

تصاویر ماهواره‌ای و فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه از طریق پلتفرم‌هایی مانند گوگل ارث انجین، داده‌های ارزشمندی را برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی در مناطق سیل‌گیر ارائه می‌کنند.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر به پایش وقایع سیلابی به وقوع پیوسته با دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه هیدرومتری سد کهک پرداخته شد. هامون‌های سیستان، به ویژه در سال‌های اخیر، تنها از طریق آب ورودی از رودخانه‌های افغانستان به ایران در مواقع سیلابی آبیگری شده‌اند. لذا پایش سطح آبیگر هامون‌های سیستان در وقایع سیلابی و سطوح سیل‌گیر دشت سیستان در طی زمان، با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای (در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱) انجام شد.

برای این منظور از تصاویر ماهواره‌ای لندست (شاخص NDVI، الگوریتم‌های شناسایی پهنه‌های آبی انتقال و فصلی) در محیط سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. بدین منظور در اولین گام، تاریخ‌های وقوع سیلاب، در ایستگاه هیدرومتری سد کهک واقع بر رودخانه سیستان در محل ورودی از رودخانه هیرمند به ایران در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ استخراج شد. سپس در چند تاریخ شامل قبل از وقوع سیلاب، اولین تاریخ وجود تصویر بعد از وقوع سیلاب و همچنین بعد از اتمام آبیگری (بر اساس هیدروگراف روزانه ایستگاه سد کهک) تصاویر ماهواره‌ای لندست دانلود شد. سپس به منظور پردازش و استخراج اطلاعات از تصاویر، ابتدا به پیش پردازش و در نهایت شناسایی پهنه‌های آبیگر هامون‌های سیستان در وقایع سیلابی با استفاده از شاخص NDVI و با استفاده از باندهای مادون قرمز و قرمز پرداخته شد. هم‌چنین با استفاده از الگوریتم‌های GSWE، توزیع زمانی و مکانی سطوح آب در مقیاس جهانی و در طول سه دهه گذشته پایش شد.

نتایج و بحث

با استفاده از تاریخ‌های وقوع سیلاب در ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک واقع بر رودخانه سیستان (در محل ورودی از رودخانه هیرمند به ایران)، در سه مقطع زمانی شامل، قبل از وقوع سیلاب، اولین تاریخ وجود تصویر ماهواره‌ای بعد از وقوع سیلاب و بعد از اتمام آبیگری (بر اساس هیدروگراف روزانه ایستگاه سد کهک)، تصاویر ماهواره‌ای لندست دانلود شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸ دبی حدکثر لحظه‌ای، معادل ۹۰۱/۸۳ مترمکعب بر ثانیه بوده که در تاریخ ۱۳۶۸/۰۱/۱۸ به وقوع پیوسته است. پایش تصاویر ماهواره‌ای لندست در سه مقطع زمانی قبل، حین و پس از وقوع سیلاب، نشان می‌دهد که با ورود جریان سیلابی از رودخانه هیرمند به ایران پهنه

بررسی تغییرات پهنه‌های سیل‌گیر هامون‌های سیستان در سامانه Google Earth Engine

سمانه رضوی‌زاده^{۱*}، فاطمه درگاهیان^۲، آزاده گوهردوست^۳، سارا تیموری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

<https://doi.org/10.22034/18.67.2>

چکیده مبسوط

مقدمه

سیل یک خطر طبیعی قابل توجه است که هر ساله، میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد و خسارات زیادی به اموال، زیرساخت‌ها و بوم‌سازگان‌های مختلف وارد می‌کند. بررسی تغییرات مناطق سیلابی برای درک و کاهش این اثرات بسیار مهم است. تحقیقات علمی نشان می‌دهد که دشت‌های سیلابی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله تغییرات آب و هوا، شهرنشینی و شیوه‌های مدیریت رودخانه است. تغییرات آب و هوایی، به ویژه در سال‌های اخیر، منجر به افزایش شدت بارش‌های رگباری شده است که به نوبه خود پهنه‌های سیل‌گیر را گسترش و خطر سیل را افزایش می‌دهد. شهرنشینی و توسعه مناطق مسکونی نیز با افزایش رواناب سطحی و کاهش مناطق نفوذ طبیعی آب، حجم و دبی حداکثر سیلاب را تشدید می‌کند.

اولین قدم جهت مدیریت بهینه سیلاب شناسایی مناطق سیل‌گیر، تهیه نقشه محدوده سیل‌گیر و پایش تغییرات سطوح آن در طی زمان است. تهیه نقشه پهنه‌های سیل‌گیر پس از واقعه و پایش مستمر وقایع سیلابی، معمولاً سخت و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یکی از مهم‌ترین انتخاب واقع‌بینانه برای این موضوع است. از سوی دیگر تحولات اخیر در پایش سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیز، پتانسیل پایش سیلاب را در جهان به صورت چشمگیری افزایش داده است.

- ۱- نویسنده مسئول و استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: srazavizade@gmail.com
- ۲- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران، ایران.
- ۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات صنوبر و گیاهان سریع‌الرشد، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران، ایران.
- ۴- محقق، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

آبگیر تالاب‌های هامون افزایش یافته و مساحت پهنه آبرگیر هامون‌های سیستان بعد واقعه سیلابی و در تاریخ ۱۳۶۸/۰۱/۱۸، برابر با ۴/۲۶۱۴ کیلومتر مربع بوده است. در سال‌های آبی ۱۳۷۰-۱۳۶۹ و ۱۳۹۵-۱۳۹۴ نیز، دبی حدکثر لحظه‌ای به ترتیب معادل ۱۱۷۸ و ۶۲۴/۶ مترمکعب بر ثانیه بوده که در تاریخ‌های ۱۳۶۹/۰۲/۱۴ و ۱۳۹۵/۰۱/۲۲ به وقوع پیوسته است. استخراج پهنه‌های آبرگیر تالاب‌های سیستان با استفاده از شاخص NDVI از تصاویر ماهواره‌ای لندست، نشان می‌دهد که در این دو واقعه سیلابی حداکثر پهنه آبرگیر تالاب‌های هامون حاصل از جریان سیلابی و پس از ورود سیلاب بوده است که به ترتیب مساحتی برابر با ۴۴۷۷/۶ و ۱۳۱۹/۸ کیلومتر مربع بوده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه سه واقعه سیلابی سالانه حداکثری در دشت سیستان، نشان داد که آبرگیری هامون‌های سیستان کاملاً متأثر از وقوع سیلاب است. مقایسه گام به گام نقاط شروع تا انتهای هیدروگراف سیلاب با پهنه‌های سیلابی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در همان گام‌های زمانی، نشان‌دهنده تطابق کامل سطح پهنه آبرگیر با اندازه دبی سیلابی است. همچنین مطالعه تغییرات پهنه‌های آبرگیر هامون‌های سیستان با استفاده از لایه GSWE، به خوبی تغییرات رخ داده در این پهنه‌ها را در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهند. لذا نتایج بدست آمده از مطالعه آبرگیری هامون‌های سیستان با استفاده از نقشه‌های GSW نشان داد که سطح آبرگیر هامون‌ها در بازه زمانی بلند مدت، کاهش شدیدی را نشان می‌دهد بطوریکه تغییرات رخ داده به گونه‌ای بوده که در سال ۲۰۲۰ نسبت به ۱۹۸۴، بیش از ۷۴ درصد از مساحت هامون‌های سیستان به صورت فصلی آبرگیری می‌شود. همچنین از نظر مطالعه وضعیت آبرگیری ماهانه بر اساس پایش پهنه‌های آبرگیر متوسط بلند مدت نیز، نتایج نشان داد که تنها بخش کوچکی از دشت سیستان (حدود ۱۱ هزار هکتار) بطور متوسط در تمام مدت سال آبدار است که این مساحت نیز متعلق به چاه نیمه‌هاست و حدود ۵/۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. همچنین بیش از دو میلیون هکتار از سطح منطقه مورد مطالعه، به طور متوسط تنها در یک ماه از سال آبدار بوده که معادل ۸۸/۴ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه (هامون‌های سیستان، رودخانه‌های مشرف به آن و چاه نیمه‌ها) را شامل می‌شود.

کلیدواژه‌ها: هیدروگراف سیلاب، الگوریتم *transition*، الگوریتم

seasonality، دشت سیستان

مقدمه

سیل به عنوان یکی از خطرناک‌ترین مخاطرات طبیعی، منجر به خسارات جانی و مالی جدی در جهان می‌شود. برای بسیاری از رودخانه‌ها، سیل یک واقعه طبیعی و منظم است که در آن کانال رودخانه ظرفیت انتقال حجم آب ناشی از بارندگی شدید، رگبار فصلی یا ذوب فصلی برف را نداشته و مازاد جریان از بستر رودخانه سرریز کرده و کرانه‌های رودخانه‌ها را در برمی‌گیرد. با این حال، اغلب به دلیل خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب، وقایع سیلابی به عنوان مخاطره در نظر گرفته می‌شوند و وقایع سیلابی سالانه ده‌ها

هزار کشته و میلیاردها دلار خسارت اقتصادی به بار می‌آورند [۱، ۲]. با توجه به پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم، تغییرات الگوی کاربری اراضی و نیز افزایش جمعیت، پیش‌بینی می‌شود که میزان وقوع و شدت وقایع سیلابی تا سال ۲۰۵۰ تشدید و خسارات زیادی را به همراه داشته باشند [۴، ۵، ۷]. لذا شناسایی مناطق سیل‌گیر و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری، یک اقدام ضروری برای تصمیم‌گیران در جهت جلوگیری و مدیریت خسارات ناشی از سیل است. منظور از پتانسیل سیل‌گیری، احتمال آبرگیری یک منطقه خاص بر اثر واقعه سیلابی است [۳، ۸].

تهیه نقشه پهنه‌های سیل‌گیر پس از واقعه و پایش مستمر وقایع سیلابی، معمولاً سخت و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تنها انتخاب واقع‌بینانه برای این موضوع است. از سوی دیگر تحولات اخیر در پایش سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نیز، پتانسیل پایش سیلاب‌ها را در جهان به صورت چشمگیری افزایش داده است.

دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای در سری‌های زمانی مختلف به صورت رایگان مانند تصاویر ماهواره‌ای Landsat، Sentinel-1A و Sentinel-1B، امکان پایش تغییرات سطح زمین با رزولوشن زمانی و مکانی نسبتاً بالا را فراهم می‌کند [۲۹].

همچنین ظهور ساختارهای محاسباتی ابری، منجر به ایجاد جهش در پایش سطح زمین شده است که این امکان را برای کاربران فراهم می‌کند تا با دسترسی به آرشیوهای کامل تصاویر ماهواره‌ای، نیاز به دانلود و ذخیره‌سازی این داده‌ها در حجم‌های بالا مرتفع شود. این سامانه‌ها منجر افزایش سرعت دسترسی به حجم بالایی از داده‌ها از یکسو و از سوی دیگر عدم نیاز به انجام پیش پردازش‌ها سنتی می‌شوند [۱۸]. سامانه گوگل ارت انجین^۱ (GEE)، یک پلتفرم نوین است که توسط شرکت گوگل ایجاد شده است و تصاویر ماهواره‌ای و محصولات^۲ حاصل از آن‌ها در سطح جهان را در سری‌های زمانی مختلف در اختیار کاربران قرار می‌دهد [۱۳]. GEE برای مطالعات سطح زمین در مقیاس جهانی و همچنین منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد که نمونه این مطالعات شامل مطالعات پوشش جنگلی، آب‌های سطحی، مناطق جمعیتی، اراضی کشاورزی و خاک و غیره می‌شود [۱۵، ۱۷، ۲۷، ۳۰].

این سامانه از یکسو تصاویر ماهواره‌ای پیش پردازش شده را در سری‌های زمانی مختلف به صورت خام در اختیار کاربران قرار داده و از سوی دیگر با انجام پردازش در محیط ابری و با استفاده از شاخص‌ها و الگوریتم‌های مناسب، محصولات متنوعی را تهیه و در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در خصوص محصول آب، این محصول در پلتفرم GEE و تحت برنامه کوپرنیکوس^۳ با شاخص‌های مختلفی تهیه و در دسترس کاربران بوده است. در خصوص پهنه‌بندی سیلاب پژوهش‌های متعددی انجام شده است که در ادامه به مواردی اشاره می‌شود.

1. Google Earth Engine
2. products
3. Copernicus

پوراگر می و همکاران [۲۵]، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱- و با استفاده از روش آستانه‌گذاری و اعمال عملیات ریاضی بر روی تصویر، محدوده سیلاب را استخراج کردند. نتایج نشان داد که روش آستانه‌گذاری روی تصاویر راداری، روشی سریع و مناسب برای استخراج سریع نقشه سیل است.

گلشن و همکاران [۱۲] نیز با استفاده از مدل نسبت فراوانی احتمالاتی حساسیت حوزه آبخیز تالار به سیل را ارزیابی نمودند. ایشان به منظور مدل‌سازی حوضه نسبت به سیل‌خیزی، از ۱۰ پارامتر مؤثر مؤثر در سیل‌خیزی شامل طبقات ارتفاعی، شیب زمین، انحنا، زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، قدرت رود، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، گروه هیدرولوژیکی خاک، حداکثر عمق خاک و کاربری اراضی استفاده نمودند. در این پژوهش در نهایت نقشه احتمال سیل منطقه مورد مطالعه توسط روش نسبت فراوانی تهیه شد. بر اساس نقشه استعداد سیل‌گیری، حساسیت به سیل حوضه آبخیز تالار به صورت پنج کلاس با حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم نشان داده شد. نتایج نشان داد روش نسبت فراوانی با دقت ۸۰ درصد از قابلیت بالایی در شناسایی مناطق حساس به وقوع سیل در حوزه آبخیز تالار برخوردار بوده است.

از طرفی، شریفی پیچون و پرنون [۲۴]، به ارزیابی و تحلیل فضایی سیل‌گیری رودخانه قره‌سو با استفاده از منطق فازی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین میزان سیل‌گیری در حوالی شهر روانسر و همچنین در شهر کرمانشاه وجود دارد. کم‌ترین میزان سیل‌گیری در ارتفاعات، نواحی با شیب زیاد و مناطق با فاصله زیاد از مسیر رودخانه دیده داشت.

در پژوهشی پرورش و همکاران [۲۰]، با استفاده از مدل الکتره و فازی تاپسیس، به اولویت‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های حوزه آبخیز سرخون بندرعباس پرداختند. شاخص‌های مهم برای ورود اطلاعات به مدل بر اساس نظرات کارشناسی و مرور منابع علمی موجود از هفت معیار شامل نفوذپذیری، ضریب گراویلوس، شیب متوسط وزنی حوضه، پوشش گیاهی، ضریب شکل، ضریب رواناب و شدت بارندگی با دوره بازگشت‌های ۷۰، ۲۵ و ۱۰۰ ساله بود که جهت اولویت‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که متدولوژی معرفی شده با به کارگیری مدل تلفیقی می‌تواند به عنوان روشی مناسب جهت تعیین پتانسیل سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها مورد استفاده واقع شود.

جلیلیان و اصغری سراسکانرود [۱۴] نیز به پهنه‌بندی دشت سیلابی رودخانه گاماسیاب در دوره بازگشت‌های مختلف پرداختند. ایشان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و سنتینل و با استفاده از روش شیء‌گرا نسبت به تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه اقدام کردند. نتایج نشان داد که تصویر سنتینل با ضریب کاپای ۰/۹ نسبت به تصویر لندست از صحت بالاتری برخوردار بود. از آن جا که طبقه‌بندی تصویر سنجنده سنتینل مقایسه با تصویر سنجنده OLI، دارای صحت کلی و ضریب کاپای بالاتری برخوردار است، بنابراین

از این سنجنده برای بررسی دشت سیلابی رودخانه استفاده شد. سعیدی‌مفرد و همکاران [۲۳]، به پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در شهرستان تربت حیدریه با استفاده از عملگرهای فازی پرداختند. در این پژوهش هشت معیار شیب، فاصله از رودخانه، ارتفاع، زمین شناسی، کاربری اراضی، بارش، تراکم زهکشی و پوشش گیاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که متغیرهای اصلی و مؤثر در ایجاد سیل در منطقه مورد مطالعه، شیب با ضریب وزنی ۰/۳۱ و بارش با ضریب وزنی ۰/۱۸ بود. البته متغیر پوشش گیاهی با ضریب وزنی ۰/۰۴ کمترین تأثیر را در منطقه مورد مطالعه داشت؛ بنابراین شهرستان تربت حیدریه با توجه به نقشه کلاسه‌بندی خطر سیل‌خیزی در منطقه با خطر خیلی زیاد قرار گرفت.

یوسف و همکاران [۳۱]، نیز به پهنه‌بندی نقشه حساسیت به وقوع سیل شهر جده در عربستان سعودی با دو روش رگرسیون لجستیک و نسبت فراوانی و ترکیب آن‌ها پرداختند. ایشان بیان کردند که روش ترکیبی با دقت ۹۱/۳ درصد، روش مناسب‌تری برای مدل‌سازی سیل نسبت به دو روش رگرسیون لجستیک و نسبت فراوانی به صورت انفرادی است.

بن و همکاران [۶]، از تصاویر سنجنده مادیس و ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز، برای پایش سیلاب ۲۵ اکتبر ۲۰۱۵ در حاشیه رودخانه Pampanga در فیلیپین و در سیلاب ۲۸ جولای ۲۰۱۶ در دریاچه‌های Poyang و Dongting در چین استفاده کردند. در مورد رودخانه Pampanga، نواحی آبگرفته با آستانه بازتاب سطحی (R) به ترتیب $0.03 < R_2 < 0.148$ و $0.0 < R_5 < 0.14$ ، $0.0 < R_6 < 0.10$ برای باندهای ۶، ۵ و ۲ به ترتیب برآورد شد. در نتایج بدست آمده مساحت پهنه سیل گیر برای رودخانه و دریاچه ارائه شده و دقت نتایج بدست آمده از تصاویر مادیس با تصاویر سنتینل ارزیابی شد. فنگ و همکاران [۱۱]، با استفاده از مدل LSTM Neural Networks نسبت به تهیه نقشه حساسیت سیل در چین پرداختند. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده قابلیت بالای این روش در استخراج مکانی سیل بوده و مقدار AUC معادل ۰/۹۷ را نشان داد.

ژانگ و همکاران [۳۲]، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، یک روش طبقه‌بندی برای تولید نقشه کلاسه‌بندی سیل ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند به طور مؤثر مؤثری عوامل کلیدی وقوع سیلاب‌های ناگهانی را شناسایی کند. دقت نقشه پهنه‌های سیل شناسایی شده توسط وقایع سیلابی تاریخی هم از نظری و هم از نظر کمی، ارزیابی شد.

با توجه به علل مختلف و مؤثر در بروز سیل، می‌توان با اعمال روش‌ها و راهکارهای علمی و عملی، از روی دادن بسیاری از سیل‌ها پیشگیری کرده و برای سیل‌هایی که قابلیت پیشگیری از رخداد آن‌ها نباشد با انجام تدابیر مختلف، از جمله پهنه‌بندی سیل و به دنبال آن تعیین کاربری مناسب برای مناطق سیل‌گیر، خسارات ناشی از آن را کاهش داد [۲۸].

با مرور منابع موجود مشاهده شده که علی‌رغم گستردگی دامنه

مطالعات در بحث سیلاب، مطالعه‌ای با هدف بررسی وضعیت وقایع سیلابی در یک بازه زمانی بلند مدت و ارزیابی نحوه تغییرات پیک‌های سیلابی و همچنین پهنه‌های سیل‌گیر، انجام نشده است. این مسئله از جهت امکان ارائه برنامه‌های کاهش خسارات سیل و همچنین برنامه‌ریزی جهت استفاده از ظرفیت سیلاب حائز اهمیت بالایی است. از سوی دیگر، در هیچ یک از منابع داخلی استفاده از محصولات انتقال و فصلی در بررسی تغییرات سطوح آبی استفاده نشده است که در این مقاله به معرفی این لایه‌ها پرداخته شده است. از این رو، پژوهش حاضر به بررسی وقایع سیلابی دشت سیستان می‌پردازد. در دشت سیستان در سال‌های اخیر، مسئله آب به عنوان یک موضوع مهم و چالش برانگیز مطرح است. احداث سد بر سرشاخه‌های هیرمند و رودخانه فراه و همچنین خشکسالی‌های پی در پی، باعث کاهش ورود آب به دشت سیستان و در نتیجه به هامون‌های سیستان شده است. این موضوع منجر به خشکیدگی هامون‌ها و تشدید تولید گرد و غبار شده است. بنابراین شرایط در سال‌های اخیر، فقط در مواقع سیلابی شدید آبیگری هامون‌های سیستان مشاهده شده است [۲۸].

لذا با توجه به وضعیت خاص سیلاب در دشت سیستان، پژوهش حاضر با هدف پایش سیلاب (دبی‌های حداکثر سالیانه و پهنه‌های سیل‌گیر)، انجام شد. هدف نهایی از این پژوهش ارزیابی روند تغییرات دبی‌های پیک سیلابی (در بازه زمانی وجود داده‌های آماری) و همچنین پایش روند تغییرات پهنه‌های آبیگر حاصل از سیلاب (در بازه زمانی وجود تصاویر ماهواره‌ای) است. نتایج به دست آمده از شناسایی مناطق سیل‌گیر و نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری حاصل از پژوهش حاضر، یک اقدام ضروری برای تصمیم‌گیران در جهت جلوگیری و مدیریت خسارات ناشی از سیل از یکسو، و برنامه‌ریزی جهت استفاده بهینه از ظرفیت‌های سیلابی از سوی دیگر، به حساب می‌آید [۳، ۸].

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان پس از استان کرمان به عنوان دومین استان پهناور کشور، در جنوب شرق ایران واقع شده و بیش از ۱۱ درصد وسعت ایران را در بر می‌گیرد. نیمروز یا دشت سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده و مساحتی برابر با ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع داشته و حوضه مسطح و مسدودی است که از آبرفت‌های دلتای قدیمی و فعلی رودخانه هیرمند تشکیل شده و سه کشور ایران، افغانستان و پاکستان را در یک نقطه به هم پیوند می‌زند [۲۱]. متوسط میزان بارندگی دشت سیستان در حدود ۵۴ میلی‌متر و میزان تبخیر ۴۷۷۵ میلی‌متر است [۲۲]. به لحاظ تقسیم‌بندی حوزه‌های آبخیز درجه یک (اصلی)، دشت سیستان در حوزه آبخیز مرزی شرق و به لحاظ تقسیم‌بندی حوزه‌های آبخیز درجه دو (فرعی)، دشت سیستان در حوزه آبخیز هامون هیرمند واقع شده است. حوزه آبخیز هامون هیرمند در بخش میانی مرزهای شرقی

ایران در مجاورت کشورهای افغانستان و پاکستان قرار گرفته است. در این حوزه آبخیز کلیه رودخانه‌ها به سمت هامون‌های پوزک، صابری و هیرمند جریان یافته و سپس به شوره‌زار گودزره در خاک افغانستان متصل می‌شوند. از نظر تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران حوزه آبخیز هیرمند بخشی از حوضه‌های شرقی کشور محسوب می‌شود که جریان آب در آن‌ها از سمت کشور افغانستان می‌است. مساحت حوضه هیرمند ۳۳۷۳۱ کیلومتر مربع است که ۵۵/۱۳ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها و ۰/۰۷ درصد آن را هامون هیرمند و ۴۴/۸ درصد آن را کوهستان‌ها تشکیل می‌دهند. بیشترین بخش دشت‌ها در مناطق اطراف هامون‌ها قرار گرفته‌اند. شهرهای زاهدان و زابل در این حوضه قرار داشته و بخش‌هایی از جاده‌های اصلی که زاهدان را به مشهد، خاش، کرمان و سیرجان متصل می‌کند، در داخل این حوضه قرار دارد (شکل ۱).

رودخانه‌های ورودی به سیستان از کشور افغانستان عبارتند از رودخانه هیرمند، رودخانه ادرسکن، رودخانه فراه، خوسپاس رود و خاش رود. آب حاصل از ذوب برف‌های بخش جنوبی کوه‌های هندوکش توسط رودخانه هیرمند به منطقه سیستان وارد می‌شود که این رودخانه با ورود آب به دو منبع مخازن چاه نیمه‌ها و دریاچه هامون، نقش اساسی در تأمین آب آشامیدنی و آب مورد نیاز برای آبیاری سیستان را بر عهده دارد [۱۰].

رودخانه هیرمند که اصلی‌ترین تأمین‌کننده آب سیستان است و در افغانستان به «هلمند» مشهور است، پس از رسیدن به مرز ایران به دو شاخه «سیستان» و «پریان» تقسیم می‌شود. شاخه سیستان ضمن مشروب کردن بخشی از اراضی کشاورزی دشت سیستان به هامون هیرمند می‌ریزد. شاخه پریان در امتداد مرز به سمت شمال حرکت کرده و ابتدا هامون پوزک و سپس هامون‌های صابری و هیرمند را تغذیه می‌کند. رودخانه‌های هرات‌رود، خاش‌رود و چندین رودخانه فرعی از غرب و شمال به هامون‌ها می‌ریزند.

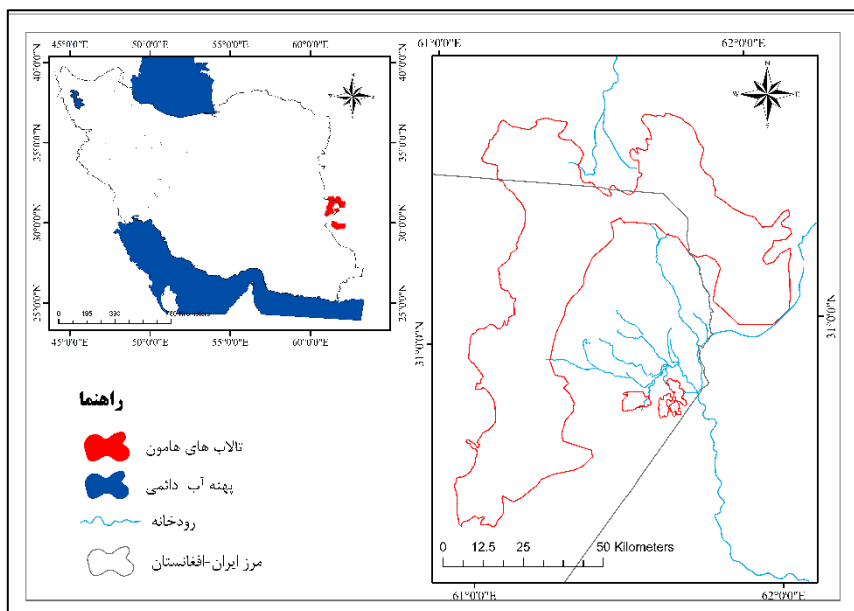
روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر اپتیکی لندست ۵، ۷ و ۸ است. رزولوشن مکانی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۳۰ متر در ۳۰ متر و رزولوشن زمانی آن ۱۶ روز است.

پایش سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای

در تحقیق حاضر به پایش وقایع سیلابی به وقوع پیوسته با دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه هیدرومتری سد کهک پرداخته شد. ایستگاه سد کهک، اصلی‌ترین ایستگاه هیدرومتری واقع بر رودخانه سیستان که ورودی اصلی رودخانه هیرمند از افغانستان به ایران است؛ با توجه به اینکه هامون‌های سیستان متأثر از آب ورودی از رودخانه‌های افغانستان به ایران در مواقع سیلابی هستند، پایش سطح آبیگر هامون‌های سیستان در وقایع سیلابی امکان بررسی چگونگی و روند تغییرات این تأثیرپذیری را فراهم می‌سازد. بدین منظور در اولین گام، تاریخ‌های وقوع سیلاب، در ایستگاه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی هامون‌های سیستان در کشور ایران
Fig 1. Geographical location of Sistan Hamuns in Iran

GSWE توزیع زمانی و مکانی سطوح آب در مقیاس جهانی و در طول سه دهه گذشته را نقشه‌برداری کرده و با اعمال آنالیزهای آماری بر آن‌ها، چگونگی تغییرات سطوح آبی را اطلاعات مناسب‌تری را به تصمیم‌گیران حوزه مدیریت آب، ارائه می‌کند. مجموعه داده‌های آب ایجاد شده توسط GSWE در چارچوب برنامه کوپرنیک نمایه شده است.

نقشه‌های پهنه‌های آبیگر حاصل از الگوریتم انتقال^۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸، تغییرات ایجاد شده در پهنه‌های آبیگر در سال آخر نسبت به سال اول (۲۰۲۱ نسبت به سال ۱۹۸۴) را نمایش می‌دهد. در این روش، تمامی پیکسل‌ها به صورت مجزا و انفرادی به دو کلاس آب/غیر آب، طبقه‌بندی شده و نتایج به صورت ماهانه برای بازه زمانی (۱۹۸۴ و ۲۰۲۱) تهیه و فرایند تشخیص تغییر^۴ به منظور ارزیابی تغییرات بر آن‌ها اعمال شد. نتایج این الگوریتم به صورت کلاس‌های پتانسیل آبیگری ارائه می‌شود. با توجه به اینکه آبیگری هامون‌های سیستان ناشی از جریان‌های سیلابی رودخانه‌های هیرمند و فراه است، لذا مفهوم پتانسیل آبیگری و سیل‌گیری در این پژوهش، معادل هم در نظر گرفته شده است.

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری دشت سیستان با استفاده از الگوریتم فصلی^۵

این الگوریتم، نیز از دسته الگوریتم‌های جهانی (است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست پهنه‌های آبیگر ماهانه را در دامنه ۰ تا ۱۲ نمایش می‌دهد. این دامنه اعداد، تعداد ماه‌هایی از سال که هر منطقه آبیگر است را نشان می‌دهد.

هیدرومتری سد کهک واقع بر رودخانه سیستان در محل ورودی از رودخانه هیرمند به ایران در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ استخراج شد. سپس در چند تاریخ شامل قبل از وقوع سیلاب، اولین تاریخ وجود تصویر بعد از وقوع سیلاب و همچنین بعد از اتمام آبیگری (بر اساس هیدروگراف روزانه ایستگاه سد کهک) تصاویر ماهواره‌ای لندست دانلود شد. سپس به منظور پردازش و استخراج اطلاعات از تصاویر، ابتدا به پیش پردازش و تصحیحات رادیومتریک (استخراج رفلکتانس) و اتمسفری، تلفیق تصاویر و افزایش کنتراست پرداخته شد و در نهایت پهنه‌های آبیگر هامون‌های سیستان در وقایع سیلابی با استفاده از شاخص NDVI و با استفاده از باندهای مادون قرمز و قرمز استخراج شد. نحوه محاسبه شاخص پوشش گیاهی در رابطه یک آورده شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

معادله (۱)

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری دشت سیستان با استفاده از الگوریتم انتقال

این الگوریتم، یک الگوریتم جهانی^۱ است که در مرکز پژوهش‌های مشترک (JRC)، تعریف شده است. مرکز پژوهش‌های مشترک اتحادیه اروپا (JRC)، محیط‌زیست سازمان ملل و شرکت گوگل، به منظور ارائه داده‌های رایگان و در دسترس، در مورد میزان و وسعت آب با اهداف بشر دوستانه به گونه‌ای که شهروندان و دولت‌ها بتوانند به راحتی ارزیابی کنند که واقعاً چه اتفاقی برای منابع طبیعی جهان می‌افتد، با یکدیگر مشارکت می‌کنند. برای این منظور، یک ساختار اختصاصی با عنوان GSWE^۲ بطور مشترک توسط مراکز ذکر شده، تحقیقات مشترک خود را توسعه داده‌اند.

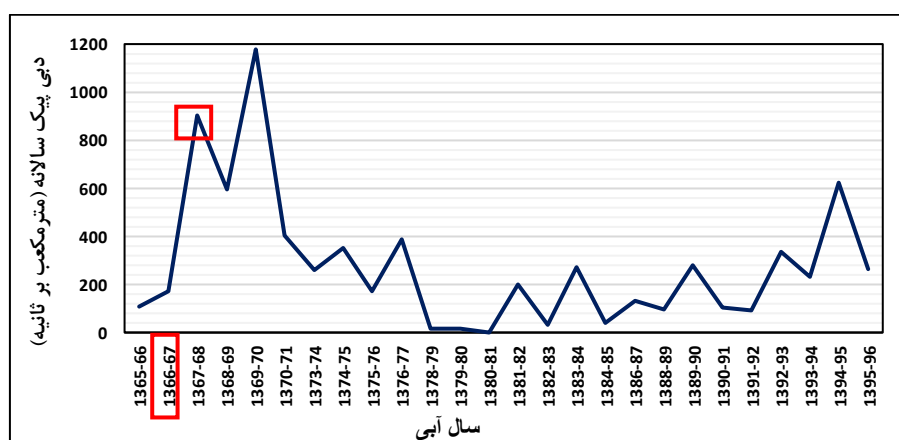
3. Transition
4. change detection
5. Seasonality

1. JRC Global Surface Water Mapping Layers
2. Global Surface Water Exploring

با توجه به اینکه هامون‌های سیستان متأثر از آب ورودی از رودخانه‌های افغانستان به ایران در مواقع سیلابی است، پایش سطح آبگیر هامون‌های سیستان در وقایع سیلابی امکان بررسی چگونگی و روند تغییرات این تاثیرپذیری را فراهم می‌سازد. بدین منظور با استفاده از تاریخ‌های وقوع سیلاب در ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک واقع بر رودخانه سیستان در محل ورودی از رودخانه هیرمند به ایران، در تاریخ‌های قبل از وقوع سیلاب، اولین تاریخ وجود تصویر بعد از وقوع سیلاب، بعد از اتمام آبگیری (بر اساس هیدروگراف روزانه ایستگاه سد کهک)، تصاویر ماهواره‌ای لندست دانلود شد. نتایج بدست آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در سه واقعه سیلابی حداکثری در ذیل ارائه شده است.

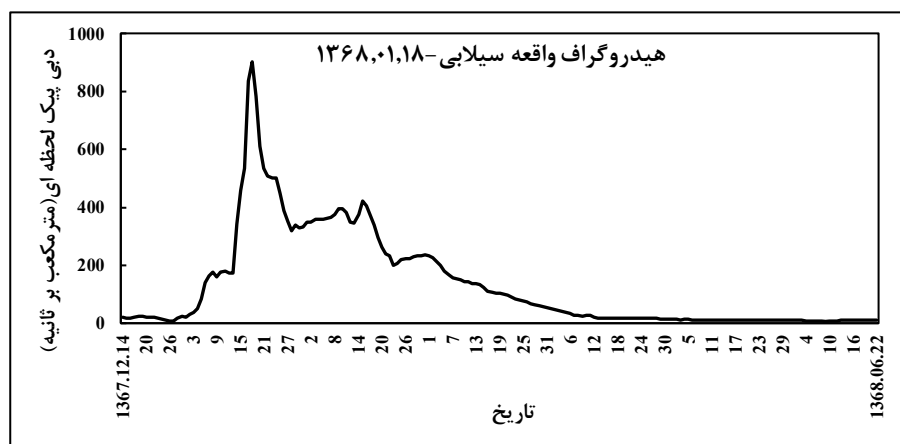
در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸ دبی حداکثر لحظه‌ای معادل ۹۰۱/۸۳ مترمکعب بر ثانیه بوده که در تاریخ ۱۳۶۸/۰۱/۱۸ به وقوع پیوسته است. شکل (۲) وضعیت دبی حداکثر لحظه‌ای در سال آبی مورد نظر را در نمودار ۳۰ ساله نمایش می‌دهد. همچنین شکل (۳) هیدروگراف روزانه ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک را در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸ و در بازه زمانی شروع آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان قبل از پیک سیلابی تا انتهای آبگیری نمایش می‌دهد.

تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده در شکل (۴) مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ با اعمال شاخص NDVI است که نشان‌دهنده وضعیت سطوح آبگیر هامون‌های سیستان در (۱) قبل از واقعه سیلابی، (۲) بعد از واقعه سیلابی، (۳) بلافاصله بعد از اتمام آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان و (۴) با فاصله زمانی از اتمام آبگیری



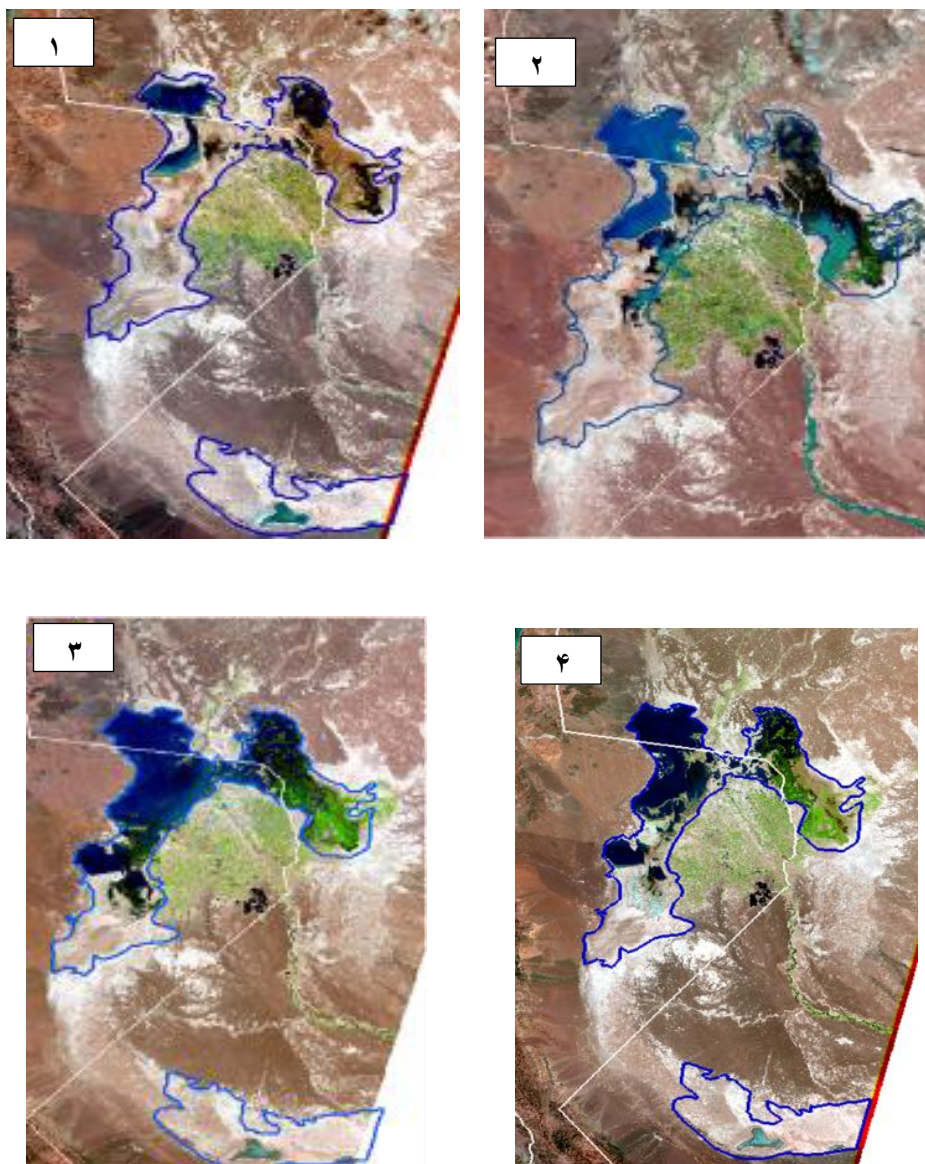
شکل ۲- دبی حداکثر لحظه‌ای در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸ در نمودار ۳۰ سال

Fig 2. Peak discharge in the water-year 1988-1989 in the 30-year graph



شکل ۳- هیدروگراف روزانه ایستگاه هیدرومتری سد کهک را در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸

Fig 3. Daily hydrograph of hydrometric station of Kohak dam in water year 1988-1989

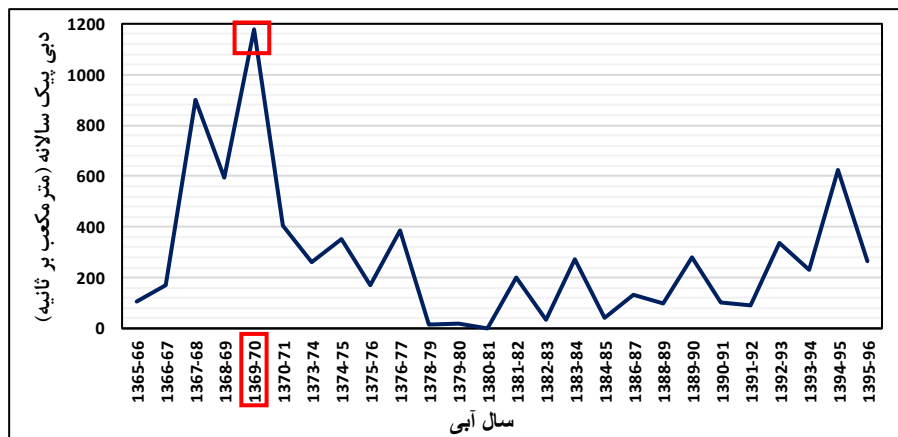


شکل ۴- وضعیت سطوح سیل گیر هامون های سیستان در سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۸ (۱. قبل از واقعه سیلابی، ۲. بعد از واقعه سیلابی، ۳. بلافاصله بعد از اتمام آبگیری هامون ها از رودخانه سیستان و ۴. با فاصله زمانی از اتمام آبگیری هامون ها از رودخانه سیستان)
 Fig 4. The condition of flooding zones in Hamuns of Sistan (1. Before the flood event, 2. After the flood event, 3. Immediately after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River and 4. With a time interval after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River)

روزانه ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک را در سال آبی ۱۳۷۰-۱۳۶۹ و در بازه زمانی شروع آبگیری هامون ها از رودخانه سیستان قبل از پیک سیلابی تا انتهای آبگیری نمایش می دهد
 شکل (۷) مستخرج از تصاویر ماهواره ای لندست ۷ با اعمال شاخص NDVI است که نشان دهنده وضعیت سطوح آبگیر هامون های سیستان در (۱) قبل از واقعه سیلابی، (۲) بعد از واقعه سیلابی، (۳) بلافاصله بعد از اتمام آبگیری هامون ها از رودخانه سیستان و (۴) با فاصله زمانی از اتمام آبگیری هامون ها از رودخانه سیستان، است. مساحت پهنه آبگیر هامون های سیستان بعد واقعه

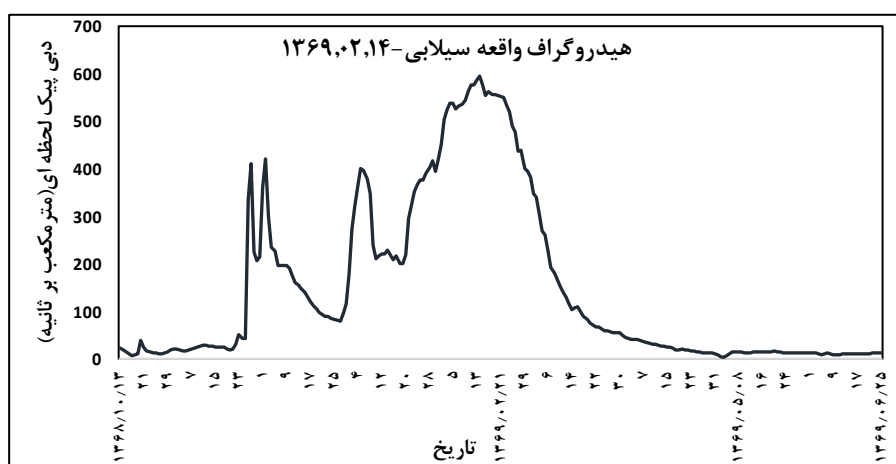
هامون ها از رودخانه سیستان، هستند که این وضعیت ها با همین اعداد در شکل (۳) نیز نمایش داده شده اند. مساحت پهنه آبگیر هامون های سیستان بعد واقعه سیلابی ۱۳۶۸/۰۱/۱۸ (شکل ۴) برابر با ۲۶۱۴/۴ کیلومترمربع است.
 سال ۱۳۶۹-۱۳۷۰

در سال آبی ۱۳۶۹-۱۳۷۰ دبی حداکثر لحظه ای معادل ۱۱۷۸ مترمکعب بر ثانیه بوده که در تاریخ ۱۳۶۹/۰۲/۱۴ به وقوع پیوسته است. شکل (۵) وضعیت دبی حداکثر لحظه ای در سال آبی مورد نظر را در نمودار ۳۰ ساله نمایش می دهد. همچنین شکل (۶) هیدروگراف



شکل ۵- وضعیت دبی حداکثر لحظه‌ای در سال آبی ۱۳۶۹-۱۳۷۰ در نمودار ۳۰ ساله

Fig 5. Peak discharge in the water-year 1990-1991 in the 30-year graph



شکل ۶- هیدروگراف روزانه ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک را در سال آبی ۱۳۶۹-۱۳۷۰

Fig 6. Daily hydrograph of hydrometric station of Kohak dam in the water-year 1990-1991

اتمام آبیگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان است. مساحت پهنه آبیگیر هامون‌های سیستان بعد از واقعه سیلابی ۱۳۹۵/۰۱/۲۲ (شکل ۲ از ۱۰) برابر با ۱۳۱۹/۸ کیلومترمربع است.

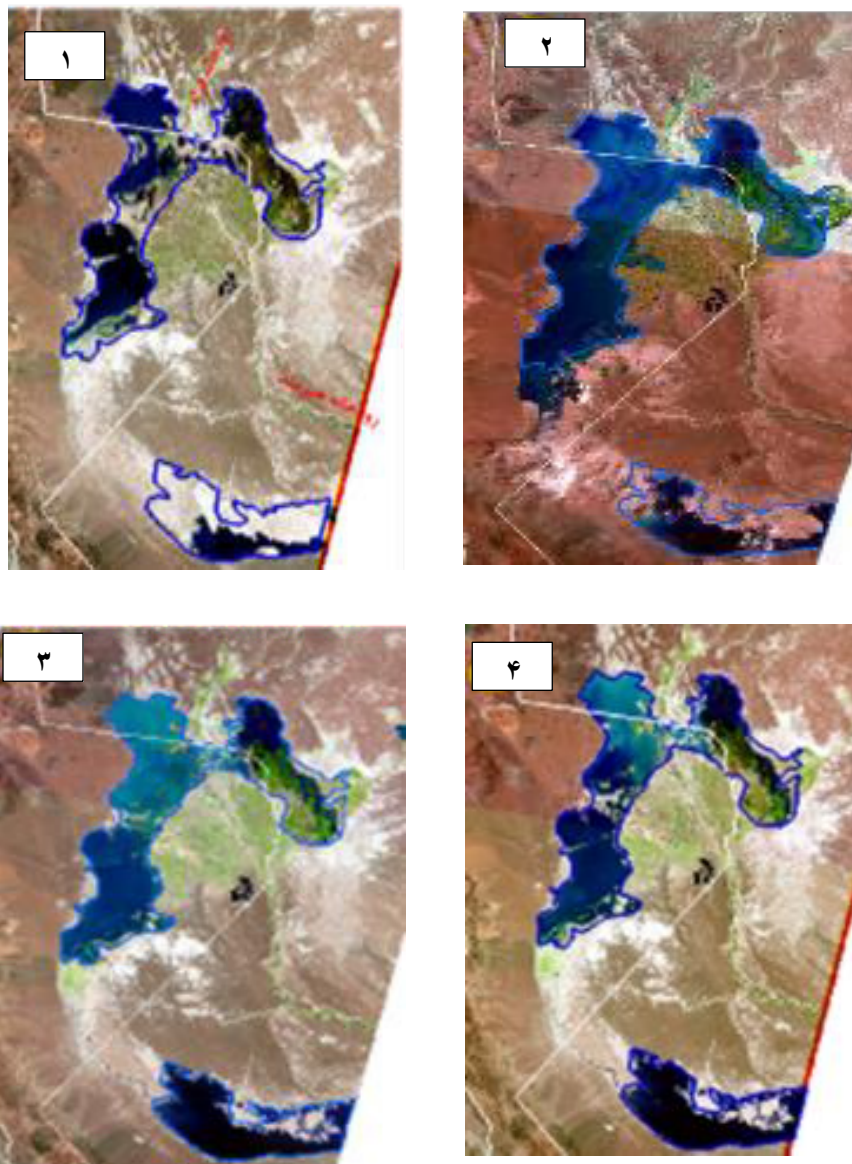
پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری هامون‌های سیستان با الگوریتم انتقال

نتایج بدست آمده از پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از الگوریتم انتقال، در قالب نقشه توسط GSWE تهیه و در چارچوب برنامه کوپرنیک نمایه شده است. با اجرای کدهای دستوری طراحی شده در سامانه GEE، نقشه تغییرات پهنه سیل‌گیر دشت سیستان تهیه شد (شکل ۱۱). این نقشه تغییرات رخ داده در پهنه‌های آبیگیر بین دو سال ۱۹۸۴ نسبت به ۲۰۲۰ را در قالب هفت کلاس نشان می‌دهد. نقشه تولید شده، نشان می‌دهد که سطح سیل‌گیر هامون‌ها در بازه‌ی ۳۶ ساله اخیر دچار تغییرات گسترده‌ای شده است.

سیلابی ۱۳۷۰/۰۱/۱۸ (شکل ۲ از ۷) برابر با ۴۴۷۷/۶ کیلومترمربع است.

سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴

در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ دبی حداکثر لحظه‌ای معادل ۶۲۴/۶ مترمکعب بر ثانیه بوده که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۸ وقوع پیوسته است. شکل (۸) وضعیت دبی حداکثر لحظه‌ای در سال آبی مورد نظر را در نمودار ۳۰ ساله نمایش می‌دهد. همچنین شکل (۹) هیدروگراف روزانه ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک را در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ و در بازه زمانی شروع آبیگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان قبل از پیک سیلابی تا انتهای آبیگیری نمایش می‌دهد. شکل (۱۰) مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با اعمال شاخص NDVI است که نشان‌دهنده وضعیت سطوح آبیگیر هامون‌های سیستان در (۱) قبل از واقعه سیلابی، (۲) بعد از واقعه سیلابی، (۳) بلافاصله بعد از اتمام آبیگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان و (۴) با فاصله زمانی از



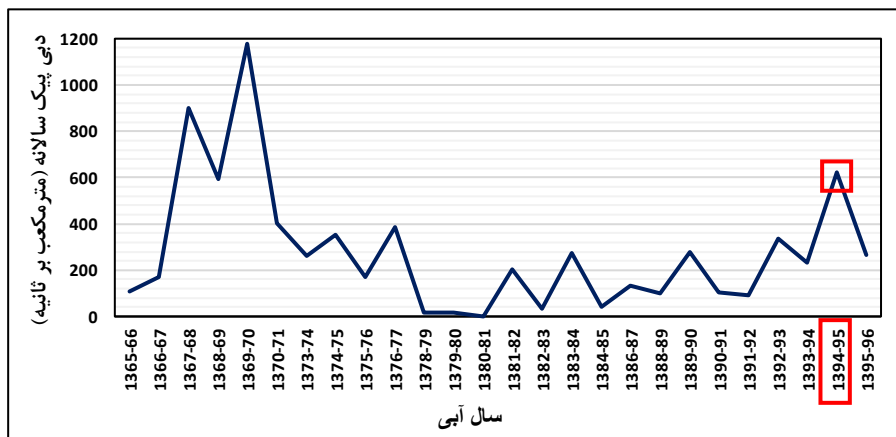
شکل ۷- وضعیت سطوح آبگیر هامون‌های سیستان (۱. قبل از واقعه سیلابی، ۲. بعد از واقعه سیلابی، ۳. بلافاصله بعد از اتمام آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان و ۴. با فاصله زمانی از اتمام آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان)

Fig 7. The condition of flooding zones in Hamuns of Sistan (1. Before the flood event, 2. After the flood event, 3. Immediately after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River and 4. With a time interval after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River)

در قالب نقشه توسط GSWE تهیه و در چارچوب برنامه کوپرنیک نمایه شده است. با اجرای کدهای دستوری طراحی شده در سامانه گوگل ارث انجین، نقشه پهنه‌های سیل‌گیر دشت سیستان به صورت ماهانه (شکل ۱۲) تهیه شد. این نقشه پهنه‌های آبگیر هامون‌ها را به صورت ماهانه و در قالب ۱۲ کلاس نمایش می‌دهد و کلاس‌های یک تا ۱۲، نمایش‌دهنده تعداد ماه آبگیری هر کلاس است. این شکل بر اساس تعداد ماه‌هایی از سال که هر پهنه از هامون‌های سیستان، آب‌دار هستند طبقه‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش وسیعی از هامون‌ها کمتر از هشت ماه از سال آب‌دار هستند. شایان

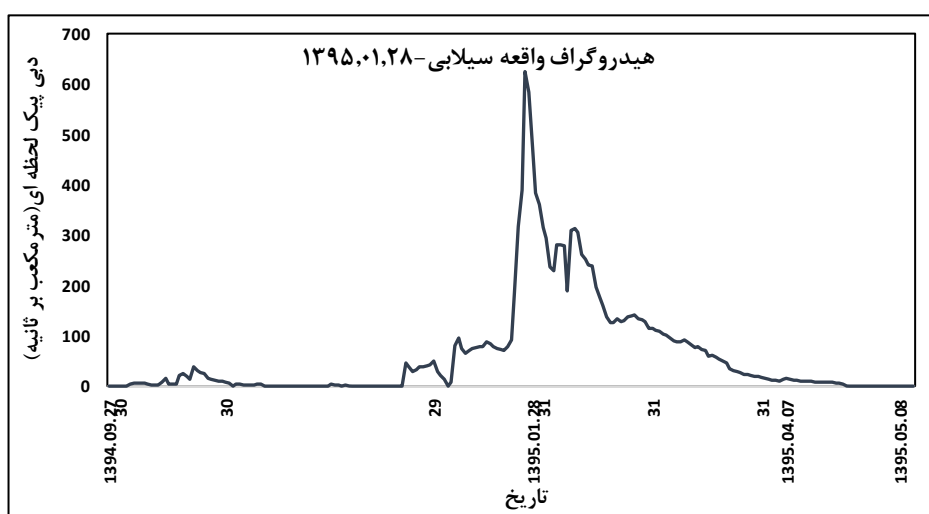
جدول (۱) مساحت پهنه‌های آبی هامون‌های سیستان، رودخانه‌های مشرف به آن و چاه نیمه‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، بیش از ۴۴ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه که معادل ۱۳۲۲۵۱۴ هکتار است، در دسته فصلی جدید قرار دارد؛ بدین معنی که در سال ۱۹۸۴ این مناطق جزو مناطق آبگیر فصلی محسوب نبوده‌اند اما طی تغییرات رخ داده در بازه زمانی ۳۶ ساله، دارای آبگیری فصلی شده‌اند. پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری هامون‌های سیستان با الگوریتم فصلی

نتایج بدست آمده از پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از روش فصلی،



شکل ۸- وضعیت دبی حداکثر لحظه‌ای در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ در نمودار ۳۰ ساله

Fig 8. Peak discharge in the water-year 2015-2016 in the 30-year graph



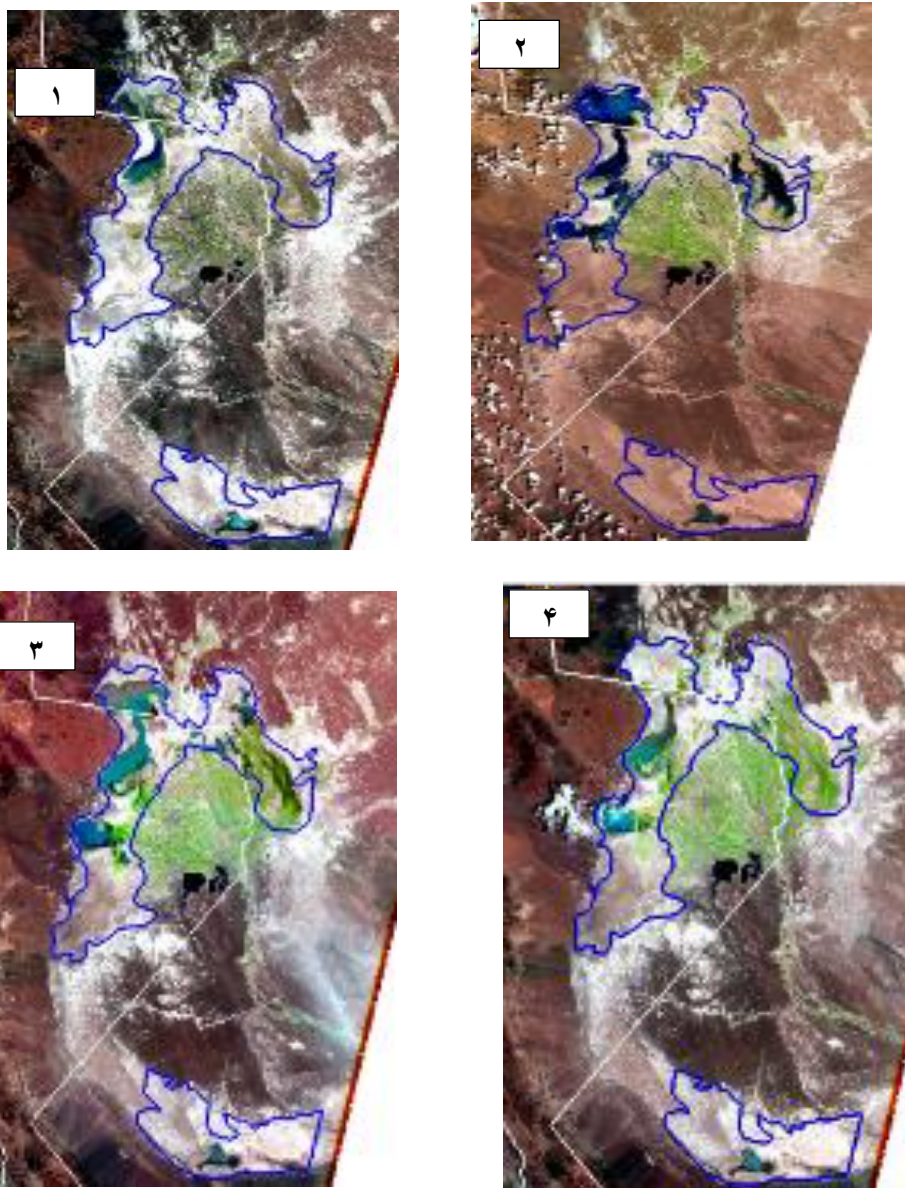
شکل ۹- هیدروگراف روزانه ایستگاه هیدرومتری پایاب سد کهک را در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴

Fig 9. Daily hydrograph of hydrometric station of Kohak dam in the water-year 2015-2016

جدول ۱- مساحت پهنه‌های آب‌دار هامون‌های سیستان به روش انتقال

Table 1- The area of watery areas of the Hamuns of Sistan by Transition method

درصد مساحت آب‌دار به مساحت کل Percentage of inundation zones to total area	مساحت پهنه‌ها (هکتار) Area of zones (hectares)	تعداد ماه‌های آب‌دار The number of inundation months
5.56	16472.6	دائمی Permanent
2.3	6863.9	دائمی جدید New permanent
0.65	1929.8	دائمی از دست رفته lost permanent
29.9	88643.7	فصلی Seasonal
44.7	1322514.1	فصلی جدید New seasonal
0.03	94	فصلی از دست رفته Lost seasonal
16.8	49783.6	دائمی به فصلی Permanent to seasonal
100	26711.6	مجموع total



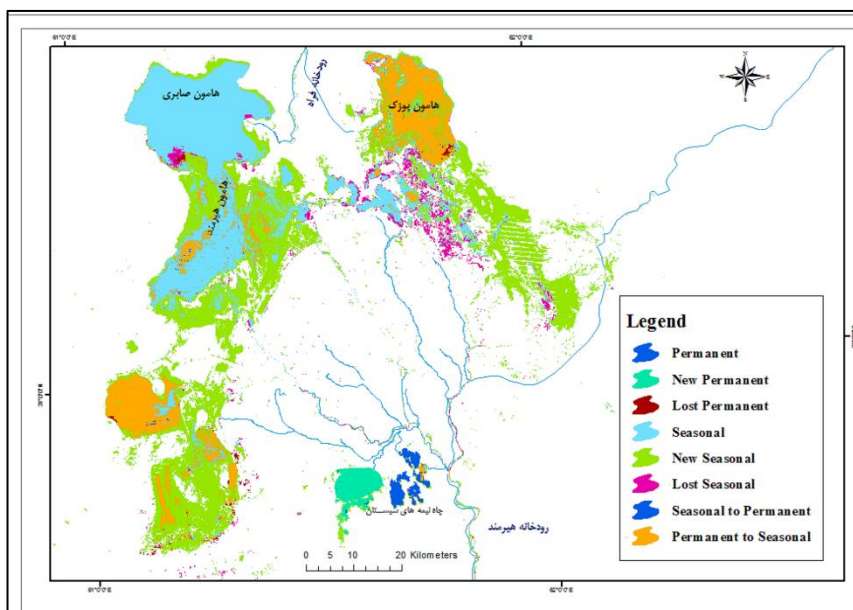
شکل ۱۰- وضعیت سطوح هامون‌های سیستان (۱. قبل از واقعه سیلابی، ۲. بعد از واقعه سیلابی، ۳. بلافاصله بعد از اتمام آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان و ۴. با فاصله زمانی از اتمام آبگیری هامون‌ها از رودخانه سیستان)

Fig 10. The condition of flooding zones in Hamuns of Sistan (1. Before the flood event, 2. After the flood event, 3. Immediately after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River and 4. With a time interval after the completion of the inundation of Hamuns from the Sistan River)

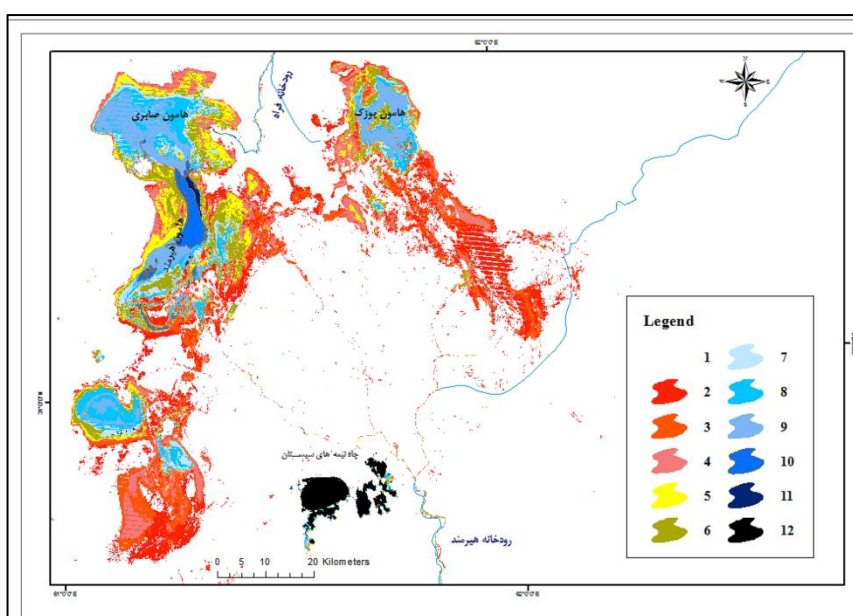
۲ میلیون هکتار از سطح منطقه مورد مطالعه، بطور متوسط تنها برای یک ماه از سال آبدار بوده که معادل ۸۸/۴ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه (هامون‌های سیستان، رودخانه‌های مشرف به آن و چاه نیمه‌ها) را شامل می‌شود.

ذکر است که نقشه ارائه شده، پهنه‌های آبگیر را بر اساس متوسط بلند مدت نشان می‌دهد.

جدول (۲) مساحت پهنه‌های آبی هامون‌های سیستان، رودخانه‌های مشرف به آن و چاه نیمه‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، بیش از



شکل ۱۱- تغییرات پهنه‌های آبگیر هامون‌های سیستان در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۸۴
 Fig 11. Changes in the water areas of the Hamuns of Sistan in 2020 compared to 1984



شکل ۱۲- آبگیری پهنه‌های هامون‌های سیستان به صورت ماهانه
 Fig 12. Monthly inundation of the Sistan Hamuns

Table 2- The area of watery areas of the Hamuns of Sistan by seasonality method

درصد مساحت آب‌دار به مساحت کل Percentage of inundation zones to total area	مساحت پهنه‌ها (هکتار) Area of zones (hectares)	تعداد ماه‌های آب‌دار The number of inundation months
88.4	2147350	1
2.3	56155.9	2
1.9	45287.1	3
1.4	34582.1	4
1.1	26701.7	5
1.1	25501.2	6
0.8	18576.1	7
1.1	26711.6	8
1.2	28891.6	9
0.3	6871.81	10
0.0	1029.61	11
0.5	10976.9	12

بحث و نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم و خشکسالی‌های متوالی به همراه تغییرات کاربری اراضی و تخریب منابع طبیعی، منجر به وقوع و تشدید اثرات تخریبی سیلاب‌ها در سال‌های اخیر در ایران شده است. با توجه به اهمیت موضوع سیلاب و خسارات جانی و مالی ناشی از آن از یک سو و از دست رفتن ظرفیت منابع آبی سیلابی در وقایع و جریانات سیلابی و عدم استفاده از این منابع با ارزش در شرایط فوق بحرانی آب در کشور از سوی دیگر، به کارگیری روش‌های نوین در شناسایی مناطق دارای پتانسیل سیل‌گیری ضروری به نظر می‌رسد.

این مسئله به ویژه در دشت سیستان به دلیل پدیده گرد و غبار شایان توجه است. منبع آب هامون‌های سیستان در دو دهه اخیر، جریان‌های سیلابی ورودی از رودخانه‌های هیرمند و فراه در افغانستان است [۲۱]. از سوی دیگر، طبق مطالعات انجام شده، منشاء ۳۳ درصد از گرد و غبار منطقه سیستان، هامون‌ها هستند [۱۹]. لذا تعیین پتانسیل سیل‌گیری هامون‌های سیستان به منظور تبیین برنامه مدیریتی مهار گرد و غبار سیستان، هم به لحاظ استفاده از ظرفیت‌های آبی سیلاب در خود هامون‌ها و هم به لحاظ استفاده از این ظرفیت آبی در سایر مناطق دشت سیستان یا بخش‌هایی از هامون‌ها که پتانسیل سیل‌گیری کمتری دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه سه واقعه سیلابی سالانه حداکثری در دشت سیستان، نشان داد که آبگیری هامون‌های سیستان کاملاً متأثر از وقوع سیلاب است. مقایسه گام به گام نقاط شروع تا انتهای هیدروگراف سیلاب با پهنه‌های سیلابی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در همان گام‌های زمانی، نشان‌دهنده تطابق کامل سطح پهنه آبگیر با اندازه دبی سیلابی است. رضوی‌زاده و همکاران [۲۱]، نیز با پایش روند تغییرات پهنه آبگیر هامون‌های سیستان در سیلاب‌های به وقوع پیوسته از بهمن ۱۳۹۷ تا فروردین ۱۳۹۸، بیان کردند که هامون‌های سیستان از تمام

سال حقایق ثابت از افغانستان دریافت نکرده و آبگیری هامون‌های سیستان متأثر از وقوع سیلاب در رودخانه‌های هیرمند و فراه و پهنه آبگیر متناسب با میزان سیلاب، افزایش می‌یابد.

مطالعه تغییرات پهنه‌های آبگیر هامون‌های سیستان با استفاده از لایه GSWE، به خوبی تغییرات رخ داده در این پهنه‌ها را در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهند. کولکمی و همکاران [۱۶]، به منظور اعتبارسنجی دقت نتایج مطالعه خود در استخراج پهنه‌های آبی از تصاویر ماهواره‌ای، از تصاویر GSWE استفاده کردند.

لی و همکاران [۱۹]، نیز به ارزیابی دقت لایه پهنه آب (GSWE) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که تخمین وسعت پهنه دائمی آب سطحی با مستخرج از تصاویر مادیس با نتایج حاصل از GSW، الگوهای زمانی مشابهی را نشان می‌دهد. پهنه آبی مستخرج از تصاویر مادیس با افزودن جزئیات زمانی بیشتر، محصولات آب‌های سطحی GSWE را با وضوح مکانی خوب تکمیل می‌کند، که امکان نظارت و ارزیابی مؤثر تغییرات فصلی، بین سالانه و بلندمدت منابع آب، از جمله توده‌های آبی کوچک را فراهم می‌کند.

نتایج بدست آمده از مطالعه آبگیری هامون‌های سیستان با استفاده از نقشه‌های GSW نشان داد که سطح آبگیر هامون‌ها در بازه زمانی بلند مدت، کاهش شدیدی را نشان می‌دهد بطوریکه تغییرات رخ داده به گونه ای بوده که در سال ۲۰۲۰ نسبت به ۱۹۸۴، بیش از ۷۴ درصد از مساحت هامون‌های سیستان به صورت فصلی آبگیری می‌شود. نتایج بدست آمده از تیموری و همکاران [۲۶]، نیز با این نتیجه مطابقت دارد.

همچنین از نظر مطالعه وضعیت آبگیری ماهانه بر اساس پایش پهنه‌های آبگیر متوسط بلند مدت نیز، نتایج نشان داد که تنها بخش کوچکی از دشت سیستان (حدود ۱۱ هزار هکتار) بطور متوسط

Can integrated green spaces and storage facilities absorb the increased risk of flooding due to climate change in developed urban environments?. *Journal of Hydrology*. 579, 124201. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124201

5. Ali, H. Modi, P. and Mishra, V. 2019. Increased flood risk in Indian sub-continent under the warming climate. *Weather and Climate Extremes*. 25, 100212. doi:10.1016/j.wace.2019.100212.

6. Ban, H. J. Kwon, Y. J. Shin, H. Ryu, H. S. and Hong, S. 2017. Flood monitoring using satellite-based RGB composite imagery and refractive index retrieval in visible and near-infrared bands. *Remote Sensing*. 9(4): 313. doi.org/10.3390/rs9040313.

7. Bubeck, P. and Thieken, A. H. 2018. What helps people recover from floods? Insights from a survey among flood-affected residents in Germany. *Regional environmental change*. 18: 287-296. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-017-1200-y#Abs1>.

8. Bui, D.T. Ngo, P.T.T. Pham, T.D. Jaafari, A. Minh, N.Q. Hoa, P.V. and Samui, P. 2019. A novel hybrid approach based on a swarm intelligence optimized extreme learning machine for flash flood susceptibility mapping. *Catena*. 179: 184-196. doi:10.1016/j.catena.2019.04.009

9. Dargahian, F. 2022. Investigating the share of Sistan's internal centers in dust storms. Final report of research, Agricultural Research, Education & Extension Organization. (In Persian)

10. Dargahian, F. Mousivand, Y. and Razavizadeh, S. 2024. Snow Monitoring in the Upper Reaches of the Basin and its Relationship with the Changes in the Water Area of Hamoun Using Remote Sensing. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 18(64): 90-102. doi: 10.22034/18.64.90. (In Persian)

11. Fang, Z. Wang, Y. Peng, L. and Hong, H. 2021. Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. *Journal of Hydrology*. 594:125734. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125734.

12. Golshan, M. Esmali Ouri, A. and Khosravi, KH. 2018. Flood Susceptibility assessments Using Frequency Ratio model in Talar Watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 7(15): 1-16. doi:10.22111/JNEH.2017.3120. (In Persian)

13. Gorelick, N. Hancher, M. Dixon, M. Ilyushchenko, S. Thau, D. and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*. 202: 18-27. doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

14. Jalilian, S. and Asghari S. 2020. Flood Plain Zoning of Gamasiab River in Different Return Periods, *Journal of Extension and Development of Watershed Management*. 8(29): 19-28. https://www.wmji.ir/article_254396.html. (In Persian)

15. Johansen, K. Phinn, S. and Taylor, M. 2015. Mapping

در تمام مدت سال آبدار است که این مساحت نیز متعلق به چاه نیمه‌هاست و حدود ۵/۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. همچنین بیش از ۲ میلیون هکتار از سطح منطقه مورد مطالعه، به طور متوسط تنها در یک ماه از سال آبدار بوده که معادل ۸۸/۴ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه (هامون‌های سیستان، رودخانه‌های مشرف به آن و چاه نیمه‌ها) را شامل می‌شود. لذا نتایج بدست آمده از پایش پهنه آبیگر تالاب‌ها هامون بیانگر کاهش پهنه آبیگر از گذشته تا به حال و تبدیل بخش‌های زیادی از پهنه دائمی هامون‌ها به فصلی است.

تشکر و قدردانی

با توجه به اینکه این مطالعه برگرفته از طرح "پایش سیلاب‌های دشت سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی ۳۰ ساله" است که در موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور انجام گرفته است، از دست اندرکاران این طرح، سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

سمانه رضوی‌زاده: روش تحقیق، نگارش متن اصلی مقاله، نرم‌افزار فاطمه درگاهیان: منابع، مشاوره
سارا تیموری: نرم‌افزار و بازبینی
آزاده گوهردوست: بازبینی مقاله

منابع مورد استفاده

1. Aerts, J.C., Botzen, W.J., Clarke, K.C., Cutter, S.L., Hall, J.W., Merz, B., Michel-Kerjan, E., Mysiak, J., Surminski, S. and Kunreuther, H., 2018. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. *Nature Climate Change*, 8(3), pp.193-199. doi: 10.1038/s41558-018-0085-1
2. Ahmadelipour, A. and Moradkhani, H., 2019. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996-2017. *Journal of Hydrology*, 578, p.124106. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124106.
3. Ahmadlou, M. Karimi, M. Alizadeh, S. Shirzadi, A. Parvinnejhad, D. Shahabi, H. and Panahi, M. 2018. Flood susceptibility assessment using integration of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) and biogeography-based optimization (BBO) and BAT algorithms (BA). *Geocarto Int.* 34: 1252-1272. doi:10.1080/10106049.2018.1474276
4. Alexander, K. Hettiarachchi, S. Ou, Y. and Sharma, A. 2019.

River). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 7(15): 14-30. doi: 10.22111/JNEH.2017.3203. (In Persian)

25. Su, B. Huang, H. and Zhu, W. 2019. An urban pluvial flood simulation model based on diffusive wave approximation of shallow water equations. *Hydrology Research*. 50(1): 138-154. doi:10.2166/nh.2017.233.

26. Teimouri, S., Razavizadeh, S., Khosroshahi, M., Jalili, A. and Dargahian, F. 2024. Estimating the Water Requirement of Hamoons with the Basis Area Derived from the Landsat Product on the Google Earth Engine Platform. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 18(64): 103-113. <http://jwmsei.ir/article-1-1130-fa.html> .(In Persian)

27. Toloui, S. Hosseinzadeh, D. FakheriFard, A. and Salmasi, F. 2011. Spatial and temporal estimation of suspended sediment load in Aji-Chayriver using geostatistics and artificial neural network. *Water and Soil Science*. 21(4): 93-104. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_1190.html. (In Persian)

28. Wulder, M. A. Masek, J. G. Cohen, W. B. Loveland, T. R. and Woodcock, C. E. 2012. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*. 122: 2-10. doi:10.1016/j.rse.2012.01.010

29. Xiong, J. Thenkabail, P. S. Tilton, J. C. Gumma, M. K. Teluguntla, P. Oliphant, A. and Gorelick, N. 2017. Nominal 30-m cropland extent map of continental Africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 data on Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 9(10): 1065. doi.org/10.3390/rs9101065

30. Yang, C.T. Marsooli, R. and Aalami, M.T. 2009. Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. *International Journal of Sediment Research*. 24 (2009): 274-286. doi:10.1016/S1001-6279(10)60003-0

31. Youssef, A. M. Pradhan, B. and Sefry, S. A. 2016. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences*. 75(1): 12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4830-8>.

32. Zhang, R. Chen, Y. Zhang, X. Ma, Q. and Ren, L. 2022. Mapping homogeneous regions for flash floods using machine learning: A case study in Jiangxi province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 108: 102717. doi:10.1016/j.jag.2022.102717

woody vegetation clearing in Queensland, Australia from Landsat imagery using the Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 1: 36-49. doi:10.1016/j.rsase.2015.06.002

16. Kulkarni, R. Khare, K., and Khanum, H. 2022. Detecting, extracting, and mapping of inland surface water using Landsat 8 Operational Land Imager: A case study of Pune district, India. *F1000Research*, 11. doi: 10.12688/f1000research.121740.1

17. Lee, J. S. H., Wich, S. Widayati, A. and Koh, L. P. 2016. Detecting industrial oil palm plantations on Landsat images with Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 4: 219-224. doi:10.1016/j.rsase.2016.11.003

18. Lewis, A. Lymburner, L. Purss, M.B. Brooke, B. Evans, B. Ip, A. and Wyborn, L. 2016. Rapid, high-resolution detection of environmental change over continental scales from satellite data—the Earth Observation Data Cube. *International Journal of Digital Earth*. 9(1): 106-111. doi:10.1080/17538947.2015.1111952

19. Li, L. Skidmore, A. Vrieling, A. and Wang, T. 2019. A new dense 18-year time series of surface water fraction estimates from MODIS for the Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23(7): 3037-3056. doi:10.5194/hess-23-3037-2019

20. Parvaresh, E. Mahdavi, R. Malekian, A. Esmaelpour, Y. and Holisaz, A. 2019. Studying the main factors and prioritizing the flooding potential of subwatersheds using fuzzy topsis and electre III, case study: Sarkhoon Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 11(2): 493-507. DOI: 10.22092/ijwmse.2018.115868.1369. (In Persian)

21. Razavizadeh, S. 2022. Flood modeling due to recognition the high flood risk zones. Final report of research, Agricultural Research, Education & Extension Organization. (In Persian)

22. Razavizadeh, S. Khosroshahi, M. Dargahian, F. and Teimouri, S. 2019. Monitoring the changes in surface water of the Sistan Hamoons during flood events of February 2019 to April 2019. 14th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran Watershed Management and Integrated Management of Water and Soil Resources. <https://civilica.com/doc/1012205>. (In Persian)

23. Saeedi Mofrad, S. Asiaei, M. and Goharkhah, F. 2022. Flood Risk Zoning in Torbat-e Heydarieh Using Fuzzy Logic. *Geography and Development*. 20 (66): 81-106. : doi:10.22111/J10.22111.2022.6714. (In Persian)

24. Sharifi paichoon, M. Parnoon, F. 2018. Article Evaluation and spatial analysis of Floods in a river using Fuzzy Logic in geographic information system environment (Case Study: Qarasou

Changes in Flood Zones of Sistan's Hamuns Based on Google Earth Engine

Samaneh Razavizadeh^{1,*}, Fatemeh Dargahian², Azadeh Gouhardoust³ and Sara Teimouri⁴

Received: 24.02.2024

Accepted: 18.08.2024

Extended abstract

Introduction

Flooding is a significant natural hazard that affects millions of people around the world every year and causes extensive damage to property, infrastructure, and ecosystems. Investigating changes in floodplains is very important to understand and reduce these effects. Scientific research reveals that floodplains are affected by various factors, including climate change, urbanization, and river management practices. Notably, recent climate shifts have intensified torrential rains, expanding flood zones and elevating flood risk. Concurrently, urban development and residential expansion contribute to increased flood volume and flow by altering surface runoff patterns and reducing natural water infiltration areas. To optimize flood management strategies, the initial step involves identifying flood-prone regions, creating flood area maps, and monitoring changes over time. While post-event flood zone mapping and continuous monitoring pose challenges, satellite imagery remains the most practical solution. Advances in earth surface monitoring using satellite technology have significantly enhanced global flood monitoring capabilities. Leveraging satellite imagery and remote sensing technologies, platforms like Google Earth Engine provide valuable data for analyzing temporal and spatial variations in flood-prone areas.

Materials and methods

In the current research, we discuss the continuous monitoring of flood events in relation to the instantaneous maximum flow at the hydrometric station of the Kohak Dam. The Hamuns of Sistan, especially in recent years, have relied solely on water inflow from Afghan rivers during floods. Consequently, we conducted monitoring of the water area of the Hamuns of Sistan during flood events and tracked the water area of the Sistan plain over time using a time series of satellite images spanning from 1984 to 2021. For this purpose, we utilized Landsat satellite images (employing the NDVI index, transition algorithms, and seasonality blue zone identification algorithms) within the Google Earth Engine environment. The initial step involved extracting flood dates from the hydrometric station at Kohak Dam, located on the Sistan River at the entrance of the Hirmand River to Iran. Subsequently, we downloaded Landsat satellite images for various dates, including pre-flood, the first image after the flood, and post-water withdrawal (based on the daily hydrograph of the Kohak Dam station). To process and extract information from the

1. Corresponding author, Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: srazavizadeh@ymail.com

2. Associate Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Poplar and fast-growing trees Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

4. Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

images, we performed pre-processing and identified catchment areas of Sistan's Hamuns during flood events using the NDVI index and infrared and red bands. Additionally, we employed GSWE (Global Surface Water Explorer) algorithms to monitor temporal and spatial water extent distributions globally over the past three decades.

Results

Using the dates of flood occurrence at the hydrometric station of Kohak Dam located on the Sistan River (at the entrance of the Hirmand River to Iran), we analyzed three distinct time periods: before the flood, the first date of the satellite image after the occurrence, and after the completion of water withdrawal (based on the daily hydrograph of the Kohak Dam station). During these periods, we downloaded Landsat satellite images. The obtained results reveal that in the water year 1988-1989, the maximum instantaneous discharge was equal to 901.83 cubic meters per second, occurring on 1989/04/06. Monitoring Landsat satellite images during the three time periods before, during, and after the flood shows that with the arrival of flood flow from the Hirmand River to Iran, the water area of the Hamun wetlands increased. Specifically, after the flooding event, the water area of the Hamun wetlands in Sistan reached 2614.4 square kilometers. In the water years 1990-1991 and 2015-2016, the instantaneous maximum discharge was equal to 1178 and 624.6 cubic meters per second, respectively, occurring on 1991/06/01 and 2016/04/16. The extraction of water areas of Hamun wetlands using the NDVI index from Landsat satellite images shows that in these two flood events, the maximum water area of the Hamun wetlands resulted from flood flow and subsequent inundation. Specifically, the water area was 4477.6 and 1319.8 square kilometers, respectively.

Conclusion

The study of three maximum annual flood events in the Sistan plain showed that the water intake of Hamun wetlands is completely affected by the occurrence of floods. A step-by-step comparison of the beginning to the end of the flood hydrograph with the flood zones extracted from satellite images in the same time steps, shows the complete matching of the surface of the water zone with the size of the flood discharge. Also, the study of the changes in the water areas of the Hamuns of Sistan using the GSWE layer shows the changes that have occurred in these areas between 1984 and 2020. Therefore, the results obtained from the study of the water zones of Hamuns using GSW maps showed that the water area of Hamuns in the long term shows a sharp decrease, so that the changes occurred in such a way that in the year In 2020, compared to 1984, more than 74% of the area of Sistan's Hamuns is drained seasonally. From the point of view of studying the situation of monthly water intake based on the monitoring of long-term average water areas, the results showed that only a small part of the Sistan plain (about 11 thousand hectares) has water on average throughout the year, and this area also belongs to wells. It is half and covers about 0.5% of the studied area. Also, more than 2 million hectares of the surface of the studied area, on average, have water only in 1 month of the year, which is equivalent to 88.4% of the total area of the studied area (includes Hamuns, the rivers adjacent and the wells).

Keywords: Flood hydrograph, Transition algorithm, Seasonality algorithm, Sistan plain

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Forest and Rangeland Research Institute for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.



Conflicts of interest

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

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be available through correspondence with the author.

Authors' contribution

Samaneh Razavizadeh: research method, writing the main text of the article, software

Fateme Dargahian: References, Result analysis

Azadeh Gohardoost: Revision of the article

Sara Timuri: Software and Result analysis