

بررسی عوامل مهم و مؤثر بر فرسایش خاک و رسوب‌زایی رودخانه شیرین‌دره با بهره‌گیری از رویکردهای سنجش از دور و GIS

غلامحسین اکبری^{۱*}، میثم امانی^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۱۶، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۲/۱۰)

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، به‌کارگیری و تبیین کاربرد و اهمیت تصاویر چندزمانه (تکرار زمانی) ماهواره‌ای لندست در بارزسازی تغییرات حریم (بستر و کرانه‌ها) رودخانه شیرین‌دره به منظور ارزیابی تغییرات مورفولوژی رودخانه بوده است. ارزیابی میزان توسعه بستر عمومی و فعال، نوع رودخانه و تغییر شکل‌های رود طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ در پنج دوره ارزیابی شامل ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ (دوره اول)، ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ (دوره دوم)، ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ (دوره سوم)، ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ (دوره چهارم) و ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ (دوره پنجم) شده است. از مدل‌های تعیین فرسایش‌پذیری تجربی EPM و MPSIAC برای برآورد تغییرات رودخانه استفاده شده است. مدل EPM بر پایه اصل امتیازدهی به دو متغیر اصلی شامل شدت و میزان فرسایش و رسوب‌زایی، اقدام به بررسی میزان فرسایش‌پذیری حوضه آبریز کرده و مدل MPSIAC از تأثیر و نقش ۹ عامل مهم و مؤثر بر فرسایش خاک و رسوب‌زایی حوضه آبریز برای برآورد وضعیت رسوب‌دهی و فرسایش بهره می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که حوضه آبریز شیرین‌دره رسوب‌دهی کلی ۸۳۱۴۰/۳ مترمکعب بر سال و رسوب‌دهی در سطح برابر با ۲۱۷۹۰۹/۹۴ تن بر سال برای مدل EPM دارد. همچنین، مقادیر ۷۵۰/۹۵ مترمکعب بر سال و رسوب‌دهی در سطح برابر با ۶۵۸۵۰۹/۵ تن بر سال توسط مقدار تحویل رسوب ۳۸/۰۲ برای مدل MPSIAC است. همچنین، با انجام اعتبارسنجی مدل‌های تجربی مشخص شد که نتایج مدل MPSIAC نسبت به EPM در مورد حوضه بررسی شده دقت بیشتری داشته است.

کلیدواژه‌گان: تصاویر ماهواره‌ای، فرسایش خاک، مدل MPSIAC، مدل EPM.

مقدمه

رودخانه‌ها مهم‌ترین منبع تأمین آب برای مصارف مختلف از جمله شرب، صنعت و کشاورزی هستند. شناخت شرایط هر رودخانه در برنامه‌ریزی منابع آب، احداث سازه‌های هیدرولیکی و تأمین مصارف بخش‌های مختلف اهمیت دارد. شناخت یک رودخانه به‌تنهایی و با در نظر گرفتن شرایط طبیعی بسیار مهم است، حال می‌توان اهمیت زیاد این شناخت را زمانی درک کرد که شرایط یک رودخانه از حالت طبیعی خارج شده و دستخوش تغییرات غیرطبیعی می‌شود، زیرا رودخانه‌ها به دلیل ویژگی‌های طبیعی خود مدام در حال تغییر و تحول هستند. این تغییرات خواه در بعد فیزیکی و مورفولوژیکی و خواه به لحاظ کیفی، می‌تواند تحت تأثیر عوامل طبیعی و یا غیرطبیعی مانند دخالت‌های انسانی از قبیل ساخت سازه‌های هیدرولیکی مثل کانالیزاسیون و یا احداث سد و سد احداثی باشد. بنابراین، با احداث سازه‌های هیدرولیکی عظیم مانند سد‌ها زمینه تغییرات مضاعف بر شرایط رودخانه‌ها به‌خصوص در پایین‌دست این سازه‌ها به وجود می‌آید. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که بهره‌برداری از سد‌ها تأثیرات زیادی بر پایین‌دست رودخانه‌ها دارد [۱].

در کشور ما، ایران، با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دما، کاهش شدید بارش‌های جوی و خشکسالی‌های اخیر، شاهد کاهش آب ورودی به مخازن سد‌ها و در پی آن، کمتر شدن آب رهاشده از دریچه‌ها به سمت پایین‌دست هستیم. بنابراین، همواره ضرورت مطالعه و بررسی شرایط رژیم جریان رودخانه‌ها و متغیرهای هیدرولیکی آنها به منظور تصمیم‌گیری در مدیریت کلان آب کشور احساس می‌شود. میزان تأثیر سد بر مورفولوژی رودخانه به میزان زیادی به استراتژی سد و خصوصیات رودخانه پایین‌دست وابسته است. تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها به دلیل تغییر در میزان ظرفیت انتقال رسوبات است. با احداث سد‌های مخزنی، آب در پشت سد ذخیره می‌شود و آبی که به پایین‌دست سد می‌رسد، به عنوان آب زلال در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، آبی که وارد رودخانه در مسیر پایین‌دست می‌شود، ظرفیت انتقال رسوب زیادی دارد. سد مخزنی شیرین‌دره در ۶۵ کیلومتری شمال غربی شهر بجنورد روی رودخانه شیرین‌دره، یکی از سرشاخه‌های بزرگ شمالی رودخانه اترک، به شمار می‌رود. هدف از احداث این سد، تأمین آب کشاورزی اراضی

پایاب سد، مهار سیلاب و جلوگیری از خسارت‌های سیل و تأمین آب شرب شهر بجنورد است. به همین دلیل، بررسی و تحلیل وضعیت پایین‌دست این سد و تأثیری که بر سیل می‌گذارد، اهمیت دارد.

سد‌ها سبب تبدیل جریان طبیعی رودخانه به جریان تنظیمی می‌شوند. همچنین، سد‌ها باعث تغییرات گسترده‌ای در پارامترهای هیدرولیکی رودخانه می‌شوند [۱]. مدل MPSIAC در مقایسه با سایر مدل‌های تجربی موجود، بیشترین عوامل مؤثر بر فرسایش خاک را برای محاسبه فرسایش ویژه و تولید رسوب به کار گرفته است. ارائه نتایج به صورت کمی، از دیگر مزیت‌هایی است که این مدل را برجسته می‌سازد. کاربرد این مدل در مناطق با وسعت ۳۳ تا ۱۷ هزار هکتار مورد تأیید قرار گرفته و در مناطق با وسعت بیش از ۳۳ هزار هکتار نیز جواب‌های قابل قبولی به دست می‌دهد [۲]. Nislow & Magilligan تأثیرات احداث سد «چون» را بر تغییر رژیم جریان رودخانه وانگ در کشور کره جنوبی بررسی کردند. آنها دریافتند که احداث سد موجب تغییرات مهمی در رژیم هیدرولیکی جریان در پایین‌دست شده است [۳]. طی پژوهشی در آمریکا هم تغییرات رژیم هیدرولوژیکی ناشی از احداث سد‌ها روی رودخانه‌ها مطالعه شده است. تغییرات هیدروگراف در مقیاس‌های ماهانه و سالانه از تأثیرات احداث سد‌ها روی رژیم جدید رودخانه‌ها بوده است [۳]. در تحقیقی که آثار هیدرولوژیکی سد‌های بزرگ روی تعدادی از رودخانه‌های آمریکا بررسی شد، مقایسه‌ای بین جریان‌های طبیعی و تنظیم‌شده صورت گرفت که این امر باعث کاهش مقدار دبی ورودی در بالادست دریاچه سد بین ۶۷ درصد تا ۹۰ درصد شد [۴]. در پژوهش دیگری تأثیر ساخت سد بر رژیم جریان در پایین‌دست رودخانه زرد بررسی شد. پژوهشگران در تحقیق یادشده متوجه شدند که کاهش شدیدی در جریان رودخانه با مقیاس‌های زمانی گوناگون ایجاد شده است [۵]. در تحقیق انجام‌شده از تأثیرات جریان تنظیمی ناشی از احداث سد روی رودخانه سینی در کشور روسیه هم مشخص شد که کاهش دبی متوسط سالیانه رودخانه از آثار ساخت سد روی رودخانه بوده است [۶].

رودخانه به عنوان سیستمی پویا، مکان و خصوصیات مورفولوژیکی خود را همواره برحسب زمان، عوامل ژئومورفی، زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی و گاه بر اثر دخالت بشر تغییر

پایین‌دست این سازه‌ها به وجود می‌آید. هدف از تحقیق حاضر، تحلیل وضعیت موجود حد بستر و حریم رودخانه شیرین‌دره در پایین‌دست سد شیرین‌دره بجنورد است.

مواد و روش‌ها

منطقه بررسی شده

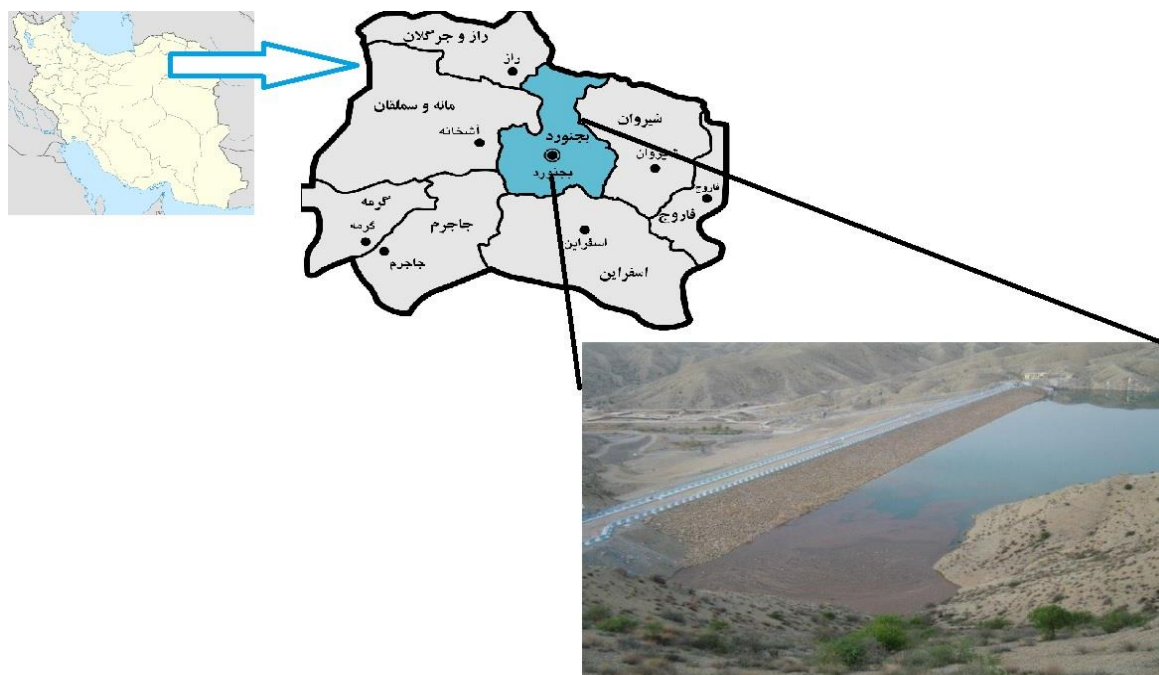
منطقه شیرین‌دره واقع در مجاورت رودخانه اترک و یکی از سدهای بزرگ خراسان شمالی قرار دارد، طبیعت بکر و آب‌های خروشان رودخانه شیرین‌دره به عنوان یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه اترک، بی‌شک یکی از ظرفیت‌های مهم پنهان گردشگری خراسان شمالی است. سد شیرین‌دره با هدف کنترل و مهار سیلاب‌ها، تأمین آب آشامیدنی شهر بجنورد، تأمین آب مورد نیاز صنایع و زمین‌های کشاورزی بنا شده است. عملیات ساخت این سد در سال ۱۳۷۵ آغاز شد و در فروردین ۱۳۸۴ به پایان رسید. منطقه بررسی شده با ایجاد دریاچه مخزنی، مکانی دیدنی و درخور توجه برای گردشگران به منظور شنا، قایقرانی و ماهیگیری شده است. سد شیرین‌دره با ۶۵ میلیون و ۸۰۰ هزار متر مکعب آب، بزرگ‌ترین سد استان خراسان شمالی به شمار می‌آید. ارتفاع این سد از بستر رودخانه ۶۳ متر و به طول ۴۸۳ متر از نوع سد خاکی با هسته رسی است. حجم بدنه و مخزن سد به ترتیب ۳/۲۵ و ۹۱/۵ میلیون مترمکعب محاسبه شده که سالانه حجم تنظیم‌شده‌ای برابر ۶۵/۸ میلیون مترمکعب را پوشش می‌دهد. این سد دبی جریان‌ی برابر ۱۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه را پوشش می‌دهد، اما دبی خروجی برای پایین‌دست سد حداکثر ۲۶/۷ مترمکعب بر ثانیه در تراز نرمال لحاظ شده است. موقعیت سد شیرین‌دره در شکل ۱ نشان داده شده است.

منطقه بررسی شده در محدوده شیرین‌دره در بخش بالادست آن رودخانه از شرایط کوهستانی عبور می‌کند و در بخش پایین‌دست ساختار مئاندری به خود می‌گیرد. شکل ۲ وضعیت تغییرات را در بستر اصلی رودخانه شیرین‌دره نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بستر رودخانه در بخش پایین‌دست و همچنین، محدوده مسیر در مناطقی که ژئومورفولوژی ساختمانی منطقه به صورت مناطق پست و دشت ظاهر شده، به صورت مئاندری گسترش پیدا کرده است. این مسئله نیز سبب توسعه صنایع کشاورزی، ایجاد مزارع و

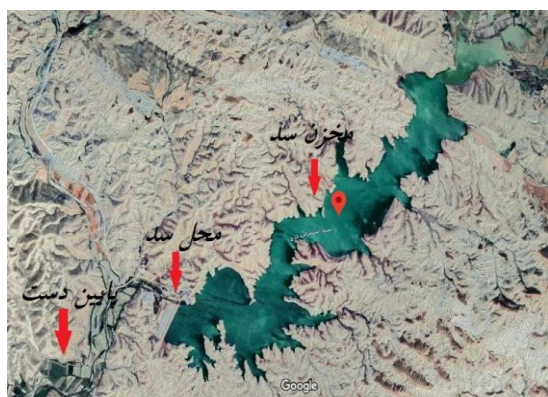
می‌دهد [۷]. مطالعات زیادی روی بسیاری از سیستم‌های رودخانه‌ای، طی صد سال گذشته انجام شده، عوامل متعددی مانند کاربری اراضی در مجاورت رودخانه‌ها، شهرنشینی، زهکشی، ساخت سدها، انحراف مسیر رودخانه، برداشت معادن شن و ماسه و تأثیر دینامیک رودخانه هر یک تغییرات درخور توجهی به دلیل دخالت‌های انسانی داشته است. حاصل هر یک از این عوامل تغییرات رودخانه‌ای به صورت فرسایش یا رسوب‌گذاری در بستر، تخریب دیواره‌ها، تغییر راستای جریان، تغییر و جابه‌جایی مئاندرها و تغییر در فرم بستر رودخانه‌ها را داشته است [۸]. بنابراین، تغییرات جریان در محدوده رودخانه‌ها سبب ایجاد تغییراتی در فرایندهای فرسایش‌دهنده و رسوب‌گذاری خواهد شد. با این حال، تغییرات در شرایط زمین‌شناسی هم توانسته در ایجاد شرایط فرسایش و رسوب‌گذاری تأثیر اساسی داشته باشد. به‌خصوص وجود این تغییرات روی مورفولوژی مسیر رودخانه‌ها و بستر آنها در حوضه‌های سیلابی تأثیر زیادی داشته و سبب دگرگونی رودخانه‌ها شده است. بررسی پلان و پروفیل رودخانه‌ها روش مناسبی برای درک پدیده‌های مورفولوژیک در رودخانه‌ها است. با در نظر گرفتن پیوسته بودن تغییرات حاصل از فرایندهای زمین‌شناسی فرساینده-رسوب‌گذار در مراحل مختلف زمانی و تکنیک‌های سنجش از دور می‌توان تغییرات شرایط حوضه سیلابی رودخانه را تعیین کرد. از روش EPM برای تعیین شدت فرسایش و فرسایش ویژه، ضریب رسوب‌دهی حوضه و تعیین دبی رسوب ویژه و دبی رسوب کل استفاده می‌شود [۹]. در این مطالعه با به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور و داده‌های ماهواره‌ای لندست TM ۴ تا ۸ از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ برای منطقه شیرین‌دره استفاده شده است تا بتوان تغییرات حوضه سیلابی مئاندر اصلی رودخانه شیرین‌دره در پایین‌دست سد را به دست آورد. سپس، با به‌کارگیری تصاویر راداری ASTER و مدل‌های فرسایش‌پذیری-رسوب‌دهی تجربی شامل EPM و MPSIAC ضرایب رسوب‌دهی و دبی حوضه و رودخانه شیرین‌دره محاسبه شده و به منظور ارزیابی تأثیرات هیدرولیکی و تغییر شکل‌های بستری و کرانه‌ای رودخانه در پایین‌دست از مدل عددی المان محدود و نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده است. با احداث این سازه‌های عظیم به‌خصوص سدهای مخزنی، زمینه تغییرات مضاعف بر شرایط رودخانه‌ها به‌خصوص

ساختار ممانداری خود را از دست نداده است. از سوی دیگر، سبب رونق کشاورزی در منطقه شده و این مسئله نیز سبب نفوذ مزارع کشاورزی به حریم رودخانه در پایین دست شده است (شکل ۳).

روستاها در مناطق پایین دست شده است. درخور یادآوری است که در سال‌های اخیر با ساخت سد شیرین‌دره، بیشتر این مناطق به زیر آب رفته و بخش‌های بالادست و مرکزی به صورت غرقابی است. با این حال، هنوز پایین دست سد،



شکل ۱. نمایی از سد شیرین‌دره در بجنورد



شکل ۳. تصویر ماهواره‌ای رودخانه شیرین‌دره و شرایط ممانداری پایین دست (تصویر گوگل مپ ۲۰۱۹)



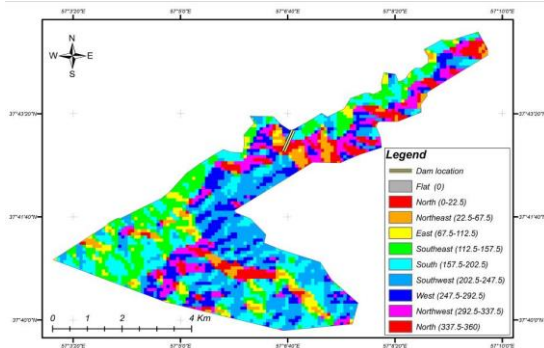
شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای رودخانه شیرین‌دره و شرایط ممانداری پایین دست (تصویر لندست ۱۹۹۵)

است. این نقشه‌ها در محیط GIS ژئورفرنس و موزاییک شده و محدوده مطالعه شده و مسیر رودخانه شیرین‌دره، به صورت پیوسته به لحاظ تغییرات ارتفاعی بررسی شده است. عامل اصلی این طبقه‌بندی، تغییرات ژئومورفولوژیک که وابسته به تغییرات رقوم ارتفاعی هستند، در نظر گرفته شده است، زیرا مماندرها همواره با تغییرات

نقشه‌های توپوگرافی

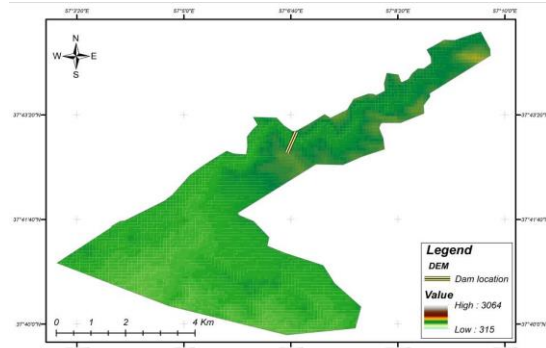
در تحقیق حاضر از نقشه‌های توپوگرافی مستخرج از داده‌های DEM استفاده شد. این نقشه‌ها به صورت رقومی درآمده و سپس، به صورت نقشه‌های تغییرات ارتفاعی درآمده است. شکل ۴ نقشه مربوط به تغییرات ارتفاعی منطقه که از داده‌های DEM استخراج شده را نشان داده

همچنین، با استفاده از داده‌های DEM، وضعیت شیب‌داری و شرایط الگوی زهکشی منطقه تهیه شده است (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه تغییرات جنبه شیب منطقه مطالعه شده

ژئومورفولوژیک، تغییر ساختاری اساسی نشان می‌دهند. هدف از به‌کارگیری این نقشه، برآورد وضعیت ژئومورفولوژی ساختاری منطقه بررسی شده است.



شکل ۴. نقشه DEM منطقه مطالعه شده

سنجندۀ اسکتر چندطیفی موسوم به MSS و دوربین‌های RBV سنجنده‌ها نسبت به انرژی امواج الکترومغناطیسی منعکس‌شده از سطح زمین واکنش نشان دادند و این واکنش به صورت «داده» چند طیفی روی چهار باند سنجندۀ MSS و سه باند دوربین RBV که دارای قدرت تفکیک پیکسلی ۷۹ متر برای سنجندۀ MSS در لندست ۱، ۲، و ۳ و دوربین RBV در لندست ۱ و ۲ و قدرت تفکیک ۳۰ متر برای دوربین RBV در لندست ۳ بودند، ضبط شد.

به منظور ارزیابی و انتخاب مدل مناسب برای تخمین رسوب در مطالعه حاضر از میانگین قدرمطلق خطا، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطای نسبی، به ترتیب از روابط ۱ تا ۳ استفاده شد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - z(x_i)| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2}{n}} \quad (2)$$

$$MARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{Z(x_i)} \quad (3)$$

بحث و نتیجه‌گیری

شکل‌های ۶ تا ۱۲ تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شده برای بازه‌های مختلف زمانی را نشان داده است. این شکل‌ها تصاویر ثبت شده از وضعیت رودخانه اصلی بررسی شده در

مدل EPM

مدل EPM یا روش تحلیل پتانسیل فرسایش‌پذیری با استفاده از اطلاعات پلات‌های فرسایشی و اندازه‌گیری رسوب طی چهل سال آزمایش در کشور یوگسلاوی سابق به دست آمده است. استفاده از این مدل از سال ۱۹۸۸ با ارائه مقالات در کنفرانس‌های بین‌المللی رایج شده و ضمن تعیین شدت فرسایش، میزان حمل رسوب در رودخانه‌ها نیز برآورد شده است. این روش به صورت گسترده در رودخانه‌هایی که آمار هیدرومتری و رسوب‌سنجی ندارند، کاربرد مناسبی داشته است [۵].

مدل MPSIAC

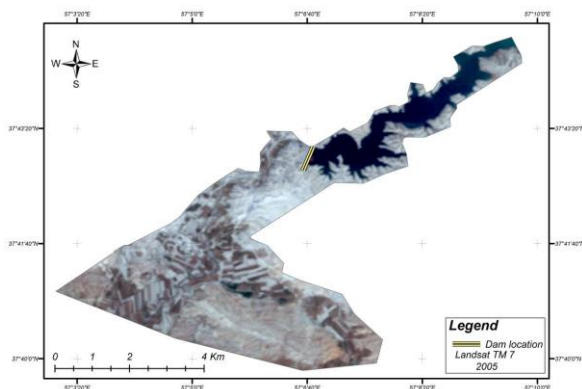
این روش در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط کمیته مدیریت آب در آمریکا برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک، غرب ایالات متحده آمریکا ارائه شد و برای اولین بار در یک منطقه تحقیقاتی WALNUT GULCH واقع در جنوب شرقی ایالت آریزونا آمریکا آزمایش شد. این روش برای اولین بار در ایران در سال ۱۳۵۲ در حوضه آبریز سد دز استفاده شد.

تصاویر ماهواره‌ای لندست

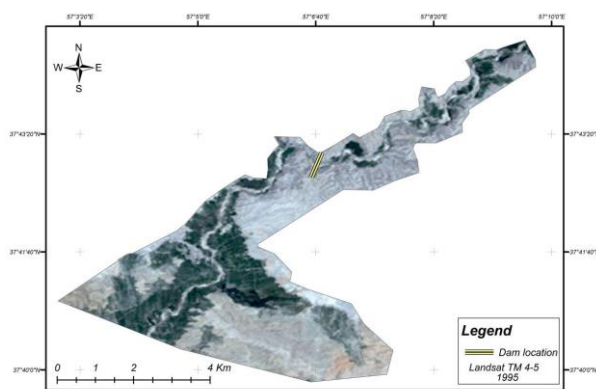
محدوده مطالعه شده در تحقیق حاضر را مجموعه تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سنجنده‌های TM4-5 تا TM8 پوشش داده است. این مجموعه تصاویر در بازه زمانی اصلی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ برای منطقه ذخیره شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

دوم داشته که نشان‌دهنده رخداد بارش‌های پیوسته و افزایش توسعه مخزن سد بوده است. دوره سوم را می‌توان محوریت تمرکز آب در پشت سد مخزنی شیرین‌دره توصیف کرد که نشان‌دهنده دوره پربارش در حوضه آبریز شیرین‌دره است. کاهش درخور توجه حجم مخزن در دوره‌های چهارم و پنجم نشان‌دهنده رخداد خشکسالی و به همراه عوامل انسانی برای کاهش حجم آب ورودی به مخزن سد است. به طوری که حجم آب تعیین‌شده بیانگر پایین‌ترین سطح موجود طی ۲۴ سال گذشته خود سد است. برای تهیه نقشه‌های تغییرات کرانه‌های تصاویر ماهواره‌ای به همراه اطلاعات رقوم ارتفاعی به صورت لایه‌های داده‌ها در محیط GIS وارد شده و تغییرات مربوط به رفلکتانس تصاویر برای حاشیه رودخانه اصلی مورد سنجش قرار گرفته است. به این منظور از باندهای حساس به تغییرات آب، پوشش گیاهی و رطوبت استفاده شده است.

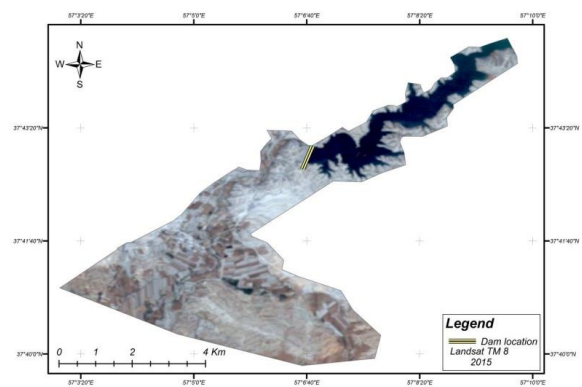
شیرین‌دره است که با تلفیق داده‌های باندهای RGB کاذب برای استخراج تغییرات بستری و کرانه‌های رودخانه شیرین‌دره به کار گرفته شده است. شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نقشه‌های تغییرات کرانه‌های تهیه‌شده برای بازه‌های زمانی مختلف را نشان داده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در دوره اول رودخانه شیرین‌دره (قبل از ساخت سد) تغییرات درخور توجهی برای بلوغ مئاندر در بخش‌های پایین‌دست سد نشان داده است که تغییرات مورفولوژی و ساختار زمین‌شناسی تبدیل کوهستان به دشت را بیان می‌کند. این مسئله سبب شده تا رودخانه در بخش پایین‌دست، توسعه بیشتری داشته باشد. در این دوره با ساخت سد شیرین‌دره، مخزن سد شروع به جمع‌آوری آب و مهار رواناب‌ها در پشت سد کرده که سبب افزایش تراکنش آب در این بخش (بالادست و مخزن سد) شده است. این مسئله روند افزایش درخور توجهی در دوره



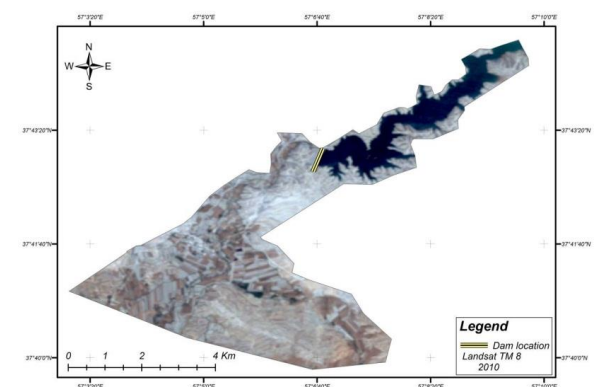
شکل ۷. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۰۵ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



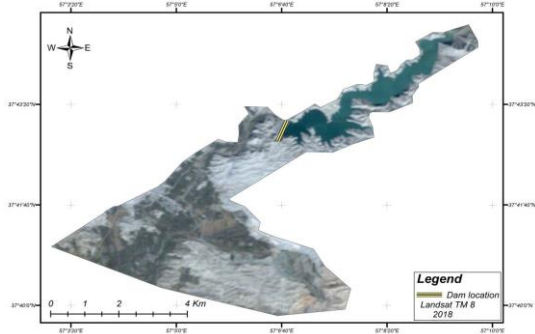
شکل ۶. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۱۹۹۵ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



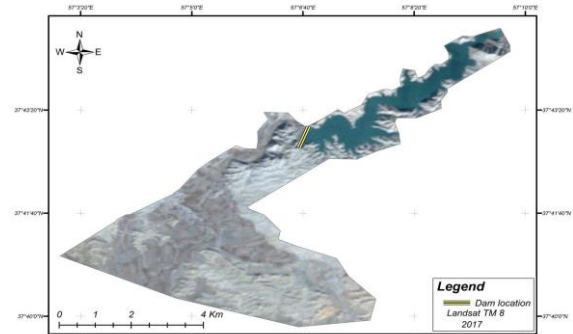
شکل ۹. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۱۵ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



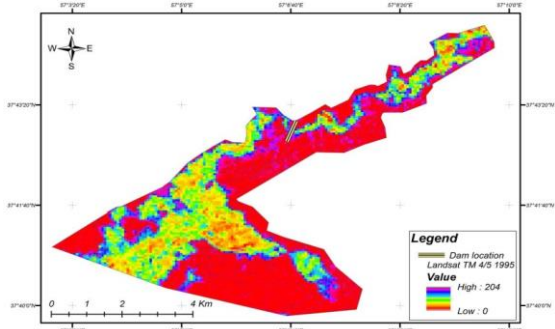
شکل ۸. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۱۰ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



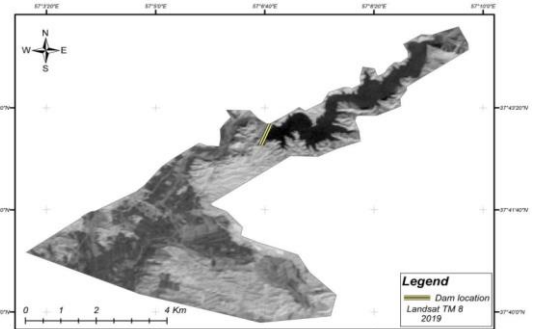
شکل ۱۱. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۱۸ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



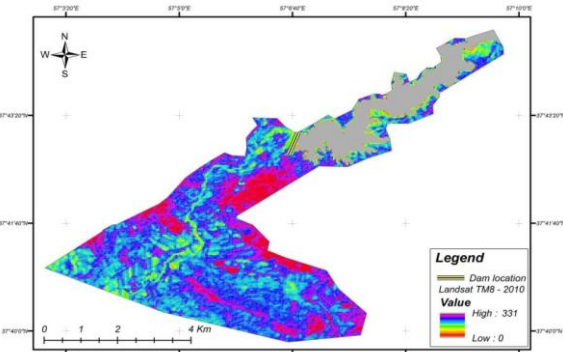
شکل ۱۰. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۱۷ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



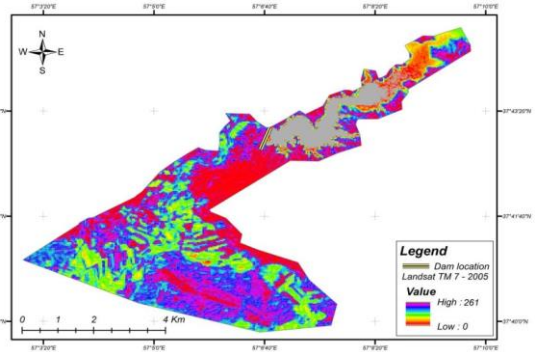
شکل ۱۳. تغییرات بستری و کرانه‌ای رودخانه شیرین‌دره برای دوره اول



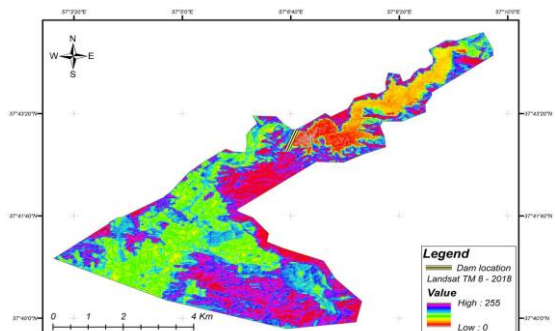
شکل ۱۲. تصویر ماهواره‌ای لندست برای دوره زمانی ۲۰۱۹ و وضعیت رودخانه در بالادست و پایین‌دست دره



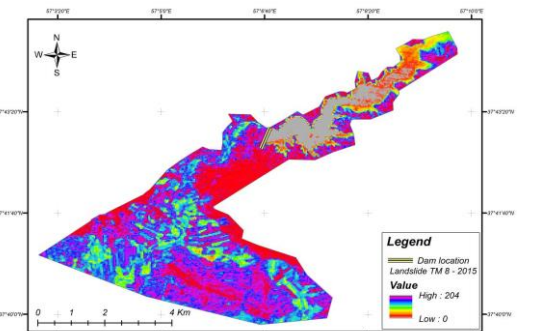
شکل ۱۵. تغییرات بستری و کرانه‌ای رودخانه شیرین‌دره برای دوره سوم



شکل ۱۴. تغییرات بستری و کرانه‌ای رودخانه شیرین‌دره برای دوره دوم



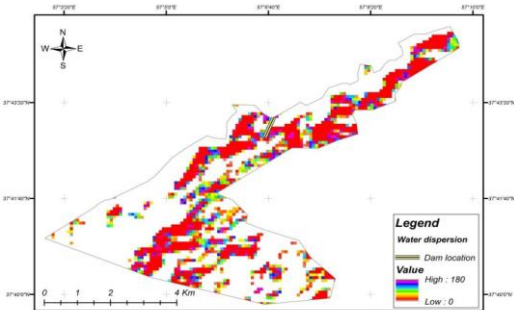
شکل ۱۷. تغییرات بستری و کرانه‌ای رودخانه شیرین‌دره برای دوره پنجم



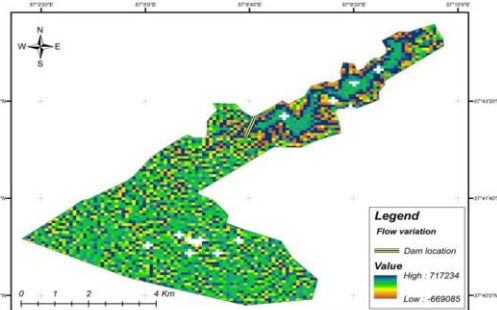
شکل ۱۶. تغییرات بستری و کرانه‌ای رودخانه شیرین‌دره برای دوره چهارم

سد عملاً تغییراتی را نشان نمی‌دهد. این مسئله بیانگر کاهش سطح آب و خشکیده شدن شاخه شرقی رودخانه و جداسازی آن از مسیر فعال رودخانه است. این مسئله با گسترش کاربری‌های اراضی در منطقه مواجه بوده است. از دوره سوم به بعد و شروع دوره چهارم و ظهور خشکسالی در منطقه، تغییرات فعال بستری رودخانه به کمترین مقدار خود رسیده و نسبت تغییرات کرانه‌ای در این بازه‌های زمانی بسیار کم ثبت شده است. به طوری که برابر جریان برآوردشده آب در محدوده رودخانه اصلی برای سالیان مطالعاتی، تغییرات پایین دست به کمترین حد خود رسیده است. این مسئله در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات برآوردشده مربوط به محدوده بالادست و مخزن سد طی ۲۴ سال گذشته است. شکل ۱۹ نیز تغییرات مربوط به تأثیر تخریب و فرسایش در کرانه‌ها و بستر رودخانه اصلی را توسط جریان آب رودخانه طی دوره بررسی شده نشان داده است. شکل ۱۹ نیز تغییرات برآوردشده را برای بخش شرقی بیشتر نشان داده است که فعال بودن فرسایش در این بخش‌ها توسط آب به صورت‌های مختلف را بیان می‌کند.

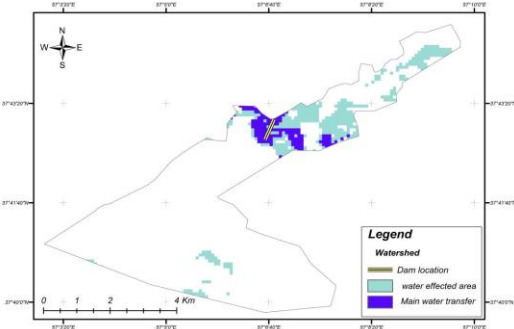
با توجه به این نقشه‌ها می‌توان بیان کرد که در منطقه بررسی شده طی دوره‌های اول و دوم به دلیل رخداد بارش و تجمع آب در محدوده بالادست و مخزن سد، میزان جریان آب به پایین دست سد بالا رفته است. اما با ایجاد پدیده خشکسالی طی سالیان بعدی و دوره‌های چهارم به بعد، این روند جریان در پایین دست کاهش داشته است. با نگرش مجدد به شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ در بخش پایین دست رودخانه می‌توان گفت که قبل از ساخت سد، رودخانه اصلی مائندهای دشت خود را در این بخش به صورت درخور توجهی رشد داده و بلوغ کامل را برای تغییرات گوناگون خود به دست آورده است. گسترش تغییرات و حرکت بستر رودخانه شیرین‌دره طی دوره اول این مسئله را تصدیق می‌کند. با ایجاد سد در دوره دوم، دو مسیر اصلی برای شاخه‌های مائندر در بستر عمومی پایین دست و دشت مشاهده شده که سبب ایجاد رودخانه‌های مائندری مرکزی دو شاخه در این محدوده است. همچنین، گسترش کاربری‌های کشاورزی بر محدودسازی بستر رودخانه مائندری در این بخش به طور مشخص، عمل کرده است. با ایجاد سد و تجمع آب رودخانه در مخزن سد، حجم تغییرات در پایین دست محدود شده و یکی از شاخه‌های مائندر پایین دست



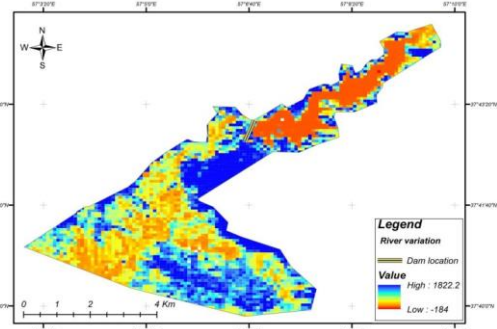
شکل ۱۹. وضعیت تغییرات عامل توسط جریان آب سطحی رودخانه در بستر فعال خود



شکل ۱۸. وضعیت تغییرات جریان آب در محدوده مسیر رودخانه اصلی شیرین‌دره



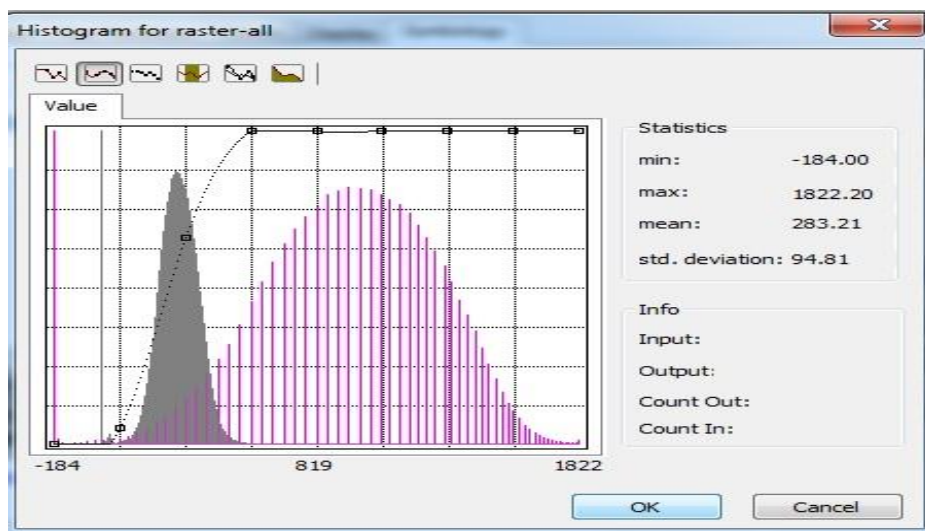
شکل ۲۱. شرایط توزیع جریان آب فعال و وضعیت انتقال آب طی دوره بررسی شده



شکل ۲۰. وضعیت تغییرات حریم رودخانه شیرین‌دره طی دوره بررسی شده

حال حاضر، رودخانه در شاخه غربی پایین‌دست سد در جریان است که تغییرات حریم این بخش نسبت به شاخه شرقی بیشتر بوده و مشخص‌تر است. به این منظور، با ترسیم میزان تأثیرپذیری جریان آب در محدوده سد رودخانه، بالادست و پایین‌دست رودخانه می‌توان بیشترین تمرکز تأثیرات را در محدوده مسیر مشخص کرد. همچنین، می‌توان با ترسیم تغییرات هیدروگراف سطح تغییرات آب برای محدوده مسیر رودخانه، وضعیت نوسانات آبی را برای این رودخانه محاسبه کرد. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نقشه تغییرات و هیدروگراف نوسانات آبی را در محدوده مسیر رودخانه شیرین‌دره نشان داده است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه رسوب‌دهی و فرسایش مسئله بسیار مهمی در محدوده بالادست و مخزن سد شیرین‌دره است، از مدل‌های تعیین فرسایش‌پذیری تجربی EPM و MPSIAC برای برآورد تغییرات استفاده شده است.

با توجه به شکل ۱۹ می‌توان گفت که حرکت آب در فرسایش آبی بخش‌های شرقی نسبت به بخش‌های غربی، عاملی بر افزایش بار بستری و رسوب‌دهی مخزن سد است که با شواهد میدانی و گزارش‌های مسئولان سد کاملاً هماهنگی دارد. با ترسیم تغییرات کرانه‌ای و بستری رودخانه برای کل بازه‌های زمانی بررسی‌شده، نقشه تغییرات حریم رودخانه به دست می‌آید که در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، تغییرات رودخانه در بخش پایین‌دست کم‌عمق‌تر ولی گسترده‌تر است. این مسئله به وضعیت زمین‌شناسی و لایه‌های ژئومورفولوژی محدوده مرتبط است و از آن تأثیر می‌پذیرد. در پایین‌دست سد نیز تغییرات رودخانه ماندیری در بخش غربی نسبت به بخش شرقی بیشتر بوده است. تحلیل‌های سنجش از دور نشان داد خشک بودن شاخه شرقی رودخانه به صورت میدانی به اثبات رسیده است.



شکل ۲۲. نمودار تغییرات رطوبت-تبخیر در مسیر رودخانه اصلی طی دوره بررسی شده

DEM و تصاویر راداری و ماهواره‌ای در GIS این عمل ممکن است. از سوی دیگر، با مراجعه به جدول‌های استاندارد و امتیازبندی محدوده بررسی‌شده و نقشه‌های مورد نیاز منطقه، مدل EPM برای حوضه شیرین‌دره تهیه شده است. جدول ۱ نتایج مربوط به برآورد مدل EPM برای حوضه را نشان داده است. درخور یادآوری است برای تهیه مدل تجربی EPM از داده‌های سازمان هواشناسی منطقه، گزارش بیان آب منطقه‌ای و شرح وضعیت کاربری جهاد کشاورزی منطقه استفاده شده است.

ارزیابی شرایط رسوب‌دهی-فرسایش رودخانه شیرین‌دره همان‌طور که پیش‌تر در مورد روابط و رویکردهای مطرح‌شده در زمینه به‌کارگیری مدل EPM گفته شد، این مدل برپایه اصل امتیازدهی به دو متغیر اصلی شامل شدت و میزان فرسایش و رسوب‌زایی، میزان فرسایش‌پذیری حوضه آبریز را بررسی می‌کند. به این منظور، به تهیه نقشه‌های پایه برای تعیین ضرایب تأثیر پارامتریک هر یک از المان‌های بیان‌شده نیاز دارد. بنابراین، با به‌کارگیری رویکرد ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مربوط به داده‌های

جدول ۱. نتایج حاصل برای تهیه مدل EPM برای حوضه شیرین دره

نام حوضه	شدت فرسایش	فرسایش ویژه	ضریب رسوب‌دهی	رسوب ویژه	رسوب کل	رسوب در واحد سطح
	(m ³ /km ² /y)	(m ³ /km ² /y)		(m ³ /km ² /y)	(m ³ /y)	(Ton/y)
شیرین دره	۱/۲۴۲	۱۹۰۹/۰۷	۰/۱۳۰	۲۴۸/۱۸	۸۳۱۴۰/۳	۲۱۷۹۰۹/۹۴

آب منطقه‌ای، هواشناسی و جهاد کشاورزی بهره گرفته شده است. جدول ۲ نتایج مربوط به برآورد مدل MPSIAC برای حوضه آبریز شیرین دره را نشان داده است. در این روابط Z^* میزان داده برآورد شده، Z مقدار متغیر اندازه‌گیری شده، n تعداد داده‌ها و MAE میانگین قدرمطلق خطا، RMSE جذر میانگین مربعات خطا و MARE میانگین قدرمطلق خطای نسبی است.

در کاربرد روش MPSIAC تأثیر و نقش نه عامل مهم و مؤثر بر فرسایش خاک و رسوب‌زایی حوضه بررسی و ارزیابی می‌شود. آن‌گاه نتایج این بررسی به صورت کمی که بر اهمیت و شدت تأثیر عوامل یادشده در تولید رسوب رودخانه اصلی مطالعه شده تأکید دارد، توسط رویکرد امتیازدهی نشان داده می‌شود. هریک از این عوامل به صورت میدانی و سنجش از دوری ارزیابی شده که به این منظور، از اطلاعات گزارش‌های سازمان‌های زمین‌شناسی،

جدول ۲. نتایج حاصل برای تهیه مدل MPSIAC برای حوضه شیرین دره

نام حوضه	درجه رسوب‌دهی	فرسایش ویژه	نسبت تحویل	میزان رسوب	رسوب در واحد سطح
		(m ³ /km ² /y)	رسوب (%)	(m ³ /km ² /y)	(Ton/y)
شیرین دره	۸۴/۲۱	۱۹۷۵/۱۴	۳۸/۰۲	۷۵۰/۹۵	۶۵۸۵۰۹/۵

جدول ۳. اعتبارسنجی مدل‌های EPM و MPSIAC

مدل	MAE	RMSE	MARE
EPM	۲/۸۵	۲/۸۵	۴۴۱/۷۹
MPSIAC	۲/۵	۲/۵	۲۵۰

پایین دست سد بالا رفته است. اما با ایجاد پدیده خشکسالی طی سالیان بعدی و دوره‌های چهارم به بعد این روند جریان در پایین دست کاهش نشان داده است. با ایجاد سد در دوره دوم زمانی، حجم تغییرات در پایین دست محدود شده است و یکی از شاخه‌های مئاندر پایین دست سد تغییراتی را نشان نمی‌دهد. این مسئله بیانگر کاهش سطح آب و خشکیده شدن شاخه شرقی رودخانه و جداسازی آن از مسیر فعال رودخانه است. این مسئله با گسترش کاربری‌های اراضی در منطقه مواجه بوده است. از دوره سوم به بعد و شروع دوره چهارم و ظهور خشکسالی در منطقه، تغییرات فعال بستری رودخانه به کمترین مقدار خود رسیده و نسبت تغییرات کرانه‌ای در این بازه‌های زمانی بسیار کم ثبت شده است. به طوری که برابر جریان برآوردشده آب در محدوده رودخانه اصلی برای سالیان

با توجه به نتایج جدول ۳ مشخص شد که نتایج مدل MPSIAC نسبت به EPM برای حوضه بررسی شده با دقت بیشتری همراه بوده است.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش رویکردهای سنجش از دور، وضعیت رودخانه شیرین دره در بالادست و پایین دست شناسایی شد و مشخص شد که رودخانه از نوع مئاندری است. وضعیت زمین‌شناسی و تغییرات ژئومورفولوژی کوهستان-دشت سبب شده که در پایین دست رودخانه مئاندری بیشتر توسعه داشته باشد و زودتر به بلوغ خود برسد. برپایه نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در حریم رودخانه شیرین دره طی دوره‌های اول و دوم به دلیل رخداد بارش و تجمع آب در محدوده بالادست و مخزن سد، میزان جریان آب به

- regime by dams. *Geomorphology Journal*. 2005; 71 (1-2):61-78.
- [4]. Graf WL. downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, *Geomorphology Journal*. 2006; 79 (3-4):336-360.
- [5]. Yan Y, Yang Zh, Liu Q, Sun T. Assessing effects of dam operation on flow regimes in the lower Yellow River. *Procedia Environmental Sciences*. 2010; 2:507-516.
- [6]. Stuefer S, Yang D, and Shiklomanov A. Effect of streamflow regulation on mean annual discharge variability of the Yenisei River, Cold Region Hydrology in a Changing Climate (Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011), Melbourne, Australia. 2011.
- [7]. Haghi AA, Habibi M, Ahmadipour H, Javaheri N. Theories of the creation and evolution of river windings. Farhang-e Zaban Publications, Tehran, Iran, 2013; 442 p. [Persian].
- [8]. Farrokhi Z, Barani, G, Arshad p. Investigation of river plan changes using remote sensing and GIS. Fifth Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. 2004. [Persian].
- [9]. Efthimiou N, Lykoudi E. Soil erosion estimation using the EPM model. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2016; 50(1), 305-314.
- مطالعاتی، تغییرات پایین‌دست به کمترین حد خود رسیده است. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری در کرانه‌ها و بستر رودخانه اصلی نتایج تخمین زده‌اند که بخش شرقی فرسایش بیشتری داشته که بیانگر فعال بودن فرسایش در این بخش‌ها توسط آب به صورت‌های مختلف است. در آخر نیز مشخص شد که نتایج مدل MPSIAC نسبت به مدل EPM در بررسی و ارزیابی تأثیر و نقش نه‌عامل مهم و مؤثر در فرسایش خاک و رسوب‌زایی برای حوضه مطالعه‌شده با دقت بیشتری همراه بوده است.

منابع

- [1]. Azarang F, Telluri A, Sedghi H, Shafaei Bajestan M. Effects of construction of large dams on flow conditions and hydraulic parameters of the river (Case study: Karkheh river downstream of reservoir dam). 2017; 31 (1): 11-27. [Persian].
- [2]. Noori H, Karami H, Farzin S, Siadatmousavi SM, Mojaradi B, Kisi O.. Investigation of RS and GIS techniques on MPSIAC model to estimate soil erosion. *Natural Hazards*. 2018; 91(1): 221-238.
- [3]. Magilligan F, Nislow K. Changes in hydrologic