

مدل‌سازی تغییرات فرسایش و رسوب رودخانه سجاسرود قبل و بعد از ساخت سد گلابر با روش GCD

حسن مظفری - دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.
صیاد اصغری سراسکانرود* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.
فریبا اسفندیاری درآباد - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده

امروزه از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای در زمینه‌های مختلف برای رصد و کشف تغییرات پدیده‌های مختلف ژئومورفولوژی استفاده می‌شود. در همین راستا با هدف تعیین و تبیین تاثیر سد گلابر بر مورفولوژی و میزان فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه سجاسرود در پایین‌دست، از مدل GCD استفاده گردید. داده‌های این مدل از طرق مختلف قابل حصول است. در این مقاله مدل‌های رقومی ارتفاعی سری زمانی، از تصاویر ماهواره‌ای استر سری LIA و LIB برای مدل GCD تهیه گردید. پس از تهیه DEM‌های تاریخی مورد نیاز، مدل با سه روش حداقل سطح تشخیص، مدل خط‌های انتشار یافته و تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک‌فاصله اطمینان توسط کاربر، در محیط نرم افزار ARCGIS و الحاقیه GCD اجرا گردید. خروجی روش‌های سه‌گانه مدل نشان داد، در تمام طول دوره مطالعه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ فرایند رسوب‌گذاری در بستر رودخانه بر فرایند فرسایش غلبه داشته است. از طرفی بعد از بهره‌برداری از سد، ضمن کاهش کلی نرخ فرسایش و رسوب در پایین‌دست سد، خروجی مدل GCD در هر سه روش و نمودارهای رواناب سری زمانی، حاکی از کاهش معنادار میزان فرسایش در بستر رودخانه دارد. با کاهش قدرت حمل بار رسوب و فرسایش رودخانه در بخشهایی از مسیرش با جابجایی مواجه شده است. همچنین میانگین درصد تغییرات اختلاف حجم خالص در رودخانه از ۱۹٪ در صد قبل از ساخت سد تا ۵۰٪ در صد بعد از ساخت سد برای مدل‌های مختلف در نوسان است. همچنین نتایج حاصل از محاسبات برخی از پارامترهای مورفومتری رودخانه ضمن تایید صحت خروجی مدل GCD نشان می‌دهند میانگین کلی اکثر پارامترها مانند تعداد پیچان‌رودها، طول کانال، ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی در دوره بعد از بهره‌برداری از سد کاهش یافته است و رودخانه از حالت الگوی پیچان‌رودی توسعه یافته به الگوهای پیچان‌رودی توسعه نیافته و شبه توسعه یافته تغییر شکل داده است.

واژگان کلیدی: *DOD, GCD, DEM* رسوب‌گذاری، فرسایش، مورفومتر

مقدمه

در نواحی نیمه‌خشک، تأثیرات ژئومورفولوژیکی سدها بسیار شاخص است. این ساختارهای دست‌ساز انسانی، با وجود مزایایی که در تنظیم جریان رودخانه‌ها و کاستن از بزرگی و فرکانس وقوع سیلاب‌ها دارند، رژیم‌های مصنوعی از جریان آب در پایاب رودخانه‌ها پدید می‌آورند و در مسیر انتقال رسوبات از سراب‌ها، آشفته‌گی‌هایی ایجاد می‌کنند. تغییرات در عملکرد فرایندهای ژئومورفولوژیکی، مانند افزایش زمین‌لغزش‌ها، به عمق رفتن بستر جریان و تغییر در آرایش جریان رودخانه‌ها سبب تغییر در فرایندهای فرسایشی، نهشته‌گذاری در بالادست و پایین‌دست رودخانه می‌شود (بیاتی و همکاران، ۱۳۸۸). نتایج بررسی‌هایی که در محدوده‌های مختلف صورت گرفته است، نشان می‌دهد که تغییرات ناشی از احداث سدها در بخش‌های مختلف دنیا بسیار درخور اهمیت بوده است، اما مقایسه تغییرات رخ داده در قسمت‌های مختلف حاکمی از این است که پیامدهای ناشی از احداث سازه‌های آبی در محدوده‌های نیمه‌خشک، به مراتب بیشتر از سایر مناطق است (لورانگ^۱ و اگت^۲، ۲۰۰۵؛ کروپ^۳، ۲۰۰۵؛ کارسلن^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). در حوضه‌های زهکشی مناطق نیمه‌خشک، به علت واکنش‌های زمانی کوتاه‌مدت رودخانه‌ها برای انطباق با شرایط جدید، تغییرات در بستر رودخانه‌ها سریع بوده است از نظر تغییرات جریان و رسوب رودخانه‌ها، سدها اغلب به‌عنوان اصلی‌ترین نوع تأثیر انسان بر سیستم‌های رودخانه‌ای شناخته می‌شوند. سدها می‌توانند جریان آب و رسوبات را کاهش دهند که منجر به تغییراتی در کانال‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه می‌شود. بر روی بیشتر رودخانه‌های نیم‌کره شمالی سد بسته شده است که خطر قابل توجهی اکوسیستم‌های این رودخانه‌ها را تهدید می‌کند (مارکینکو سکی^۵ و گریگروک^۶، ۲۰۱۷). بنا به گزارش‌ها تأثیر سدها بر سیستم‌های رودخانه‌ای چندین برابر بیشتر از تأثیر تغییرات آب و هوایی است (گراف^۷، ۱۹۹۹). رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌های جهان به‌طور قابل توجهی به واسطه ساخت سد دچار تغییر و دگرگونی شده است (جان^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به اینکه ۸۵٪ کل رودخانه‌ها توسط سدها کنترل و تقسیم شده‌اند (نایمن^۹ و دکامپس^{۱۰}، ۱۹۹۷). با این حال اثرات هیدرولوژیکی پایین‌دست سدها قابل توجه و مستقیم هستند به‌عنوان مثال، مشخص شده است که سدها حداکثر دبی و تنوع جریان را کاهش می‌دهند، درحالی‌که می‌توانند حداقل دبی را افزایش داده و جریان آب را در مناطق مختلف آب و هوایی همگن کنند (ماگیلیگان^{۱۱} و نیسلوو^{۱۲}، ۲۰۰۱). در مناطق خشک، سدها برای تنظیم تخلیه جهت اطمینان از تأمین آب ساخته شده‌اند (دادجن^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۶). از طرف دیگر، سدها از طریق کنترل رودخانه‌های طغیانی و خطرناک مانع از سیلاب در پایین‌دست می‌شوند (داینیئو شز^{۱۴} و نیلسون^{۱۵}، ۱۹۹۴). ساخت سد اغلب منجر به دام انداختن رسوب در بالادست و کاهش رسوب در پایین‌دست، تأثیر بر روی زیستگاه

¹ -Lorang

² -Agget

³ -Korup

⁴ -Karslan

⁵ - Marcinkowski

⁶ - Grygoruk

⁷ - Graf

⁸ - Zhang

⁹ - Naiman

¹⁰ - Decamps

¹¹ - Magilligan

¹² - Nislow

¹³ - Dudgeon

¹⁴ - Dynesius

¹⁵ - Nilsson

آبزیان، تخم‌ریزی و مهاجرت آن‌ها می‌شود (موریس^۱ و استانفورد^۲، ۲۰۱۱). مطالعات نشان داده است که سدهای رودخانه‌ای می‌توانند رسوب، مواد مغذی و مواد آلی ورودی به پایین‌دست را کاهش دهند و خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های ساحلی را تغییر دهند (ادایر^۳ و همکاران، ۲۰۰۴؛ کانز^۴ و دیگران، ۲۰۱۱).

رودخانه‌ها دارای الگوهای متفاوتی از جریان هستند. رودخانه‌های مستقیم و رودخانه‌های تک مجرای هستند و رودخانه‌های شریانی و رودخانه‌های با مجاری به هم پیوسته، رودخانه‌های با الگوی چند مجرای هستند (ضای مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). رژیم رودخانه عبارت است از الگوی مورد انتظار برای جریان رودخانه در طی یک سال. رژیم یک رودخانه مستقیماً به عوامل اقلیمی که رواناب حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهند بستگی دارد. بنابراین با شناخت اقلیم هر منطقه می‌توان رژیم رودخانه‌های جاری در آن منطقه را تخمین زد. جریان آب در رودخانه‌ها از نظر فرم جریان، منابع تغذیه‌کننده آن‌ها، شرایط فیزیوگرافی حوضه و اقلیمی که حوضه رودخانه مورد نظر در آن قرار گرفته است متغیر می‌باشد. به‌طور کلی رژیم جریان آب در رودخانه‌ها به دودسته فصلی و دائمی تقسیم می‌شود. دلیل تنوع زیاد الگوهای کانال رودخانه چیست؟ عواملی که بر تکامل کانال رودخانه تأثیر می‌گذارند، کدامند؟ این سؤالات برای مدت طولانی ژئومورفولوژیست‌های رودخانه‌ای و مهندسان رودخانه را با مشکل مواجه کرده است، از این رو تعداد زیادی از تحقیقات محققین به این موضوع اختصاص یافته است (اسلاویک^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). بسیاری از مسیرهای رودخانه‌ای تحت تغییر در مقدار جریان و انتقال رسوب قرار می‌گیرند. این تغییرات ممکن است از ویژگی‌های طبیعی یک رژیم هیدرولوژیکی باشد و می‌تواند با ویژگی چرخه‌ای (فصلی) مشخص شود. با این حال، در بسیاری از موارد چنین تغییراتی ناشی از اقدامات انسانی مانند بستن سد، استخراج شن و ماسه و ساخت کانال‌های زهکشی یا آبیاری است (سورین^۶، ۱۹۹۹؛ پتس^۷ و گارنل^۸، ۲۰۰۵؛ دیوید^۹ و همکاران، ۲۰۱۶). بستن سد روی رودخانه‌ها منجر به تغییراتی شد که در گذشته سابقه نداشته است. بیشترین تغییرات مکرر ناشی از بسته شدن سد، کاهش مقدار جریان و تخلیه اوج، حذف رسوبات در پایین‌دست و برش بستر است (ویلیامز^{۱۰} و ولمن^{۱۱}، ۱۹۸۴؛ گرانت^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۳). این تغییرات بر زندگی جوامع وابسته به منابع رودخانه (نووین^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۶؛ لاتروبسس^{۱۴}، ۲۰۱۷؛ همکاران، ۲۰۲۱) و وجود زیستگاه ماهیان تأثیر می‌گذارد (پاش^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۵). ساخت سدهای بیشتر، بر زندگی مردم در کشورهای در حال توسعه تأثیر خواهد گذاشت (کاتله^{۱۶} و همکاران، ۲۰۲۰). کمبود و فقدان رسوبات ناشی از بسته شدن سد بر رسوب‌گذاری در سواحل و دلتاها تأثیرگذار است (کاندلف و همکاران، ۲۰۱۴). در زمینه تأثیر ساخت سد بر هیدروژئومورفولوژی رودخانه‌ها پژوهش‌های زیادی

¹ -Morris

² -Stanford

³ -Adair

⁴ -Kunz

⁵ -Slowik

⁶ -Surian

⁷ -Petts

⁸ -Gurnell

⁹ -David

¹⁰ -Williams

¹¹ -Wolman

¹² -Grant

¹³ -Nguyen

¹⁴ -Latrubesse

¹⁵ -Pash

¹⁶ -Gutler

از جمله (اسمیت^۱ و مهرگ^۲، ۲۰۱۷؛ سانویل^۳، ۲۰۱۷؛ کوکچیارو^۴ و همکاران، ۲۰۱۹) در مجامع علمی دنیا انجام گرفته است که همه این پژوهشگران به تأثیر سد در مورفولوژی بستر رودخانه اذعان نمودند. در ایران نیز مطالعات متعددی در همین زمینه انجام شده است که از جمله می‌توان به تحقیقات (فصاحت و همکاران، ۱۳۹۳؛ نیری، ۱۳۹۴؛ آذرنگ و همکاران، ۱۳۹۵؛ شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ طیبی و همکاران، ۱۳۹۷) اشاره نمود که به تأثیرات سد در مورفولوژی و دبی رودخانه‌ها و همچنین به تغییرات کاربری و فرسایش و رسوب در بستر رودخانه پرداخته‌اند

در زمینه استفاده از مدل GCD در ژئومورفولوژی ویتون و همکاران (۲۰۰۹) تغییرات ژئومورفولوژی رودخانه فشی در اسکاتلند با مدل GCD و روش استنتاج فازی بررسی و تحلیل نمودند. فاوالی^۵ و همکاران (۲۰۱۰) از طریق تصاویر لیدار تغییرات ناشی از جریان گدازه کوه آتش فشانی آتنا در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز از طریق مدل GCD رصد کرده و تغییرات حجمی و مساحتی آن را محاسبه نمودند. در پژوهشی دیگری جیمز^۶ و همکاران (۲۰۱۱) آشکار سازی تغییرات گالی ها و رودخانه‌ها را با استفاده از نقشه‌های تاریخی و تفاوت DEM با مدل GCD انجام دادند. در تحقیقی دیگر ویلیامز^۷ (۲۰۱۲) رویکرد تولید DEM و رفع خطاهای آن از طریق آماری را جهت تولید DOD مناسب و برآورد نرخ تغییرات فرسایش و رسوب را با یک مثال تشریح کرده است. کروک^۸ و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات فاجعه‌بار سیل کوئینزلند استرالیا را از طریق تصاویر لیدار از نظر نرخ رسوب‌گذاری و فرسایش در سال ۲۰۱۱ از طریق مدل GCD و DOD محاسبه کردند. اورم^۹ و پلتیر^{۱۰} (۲۰۱۵) تأثیر آتش‌سوزی سال ۲۰۱۱ لاس کانکوس واقع در کوه‌های جیمز ایالت نیومکزیکو در میزان نرخ فرسایش و رسوب را بررسی کردند. آن‌ها توسط اسکنر لیزی زمینی DEM دو زمانه مربوط به دو حوضه منتخب را تولید کردند و از طریق DOD تغییرات حجمی فرسایش و رسوب را به دست آوردند. در پژوهش دیگری کاوالی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی فرسایش و رسوب در حوضه‌های کوهستانی (گادریا^{۱۲}، استرم^{۱۳} و دره ونوستا^{۱۴}) واقع در آلپ شرقی ایتالیا را از طریق DOD حاصل از مدل DTM انجام دادند. کالیراج^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۷) تحلیل تغییرات حجمی در سواحل جنوب غربی کانیاکومری، واقع در جنوب کشور هند را انجام دادند. آن‌ها ابتدا نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه را ترسیم کردند. سپس با تولید DEM از تصاویر استر و SRTM از طریق مدل GCD تغییرات رسوب و فرسایش هر یک از لند فرم‌ها را مشخص نمودند. اگر و همکاران (۲۰۱۸) فرسایش خاک ناشی از بارش‌های سیل‌آسا در منطقه آندلس اسپانیا بین دو دوره زمانی را از طریق مدل GCD و لیدار بررسی و تحلیل نمودند و تغییرات ژئومورفولوژی ناشی از بارش‌ها را محاسبه نمودند. در مطالعه دیگری اگر^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۸) باز با استفاده از پهباد و روش DOD عمق و حجم برف در دره دیشمای کشور سوئیس را برآورد و محاسبه کردند. شیانگ^{۱۷} و

1 -Smith

2 -Mohrig

3 -Sanyal

4 -Cucchiario

5 -Wheaton

6 -James

7 -Williams

8 -Croke

9 -Orem

10 -Pelletier

11 -Cavalli

12 - Gatria

13 - Strimm

14 - Venosta

15 -Kaliraj

16 -Eker

17 - Xiang

همکاران (۲۰۱۸) از طریق DEM های چند زمانه حاصل از تصویربرداری با پهپاد تغییرات ناشی از استخراج معدن را تحلیل نمودند.

در طول دهه گذشته پیشرفت‌های سریع در توسعه فناوری ژئوماتیک و تکنیک‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای، ژئومورفولوژیست‌ها را قادر ساخته تا بتوانند به مدل‌های دقیق رقومی ارتفاعی در زمان‌های مختلف دست‌یافته و تغییرات ژئومورفولوژی را رصد و بررسی کنند (فاوالی^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). در این راستا قدرت تفکیک مکانی تصاویر این امکان را فراهم می‌آورد که تغییرات مورفولوژیک به‌طور مستقیم به مشاهدات مبتنی بر فرآیند ربط داده شوند. علاوه بر این تکنیک‌های جدید پردازش تصاویر ماهواره‌ای پتانسیل لازم برای تولید DEM از تصاویر زمان‌های مختلف را فراهم کرده است (براسینگتن^۲ و همکاران، ۲۰۱۲؛ میلان^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). این امر بینش تغییرات ژئومورفولوژی را به‌طور مستقیم به مشاهدات مبتنی بر فرآیند، امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین این امر فرصتی را فراهم می‌آورد تا مقیاس‌های زمانی تحقیق (سری‌های زمانی تحقیق) را با استفاده از اطلاعات مجموعه‌های تاریخی تصاویر ماهواره‌ای گسترش دهد. و بر اساس شناخت و دانش، از پدیده‌های ژئومورفولوژی دوره‌های زمانی مورد مطالعه، عواملی که موجب تغییرات ژئومورفولوژیک در مدل‌های رقومی ارتفاعی چند زمانه می‌شوند، بهتر شناسایی و استنتاج شوند (ویتون^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). شناسایی تغییرات ریخت‌شناسی و فرایندهای ژئومورفولوژی از طریق DEM های سری زمانی را جیمز^۵ و همکاران، (۲۰۱۱) مطرح نمودند. در همین زمینه (برایسینگتن و همکاران، ۲۰۰۳؛ لین^۶ و همکاران، ۲۰۰۳؛ ویتون و همکاران، ۲۰۰۹) مدل GCD را از طریق تفاضل پیکسلی دو DEM سری زمانی اجرا کردند و بر اهمیت ارزیابی عدم قطعیت و خطای انتشار جهت به دست آوردن یک نقشه مطمئن از DOD^۷ تأکید کرده‌اند. بنابراین مدل GCD یک مدل کارآمد برای سنجش تغییرات کوتاه‌مدت تا درازمدت پدیده‌های مختلف ژئومورفولوژیکی ناشی از فرایندها و فعالیت‌های طبیعی و انسانی است. هدف این تحقیق نیز استفاده از این مدل و پارامترهای مورفومتری رودخانه برای سنجش و برآورد میزان اثرگذاری سد گلابر شهرستان ایجرود در پایین دست سد بر روی رودخانه سجاسرود از لحاظ تغییرات حجم و مساحت نرخ فرسایش و رسوب در بستر رودخانه است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سجاسرود در شمال غرب ایران، جنوب استان زنجان، بین عرض‌های ۳۶ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی، طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). بر اساس مطالعات انجام‌شده حدود ۲۴۹۴ کیلومتر مربع وسعت دارد که ۱۲۹۸ کیلومتر مربع آن را نهشته‌های آبرفتی و بقیه را ارتفاعات تشکیل داده‌اند. در این حوضه آبریز دشت‌ها به‌صورت تپه‌ماهوری و دره‌ای و ناهموار هستند که توسط ارتفاعات بلند و یا نهشته‌های پلیوپلئوستوسن کم ارتفاع از هم جدا می‌شوند. رودخانه سجاسرود از سمت شرق و از دشت مزید آباد سرچشمه گرفته و با روند شرقی - غربی پس از عبور از شهر سجاس در پایاب روستای ینگگی کند به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد این محدوده، با ارتفاع متوسط ۱۶۵۰ متر، از غرب به کوه‌های ماه‌نشان از شمال به کوه‌های سلطانیه و از جنوب به کوه‌های قیدار محدود است. پست‌ترین نقطه، با ارتفاع ۱۴۰۶ متر در محل تلاقی سجاسرود به رودخانه قزل‌اوزن و

¹ -Favalli

² -Brasington

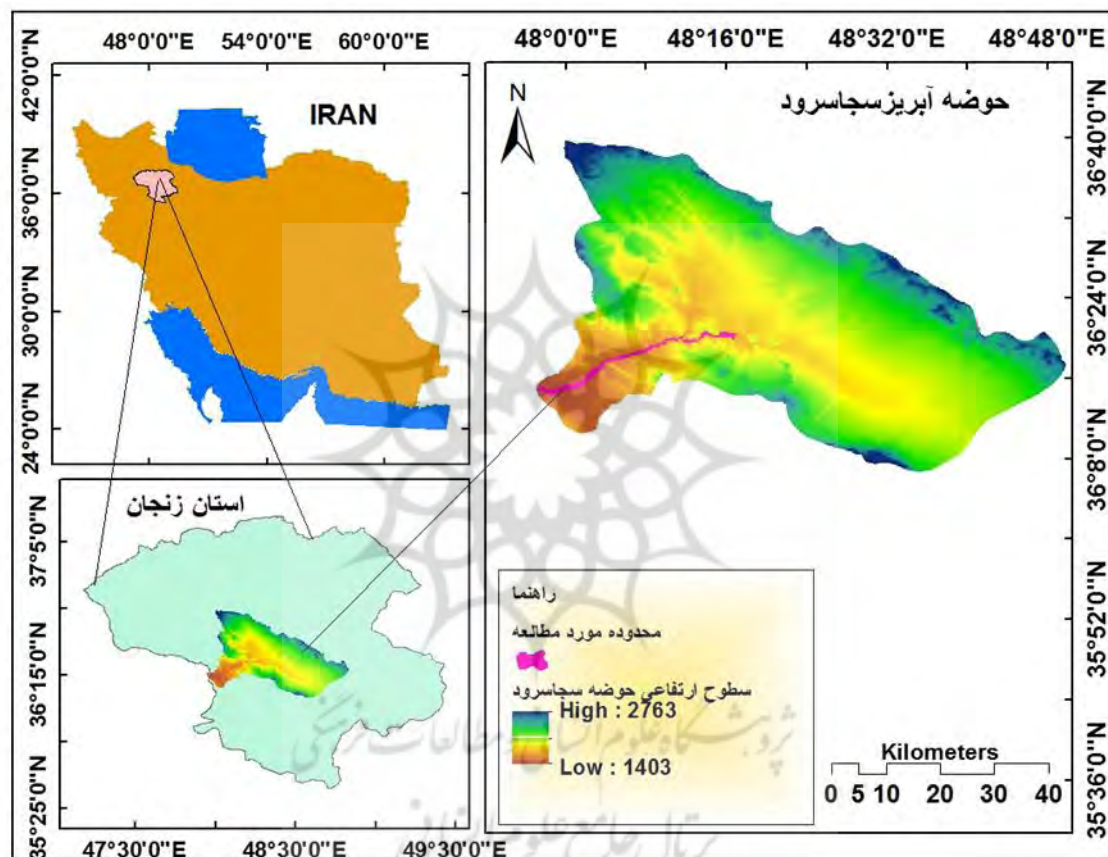
³ -Milan

⁴ -Wheaton

⁵ -James

⁶ -Lane

مرتفع‌ترین نقطه به ارتفاع ۲۶۰۰ متر در جنوب منطقه قرار دارد. مهم‌ترین مرکز مسکونی در این منطقه شهر سجاسرود و زرین‌آباد با ارتفاع ۱۷۴۰ و ۱۷۳۹ متری از سطح دریا در قسمت میانی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه و جنوب و جنوب غربی استان زنجان قرار دارد میانگین درجه حرارت سالانه در ایستگاه باران سنجی حلب شکل (۱) واقع در جنوب غربی حوضه آبریز سجاسرود با ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد (برای دوره‌ی آماری ۱۹ ساله) است. متوسط بارندگی سالیانه در این ایستگاه ۳۹۰/۹۲ میلی‌متر است. بیشترین بارش در فروردین‌ماه با میزان ۶۷/۶ و کمترین میزان آن در شهریور به میزان ۲/۱ میلی‌متر رخ داده است. نوع اقلیم حوضه آبریز بر اساس مدل دمارتن نیمه‌خشک و آمبرژه نیمه‌خشک سرد است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵، ص ۲۲).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

برای انجام این تحقیق از تصاویر استر سری L1A و L1B، سامانه گوگل ارث انجین، زبان برنامه‌نویسی R، نقشه‌های توپوگرافی ۵۰ هزار سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تصاویر ماهواره‌ای لندست، مدل رقومی ارتفاعی ALOS، دستگاه GPS گارمین، نرم‌افزار ARCGIS، نرم‌افزار و الحاقیه GCD، نرم‌افزار انوی ۵/۳، اکسل، ARCGIS PRO، AutoCAD، QGIS و بازید میدانی استفاده گردید. این پژوهش به دو روش GCD و مورفومتری کانال رودخانه انجام روش تحقیق از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت پیمایشی و تحلیلی است. برای اجرای مدل GCD و تعیین اثرگذاری سد گلابر در پایین دست رودخانه سجاسرود مراحل زیر (شکل ۲) به ترتیب انجام شد.



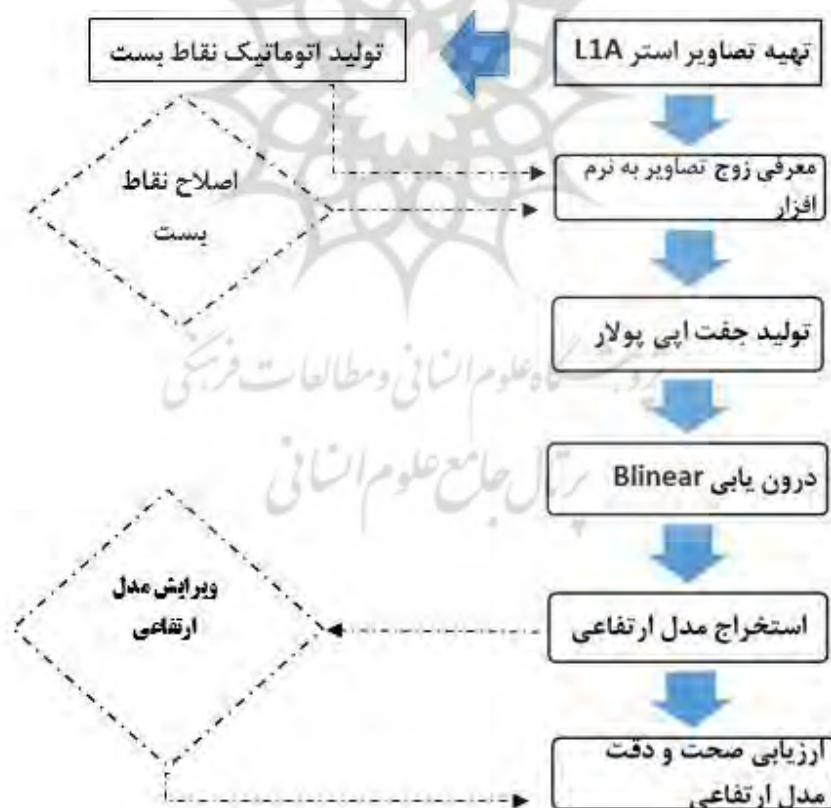
شکل ۲: فلوچارت مراحل کلی انجام تحقیق با مدل GCD

جهت تهیه DEM موردنیاز برای اجرای مدل GCD از تصاویر باندهای مادون قرمز نزدیک زوج استریو 3N,3B سری L1A و L1B استر با مشخصات و تاریخ‌های اشاره شده در جدول (۱) استفاده گردید.

جدول ۱: مشخصات زوج تصویر در نظر گرفته شده برای استخراج مدل رقومی ارتفاع

محدوده طیفی	سیستم تصویر	بیضوی مبنا	قدرت تفکیک (متر)	تاریخ اخذ تصویر
3N(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۸۲/۰۶/۲۷
3B(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۸۲/۰۶/۲۷
3N (0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۸۶/۰۴/۱۳
3B(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۸۶/۰۴/۱۳
3N(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۹۲/۰۵/۰۵
3B(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۹۲/۰۵/۰۵
3N(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۹۸/۰۵/۳۱
3B(0.78–0.86 μm)	UTM, Zone north, ۳۹	WGS84	۱۵	۱۳۹۸/۰۵/۳۱

پردازش‌های موردنیاز جهت تولید مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام گرفت. برای این منظور از تکنیک‌های خودکار انطباق تصویر که به‌طور معمول شامل جمع‌آوری نقاط کنترل زمینی (Ground Control Point) و تعیین ارزش پارالاکس برای هر پیکسل با کل تصویر است، استفاده شد. دو روش برای انطباق تصاویر زوج استریو استفاده می‌شود در روش اول با استفاده از نقاط کنترل زمینی بین دو تصویر چپ (3B) و راست (3N) انطباق صورت می‌گیرد. خروجی نهایی مدل رقومی ارتفاع مطلق خواهد بود. تمام نقاط به یک نقطه مرجع زمینی ارجاع داده می‌شوند. در این روش نقاط کنترل زمینی توسط کاربر با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و یا موقعیت‌یاب زمینی تهیه می‌گردد. روش دوم اگر انطباق بین دو تصویر تنها با استفاده از نقاط بست (Tie Point) صورت گرفته باشد خروجی به‌صورت مدل رقومی ارتفاع نسبی خواهد بود و نقاط به کم ارتفاع‌ترین نقطه موجود در تصویر ارجاع داده می‌شوند. مدل رقومی ارتفاع بر اساس اصول فتوگرامتری هم خطی استخراج می‌شود. در ابتدا زوج تصویر در یک نقطه مشترک منطبق می‌شوند. این عمل توسط نقاط کنترل زمینی با نقاط بست صورت می‌گیرد فرض بر این است که هرگونه اختلاف موقعیتی در امتداد مسیر حرکت ماهواره به علت پارالاکس است. اختلاف پارالاکس اندازه‌گیری شده همراه با اطلاعات مداری ماهواره (موقعیت مداری، ارتفاع مداری، به ارتفاع مطلق یا نسبی تبدیل می‌گردد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۰). در این تحقیق از روش دوم که به‌صورت اتوماتیک نقاط بست دو تصویر برهم منطبق می‌شوند، استفاده گردید. مراحل تولید اتوماتیک DEM به ترتیب طبق (شکل ۳) در محیط نرم‌افزار envi 5.3 در چندین گام انجام گردید.



شکل ۳: فلوچارت تولید DEM از تصاویر زوج استریو ماهواره استر در نرم‌افزار انوی

DEM های تولیدشده برای سال‌های قبل و بعد ساخت سد، دارای خطاهای جزئی هندسی و ارتفاعی بود که باید قبل از تولید DOD اصلاح می‌شدند. مرحله اول اصلاح در زمان تولید DEM در نرم‌افزار ENVI انجام گرفت. مرحله دوم در نرم‌افزار ARCGIS و از طریق روش‌های درونیابی نسبت به حذف خطاهای ارتفاعی اقدام گردید و مرحله سوم در پردازش نهایی DEM ها توسط الحاقیه GCD انجام شد. برای اطمینان از دقت مدل‌های رقومی چند زمانه از طریق زبان برنامه‌نویسی R و کتابخانه Metrics میزان خطای آن‌ها محاسبه گردید. برای محاسبه میزان خطاها ابتدا از طریق بازدید میدانی با استفاده از دستگاه GPS از کل مسیر ۵۰ نقطه از بستر رودخانه (شکل ۴) جی‌پی‌اس زده شد و نقاط ارتفاعی ثبت گردید. سپس با ابزار **Extract Multi Values to Points** ارزش پیکسلی DEM های چهارگانه با استفاده از نقاط ارتفاعی حاصل از دستگاه GPS استخراج گردید. پس از تولید فایل اکسل جدول اطلاعاتی در ARCGIS این جدول وارد محیط زبان برنامه‌نویسی R گردید و خطاهای موردنیاز جهت بررسی میزان صحت و دقت DEM ها شامل انحراف مطلق میانگین (MAD)، مجذور خطای میانگین (MSE) مجذور خطای ریشه دوم میانگین (RMSE)، درصد خطای مطلق میانگین (MAPE) با استفاده از کتابخانه METRICE جدول (۲) محاسبه گردید.



شکل ۴: برداشت نقاط ارتفاعی بستر رودخانه با دستگاه GPS

جدول ۲: سنجش میزان دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی چهارگانه ماهواره استر

DEM سال	DEM2003	DEM2007	DEM2013	DEM2019
MAD ^۱	۰/۸۵	۱/۰۶	۱/۰۵	۱/۰۹
MSE ^۲	۱/۳۴	۱/۹۳	۱/۸۶	۱/۸۹
RMSE ^۳	۱/۱۶	۱/۳۹	۱/۳۶	۱/۳۷
MAPE ^۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۶۶

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n}$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n} \times 100$$

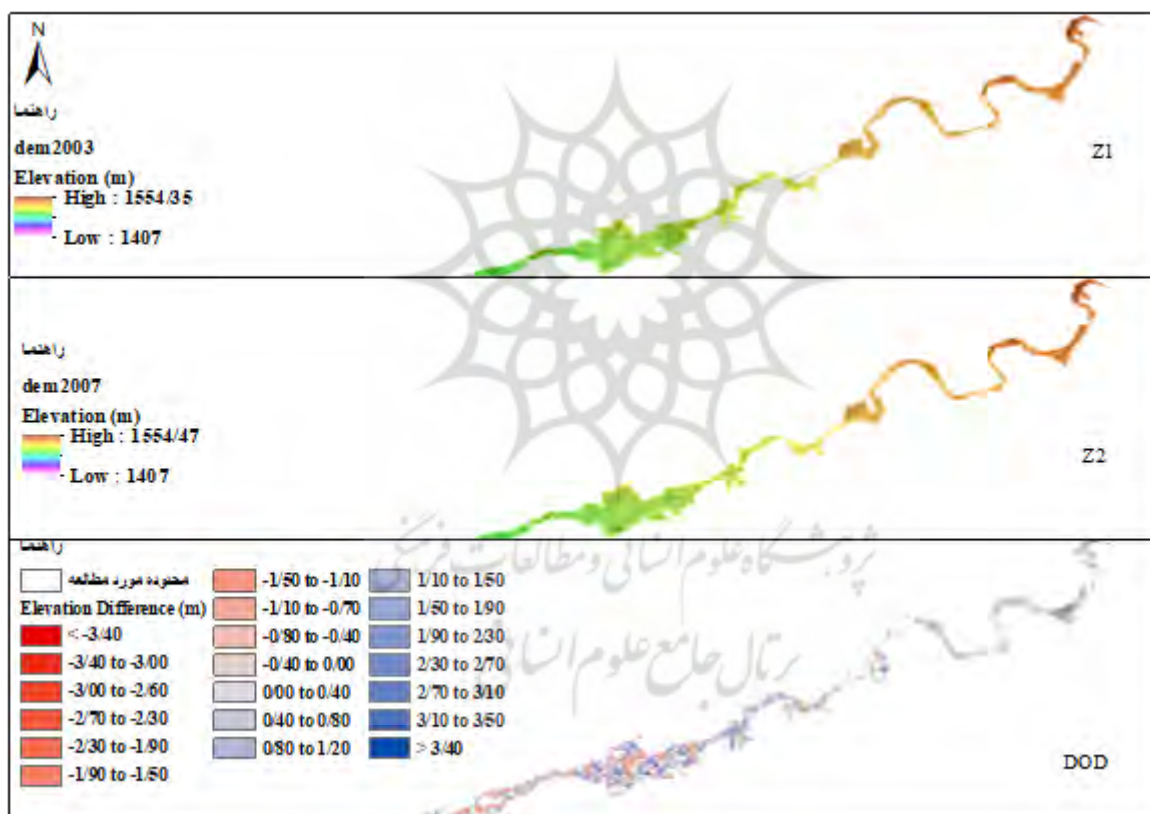
¹ - Mean-Absolute Deviation

² - Mean Squared Error

³ - Root Mean Squared Error

⁴ - Mean Absolute Percent Error

در بررسی و برآورد میزان فرسایش و رسوب به صورت میدانی و با استفاده از مدل‌های کمی به علت اینکه به صورت مقطعی در بخش‌های کوچکی از رودخانه داده‌ها، مواد اولیه و بررسی‌های میدانی انجام می‌گیرد و سپس نتایج حاصل به کل رودخانه تعمیم داده می‌شود، با توجه به پیچیدگی‌های موجود در طول بستر رودخانه از لحاظ تغییرات ژئومورفیک، عدم قطعیت‌های بزرگی را به وجود خواهد آورد. دانشمندان ژئومورفولوژی جهان برای ایجاد دید سیستمی و کل‌نگری در تغییرات ژئومورفولوژی رودخانه رویکرد جدیدی بنام (DOD) را دنبال می‌کنند. این متد به علت اینکه تغییرات را در کل مسیر رودخانه با دید همه‌جانبه رصد می‌کند، حائز اهمیت است. DOD حاصل تفاضل دو یا چند DEM تهیه‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، پهپاد و پردازش‌های زمینی از طریق (GPS) و سایر روش‌ها است که دید ترکیبی به دست می‌دهد. رویکرد DoD نقشه رقومی ارتفاعی زمان اول (شکل ۵) را از نقشه رقومی ارتفاعی زمان بعدی کم می‌کند (ویتون و همکاران، ۲۰۰۹). در مدل GCD به تغییرات حجمی بیشتر توجه می‌شود که در آن دو DEM که یک مختصات هندسی مشابه دارند از یکدیگر تفریق می‌شوند تا یک موزاییک از تغییرات ژئومورفولوژیکی را نشان دهند:



شکل ۵: یک نمونه DOD حاصل از اجرای مدل GCD بر اساس روش حداقل سطح تشخیص برای مدل‌های رقومی ارتفاعی

۲۰۰۳-۲۰۰۷

$$\delta E = Z_2 - Z_1 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن δE تغییرات ارتفاعی را نشان می‌دهد، Z_2 مدل رقومی ارتفاعی جدید و Z_1 مدل رقومی ارتفاعی قدیمی است. مجموع تغییر کل در DOD (δE) کل تغییرات حجمی بین دو دوره را نشان می‌دهد. مقادیر منفی و مثبت روی یک نقشه

DOD شکل (۵) به ترتیب فرسایش و رسوب را نشان می‌دهد. کاربرد معادله (۱) فرض می‌کند که هر دو DEM نماینده واقعی اشکال ژئومورفولوژی هستند (ویلیامز^۱، ۲۰۱۲). ولی همیشه رابطه (۱) نمی‌تواند بدون خطا باشد این مشکل زمانی که به صورت میدانی و آزمایشگاهی صحت سنجی شود، احتمالاً حاوی مؤلفه‌های خطای عمودی رابطه (۲)، δz است (ویتون^۲ و همکاران، ۲۰۰۹):

$$Z_{Actual} = Z_{DEM} \pm \delta z \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن Z_{Actual} مقدار ارتفاع حقیقی است. بنابراین لازم است که آنالیز خطا انجام شود تا مطمئن شویم که یک DOD قابل‌اعتماد است (ویلیامز، ۲۰۱۲). ولی در مدل‌های رقومی ارتفاعی چند زمانه تاریخی در مدل GCD چندین روش برای کاهش خطاهای DOD در نظر گرفته شده است که در این پژوهش از سه روش به شرح ذیل استفاده گردید.

الف) حداقل سطح تشخیص (Minimum Level of Detection)

برای کمی‌سازی خطا در DEM ها، ما فرض می‌شود که خطاهای سلول‌های شبکه‌ای از توزیع نرمالی با میانگین صفر تبعیت می‌کنند. لذا، خطای کلی DEM را می‌توان با انحراف استاندارد^۳ بیان کرد. هاس^۴ و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که عدم قطعیت تکرار شده (δ_{DOD}) در DoD را می‌توان با استفاده از یک تکرار خطای گاوسی^۵ محاسبه کرد:

$$\delta_{DOD} = \sqrt{(\delta z_{NEW})^2 + (\delta z_{OLD})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن δz_{new} و δz_{old} به ترتیب خطاهای جداگانه در DEM_{new} و DEM_{old} هستند. در این فرمول فرض می‌شود که عدم قطعیت DoD از نظر فضایی یکنواخت است و این فرض برآورد خطای حجم کلی تمام n سلول شبکه‌ای با اندازه سلول C در DoD را ممکن می‌سازد (شیانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۸).

$$\delta_{DOD} \sqrt{NC^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

ب) مدل خطاهای انتشار یافته

روش دوم تولید DOD در نرم‌افزار GCD مدل خطاهای انتشار یافته است. این روش در اصل با اضافه کردن نقشه خطای هر DEM در کنار نقشه‌های چند زمانه مدل رقومی ارتفاعی، گامی مؤثر در افزایش دقت DOD تولیدی و عدم قطعیت فراهم می‌کند. نقشه‌های خطای چند زمانه هم از طریق الحاقیه GCD و هم از طریق روش درون‌یابی کریچینگ قابل تولید است. در این تحقیق از روش کریچینگ در نرم‌افزار ARCGIS برای ایجاد نقشه خطای DEM ها (شکل ۶) استفاده گردید.

¹ - Williams

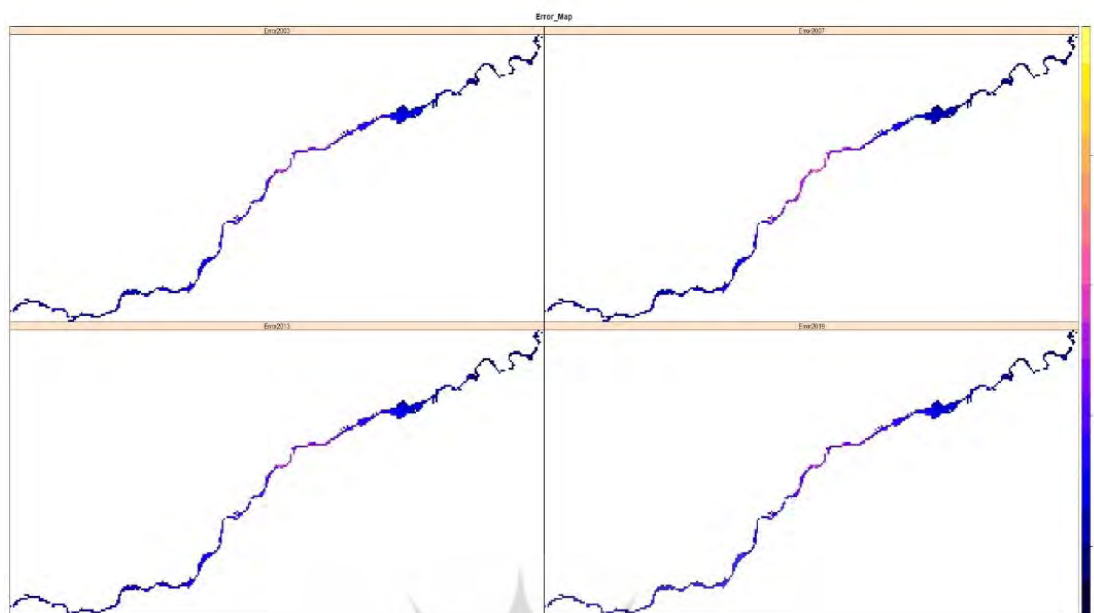
² - Wheaton

³ - Standard deviation

⁴ - Haas

⁵ - Gaussian error propagation

⁶ - Xiang



شکل ۶: نقشه‌های میزان خطا (ERROR) چند زمانه جهت استفاده در مدل انتشار خطا (PROPAGATED ERROR)

پ) تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک فاصله اطمینان توسط کاربر یک رویکرد دقیق‌تر برای تولید (DOD)، این است که کل خطا را به آستانه احتمالاتی در یک فاصله اطمینان تعریف‌شده توسط کاربر نشان دهد (براسینگتون^۱، رامسی^۲ و مکوی^۳، ۲۰۰۰؛ لین^۴ و همکاران، ۲۰۰۳). فرض بر این است که تخمین‌های δz با خطای انحراف استاندارد σ و توزیع نرمال تقریب می‌یابند، معادله ۳ را می‌توان به:

$$U_{crit} = t \sqrt{SDE_1^2 + SDE_2^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

درجایی که U_{crit} خطای آستانه بحرانی است، SDE_1 و SDE_2 به ترتیب انحراف معیار خطا برای Z_1 و Z_2 هستند و t مقادیر بحرانی توزیع t استیودنت دو دنباله برای یک فاصله اطمینان انتخابی است:

$$t = \frac{|Z_{new} - Z_{old}|}{\delta_{DOD}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که $|Z_{new} - Z_{old}|$ قدر مطلق تفاضل DEM ها است. برای آزمون در فاصله اطمینان Q_1 یا 68% ، $T \geq 1$ و برای آزمون Q_2 یا 95% فاصله اطمینان، $T \geq 1/96$ است (ویلیامز^۵، ۲۰۱۲). تمامی روابط مذکور با اجرای نرم‌افزار GCD و الحاقیه آن در محیط نرم‌افزار ARCGIS شکل عملیاتی به خود گرفته و خروجی آن‌ها به شکل نقشه، جدول، فایل اکسل تغییرات حجمی و مساحتی محدوده مورد مطالعه به دست می‌آید.

¹ -Brasington

² -Rumsby

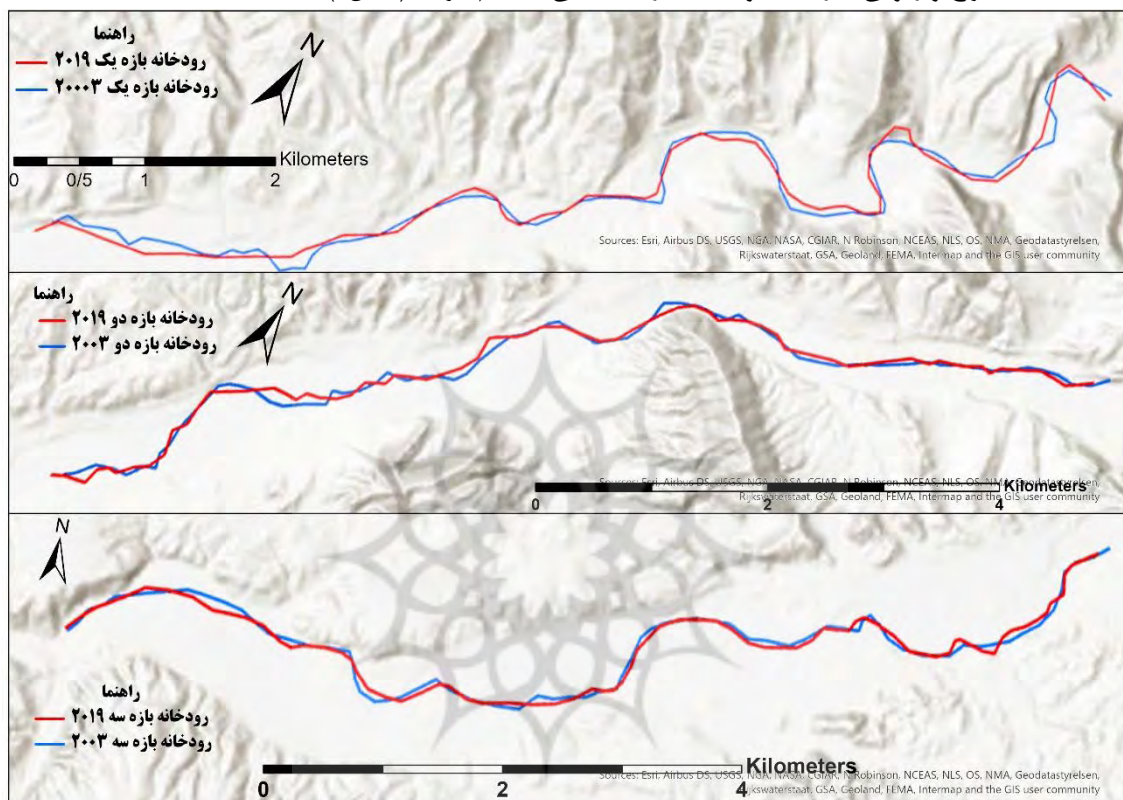
³ -McVey

⁴ - Lane

⁵ -Williams

مورفومتری بستر رودخانه

در کنار مدل GCD از برخی پارامترهای مورفومتری مانند پروفیل طولی رودخانه، تعداد پیچانرود، زاویه مرکزی، شاخص طول رودخانه و شاخص سینوزیته جهت بررسی واکنش سیستم رودخانه بعد از بهره برداری از سد گلابر نیز استفاده گردید. برای این منظور ابتدا مسیر رودخانه در پایین دست سد، برای دوره های تاریخی ۲۰۰۳ و ۲۰۱۹ از طریق تصاویر ماهواره ای لندست استخراج و رقمی سازی شد و به سه بازه مطالعاتی تقسیم گردید (شکل ۷)



شکل ۷: بازه‌های سه گانه مطالعاتی تغییرات ژئومورفولوژی بستر رودخانه سجاسرود در پایین دست سد گلابر استان زنجان

پروفیل طولی رودخانه: نیمرخ طولی رود یکی از مؤلفه‌های اساسی در سیستم رودخانه‌ای است و به‌عنوان یک شاخص توپوگرافی کلیدی از روابط متقابل بین فرو سایی رودخانه‌ای، لیتولوژی، تکتونیک، و تغییرات سطح اساس ایجاد می‌شود و تعادل بلندمدت سیستم را نشان می‌دهد (Larue, 2008). نیمرخ طولی رودخانه‌هایی که در حالت تعادل قرار دارند به شکل مقعر است با اذعان به اینکه عوامل مختلفی در تعادل و عدم تعادل نیمرخ طولی رودخانه مؤثر هستند، نسبت به ترسیم پروفیل طولی رودخانه سجاسرود در نرم‌افزار QGIS اقدام گردید. نیمرخ طولی رود از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

رابطه (۷)

$$S = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

که در آن ΔL فاصله طولی بین دو تا نقطه و ΔH اختلاف ارتفاع و S نیمرخ طولی می باشد. که در این پژوهش شاخص فوق محاسبه و نتایج حاصل از آن برای قبل و بعد از احداث سد باهم مقایسه شده است.

شاخص تعداد پیچانرود: پیچان‌رودها اشکال مهم ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی هستند و به لحاظ جابجایی‌های مکانی که در محدوده دشت‌های سیلابی انجام می‌دهند، موجب تغییر ابعاد ریخت‌شناسی بستر جریان رودخانه و دشت‌های

سیلابی می‌شوند (سربازی و همکاران، ۱۳۹۴). در این تحقیق ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اتوکد دایره‌های مماس با پیچان‌رودها ترسیم گردید و سپس زاویه مرکزی هر کدام از این دایره‌ها نیز به وسیله نرم‌افزار اتوکد به دست آمد. تعداد پیچان‌رودها یکی از معیارهای پویایی یک رودخانه محسوب می‌شود. با شمارش تعداد پیچان‌رودهای بازه‌های سه‌گانه روند تغییرات تعداد پیچان‌رودها در سال‌های مورد مطالعه مشخص گردید.

زاویه مرکزی:

کورنایس در سال ۱۹۸۰ برای بیان کیفی توسعه و پیشرفت پیچان‌رودی شدن رودخانه‌های آبرفتی و تمایز آن‌ها از یکدیگر از معیار زاویه مرکزی استفاده کرد (جدول ۳) را برای تقسیم‌بندی توسعه پیچان‌رودی رودخانه‌ها پیشنهاد نمودند. بعد از ترسیم دایره‌های مماس با قوس‌های رودخانه در نرم‌افزار اتوکد، زاویه مرکزی تک‌تک قوس‌ها برای بازه‌های سه‌گانه در اتوکد اندازه‌گیری شد و در فایل اکسل ثبت گردید. همچنین در فرمت نرم‌افزار ARCGIS ذخیره شد. در مرحله بعدی در محیط نرم‌افزار اکسل درصد فراوانی دسته‌بندی کورنایس برای بازه‌های مربوطه محاسبه گردید.

جدول ۳: میزان رشد قوس‌های پیچان‌رودی بر اساس اندازه زاویه مرکزی (کورنایس)

زاویه مرکزی (درجه)	شکل رودخانه
۰	رودخانه مستقیم
۴۱ تا ۴۱	رودخانه شبه پیچان‌رودی
۸۵ تا ۴۱	رودخانه پیچان‌رودی توسعه نیافته
۱۵۸ تا ۸۵	رودخانه پیچان‌رودی توسعه یافته
۲۹۶ تا ۱۵۸	رودخانه پیچان‌رودی بیش از حد توسعه یافته
بیش از ۲۹۶	رودخانه دارای دریاچه هلالی شکل



شکل ۸: بازه اول محدوده مورد مطالعه با دایره‌های برآزش شده بر پیچان‌رودها برای سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳

طول کانال: یکی از شاخص‌های اصلی جهت مقایسه مورفومتری کانال‌ها، شاخص طول کانال یا طول دره آبراهه می‌باشد (جوکار سرهنگی و همکاران، ۲۰۱۸). طول کانال میزان جابجایی و انحراف رودخانه و تحول پیچان‌رودها را بین بازه‌های مطالعاتی مشخص می‌کند. طول کانال برای بازه‌های سه‌گانه از طریق رقوم‌سازی تصاویر ماهواره‌ای لندست در نرم‌افزار ARCGIS بدست آمد.

سینوزیته کانال رود: یکی دیگر از مشخصات مورفومتری رودخانه که جهت بررسی میزان تغییرات مسیر آبراهه استفاده می‌گردد شاخص سینوزیته می‌باشد. سینوزیته یا ضریب خمیدگی پارامتری است که الگوی پیچان‌رودی (مئاندری) یک رود را نشان می‌دهد. و به صورت نسبت طول کانال به طول دره (در یک خط مستقیم) تعریف می‌شود. به عبارت دیگر نسبت شیب دره به شیب کانال است (خسروی و همکاران، ۲۰۲۰). بر پایه طبقه‌بندی بریرلی^۱ و فریرس^۲ (۲۰۰۵)، کانال‌های با نسبت سینوزیته کمتر از ۱/۰۵ به عنوان الگوی مستقیم، نسبت بین ۱/۳-۱/۰۶ به عنوان الگوی سینوسی و بزرگ‌تر از ۱/۳ نیز به عنوان رودخانه‌های پیچان‌رودی نامیده می‌شوند (حسین زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴). بر اساس الگوی بریرلی و فریرس ضریب خمیدگی برای دو دوره ۲۰۰۳ و ۲۰۱۹ محاسبه گردید و الگوی کانال مشخص گردید.

بحث و یافته‌ها

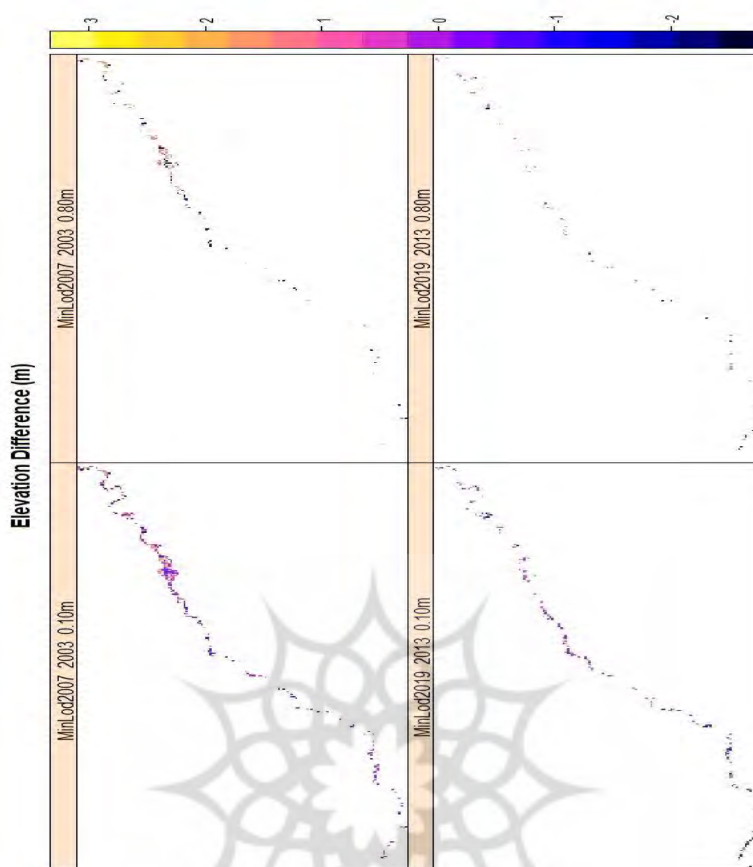
نقشه‌های خروجی و داده‌های مدل نشان داد ساخت سد تأثیر فراوانی بر بار رسوب و فرسایش در بستر رودخانه در پایین‌دست دارد. در هر سه روش پیاده شده در این تحقیق، با آستانه‌گذاری‌های مختلف، میزان فرسایش و رسوب بعد از ساخت سد گلابر در پایین‌دست سد و رودخانه به شکل محسوس تغییر پیدا کرده است. در ادامه خروجی روش‌های سه‌گانه نتایج به تفصیل آورده شده است.

نتایج مدل حداقل سطح تشخیص^۳: بعد از تهیه مدل‌های رقوم‌های ارتفاعی چهارزمانه قبل و بعد از ساخت سد و وارد کردن این نقشه‌ها به مدل در محیط نرم‌افزار ARCGIS، ابتدا روش حداقل سطح تشخیص از طریق منوهای ابزار و الحاقیه GCD اجرا گردید. در راستای کاهش خطاهای نقشه تغییرات و عدم قطعیت‌های موجود در علم ژئومورفولوژی، امکان اعمال آستانه‌گذاری‌های مختلف در الحاقیه وجود دارد. این آستانه‌گذاری‌ها از ۰/۱۰ متر تا ۰/۸۰ متر در نظر گرفته شد. هر چه قدر میزان آستانه‌گذاری زیاد می‌شود، شرایط سخت‌گیرانه‌ای در سنجش و ثبت تغییرات ژئومورفولوژی بستر رودخانه برای دو دوره زمانی اعمال می‌شود. خروجی تفاضل مدل‌های رقوم‌های ارتفاعی با اعمال توابع خاص در الحاقیه GCD در محیط ARCGIS به صورت نقشه و فایل XML پارامترهای مربوط به تغییرات ارتفاعی، تغییرات مساحت پهنه‌ها و نیز نمودار تغییرات مدل‌های رقوم‌های ارتفاعی است. با توجه به (اشکال ۸،۷) می‌توان دریافت که فرایند رسوب‌گذاری و فرسایش در بستر رودخانه هر دو کاهش یافته و میزان رسوب‌گذاری در این دوره از میزان فرسایش بیشتر بوده است که نشان‌دهنده کاهش رواناب (شکل ۹) در این دوره زمانی است که خود ناشی از تغییرات کاربری، بخصوص در بخش کشاورزی، استفاده گسترده از منابع آب در طول مسیر و نوسانات اقلیمی است. در (شکل ۷) حجم کلی کاهش سطح به مترمکعب (فرسایشی)، حجم کلی افزایش سطح به مترمکعب (رسوب‌گذاری) اختلاف کل حجم خالص به مترمکعب (DOD) مشخص شده است. همچنین (شکل ۸) نشان می‌دهد با افزایش حد آستانه‌گذاری میزان شاخص‌های فرسایشی و رسوب‌گذاری کاهش پیدا کرده ولی نرخ اختلاف کل حجم خالص تغییرات ناچیزی را نشان می‌دهد.

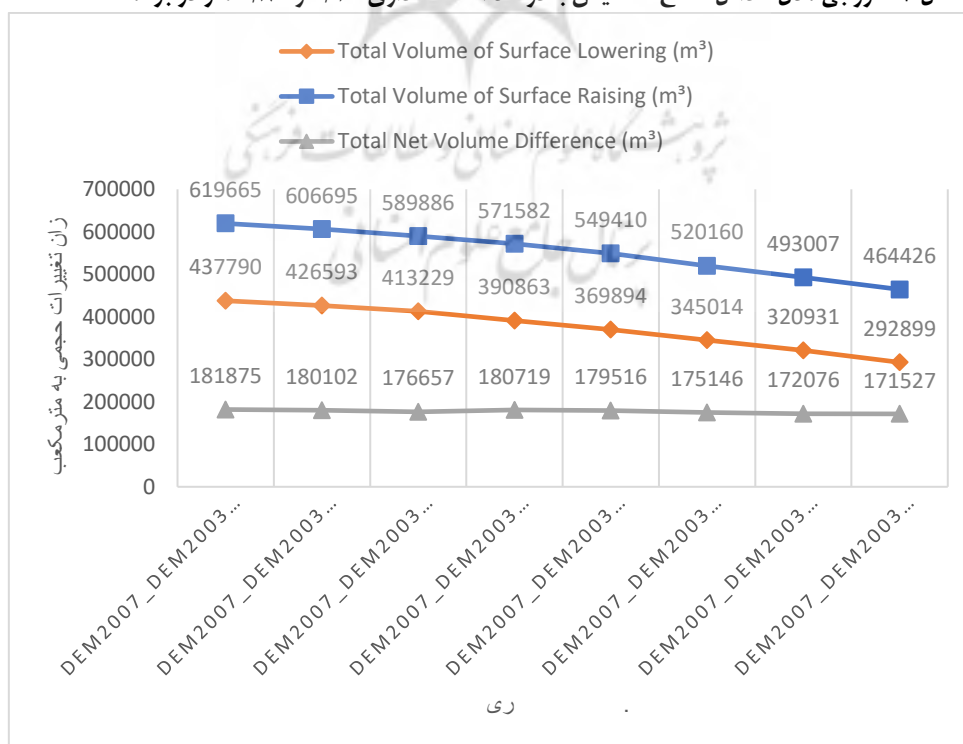
¹ - Brierley

² - Fryirs

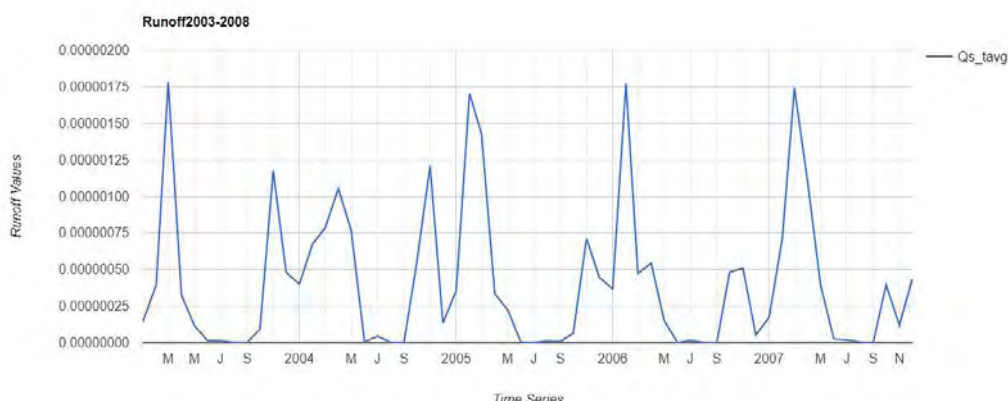
³ - Minimum Level of Detection



شکل ۷: خروجی مدل حداقل سطح تشخیص با دو حد آستانه گذاری +۰/۱۰ و +۰/۸۰ متر در برنامه R



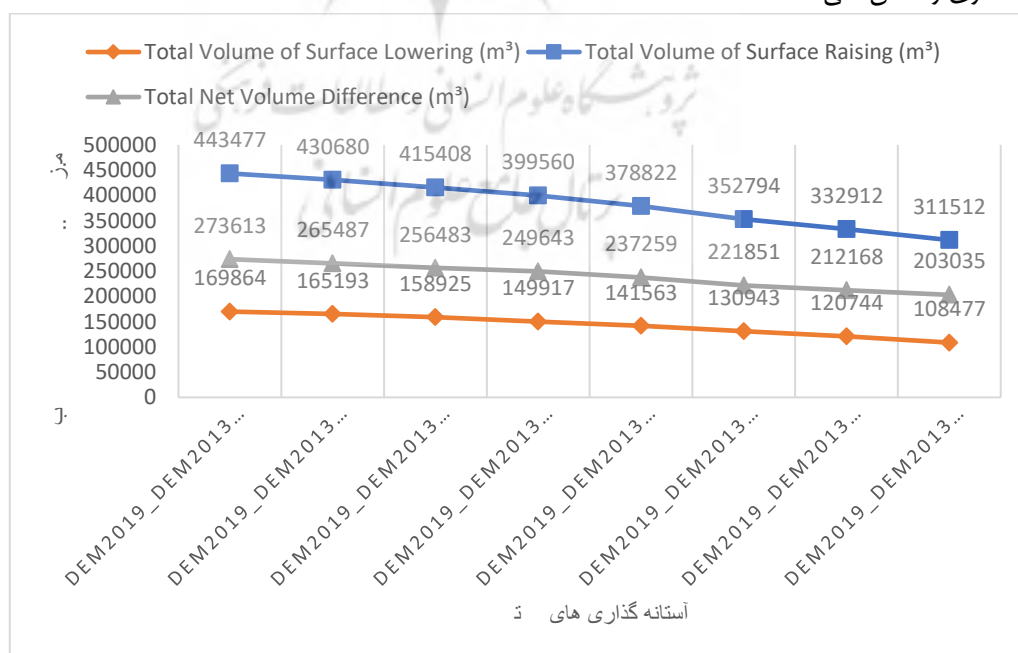
شکل ۸: نمودار تغییرات حجمی مدل حداقل سطح تشخیص بین سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۷ با آستانه گذاری‌های مختلف



شکل ۹: میزان تغییرات رواناب از سال ۲۰۰۳ الی ۲۰۰۷ برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه

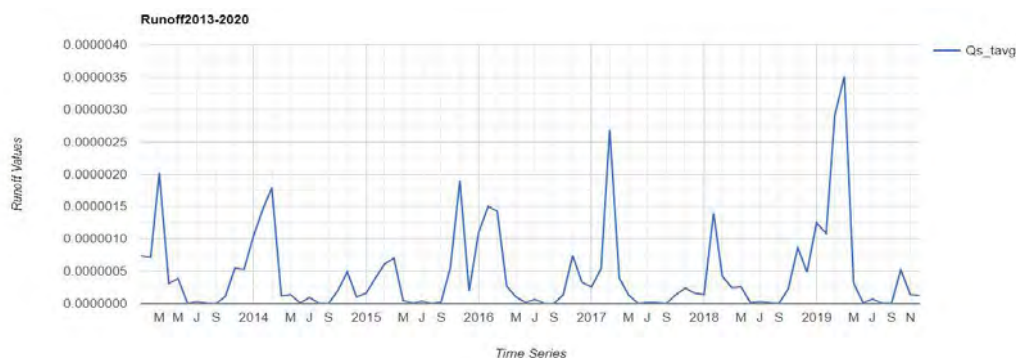
در سری زمانی دوم یعنی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ که مرحله بعد از بهره‌برداری سد گلابر بر روی این رودخانه است، مدل حداقل سطح تشخیص در (شکل ۱۰) نشان می‌دهد همانند سری زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ که مرحله قبل از ساخت را در برمی‌گیرد، فرایند رسوب‌گذاری در بستر رودخانه بر فرایند فرسایش غلبه دارد. همچنین در مقایسه با (شکل ۷) در سری زمانی دوم شدت و حجم رسوب‌گذاری با بهره‌برداری از سد شدت گرفته و دبی و رواناب رودخانه (شکل ۹) هم به شدت کاهش یافته است.

مقایسه (اشکال ۱۱، ۹) از کاهش شدید مقدار رواناب دوره سری زمانی بعد از ساخت سد (۲۰۱۳-۲۰۱۹) نسبت به قبل از آن (۲۰۰۳-۲۰۰۷) بر روی رودخانه سجاسرود حکایت دارد. این در حالی است که مقدار بارندگی تغییر محسوسی بین دو دوره زمانی ندارد. در سامانه گوگل ارث گوگل ارث انجین با استفاده از داده‌های CHIRPS^۱ میانگین بارش سالانه در حوضه آبریز سجاسرود در سری زمانی قبل از ساخت سد ۳۹۲/۷۵ و بعد از ساخت سد ۳۷۵/۵۹ حاصل شد که تفاوت معناداری را نشان نمی‌دهد.



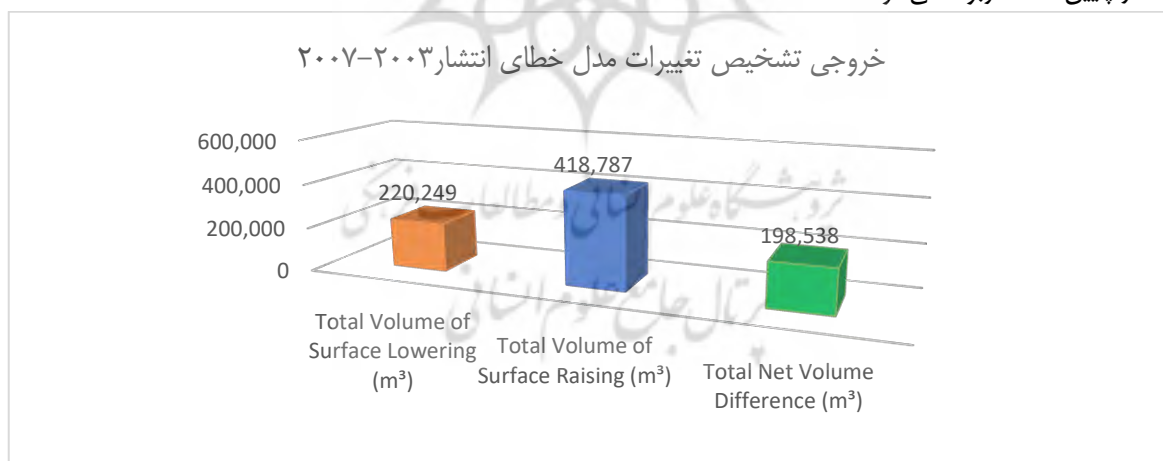
شکل ۱۰: نمودار تغییرات حجمی مدل حداقل سطح تشخیص بین سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۹ با آستانه گذاری‌های مختلف

^۱ - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data



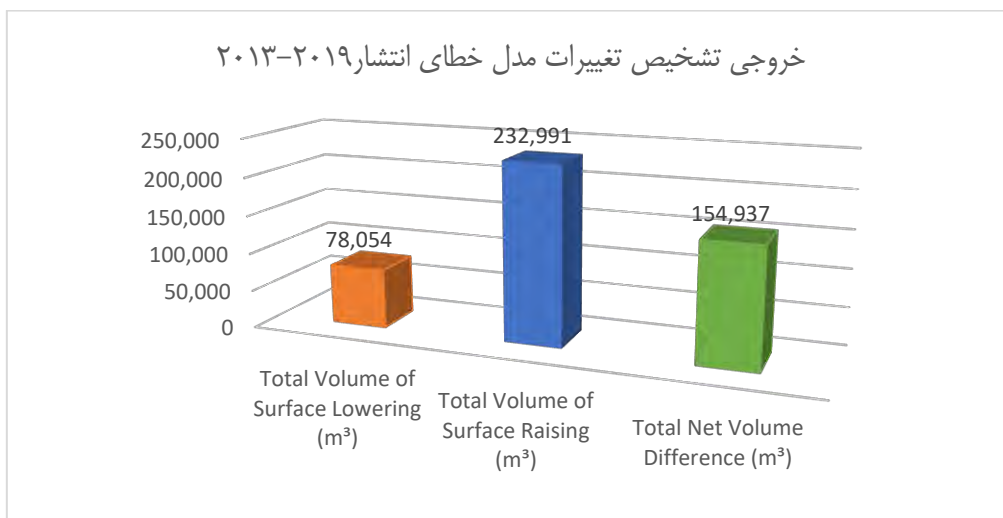
شکل ۱۱: میزان رواناب از سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۹ برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه

نتایج و یافته‌های مدل خطاهای انتشار یافته در مدل‌های رقومی چند زمانه (PROPAGATED ERRORS)
 در این روش تعیین حد آستانه دیگر مطرح نیست. خروجی مدل تغییرات ژئومورفولوژی بستر رودخانه در روش خطای انتشار یافته (PROPAGATED ERRORS) در (شکل ۱۲) نشان می‌دهد در بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ که مرحله قبل از ساخت سد است، میزان رسوب‌گذاری در بستر رودخانه همانند مدل حداقل سطح تشخیص تقریباً دو برابر فرسایش است که کاملاً منطبق با خروجی میزان رواناب (شکل ۸) است. این روند (شکل ۱۳) بعد از احداث و بهره‌برداری از سد گلابر یعنی مابین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ به علت ذخیره آب در پشت سد و کاهش رواناب، نرخ فرسایش به شکل تصاعدی کاهش یافته است و از حدود ۲۲۰ هزار مترمکعب به ۷۸ هزار مترمکعب رسیده است. همان‌طور که (شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴) نشان می‌دهند با بهره‌برداری از سد، میزان فرسایش و رسوب‌گذاری کلاً روند کاهشی دارد که به کاهش رواناب ناشی از سد در پایین دست مربوط می‌شود.

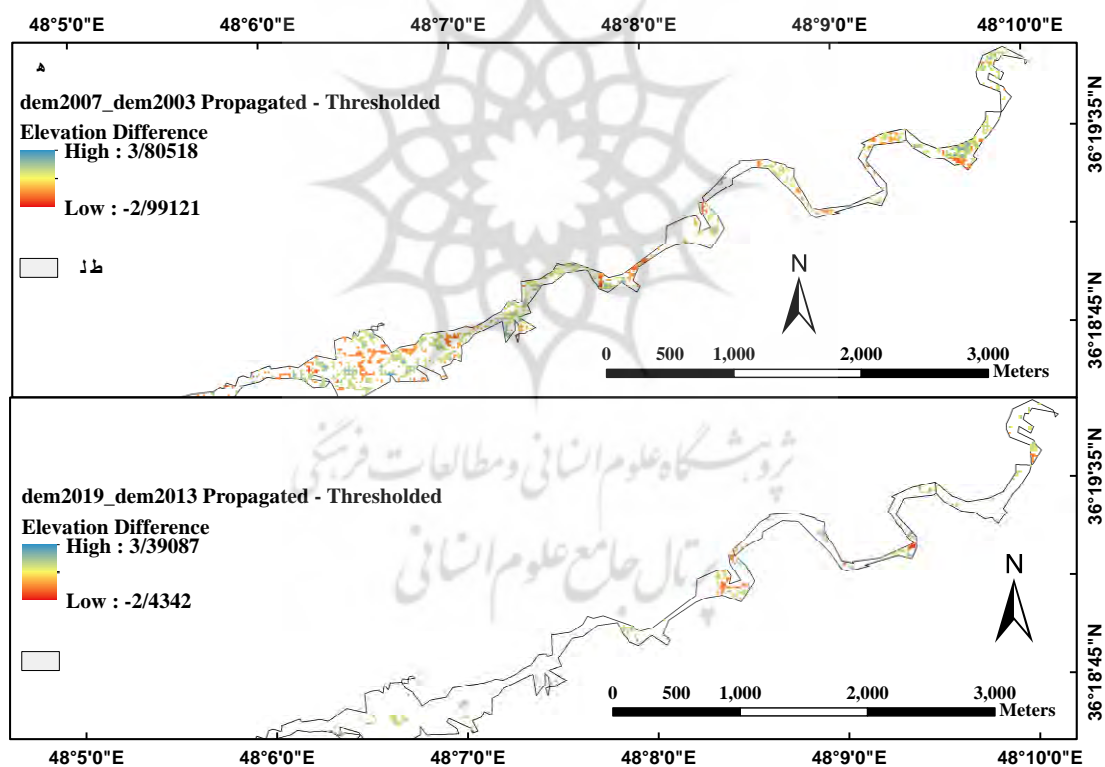


شکل ۱۲: میزان فرسایش (Lowering) و رسوب (Raising) به مترمکعب در بستر رودخانه با روش خطای انتشار یافته ۲۰۰۳-۲۰۰۷

۱ - خطاهای منتشر شده (یا انتشار عدم قطعیت) به عنوان اثرات بر روی یک تابع توسط عدم قطعیت یک متغیر تعریف می‌شود. یک تحلیل آماری مشتق از محاسباتی است که برای ترکیب عدم قطعیت‌ها از متغیرهای متعدد، به منظور ارائه اندازه گیری دقیق عدم قطعیت طراحی شده است.



شکل ۱۳: میزان فرسایش و رسوب به مترمکعب در بستر رودخانه با روش خطای انتشار یافته ۲۰۱۳-۲۰۱۹

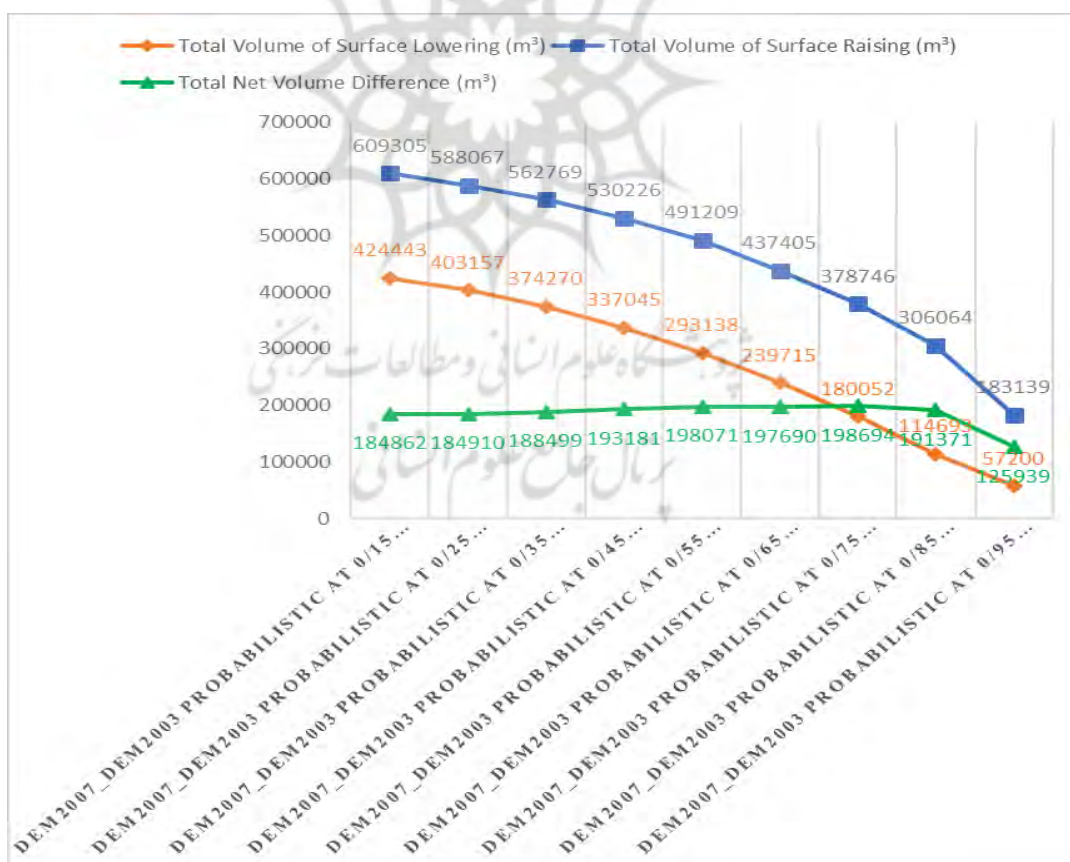


شکل ۱۴: نقشه‌های تشخیص تغییر با مدل خطای انتشار یافته (PROPAGATED ERROR) برای سری‌های زمانی چهارگانه

نتایج و یافته‌های تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک فاصله اطمینان:

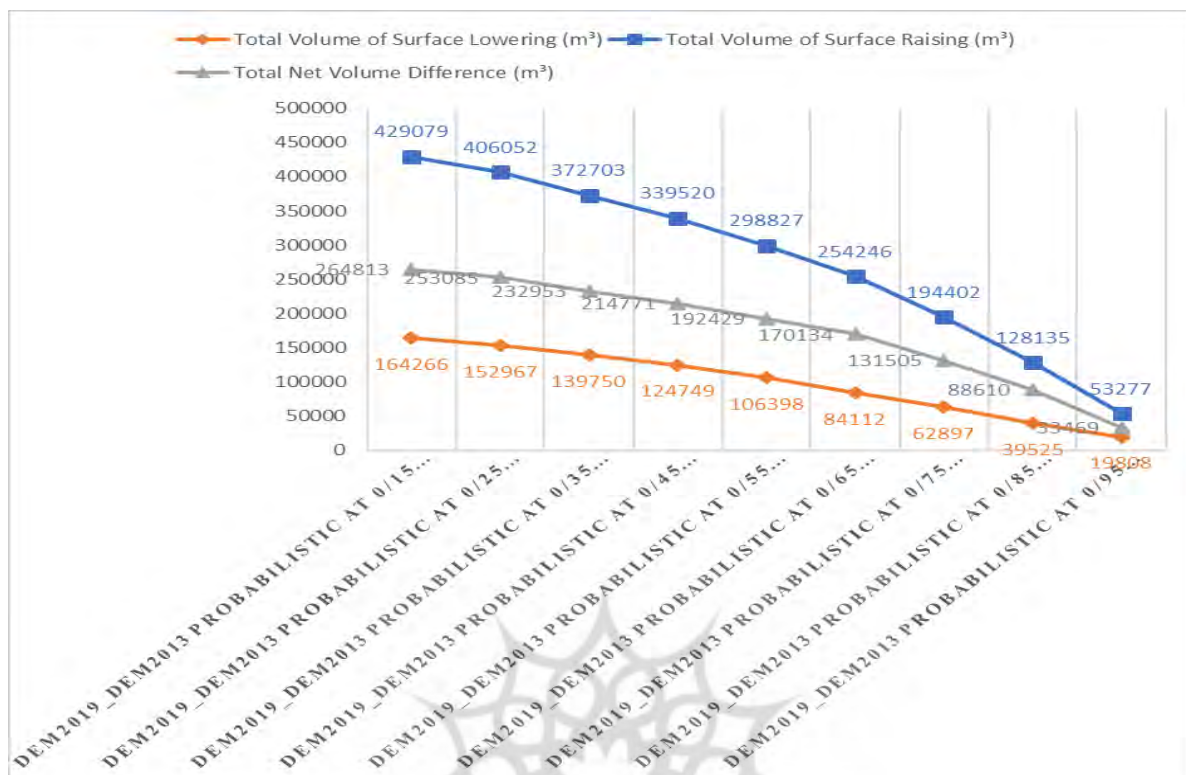
در این مدل تعیین آستانه‌ها بر اساس مدل‌های آماری رابطه‌های (۵ و ۶) و از طریق تعیین فاصله اطمینان‌های مختلف تغییرات حجمی فرسایش و رسوب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا برآورد دقیق‌تری از تغییرات ژئومورفولوژی بستر رودخانه حاصل شود. در اکستنشن GCD نرم‌افزار ARCGIS قسمتی برای محاسبات تغییرات با همین عنوان قرار گرفته که با قرار دادن سطوح اطمینان‌های مختلف توسط کاربر، تغییرات حجمی و مساحتی DEM های سری زمانی به صورت

اتوماتیک بر پایه پیکسلی محاسبه می‌شود. در این پژوهش از پایین‌ترین سطح اطمینان یعنی ۱۵ درصد تا ۹۵ درصد استفاده شد تا مقایسه بهتر و دقیق‌تری نسبت به تغییرات حاصل شود. نتایج و یافته‌ها برای سری زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۷ همانند مدل‌های قبلی با افزایش حد آستانه‌ها سطوح رسوب‌گذاری و فرسایش از نظر تغییرات حجمی و مساحت از روند کاهش تبعیت می‌کند. اما تغییر عمده‌ای که در این مدل اخیر روی داد این بود که برای آزمون در فاصله اطمینان Q1 با ۰/۶۸، T ≥ 1 مجموع اختلاف حجم خالص برحسب مترمکعب روند ثابت یا افزایش اندکی را نشان می‌دهد (شکل ۱۵) درحالی‌که آزمون Q2 با ۰/۹۵ فاصله اطمینان، $T \geq 1/96$ ، مجموع اختلاف حجم خالص برحسب مترمکعب که حاصل تفاضل سطوح رسوب‌گذاری از سطوح فرسایش است، به شدت کاهش یافته است. مدل آستانه احتمالی در سری زمانی دوم یعنی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ (شکل ۱۶) نشان می‌دهد تغییرات حجمی مربوط به فرایند رسوب‌گذاری در بستر رودخانه بیش از ۲/۵ برابر تغییرات مربوط به فرسایش است. شیب تغییرات در فاصله اطمینان‌های کم نسبت به فاصله اطمینان ۹۵ درصد خیلی زیاد است. همانند مدل حداقل سطح تشخیص برای سری زمانی دوم در این مدل نیز مجموع اختلاف حجم خالص^۱ بیش از تغییرات حجمی سطوح فرسایشی است. لذا به سهولت می‌توان درک کرد که با احداث سد گلابر ضمن کاهش رواناب رودخانه در پایین‌دست سد به طبع آن سهم فرسایش در بستر کاهش یافته و نرخ رسوب‌گذاری افزایش پیدا کرده است. همچنین در سری زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ با سطح اطمینان ۹۵ درصد (شکل ۱۷) سطوح فرسایش به ۱۹۸۰۸ مترمکعب و سطوح رسوب‌گذاری به ۵۳۲۷۷ مترمکعب در کل بستر مورد مطالعه رسیده است.

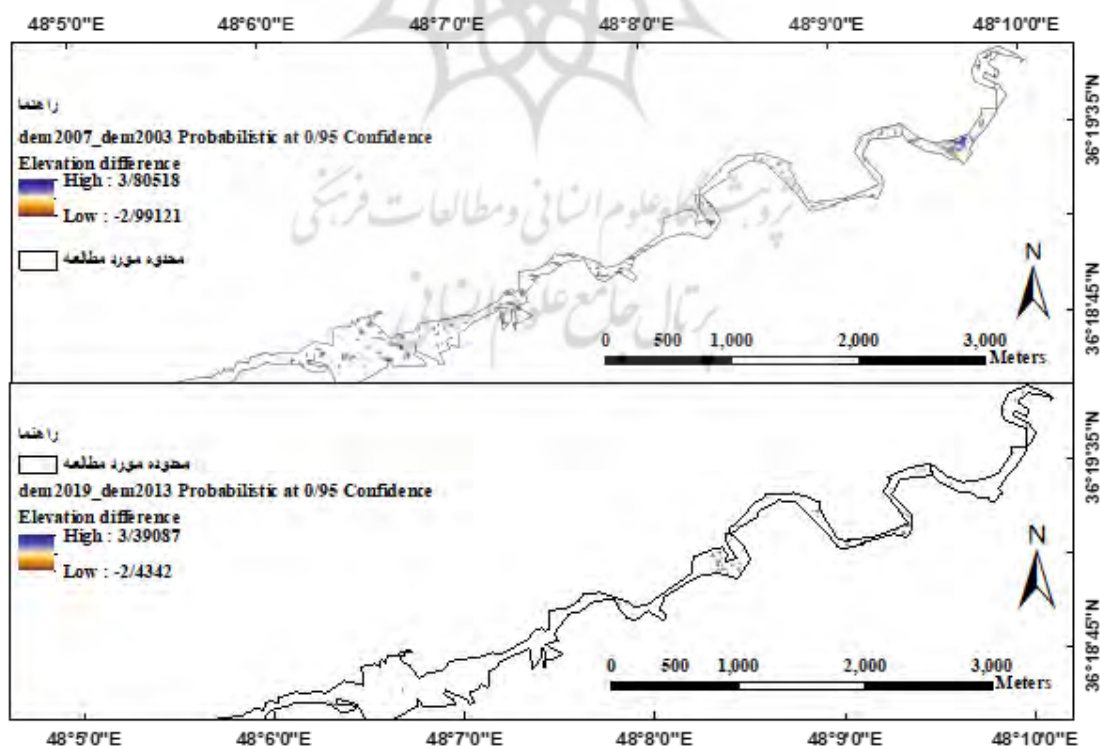


شکل ۱۵: نمودار تغییرات حجمی مدل تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک فاصله اطمینان توسط کاربر بین سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۷

^۱ - Total Net Volume Difference



شکل ۱۶: نمودار تغییرات حجمی مدل تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک فاصله اطمینان توسط کاربر بین سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۹

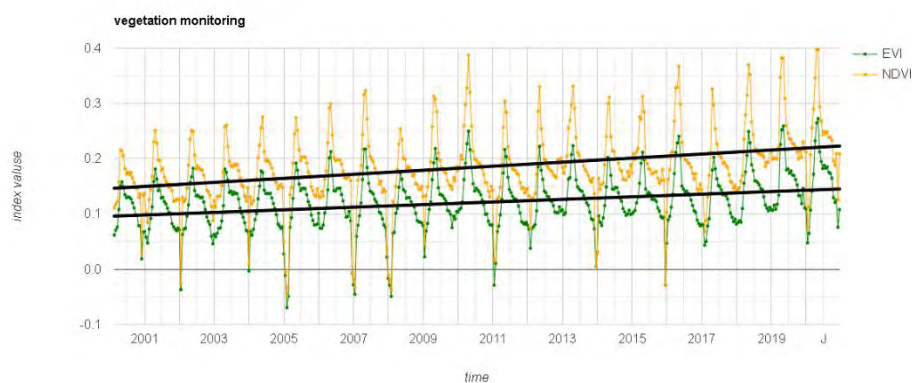


شکل ۱۷: نقشه‌های تشخیص تغییر با مدل تعیین آستانه احتمالی با استفاده از تعریف یک فاصله اطمینان توسط کاربر برای سری‌های زمانی چهارگانه

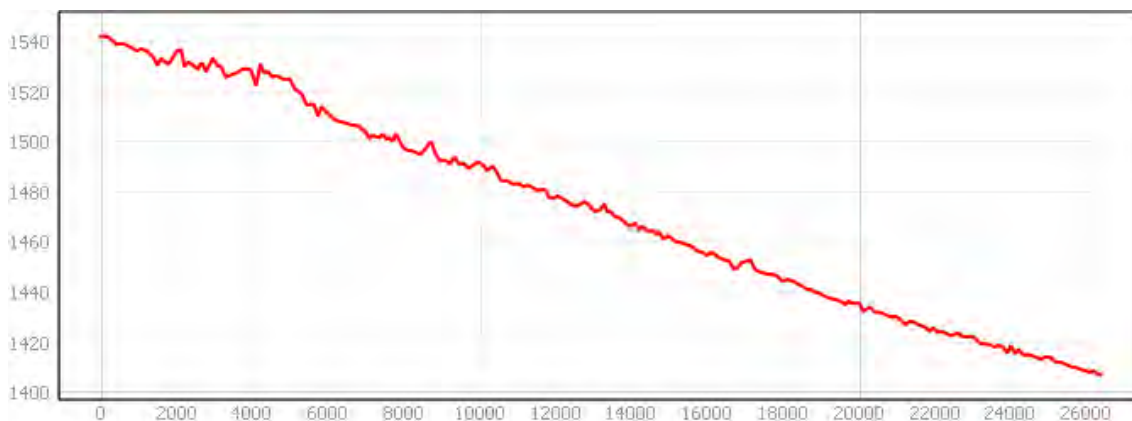


شکل ۱۸: تصاویری از بازدید میدانی رودخانه سگاسرود **A** رودخانه سگاسرود بستر همواره در دوره کم آبی **B** نمایی از سد گلابر **C** کشف کتیبه ۴۰۰ ساله مربوط به دوره صفویه بر اثر سیل ۱۲ مرداد ۱۴۰۰ **D** برش کرانه شمالی توسط رودخانه سگاسرود و پوشش گیاهی داخل مجرای رود

نیمرخ طولی: پروفیل طولی رودخانه در دوره بعد از ساخت سد (شکل ۲۱) تحت تأثیر کاهش رواناب ناشی از احداث سد () و افزایش پوشش گیاهی (شکل ۱۹) بستر رودخانه قرار دارد. رودخانه در پایین دست سد (بازه اول) به علت شیب بیشتر و ساختار گسلی شکل محدب خود را در هر دو بازه مورد مطالعه حفظ کرده است. ولی در سایر بازه‌های مورد مطالعه به سمت تعادل ژئومورفولوژیکی پیش می‌رود. چالاب‌ها و خیزاب‌های ایجاد شده در کانال رودخانه طی دوره‌های پرآبی و جریان‌های طغیانی مانند سیل ۱۲ مرداد ۱۴۰۰ در طول دوره مورد مطالعه، باعث موج‌دار شدن پروفیل طولی رودخانه شده است. با تطبیق گسل‌های مسیر جریان با پروفیل طولی نوسانات بلند موجی شکل پروفیل طولی اثبات گردید. به علت افزایش نرخ رسوب‌گذاری در دوره بعد از ساخت سد پروفیل طولی در سال ۲۰۰۳ (شکل ۲۰) در جاهای بیشتری از بستر رودخانه ارتفاع کمتری نسبت به دوره ۲۰۱۹ دارد.



شکل ۱۹: روند تغییرات پوشش گیاهی بستر رودخانه سگاسرود در پایین دست سد گلابر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی



شکل ۲۰: پروفیل طولی رودخانه سجاسرود در پایین‌دست سد گلابر در سال ۲۰۰۳



شکل ۲۱: پروفیل طولی رودخانه سجاسرود در پایین‌دست سد گلابر در سال ۲۰۱۹

تعداد پیچانرود

تعداد پیچانرودها یکی از معیارهای پویایی یک رودخانه محسوب می‌شود. با شمارش تعداد پیچانرودهای بازه‌های سه‌گانه روند تغییرات تعداد پیچانرودها در سال‌های مورد مطالعه مشخص گردید (جدول ۴). با توجه به اینکه پایین‌دست سد قسمت انتهایی حوضه آبریز سجاسرود است ارتفاع حوضه در این قسمت نسبت به کل حوضه پایین‌تر است. ساختار دشت سیلابی با آبرفت‌های سست‌عهد حاضر به همراه شیب کم و تغییرات کاربری از عوامل عمده پیچانرودی شدن رودخانه در این بخش شده است. در بازه اول تعداد پیچانرودها از ۴۷ در سال ۲۰۰۳ به ۴۴ عدد در سال ۲۰۱۹ کاهش پیدا کرده است. این امر بیشتر به علت تأثیرات مستقیم سد در مورفولوژی رودخانه در پایین‌دست، قابل تفسیر است. در بازه دوم تعداد پیچانرودها در سال ۲۰۰۳ نسبت به سال ۲۰۱۹ کاهش یافته است. فعالیت‌های کشاورزی عمرانی و تغییرات کاربری، اضافه شدن شاخه‌های فرعی در مسیر به رودخانه، گسترش پوشش گیاهی بستر رودخانه از علل مهم افزایش تعداد پیچانرودها در بازه دوم در سال ۲۰۱۹ است. در بازه سوم نیز تغییر محسوسی در تعداد پیچانرودها مشاهده نمی‌شود. این امر بیشتر به تغذیه رودخانه از شاخه‌های فرعی و کاهش اثرات سد در این بازه به علت فاصله زیادگرفتن از سد مربوط می‌شود.

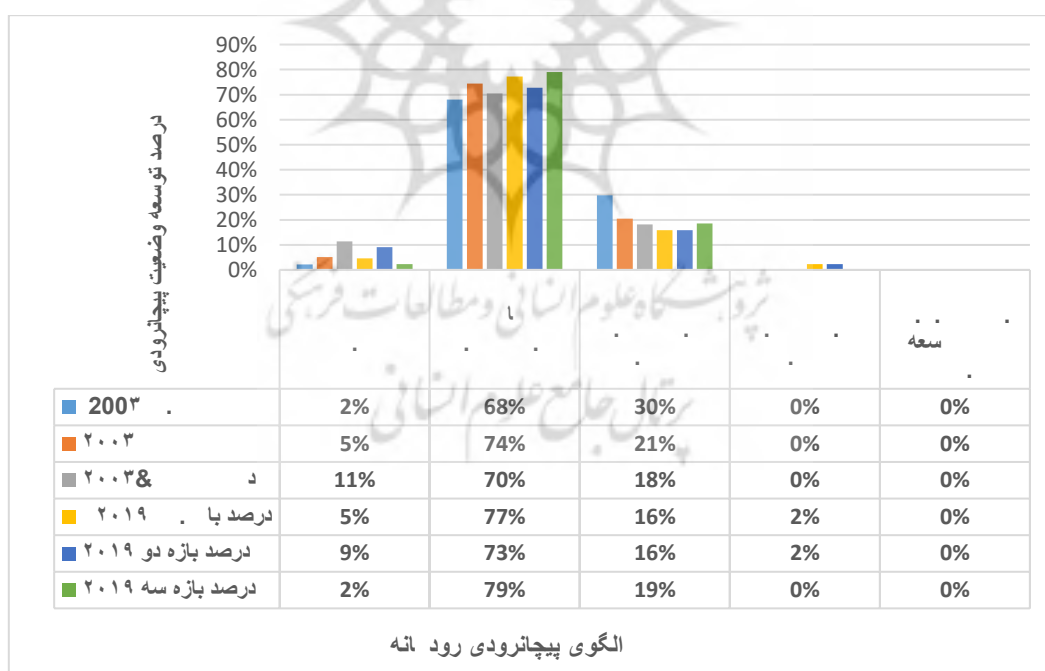
جدول ۴: مقایسه تعداد پیچانرود در بازه‌های مورد مطالعه، در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۹

شماره بازه	تعداد پیچانرود سال ۲۰۰۳	تعداد پیچانرود سال ۲۰۱۹
۱	۴۷	۴۴
۲	۳۹	۴۴
۳	۴۴	۴۳

زاویه مرکزی: نتایج محاسبات مربوط به زاویه مرکزی کورنایس (شکل ۲۲) نشان می‌دهد در بازه‌های سه‌گانه، هر دو دوره مورد مطالعه، الگوی رودخانه‌های شبه پیچانرودی بیشترین درصد فراوانی را در پایین دست سد گلابر دارند. همچنین این نوع الگوی رودخانه با نوع الگوی سینوسی حاصل از ضریب خمیدگی همبستگی خوبی را نشان می‌دهد. الگوی رودخانه پیچانرودی توسعه نیافته دومین الگو با درصد فراوانی بیشتر است. الگوی رودخانه‌های توسعه یافته در دوره قبل از ساخت سد وجود ندارد و با درصد ناچیزی در دوره بعد از ساخت سد شکل گرفته است که بیشتر با جریان‌های سیلابی موقتی و رشد پوشش گیاهی و تغییرات کاربری در روستاهای مسیر و شهر حلب مربوط می‌شود. میانگین زاویه مرکزی بازه‌های سه‌گانه (جدول ۵) در دوره بعد از ساخت سد کاهش معناداری را با دوره قبل از ساخت سد نشان می‌دهد. فقط در (بازه سه) دوره بعد از ساخت سد اندکی افزایش در میانگین زاویه مرکزی مشاهده می‌شود که آن هم به خاطر فاصله زیاد از دیواره سد و اضافه شدن شاخه‌های فرعی منابع آب به رودخانه در طول مسیر مرتبط است. میانگین کل زاویه مرکزی بازه‌ها هم در دوره قبل از ساخت سد بیشتر از دوره بعد از آن است.

جدول ۵: میانگین زاویه مرکزی پیچانرودهای هر کدام از بازه‌ها در سال

کل بازه‌ها	بازه سه	بازه دو	بازه یک	
۳۲	۲۹	۳۲	۳۵	میانگین زاویه مرکزی سال ۲۰۰۳ به درجه
۲۹/۴۳	۲۹/۴۱	۲۸/۲۵	۳۰/۶۵	میانگین زاویه مرکزی سال ۲۰۱۹ به درجه
-۲/۵۶	۰/۴۱	-۳/۷۵	-۴/۳۵	میزان تغییرات



شکل ۲۲: درصد فراوانی زاویه مرکزی پیچانرودهای بازه‌های سه‌گانه

شاخص طول کانال: میزان تغییرات طول رودخانه که ناشی از تحولات پیچانرودها از جمله از بین رفتن قوس متاندره ها و مستقیم شدن مسیر جریان به واسطه تغییرات رژیم جریان و فرایندهای فرسایش و رسوب و دخالت‌های انسانی و تغییرات سطح اساس حاصل می‌شود، محاسبه گردید. طول رودخانه (ب) بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ یعنی ۱۶ سال حدود ۴۰۰ متر کوتاه‌تر شده است که با کاهش تعداد پیچانرودها بین این دو دوره زمانی همبستگی مستقیم نشان می‌دهد. یکی

از دلایل مهم این کاهش طول رودخانه در سری زمانی دوم (۲۰۱۹) کاهش شدید رواناب ناشی از ساخت سد و کاهش قدرت فرسایشی رودخانه و مستقیم شدن مسیر جریان است.

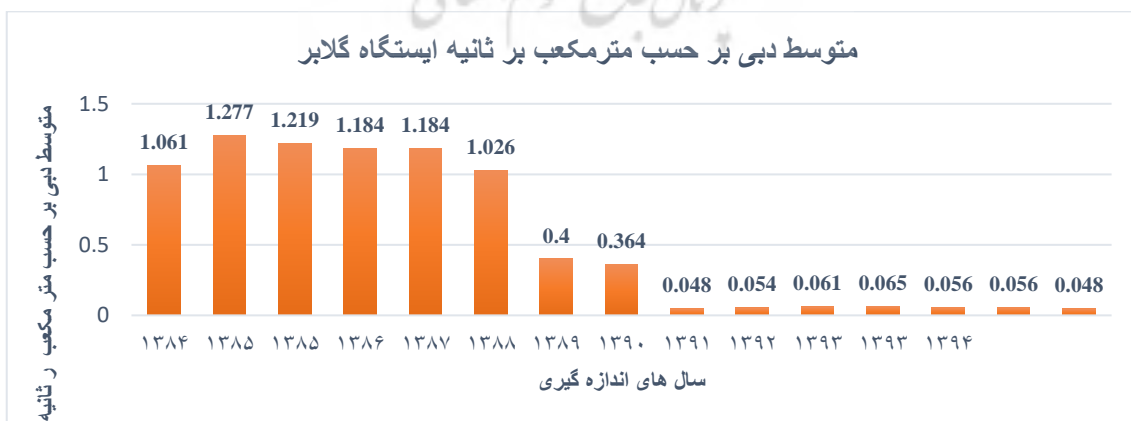
جدول ۶: مقایسه طول کانال در بازه‌های سه‌گانه رودخانه سجاسرود در پایین دست سد گلابر در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳

کل بازه‌ها	بازه ۳	بازه ۲	بازه ۱	
۲۶/۲۰۱	۸/۷۱۹	۸/۶۸۴	۸/۷۹۸	طول کانال سال ۲۰۰۳ (Km)
۲۵/۷۸۹	۸/۶۶۸	۸/۵۷۶	۸/۵۴۵	طول کانال سال ۲۰۱۹ (Km)
-۰/۴۱۲	-۰/۰۵۱	-۰/۱۰۸	-۰/۲۵۳	میزان تغییرات

شاخص سینوزیته: تغییر الگوی پیچانرودی بازه یک در سال ۲۰۰۳ به سینوسی در سال ۲۰۱۹ (جدول ۷) رابطه مستقیمی با کاهش دبی رودخانه و به طبع آن کاهش قدرت فرسایش رودخانه، افزایش پوشش گیاهی بستر و کناره‌ها (شکل ۱۹) دارد. پوشش گیاهی ضریب زبری و مقاومت کناره‌ها را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی در سری زمانی دوم (۲۰۱۹) میزان سینوزیته (ضریب خمیدگی) کاهش یافته است که با کاهش رواناب رودخانه شکل (۲۳) و افزایش میزان پوشش گیاهی و تغییرات کاربری زمین در حاشیه رودخانه قابل توجه است. مطابق با شکل (۲۳) با بهره‌برداری عملی از سد گلابر در سال ۱۳۸۹ دبی رودخانه سجاسرود به شدت کاهش یافته است که کاملاً با خروجی مدل GCD و شاخص‌های ژئومورفومتری این پژوهش مانند شاخص پیچانرودی، زاویه مرکزی، پروفیل طولی، ضریب خمیدگی و شاخص طول کانال مطابقت دارد.

جدول ۷: شاخص ضریب خمیدگی بازه‌های رودخانه سجاسرود در پایین دست سد گلابر طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۳

سال ۲۰۱۹				سال ۲۰۰۳				شماره بازه
نوع الگوی رودخانه	ضریب خمیدگی	طول دره	طول کانال	نوع الگوی رودخانه	ضریب خمیدگی	طول دره	طول کانال	
سینوسی	۱/۲۸	۶/۶۴	۸/۵۴	پیچانرودی	۱/۳۱	۶/۶۸	۸/۸۰	۱
سینوسی	۱/۱۲	۷/۶۴	۸/۵۷	سینوسی	۱/۱۳	۷/۶۵	۸/۶۸	۲
سینوسی	۱/۱۸	۷/۳۲	۸/۶۶	سینوسی	۱/۱۹	۷/۳۱	۸/۷۲	۳



شکل ۲۳: متوسط دبی رودخانه سجاسرود در پایین دست سد گلابر بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ منبع (سازمان آب منطقه‌ای زنجان)

نتیجه‌گیری

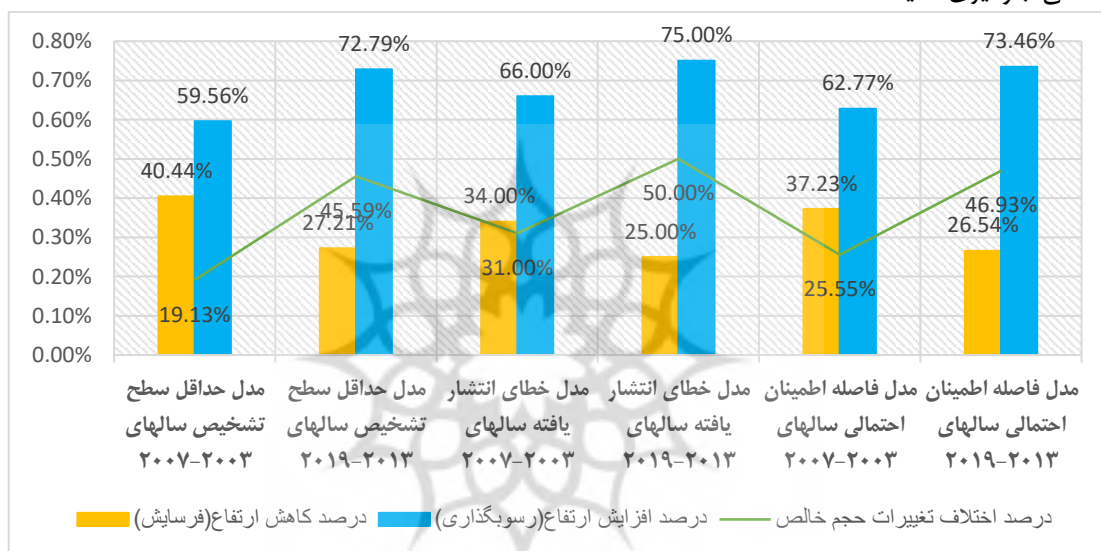
هدف این پژوهش پیاده‌سازی مدل GCD در پایین‌دست سد گلابر در رودخانه سجاسرود قبل و بعد از ساخت سد بود. مدل GCD مدلی است که بر پایه مدل‌های رقومی ارتفاعی تولیدشده از منابع مختلف، کار می‌کند و تغییرات ژئومورفولوژی پدیده‌های مختلف را در روی زمین در طول زمان تحلیل و بررسی می‌کند. در کنار این مدل از شاخص‌های ژئومورفومتری مانند شاخص تعداد پیچانرود، پروفیل طولی رودخانه، زاویه مرکزی، طول کانال رودخانه و سینوزیته (ضریب خمیدگی) استفاده شد تا ارزیابی بهتری از تأثیرات سد در پایین‌دست آن انجام بشود. بعد از تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی استر از ماهواره ترا و رفع خطاهای ارتفاعی و هندسی، برای زمان‌های قبل و بعد از احداث سد گلابر مدل GCD در محیط ARCMAP اجرا شد. از طریق سه روش، مدل GCD اجرا گردید. نقشه‌ها و اطلاعات موردنیاز از مدل استخراج گردید. خروجی نمودار (شکل ۲۴) و روش‌های سه‌گانه مدل GCD نشان می‌دهد اولاً در کل دوره مورد مطالعه (۲۰۱۹-۲۰۰۳) فرایند رسوب‌گذاری بر میزان فرسایش برتری دارد. ثانیاً فرایند رسوب‌گذاری در سری زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۳ نسبت به سری زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۳ افزایش یافته و برعکس نرخ فرسایش کاهش یافته است. خط سبزنگ (شکل ۲۴) که نشانگر درصد اختلاف حجم خالص است نیز دقیقاً مؤید همین مسئله است. بنابراین با توجه به اینکه میزان بارندگی‌ها از نظر آماری بین دو دوره مورد بررسی تفاوت چندانی ندارد همچنین میزان رواناب سری زمانی دوم نسبت به سری زمانی اول کاهش یافته است، می‌توان نتیجه گرفت سد گلابر تأثیر مستقیمی در کاهش رواناب (شکل ۲۳) و پویایی رودخانه در پایین‌دست داشته است. نتایج پارامترهای مورفومتری (جدول ۸) نشان داد رودخانه در اکثر پارامترها روند کاهشی را در دوره بعد از بهره‌برداری از سد طی می‌کند. این روند بخصوص در بازه اول که به دیواره سد نزدیک است، بیشتر مشهود است. در شمارش تعداد پیچانرودها بازه اول و سوم در سال ۲۰۰۳ اندکی بیشتر از سال ۲۰۱۹ است ولی در بازه دوم در سال ۲۰۱۹ تعداد پیچانرودها افزایش یافته است. این مسئله از جریان‌های طغیانی به همراه تغییرات گسترده کاربری زمین در این بازه و افزایش رشد پوشش گیاهی ناشی می‌شود. در کل تعداد پیچانرودها در دوره قبل از ساخت سد بیشتر از دوره بعد آن است. در پارامتر زاویه مرکزی که از شاخص‌های مهم تحلیل مورفومتری رودخانه است، بیشترین درصد فراوانی الگوی کانال از نوع شبه پیچانرودی و پیچانرود توسعه نیافته است. میانگین زاویه مرکزی در بازه‌های سه‌گانه به جزء بازه سوم در دوره قبل از ساخت سد بیشتر از دوره بعد از ساخت است. این بدین معنی است رودخانه به علت دبی مناسب قبل از ساخت سد روند تکاملی بهتری را دنبال کرده است و قدرت فرسایش و رسوب‌گذاری مؤثرتری داشته است. میانگین کل پارامتر طول کانال رودخانه در سال ۲۰۰۳، ۰/۴ کیلومتر بیشتر از سال ۲۰۱۹ است. این امر با کاهش قدرت جریان و رشد پوشش گیاهی بستر و افزایش رسوب‌گذاری رودخانه رابطه تنگاتنگی می‌تواند داشته باشد. همچنین ایجاد الگوی پیچانرودی توسعه یافته در بازه‌های دوره بعد از ساخت سد در سال ۲۰۱۹ با کاهش طول رودخانه رابطه معناداری دارد. ضریب خمیدگی یکی از پارامترهای مهم شناسایی الگوی رودخانه، با میانگین کل ۳/۶۳ بیشتر از دوره بعد از ساخت سد است. الگوی رودخانه به جزء بازه اول ۲۰۰۳ که پیچانرودی بوده است در سایر بازه‌ها در هر دو دوره سینوسی برآورد شده است. با کاهش دبی رودخانه به علت سد رودخانه توانایی فرسایش کناره‌ها را از دست داده و تکامل پیچانرودها متوقف شده است و به سمت سینوسی شدن رفته است. نتایج پارامترهای مورفومتری با نتایج خروجی‌های مدل GCD همبستگی مثبت خوبی را نشان می‌دهد. در زمینه تأثیر ساخت سد در کاهش جریان آب و رسوب‌گذاری، نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات (پوپل^۱ و همکاران، ۲۰۱۳)، (دینسیوس^۲ و نیلسون^۳

^۱ - Poeppl

^۲ - Dynesius

^۳ - Nilsson

، (۱۹۹۴) ، (موریس^۱ و استنفورد^۲ ، ۲۰۱۱) ، (ادایر^۳ و همکاران ، ۲۰۰۴ ؛ کونز^۴ و همکاران ، ۲۰۱۱) ، (ویلیامز^۵ و ولمن^۶ ، ۱۹۸۴ ؛ گرانت^۷ و همکاران ، ۲۰۰۳) همسو و در یک راستا است. در زمینه به‌کارگیری مدل GCD و برآورد میزان فرسایش و رسوب و تغییرات ژئومورفولوژی بستر رودخانه نتایج این تحقیق مشابهت بسیار زیادی با پژوهش‌های (ویلیامز^۸ ، ۲۰۱۲) ، (ویتون^۹ و همکاران ، ۲۰۰۹) ، (برازینگتون^{۱۰} و همکاران ، ۲۰۱۲) و (کوالی^{۱۱} و همکاران ، ۲۰۱۷) دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند در شناسایی اثرات مختلف ژئومورفولوژی، زیست‌محیطی ناشی از ساخت سد بر روی رودخانه‌ها مثرتر واقع شده و ژئومورفولوژیست‌ها را در مدیریت بهتر محیط یاری نماید. از آنجاکه مدل GCD به‌صورت کل‌نگری و سیستمی رژیم‌های حاکم بر رودخانه را در بازه‌های مختلف زمانی موردبررسی قرار می‌دهد به کارشناسان ژئومورفولوژی کمک می‌کند تا مخاطرات طبیعی ناشی از تحولات فرم‌ها را در طول زمان به‌موقع تشخیص داده و از طریق روش‌های مناسب از خسارت‌های احتمالی جلوگیری نماید.



شکل ۲۶: درصد تغییرات کلی حجمی مدل‌های مختلف در سری‌های زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۳ و ۲۰۰۷-۲۰۰۳

جدول ۸: بررسی کلی تغییرات پارامترهای مورفومتری رودخانه سجاسرود در پایین دست سد گلابر

ضریب خمیدگی	طول کانال	زاویه مرکزی	تعداد پیچان رود	سال
۳/۶۳	۲۶/۲۰۱	۱۲۸	۱۳۰	سال ۲۰۰۳
۳/۵۸	۲۵/۷۸	۱۱۷/۷۴	۱۳۱	سال ۲۰۱۹
-۰/۰۵	-۰/۴۲۱	-۱۰/۲۶	۱	میزان تغییرات

- 1 - Morris
- 2 - Stanford
- 3 -adair
- 4 -Kunz
- 5 -Williams
- 6 -Wolman
- 7 -Grant
- 8 -Williams
- 9 -Wheaton
- 10 -Brasington
- 11 -Cavali

منابع

- آذرنگ، فرهنگ؛ تلوری، عبدالرسول؛ صدقی، حسین؛ و شفاعی بجستان، محمود. (۱۳۹۵). بررسی شرایط فرسایش و رسوب رودخانه کرخه در پایین دست سد مخزنی. علوم و مهندسی آبخیزداری، سال دهم، ۱۵-۲۶.
- اعظم طیبی؛ محمد فرجی؛ و شهرام یوسفی خانقاه. (۱۳۹۷). ارزیابی تأثیر احداث سد مارون بر مورفولوژی رودخانه و تغییر کاربری اراضی پایین دست. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، (۲)۷۱، ۴۱۹-۴۳۰.
- بیاتی، مریم؛ کرمی، فریبا؛ رجبی، معصومه؛ و مختاری، داوود. (۱۳۸۸). تغییرات ژئومورفولوژیکی ناشی از احداث سدهای سهند و ملاجیغ در بستر رودخانه‌های قرتقو و شور و دامنه‌های مشرف به دریاچه‌های سدها (واقع در دامنه‌های شرقی کوهستان سهند). پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی سابق)، چهل (۶۸).
- جوکار سرهنگی؛ عیسی؛ تلنک؛ و لرستانی. (۲۰۱۸). بررسی تغییرات مورفومتری رودخانه با تأکید بر پیچان رودها (مطالعه موردی: رودخانه چهل‌چای-نرماب). مجله آمایش جغرافیایی فضا، (۲۶)۷، ۱۷-۳۰.
- حسین زاده، محمد مهدی؛ و اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مفاهیم، اشکال و فرآیندها. تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- خسروی، انتظاری؛ احمدآبادی؛ علی؛ پورموسوی؛ و سیدموسی. (۲۰۲۰). تحلیل اثر توسعه شهری تهران بر چرخه هیدرولوژی و ژئومورفولوژی رودخانه اوین-درکه. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، (۱)۹، ۱۸۴-۲۰۲.
- رضایی مقدم محمدحسین؛ جباری ایرج؛ و پیروزی نژاد نوشین. (بی تا). بررسی الگوهای رودخانه‌ای متاندری، شریانی و آنابرنچینگ با استفاده از شاخص‌های شریانی و خمیدگی در رودخانه گاماسیاب.
- رضایی مقدم، محمد حسین؛ نیکجو، محمدرضا؛ و کیانی، وحید. (۱۳۹۵). تحلیل کمی مورفولوژی مجرای رودخانه سجاجسرد قبل و بعد از احداث سد گلابر (پایین دست سد) (پایان نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه تبریز، دانشگاه تبریز.
- سربازی؛ حاجی بیگلر؛ و گوهری. (بی تا). کاربرد سنجش از دور در تعیین تغییرات مورفولوژی رودخانه کشف رود. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، (۱)۶، ۱۵۰-۱۶۵.
- شفیعی خورشیدی، فاطمه؛ متین فر، حمید رضا؛ علوی پناه، سید کاظم؛ و فرخی. (۱۳۹۰). تولید مدل رقومی ارتفاع با استفاده از زوج تصویر سنجنده ASTER سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، (۳)۲، ۱-۱۱.
- فصاحت وجیهه؛ ساداتی نژاد سیدجواد؛ هنربخش افشین؛ و صمدی بروجنی حسین. (۱۳۹۳). تأثیر احداث سد مخزنی در میزان کاهش دبی اوج سیلاب. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، (۱۰)۵، ۴۴-۵۴.
- محمد شریفی کیا؛ سیاوش شایان؛ سید مروت افتخاری؛ و امیر کرم. (۱۳۹۶). تحلیل تغییرات مورفولوژیکی رودخانه ناشی از احداث سد طالقان بر پایه تفاضل سنجی زمانی داده‌های سنجش از دوری. مدرس علوم انسانی (برنامه ریزی و آمایش فضا)، سال بیست و یکم، ۲۴۳-۲۶۳.
- نیری، هادی. (۱۳۹۴). تحلیل مورفولوژیکی مجرای رودخانه مه‌باد و تأثیر احداث سد بر آن. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۱۵)۳۷، ۱۵۵-۱۷۸.
- یمانی مجتبی؛ دولتی جواد؛ و زارعی علیرضا. (بی تا). تأثیرگذاری عوامل هیدرو ژئومورفیک در تغییرات زمانی و مکانی بخش میانی رودخانه اترک.
- Adair, E Carol; Binkley, Dan; & Andersen, Douglas C. (2004). Patterns of nitrogen accumulation and cycling in riparian floodplain ecosystems along the Green and Yampa rivers. *Oecologia*, 139(1), 108-116.
- Brasington, J.; Rumsby, B. T.; & McVey, R. A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973-990. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y)

- Brasington, J.; Vericat, D.; & Rychkov, I. (2012). Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning: MODELING RIVER BED MORPHOLOGY WITH TLS. *Water Resources Research*, 48(11). <https://doi.org/10.1029/2012WR012223>
- Brasington, James; Langham, Joe; & Rumsby, Barbara. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53, 299-316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)
- Cavalli, Marco; Goldin, Beatrice; Comiti, Francesco; Brardinoni, Francesco; & Marchi, Lorenzo. (2017). Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. *Geomorphology*, 291, 4-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>
- Croke, Jacky; Todd, Peter; Thompson, Chris; Watson, Fiona; Denham, Robert; & Khanal, Giri. (2013). The use of multi temporal LiDAR to assess basin-scale erosion and deposition following the catastrophic January 2011 Lockyer flood, SE Queensland, Australia. *Geomorphology*, 184, 111-126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.023>
- Cucchiario, Sara; Cazorzi, Federico; Marchi, Lorenzo; Crema, Stefano; Beinat, Alberto; & Cavalli, Marco. (2019). Multi-temporal analysis of the role of check dams in a debris-flow channel: Linking structural and functional connectivity. *Geomorphology*, 345, 106844.
- Cutler, Joseph S; Olivos, J Andrés; Sidlauskas, Brian; & Arismendi, Ivan. (2020). Habitat loss due to dam development may affect the distribution of marine associated fishes in Gabon, Africa. *Ecosphere*, 11(2), e03024.
- David, Mélodie; Labenne, Amaury; Carozza, Jean-Michel; & Valette, Philippe. (2016). Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAMix). *Geomorphology*, 258, 21-39.
- Dudgeon, David; Arthington, Angela H; Gessner, Mark O; Kawabata, Zen-Ichiro; Knowler, Duncan J; Lévêque, Christian; ... Stiassny, Melanie LJ. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological reviews*, 81(2), 163-182.
- Dynesius, Mats; & Nilsson, Christer. (1994). Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 266(5186), 753-762.
- Eker, Remzi; Aydın, Abdurrahim; Bühler, Yves; & Stoffel, Andreas. (2018). SFM-BASED 3D POINT CLOUDS IN DETERMINATION OF SNOW DEPTH FROM HIGH-RESOLUTION UAS DATA AS ALTERNATIVE METHODS: IS IT POSSIBLE TO USE?
- Favalli, M.; Fornaciai, A.; Mazzarini, F.; Harris, A.; Neri, M.; Behncke, B.; ... Boschi, E. (2010). Evolution of an active lava flow field using a multitemporal LIDAR acquisition. *Journal of Geophysical Research*, 115(B11). <https://doi.org/10.1029/2010JB007463>
- Graf, William L. (1999). Dam nation: A geographic census of American dams and their large scale hydrologic impacts. *Water resources research*, 35(4), 1305-1311.
- Grant, Gordon E; Schmidt, John C; & Lewis, Sarah L. (2003). A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. *Water Science and Application*, 7, 209-225.
- Haas, Florian; Hilger, Ludwig; Neugirg, Fabian; Umstädter, Kathrin; Breitung, Christian; Fischer, Peter; ... Becht, Michael. (2015). Quantification and analysis of geomorphic processes on a recultivated iron ore mine on the Italian island Elba using long-time ground-based LIDAR and photogrammetric data by an UAV. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 6271-6319. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-6271-2015>

- James, L. Allan; Hodgson, Michael E.; Ghoshal, Subhajit; & Latiolais, Mary Megison. (2011). *Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing : The temporal dimension of geospatial analysis.*
- Kaliraj, S.; Chandrasekar, N.; & Ramachandran, K. K. (2017). *Mapping of coastal landforms and volumetric change analysis in the south west coast of Kanyakumari, South India using remote sensing and GIS techniques. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 20(2), 265-282.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.006>
- karslan, S.; Coşkun, S. B.; & Taşkın, B. (2005). *Transient analysis of dam reservoir interaction including the reservoir bottom effects. Journal of Fluids and Structures, 20, 1073-1084.* <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.004>
- Kondolf, George Mathias; Rubin, Zan K; & Minear, JT. (2014). *Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. Water Resources Research, 50(6), 5158-5169.*
- Korup, Oliver. (2005). *Geomorphic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: Fundamental problems and approaches. Geomorphology, 167-188.* <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.013>
- Kunz, Manuel J; Anselmetti, Flavio S; Wüest, Alfred; Wehrli, Bernhard; Vollenweider, Adrian; Thüiring, Silvan; & Senn, David B. (2011). *Sediment accumulation and carbon, nitrogen, and phosphorus deposition in the large tropical reservoir Lake Kariba (Zambia/Zimbabwe). Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 116(G3).*
- Lane, Stuart N.; Westaway, Richard M.; & Murray Hicks, D. (2003). *Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. Earth Surface Processes and Landforms, 28(3), 249-271.* <https://doi.org/10.1002/esp.483>
- Larue, Jean-Pierre. (2008). *Effects of tectonics and lithology on long profiles of 16 rivers of the southern Central Massif border between the Aude and the Orb (France). Geomorphology, 93(3-4), 343-367.*
- Latrubesse, Edgardo M; Arima, Eugenio Y; Dunne, Thomas; Park, Edward; Baker, Victor R; d'Horta, Fernando M; ... Baker, Paul A. (2017). *Damming the rivers of the Amazon basin. Nature, 546(7658), 363-369.*
- Latrubesse, Edgardo M; d'Horta, Fernando M; Ribas, Camila C; Wittmann, Florian; Zuanon, Jansen; Park, Edward; ... Baker, Paul A. (2021). *Vulnerability of the biota in riverine and seasonally flooded habitats to damming of Amazonian rivers. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 31(5), 1136-1149.*
- Lorang, Mark S.; & Aggett, Graeme. (2005). *Potential sedimentation impacts related to dam removal: Icicle Creek, Washington, U.S.A. Geomorphology, 71(1-2), 182-201.* <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.013>
- Magilligan, Francis J; & Nislow, Keith H. (2001). *LONG TERM CHANGES IN REGIONAL HYDROLOGIC REGIME FOLLOWING IMPOUNDMENT IN A HUMID CLIMATE WATERSHED 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 37(6), 1551-1569.*
- Marcinkowski, Pawel; & Grygoruk, Mateusz. (2017). *Long-Term Downstream Effects of a Dam on a Lowland River Flow Regime: Case Study of the Upper Narew. Water, 9(10).* <https://doi.org/10.3390/w9100783>
- Milan, David J.; Heritage, George L.; & Hetherington, David. (2007). *Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. Earth Surface Processes and Landforms, 32(11), 1657-1674.* <https://doi.org/10.1002/esp.1592>
- Morris, Michael R; & Stanford, Jack A. (2011). *Floodplain succession and soil nitrogen accumulation on a salmon river in southwestern Kamchatka. Ecological Monographs, 81(1), 43-61.*

- Naiman, Robert J; & Decamps, Henri. (1997). *The ecology of interfaces: riparian zones. Annual review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621-658.
- Nguyen, Hoang Huu; Dargusch, Paul; & Moss, Patrick. (2016). *A review of the drivers of 200 years of wetland degradation in the Mekong Delta of Vietnam. Regional Environmental Change*, 16(8), 2303-2315.
- Orem, Caitlin A.; & Pelletier, Jon D. (2015). *Quantifying the time scale of elevated geomorphic response following wildfires using multi-temporal LiDAR data: An example from the Las Conchas fire, Jemez Mountains, New Mexico. Geomorphology*, 232, 224-238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.006>
- Pasha, M Fayzul K; Yeasmin, Dilruba; & Rentch, Jeremy W. (2015). *Dam-lake operation to optimize fish habitat. Environmental Processes*, 2(4), 631-645.
- Petts, Geoffrey E; & Gurnell, Angela M. (2005). *Dams and geomorphology: research progress and future directions. Geomorphology*, 71(1-2), 27-47.
- Poepl, Ronald E; Keesstra, Saskia D; Keiler, Margreth; Coulthard, Tom; & Glade, Thomas. (2013). *Impact of dams, dam removal and dam-related river engineering structures on sediment connectivity and channel morphology of the Fugnitz and the Kaja Rivers (pp. 607-614). Presented at the 5th Symposium on Research in Protected Areas.*
- Sanyal, Joy. (2017). *Predicting possible effects of dams on downstream river bed changes of a Himalayan river with modmorphodynamic elling. Quaternary International*, 453, 48-62.
- Słowik, Marcin; Kiss, Kinga; Czigány, Szabolcs; Gradwohl-Valkay, Alexandra; Dezső, József; Halmai, Ákos; ... Pirkhoffer, Ervin. (2021). *The influence of changes in flow regime caused by dam closure on channel planform evolution: insights from flume experiments. Environmental Earth Sciences*, 80(4), 165. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09437-5>
- Smith, Virginia B; & Mohrig, David. (2017). *Geomorphic signature of a dammed Sandy River: the lower Trinity River downstream of Livingston Dam in Texas, USA. Geomorphology*, 297, 122-136.
- Surian, Nicola. (1999). *Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(12), 1135-1151.
- Wheaton, Joseph M.; Brasington, James; Darby, Stephen E.; & Sear, David A. (2009). *Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. Earth Surface Processes and Landforms*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Williams, Garnett P; & Wolman, Markley Gordon. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers (Vol. 1286). US Government Printing Office.*
- Williams, Richard. (2012). *DEMs of difference. Geomorphological Techniques*, 2.
- Xiang, Jie; Jianping, Chen; Sofia, Giulia; Tian, Yi; & Tarolli, Paolo. (2018). *Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey. Environmental Earth Sciences*, 77, 220. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7383-9>
- Zheng, Yuexin; Zhang, Guangxin; Wu, Yanfeng; Xu, Y. Jun; & Dai, Changlei. (2019). *Dam Effects on Downstream Riparian Wetlands: The Nenjiang River, Northeast China. Water*, 11(10), 2038. <https://doi.org/10.3390/w11102038>