



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و پنجم، پاییز ۱۳۹۹

صص ۲۰۵-۲۲۵

DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2020.67016.0>

مقاله پژوهشی

## بررسی اثر شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود بر پهنه‌های سیلاب با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های مکانی (منطقه مطالعاتی: شهر آق‌قلا)

کامران گنجی - کارشناس ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
سعید قره‌چلو<sup>۱</sup> - استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران  
احمد احمدی - دانشیار گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۴ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۱

### چکیده

عبور رودخانه گرگانرود از شهرستان آق‌قلا همواره موجب سیلاب‌های مخربی شده است. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود بر پهنه‌های سیلاب ۱۳۹۸ شهرستان آق‌قلاست؛ بدین منظور از تصاویر سری زمانی ماهواره‌های Sentinel-2 و Landsat-8 به منظور پایش کامل سیلاب استفاده شد. همچنین شاخص‌های NDWI و MNDWI برای آشکارسازی پهنه‌های سیلاب بر تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردید. پارامتر ضریب سینوزیته و تعداد و میانگین شعاع پیچانرودها در چهار بازه در حدفاصل روستای سلاق‌یلقی تا روستای دوگونچی با استفاده از نرم‌افزار Google Earth و AutoCAD محاسبه گردید. مساحت پهنه‌های به دست آمده با استفاده از شاخص MNDWI تقریباً ۸۸ درصد از مساحت پهنه‌های بدست آمده از شاخص NDWI بیشتر بود. شاخص سینوزیته رودخانه در حدفاصل روستای سلاق‌یلقی تا روستای محمد آلق برابر ۳/۸۸ (پیچانرودی شدید) است. با توجه به تخریب دیواره بیرونی پیچانرودهایی که شعاع انحنای کمی دارند مقدار زیادی گل‌ولای همراه با سیلاب به سمت مناطق شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی جریان پیدا کرده بود. در تاریخ چهارم فروردین ۱۳۹۸، در حدفاصل روستای آق‌تکه‌خان تا روستای دوگونچی میانگین عرض کم بستر رودخانه و شیب بستر بسیار کم (دو در ده هزار) باعث عدم حرکت سیلاب شده که منجر به بالا آمدن سطح آب رودخانه و خروج آن از بستر رودخانه در محدوده شهری آق‌قلا شد. دیواره‌سازی قوس‌های بیرونی پیچانرودها، کاشت گیاهان با

جذب آب زیاد در حریم کمی رودخانه، تعریض و لایروبی بستر رودخانه می‌تواند تا حد زیادی از آبگرفتگی شهر آق‌قلا هنگام سیلاب جلوگیری نماید.

**کلیدواژه‌ها:** آق‌قلا، پهنه‌بندی سیل، رودخانه گرگانرود، سنجش از دور، مورفولوژی، NDWI

#### ۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات الگوی آب و هوایی شاهد افزایش وقوع سیلاب‌هایی با شدت بالا هستیم، که علاوه بر به خطر انداختن جان و اموال انسان‌ها، باعث از بین رفتن مورفولوژی طبیعی رودخانه‌ها شده و در صورت عدم بهسازی مورفولوژی رودخانه‌ها شرایط را برای وقوع سیلاب‌های بعدی فراهم می‌کند (بالاچ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). خصوصیات مورفولوژیکی رودخانه‌ها ارتباط و اثرگذاری مهمی در خروج سیلاب از مدخل رودخانه‌ها و ایجاد سیلاب دارد و اگر چنانچه رودخانه شهری باشد، از اهمیت دوچندانی برخوردار می‌شود. در این راستا کشف تغییرات ظاهری، پایش و نقشه‌بندی آن‌ها به تحلیل مناطق سیل‌خیز و سرعت عمل این تغییرات در طی زمان کمک می‌کند و می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های کنترل و کاهش خسارت سیلاب منجر شود (کومار<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). دشت‌های سیلابی در اثر جابه‌جایی رودخانه‌های فعال، متحمل تغییرات قابل ملاحظه‌ای در طول زمان می‌شوند که بار رسوبی حمل شده از بالادست توسط سیلاب در اثر نیروی گرانش باعث انباشت در بستر و تغییر سطح مقطع و مسیر رودخانه می‌شود (بیاتی‌خطیبی، ۱۳۹۲). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی بالا، این امکان را بوجود می‌آورد تا تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها و پهنه‌های سیلاب ناشی از مورفولوژی رودخانه‌ها را شناسایی نماییم. محققین زیادی در داخل و خارج از کشور بر روی اثرات متقابل سیلاب و مورفولوژی رودخانه به کمک داده‌های سنجش از دور (RS)<sup>۳</sup> و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۴</sup> به تحقیق پرداخته‌اند.

همایون و روشنی<sup>۱</sup> (۲۰۲۰)، تغییرات مورفولوژی رودخانه ژلوم<sup>۲</sup> واقع در هندوستان که ناشی از وقوع سیلاب ۲۰۱۴ بود را مورد بررسی قرار دادند، و به این نتیجه رسیدند که طول جریان و میانگین عرض بستر رودخانه به ترتیب ۵۰۰ و ۲۵ متر کاهش یافته است و همچنین بیشترین فرسایش در مقاطعی که دارای پیچانرود زیاد و سیلابدشت‌هایی با پوشش گیاهی بود رخ داده است. کمترین مقدار خسارت در قسمت‌هایی از رودخانه که دیواره‌سازی و مستحکم سازی شده بودند صورت گرفته بود. لانگات<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، به پایش تغییرات دینامیکی کانال رودخانه تانا (کنیا) با استفاده از رویکردهای سنجش از دور و GIS پرداختند، آن‌ها مقدار افزایش و تغییرات

1 Balasch

2 Kumar

3 Remote Sensing

4 Geographic Information System

5 Himayoun & Roshni

6 Jhelum river

7 Langat

فرسایش در یک باز را بوسیله تصاویر اپتیک سری زمانی لندست محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که عوامل رژیم جریان هیدرولیکی، کاربری زمین‌های بالادست، شیب طبیعی کانال و پوشش گیاهی اطراف کانال بیشترین تأثیر در این تغییرات را داشته‌اند. کومار<sup>4</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، اثرات ژئومورفیک سیلاب در سال ۲۰۱۱ را بر روی کانال رودخانه راپتی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که شکل سیلابدشت‌ها و خطوط کناری رودخانه جابه‌جایی جانبی را با توجه به قدرت جریان سیلاب به اندازه ۱۰ تا ۲۳ (Wm<sup>2</sup>) داشته است و بیشترین جابه‌جایی این کانال به طرف شمال غربی بوده است. جوکارسرهنگی و همکاران (۱۳۹۶)، به بررسی تغییرات مورفومتری رودخانه چهل‌چای نرماب با تأکید بر پیچان‌رودها با استفاده از تصاویر هوایی و تصاویر Google Earth مربوط به سال‌های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۲ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پارامتر طول کانال این رودخانه ۶۲۰۰ متر، سینوزیته ۰/۳، تعداد پیچان‌رود ۳۱ حلقه، میانگین زاویه مرکزی ۰/۴ درجه و میانگین عرض کانال آن ۹ متر نسبت به سال ۱۳۴۵ کاهش یافته است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای استخراج پهنه‌های سیلاب استفاده از تصاویر ماهواره‌های اپتیک می‌باشد (وانگ<sup>5</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). لذا با دسترس بودن تصاویر موجود از زمان وقوع سیلاب، به کمک شاخص‌های شناسایی آب و سیلاب مانند NDWI<sup>6</sup> و MNDWI<sup>7</sup> می‌توان پهنه‌های سیلاب را در هر بازه زمانی مورد پایش قرار داد (دی بالداسور و آلنبروک<sup>1</sup>، ۲۰۱۲). اصلی‌ترین مانع استفاده از داده‌های اپتیک برای پایش سیلاب حساسیت آنها نسبت به ابرها می‌باشد که معمولاً در زمان وقایع سیلاب وجود دارد، این فاکتور خود به تنهایی ایجاد مزاحمت می‌کند و علت دیگر تاریخ تصویربرداری می‌باشد، که در زمینه‌های عملیاتی پایش سیلاب با داده‌های اپتیک باید این موانع گسترده را پذیرفت (موسی<sup>2</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). در این زمینه محققین زیادی به مطالعه پرداختند از جمله، کوانگ<sup>3</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، مساحت آب‌های سطحی رودخانه وولتا<sup>4</sup> را با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-2 و Landsat-8 با استفاده از شاخص NDWI بدست آوردند و به این نتیجه رسیدند که برای شناسایی آب‌های سطحی تصاویر ماهواره Sentinel-2 از دقت بالاتری برخوردار است. دو<sup>5</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از تصاویر اپتیک ماهواره Sentinel-2 و شاخص‌های NDWI و MNDWI و فیلترهای IHS و HPF مساحت آب‌های سطحی را برای مناطق ساحلی ونیز بدست آوردند، نتایج آنان نشان می‌داد که شاخص MNDWI نسبت به شاخص NDWI از دقت بالاتری برخوردار است. یکی از مهمترین کاربردهای

1 Kumar

2 Wang

3 Normalized Difference Water Index

4 Modified Normalized Difference Water Index

5 Di Baldassarre and Uhlenbrook

6 Musa

7 Kwang

8 Volta River

9 Du

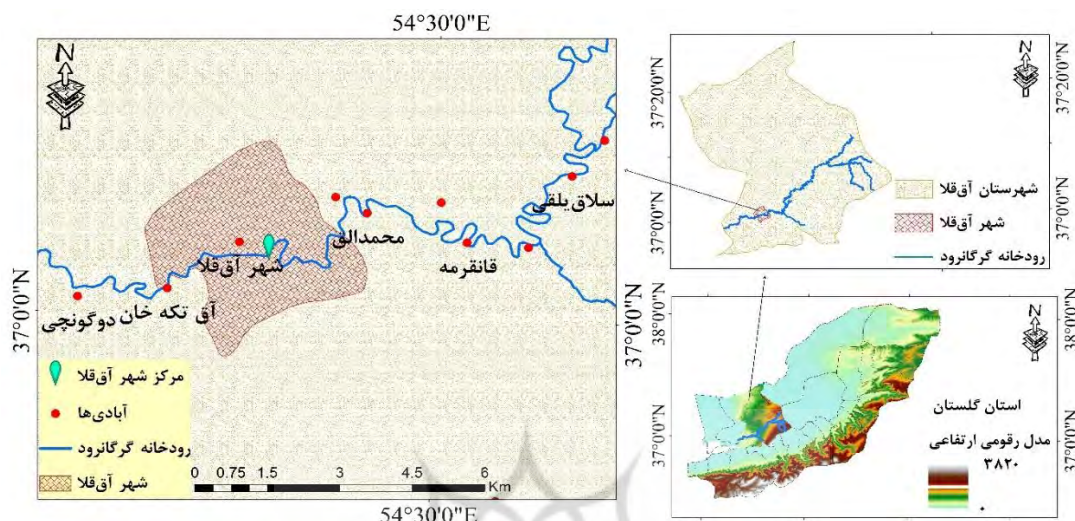
نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب برای شهرستان آق‌قلا تعیین حدود گذرگاه سیل و اراضی سیل‌گیر حاشیه رودخانه گرگانرود در مناطق شرقی شهر آق‌قلا می‌باشد. از سوی دیگر اغلب روستاهای شهرستان آق‌قلا از جمله سلاق‌یلقی، قانقرمه، سیدلر، دوگونچی و شهر آق‌قلا در حاشیه خطر این رودخانه قرار دارند. شهر آق‌قلا به دلیل عبور رودخانه گرگانرود همواره مورد تهدید سیلاب‌های مخربی چون سیل فروردین ۱۳۹۸ و سیل‌های سال ۸۰، ۸۱، ۸۶، ۹۱ و ۹۳ قرار داشته است. لذا شناسایی رفتار رودخانه و پایش تغییرات مورفولوژی رودخانه گرگانرود هنگام سیلاب می‌تواند کمک شایانی به کنترل سیلاب شهرستان آق‌قلا نماید. هدف این تحقیق استخراج و محاسبه مساحت پهنه‌های سیلاب فروردین ۱۳۹۸ شهرستان آق‌قلا به کمک تصاویر اپتیکی ماهواره‌های Landsat-8 و Sentinel-2 با استفاده از نسبت‌گیری طیفی باندهای مرئی و ارتباط آن با پارامترهای مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود در حدفاصل روستاهای سلاق‌یلقی تا روستای دوگونچی می‌باشد. همچنین جهت صحت‌سنجی، نتایج نهایی با اطلس سیل تهیه شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور و تصاویر میدانی گرفته شده از سیلاب مقایسه گردید.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

شهر آق‌قلا در استان گلستان و مرکز شهرستان آق‌قلا می‌باشد، که در محدوده مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه شمالی و ۵۴ درجه شرقی قرار داد. تقریباً ۵۰ درصد اراضی شهرستان آق‌قلا به دلیل عبور رودخانه گرگانرود دارای کاربری کشاورزی، گندم و جو می‌باشد، و مناطق شمالی و شمال‌غربی شهر آق‌قلا بیشتر از نوع باتلاقی و شورزار می‌باشد که فاقد پوشش گیاهی و درختان مناسب است، همچنین مناطق جنوبی شهر آق‌قلا مناطق صنعتی و باغ می‌باشد. اقلیم شهرستان آق‌قلا مانند منطقه ترکمن صحرا بیابانی گرم و مرطوب می‌باشد. این شهرستان در سه حوضه‌آبریز گرگانرود، قره‌سو و اترک قرار دارد. حوضه‌آبریز گرگانرود از ارتفاعات شرقی استان گلستان و خراسان‌شمالی سرچشمه گرفته که سرشاخه اصلی آن رودخانه گرگانرود می‌باشد، حوضه‌آبریز قره‌سو از دامنه‌های شمالی البرز شرقی سرچشمه گرفته که برخی از زیرشاخه‌های آن وارد رودخانه گرگانرود می‌شود، و حوضه‌آبریز اترک که قسمتی از آن در ایران و قسمتی دیگر در کشور ترکمنستان قرار دارد وارد رودخانه اترک شده که از مناطق شمالی شهرستان آق‌قلا به دریای خزر می‌ریزد. رودخانه گرگانرود یکی از مهم‌ترین شاخه‌های سیل‌خیز استان گلستان می‌باشد که طول آن حدود ۲۵۱ کیلومتر می‌باشد که تقریباً ۸۵ کیلومتر آن از شهرستان آق‌قلا و حدوداً ۱۲ کیلومتر آن از محدوده شهری آق‌قلا عبور می‌کند. جهت جریان آب این رودخانه از شرق به غرب می‌باشد و پس از عبور از شهرهای گنبد کاووس و آق‌قلا در غرب خواجه‌نفس با تشکیل دلتای بزرگی به دریای خزر می‌ریزد. متوسط آبدهی

سالانه رودخانه گرگانرود حدود ۹۲۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. موقعیت و کاربری اراضی شهرستان آق‌قلا در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی، شهرستان آق‌قلا، محدوده روستای سلاق‌بلی تا روستای دوگونچی

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

ماهواره ایتیکی Sentinel-2A از سری ماهواره‌های سنتینل می‌باشد که توسط (سازمان فضایی اروپا)<sup>1</sup> در سال ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شد. این ماهواره در ۱۳ باند در محدوده طیف مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج‌کوتاه از طیف الکترومغناطیسی تصویربرداری می‌کند. قدرت تفکیک این تصاویر در سه دسته ۱۰، ۲۰، ۶۰ متر می‌باشد (دو<sup>2</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیق حاضر برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی سری زمانی سیلاب، نیاز به داده‌های متعددی در بازه وقوع سیلاب بود، به دلیل اینکه در زمان وقوع سیلاب درصد ابر زیادی در برخی از تصاویر Sentinel-2 وجود داشت و با توجه به دوره بازگشت ده روزه آن دو تصویر مناسب از واقعه سیلاب موجود بود، به همین دلیل از داده‌های ماهواره Landsat-8 که محدوده باندهای تصویربرداری آن مشابه Sentinel-2 بود و همچنین با توجه دوره بازگشت شانزده روزه آن از (پرتال زمین‌شناسی آمریکا)<sup>3</sup> به‌عنوان مکمل برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی سری زمانی سیلاب استفاده شد. مشخصات تصاویر مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ نمایش داده شده است. پارامترهای مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود شامل طول رودخانه، تعداد پیچانرودها، عرض و شعاع پیچانرودها و ضریب

1 <https://scihub.copernicus.eu/>

2 Du

3 <https://earthexplorer.usgs.gov/>

خمیدگی (سینوزیته) رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نرم‌افزار Google Earth, AutoCAD و بازدیدها و ارزیابی‌های میدانی استخراج گردید.

### جدول ۱- مشخصات تصاویر سری زمانی داندلود شده ماهواره‌های Landsat-8 و Sentinel-2

تصاویر	تاریخ	درصد ابرناکی
LC08_L1T P	۱۴ فروردین ۱۳۹۸	۸۳۲
S2B-MSIL2A	۱۶ فروردین ۱۳۹۸	۳/۸۷
S2B-MSIL2A	۲۶ فروردین ۱۳۹۸	۲۲/۷۲
S2B-MSIL2A	۵ اردیبهشت ۱۳۹۸	۳/۴۵

### ۲-۳- پردازش رادیومتریکی و اتمسفریک داده‌ها

خطای رادیومتریکی بر اثر تغییرات انرژی الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده ناشی از سایه توپوگرافی سطح زمین یا پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی بوجود می‌آیند، که اغلب نتایج نهایی را دچار مشکل می‌کند (ناندی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفریک برای برطرف کردن خطاهای ناشی از جذب و پخش اتمسفر و افزایش آشکارسازی طیفی بر روی تصاویر صورت می‌گیرد (زانتوی و استروبل<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹؛ ژو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). جهت برطرف کردن خطاها بر روی تصویر ماهواره Landsat-8، تصحیح رادیومتریکی رادیانس<sup>۴</sup>، سپس تصحیح اتمسفری FLAASH<sup>۵</sup> بر تصاویر اعمال گردید و همچنین حاشیه‌های تصویر که ارزش پیکسل صفر داشتند، حذف گردید. با بررسی نمودار تغییر طیفی، مقدار پخش اتمسفر در تصاویر Landsat-8 بین پنج تا ده درصد بود، که بعد از اعمال تصحیح اتمسفری به دو درصد کاهش یافت. جهت بررسی رفتار طیفی مولفه‌های مؤثر در سیلاب، میزان ارزش عددی پیکسل‌ها قبل از اعمال الگوریتم تغییرمقیاس<sup>۶</sup> برای مولفه‌های آب، مناطق مرطوب و پوشش گیاهی به ترتیب برابر ۲۷۰۰، ۲۱۰ و ۳۸۰۰ بود، که بعد از اعمال الگوریتم تغییرمقیاس میزان ارزش عددی آنها به ترتیب به ۰/۲۴، ۰/۳۶ و ۰/۳۹ کاهش یافت. میزان ارزش عددی پیکسل‌هایی که بالاتر از یک و کمتر از صفر بودند، به عنوان بدپیکسل شناخته شده و برابر صفر در نظر گرفته شدند. بدلیل اینکه تصاویر ماهواره Sentinel-2، تصحیح رادیومتریکی و اتمسفریک به صورت پیش‌فرض توسط سازمان فضایی اروپا بر روی آنها اعمال شده

1 Nandi

2 Szantoi & Strobl

3 Zhou

4 Radiance

5 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube

6 Rescale, [(b1 le 0)\*0+(b1 ge 10000) \*1+(b1 gt 0 and b1 lt 10000)\*float(b1)/10000]

است (Szantoi and Strobl, 2019)، برای اطمینان تصحیح رادیومتریک رادیانس و تصحیح اتمسفری<sup>1</sup> QUAC بر آنها اعمال شد، اما تغییری محسوس در کیفیت تصاویر مشاهده نشد. به منظور افزایش دقت در نتایج نهایی از تصاویری که درصد پوشش ابر و میزان پراکنش اتمسفر در آنها کمتر از بود، در این تحقیق استفاده شد.

#### ۴-۲- استخراج پهنه‌های سیلاب با استفاده از شاخص‌های NDWI و MNDWI

شاخص NDWI رابطه (۱)، اولین شاخص شناسایی آب می‌باشد که توسط مک فترز در سال ۱۹۹۶ ارائه شد که در پهنه‌بندی و آشکارسازی آب‌های آزاد با استفاده از داده‌های سنجنش از دور بکار می‌رود (مک فترز<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶). در این شاخص از ترکیب باند مادون قرمز نزدیک (NIR<sup>۳</sup>) با طول موج ۸۴۲ نانومتر و باند سبز (GREEN) با طول موج ۵۶۰ نانومتر استفاده شده است.

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در شاخص NDWI با کاهش بازتاب ویژگی‌های غیر آب مانند گیاه و خاک در طول موج باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و همزمان افزایش بازتاب آب در طول موج باند سبز (Green) باعث آشکارسازی مناطق سیلابی از غیر سیلابی می‌شود؛ با اعمال این شاخص مقدار ارزش بازتاب بیکسل‌ها در محدوده بین -۱ تا +۱ قرار می‌گیرند (مک فترز<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶)، که مقادیر -۱ تا صفر نشان دهنده مناطق غیر سیلابی و مقادیر صفر تا +۱ نشان دهنده پهنه‌های سیلابی می‌باشد (مک فترز<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶). مهم‌ترین مشکل این شاخص ناتوانی در تشخیص مناطق ساختمانی از آب‌های سطحی می‌باشد (ژو<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶). باند سبز در ماهواره‌های Landsat-8 و Sentinel-2 باند شماره ۳ و باند مادون قرمز نزدیک در ماهواره Landsat-8 باند ۵ و ماهواره Sentinel-2 باند ۸ می‌باشد.

ژو در سال ۲۰۰۶ با جایگزین کردن باند SWIR-1 با محدوده طول موج ۱۶۰۰ نانومتر به جای باند مادون قرمز نزدیک با طول موج ۸۴۲ نانومتر شاخص MNDWI رابطه (۲) را ارائه کرد (Xu, 2006). اصلی‌ترین مزیت این شاخص، کاهش و حذف خطاهای ناشی از سایه ساختمان‌ها می‌باشد که باعث تمیز دادن مناطق ساختمانی از مناطق سیلابی می‌شود (Xu, 2006).

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR1)}{(Green + SWIR1)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این شاخص باند SWIR-1 برای ماهواره Landsat-8 باند ۶ و ماهواره Sentinel-2 باند ۱۱ می‌باشد. با اعمال این شاخص سه نتیجه قابل انتظار است: (۱) مقادیر مثبت بزرگتر برای آب و آب‌های خالص در باند SWIR-

1 Quick Atmospheric Correction

2 McFeeters

3 Near Infra-Red

4 Xu

1 نسبت به NIR؛ (۲) مقادیر منفی برای مناطق ساختمانی بدلیل بازتاب بیشتر در باند SWIR-1 نسبت به NIR؛ (۳) خاک و گیاهان همچنان مقادیر بازتاب منفی دارند.

## ۲-۵- شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه

### ۲-۵-۱- شاخص سینوزیته

شاخص سینوزیته برای نشان دادن میزان شکستگی و انحنا کانال بکار می‌رود و مقدار آن از تقسیم طول کانال با احتساب پیچ‌وخم‌های موجود بر طول مستقیم کانال که ابتدا و انتهای هر بازه را به یکدیگر متصل می‌کند بدست می‌آید (جعفر بیگلو و همکاران ۱۳۹۱). بر اساس این پارامتر، اگر ضریب سینوزیته یک رودخانه بین ۱ تا ۱/۰۵ باشد رودخانه از نوع مستقیم است، اگر بین ۱/۰۶ تا ۱/۲۵ باشد از نوع سینوسی است، بین ۱/۲۶ تا ۲ باشد از نوع پیچانرودی و اگر بیشتر از ۲ باشد، از نوع پیچانرودی شدید است (یمانی و همکاران ۱۳۸۹). رابطه (۳) نحوه محاسبه این پارامتر را نشان می‌دهد.

$$S = \frac{C}{V}$$

رابطه (۳)

در این رابطه S ضریب سینوزیته، C طول رودخانه با احتساب پیچ‌وخم‌ها و V طول رودخانه با خط مستقیم. به منظور استخراج پارامترهای مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود، بحرانی‌ترین قسمت رودخانه گرگانرود هنگام وقوع سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در نظر گرفته شد. این محدوده از روستای سلاق‌بلیقی در شرق شهر آق‌قلا شروع شده و تا روستای دوگونچی در غرب شهرستان آق‌قلا ادامه پیدا می‌کند. محدوده مورد نظر به چهار بازه تقسیم گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است. طول مستقیم و غیرمستقیم رودخانه در هر چهار بازه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth استخراج و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD مقادیر آنها اندازه‌گیری شد و با جای‌گذاری در رابطه (۳) ضریب سینوزیته محاسبه گردید، که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقدار ضریب سینوزیته و نوع الگوی رودخانه

بازه اول	بازه دوم	بازه سوم	بازه چهارم	رودخانه گرگانرود
۹/۲۷۴	۴/۶۵۰	۵/۳۷۴	۴/۳۴۹	(C) طول رودخانه با احتساب پیچ‌وخم‌ها (کیلومتر)
۲/۳۹۰	۲/۲۸۰	۳/۸۰	۲/۷۱۱	(V) طول مستقیم رودخانه (کیلومتر)
۳/۸۸۰	۲/۰۳۹	۱/۴۱۴	۱/۶۰۴	(S) ضریب سینوزیته
پیچانرودی شدید	پیچانرودی شدید	پیچانرودی	پیچانرودی	الگوی رودخانه

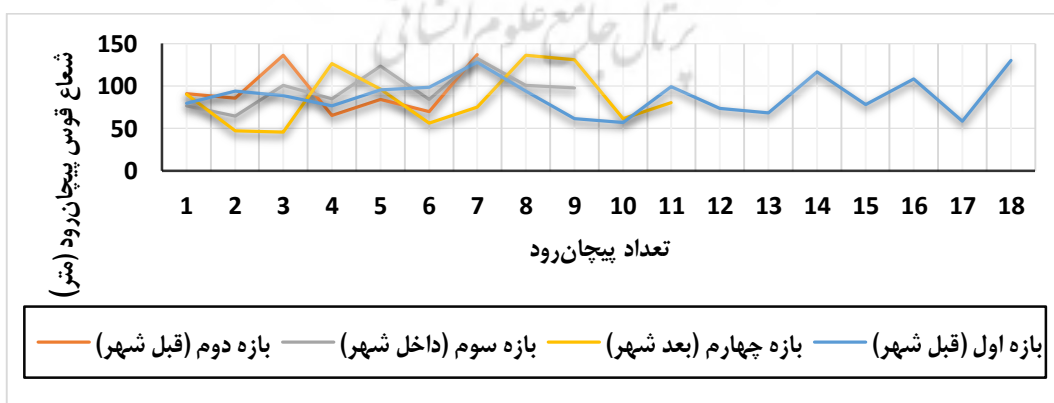


## ۲-۵-۲- پیچان‌رودها

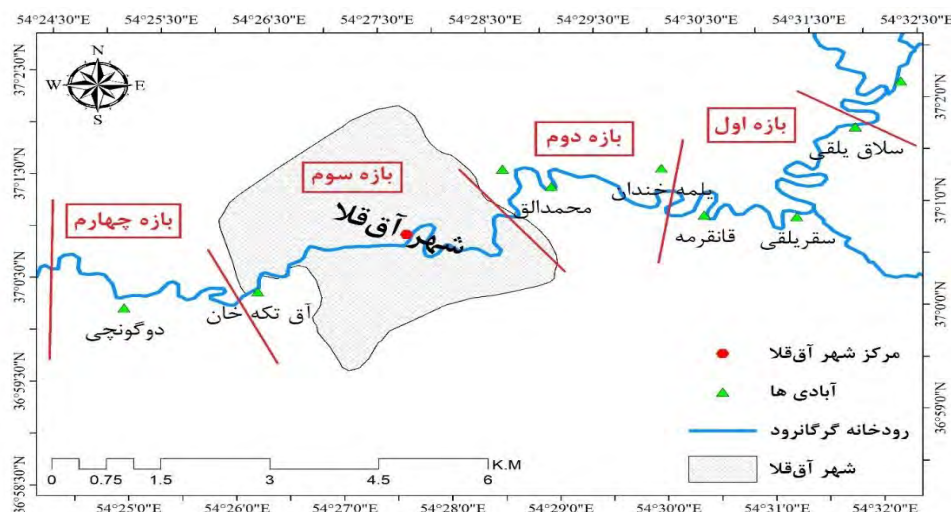
تعداد و شعاع قوس پیچان‌رودها از مهمترین شاخص‌ها در تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها می‌باشد که در گذر زمان دچار تغییرات زیادی می‌شوند. تعداد و شعاع قوس پیچان‌رودها، توانایی و قدرت رودخانه در برابر عبور سیلاب را تعیین می‌کند، به طوری که افزایش تعداد پیچان‌رودها در یک طول کوتاه، تخریب دیواره داخلی قوس افزایش یافته و مواد حاصل از فرسایش را در دیواره‌های قوس خارج انباشت کرده و باعث کاهش عمق خارجی و کاهش عرض بستر در پیچان‌رودها می‌شود (نوحه‌گر و یمانی، ۱۳۸۲). حجم زیادی از رسوبات توسط دبی جریان‌های بزرگ حل شده و از خط القعر قوس به خارج از بستر رودخانه حمل می‌شود و سیلاب‌هایی حاوی گل‌ولای را بوجود می‌آورد. این سیلاب در کنار آبگرفتگی‌های سطح شهر که ناشی از بسترهای نفوذناپذیر می‌باشند، دو طیف رنگی از سیلاب را بوجود می‌آورند که شناسایی آنها توسط شاخص‌های طیفی را دچار مشکل می‌کند. جریان با سرعت پایین به مرور زمان باعث تخریب دیواره‌های کانال شده و رودخانه مجبور به تغییر مسیر شده و به تبع آن پیچان‌رود جدیدی را بوجود می‌آورد. تعداد، شعاع پیچان‌رودها و عرض رودخانه در پیچان‌رودها (فاصله داخلی خط الراس و خط القعر قوس پیچان‌رود) برای تمامی پیچان‌رودها در هر چهار بازه به کمک تصاویر ماهواره‌ای و Google Earth استخراج و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD محاسبه گردید (شکل ۳). میانگین این مقادیر در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر تعداد پیچان‌رود، میانگین شعاع پیچان‌رودها، میانگین عرض کانال در پیچان‌رودها

رودخانه گرگانرود	بازه اول	بازه دوم	بازه سوم	بازه چهارم
تعداد پیچان‌رود	۱۸	۷	۹	۱۱
میانگین شعاع پیچان‌رودها (متر)	۸۹/۳۲۱	۹۵/۶۶۱	۹۶/۲۰۹	۸۶/۱۰۹
میانگین عرض کانال در پیچان‌رودها (متر)	۱۷/۷۰۶	۱۷/۶۵۷	۲۳/۹۳۳	۱۶/۸۲۲



شکل ۲- نمودار تعداد پیچان‌رود و شعاع قوس هر پیچان‌رود در بازه‌های مورد مطالعه



شکل ۳- بازه‌های مورد بررسی، (بازه اول) حدفاصل روستای سلاق یلقی تا قانقرمه، (بازه دوم) حدفاصل روستای قانقرمه تا شهر آق‌قلا، (بازه سوم) محدوده شهری آق‌قلا و (بازه چهارم) حدفاصل شهر آق‌قلا تا روستای دوگونچی

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تأثیر شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه گرگانرود در ایجاد پهنه‌های سیلابی

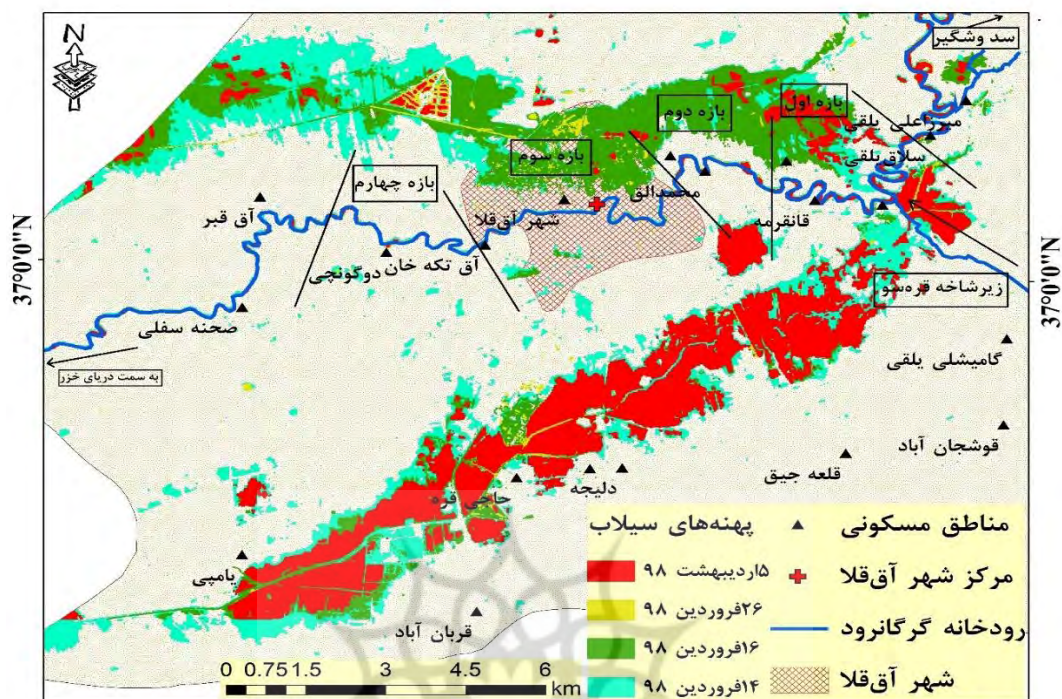
ضریب سینوزیته کانال رودخانه در محدوده روستای سلاق یلقی (بازه اول) برابر  $3/88$  می‌باشد که رودخانه از نوع پیچانرودی شدید است. در روز ۱۶ فروردین ۱۳۹۸ ماکسیمم دبی ۶۶۶ مترمکعب بر ثانیه (ایستگاه هیدرومتری سد وشمگیر، گزارش آب منطقه‌ای استان گلستان ۱۳۹۸) از سد وشمگیر و دبی ۷۳ مترمکعب بر ثانیه از زیرشاخه‌های رودخانه قره‌سو وارد این بازه از رودخانه شده است. با توجه به شیب طولی بسیار کم رودخانه (سه در ده هزار) در بازه اول و پیچانرودهای زیاد با میانگین شعاع  $89/321$  متر، حجم رسوبات انباشته شده در پیچانرودها باعث کاهش ظرفیت نرمال عبوری رودخانه شده است. اولین پیچانرود در بازه اول با شعاع حدوداً ۸۰ متر باعث خروج سیلاب از مدخل رودخانه شده که با توجه به شیب و توپوگرافی و نبود پوشش گیاهی جاذب آب، سیلاب به دشت‌های واقع در شمال شهر آق‌قلا جریان پیدا کرده و از مناطق شمالی شهر وارد محیط مرکزی شهر شده است. لذا پهنه‌های سیلاب مشاهده شده در تاریخ ۱۴ و ۱۶ فروردین ۹۸، (شکل ۴، بازه اول، پهنه‌های آبی و سبز رنگ) ناشی از دلایل ذکر شده می‌باشد.

ضریب سینوزیته کانال در محدوده روستای قانقرمه (بازه دوم) برابر  $2/039$  می‌باشد که رودخانه از نوع پیچانرودی شدید است، اما با توجه به اینکه حجم عمده سیلاب در بازه اول از مدخل رودخانه خارج شده، حجم سیلاب کمتری به بازه دوم جریان پیدا کرده است؛ در روستای محمدآلق، تصرف به حریم کمی (۲۰ متر) رودخانه

باعث تخریب دیواره‌های رودخانه در بعضی از مناطق شده، و وجود پل عبور و مرور با تراز سطح عرشه پایین و عدم وجود پایه‌های مناسب مانند مانعی بر سر راه جریان باعث بالا آمدن سطح جریان و خروج سیلاب از مدخل شده است. با توجه به اینکه توانایی تفکیک مکانی تصاویر ماهواره Sentinel-2، ده متر می‌باشد، پهنه‌های سیلاب خارج شده از مدخل به آسانی قابل شناسایی نبود که این نشان می‌دهد مساحت پهنه‌های سیلاب کمتر از ۱۰۰ مترمربع بوده است.

ضریب سینوزیته کانال در محدوده شهری آق‌قلا (بازه سوم) برابر  $1/414$  می‌باشد که رودخانه از نوع پیچانرودی است. اکثر مسیر رودخانه در این بازه مستقیم بوده و میانگین شعاع پیچانرودها  $1/8$  از میانگین شعاع پیچانرودهای بازه اول بیشتر است. میانگین عرض بستر کانال رودخانه در بازه سوم  $26\%$  بیشتر از میانگین عرض بستر کانال رودخانه در بازه‌های اول و دوم می‌باشد. و همچنین در نزدیکی پل‌ها دیواره‌سازی و بهسازی کانال رودخانه صورت گرفته است. اما در نزدیکی پل تاریخی آق‌قلا به دلیل عدم لایروبی کانال رودخانه دهانه‌های کناری پل تاریخی آق‌قلا مسدود شده و باعث تنگ‌شدگی عرض بستر رودخانه شده و به تبع آن سطح جریان بالا آمده و باعث خروج سیلاب از مدخل رودخانه شده است که باعث آبگرفتگی حریم کمی رودخانه را در پی داشته است.

ضریب سینوزیته کانال در محدوده روستای دوگونچی (بازه چهارم) برابر  $1/604$  که رودخانه از نوع پیچانرودی است. میانگین عرض پیچانرودها در این بازه حدوداً  $30\%$  نسبت به بازه سوم کمتر است که نشان می‌دهد عرض رودخانه در پیچانرودها کمتر از سایر بازه‌ها است. با توجه به اینکه حجم عمده سیلاب در بازه‌های اول، دوم و سوم از بستر رودخانه خارج شده بود، سیلاب نسبتاً کمتری در این بازه وارد شده است. در این بازه پهنه سیلابی از بستر خارج نشده است اما رودخانه در حداکثر ظرفیت عبوری خود قرار داشت. دبی جریان در زمان سیلابی باعث بالا رفتن شعاع هیدرولیکی شده و با توجه به نوع رسوب بستر و کناره‌های رودخانه که در این بخش بیشتر از جنس خاک لسی است، تنش برشی وارد بر کناره‌ها را افزایش می‌دهد. موانع موجود در مسیر رودخانه مانند پایه‌های پل آق‌تکه‌خان، جریان‌های چرخشی (گردابی) را بوجود می‌آورد. این موانع به همراه تغییرات ناگهانی مقطع رودخانه و تغییر شیب از (سه در ده هزار به دو در ده هزار)، باعث جدا شدن خطوط جریان شده و تخریب مخصوصاً در کناره‌های پل حوالی روستای آق‌تکه‌خان به طرف پایین‌دست رودخانه گرگانرود آغاز می‌گردد. در محل انحنای رودخانه گردآب‌هایی تشکیل می‌گردد که مجدداً قدرت نیروی مالشی را بالا برده و در نتیجه خاک در همان محل انحنای جدا می‌شود که این آغاز توسعه و گسترش پیچانرود در رودخانه گرگانرود است. با توجه به فروکش کردن سیلاب در تاریخ ۲۶ فروردین پهنه سیلاب قابل توجهی شناسایی نشد (شکل ۴، پهنه زرد رنگ)، و پهنه‌ها قرمز رنگ مربوط به شکسته شدن آب‌بندان یلمه‌خندان در سوم اردیبهشت می‌باشد (شکل ۴، پهنه قرمز رنگ). پهنه‌های سری زمانی سیلاب فروردین ۱۳۹۸ با توجه به شرایط مورفولوژی رودخانه گرگانرود در شکل ۴ نشان داده شده است.

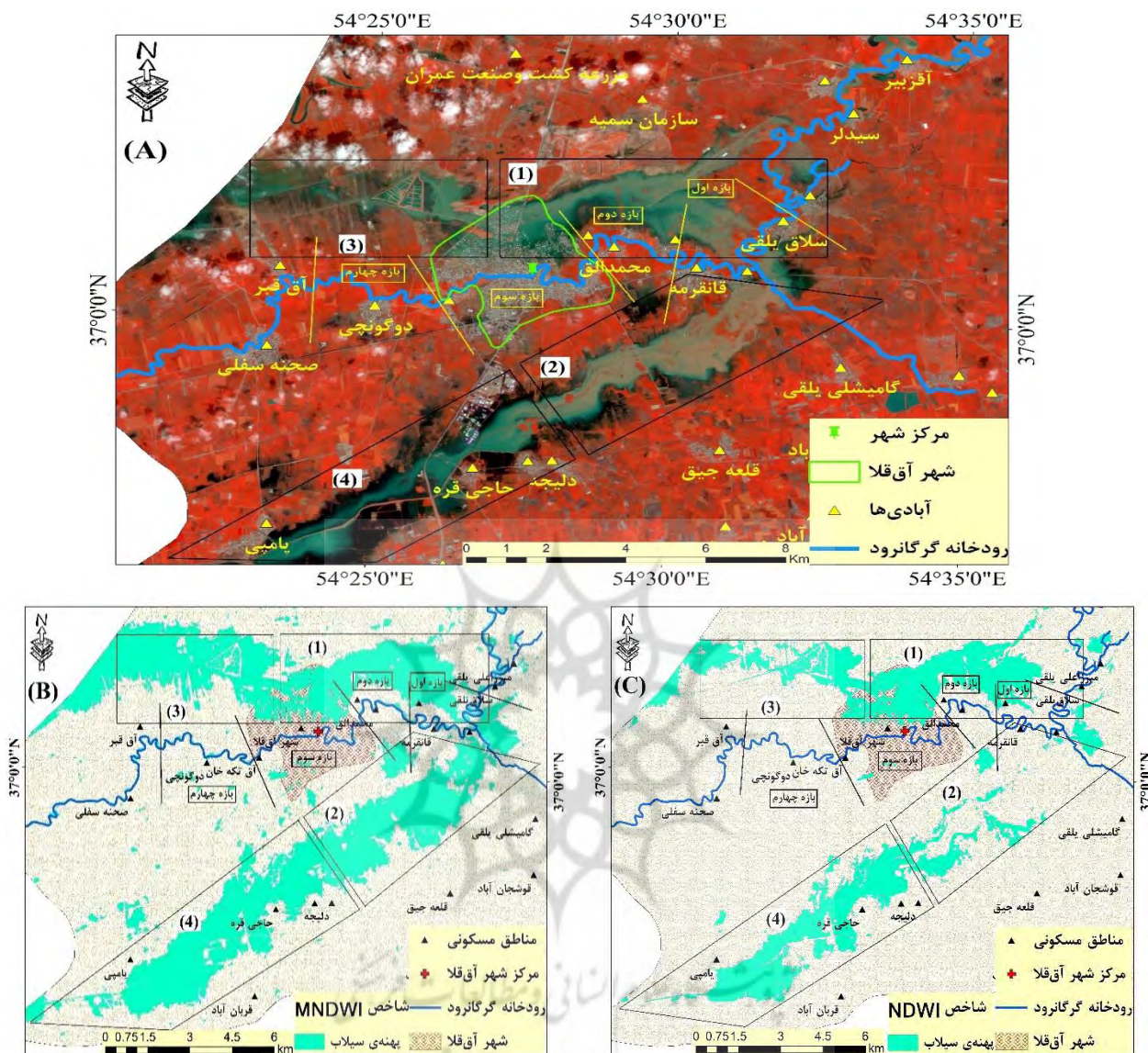


شکل ۴- پهنه‌های سری‌زمانی سیلاب، با توجه به شرایط مورفولوژی رودخانه گرگانرود (محدوده روستای سلاق یلقی تا روستای دوگونچی)

### ۲-۳- تأثیر مورفولوژی رودخانه گرگانرود بر سری‌زمانی پهنه‌های سیلابی

در سیلاب فروردین ۱۳۹۸ شهرستان آق‌قلا، پهنه‌های سیلاب موجود در تصاویر ماهواره‌ای در سیلابدشت‌ها از دو طیف رنگی آبی و قهوه‌ای تشکیل شده بود. به دلیل اینکه حجم عمده رسوبات از جنس خاک رس یا لسی می‌باشند، به راحتی در خط‌القعر پیچانرودها که سرعت جریان کمی بالاتر است با جریان گردابه‌ای سیلاب در این ناحیه حل می‌شود و پهنه سیلابی به رنگ قهوه‌ای بوجود می‌آورد. به منظور استخراج و محاسبه مساحت پهنه‌های سیلاب ذکر شده از نسبت‌گیری طیفی باندهای مرئی تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی Sentinel-2 و Landsat-8 استفاده گردید. با بررسی‌های انجام شده به صورت آزمون و خطا در این تحقیق بر روی گراف‌های بازتاب-طول موج برای آب، پوشش گیاهی، خاک، مناطق مسکونی، این نتیجه حاصل شد که مناسب‌ترین بازتاب-طول موج برای شناسایی پهنه‌های سیلاب مربوط به باندهای سبز (B3) با طول موج ۵۶۰ نانومتر و مادون قرمز نزدیک (NIR) با طول موج ۸۴۲ نانومتر و مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR-1) با طول موج ۱۶۱۰ نانومتر می‌باشد. سپس شاخص‌های NDWI و MNDWI بر روی تصاویر اعمال گردید. با توجه مرور تحقیقات پیشین حدود آستانه‌های شناسایی پهنه‌های سیلاب

مربوط به شاخص NDWI برای تصاویر Sentinel-2 در محدوده  $+0/2$  تا  $+0/4$  و برای تصاویر Landsat-8 در محدوده  $+0/3$  تا  $+0/5$  قرار داشت که این حدود آستانه با سعی و خطا در بازه  $-1$  تا  $+1$  بدست آمده‌اند. حدود آستانه‌ای که همزمان سیلاب آبی رنگ و قهوه‌ای رنگ را در نظر بگیرد با استفاده از شاخص MNDWI برای سنجنده Sentinel-2 در محدوده  $+0/3$  تا  $+0/6$  و برای سنجنده Landsat-8 در محدوده  $+0/4$  تا  $+0/6$  قرار داشت. برای هر دو سنجنده و هر دو شاخص مقادیر منفی نشان دهنده مناطق خشک و فاقد آبگرفتگی بود. به طور کلی تصاویر مجموعه L2A سنجنده Sentinel-2 بدلیل عدم نیاز به تصحیحات اتمسفری و بالا بودن رزولوشن مکانی نسبت به سنجنده Landsat-8 در بدست آوردن پهنه‌ها از سرعت و کیفیت بالاتری برخوردار است. همانطور که در (شکل ۵، A) مشاهده می‌شود، سیلاب حاوی گل‌ولای در محل تلاقی زیرشاخه‌های رودخانه قره‌سو (بازه اول) وارد رودخانه گرگانرود شده است. اکثر این پهنه‌ها (کادر مستطیل ۱ و ۲) در بازه اول قرار دارند. این پهنه‌ها در شاخص MNDWI (شکل ۵، B) به دلیل اینکه طیف بازتابی مشابه زمین‌های مرطوب دارند، جزو پهنه‌های سیلابی در نظر گرفته شده‌اند. اما پهنه‌های حاوی گل‌ولای و زمین‌های مرطوب که سیلاب در آنها فروکش کرده است (شکل ۵، A) در شاخص NDWI جزو پهنه‌های سیلابی در نظر گرفته نشده‌اند (کادر مستطیل ۳ و ۴)، این مناطق به رنگ سیاه در (شکل ۵، A) دیده می‌شود. بنابراین بازه اول که شرایط مورفولوژی رودخانه از جمله تعداد پیچانرود زیاد، عرض بستر کم و همچنین عدم کانالیزاسیون رودخانه وجود دارد، این بازه مستعد بوجود آوردن سیلاب‌هایی حاوی گل‌ولای می‌باشد، که امکان استخراج آنها با استفاده از شاخص‌های شناسایی آب مانند NDWI وجود ندارد. با توجه به خروج حجم عمده سیلاب در بازه اول، در بازه‌های دوم و سوم حجم سیلاب نسبتاً کمتری وارد شده است که رودخانه توان عبور آنها داشته است، به همین دلیل پهنه سیلابی بسیار ناچیزی از مدخل رودخانه خارج شده بود که در تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این تحقیق قابل شناسایی نبودند. بعد از شناسایی پهنه‌های سیلاب با استفاده از شاخص NDWI و MNDWI این نتیجه حاصل شد که شاخص MNDWI برای استخراج پهنه‌های سیلاب حاوی گل‌ولای و مناطقی که سیلاب فروکش کرده و زمین از رطوبت زیادی برخوردار است عملکرد بهتری دارد.

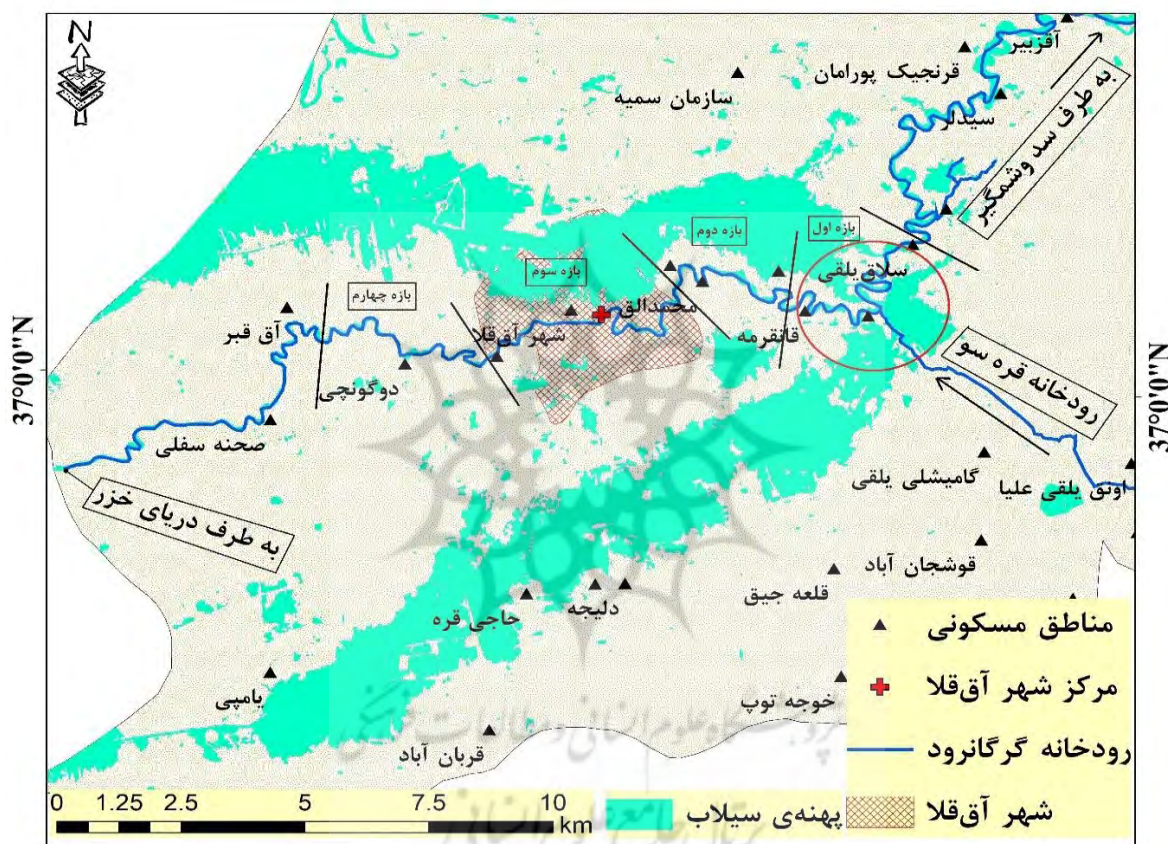


شکل ۵- تصویر (A) ماهواره سنتینل-۲ تاریخ ۱۶ فروردین ۱۳۹۸ (ترکیب رنگ کاذب ۸۳۴)، تصویر (B) پهنه‌های سیلاب استخراج شده با استفاده از شاخص MNDWI و تصویر (C) پهنه‌های سیلاب استخراج شده با استفاده از شاخص NDWI

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با شروع سیلاب در تاریخ ۲۳ اسفند ۱۳۹۷، رواناب‌های جاری شده از حوضه گرگانرود شرقی (سد وشمگیر) که شامل زیرحوضه‌های (اوغان، یل چشمه، تنگراه آق‌قمیش، تخت، پاسنگ، آق‌امام، لوه، نرماب، قوشه چشمه، کال آجی، کال شور، آق‌سو، چنارلی، زاو، فرناوه، قلی‌تپه، قره چشمه، قورچای، تیل آباد، دزدک، سیاه‌جوی و سفید

چشمه) می‌باشد، وارد رودخانه گرگانرود گردید. حجم عمده رواناب‌ها در سد گلستان و سد وشمگیر ذخیره گردید. در تاریخ ۲۹ اسفند ۱۳۹۷، رودخانه گرگانرود در محدوده سد وشمگیر تا شهر آق‌قلا با نصف ظرفیت نرمال عبوری خود (۱۲۰ مترمکعب بر ثانیه) سیلاب را عبور می‌داد. اما از تاریخ اول فروردین ۱۳۹۸ با طغیان رودخانه‌های زیرحوضه‌های گرگانرود غربی (محمدآباد، جعفرآباد، زرین‌گل، قرن‌آباد) حجم سیلاب مازادی از زیرشاخه‌های آن در محدوده روستای سلاق‌یلقی تا روستای قانقرمه وارد رودخانه گرگانرود شد (شکل ۶، دایره قرمز رنگ).



شکل ۶- پهنه‌های سیلاب ناشی از محل تلاقی رودخانه قره‌سو با رودخانه گرگانرود

زیرحوضه‌های غربی گرگانرود به دلیل پوشش گیاهی مناسب از جهت تأثیر پوشش گیاهی در تولید رواناب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است، البته در بالادست حوضه منطقه سیاه‌مرزکوه به جهت ارتفاع و شرایط اقلیمی پوشش گیاهی از جنگل به مرتع فقیر تبدیل می‌شود، که در این صورت هنگامی که مرکز ثقل بارش در بالادست حوضه باشد، عامل پوشش گیاهی را می‌توان به‌عنوان یکی از فاکتورهای مؤثر در حمل و انباشت رسوبات در محل تلاقی دو رودخانه گرگانرود و قره‌سو دانست (شکل ۶).

با توجه به بازدیدهای میدانی انجام شده (شکل ۷) و بررسی نتایج در بازه‌های مورد مطالعه، موارد ذکر شده در ادامه جزو مهمترین دلایل ایجاد سیلاب در بازه‌های مورد مطالعه می‌باشند.

۱) در محدوده روستای سلاق‌یلقی تا روستای سقرلیقی (شکل ۶-بازه اول)، وجود سازندهای حساس زمین‌شناسی و فرسایش سریع و ایجاد بار رسوبی که سبب مضاعف شدن قدرت تخریبی سیلاب می‌گردند، از مهمترین عوامل مؤثر در خروج سیلاب از مدخل رودخانه در این محدوده می‌باشند. سیلاب وارد شده از رودخانه قره‌سو به دلیل شیب نسبتاً بالا، مواد جامد و معلق زیادی را با خود به رودخانه گرگانرود وارد می‌کند که این جریان سیلاب از قدرت تخریب بالاتری نسبت به جریان سیلاب وارد شده از محدوده شرقی رودخانه گرگانرود (خروجی سد وشمگیر) دارد. مواد جامد حمل شده به مرور باعث تخریب دیواره‌های کانال و کاهش عرض بستر کانال رودخانه گرگانرود و همچنین ایجاد پیچانرود جدید در بازه اول را در پی خواهد داشت (شکل ۶).

۲) در محدوده روستای قانقرمه تا روستای محمدآلق (شکل ۶-بازه دوم)، به دلیل تغییر کاربری اراضی در حریم رودخانه و همچنین کشاورزی خارج از قاعده باعث از بین رفتن ساختار طبیعی رودخانه شده است و همچنین تخلیه نخاله‌ها و عدم لایروبی رودخانه در این محدوده باعث کاهش عرض بستر رودخانه شده است. همچنین شیب طولی بسیار پایین رودخانه و وجود خاک لس که جز فرسایش‌پذیرترین نوع خاک‌ها می‌باشد، از حساسیت بیشتری برخوردار است. این محدوده تقریباً کمترین تعداد پیچانرود را نسبت به سایر بازه‌ها دارد و همچنین میانگین شعاع قوس پیچانرودها در بازه دوم به نسبت از سایر بازه‌ها بزرگتر می‌باشد، به همین دلیل شرایط مورفولوژیکی نسبتاً مناسبی نسبت به سایر بازه‌ها دارد. وجود پل با دهانه بسیار نامناسب (شکل ۷-C) در روستای محمدآلق و تجاوز به حریم کمی رودخانه (حریم کمی رودخانه گرگانرود برابر ۲۰ متر از طرفین رودخانه می‌باشد، گزارش شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۳۹۶) و ایجاد بازار هفتگی در آن به مرور باعث تخریب دیواره‌های رودخانه و ناپایداری دیواره‌های آن شده که باعث کاهش عرض بستر در محدوده پل محمدآلق شده است.

۳) در محدوده شهری آق‌قلا (شکل ۶-بازه سوم)، ضریب سینوزیته رودخانه برابر  $1/414$  می‌باشد، وضعیت مورفولوژی رودخانه در این محدوده نسبتاً مناسب می‌باشد. عمق رودخانه در بازه سوم و چهارم نسبتاً کمتر از بازه‌های اول و دوم است و رابطه مستقیمی بین کاهش ضریب سینوزیته و کاهش عمق در این ناحیه وجود دارد. در محیط شهری آق‌قلا، کانالیزه کردن رودخانه در نزدیکی سه پل موجود در شهر آق‌قلا باعث تثبیت دیواره‌های رودخانه شده است (شکل ۷-D). رسوبات حمل شده از بالادست رودخانه گرگانرود (بازه اول) از اول تا دهم فروردین ۱۳۹۸ باعث تجمع رسوبات در نزدیکی پایه‌های پل و مسدود شدن برخی دهانه‌های پل شده است (شکل ۷-D,G). در سیل بهار ۱۳۹۸ به دلیل اینکه حجم عمده سیلاب در نزدیکی روستای سلاق‌یلقی از مدخل رودخانه خارج



شده است، حجم سیلاب نسبتاً کمتری وارد محیط شهری آق‌قلا شده است (شکل ۶- بازه دوم)، لذا این بازه از رودخانه گرگانرود توانایی عبور سیلاب را داشته است.

۴) در حد فاصل شهر آق‌قلا تا روستای دوگونچی (شکل ۶- بازه چهارم)، روستای آق‌قبر شیب طبیعی کانال از (دو در ده هزار به یک در ده هزار) تغییر می‌کند، این تغییر شیب باعث پس‌زدگی جریان در نزدیکی پل آق‌قبر می‌شود، همچنین تغییر عرض بستر بسیار زیاد (عرض بستر رودخانه در شرق پل حدود ۴۰ متر و در غرب پل در حدود ۸۵ متر) باعث بوجود آمدن جریان غیریکنواخت شده و در پی آن رسوبات انباشه بسیار زیادی در دهانه‌های کناری پل آق‌قبر به دام افتاده است که باعث بالا آمدن سطح جریان سیلاب می‌شود. در محدوده روستای آق‌قبر تخلیه نخاله‌های ساختمانی و وجود درختچه‌های گز باعث افزایش ضریب زبری بستر شده است که این علت هم باعث کاهش سرعت جریان سیلاب و به تبع آن گیر افتادن سیلاب در این ناحیه می‌شود که باعث بالا آمدن سطح جریان در کانال رودخانه در محیط شهری آق‌قلا شده و سیلاب از مدخل رودخانه خارج می‌گردد و وارد محیط نفوذناپذیر شهری شده است (شکل ۷- F, G).

بعد از بررسی پهنه‌های سیلاب مشخص شد روستاهای دوگونچی و قانقرمه در معرض خطر سیلاب این رودخانه با توجه سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله قرار ندارند، اما روستاهای سیدلر، سلاق یلقلی و مناطق شمالی شهر آق‌قلا در معرض خطر سیلاب این رودخانه برای دوره بازگشت‌های ۵۰ ساله به بالا قرار دارند. برای جلوگیری از ورود سیلاب به مناطق شهری، شهر آق‌قلا باید وضعیت رودخانه در حد فاصل روستای سلاق یلقلی تا قانقرمه به علت وجود پیچانرود زیاد و عدم وجود دیواره‌سازی مناسب و لایروبی نشدن رودخانه، ملاحظات جدی صورت گیرد، حجم زیادی از سیلاب اخیر از این مناطق با توجه به شیب و توپوگرافی منطقه از سمت شرقی و شمال‌شرقی وارد محیط شهری آق‌قلا شده است (شکل ۶- بازه ۱).

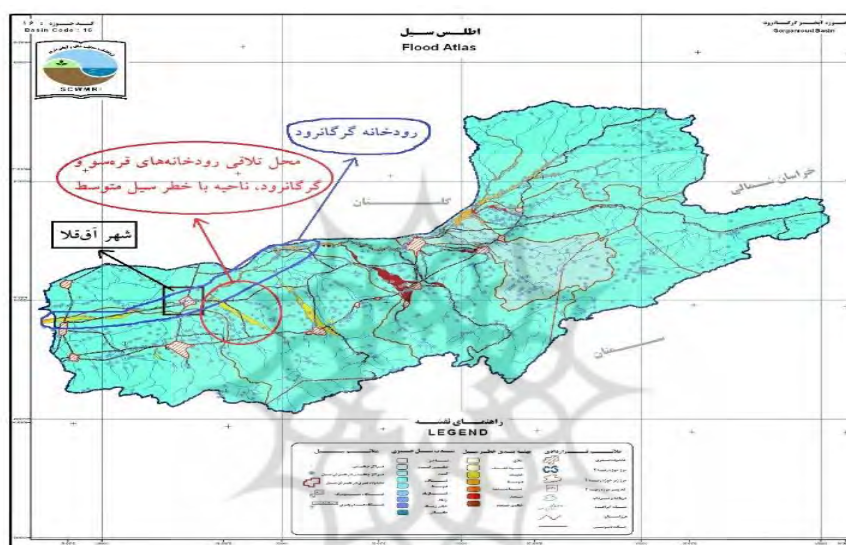




شکل ۷- تصاویر میدانی گرفته شده از بازه‌های مورد مطالعه؛ (B) مسیر رودخانه در بازه اول در نزدیکی روستای سلاق‌یلقی، (C) پل نامناسب در مسیر رودخانه در بازه دوم در نزدیکی شهر آق‌قلا، (D) تراز کف نامناسب پل و عدم لایروبی رودخانه در بازه سوم شهر آق‌قلا، (E) عدم دیواره‌سازی مناسب رودخانه در بازه سوم پل تاریخی آق‌قلا، (F) نبود شیب مناسب و تخلیه نخاله در حریم رودخانه و عدم دیواره‌سازی کانال در بازه چهارم، (G) تغییر شدید عرض رودخانه و شیب نامناسب و عدم لایروبی رودخانه در بازه چهارم (منبع: نگارند، ۱۳۹۸)

نقشه‌های پهنه‌بندی سیل بدست آمده (شکل ۴) با اطلس سیل تهیه شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور (۱۳۸۵) که در (شکل ۸) نشان داده شده است مقایسه گردید. براساس نتایج پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، رودخانه گرگانرود به سه قسمت سراب گرگانرود، گرگانرود میانی و پایاب گرگانرود تقسیم‌بندی شده است که از نظر سیل‌خیزی گرگانرود میانی که در محدوده شهر گنبدکاووس تا شهر آق‌قلا قرار دارد در طبقه خطر شدید سیل واقع شده است. از مهمترین علل آن می‌توان به ورود سیلاب زیرشاخه‌های رودخانه قره‌سو به رودخانه گرگانرود در محدوده روستای سلاق‌یلقی اشاره کرد که بار رسوبی بسیار زیادی را از بالادست حوضه آبخیز قره‌سو وارد رودخانه گرگانرود می‌کند (شکل ۶)، این امر موجب تنگ‌شدگی و کاهش شدید عرض مقطع رودخانه در محدوده روستای سلاق‌یلقی تا روستای محمدآلق شده و به همین دلیل حجم سیلاب زیادی از این بستر

رودخانه خارج شده و وارد دشت‌های پست مجاور می‌شود (شکل ۹، دایره قرمز رنگ). در نقشه‌های پهنه‌بندی سیل بدست آمده (شکل ۴) بیش‌ترین مساحت پهنه‌های سیلاب در ناحیه شرقی شهر آق‌قلا در محدوده روستای سلاق‌یلقی تا روستای قانقرمه وجود دارد. با توجه به اینکه بیش‌ترین حجم سیلاب در این ناحیه (جنوب‌شرقی شهر آق‌قلا) با گل‌ولای همراه بود این پهنه‌ها توسط شاخص MNDWI شناسایی شده (شکل ۵)، که براساس نقشه‌های پهنه‌بندی سیل بدست آمده به کمک شاخص MNDWI (شکل ۵) ناحیه گرگانرود میانی در طبقه خطر سیل خیلی شدید قرار دارد، که با اطلس سیل تهیه شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (شکل ۸) تطابق بسیار زیادی دارد.



شکل ۸- اطلس سیل حوضه آبخیز گرگانرود (منبع: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۵)

## ۵- جمع‌بندی

بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان دبی با دوره بازگشت ۵۰ ساله برای رودخانه گرگانرود برابر ۷۹۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که با توجه به هیدروگراف سیلاب ۱۳۹۸ گلستان، سیلاب با دبی پیک ۷۳۹ متر مکعب بر ثانیه در رودخانه گرگانرود جریان داشته است در حالی که میانگین ظرفیت عبوری گرگانرود در حدود ۱۲۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، بنابراین پهنه‌های سیلابی که در تاریخ چهاردهم و شانزدهم فروردین بدست آمد ناشی از دبی ۷۳۹ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، در این تاریخ تقریباً ۵۱ کیلومترمربع از شهر آق‌قلا تحت تأثیر سیلاب قرار گرفت که نیمه شمالی شهر آق‌قلا به طور کامل سیلابی شد. بررسی شرایط مورفولوژی کانال رودخانه گرگانرود نشان داده که علاوه بر شدت جریان سیلاب، ضریب خمیدگی بالا و عدم دیواره سازی و وجود پل‌های نامناسب در بازه اول و دوم و تجاوز به حریم رودخانه و عدم لایروبی کانال در بازه سوم و شیب نامناسب و تغییرات شدید

عرض بستر و تخلیه نخاله در بازه چهارم از مهمترین علل بوجود آمدن سیلاب در شهر آق‌قلا می‌باشد. با توجه به اینکه شهرستان آق‌قلا از مناطق سیل خیز استان گلستان می‌باشد لذا نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب می‌تواند یک ابزار بسیار کاربردی برای مسیر توسعه شهرستان آق‌قلا در سال‌های آتی باشد، همچنین با شناسایی مناطق حساس و پرخطر رودخانه از نظر مورفولوژی و پهنه‌های سیلاب ناشی از آن می‌توان راهکارهایی را برای جلوگیری از بروز خسارات جانی و مالی ارائه کرد و در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب و راهکارهای پیشنهادی از جمله ساخت بندهای انحرافی، تغییر کاربری اراضی، اصلاح ساختار رودخانه در نقاط بحرانی و بهبود ساختار مورفولوژی کانال و غیره را در اختیار سازمان‌های مرتبط قرار داد تا تصمیم‌گیری‌های مناسب را اتخاذ کنند.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان بابت در اختیار قرار دادن گزارش‌های سیلاب ۱۳۹۸ گلستان تشکر می‌کنند.

### کتابنامه

- بیاتی خطیبی، مریم؛ ۱۳۹۲. بررسی تغییرات زمانی کانال‌های فعال در مسیرهای پیچان‌دار با استفاده از روش‌های تجربی و با اسناد به لایه‌بندی رسوبات کناری، مطالعه موردی: مسیر پیچان‌دار آجی چای. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. تابستان. سال ۲۶، پیاپی ۵۸.
- جعفر بیگلو، منصور؛ باقری سید شکری، سجاده؛ نگهبان، سعید؛ صفراد، طاهر؛ ۱۳۹۱. بررسی تغییرات بستر و ویژگی‌های ژئومورفیکی رودخانه گیلانغرب در سال‌های ۱۳۴۴ تا ۱۳۸۱. پژوهش‌های ژئومورفیکی کمی. شماره ۲. پاییز ۱۳۹۱، صص ۸۷-۱۰۲.
- جوکار سرهنگی، عیسی؛ تلنگ، ابراهیم؛ لرستانی، قاسم؛ ۱۳۹۶. بررسی تغییرات مورفومتری رودخانه با تاکید بر پیچان‌رودها (مطالعه موردی: رودخانه چهل چای-نرماب). *فصلنامه علمی-پژوهشی آمایش جغرافیایی فضا*. دانشگاه گلستان. سال هفتم. شماره مسلسل ۲۶، صص ۳۰-۱۷.
- یمانی، مجتبی؛ دولتی، جواد؛ زارعی، علیرضا؛ ۱۳۸۹. تأثیرگذاری عوامل هیدروژئومورفیک در تغییرات زمانی و مکانی بخش میانی رودخانه اترک. *تحقیقات جغرافیایی*. زمستان. سال بیست و پنجم شماره ۴ (پیاپی ۹۹). صص ۱-۲۴.
- یمانی، مجتبی؛ نوحه‌گر، احمد؛ ۱۳۸۲. بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچانرود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین دست سد میناب). *پژوهش‌های جغرافیایی*. شماره ۵۱. بهار. صص ۸۴-۶۵.

Balash, J.C., Pino D., Ruiz-Bellet, J.L., Tuset, J., Barriendos, M., Castelltort, X., & Peña J.C., 2019. The extreme floods in the Ebro River basin since 1600 CE. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. 646: 645-660. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.325>

Di Baldassarre, G., & Uhlenbrook, S., 2012. Is the current flood of data enough? A treatise on

- research needs for the improvement of flood modelling. *Hydrological Processes* 26(1):153–158, DOI:10.1002/hyp.8226
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X., 2016. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing* 8(4):354. Available at: <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/4/354>
- Himayoun, D., & Roshni, T., 2020. Geomorphic changes in the Jhelum River due to an extreme flood event: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*. *Arabian Journal of Geosciences* 13(2):12-23. DOI: 10.1007/s12517-019-4896-9
- Kumar, R., Kamal, V., & Singh, RK., 2013. Geomorphic Effects of 2011 Floods on Channel Belt Parameters of Rapti River: A Remote Sensing and GIS Approach. *Corona Journal of Science and Technology* 2(Ii):4–12, ISSN: 2319 – 6327 (Online), Vol. 2, No. II (2013), pp. 4-12
- Kwang, C., Matthew, E., Jnr, O., & Amoah, AS., 2018. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using Water Extraction Indexes over Volta River. *Journal of Geography and Geology*; Vol. 10, No. 1; 10(1):1–7. DOI: 10.5539/jgg.v10n1p1
- Langat, PK., Kumar, L., & Koech, R., 2019. Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Geomorphology*. Elsevier B.V 325:92–102. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>
- McFeeters, SK., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7):1425–1432, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Musa, ZN., Popescu, I., & Mynett, A., 2015. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(9): 3755–3769, doi:10.5194/hess-19-3755-2015
- Nandi, I., Srivastava, PK., & Shah, K., 2017. Floodplain Mapping through Support Vector Machine and Optical / Infrared Images from Landsat 8 OLI / TIRS Sensors : Case Study from Varanasi. *Water Resources Management*. *Water Resources Management*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-017-1568-y>
- Szantoi, Z., & Strobl, P., 2019. Copernicus Sentinel-2 Calibration and Validation. *European Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis 52(1):253–255. Available at: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1582840>
- Wang, Y., Colby, JD., & Mulcahy, KA., 2002. An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. *International Journal of Remote Sensing* 23(18):3681–3696, <https://doi.org/10.1080/01431160110114484>
- 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://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhou, Y., He, B., Xiao, F., Feng, Q., Kou, J., & Liu, H., 2019. Retrieving the lake trophic level index with landsat-8 image by atmospheric parameter and RBF: A case study of Lakes in Wuhan, China. *Remote Sensing* 11(4), <https://doi.org/10.3390/rs11040457>