

بررسی تأثیر سیلاب‌ها و آبنگیزی سد کارون 4 بر تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ارمند در ده سال اخیر (94-1384)

میلاذ خواستار بروجنی¹، سعید رضا خدائشناس^{2*}، حسین صمدی بروجنی³، الهام طاهریان⁴

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

4- کارشناس مرکز تحقیقات منابع آب، دانشگاه شهرکرد

*khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده - ریخت‌شناسی یکی از مهم‌ترین شاخه‌های علم مهندسی رودخانه است که بررسی تغییرات آن در رودخانه‌هایی که سدهای بزرگ را تغذیه می‌کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حقیقت بدست آوردن درک بهتر از رفتار رودخانه موجب کاهش صدمات و آسیب‌های احتمالی به سازه‌های هیدرولیکی و زیر ساخت‌های عمومی می‌شود. در همین راستا در این پژوهش به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ارمند که از حوضه کارون شمالی سرچشمه می‌گیرد و نهایتاً وارد سد کارون 4 می‌شود، پرداخته شده است. در این مطالعه با استفاده از 14 تصویر ماهواره‌ای لندست ETM+ و OLI الگوی جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه، به همراه تغییرات عرض و سینوسیته حاصل از فرایندهای رسوبگذاری و فرسایش در ده سال منتهی به سال 1394 و ناشی از دو سیلاب بزرگ در این بازه زمانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد متوسط جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه منجر به فرسایش (رسوبگذاری) برای ساحل راست و چپ به ترتیب 15 (14) و 10 (12) درصد عرض متوسط رودخانه است. همچنین نرخ خالص تغییرات مساحت ناشی از جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه برای ساحل راست و چپ به ترتیب 0/11 و 0/74 هکتار در سال بدست آمد. با بررسی تأثیر سیلاب‌ها مشخص شد در هر دو ساحل میزان فرسایش بیشتر از رسوبگذاری است و ساحل راست پویاتر از ساحل چپ است. بررسی‌های مربوط به چهار بازه طولی در مسیر رودخانه نشان داد مقدار سینوسیته در تمام سال‌ها با نزدیک شدن بازه‌ها به مخزن سد کارون 4 افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که سد کارون 4 بر تمامی پارامترهای ریخت‌شناسی رودخانه ارمند تا بازه‌ی 3/5 کیلومتری تأثیر بسزایی دارد.

کلیدواژگان: سنجش از دور، شاخص‌های آب، فرسایش و رسوبگذاری، سیلاب‌دست.

1- مقدمه

ریخت‌شناسی، علم شناخت شبکه رودخانه از نظر شکل کلی، مرز و حریم رودخانه، ابعاد و هندسه، مشخصات هیدرولیکی، راستا و نیمرخ طولی و روند تغییرات آن است. در حقیقت ریخت‌شناسی، درک شرایط کنونی رودخانه و پیش‌بینی تغییرات آن را ممکن می‌سازد. می‌توان از سه

فرایند فرسایش بستر، انتقال و ته‌نشینی رسوبات به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر ریخت‌شناسی رودخانه نام برد. فرسایش معمولاً در دره‌ها، دامنه‌ها و آبراهه‌های بالادست حوضه‌ی آبریز اتفاق می‌افتد. رسوبات حاصل توسط انرژی جنبشی رودخانه منتقل شده و بیشتر آن‌ها در قسمت پایانی رودخانه که به جلگه‌ها ختم می‌شود، رسوب می‌-

شاخص سطح برگ و مدل‌سازی محصولات کشاورزی نیز کاربرد داشته باشد. مقدار این شاخص محدوده‌ای از 1 تا 1- را می‌پذیرد و مقادیر بیشتر محتوای آب بیشتر را نشان می‌دهد (علوی‌پناه، 1390).

(2009) Ji et al. با بررسی صحت نقشه منابع آب تهیه شده با استفاده از شاخص NDWI، نشان دادند این شاخص قابلیت خوبی برای تفکیک آب‌های سطحی دارد، اما عمدتاً با دو مشکل اساسی روبروست. مورد اول استخراج شاخص با استفاده از باندهای مختلف (مرئی، مادون قرمز نزدیک، یا مادون قرمز میانی) نتایج متفاوتی به دست می‌دهد و در مورد دیگر آستانه‌های این شاخص تا حد زیادی وابسته به نسبت آب در هر پیکسل است.

(2006) Xu شاخص NDWI را با جایگزینی باند مادون قرمز میانی به جای باند مادون قرمز نزدیک اصلاح کرد و آن را $MNDWI^3$ نامید. این شاخص اصلاح شده آستانه‌های پایدارتری نسبت به شاخص NDWI دارد.

پس از آن (2014) Feyisa et al. دو نسخه متفاوت از یک شاخص استخراج خودکار آب به نام‌های $AWEI_{no\ shadow}^4$ برای افزایش قابلیت جداسازی آب‌های سطحی در تصاویر بدون سایه و $AWEI_{shadow}$ برای تصاویر با سایه مناطق کوهستانی، ساختمان‌ها و ابرها ارائه کردند.

شاخص Enhanced Water Index با عنوان اختصاری EWI شاخص دیگری است که توسط Wang et al. (2015) ارائه شد. این شاخص از اطلاعات چهار باند طیفی استفاده می‌کند و قابلیت تخمین درصدی از پیکسل که توسط آب اشغال شده است را دارد.

(2016) Fisher et al. با استفاده از اطلاعات طیفی پنج باند ماهواره لندست شاخصی با نام WI_{2015} برای جداسازی آب‌های سطحی از سایر عوارض موجود در تصاویر ماهواره‌ای ارائه دادند.

در سال‌های اخیر با توجه به خصوصیات منحصر به فرد تکنیک سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، مطالعات بسیاری در زمینه بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها انجام شده است که از این قبیل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

کنند. هوازدگی سنگ‌ها در شیب‌ها، علت اصلی تولید بار رسوبی است که موجب ته‌نشینی آن‌ها در دشت‌های آبرفتی می‌شود. انتقال رسوب در رودخانه‌ها موجب پویایی و تغییر شکل آن‌ها در طول زمان می‌شود (Manjusree et al., 2015).

به طور معمول دو روش مستقیم و غیرمستقیم برای نظارت بر فرسایش و تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه وجود دارد. روش مستقیم شامل اندازه‌گیری میدانی نرخ فرسایش خطی، حجم فرسایش و تغییرات سطح مقطع و پلان رودخانه می‌شود. در روش غیر مستقیم داده‌های رسوب اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این داده‌ها می‌تواند اطلاعات نقشه‌برداری، عکس‌های هوایی و یا تصاویر ماهواره‌ای باشد. (Manjusree et al., 2015).

تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزار شناخته شده و ارزشمند برای بررسی تغییرات ریخت‌شناسی، مطالعات مهندسی رودخانه و تهیه پایگاه اطلاعات مکانی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان تصاویر ماهواره‌ای، لندست تنها منبع جهانی و کالیبره شده است که امکان اندازه‌گیری‌هایی دقیق و طولانی مدت از سطح زمین را فراهم می‌آورد. آرشیو گسترده سری‌های مختلف تصاویر این ماهواره قابلیت مقایسه تغییرات در طول زمان را نیز فراهم می‌آورد. این تصاویر از لحاظ سطح تصحیحات ناسا از نوع بازتابش سطحی¹ هستند (NASA, 2006).

از اساسی‌ترین پارامترها در مطالعات ریخت‌شناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تعیین مجرای اصلی رودخانه در بازه‌های زمانی مختلف است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها در این خصوص جداسازی پیکسل‌های آب از سایر پیکسل‌ها در تصاویر چندطیفی با استفاده از شاخص‌های آب است.

شاخص $NDWI^2$ اولین بار توسط McFeeters (1996) برای شناسایی دریاچه‌ها و تالاب‌ها ارائه شد. حساسیت این شاخص به محتوای رطوبت باعث شده علاوه بر شناسایی منابع آبی، در تعیین تنش پوشش گیاهی، مطالعات

³ Modification of Normalised Difference Water Index

⁴ Automated Water Extraction Index (AWEI)

¹ Surface reflectance

² Normalized Difference Water Index

گنگ در این چند سال تغییر کرده، به طوری که ساحل راست دچار فرسایش شده و سمت چپ با رسوبگذاری همراه بوده است.

Rozo et al. (2014) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست تغییرات مسیر رود آمازون را طی سال‌های 1986 تا 2006 میلادی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سیستم این رودخانه بین سال‌های 1986 تا 2006 رسوبگذاری داشته، اما بین سال‌های 1994 تا 2001 فرسایش شدیدتر از رسوبگذاری است.

Manjusree et al. (2015) به کمک ابزار سنجش از دور و سیستم مختصات جغرافیایی به بررسی تغییرات مرز، رسوبگذاری و فرسایش دو رودخانه براهماپوترا و گنگا³ پرداختند. این محققان بر اساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سال‌های 2002 تا 2010 برای رودخانه پراهماپوترا، تغییرات شدید مجرای اصلی رودخانه و خسارت شدید به بخش کشاورزی در آسام را گزارش کردند.

با توجه به گستره مطالعات صورت گرفته، همچنان نیاز به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی در رودخانه‌های کوهستانی با عرض کم و همچنین تأثیر سازه‌های آبی در تغییرات ریخت‌شناسی و نقش سیلاب در رژیم پایدار رودخانه‌ها احساس می‌شود. از اینرو در این پژوهش به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه کوهستانی ارمند ناشی از سیلاب‌های چند سال اخیر و آگیری سد کارون 4 پرداخته شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- منطقه مورد مطالعه

در این مقاله به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ارمند پرداخته شده است. رودخانه ارمند یکی از مهمترین رودخانه‌های استان چهارمحال و بختیاری است که متوسط آبدهی سالانه آن حدود 95 متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌شود. بازه مورد مطالعه در این پژوهش قسمتی از رودخانه ارمند از محل اتصال رودخانه‌های معدن و کره‌بس تا ابتدای مخزن سد کارون 4 می‌باشد. طول رودخانه در محدوده مورد نظر 25/4 کیلومتر است که شیب خالص آن

Das et al. (2007) در تحقیقی با استفاده از داده‌های توپوگرافی دو سال متفاوت و تصاویر ماهواره‌ای مربوط به 4 دوره زمانی به مطالعه تغییرات رودخانه باراک در شمال شرق هند پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد به‌طور کلی تغییر به سمت شمال در این رودخانه رخ داده که احتمالاً به دلیل بالا آمدگی بخش جنوبی دره رود باراک است.

Kusimi (2008) به بررسی مورفودینامیک و ریخت‌شناسی رودخانه دنسی¹ از سال 1960 با استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و بازدیدهای میدانی پرداخت. این محقق فرایندهای عمده این رودخانه را فرسایشی و شریانی معرفی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که ریخت‌شناسی پایین‌دست رودخانه به‌صورت پیچانرود با جزیره‌های شنی تغییر کرده، در صورتی که در بالادست و قسمت میانی آبشارها و حفره‌های فرسایش ایجاد شده است.

Archana Sarkar et al. (2011) به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه براهماپوترا² هند در یک بازه 620 کیلومتری در فاصله زمانی سال‌های 1990 تا 2008 پرداختند. این محققان ابتدا به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای لندست، تصاویر IRS را زمین مرجع کرده و با استفاده از شاخص NDWI مجرای اصلی رودخانه را مشخص کردند. مشاهدات این محققان گویای فرسایش دو طرف رودخانه در بازه‌ی مورد مطالعه است.

Pan (2013) در تحقیقی با استفاده از داده‌های توپوگرافی، تصاویر سنجنده‌های MSS و ETM+ لندست در تاریخ‌های مختلف به انضمام تصاویر گوگل ارث مربوط به سال 2011 به بررسی تغییرات رود بانکرا در غرب بنگال پرداخت. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر تغییر در پارامترهای مختلف ریخت‌شناسی آبراه‌های مانند شاخص سینوسیته، عدم تقارن متقابل دره و نسبت پیچانرودی بوده است.

Hossain et al. (2013) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و IRS به بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه گنگ بنگلادش در بازه زمانی (1973-2009) پرداختند. این محققان دریافتند که دیواره چپ و راست رودخانه

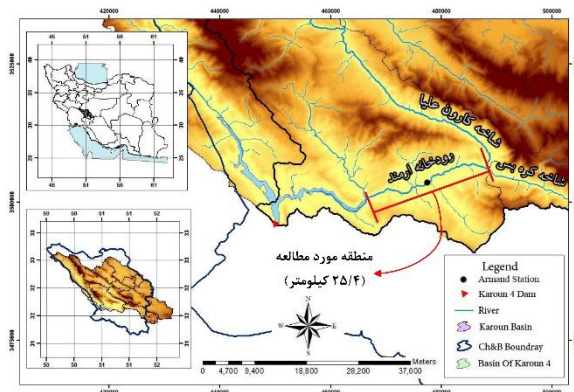
¹ Densu

² Brahmaputra

³ Ganga

سد کارون 4 با ارتفاع حدود 230 متر از پی و تراز نرمال 1028 متر از سطح دریا در چهار کیلومتری پایین دست محل تلاقی رودخانه‌های ارمند و بازفت، قرار گرفته که در فروردین ماه 1389 به صورت رسمی آبیگری شد. بر اساس آمار ایستگاه‌های آبسنجی ارمند و مرغک آورد متوسط دراز مدت رودخانه کارون در محل سد معادل 168/8 متر مکعب بر ثانیه بوده که حدود 60 درصد از آورد سد کارون 4 مربوط به رودخانه ارمند بوده و حدود 40 درصد دیگر از رودخانه بازفت تأمین می‌شود (گزارش سد و نیروگاه کارون 4، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، 1388).

شکل 1 موقعیت رودخانه ارمند، حوضه آبریز و موقعیت سد کارون 4 را نشان می‌دهد.



شکل 1 موقعیت منطقه مورد مطالعه

2-2- تصاویر ماهواره‌ای

به طور کلی در این پژوهش از 15 فریم تصویر سنجنده‌ی ماهواره‌ی لندست به‌عنوان داده‌های اصلی و نقشه‌های پوششی 1:25000 کشور به همراه تصاویر گوگل ارث به‌عنوان داده‌های مرجع زمینی، به منظور مطالعه و بررسی تغییرات مرز و نرخ فرسایش و رسوبگذاری ساحل رودخانه ارمند در ده سال اخیر استفاده شد. تمام تصاویر در فاصله نیمه تا اواخر ماه آگوست میلادی منطبق بر فصل خشک منطقه جمع‌آوری شده است. انتخاب تصاویر در فصل خشک به این دلیل است که در این زمان پوشش گیاهی و دیگر شرایط زمین، به ویژه سطح آب بهتر قابل ارزیابی است. علاوه بر این در طول فصل خشک احتمال وجود

0/56 درصد می‌باشد.

حوضه‌ی آبریز رودخانه ارمند شامل مناطق کوهستانی مرتفع شرق و دشت‌های مرکزی استان است. مساحت این حوضه بالغ بر 9062 کیلومتر مربع است که در بین طول‌های جغرافیایی 49/9 و 51/5 شمالی و عرض‌های جغرافیایی 31/4 و 32/6 شرقی واقع شده است.

گستره ارتفاعی نقاط این حوضه از 787 تا 4126 متر متغیر بوده و میانگین ارتفاع آن برابر 2345 متر است. در این حوضه سطوح ارتفاعی 2200 تا 2400 متری بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده و بیش از 28 درصد حوضه را در می‌گیرد. همچنین 74 درصد از مساحت این حوضه کمتر از 2600 متر ارتفاع دارد.

میزان بارش در ارتفاعات استان چهارمحال و بختیاری که در برخی مناطق بیشتر از 1000 میلی‌متر در سال است و همچنین توپوگرافی منطقه موجب شده که رودخانه ارمند سالانه با سیلاب‌های بزرگی مواجه شود. سیلاب‌هایی که علاوه بر تأثیر مخرب موجب تغییراتی در ریخت‌شناسی و مورفودینامیک رودخانه می‌شوند. جدول 1 زمان و بده بیشینه سیلاب سال‌های اخیر رودخانه ارمند را نشان می‌دهد.

جدول 1 مشخصات برخی از سیلاب‌های رودخانه ارمند،

ایستگاه هیدرومتری ارمند

سال آبی	فراوانی سیلاب	بده اوج (cms)	تاریخ بده اوج	متوسط بده سیلاب (cms)
1383-84	7	2570	1383/12/23	532
1384-85	9	3000	1384/12/19	675
1385-86	4	741	1386/01/07	439
1386-87	2	161	1386/09/17	148
1387-88	5	286	1386/02/07	187
1388-89	5	388	1389/02/13	245
1389-90	3	622	1389/12/21	333
1390-91	4	341	1390/08/30	237
1391-92	8	293	1391/12/17	191
1392-93	4	383	1393/12/21	270
1393-94	7	475	1394/01/04	136

2-3- استخراج مجرای اصلی رودخانه

شرح کلی انجام این پژوهش در شکل 2 و در قالب روند نما ارائه شده است. لازم به ذکر است که مراحل پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار ENVI انجام گرفت.

در این تحقیق پس از استخراج شاخص‌های مختلف آب، شاخص بهینه به کمک نمودار ROC⁴ انتخاب شد که با استفاده از شاخص بهینه موقعیت رودخانه در سطح پیکسل مشخص می‌شود. سپس با استفاده از قابلیت خرد پیکسلی شاخص بهینه، محتوای آب هر پیکسل تفکیک و در نهایت بر اساس آن مجرای اصلی رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید.

با استفاده از روش خرد پیکسلی در تصاویر ماهواره لندست، اندازه پیکسل‌ها تا حدود یک متر کاهش می‌یابد و به راحتی مکان و مقدار آب در هر خرد پیکسل قابل شناسایی است. از طرفی با توجه به مشخصات پیکسل‌های همسایه (موقعیت و مقدار آب) و فیلترهای صورت گرفته بر روی تصاویر می‌توان مرز رودخانه را با دقت مناسبی تعیین نمود.

(Pardo-Pascual et al. (2012 طی تحقیقی نشان دادند تحلیل‌های خرد پیکسلی لندست می‌تواند تغییر مرز ساحل را با دقت 1/22 تا 1/63 متر نشان دهد. پس از استخراج مجرای اصلی رودخانه از فرایند بارزسازی لبه برای تدقیق مرز استخراجی استفاده شد. در نهایت با استفاده از تصاویر گوگل ارث و نقشه‌های پوششی 1:25000 کشور صحت‌سنجی نتایج مورد بررسی قرار گرفت. محققان بسیاری از تصاویر گوگل ارث به عنوان مرجع صحت‌سنجی در مطالعات خود استفاده کرده‌اند که از این میان می‌توان به کارهای (Dong et al. (2016، (Feyisa et al. (2014 و (Jiang et al. (2014 اشاره نمود. در ادامه مجرای اصلی رودخانه در سال‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Arcview با دقت مناسب مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که از 114 مقطع عمود بر مسیر جریان با فواصل 250 متری به منظور بررسی تغییرات پارامترهای ریخت‌شناسی استفاده شد. نمایی از موقعیت مقاطع مورد بررسی در شکل 7 قابل مشاهده است.

تصاویر بدون پوشش ابر بیشتر است و مرز و الگوی رودخانه بهتر قابل تشخیص است.

در این پژوهش علاوه بر بررسی تصاویر سالانه، تصاویر قبل و بعد از سیلاب‌های اسفند 1384 و اسفند 1389 به منظور بررسی تأثیر مستقیم سیلاب‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات و زمان برداشت تصاویر مورد استفاده در جدول 2 قابل مشاهده است.

جدول 2 تصاویر لندست مورد استفاده

سنجنده	زمان اخذ	تاریخ برداشت		
		روز*	ماه*	سال*
Landsat-ETM ¹⁺	قبل از سیلاب	2	11	1384
		(21)	(1)	(2006)
	بعد از سیلاب	27	12	1384
		(17)	(3)	(2006)
		10	5	1384
Landsat-ETM ¹⁺	14	5	6	1385
		(5)	(9)	(2006)
		1	5	1386
Landsat-ETM ¹⁺	1	23	7	1386
		(23)	(7)	(2007)
		11	5	1387
Landsat-ETM ¹⁺	11	1	8	1387
		(1)	(8)	(2008)
		13	5	1388
Landsat-TM ²	13	4	8	1388
		(4)	(8)	(2009)
		24	5	1389
قبل از سیلاب	18	15	8	1389
		(15)	(8)	(2010)
		7	11	1389
بعد از سیلاب	7	27	2	1389
		(27)	(2)	(2011)
		27	1	1390
Landsat-ETM ¹⁺	27	18	3	1390
		(18)	(3)	(2011)
		14	5	1391
Landsat-ETM ¹⁺	14	4	8	1391
		(4)	(8)	(2012)
		24	5	1392
Landsat-OLI ³	24	15	8	1392
		(15)	(8)	(2013)
		27	5	1393
Landsat-OLI ³	27	18	8	1393
		(18)	(8)	(2014)
		30	5	1394
Landsat-OLI ³	30	21	8	1394
		(21)	(8)	(2015)

* اعداد مندرج در پرانتز، تاریخ میلادی برداشت تصاویر را نشان می‌دهند.

¹ Enhanced Thematic Mapper

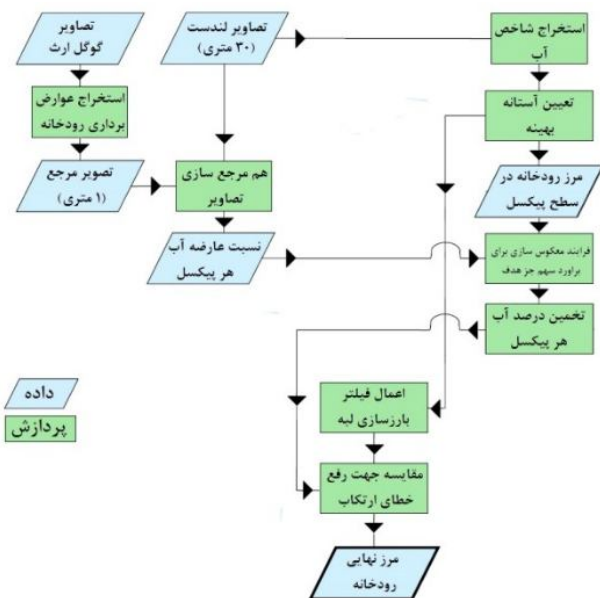
² Thematic Mapper

³ Operational Land Imager

⁴ Receiver Operator Characteristic

پیکسل‌های مربوط به رودخانه با استفاده از منحنی ROC در شکل 3 ارائه شده است. در واقع این منحنی رابطه بین سلول‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند و سلول‌هایی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند را نشان می‌دهد.

اختلاف مجرای اصلی رودخانه در ساحل چپ و راست بر روی مقطع عرضی در دو سال مختلف به عنوان جابه‌جایی مجرای اصلی در آن بازه‌ی زمانی منظور شد. در این بررسی مقادیر مثبت و منفی به ترتیب رسوبگذاری (زمین‌زایی) و فرسایش (از بین رفتن زمین) در نظر گرفته شدند. در ادامه با توجه به تغییرات مجرای اصلی رودخانه مساحت فرسایشی و رسوبگذار در حد فاصل دو مقطع عرضی به دست آمد. همچنین عرض رودخانه بر اساس فاصله بین مرز چپ و راست و تقاطع آن به خط مقطع عرضی در هر تصویر استخراج شد. تغییرات سینوسیته در زمان‌های مختلف و در چهار بازه‌ی زمانی معدن تا نقطه اول، نقطه اول تا پل ارمند، پل ارمند تا نقطه دوم و نقطه دوم تا ابتدای مخزن کارون 4 بدست آمد. ملاک انتخاب ایستگاه‌های مورد نظر علاوه بر تقسیم منطقه مورد مطالعه به بازه‌های تقریباً مساوی، وجود عارضه‌هایی نظیر پل و آبراهه (نقطه اول و دوم) بود. مشخصات بازه‌های مورد بررسی در جدول 3 ارائه شده است.



شکل 2 روند نما برای استخراج اتوماتیک موقعیت رودخانه در مقیاس خرد- پیکسل از تصاویر لندست

3- نتایج و بحث

3-1- تحلیل تصاویر ماهواره‌ای

تفاوت کارایی و آستانه شاخص‌های آب در تفکیک

جدول 3 مشخصات بازه‌های مورد بررسی در طول رودخانه

پارامتر	بازه یک	بازه دو	بازه سه	بازه چهار
موقعیت جغرافیایی	486968 و 3506565	481369 و 3505481	475421 و 3502791	470097 و 3502263
طول بازه (km)	5/8	9/4	7/3	6/4
متوسط عرض (m)	32/8	35/1	33/3	30/2
متوسط شیب (درجه)	10	11	9	9
متوسط ضریب پیچشی	1/2	1/3	1/3	1/6
الگوی رودخانه*	مستقیم	مستقیم	مستقیم	پیچانرود
کاربری اراضی ساحلی بالای چپ	مناطق مسکونی، بیرون زدگی سنگی، مناطق جنگلی	مناطق جنگلی	مزارع کشاورزی، مناطق جنگلی	بیرون زدگی سنگی، مناطق جنگلی
کاربری اراضی ساحلی بالای راست	مزارع کشاورزی، بیرون زدگی سنگی، مناطق جنگلی	مزارع کشاورزی، مناطق جنگلی	مزارع کشاورزی، مناطق جنگلی	بیرون زدگی سنگی، مناطق جنگلی

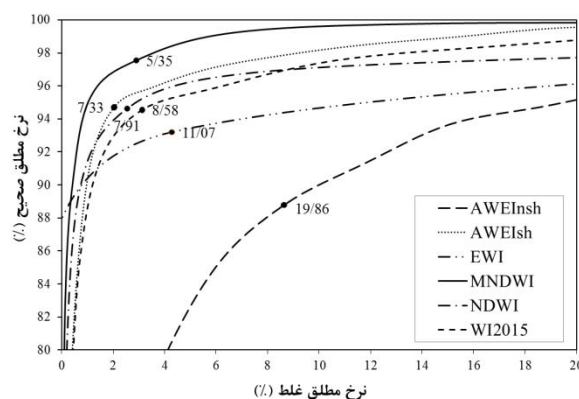
* الگوی رودخانه بر اساس متوسط ضریب پیچشی در بازه زمانی مورد مطالعه (کمتر از 1/5 مستقیم، بیشتر از 1/5 پیچانرود) تعیین شد.

ای تهیه شده به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های مطالعه حاضر به شمار می‌آید که با استفاده از مقایسه نتایج بدست آمده از تصاویر ماهواره ای و مرز مرجع در مناطقی از طول رودخانه که احتمال تغییرات ساحل اصلی رودخانه به دلیل توپوگرافی شدید و یا احداث سازه‌های مهندسی وجود ندارد، مورد بررسی قرار گرفت. در این مناطق امکان تغییرات کناره رودخانه به صفر می‌رسد، در حقیقت بررسی میزان تغییرات مجرای اصلی رودخانه طی سال‌های مختلف با استفاده از روش پردازش تصاویر در این مناطق منجر به کمی‌سازی مقدار خطای روش می‌شود. با توجه به تصاویر گوگل ارث و بازدیدهای میدانی، در محدوده مورد مطالعه، سه منطقه با دیواره‌های صخره‌ای شناسایی و به عنوان مرز مرجع در نظر گرفته شد. در ادامه با مقایسه مجرای اصلی رودخانه در سال‌های مختلف نسبت به مرز مرجع، میزان خطای مطلق مرز استخراج شده در هر تصویر بدست آمد که مقادیر آن در جدول 4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط خطای مطلق 1/1 متر بدست آمد که این مقدار حدود 3% عرض متوسط رودخانه را شامل می‌شود.

جدول 4 جابه‌جایی مرز رودخانه در ایستگاه‌های صحت‌سنجی

سال	اختلاف مرز (متر)		
	مقطع سه	مقطع دو	مقطع یک
2005	1/2	0/9	1/2
2006	1/3	1/2	1/4
2007	1/4	0/7	1/5
2008	1/1	1/0	1/2
2009	1/4	1/2	1/6
2010	1/2	1/0	1/4
2011	0/8	0/9	0/8
2012	1/1	1/0	1/3
2013	0/8	0/6	1/0
2014	1/2	1/1	1/3
2015	0/9	0/8	1/0
متوسط	1/1	0/9	1/2

البته باید در نظر داشت که در بررسی تغییرات پارامترهای



شکل 3 صحت طبقه‌بندی پیکسل‌های مربوط به رودخانه برای آستانه‌های مختلف با استفاده از نمودار ROC

اگر نرخ سلول‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند¹ روی محور عرضی و نرخ سلول‌هایی که به‌درستی طبقه‌بندی نشده‌اند² روی محور طولی قرار گیرد، آستانه بهینه نقطه‌ای است که بیش از سایر نقاط به سمت چپ و بالای نمودار منحرف شده باشد (Fawcett, 2006). لازم به توضیح است که نقاط مشخص شده روی این نمودارها آستانه بهینه و اعداد پیوسته شده به هر نقطه نمایانگر خطای ترکیبی این آستانه می‌باشد.

تحلیل نتایج کارایی شاخص‌ها با بررسی نمودار نشان می‌دهد کارایی دو شاخص MNDWI و AWEI_{shadow} بیش از سایر شاخص‌های آب می‌باشد. در واقع نمودار این دو شاخص بیش از دیگر شاخص‌های مورد بررسی به سمت چپ و بالا منحرف شده‌اند. مبنای مقایسه منحنی‌های ROC انحراف به سمت بالا و چپ نمودار است، اما بررسی سطح زیر نمودار به عنوان فاکتور دیگر صحت سنجی نشان می‌دهد علی‌رغم کسب کم‌ترین مقدار خطای ترکیبی توسط شاخص MNDWI، سطح زیر نمودار ROC برای شاخص AWEI_{shadow} بیشتر است. اما با توجه به اهمیت مقدار خطای ترکیبی در تعیین کارایی شاخص، شاخص MNDWI به عنوان شاخص بهینه در نظر گرفته می‌شود.

3-2-3- صحت‌سنجی

صحت‌سنجی مجرای اصلی رودخانه که از تصاویر ماهواره

¹ True Positive Rate

² False Positive Rate

در سال 1393-94 و ساحل چپ در سال 1389-90 رخ داده است. همچنین مقدار بیشینه رسوبگذاری در سال 1392-93 معادل 7/9 متر در سال برای ساحل راست و در سال 1385-86 به میزان 7/8 متر در سال برای ساحل چپ برآورد شده است. محدوده تغییرات فرسایش (تفاوت بیشینه و کمینه) در ساحل سمت راست 7 متر در سال می‌باشد. این در حالی است که در ساحل چپ میزان تغییرات 4/9 متر در سال بدست آمده است. با توجه به مقادیر نرخ خالص در جدول 5 می‌توان بیان داشت که ساحل راست پویاتر از ساحل چپ به نظر می‌رسد. همچنین بر اساس نرخ خالص می‌توان استنباط نمود که ساحل چپ بیشتر دچار فرسایش شده است، اما در ساحل چپ میزان رسوبگذاری از مقدار فرسایش بیشتر است.

4-3- تغییرات مساحت

شکل‌های 4 و 5 به ترتیب مساحت فرسایش و رسوبگذاری در ساحل راست و چپ رودخانه را بین سال‌های 94-1384 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به غیر از سال‌های 1384-85 و 1389-90 که میزان فرسایش اختلاف زیادی با مقدار رسوبگذاری دارد، در اغلب سال‌ها رسوبگذاری بیشتر از فرسایش است.

ریخت‌شناسی، مجرای اصلی رودخانه در دو سال متوالی یا قبل و بعد از سیلاب، نسبت به یکدیگر سنجیده می‌شود که در این حالت متوسط خطای نسبی حدود 0/6 متر بدست آمد. (Dong et al. (2016), Feyisa et al. (2014) و Jiang et al. (2014) نیز از تصاویر گوگل ارث به عنوان مرجع صحت‌سنجی در مطالعات خود استفاده کرده‌اند.

3-3- جابه‌جایی مرز

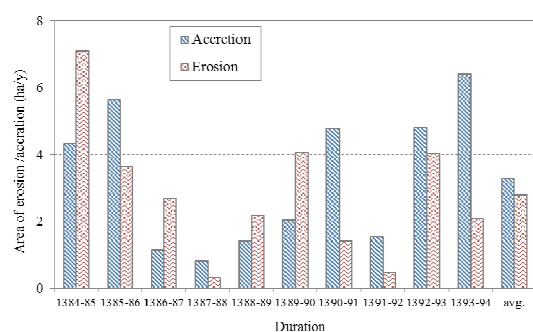
متوسط جابه‌جایی مجرای اصلی برای ساحل چپ و راست رودخانه ارمند با فواصل زمانی یک ساله در جدول 5 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد متوسط جابه‌جایی منجر به فرسایش در ده سال اخیر برای ساحل چپ 3/3 متر در سال است، در صورتی که در ساحل راست این مقدار به 5 متر در سال می‌رسد. میانگین نرخ رسوبگذاری در ساحل راست 4/9 متر و در ساحل سمت چپ 3/9 متر در سال بدست آمد. با توجه به عرض متوسط رودخانه که حدود 33/8 متر است میزان جابه‌جایی مجرای اصلی منجر به فرسایش (رسوبگذاری) برای ساحل راست و چپ به ترتیب 15 (14) و 10 (12) درصد عرض متوسط رودخانه می‌باشد. بیشینه مقدار فرسایش در ساحل راست و چپ به ترتیب حدود 8/7 و 6/7 متر در سال است که برای ساحل راست

جدول 5 میانگین نرخ جابه‌جایی کوتاه مدت* رودخانه ارمند (متر در سال)

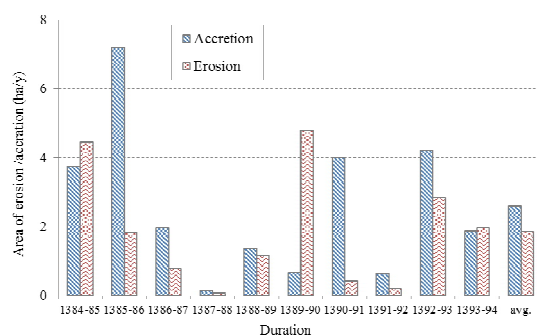
دوره زمانی	ساحل چپ			ساحل راست		
	نرخ رسوبگذاری	نرخ فرسایش	نرخ خالص	نرخ رسوبگذاری	نرخ فرسایش	نرخ خالص
1384-85	5/6	5/2	0/4	5/7	6/2	-0/5
1385-86	7/8	4/0	3/9	5/7	5/1	0/5
1386-87	3/2	2/4	0/8	2/8	4/2	-1/4
1387-88	1/8	1/7	0/0	2/2	1/8	0/4
1388-89	2/9	2/7	0/1	3/5	5/7	-2/3
1389-90	3/0	6/7	-3/6	3/7	8/5	-4/8
1390-91	5/2	2/4	2/9	6/4	3/5	2/8
1391-92	2/4	2/1	0/3	3/3	2/0	1/3
1392-93	4/9	3/4	1/5	7/9	4/8	3/1
1393-94	2/1	2/6	-0/5	7/6	8/7	-1/2
میانگین	3/9	3/3	0/6	4/9	5/0	-0/2
انحراف معیار	1/9	1/6	2/0	0/2	3/4	2/4
محدوده	6/1	4/9	7/5	5/7	7/0	7/9
خالص		0/6			-0/2	

*مقادیر مثبت نشانگر رسوبگذاری بوده و مقادیر منفی فرسایش را نشان می‌دهد.

مرز رودخانه در هر مقطع و تغییرات مساحت در حد فاصل بین دو مقطع با توجه به اختلاف مرز رودخانه در سال های مورد نظر بررسی شده و نهایتاً مقادیر فرسایش، رسوبگذاری و نرخ خالص تغییرات برای هر ساحل بر اساس نتایج کل مقاطع محاسبه می‌شود؛ از این رو عدم تطابق تغییرات ساحل رودخانه در سال‌های مختلف می‌تواند ناشی از تفاوت مساحت رسوبگذاری و فرسایش در مقاطع مختلف باشد. به بیان دیگر امکان دارد در حد فاصل دو مقطع در سال‌های متوالی رسوبگذاری یا فرسایش اتفاق بیفتد و در زمانی دیگر دبی و تعداد سیلاب‌ها موجب فرایندی معکوس در همان محدوده شود که نهایتاً بر مساحت فرسایش و رسوبگذاری در طول رودخانه تأثیرگذار است.



شکل 4 مقدار مساحت فرسایش و رسوبگذاری در ساحل راست



شکل 5 مقدار مساحت فرسایش و رسوبگذاری در ساحل چپ

3-5- تأثیر سیلاب‌ها بر پارامترهای ریخت‌شناسی

در این پژوهش به منظور ارزیابی اثرات سیلاب بر پارامترهای ریخت‌شناسی رودخانه ارمند، بزرگترین سیلاب‌های سال‌های آبی 1384-85 و 1389-90 به ترتیب با بده اوج 3000 و 622 متر مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت.

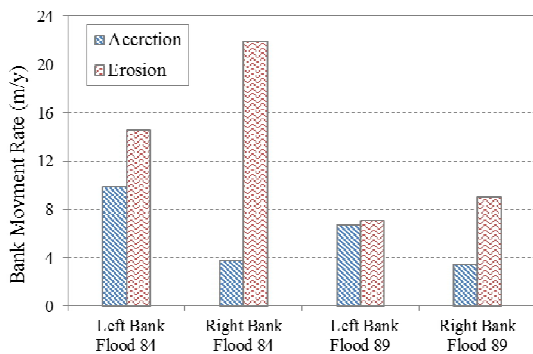
بیشترین میزان رسوبگذاری و فرسایش (حدود 11 هکتار) مربوط به سال 1384-85 است که بر اساس اطلاعات جدول 1 در این سال بزرگترین سیلاب 15 سال اخیر رودخانه ارمند با بده جریان 3000 متر مکعب بر ثانیه اتفاق افتاده است. بیشینه اختلاف فرسایش و رسوبگذاری مربوط به سال 1384-85 می‌باشد که در این سال میزان فرسایش در ساحل راست 3/9 برابر رسوبگذاری است. در سال‌های 1390-91 و 1393-94 میزان رسوبگذاری در ساحل راست به ترتیب 3/4 و 3/1 برابر فرسایش است. همچنین کمترین میزان فرسایش و رسوبگذاری به ترتیب در سال‌های 1387-88 و 1391-92 رخ داده که این موضوع منطقی به نظر می‌رسد، زیرا در این سال‌ها بده متوسط جریان سالانه (بده متوسط سیلاب) به ترتیب 46 (187) و 60 (191) متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که نسبت به بده بلند مدت جریان رودخانه (94 متر مکعب بر ثانیه) کمتر است.

نتایج نشان می‌دهد که تفاوت زیادی بین متوسط رسوبگذاری و فرسایش ساحل راست وجود ندارد و در این ساحل مساحت رسوبگذاری حدود 17 درصد بیشتر از فرسایش می‌باشد. این در حالی است که در ساحل چپ رسوبگذاری حدود 40 درصد از میزان فرسایش بیشتر است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان فرسایش در سال 1384-85 معادل 11/5 هکتار و بیشینه رسوبگذاری در سال 1385-86 و معادل 12/8 هکتار اتفاق افتاده است. این در حالی است که کمینه مقدار فرسایش و رسوبگذاری در سال 1387-88 و به ترتیب معادل 0/4 و 0/9 هکتار برآورد شده است. بیشینه نرخ خالص رسوبگذاری مربوط به سال 1385-86 و بیشینه فرسایش آن مربوط به سال 1389-90 می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های 4 و 5 مشاهده می‌شود، در بیشتر سال‌ها تغییرات فرسایش و رسوبگذاری ساحل راست و چپ رودخانه مشابه است، اما در سال‌های نظیر 1386-87، 1388-89 و 1393-94 میزان فرسایش و رسوبگذاری در ساحل راست و چپ متفاوت است (به طور مثال در 1386-87 میزان فرسایش ساحل راست بیشتر از میزان رسوبگذاری است، ولی در ساحل چپ برعکس است). همان‌طور که پیش از این بیان شد مقدار جابه‌جایی

جدول 6 مساحت فرسایش و رسوبگذاری ساحل رودخانه ناشی از سیلاب‌های اسفند 1384 و اسفند 1389 را نشان می‌دهد.

در سیلاب سال 1384 نرخ خالص تغییرات در طول رودخانه حدود 55 هکتار فرسایشی بوده که سهم ساحل راست 42 و ساحل چپ حدود 13 هکتار می‌باشد. در سیلاب سال 1389 نیز روند تغییرات به همین ترتیب است. به طوری که نرخ خالص تغییرات از جنس فرسایش و معادل 27 هکتار است که حدود 14 هکتار آن در ساحل راست و 13 هکتار دیگر در ساحل چپ اتفاق افتاده است.

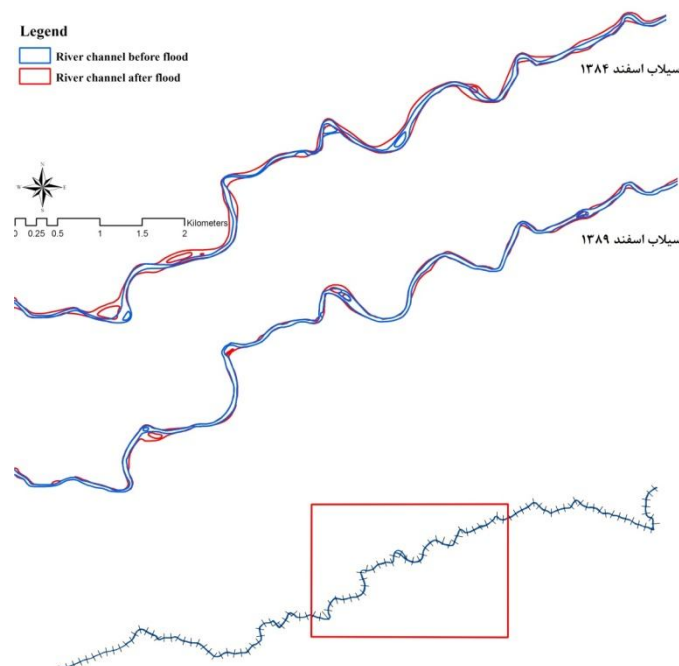


شکل 6 تغییرات مساحت ساحل چپ و راست ناشی از سیلاب اسفند سال‌های 84 و 89

شکل 6 نتایج جابه جایی مجرای اصلی رودخانه را برای هر دو سیلاب نشان می‌دهد. در سیلاب اسفند 1384 متوسط فرسایش در ساحل راست و چپ به ترتیب 22 و 15 متر و متوسط رسوبگذاری 4 و 9 متر می‌باشد. بر اساس عرض متوسط رودخانه قبل از وقوع سیل (حدود 34 متر) نسبت جابه‌جایی ساحل رودخانه که منجر به فرسایش ساحل رودخانه شده، برای ساحل راست و چپ به ترتیب 64 و 44 درصد عرض متوسط می‌باشد که این مقادیر حدود چهار برابر جابه‌جایی متوسط ده ساله است.

نتایج برای سیلاب اسفند 1389 نشان می‌دهد میزان فرسایش و رسوبگذاری برای ساحل راست به ترتیب 9 و 3/5 متر می‌باشد. این مقادیر برای ساحل چپ به ترتیب 7/1 و 6/7 متر بدست آمد. درصد جابه‌جایی ناشی از فرسایش ساحل برای این سیلاب به ترتیب در ساحل راست و چپ حدود 24 و 20 درصد عرض متوسط (37 متر) برآورد شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو ساحل میزان فرسایش بیشتر از رسوبگذاری است و ساحل راست بیشتر دچار فرسایش شده است. شکل 7 نمایی شماتیک از این تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل 7 نمایی شماتیک از تغییرات مساحت ساحل رودخانه قبل و بعد از وقوع سیلاب‌های اسفند 84 و اسفند 89

اسفند 1384 و اسفند 1389 نشان می‌دهد. در شکل 7 رنگ آبی و قرمز به ترتیب مجرای اصلی رودخانه قبل و بعد از وقوع سیلاب را نشان می‌دهد که در حقیقت تفاوت مجرای اصلی در این دو حالت بیانگر تغییرات پارامترهای ریخت‌شناسی محدوده مورد مطالعه است.

3-6- تأثیر مخزن سد کارون 4 بر ریخت‌شناسی رودخانه

به منظور بررسی تأثیر مخزن سد کارون 4 بر پارامترهای ریخت‌شناسی رودخانه ارمند، تغییرات این پارامترها در زمان‌های قبل و بعد از آبیگری سد و در بازه 5 کیلومتری از مخزن مورد بررسی قرار گرفت.

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه برای ساحل چپ و راست و در بازه 5 کیلومتری مخزن سد کارون 4 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابه‌جایی مجرای اصلی در سال‌های (89-1388)، (90-1389) و (91-1390) و از فاصله تقریبی 3/5 کیلومتری بسیار شدید است. با توجه به زمان آبیگری سد کارون 4 (فروردین 1389) می‌توان استنباط نمود که این نوسانات در مجرای اصلی رودخانه ناشی از تأثیر مخزن این سد می‌باشد. زیرا متوسط بده جریان در سال‌های قبل و بعد از آبیگری تغییر چندانی نداشته است و حتی بده جریان در سال 90-1389 حدود یک سوم بده جریان سال 85-1384 می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به مقادیر جدول 1 فراوانی و بده اوج سیلاب در این سال‌ها نسبت به متوسط دوره ده ساله کمتر است. همان‌طور که مشخص است در ساحل راست از ابتدای آبیگری (90-1389) جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه از نوع فرسایشی می‌باشد و در ادامه در سال‌های 91-1390 و 93-1392 جابه‌جایی از نوع رسوبگذاری است. در ساحل چپ نیز تغییرات مشابه ساحل راست است، به طوری که در ابتدای آبیگری، جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه فرسایشی و پس از آن از نوع رسوبگذاری است. نکته قابل توجه اینکه پس از آبیگری کامل سد محدوده‌ی تغییرات مجرای اصلی رودخانه مشابه سال‌های قبل از آبیگری می‌باشد.

شکل 10 به طور نمونه مقدار جابه‌جایی مرز رودخانه برای

جدول 6 مساحت فرسایش و رسوبگذاری ناشی از سیلاب (هکتار)

سیلاب	سیلاب	سال
اسفند 1389	اسفند 1384	
0/2	1/2	رسوبگذاری ساحل راست
1/7	6/5	رسوبگذاری ساحل چپ
14/4	43/5	فرسایش ساحل راست
14/3	19/0	فرسایش ساحل چپ
1/9	7/6	مجموع رسوبگذاری
28/7	62/5	مجموع فرسایش
-26/8	-54/9	نرخ خالص
-14/2	-42/4	نرخ خالص ساحل راست
-12/6	-12/5	نرخ خالص ساحل چپ

نتایج تغییرات مساحت ناشی از وقوع سیلاب‌ها نیز بیانگر این است که ساحل راست علاوه بر این که پویاتر از ساحل چپ است، تغییرات آن نیز بیشتر از نوع فرسایش است. نسبت فرسایش ساحل راست به چپ برای سیلاب‌های سال‌های 1384 و 1390 به ترتیب 3/4 و 1/1 بدست آمده است که البته با توجه به بده متوسط دو سیلاب، این موضوع دور از انتظار نیست، زیرا فرسایش در درجه اول متأثر از میزان بده جریان است.

بررسی تغییرات عرض متوسط رودخانه قبل و بعد از سیلاب‌های سال‌های 1384 و 1389 به ترتیب با افزایش 60 و 30 درصدی همراه بوده است، به طوری که عرض متوسط قبل و بعد از سیلاب اسفند 1384 از 34 متر به 59 متر رسیده است.

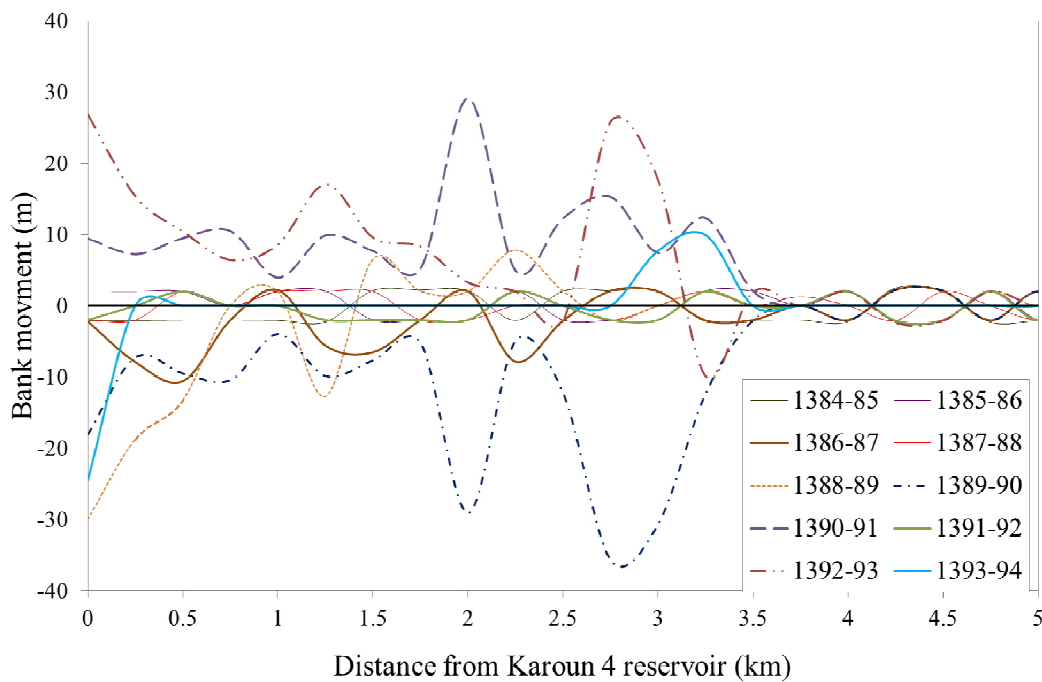
با توجه به فاصله زمانی بین تصاویر مورد بررسی قبل و بعد از سیلاب (56 روز برای سیلاب سال 1384 و 34 روز برای سیلاب 1389) و فروکش هیدروگراف سیلاب در این بازه‌ی زمانی می‌توان استنباط نمود که این تغییرات عرض ناشی از جریان بر روی سیلاب دشت‌ها نیست بلکه در حقیقت بده سیلاب تا حدی موجب فرسایش سیلاب دشت‌ها و تبدیل آن‌ها به مجرای اصلی رودخانه شده است. تغییرات عرض متوسط رودخانه قبل از سیلاب اسفند 1389 از 37 متر به 47 متر رسیده است.

شکل 7 نمایی شماتیک از تغییرات مجرای اصلی رودخانه در بازه‌ای از محدوده مورد مطالعه را برای سیلاب‌های

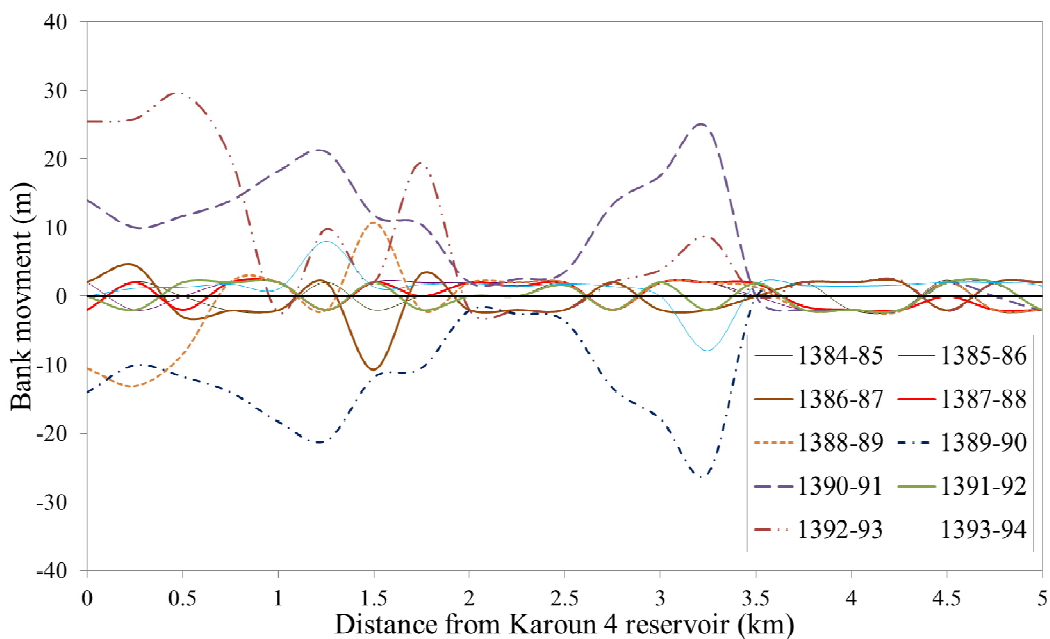
7-3- تغییرات مساحت جابه‌جایی

شکل 11 مجموع فرسایش و رسوبگذاری هر دو ساحل چپ و راست را در فاصله 5 کیلومتری از سد کارون 4 نشان می‌دهد.

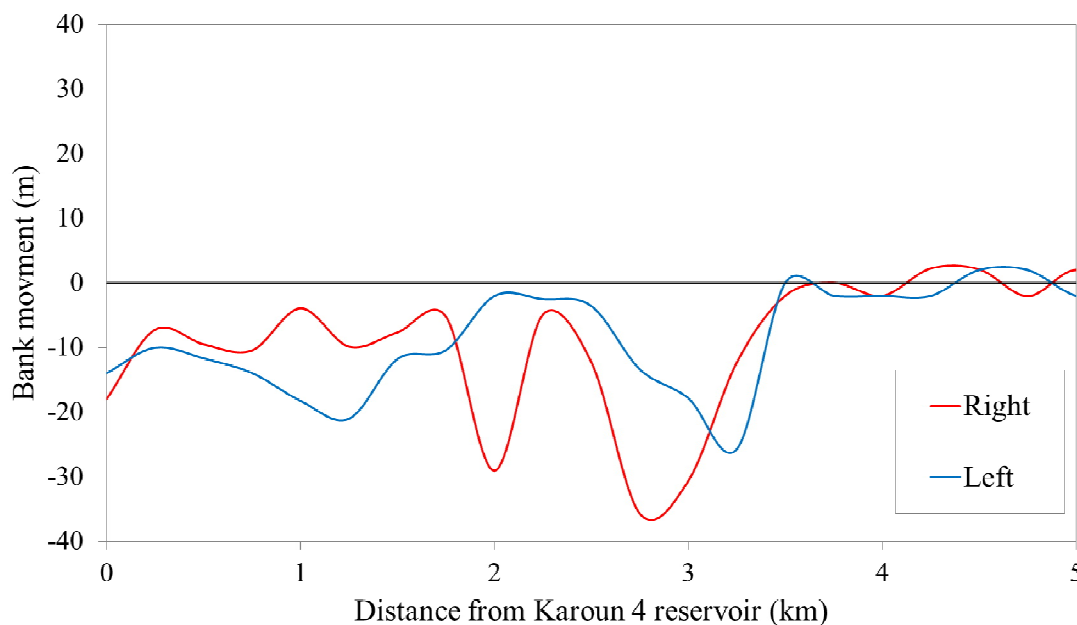
هر دو ساحل چپ و راست رودخانه ارمند را بین سال‌های 1389-90 نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است نوسانات شدید در فاصله 3/5 کیلومتری مخزن رخ داده و بیشتر تغییرات از جنس فرسایشی است.



شکل 8 تأثیر مخزن سد کارون 4 بر جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه در بازه‌های زمانی مختلف برای ساحل راست

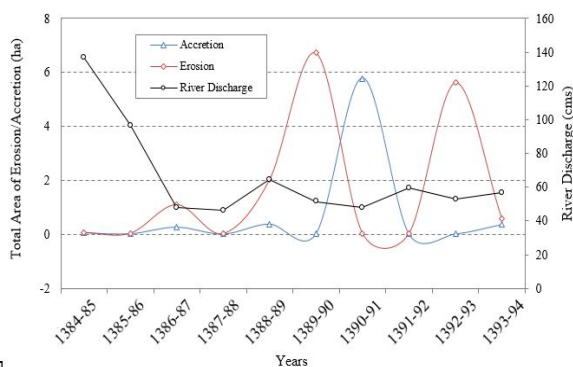


شکل 9 تأثیر مخزن سد کارون 4 بر جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه در بازه‌های زمانی مختلف برای ساحل چپ



شکل 10 تأثیر مخزن سد کارون 4 بر جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه در سال 1389-90

ریخت‌شناسی، به ویژه میزان فرسایش در یک بازه که جنس مصالح تغییراتی زیادی ندارد، کاملاً متأثر از دبی است.



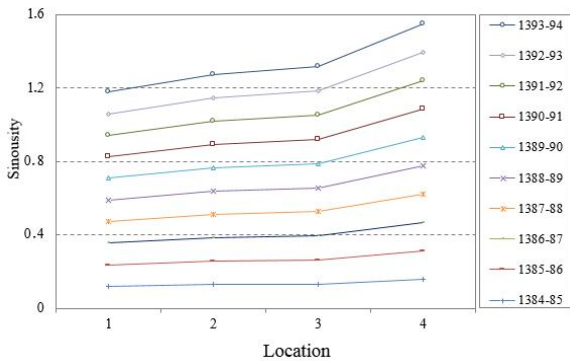
شکل 11 تغییرات کل مساحت فرسایش و رسوبگذاری در بازه 5 کیلومتری مخزن سد کارون

بنابراین تغییرات را می‌توان این گونه توجیه نمود که از زمان آبرگیری تا پر شدن کامل مخزن، فرسایش افزایش یافته و پس از آن میزان فرسایش به روند طبیعی خود بازگشته است. در نقطه مقابل، در زمان پر بودن مخزن، کاهش سرعت جریان رودخانه موجب افزایش رسوبگذاری شده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات

بر اساس یافته‌های این تحقیق مشخص شد میزان فرسایش از زمان آبرگیری سد افزایش یافته و تا سال 1389-1390 این روند ادامه داشته، پس از آن در سال 1390-91 کاهش یافته و روند ثابتی تا سال 1391-92 طی کرده است. سپس در سال 1392-93 مجدداً به صورت ناگهانی افزایش داشته و سپس دوباره با کاهش همراه بوده است. برای رسوبگذاری پس از دو سال از زمان آبرگیری تغییراتی مشاهده نمی‌شود اما در سال 1390-91 افزایش ناگهانی در میزان رسوبگذاری اتفاق افتاده است.

همان‌طور که در شکل 11 مشخص است، بده متوسط جریان رودخانه از سال 1386-87 به طور چشمگیری کاهش یافته و در سال‌های 1389 الی 1394 تغییرات آن تقریباً ثابت است. همچنین بده اوج و فراوانی سیلاب‌ها نیز نسبت به سال‌های قبل از احداث سد با کاهش همراه بوده است، از اینرو با توجه به وابستگی فرسایش به میزان بده جریان، این تغییرات ناگهانی را می‌توان متأثر از احداث سد کارون 4 دانست. نکته قابل توجه اینکه پس از احداث سد، زمانی که رسوبگذاری بیشینه است، کمینه مقدار فرسایش را شاهد هستیم و بالعکس. با توجه به اینکه بیشترین تغییرات ریخت‌شناسی متأثر از دبی و جنس مصالح هستند، می‌توان اظهار داشت که پارامترهای

کارون 4 بحث شد، می توان استنباط نمود که تغییرات سینوسیته در بازه 4 متاثر از احداث سد کارون 4 است.



شکل 13 تغییرات سینوسیته در طول رودخانه ارمند بین سال‌های 1384 تا 1395

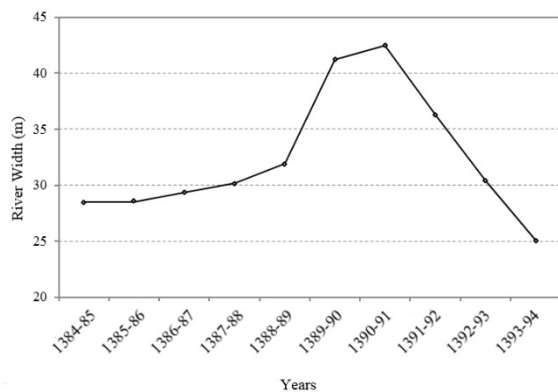
4- نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان بیان داشت که تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ارمند نسبت به رودخانه‌های بزرگ دنیا از نظر کمی ناچیز است. اما با توجه به ماهیت کوهستانی بودن این رودخانه و وقوع سیلاب‌های بزرگ و به دنبال آن بار رسوبی زیاد، مشاهده شد که متوسط جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه ناشی از فرسایش در بازه ده ساله برای هر دو ساحل حدود 25 درصد عرض رودخانه است، همچنین بررسی برخی سیلاب‌ها نشان داد این مقادیر با توجه به بده سیلاب تا 44 و 108 درصد عرض رودخانه نیز می‌رسد. ارزیابی نرخ خالص تغییرات مساحت در طول رودخانه نشان داد که این نرخ در سیلاب‌ها تا حدود 55 هکتار از جنس فرسایش می‌رسد. بنابراین می‌توان اظهار داشت که تغییرات ریخت‌شناسی با حجم رسوب زیاد می‌تواند بر عملکرد و ارائه راهکارهای مدیریتی سد کارون 4 تأثیرگذار باشد.

از سوی دیگر با بررسی تأثیر سد کارون 4 بر تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه ارمند مشخص شد که این سد بر میزان جابه‌جایی مرز و مساحت فرسایشی و رسوبگذاری تا بازه 3/5 کیلومتری از مخزن تأثیر بسزایی دارد. نتایج نشان داد که از زمان آبیگری تا پر شدن مخزن سد فرسایش مجرای اصلی رودخانه افزایش یافته و در نقطه

آب مخزن نیز به طور قابل توجهی بر مساحت فرسایش و رسوبگذاری مجرای اصلی رودخانه تأثیرگذار است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات مساحت مشابه جابه‌جایی مجرای اصلی رودخانه، در فاصله‌ی حدود 3/5 کیلومتر رخ می‌دهد. در واقع این گونه می‌توان اظهار نمود که مخزن سد کارون 4 تا فاصله‌ی 3/5 کیلومتری بر مساحت فرسایش و رسوبگذاری مجرای اصلی رودخانه اثر دارد. متوسط عرض رودخانه در بازه 5 کیلومتری مخزن بین سال‌های 1384-95 در شکل 12 ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است عرض رودخانه پس از آبیگری مخزن افزایش یافته که این افزایش تا زمان پر شدن کامل مخزن ادامه دارد و پس از آن به دلیل رسوبگذاری کاهش یافته است.

شکل 13 متوسط مقدار سینوسیته را در چهار بازه رودخانه و برای سال‌های 1384-94 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود از سال 1384 الی 1394 مقدار سینوسیته در هر چهار بازه افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در بازه آخر (حدود 6 کیلومتر) تغییرات سینوسیته در سال‌های پس از آبیگری با شیب بیشتری تغییر کرده است. این در حالی است که در بازه‌های قبل (1، 2 و 3) شیب تغییرات سینوسیته در سال‌های قبل و بعد از آبیگری تغییرات چندانی نداشته است.



شکل 12 متوسط عرض رودخانه در بازه 5 کیلومتری مخزن بین سال‌های 1384 الی 1394

از طرفی با توجه به اینکه در قسمت قبل مقاله در مورد تأثیر مخزن بر میزان فرسایش و رسوبگذاری مجرای اصلی رودخانه در بازه 3/5 کیلومتری منتهی به مخزن سد

S.R., (2014). "Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery". *Remote Sensing of Environment*, 140, pp. 23-35.

Fisher, A., Flood, N. and Danaher, T., (2016). "Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia". *Remote Sensing of Environment*, 175, pp. 167-182.

Ji, L., Zhang, L. and Wylie, B., (2009). "Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), pp. 1307-1317.

Hossain .Md.A., Gan T.y and Baki. A, (2013), "Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images". *Quaternary International* 304. 142-155.

Kusimi, J.M, (2008). "Stream processes and dynamics in the morphology of the Densu river channel in China". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8.

Manjusree. P, Satyanarayana. P, CM. Bhatt, Sharma. SVSP and Srinivasa Rao. G, (2015). "River sensing and GIS for river morphology studies". *Remote Sensing Applications Area*, National Remote Sensing Centre ISRO, Department of Space, Hyderabad - 500 037.

NASA (2006). "Landsat 7 science data users handbook", http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf, 2006.

Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A. and Palomar-Vázquez, J., (2012), "Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision". *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 1-11.

Rozo, M.G., Nogueira, A.C. and Castro, C.S., (2014). "Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986–2006". *Journal of South American Earth Sciences*, 51, pp. 28-44.

Wang, J.J. and Lu, X.X., 2010. "Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: an example from the Lower Yangtze River, China." *Science of the Total Environment* 408, 1131-1138.

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: 3025-3033.

مقابل پر شدن مخزن موجب افزایش رسوبگذاری شده است. همچنین نتایج نشان داد که مقدار سینوسیته در سال‌های پس از آبیگری در بازه نزدیک مخزن با شیب بیشتری افزایش یافته است که این موضوع نشان‌دهنده پویایی بیشتر رودخانه پس از احداث سد می‌باشد.

5- فهرست علائم

AWEI _{no shadow}	شاخص استخراج خودکار آب - مناطق بدون سایه
AWEI _{shadow}	شاخص استخراج خودکار آب - مناطق سایه‌دار
EWI	شاخص آب پیشرفته
ETM ⁺	نام سنجنده ماهواره لندست
IRS	سری ماهواره‌های هندوستان
MNDWI	شاخص اصلاح شده بهنجار آب
MSS	نام سنجنده ماهواره لندست
NDWI	شاخص بهنجار تفاضل آب
MNDWI	شاخص اصلاح شده بهنجار آب
OLI	نام سنجنده ماهواره لندست
ROC	مشخصه عملکرد سیستم
TM	نام سنجنده ماهواره لندست
WI ₂₀₁₅	شاخص آب

6- منابع

شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (1388). گزارش اولین آبیگری سد کارون 4، شرایط اجرا، سناریوی آبیگری و ریسک - ها. ص. 108.

علوی پناه، س.ک.، (1394). اصول سنجش از دور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تهران. ص. 780.

Archana Sarkar, R. D. Garg and Nayan Sharma, (2012). "RS-GIS based assessment of river dynamics of Brahmaputra river in India". *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, pp. 63-72

Das, J.D., Dutta, T. and Saraf, A.K., (2007). "Remote sensing and GIS application in change detection of the Barak River channel, NE India". *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 35(4), pp. 301-312.

Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. and Proud,