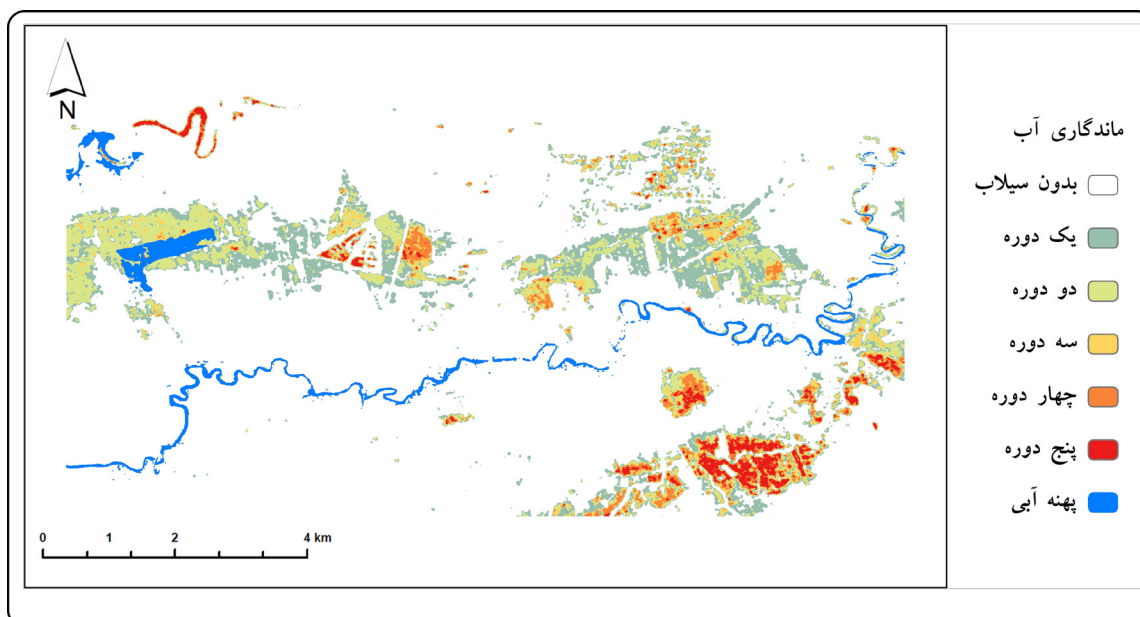
محسوب می‌شوند.

نرخ تخلیه سیلاب دارای اهمیت کلیدی است. از تاریخ دوم به سوم، کاهش حدود ۲۸ درصدی مساحت غرقابی در اراضی کشاورزی مشاهده می‌شود، اما این روند در تاریخ‌های پایانی (پنج‌شنبه و ششم) بسیار کند شده و به ترتیب ۱/۶۳ و ۱/۳۶ کیلومترمربع از اراضی همچنان غرقاب باقی مانده‌اند. تداوم پهنه سیلابی در این مناطق احتمال بروز خسارات ثانویه، به‌ویژه در اراضی کشاورزی را افزایش می‌دهد (جدول ۳). بررسی نتایج نشان داد که نواحی با ماندگاری بیش‌تر سیلاب، در مقایسه با سایر مناطق، در فاصله بیش‌تری از مسیر

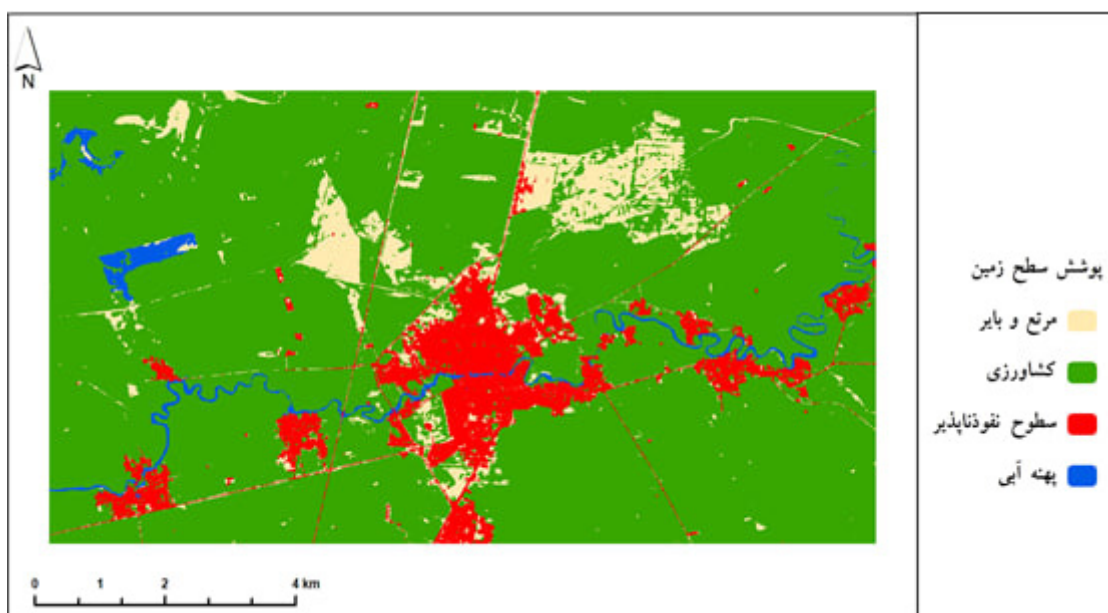
اصلی رودخانه قرار دارند که بیانگر نقش توپوگرافی و محدودیت زهکشی در تداوم آب‌گرفتگی این مناطق است.

جدول ۳: مساحت کاربری‌های مختلف زیر سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ (کیلومترمربع)

کاربری اراضی	تاریخ ۲	تاریخ ۳	تاریخ ۴	تاریخ ۵	تاریخ ۶
کشاورزی	۸/۵۴	۶/۱۱	۱/۹۵	۱/۶۳	۱/۳۶



شکل ۶: ماندگاری سیلاب مورخ اسفند ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ بر اساس پلاریزه ۷۷



شکل ۷: نقشه پوشش سطح زمین بر اساس تصاویر سنتینل ۲

4. Archer, N. A., Bonell, M., Coles, N., MacDonald, A. M., Auton, C. A., and Stevenson, R. 2013. Soil characteristics and landcover relationships on soil hydraulic conductivity at a hillslope scale: A view towards local flood management. *Journal of Hydrology*, 497, 208–222.

5. Baker, V. R., and Costa, J. E. 2020. Flood power. In *Catastrophic Flooding*, Routledge, 1–21.

6. Bentivoglio, R., Isufi, E., Jonkman, S. N., and Taormina, R. 2022. Deep learning methods for flood mapping: A review of existing applications and future research directions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–50.

7. Cian, F., Blasco, J. M., and Ivanescu, C. 2024. Improving rapid flood impact assessment: An enhanced multi-sensor approach including a new flood mapping method based on Sentinel-2 data. *Journal of Environmental Management*, 369, 122326.

8. Costa, M. P. 2004. Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation communities in the Amazon floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10), 1817–1835.

9. Dasgupta, A., Grimaldi, S., Ramsankaran, R. A., Pauwels, V. R., and Walker, J. P. 2018. Towards operational SAR-based flood mapping using neuro-fuzzy texture-based approaches. *Remote Sensing of Environment*, 215: 313–329.

10. Filipponi, F. 2019. Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Proceedings*, 18(1), 11.

11. Giustarini, L., Vernieuwe, H., Verwaeren, J., Chini, M., Hostache, R., Matgen, P., Verhoest, N. E., and De Baets, B. 2015. Accounting for image uncertainty in SAR-based flood mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 70–77.

12. Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., and Levermann, A. 2014. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *PNAS*, 111(9), 3292–3297.

13. Islam, T., Zeleke, E. B., Afroz, M., and Melesse, A. M. 2025. A systematic review of urban flood

مراتع و بایر	۱/۳۹	۱/۰۶	۰/۶۷	۰/۵۵	۰/۳۳
پهنه‌های آبی	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۰۱
سطوح نفوذناپذیر	۰/۰۴	۰/۰۱	۰	۰	۰

نتیجه‌گیری

تحلیل دینامیک زمانی-مکانی سیلاب نشان داد که الگوی پهنه‌های غرقابی تابع ویژگی‌های توپوگرافیک و نوع کاربری اراضی است. عدم وقوع غرقابی در تاریخ اول و افزایش ناگهانی آن در تاریخ دوم (۱۷/۴۷ کیلومترمربع)، بیانگر ماهیت سیلاب‌های ناگهانی در منطقه است. اراضی کشاورزی با بیش از ۸۰ درصد از کل مساحت غرقابی در تمامی تاریخ‌ها، بیش‌ترین سیل‌گیری را داشته‌اند.

درگیری اراضی کشاورزی در تاریخ‌های دوم و سوم (۸/۵۴ و ۶/۱۱ کیلومترمربع) نشان‌دهنده استقرار در پادگان‌های سیلابی و حاشیه رودخانه است. تداوم ۱/۳۶ کیلومترمربع غرقابی تا تاریخ ششم، درحالی‌که سایر کاربری‌ها سریع‌تر پایدار شده‌اند، بیانگر حبس آب و ضعف زهکشی در اراضی کشاورزی است که به بافت خاک و نبود زیرساخت مناسب نسبت داده می‌شود.

از نظر هیدرولوژیکی، وجود تأخیر زمانی در اوج سیلاب مشاهده شد؛ به‌طوری‌که بیشینه پهنه سیلاب در تاریخ چهارم (۲۷/۹۴ کیلومترمربع) ثبت گردید. این موضوع نشان‌دهنده ناتوانی اولیه شبکه زهکشی طبیعی در تخلیه رواناب و وقوع اوج سیلاب پس از اشباع کانال‌ها است.

در مقابل، سطوح نفوذناپذیر کم‌ترین تأثیرپذیری (۰/۰۵ کیلومترمربع) را نشان دادند. درمجموع، مساحت مناطق سیل‌گیری انباشته در اراضی کشاورزی و مراتع (۲۳/۵۹ کیلومترمربع) ضرورت بازنگری در مدیریت کاربری اراضی و تقویت زیرساخت‌های زهکشی را نشان می‌دهد. اگرچه تصاویر راداری ابزار مناسبی برای پایش سیلاب هستند، اما عواملی مانند پوشش گیاهی، ناهمواری سطح و انتخاب آستانه می‌توانند موجب عدم قطعیت در استخراج پهنه‌های سیلابی شوند. استفاده از داده‌های مکمل در مطالعات آینده می‌تواند به بهبود دقت نتایج کمک کند.

منابع

1. Akter, A., Sawon, F. S. 2025. Hydrological modeling of the selected flash flood-prone rivers. *Natural Hazards*, 121(4), 3997–4021.

2. Amatebelle, C. E., Owolabi, S. T., Ogundeji, A. A., and Okolie, C. C. 2025. A systematic analysis of remote sensing and geographic information system applications for flood disaster risk management. *Journal of Spatial Science*, 70(3), 441–467.

3. Amitrano, D., Di Martino, G., Di Simone, A., and Imperatore, P. 2024. Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. *Remote Sensing*,

23. Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I., and Balogun, W. 2021. Flood hazard mapping methods: A review. *Journal of Hydrology*, 603, 126846.
24. Munawar, H. S., Hammad, A. W., and Waller, S. T. 2022. Remote sensing methods for flood prediction: A review. *Sensors*, 22(3), 960.
25. Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., and Galve, J. P. 2018. Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote Sensing*, 10(11), 1673.
26. Pal, S., and Singha, P. 2022. Analyzing sensitivity of flood susceptible model in a flood plain river basin. *Geocarto International*, 37(24), 7186–7219.
27. Pramanick, N., Acharyya, R., and Mukherjee, S. 2022. SAR-based flood risk analysis: A case study Kerala flood 2018. *Advances in Space Research*, 69(4), 1915–1929.
28. Rahman, M. R. 2006. Flood inundation mapping and damage assessment using multi-temporal RADARSAT and IRS 1C LISS III image. *Asian Journal of Geoinformatics*, 6(2), 11–21.
29. Rashidiyan, M., and Rahimzadegan, M. 2024. Investigation and evaluation of land use–land cover change effects on current and future flood susceptibility. *Natural Hazards Review*, 25(1), 04023049.
30. Rivera, J. A., Marianetti, G., and Hinrichs, S. 2018. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 213: 437–449.
31. Sadiq, R., Imran, M., and Ofli, F. 2023. Remote sensing for flood mapping and monitoring. *International Handbook of Disaster Research*, 1–9.
32. San Jose, I. K., Wiguna, S., Kametaka, R., Adriano, B., Mas, E., and Koshimura, S. 2026. Evaluation of open-source SAR-based flood datasets for flood extent mapping in emergency settings. *Progress in Disaster Science*, 29, 100507.
33. Savari, M., Jafari, A., and Sheheytavi, A. 2025. Determining factors affecting flood risk perception among local communities in Iran. *Scientific Reports*, 15(1), 4076.
34. Sharifi, A. 2020. Flood mapping using relevance vector machine and SAR data: A case study from susceptibility mapping: Remote sensing, machine learning, and other modeling approaches. *Remote Sensing*, 17(3), 524.
14. Jiang, X., and Zeng, Z. 2025. Empowering multi-source SAR flood mapping with unsupervised learning. *Environmental Research Letters*, 20(1), 014006.
15. Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., and Marcial-Pablo, M. D. 2020. Rapid urban flood damage assessment using high resolution remote sensing data and an object-based approach. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 906–927.
16. Kaya, C. M., and Derin, L. 2023. Parameters and methods used in flood susceptibility mapping: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 14(6), 1935–1960.
17. Khan, K. M., Wang, B., Dey, H., Pradhananga, D., and Smith, L. C. 2026. Flood susceptibility mapping of the Kosi megafan using ensemble machine learning and SAR data. *Remote Sensing*, 18(8), 1158.
18. Klemas, V. 2015. Remote sensing of floods and flood-prone areas: An overview. *Journal of Coastal Research*, 31(4), 1005–1013.
19. Landuyt, L., Van Wesemael, A., Schumann, G. J., Hostache, R., Verhoest, N. E., and Van Coillie, F. M. 2018. Flood mapping based on synthetic aperture radar: An assessment of established approaches. *IEEE TGRS*, 57(2), 722–739.
20. Li Z, Tong R, Zhao Z, and Tian F. 2025. Multi-Source SAR-Based Rural Flood and Partially Submerged Vegetation Mapping Using Fuzzy Logic and Machine Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
21. Liu, Z., Huang, F., Li, L., and Wan, E. 2002. Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3669–3679.
22. Matgen, P., Hostache, R., Schumann, G., Pfister, L., Hoffmann, L., and Savenije, H. H. 2011. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7–8), 241–252.

45. Zotou I, Karamvavis K, Karathanassi V, and Tsihrintzis VA. 2022. Potential of Two SAR-Based Flood Mapping Approaches in Supporting an Integrated 1D/2D HEC-RAS Model, *Water*, 14, 4020.
46. Uddin, K., Matin, M. A., and Meyer, F. J. 2019. Operational Flood Mapping Using Sentinel-1 SAR Images: Bangladesh case. *Remote Sensing*, 11(13), 1581.
47. Hansen, M., Vejby, J., & Koch, J. (2025). Flood mapping using Sentinel-1 imagery with topographical and hydrological contextualization: Case study from Ribe, Denmark. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 143, 104816.
48. Emadeddin, S., and Mohammadghasemi, M. 2021. Monitoring flood expansion maps using SAR images (Case study: April 2019 flood, Aqqala County). *Journal of Climate Change Research*, 2, 79–96. DOI: 10.30488/ccr.2021.308697.1053 (In Persian).
49. Soleimani, K., Darvishi, Sh., and Zaghi, M. H. 2024. Assessment of flood risk of the 2019 Aqqala flood using remote sensing and multi-criteria decision-making models. *Journal of Geographical Spatial Planning*, 14(1), 77–90. (In Persian).
50. Haddadi, N., and Heidari-Mozaffar, M. (n.d.). Flood-prone area detection using Google Earth Engine (Case study: Aqqala County). *Proceedings of the First National Conference on Geospatial Analysis*. (In Persian).
51. Parida BR, Pandey AC, Kumar S, and Tripathi G. Comparative flood area analysis based on change detection and binarization methods using Sentinel-1 synthetic aperture radar data. *In Radar Remote Sensing 2022 Jan 1* (pp. 93-108). Elsevier.
52. Samieh, E., and Ghasemi Masoud, M. (2021). Monitoring flood extent maps using Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery (Case study: Aq Qala flood, April 2019). *Climate Change Research*, 2(6), 79–96. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.308697.1053> (In Persian).
53. Barkhordari, Z., and Shamsoddini, A. 2025. Spatiotemporal assessment of monthly precipitation based on CHIRPS, TRMM, and MERRA datasets in Iran. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 17(2), 55–78. <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.234268.1194> (In Persian).
- Aqqala, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(9), 1289–1296.
35. Sharma, T. P., Zhang, J., Koju, U. A., Zhang, S., Bai, Y., and Suwal, M. K. 2019. Review of flood disaster studies in Nepal: A remote sensing perspective. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34: 18–27.
36. Shokati, H., Seufferheld, K. D., Fiener, P., and Scholten, T. 2026. Rapid flood mapping from aerial imagery using fine-tuned SAM and ResNet U-Net. *HESS*, 30(3), 743–756.
37. Singh, A., Sreeparvathy, V., Debdut, S., Pregolato, M., and Wright, N. 2025. A critical review of flood risk assessment in Kerala post-2018. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58: 102262.
38. Thanh Noi, P., and Kappas, M., 2017. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*, 18(1), p.18.
39. Tupas, M. E., Roth, F., Bauer-Marschallinger, B., and Wagner, W. 2024. Assessment of time-series-derived no-flood references for SAR-based Bayesian flood mapping. *GIScience & Remote Sensing*, 61(1), 2427304.
40. Uddin, K., Matin, M. A., and Meyer, F. J. 2019. Operational flood mapping using Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 11(13), 1581.
41. Wang L, Cui S, Li Y, Huang H, Manandhar B, Nitivattananon V, Fang X, and Huang W. 2022. A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 1, 8(11).
42. Yousefi S, Mirzaee S, Keesstra S, Surian N, Pourghasemi HR, Zakizadeh HR, and Tabibian S. 2018. Effects of an extreme flood on river morphology (case study: Karoon River, Iran). *Geomorphology*, 1, 304:30-9.
43. Zhao, J., Li, M., Li, Y., Matgen, P., and Chini, M. 2024. Urban flood mapping using SAR data. *IEEE GRSM*, 13(1), 237–268.
44. Zope PE, Eldho TI, and Jothiprakash V. 2016. Impacts of land use–land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena*, 1, 145:142-54.



Abstract

Monitoring and Analysis of Flood Duration from March to May 2019 in Aqqala Using Synthetic Aperture Radar (SAR)P. Safaei Anaraki¹ and N. Mostofi^{*2}

Received: 2026/05/31 Accepted: 2026/07/14

Rapid and accurate monitoring of flood extent and duration is essential for effective disaster management and reducing economic losses, particularly in lowland areas where floodwaters may persist for extended periods. This study aimed to monitor and analyze flood duration in Aqqala, Iran, from March to May 2019 using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery processed within the Google Earth Engine (GEE) platform. Six temporal periods spanning March to May 2019 were analyzed using both VV and VH polarizations. In addition, a land use/land cover (LULC) map was generated from Sentinel-2 imagery using the Support Vector Machine (SVM) classification algorithm. The classification achieved an overall accuracy of 91% and a Kappa coefficient of 0.85. The results revealed the complete flood cycle, from rapid inundation to gradual drainage, across the study area. The maximum flood extent occurred during the fourth observation period, reaching 27.94 km². Agricultural lands experienced the greatest inundation, with 19.60 km² affected, indicating their high vulnerability to prolonged flooding. Furthermore, 1.36 km² of persistent flooded areas remained until the sixth observation period (20–30 May 2019), suggesting inadequate drainage conditions. In contrast, urban areas exhibited a maximum inundation extent of only 0.04 km², reflecting more efficient drainage. Overall, the findings demonstrate the effectiveness of Sentinel-1 SAR imagery and the Google Earth Engine platform for monitoring flood duration and supporting flood hazard assessment and disaster management.

Keywords: Flood Duration, Google earth Engine (GEE), Land Use/Land Cover (LULC), Sentinel-1

1- Department of Surveying Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2-Department of Surveying Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, corresponding author email: n_mostofi@iau.ac.ir