

اثرات احداث سد بر ویژگی‌های پیچان‌رودی قسمت‌های میانی گرگان‌رود

رضا اسماعیلی - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای دانشگاه مازندران
قاسم لرستانی - استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای دانشگاه مازندران
غفور بازیار - کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای دانشگاه مازندران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱۰

چکیده

در این تحقیق اثرات احداث سد بر ویژگی‌های پیچان‌رودی قسمت‌های میانی گرگان‌رود در استان گلستان بررسی شده است. محدوده مورد مطالعه بین شهر گنبدکابوس و روستای دیگجه قرار دارد. در قسمت‌های بالادست گرگان‌رود سه سد مخزنی احداث شده است. برای بررسی اثرات احداث این سدها بر ویژگی‌های پیچان‌رودی از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۳۴۶، ۱۳۸۰، و ۱۳۹۵ استفاده شد. با رقومی کردن مسیر رودخانه در سال‌های یادشده، پارامترهای طول موج، دامنه موج، شعاع قوس، عرض کانال، و میزان مهاجرت کانال رود اندازه‌گیری شد. برای تحلیل تغییرات آب و رسوب داده‌های دو دوره قبل (۱۳۴۶-۱۳۸۰) و بعد (۱۳۸۰-۱۳۹۵) از احداث بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پس از احداث سد میانگین دبی رودخانه ۲۶ درصد و دبی رسوبات معلق ۵۰ درصد کاهش یافته است. به دنبال کاهش جریان آب، میانگین عرض کانال ۵۰ درصد کاهش یافت. پارامترهای طول موج و دامنه موج تغییرات مشخصی نداشته‌اند. شعاع قوس پس از احداث سد کاهش یافته و با افزایش نسبت شعاع قوس به عرض کانال ظرفیت مهاجرت رود کم شده است. به طور میانگین، میزان فعالیت کانال رود در دوره مورد مطالعه ۰/۶۵ متر در سال اندازه‌گیری شد.

کلیدواژه‌ها: استان گلستان، پیچان‌رود، سد مخزنی، گرگان‌رود.

مقدمه

از ویژگی‌های مهم سیستم رودخانه‌ای شکل کانال رود است و کانال‌هایی با الگوی پیچان‌رودی از فعال‌ترین اشکال رودخانه‌ای به‌شمار می‌روند که فرسایش در کناره مقعر خمیدگی‌ها و رسوب‌گذاری در کناره مقابل آن‌ها موجب مهاجرت کانال در عرض دشت سیلابی می‌شود. میزان این مهاجرت جانبی در مقیاس فضایی و زمانی متغیر بوده و از ۰ تا تقریباً ۸۰۰ متر در سال گزارش شده است (هوک، ۱۹۸۰: ۱۵۱).

رودخانه‌ها دارای تعادل دینامیکی‌اند و در طی زمان با نوسان مقادیر دبی و رسوب خود را تعدیل می‌کنند (الرو، ۲۰۱۰: ۲۴۷). یعنی حالت خودتنظیمی دارند، از این رو، تغییر یک حالت طبیعی و حیاتی در سیستم رودخانه‌ای است و فرسایش کناره‌ای، زیربری رود، و رسوب‌گذاری از جمله فرایندهای طبیعی در آن به‌شمار می‌روند. فعالیت‌های انسانی مانند برداشت شن و ماسه، احداث سازه‌ها و دیواره‌ها در کرانه رود، میان‌بری‌های مصنوعی، ساخت سدهای مخزنی، و تغییرات کاربری

اراضی موجب تغییراتی در دینامیک ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها می‌شود (یاتو و همکاران، ۲۰۱۳: ۹۸). بدین ترتیب به صورت مستقیم یا غیر مستقیم آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

فعالیت‌های انسانی با تغییر در رژیم دبی و حمل رسوب می‌تواند تغییراتی در عرض، سینوسیته، یا پایداری کانال رودخانه به‌وجود آورد (مورایس و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۴۸). از جمله مهم‌ترین سازه‌های انسان‌ساخت در مسیر رودخانه‌ها سدهای مخزنی است که با اهداف تولید برق، کنترل سیل، تهیه آب برای کشاورزی و مصارف خانگی احداث می‌شود. احداث سدهای بزرگ برای جریان آب، رسوب، و ارگانیک‌های زنده مانع ایجاد می‌کند و موجب ناپوستگی در شرایط ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی می‌شود (سیکی و رودز، ۲۰۱۴: ۲۱۵). در نتیجه، اختلال در جریان آب و حمل رسوب تغییراتی در بالادست و پایین‌دست محل احداث سد به‌وجود می‌آید. از این رو، درک تغییرات دینامیک رودخانه‌ای به‌خصوص در رودخانه‌های پیچان‌رودی اهمیت زیادی دارد.

در استان گلستان تاکنون چهار سد مخزنی بر روی کانال اصلی گرگان‌رود احداث شده است که سه سد چمران، بوستان، و گلستان در بالادست محدوده مورد مطالعه قرار دارد. احداث این سدها بر روی کانال رودخانه و مورفولوژی آن تأثیر گذاشته است. از این رو، در این تحقیق، تغییرات مورفولوژیکی کانال رود بررسی شده است.

مآندره‌های رودخانه‌ای در رشته‌های مختلف علمی مانند ژئومورفولوژی، مهندسی رودخانه، دینامیک سیالات، فیزیک، زیست‌شناسی، و اکولوژی بررسی و مطالعه می‌شوند. اما در همه آن‌ها برای درک این اشکال از ژئومورفولوژی استفاده می‌شود (هوک، ۲۰۱۳: ۲۶۲). بررسی تغییرات رودخانه‌های پیچان‌رودی در یک دوره زمانی با استفاده از نقشه‌های تاریخی (تهیه‌شده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای) خصوصاً با توسعه GIS به‌شدت افزایش یافته است و بسیاری از محققان درباره تکامل مورفولوژیکی پیچان‌رودها مطالعه کرده‌اند که در اینجا فقط به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

شیلدر و همکاران (۲۰۰۰) اثرات احداث سد را بر مهاجرت کانال رود در قسمت پایین‌دست رودخانه میسوری بررسی کردند و به نتیجه رسیدند که میزان مهاجرت کانال پس از ساخت سد از ۶۶ متر در سال به ۱/۸ متر در سال کاهش یافت. بیاتی خطیبی (۱۳۹۳) تغییرات پیچان‌رود آجی‌چای را بررسی کرد و با استفاده از پارامتر شعاع خمیدگی، میزان جابه‌جایی و قابلیت حرکات جانبی رود را در دشت سیلابی محاسبه و برآورد کرد.

عاشوری و همکاران (۱۳۹۲) اثرات احداث سد ستارخان را روی رودخانه اهرچای مطالعه کردند. تحقیقات نشان داد که بعد از احداث سد دبی‌های اوج و سیلابی کاهش و به دنبال آن سینوسیته رودخانه کاهش یافته است.

یمانی و همکاران (۱۳۹۴) مورفومتری رودخانه ارس را در پایین‌دست سد میل مغان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و IRS بررسی کردند. نتایج نشان داد که طی ۲۶ سال (۱۹۸۷-۲۰۱۳) تغییرات زیادی (حداکثر تا ۱/۷ کیلومتر جابه‌جایی) در مسیر رود اتفاق افتاده است.

لگلیتر (۲۰۱۵) اثرات سدهای مخزنی را بر مورفودینامیک رودخانه‌های پیچان‌رودی در پایین‌دست رودخانه ساوری در امریکا مطالعه کرد و نتیجه گرفت که احداث سد موجب کاهش بزرگی جریان‌های اوج بهاری و افزایش جریان پایه شده و در مجموع میزان مهاجرت جانبی و فرسایش خالص و رسوب‌گذاری در دوره پس از احداث سد افزایش یافته است.

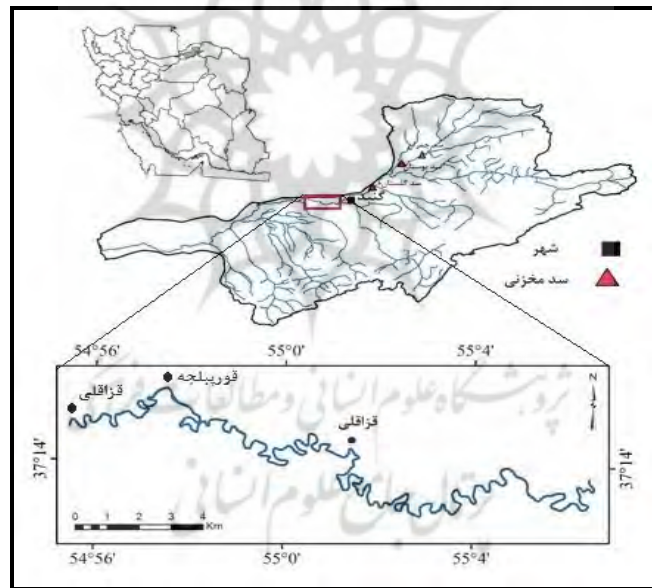
اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵) در بررسی تغییرات مورفولوژیک رودخانه شهرچای ارومیه نشان داد که پس از احداث سد، دبی رودخانه شهرچای کاهش یافته و پارامترهای پیچان‌رودی رودخانه در دوره مورد مطالعه (۲۰۱۳-۲۰۰۰) کمترین میزان تغییرات را داشته است.

یوسفی و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات مورفومتریکی پارامترهای مآندر رودخانه کارون را با استفاده از تصاویر لندست طی دوره ۲۰۰۸-۱۹۸۹ مطالعه کردند. مورایس و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات فضایی و زمانی رودخانه مآندری پیکس در برزیل را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اثرات انسانی مانند احداث سد موجب می‌گردد که سینوسیته رود از ۲/۶ به ۱/۷ کاهش یابد و میانگین طول موج قوس‌ها از ۲۰۰ متر به ۵۰۰ متر افزایش یابد.

کاسادو و همکاران (۲۰۱۶) تغییرات ژئومورفیک رودخانه ساوس گراند آرژانتین را بعد از احداث سد مطالعه کردند. بررسی‌ها نشان داد که در پایین‌دست سد میزان مهاجرت کانال کم شده و عرض کانال هم تا ۳۰ درصد کاهش یافته و در نتیجه پلانفرم کانال پایدار شده است. این تحقیق با هدف شناسایی الگوی فضایی و زمانی تغییرات پلانفرم رودخانه پیچان رودی گرگان رود و بررسی اثرات احداث سد بر روی آن انجام شده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گرگان رود تقریباً نیمه جنوبی استان گلستان را با مساحت ۱۱۳۸۰ کیلومتر مربع شامل می‌شود. رودخانه اصلی این حوضه گرگان رود است که پس از دریافت شاخه‌های مختلف به دریای خزر می‌ریزد. از نظر زمین‌شناسی، حوضه آبریز گرگان رود در دو زون زمین‌شناسی گرگان-رشت و هزار مسجد-کپه‌داغ واقع شده است. محدوده مورد مطالعه قسمت میانی گرگان رود، حد فاصل شهر گنبد کابوس تا روستای دیگجه، به طول ۴۴ کیلومتر است (شکل ۱). الگوی رودخانه در این قسمت پیچان رودی است و میانگین دبی سالانه آن در ایستگاه قزاقلی ۱۲/۹ متر مکعب در ثانیه اندازه‌گیری شده است. سدهای چمران، گلستان، و بوستان به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۷۹، و ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسیدند. حجم مفید این سه سد به ترتیب ۳، ۵۶، و ۴۴ میلیون متر مکعب است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز گرگان رود و بازه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

داده‌های دبی و رسوب از گزارش‌های ایستگاه هیدرومتری قزاقلی، که در ۷۳ کیلومتری پایین‌دست سد گلستان (طول مسیر رودخانه) و در محدوده مورد مطالعه قرار دارد، به دست آمد. این داده‌ها طی سال‌های ۱۳۵۲-۱۳۹۴ اندازه‌گیری شدند. در تحلیل هیدرولوژیکی به دو دوره-قبل از احداث سد (۱۳۵۲-۱۳۸۰) و بعد از احداث سد (۱۳۸۱-۱۳۹۴)- تقسیم شدند. برای مقایسه تغییرات میانگین دبی روزانه، یعنی مقادیر میانگین دبی در قبل و بعد از احداث سد، از آزمون T جفتی استفاده شد. داده‌های رسوب هم بر اساس برازش بین مقادیر دبی جریان و رسوب معلق متناظر آن با استفاده از معادله رگرسیونی زیر محاسبه شد.

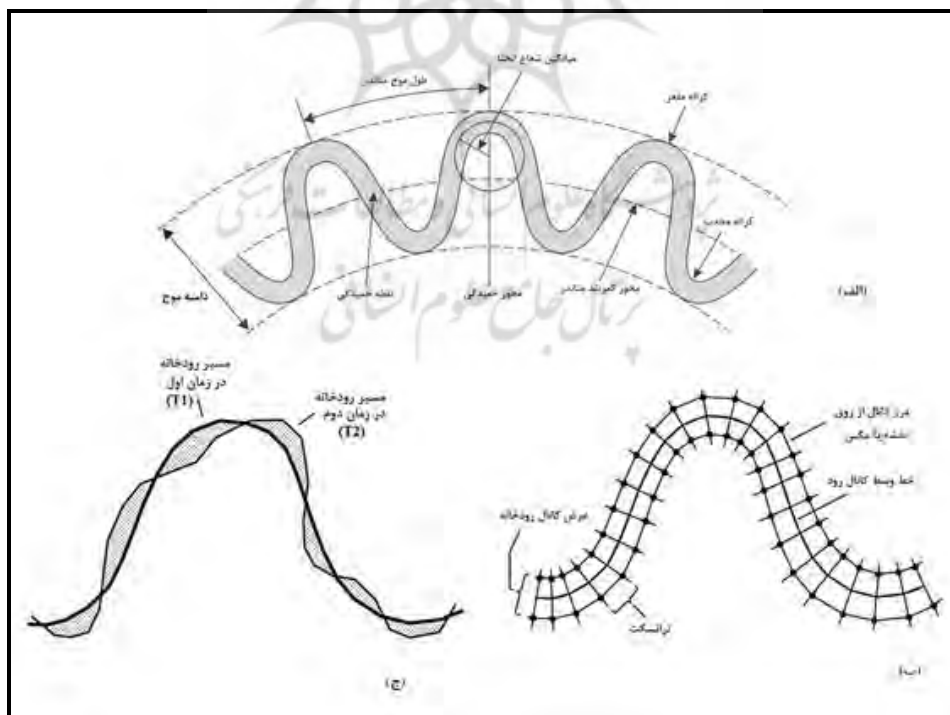
$$Q_s = \alpha Q_w^b \quad (۱)$$

که Q_s بار رسوب معلق بر حسب تن در روز، Q_w دبی جریان آب به مترمکعب در ثانیه، و α و b ضرایب ثابت رگرسیون توانی هستند.

برای بررسی تغییرات پلان رود در محدوده مورد مطالعه، از عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۶ با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، تصاویر ماهواره لندست (سنجنده TM) سال ۲۰۰۱ (۱۳۸۰) و تصاویر گوگل ارث سال ۲۰۱۵ (۱۳۹۵) استفاده شد. منابع فوق در ابتدا ژئورفرنس شدند و سپس از روی آن‌ها مسیر رودخانه در نرم‌افزار Arc GIS به صورت رقومی ترسیم شد. پارامترهای طول موج، دامنه موج، و شعاع قوس شاخص‌های هندسی رودخانه هستند که شکل ۲ - الف روش اندازه‌گیری این پارامترها را نشان می‌دهد. برای محاسبه عرض کانال لبایی، پهنای رودخانه در فواصل ۴۰۰ متری از مسیر رودخانه اندازه‌گیری شد و در مجموع برای هر سال ۹۱ مورد نمونه‌گیری شد (شکل ۲ - ب). پارامترهای میزان جابه‌جایی کانال و فعالیت کانال نشان‌دهنده فعالیت ژئومورفیک رودخانه‌اند. میزان فعالیت کانال گویای میزان مهاجرت کانال در برابر فرسایش در طی زمان است. برای اندازه‌گیری این پارامتر، ابتدا خط وسط رودخانه برای هر یک از سال‌های مورد نظر ترسیم شد (شکل ۲ - ج). سپس، با روی هم گذاری آن‌ها و با استفاده از رابطه ۱ میزان فعالیت کانال مشخص شد.

$$CA = (SA) / (L_{T1}) / (T_2 - T_1) \quad (۲)$$

CA فعالیت کانال، SA محدوده سایه‌خورده (مساحت تغییر مسیر رود در طی دو زمان) به هکتار، L_{T1} طول کانال رود در زمان اول، T_1 زمان (سال) اول، و T_2 زمان (سال) دوم است.



شکل ۲. روش‌های اندازه‌گیری: الف) پارامترهای هندسی پلان‌فرم رود (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴: ۲۴۳)؛ ب) عرض کانال لبایی رود؛ ج) میزان فعالیت کانال رود (مگدانلو و فرناندز، ۲۰۱۱: ۲۰۰)

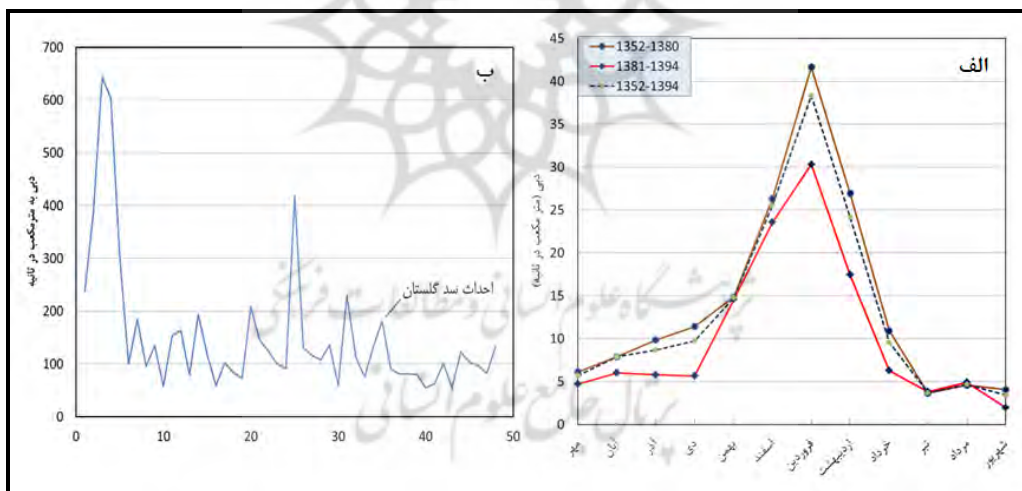
برای بررسی تغییرات پارامترهای هندسی گرگان‌رود از آزمون‌های آماری در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. برای این کار، نخست نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. سپس، با توجه به تعداد سال‌های مورد بررسی (سه سال)، در صورت نرمال‌بودن توزیع داده‌ها از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) و در غیر این صورت از آزمون ناپارامتری کروسکال والیس استفاده شد. در همه موارد سطح اطمینان ۰/۰۵ برای رد فرضیه صفر در نظر گرفته شد.

برای بررسی تغییرات هر یک از پارامترهای هندسی رود از بالادست به پایین‌دست رود از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. بدین صورت که برای اولین مقدار هر پارامتر در بالادست رتبه یک داده شد و به ترتیب به سمت پایین‌دست سایر رتبه‌ها مرتب و در سطح اطمینان ۰/۰۵ آزمون شدند.

یافته‌های پژوهش

تغییرات دبی و رسوب

رژیم جریان گرگان‌رود به صورت دائمی بوده و منشأ برف و باران دارد. میانگین دبی روزانه طی سال‌های ۱۳۵۲-۱۳۸۰ (قبل از احداث سد) ۱۴ متر مکعب در ثانیه اندازه‌گیری شده است و طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۹۴ (پس از احداث سد) میانگین دبی به ۱۰/۵ متر مکعب در ثانیه کاهش یافته است (شکل ۳ - الف). که معادل ۲۵/۶ درصد محاسبه شده است. آزمون T جفتی در سطح معناداری ۰/۰۵ نشان می‌دهد که میانگین دبی طی دو دوره یادشده تغییرات کاهشی مشخصی داشته است. شکل ۳ - ب میزان تغییرات دبی حداکثر لحظه‌ای را قبل و بعد از احداث سد نشان می‌دهد.



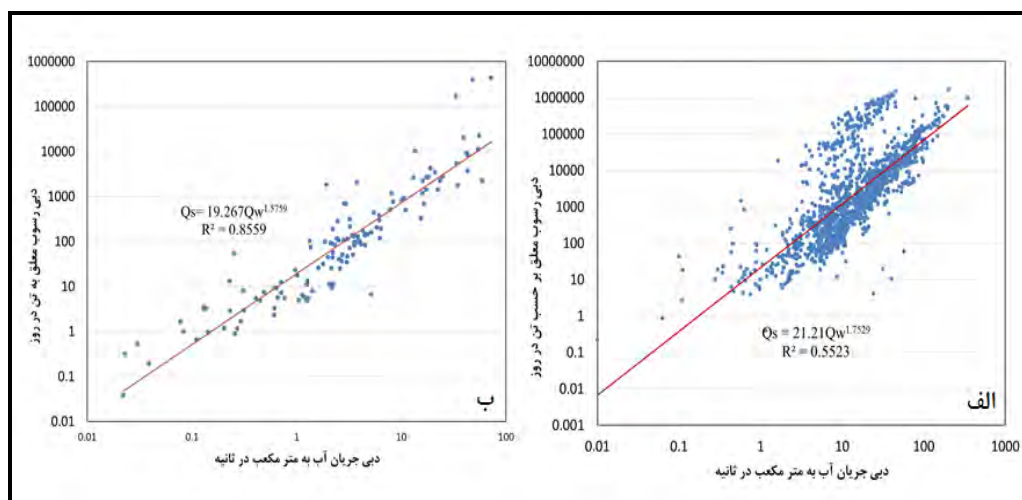
شکل ۳. الف) تغییرات میانگین دبی گرگان‌رود در ایستگاه قزاقلی در قبل و بعد از احداث سد؛ ب) تغییرات دبی حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه قزاقلی در قبل و بعد از احداث سد مخزنی

رسوبات معلق حمل شده به وسیله گرگان‌رود طی دو دوره با معادلات رگرسیون توانی برازش داده شد (رابطه‌های ۲ و ۳ و شکل ۴).

$$Q_s = 21.21 Q_w^{1.752} \quad \text{Sig: } \cdot \quad (3)$$

$$Q_s = 19.26 Q_w^{1.575} \quad \text{Sig: } \cdot \quad (4)$$

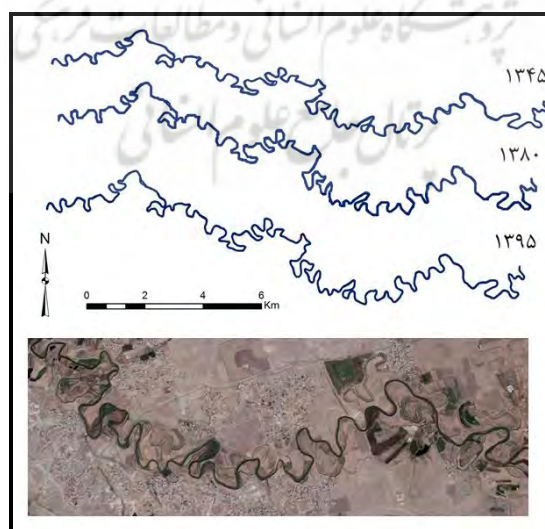
مقادیر توان در رابطه‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده نسبت میزان تغییرات رسوبات حمل شده در طی دو دوره است که بر این اساس متوسط مقدار رسوبات معلق حمل شده در گرگان‌رود ۵۰ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴. معادله رگرسیونی حمل رسوبات معلق گرگان‌رود در ایستگاه قزاقلی: الف) سال‌های ۱۳۵۲-۱۳۸۰ و ب) سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۹۴

تغییرات پارامترهای هندسی

برای بررسی مورفومتری پیچان‌رود سه پارامتر طول موج، دامنه موج، و شعاع قوس در سه دوره ۱۳۴۶، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۵ اندازه‌گیری شد (شکل ۵). جدول ۱ مقادیر میانگین هر یک از پارامترها را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۶ به صورت خلاصه آمار توصیفی پارامترها (میان، چارک اول و سوم) را نشان می‌دهد. طول موج در سال‌های اندازه‌گیری شده روند کاهشی داشت و مقدار آن در سال ۱۳۴۶ از ۳۸۶ متر به ۳۶۲ متر در سال ۱۳۹۵ کاهش یافت. اما آزمون آنالیز واریانس در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Sig = ۰/۷۴۳$) نشان می‌دهد که تغییرات معناداری در دوره ۱۳۴۶-۱۳۹۵ ایجاد نشده است. دامنه موج در سال ۱۳۴۶ از ۳۴۴ متر به ۳۵۹ متر در سال ۱۳۸۰ افزایش یافته و سپس در سال ۱۳۹۵ به ۳۰۳ متر کاهش یافته است. آزمون آنالیز واریانس در سطح اطمینان ۰/۰۵ ($Sig = ۰/۰۶۴$) نشان‌دهنده فقدان تغییرات معنادار این پارامتر در طی دوره مورد مطالعه است (جدول ۲).



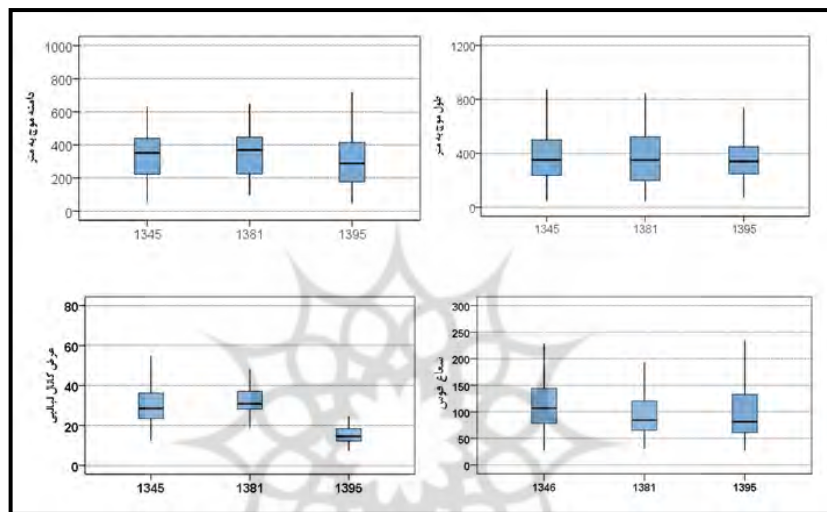
شکل ۵. مسیر پیچان‌رودی محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵، تصویر پایینی نیمه اول مسیر را از تصاویر گوگل‌ارت نمایش می‌دهد

جدول ۱. مقادیر آمار توصیفی پارامترهای بیجان‌رودی طی سال‌های ۱۳۴۶-۱۳۹۵

سال	۱۳۴۶		۱۳۸۰		۱۳۹۵	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
طول موج	۳۸۶٫۹	۲۰۴٫۳	۳۷۷٫۷۵	۲۵۵٫۸	۳۶۲	۱۵۷٫۲
دامنه موج	۳۴۴٫۱۴	۱۳۵	۳۵۹٫۳۸	۱۶۳٫۱۹	۳۰۳٫۷	۱۵۹
شعاع قوس	۱۲۴٫۷	۶۹٫۲۸	۱۰۰٫۶	۵۵٫۵۸	۱۰۳	۵۸٫۵۸
عرض کانال	۳۱٫۰۲	۱۲٫۴۷	۳۳٫۴۶	۸٫۷۶	۱۵٫۷	۶٫۱
مهاجرت کانال**	-	-	۳۹٫۲۸	-	۲۲٫۱۸	-

* همه متغیرها به متر اندازه‌گیری شده‌اند.

** مقادیر مهاجرت کانال به ترتیب مربوط به دوره ۱۳۴۶-۱۳۸۰ و ۱۳۸۰-۱۳۹۵ است.



شکل ۶. خلاصه آمار توصیفی پارامترهای هندسی در قسمت میانی گرگان‌رود

جدول ۲. مقایسه تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده با آزمون‌های آماری

پارامتر	تعداد نمونه اندازه‌گیری شده در سال			آزمون آماری	Sig	هیچ تغییر مشخصی ایجاد نشده است	فرضیه صفر (H ₀):
	۱۳۴۶	۱۳۸۰	۱۳۹۵				
طول موج	۷۴	۶۹	۸۵	آنالیز واریانس	۰٫۷۴۳	تأیید	هیچ تغییر مشخصی ایجاد نشده است
دامنه موج	۷۴	۷۹	۸۵	آنالیز واریانس	۰٫۰۶۴	تأیید	هیچ تغییر مشخصی ایجاد نشده است
شعاع قوس	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۷	کروسکال والیس	۰٫۰۰۳	رد	فرضیه صفر (H ₀): هیچ تغییر مشخصی ایجاد نشده است
عرض کانال	۹۱	۹۱	۹۱	کروسکال والیس	۰۰	رد	فرضیه صفر (H ₀): هیچ تغییر مشخصی ایجاد نشده است

شعاع قوس بیجان‌رودی در سال ۱۳۴۵ از ۱۲۴٫۷ متر به ۱۰۰٫۶ متر در سال ۱۳۸۰ کاهش یافت و سپس در سال ۱۳۹۵ به ۱۰۳٫۸ متر افزایش یافت. آزمون آماری کروسکال والیس در سطح اطمینان ۰٫۰۵ ($Sig = ۰٫۰۰۶$) نشان می‌دهد که شعاع قوس تغییرات مشخصی در طی زمان تجربه کرده است.

عرض متوسط کانال در سال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۸۰ به ترتیب ۳۱ و ۳۳ متر اندازه‌گیری شد؛ اما در سال ۱۳۹۵ به ۱۵٫۷ متر کاهش یافته است. آزمون آماری کروسکال والیس در سطح اطمینان ۰٫۰۵ ($Sig = ۰۰$) نشان می‌دهد که تغییرات کاملاً مشخصی در دوره مورد مطالعه رخ داده است.

میانگین مهاجرت جانبی کانال در دوره اول (۱۳۴۶-۱۳۸۰) ۳۹٫۳ متر اندازه‌گیری شد که حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۸ و ۹۵ متر بوده است. در دوره دوم (۱۳۸۰-۱۳۹۵) میانگین مهاجرت جانبی کانال ۲۲٫۲ متر با مقدار حداقل و حداکثر ۵٫۶

و ۵۳/۵ متر رخ داده است. فعالیت کانال با مهاجرت جانبی کانال ارتباط دارد. میزان فعالیت کانال از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵ در محدوده مورد مطالعه ۰/۶۵ متر در سال محاسبه شده است.

نسبت شعاع قوس به عرض رودخانه (R_c/W_b)، که یکی از مهم‌ترین عوامل توزیع تنش برشی در قوس رودخانه‌ها است، در سال‌های ۱۳۴۶، ۱۳۸۰، و ۱۳۹۵ به ترتیب ۴/۱۴، ۳/۰۴، و ۷/۴۸ محاسبه شده است. طبق نظر لاگاس و همکاران (۲۰۰۴: ۲۴) مقادیر $2 < R_c/W_b < 4$ ظرفیت بسیار زیادی برای مهاجرت جانبی کانال دارند و مقادیر بیش از آن مهاجرت رود شدیداً کاهش می‌یابد یا متوقف می‌شود. در بازه مورد مطالعه در دوره اول (قبل از احداث سد) ظرفیت مهاجرت جانبی کانال زیاد بوده و در دوره دوم (پس از احداث سد) این مقدار از آستانه جابه‌جایی فاصله زیادی داشته است. لذا، ظرفیت کانال برای مهاجرت جانبی به شدت کاهش یافته است.

بررسی روند تغییرات از بالادست به پایین دست هریک از پارامترهای هندسی پیچان رود و عرض کانال نشان می‌دهد که هیچ روند مشخصی از تغییرات وجود ندارد. جدول ۳ ضریب همبستگی اسپیرمن را برای هر یک از متغیرها در سطح اطمینان ۰/۰۵ نشان می‌دهد.

جدول ۳. ضریب همبستگی اسپیرمن پارامترها

پارامتر	۱۳۴۶		۱۳۸۰		۱۳۹۵	
	Sig	R	Sig	R	Sig	R
طول موج	۰/۱۸۲	-۰/۱۵۶	۰/۰۴۶	-۰/۲۴	۰/۶۲۶	-۰/۰۵۴
دامنه موج	۰/۲۰۵	-۰/۱۴۹	۰/۸۲۴	-۰/۰۲۷	۰/۶۷	۰/۰۴۶
شعاع قوس	۰/۸۴۹	-۰/۰۱۸	۰/۰۸۲	-۰/۱۶۵	۰/۰۵۲	-۰/۱۷۳
عرض کانال	۰/۵۷۴	۰/۰۶	۰/۱۸۷	۰/۱۴	۰/۳۲۲	۰/۱۰۵

بررسی ارتباط بین کاربری اراضی اطراف رودخانه، که به طور عمده شامل کشاورزی و مرتع است، با میزان مهاجرت کانال رود، با استفاده از روش مجذور اتا ۰/۰۳۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط ضعیف بین کاربری اراضی و میزان مهاجرت کانال رود است.

نتیجه‌گیری

احداث سه سد در بالادست محدوده مورد مطالعه (قسمت میانی گرگان‌رود) موجب کاهش ۲۶ درصدی میانگین جریان آب شد. دبی جریان‌های اوج هم پس از احداث سد کاهش یافت. با کاهش دبی جریان، میانگین عرض کانال هم به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت. به دنبال کاهش جریان و ته‌نشینی رسوبات معلق در پشت سدها، دبی رسوبات معلق هم یک کاهش ۵۰ درصدی را نشان می‌دهند. مطالعات پال (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که کاهش دبی موجب کاهش سه‌برابری مقدار رسوب شده است. در این تحقیق مقدار کاهش دبی رسوب معلق نسبت به دبی جریان دو برابر شده است. ادیب و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی اثرات سد کرخه در پایین دست رودخانه به نتیجه رسیدند که، پس از احداث سد، دبی جریان، عرض رودخانه، و دبی رسوب به ترتیب ۵۶، ۲۱، و ۱۴ درصد کاهش یافته‌اند. تحقیقات الرو (۲۰۱۰) و کاسادو و همکاران (۲۰۱۶) کاهش مقدار آب و رسوب را پس از احداث سد نشان می‌دهد. تحقیقات فوق نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند.

از پارامترهای هندسی پیچان‌رود، طول موج و دامنه موج تغییرات کمی را در دوره زمانی ۴۹ ساله نشان می‌دهند؛ یعنی این دو پارامتر در قبل و بعد از احداث سد تغییرات مشخصی نداشته‌اند. وجود تقریباً ۳۲ کیلومتر کانال متروک در بازه مورد مطالعه، که در عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی است (شکل ۵) نشان‌دهنده مورفودینامیک فعال رودخانه قبل از سال ۱۳۴۶ است. اما مقدار شعاع قوس در دوره قبل و بعد از احداث سد کاهش معناداری را نشان می‌دهد. اگرچه کاهش شعاع قوس می‌تواند نشان‌دهنده تحت فشار بودن کانال باشد، کاهش عرض کانال و در نتیجه افزایش دوبرابری نسبت شعاع قوس به عرض کانال نشان‌دهنده ایجاد شرایط تقریباً پایدار در قسمت میانی گرگان‌رود است. مطالعه مگدانلو

و فرناندز (۲۰۱۱) در رودخانه ابرو اسپانیا هم نشان می‌دهد که پارامترهای پیچان‌رودی در یک دوره هشتادساله تغییرات کمی داشته‌اند، عرض کانال کاهش یافته و نسبت شعاع قوس به عرض کانال دو برابر شده است که تأییدکننده نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق است.

رودخانه‌ها در حالت عادی دارای تعادل دینامیکی‌اند. اما با تغییراتی که در سیستم رودخانه‌ای گرگان‌رود اتفاق افتاده است برخی از پارامترهای پیچان‌رودی در طی زمان تغییر نکرده‌اند. این نشان می‌دهد که تغییرات مهمی در عملکرد ژئومورفیک رودخانه ایجاد شده است و رودخانه از تعادل دینامیکی به تعادل استاتیکی نزدیک می‌شود.

منابع

اصغری سراسکانرود، ص. (۱۳۹۵). بررسی پتانسیل تغییرات مورفولوژیک رودخانه شهرچای ارومیه، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۵۷: ۶۲-۴۹

بیاتی خطیبی، م. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات پیچان‌رود آجی‌چای در پهنه سیلاب دشت، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۴۹: ۷۹-۵۵.

حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر. (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، مفاهیم، اشکال و فرایندها، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.

عاشوری، م.؛ رضایی مقدم، م. ح. و پیری، ز. (۱۳۹۲). بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه پیش و پس از احداث سد با استفاده از HEC RAS و GIS (مطالعه موردی: منطقه پایین‌دست سد ستارخان اهر)، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۵(۱): ۸۷-۱۰.

یمانی، م.؛ رحیمی، م. و ویسی، ع. (۱۳۹۴). مورفومتری و مقایسه تغییرات عرضی رودخانه ارس طی سه دهه اخیر (مطالعه موردی: پایین‌دست سد میل مغان)، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۴: ۷۴-۸۹.

Adib, A.; Foladfar, H. and Roozy, A. (2016). Role of construction of large dams on river morphology (case study: the Karkheh dam in Iran), *Arab J. Geosci*, 9: 661, 1-16.

Asghari Saraskanroud, S. (2016). Investigation the Potential of Morphological Change Urmia Shahrchi River, *Journal of Geography and planning*, 57: 49-62.

Ashouri, M.; Rezaei Moghaddam, M.H. and Piry, Z. (2013). Morphologic Change Assessment of Riverbed Before and after Dam Construction Using HEC RAS Modeland GIS (Case Study: Downstream of SatarkhanDam), *Physical Geography research Quarterly*, 45(1): 87-100.

Bayati Khatibi, M. (2014). Investigation on Aji-Chay River Meander Changes on Flood Plain, *Journal of Geography and planning*, 49: 55-79.

Casado, A.; Peiry, J.L. and Campo, A.M. (2016). Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina, *Geomorphology*, 268: 21-34.

Csiki, S.Jc. and Rhoads, B.L. (2014). Influence of four run-of-river dams on channel morphology and sediment characteristics in Illinois, USA, *Geomorphology*, 206: 215-229.

Lagasse, P.F.; Zevenbergen, L.W.; Spitz, W.J., and Thorne, C.R. (2004). Methodology for Predicting Channel Migration. NCHRP Web-Only Document 67 (Project 24-16), *National Cooperative Highway Research Program*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Legleiter, C.J. (2015). Downstream effects of recent reservoir development on the morphodynamics of a meandering channel: Savery Creek, Wyoming, USA, *River Research & Applications*, 31(10): 1328-1343.

Hosseinzadeh, M.M. and Esmaili, R. (2016). *Fluvial geomorphology, concepts, forms and processes*, Tehran: Shahid Beheshti University publication.

- Hooke, J.M. (1980). Magnitude and distribution of rates of river bank erosion, *Earth Surface Processes*, 5: 143-157.
- Hooke, J.M. (2013). *River Meandering*, Treatise on Geomorphology, pp. 260-288.
- Magdaleno, F. and Fernández-Yuste, J.A. (2011). Meander dynamics in a changing river corridor, *Geomorphology*, 130: 197-207.
- Morais, E.S.; Rocha, P.C. and Hooke, J. (2016). Spatiotemporal variations in channel changes caused by cumulative factors in a meandering river: The lower Peixe River, Brazil, *Geomorphology*, 273: 348-360.
- Ollero, A. (2010). Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain, *Geomorphology*, 117: 247-260.
- Pal, S. (2016). Impact of Massanjore Dam on hydro-geomorphological modification of Mayurakshi River, *Eastern India, Environ Dev Sustain*, 18: 921-944.
- Shields, JR. F.D.; Simon, A. and Steffen, L.G. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration, *Environmental Conservation*, 27(1): 54-66.
- Yamani, M.; Rahimi, M. and Veisi, A. (2015). Morphometry and compare changes across the Aras River during the last three decades (case study: downstream Mil dam of Moghan), *Journal of Quantitative Geomorphological researches*, 3(4): 74-89.
- Yao, Z.; Xiao, J.; Ta, W. and Jia, X. (2013). Planform channel dynamics along the Ningxia° Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008: analysis using Landsat images and topographic maps, *Environ Earth Sci*, 70: 97-106.
- Yousefi, S.; Pourghasemi, H.R.; Hooke, J.; Navartil, O. and Kidov'a, A. (2016). Changes in morphometric meander parameters identified on the Karoon River, Iran, using remote sensing data, *Geomorphology*, 271: 55-64.