

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای (مطالعه موردی: رودخانه هفت‌چشمه قزوین)

محمد مهدی حسین‌زاده* - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
نیلوفر برخورداری - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

چکیده

رودخانه‌ها سیستمی پویا بوده و برای رسیدن به تعادل بستر در مسیر خود برداشت، حمل، و رسوب‌گذاری می‌کنند. به همین دلیل، مشخصه‌های مورفولوژیک آن‌ها به‌طور پیوسته در طی زمان تغییر می‌کند. در این پژوهش از روش پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره برای بررسی عوامل مؤثر (شیب کناره، الگوی بیجان‌رودی، شیب طولی رودخانه، فرسایش خاک، پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی، و تنش برشی نزدیک کرانه) در ناپایداری و فرسایش کناری رودخانه هفت‌چشمه در روستای رزجرد از توابع استان قزوین بخش رودبار الموت (معلم کلایه) و به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر استفاده شده است. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر گوگل ارث، و بازدیدهای میدانی، پارامترهای هر بازه بررسی شد و سپس پهنه‌بندی رودخانه از نظر مخاطره‌آمیز بودن آن به پنج منطقه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، و خیلی کم تقسیم شد. نتایج نشان داد بیشتر بازه‌ها در رودخانه هفت‌چشمه از نظر حساسیت به فرسایش در وضعیت متوسط قرار دارند. اما در بازه‌های ۸ و ۹ به دلیل فعالیت انسانی زیاد در حریم رودخانه در طبقه متوسط تا زیاد از نظر مخاطره قرار گرفته‌اند. همچنین، در همه بازه‌ها به‌جز بازه ۱۰ به دلیل حساسیت مواد کناره نسبت به فرسایش در طبقه متوسط تا زیاد قرار گرفته‌اند.

واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری کانال، پهنه‌بندی، رودخانه هفت‌چشمه، فرسایش کناره‌ای، قزوین.

مقدمه

رودخانه‌ها به‌طور دائم در حال تغییر و تحول‌اند. مفهوم این جمله را کسانی که سالیان متمادی در حاشیه رودخانه‌ها سکنی داشته یا به فعالیت‌های کشاورزی مشغول‌اند به‌خوبی درک کرده‌اند و معمولاً خاطرات آنان بیانگر حرکت‌های موضعی و تغییر ابعاد رودخانه‌ها به‌طور تدریجی (تحت رژیم عادی جریان) یا ناگهانی تحت شرایط سیلاب‌هاست. تغییر و دگرگونی مستمر از اصول حاکم بر هر رودخانه‌ای است که همگام با حرکت و جاری شدن آب و رسوب در بستر آن، تغییر و جابه‌جایی در سایر مشخصات هندسی رودخانه به‌وقوع می‌پیوندد. جریان رودخانه‌ها در بستر آبرفتی همواره با فرسایش و انتقال رسوب همراه بوده است. وقوع فرسایش در بستر رودخانه‌ها، به‌صورت تدریجی یا توده‌ای، متضمن تغییراتی در شکل و مسیر و ظرفیت رودخانه‌هاست که ممکن است خسارات یا مشکلات مختلفی به دنبال داشته باشد. پیوند مستقیم رودخانه‌ها با مسائل اجتماعی، اقتصادی، و معیشتی جوامع عامل اصلی حساسیت نگاه بشری به تغییرات رودخانه‌هاست که معمولاً این جابه‌جایی‌ها اثرهای نامطلوبی در عوامل فوق ایجاد می‌کند. به همین جهت، ریخت‌شناسی یا علم رفتارشناسی رودخانه در پی شناخت قوانین حاکم بر تغییرات و علل و عوامل آن و همچنین پیش‌بینی رفتار

رودخانه‌هاست. رفتار رودخانه از دو دسته عوامل طبیعی و عوامل انسانی تأثیر می‌پذیرد. عوامل طبیعی مانند وقوع سیل، فرسایش خاک، لغزش زمین و عوامل انسانی مانند ساخت‌وساز تأسیسات، تغییر کاربری اراضی، و برداشت شن و ماسه از بستر نقش اساسی در رفتار و تشدید تغییرات رودخانه دارد.

فرسایش کناره تخریب کناره رودخانه و ناپایداری مجرای رودخانه را به دنبال داشته و این پدیده هنگامی تشدید می‌شود که مجرا و بستر رودخانه آبرفتی باشد (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۶). در رودخانه‌هایی که هنوز به نظام تعادلی نرسیده‌اند، تعریض و تعمیق رودخانه و در رودخانه‌های پیچان‌رودی عقب‌نشینی ساحل خارجی از پدیده‌های عادی به‌شمار می‌روند (تورن، ۱۹۸۱: ۴۷۱). دلایل عمده ناپایداری سواحل و دیواره‌های رودخانه را می‌توان شسته‌شدن ذرات خاک در اثر جریان و امواج، شسته‌شدن پاشنه شیب سواحل و ریزش و گسیختگی درونی آن، افزایش شیب سواحل در اثر فرسایش و آب‌شستگی، افزایش فشار منفذی در حالت کاملاً اشباع، گسیختگی درونی شیب به‌علت نشت آب به سمت رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زهکش‌های کشاورزی، و عوامل بسیار دیگر برشمرد (غفاری و همکاران، ۱۳۸۶: ۶۲). از سوی دیگر، پایداری رودخانه نیز تحت تأثیر مؤلفه‌های درونی شامل متغیرهای اقلیم، پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی، و شیوه یخ‌زدن و ذوب‌شدن (برترند و پاپانیکولاو، ۲۰۰۹: ۶۴۸۰) و مؤلفه‌های خارجی نیز شامل مورفولوژی رودخانه، مانند انواع الگوهای رودخانه (پیچان‌رودی، شریانی، و مستقیم) ویژگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی قوس‌های رودخانه‌ای، مواد بستر و کناره‌های رودخانه، متغیرهای هیدرولوژیکی جریان، و عامل تنش برشی است (مینگوی، ۲۰۱۰: ۳۹۱؛ توکالندنی، ۲۰۰۷: ۱۱۶۸). تغییر هر کدام از مؤلفه‌های درونی و خارجی پایداری رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به این موارد، نظارت بر تغییرات جانبی مجرا و ناپایداری بستر و بررسی علل اساسی این تغییرات از مؤلفه‌های اساسی مدیریت رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی محسوب می‌شود. با این شناخت، دانش مورد نیاز برای پیش‌بینی تغییرات آینده فراهم می‌شود.

روسگن (۲۰۰۱) در پژوهش در کلرادو به بررسی فرسایش کناره‌ای پرداخته است. در این روش میزان فرسایش کناره‌ای و میزان انتقال رسوبات رودخانه با توجه به اندازه‌گیری پارامترهایی شامل اندازه‌گیری ارتفاع کناره، زاویه، مواد سازنده کناره، توالی لایه‌ها، عمق شیارها، چگالی شیارها، و درصد حفاظت کناره انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که میزان فرسایش زمین‌شناسی و دخالت عوامل انسانی و بررسی میزان پوشش گیاهی کانال رودخانه در آنالیز پایداری کانال رودخانه، تثبیت کناره رودخانه، و مقدار رسوبات ناشی از فرسایش کناره‌ای رودخانه دخالت دارد. برترند و پاپانیکولاو (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای نقش تغییرات مورفولوژیکی حادث‌شده به‌وسیله جریان‌های عادی و سیلابی را در رودخانه تأقلمانتو در ایتالیا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند تا زمانی که دبی رودخانه پایین‌تر از دبی لبالی است و سیلاب‌های بزرگی را تجربه نکند، فرم بستر رودخانه منطبق با نوع جریان می‌شود و اشکال مورفولوژیکی منطبق با آن جریان شکل می‌گیرد. اما تغییرات مورفولوژیکی حادث‌شده به‌وسیله ۶ سیلاب نسبتاً بزرگ چشم‌گیر بوده و تغییرات بزرگی در مقطع عرضی بستر بعد از وقوع هر سیل رخ داده است. این مطالعه رابطه بسیار خوبی را بین اوج دبی و بستر فعال و میانگین تغییرات بستر نشان داده است. همچنین، تغییرات عرضی کانال بعد از وقوع هر سیل نشان داد که تفاوت‌های بسیار اساسی در حالت جریان معمولی و جریان سیلابی (جریان‌هایی با دوره بازگشت بیشتر از دو سال) وجود دارد. باندی اپادهی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی فرسایش کناره‌ای با استفاده از RS-GIS پرداختند و با استفاده از هشت پارامتر شامل فرسایش آبی، فاکتور سنگ‌شناسی، شیب کناره‌ای، پیچان‌رودی، گرادبان رودخانه، فرسایش خاک، و فعالیت‌های

انسانی میزان آسیب‌پذیری رودخانه هاورا و تیپورا را اندازه‌گیری کردند و منطقه را از نظر خطر فرسایش به پنج ناحیه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، و خیلی کم تقسیم کردند.

گوش و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی که در امتداد رودخانه بکرشوار^۱ در شرق هند انجام شد به تخمین منبع رسوب و فرسایش کناره‌ای با استفاده از مدل پتانسیل مخاطره فرسایش کناره‌ای (SBEHP) پرداختند. همچنین، با استفاده از شاخص‌های BEHI و NBS به بررسی فرسایش کناره بالادست و پایین‌دست رودخانه پرداختند و این دو شاخص را مقایسه کردند. تاهی و مین (۲۰۱۹) مکانیزم‌های اصلی ناپایداری کناره‌ای را مطالعه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد ویژگی‌های خاک و تغییرات سطح آب از عوامل مهم ناپایداری کناره‌ای است.

غفاری و همکاران (۱۳۸۶) تغییرات مورفولوژی کناره‌ای بابل‌رود را بررسی کرد. در این مطالعه برای تعیین و شناسایی نقاط مستعد فرسایش و رسوب‌گذاری، مقادیر حداکثر و حداقل تنش برشی سواحل راست و چپ و مجرای اصلی هر مقطع در دوره‌های بازگشت مختلف تعیین و در نهایت مناطق در معرض خطر فرسایش مشخص شده است. یمانی و شرقی (۱۳۹۱) عوامل مؤثر در فرسایش کناره رودخانه هررود در استان لرستان را بررسی کردند. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی با استفاده از روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر به بررسی وضعیت پایداری و مقایسه نتایج این روش‌ها با نتایج مطالعات صحرایی و ویژگی‌های مورفولوژیک هر کدام از بازه‌های مورد مطالعه در طبیعت پرداختند. حسین‌زاده و متش بیرانوند (۱۳۹۳) فرسایش کناره‌ای بخشی از رودخانه کشکان در استان لرستان در محدوده شهر پل‌دختر تا پل گاومیشان به طول ۲۵ کیلومتر را با استفاده از روش توالی زمانی استنتاجی بررسی کردند. حسین‌زاده و اسماعیلی (۱۳۹۴) در پژوهشی مدل‌سازی فرسایش کناره رودخانه را با استفاده از مدل BSTEM در رودخانه لایج انجام دادند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد پسروری اندازه‌گیری شده در کناره رود در سناریوهای مختلف از ۰ تا ۸۱ سانتی‌متر تغییر می‌کند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از روش BEHI (شاخص خطر فرسایش کناره‌ای)، به ارزیابی رودخانه قرانقوچای از نظر الگو و اندازه‌گیری میزان فرسایش کناره‌ای و ناپایداری کناره‌ها پرداختند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶)، برای بررسی فرسایش کناره رودخانه گلالی قروه به‌عنوان یک رودخانه ناپایدار، از نقشه‌برداری میدانی و گوگل‌ارث استفاده کردند و پارامترهای مورفولوژی مجرا و میزان فرسایش کناره رودخانه بر اساس شاخص تنش برشی نزدیک کناره رودخانه (NBS) را سگن را مطالعه کردند.

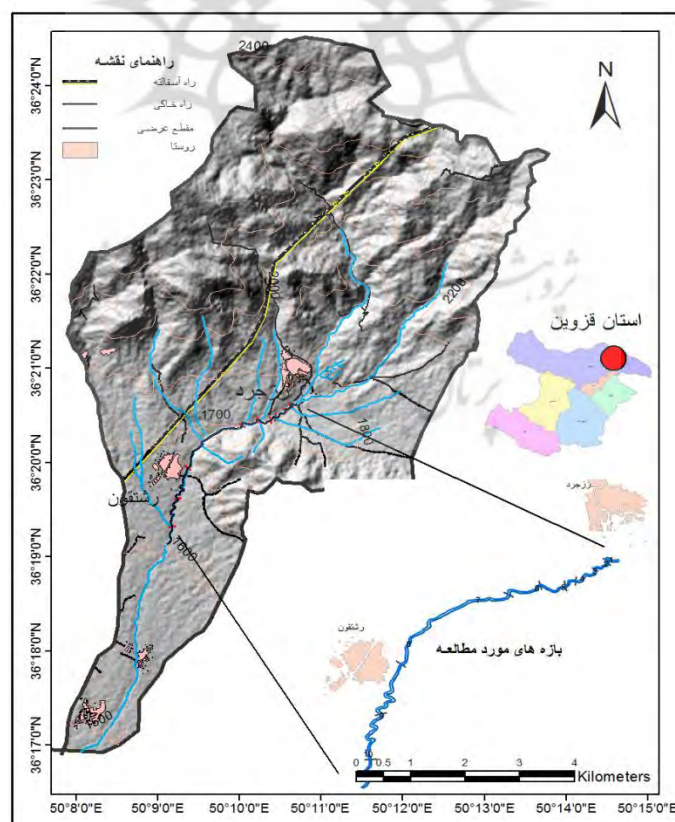
تحقیق حاضر با هدف بررسی ناپایداری و فرسایش کناره رودخانه هفت‌چشمه در روستای رزجرد از توابع استان قزوین بخش رودبار الموت (معلم کلایه) انجام گرفته است. به دلیل اهمیت رودخانه هفت‌چشمه و حوضه آن برای ادامه حیات ساکنان روستا به‌واسطه عبور طولی آن از دو طرف کناره‌های روستا و ارتباط مستقیم آن با فعالیت‌های کشاورزی و معیشتی مردم روستا، اهمیت انجام‌دادن این پژوهش را مشخص می‌کند.

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در شمال شرقی استان قزوین بخش رودبار الموت (معلم کلایه) با طول جغرافیایی $50^{\circ} 10' 14''$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 20' 27''$ به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر در روستای رزجرد در دامنه جنوبی البرز و جنوب منطقه الموت قرار دارد و به همین علت منطقه کوهستانی بود و بیشتر اراضی روستای رزجرد را کوه‌ها و تپه‌ها فراگرفته است (شکل ۱). کوه‌های موجود در این حوضه شامل آسو مرز، تل سیفون، زرده‌کش، سجاف، سیاسنگ، سیرکوه، قلعه، لاله‌چاک، نقاره‌خانه تپه، و

یخیند (شجاع‌الدین) است که از میان آن‌ها کوه یخیند (شجاع‌الدین) به ارتفاع ۲۴۴۵ در شمال غربی روستای رزجرد و یکی از بلندترین قله‌هایی است که نزدیک به شهر قزوین قرار دارد. قله دیگر، به نام نقاره‌خانه تپه، در جنوب روستا واقع است و ارتفاعی در حدود ۱۸۲۵ متر دارد. اهالی روستا این کوه را جهت قبله رزجرد می‌شناسند. رودخانه هفت‌چشمه متشکل از چشمه‌های وندر، اولی‌کرو، پلارودخانه، و چشمه‌رو است که به یکدیگر متصل می‌شوند و رودخانه هفت‌چشمه را تشکیل می‌دهند. منطقه مورد مطالعه در دامنه جنوبی البرز در بخش الموت قرار گرفته است. این بازه به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر است که از مجاور روستاهای رزجرد، رشتقون، میانبر، و شینقر عبور می‌کند. منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌شناسی البرز واقع شده است. واحدهای چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه مربوط به دوران پالئوزوئیک (سازند روته و دورود)، مزوزوئیک (سازند الیکا و شمشک متشکل از شیل سیاه‌رنگ زغال‌دار با بین لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون همچنین آندزیت بنفش‌رنگ و تراکی آندزیت)، سنوزوئیک (جریان‌های بازالتی و تراکی آندزیت‌های تیره‌رنگ همراه با توف‌های آتشفشانی ائوسن، بازالت خاکستری تیره و آندزی بازالت میوسن، رسوبات مارن‌های ژیبس‌دار و ژیبس و کنگلومرای سازند هزار دره پلیوسن) است. رسوبات کواترنر عمدتاً شامل پادگانه‌های جوان متشکل از قله‌سنگ‌های درشت به همراه مقادیر قابل توجهی ذرات در حد اندازه ماسه درشت و شن و مقادیر بسیار جزئی رس و آبرفت عهد حاضر است.

میانگین بارش سالانه منطقه از ۲۱۰ میلی‌متر در مناطق جنوبی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است. حداکثر بارش در دامنه‌های شمال شرقی الموت و با بارش بیش از ۵۵۰ میلی‌متر است. متوسط دبی سالانه رودخانه در ایستگاه امیرآباد ۰/۴۲ متر مکعب در ثانیه و در ایستگاه باراجین ۰/۵ متر مکعب در ثانیه است.

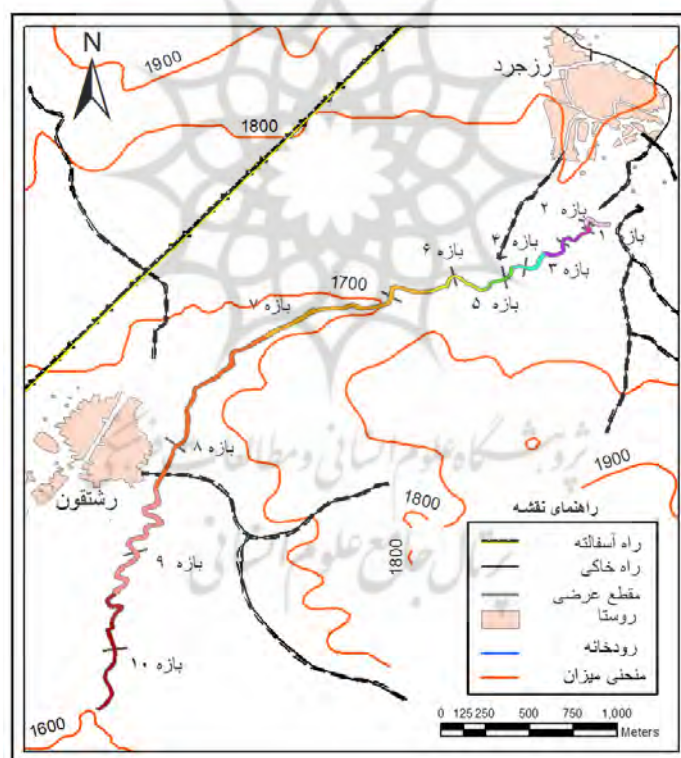


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای تعیین مرز حوضه و مسیر جریان و همچنین بخشی از لایه‌های اطلاعاتی از جمله مدل رقمی ارتفاع، منحنی میزان، شیب، و جهت دامنه استفاده شد. داده‌های بارش از سازمان هواشناسی کشور- شامل ایستگاه‌های باغ کلاویه، رجایی‌دشت، یارفع، محمدآباد، رازمیان، خسرو، قسطنین لار، شیرکوه، شترک، بهجت‌آباد، آشتجین، زرشک، بیدستان، باراجین، و زیاران- تهیه شد. ضریب پیچان رودی و پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث اندازه‌گیری و تعیین حدود شد و بر اساس داده‌های میدانی بازمینی و تأیید نهایی شد.

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر و از روستای رزجرد تا روستای شینقر قرار دارد و میانگین ضریب خمیدگی این بازه ۱/۱۷ و دارای الگوی سینوسی است. از محدوده مورد مطالعه ۷ بار بازدید میدانی انجام پذیرفت و با توجه به مورفولوژی و الگوی کانال، محدوده به ده بازه تفکیک شد. در ادامه ده مقطع عرضی در این بازه به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر انتخاب شد و به تهیه پروفیل‌های عرضی کانال با استفاده از متر پارچه‌ای و شاخص و دوربین نقشه‌برداری اقدام شد (شکل ۱).



شکل ۲. موقعیت بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه هفت‌چشمه قزوین

به‌منظور شناسایی مناطق مستعد فرسایش کناره‌ای، از مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای استفاده شد که با استفاده از اطلاعات و اندازه‌گیری‌ها و اعداد و ارقام به‌دست‌آمده در قالب یک سری جدول‌ها و نمودارها برای موارد مختلف نمونه‌برداری انجام می‌گیرد. در این روش بر پایه کارهای میدانی و بر اساس ۹ پارامتر می‌توان فرسایش و آسیب‌پذیری رودخانه نسبت به فرسایش را بررسی و ارزیابی کرد. پارامترهای مورد مطالعه عبارت‌اند از:

(۱) فرساینده‌گی باران؛ (۲) فاکتور سنگ‌شناسی؛ (۳) شیب کناره کانال؛ (۴) ضریب پیچان رودی؛ (۵) شیب طولی رودخانه؛ (۶) وضعیت فرسایش خاک؛ (۷) پوشش گیاهی حاشیة رودخانه؛ (۸) فعالیت‌های انسانی مجاور رودخانه؛ (۹) تنش برشی نزدیک کرانه.

بعد از مشخص شدن هر یک از اطلاعات و با استفاده از پارامترهای موجود، به بررسی مقاطع انتخابی با استفاده از پارامترها پرداخته می‌شود و بر اساس داده‌های هر پارامتر وزن‌دهی انجام می‌گیرد. مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره از طریق وزن‌دهی به متغیرها به تفسیر داده‌ها می‌پردازد و در واقع یک مدل پیشنهادی بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی است. در انتها به تهیه نقشه پهنه‌بندی رودخانه با توجه به پارامترهای گفته شده پرداخته می‌شود که شدت آسیب‌پذیری به پنج طبقه - خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، و خیلی کم - تقسیم می‌شود (جدول ۱). در انتها زمانی که همه مقاطع امتیازدهی شد، نقشه کلی از مقاطع تهیه می‌شود و بر اساس وزن‌های اختصاص یافته به مقاطع، مناطق حساس به ناپایداری و آسیب‌پذیری کرانه پهنه‌بندی می‌شود.

جدول ۱. جمع‌بندی و امتیازدهی مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای

جمع‌بندی کلی	تنش برشی کناره	فعالیت‌های انسانی	پوشش گیاهی	فرسایش خاک	شیب طولی	پیچان رودی	شیب کناره‌ای	کرانه	مقاطع در ۱۰ بازه
		بیشتر از ۳۵		۲۸-۳۵	۲۱-۲۸	۱۴-۲۱	۷-۱۴		
	خیلی شدید		خیلی زیاد	زیاد	متوسط	آرام	خیلی آرام		
	۶		۵	۴	۳	۲	۱		
	F		E	D	C	B	A		
جمع نهایی امتیاز هر بازه از کل پارامترها	امتیاز هر بازه شامل کرانه راست و چپ در هر کدام از پارامترهای بالا داده می‌شود. سپس، کل امتیازات هر بازه از هفت پارامتر محاسبه شده جمع می‌شود و در جمع‌بندی کلی قرار می‌گیرد که با توجه به نمره کسب شده در کدام طبقه شامل خیلی آرام، آرام، متوسط، زیاد، خیلی زیاد، و خیلی شدید قرار می‌گیرد. (A, B, C, D, E, F)							کرانه راست و چپ هر بازه	۱
									۲
									۳
									۴
									۵
									۶
									۷
									۸
									۹
									۱۰

۱. فرساینده‌گی باران

مفهوم عبارت فرساینده‌گی باران را ویشمایر و اسمیت در سال ۱۹۵۸ (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۱۷) به لحاظ تأثیر اقلیم بر فرسایش ارائه کردند. با توجه به اینکه حوضه مورد مطالعه از نظر مساحت کوچک است و فاقد هر گونه ایستگاه ثبت باران است، الگوی بارندگی با استفاده از ایستگاه‌های باران‌سنجی مجاور آن بررسی شد. به همین منظور، برای تهیه نقشه فرساینده‌گی منطقه مورد مطالعه داده‌های بارش به مدت سیزده سال برای پانزده ایستگاه - که نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به حوضه مورد مطالعه بودند - تهیه شد. سپس، در محیط اکسل رابطه رگرسیونی داده‌ها بر اساس رابطه بین بارش و ارتفاع ترسیم شد و بهترین تابع برای برازش آن (تابع خطی) انتخاب شد و بر اساس معادله رگرسیونی حاصل از برازش بارش و ارتفاع در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه توزیع بارش منطقه ترسیم شد. برای محاسبه مقدار فرسایش بارندگی از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شده است (جدول ۲):

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (1)$$

P_i = متوسط بارندگی بر حسب میلی‌متر، P = متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر

$$R\text{-factor} = \frac{0.07397 \times F1.847}{17.2} \quad (2)$$

F = شاخص فورنیه، $1-h-1y$ -MJmmha - واحد شاخص فرساینده‌گی باران

۲. شاخص حساسیت مواد کناره و بستر

تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری رسوبات بستر و کناره وجود دارد. در این پژوهش از روش گراول متر برای اندازه‌گیری رسوبات بستر استفاده شده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۴۳). در بازدیدهای میدانی، ۲۲ نمونه از کرانه‌های رودخانه در هر بازه برداشت شد و برای آزمایش دانه‌سنجی با استفاده از الک برای آنالیز رسوبات کرانه رود به آزمایشگاه منتقل شد و حساسیت مواد کناره بازه‌ها نسبت به فرسایش کناره مشخص شد (جدول ۳).

جدول ۲. مقادیر محاسبه‌شده فرساینده‌گی باران برای ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
شاخص فرساینده‌گی باران $h-1y$ -MJmmha	۴/۲۶	۴/۱۶	۴/۰۷	۳/۹۸	۳/۹۸	۳/۸	۳/۳۴	۲/۶۲	۳/۵۴	۳/۴۵	۳/۳۷
شاخص فورنیه mm	۵۲۶/۶۸	۵۲۴/۸۷	۵۱۳	۵۰۱/۵۷	۴۹۰/۱۳	۴۷۸/۸۳	۴۶۷/۶۵	۴۵۶/۶۱	۴۴۵/۷	۴۳۴/۹	۴۲۴/۲۷
بارش mm	۴۵۱	۴۴۶	۴۴۱	۴۳۶	۴۳۱	۴۲۶	۴۲۱	۴۱۶	۴۱۱	۴۰۶	۴۰۱
امتیاز مدل	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

جدول ۳. طبقه‌بندی حساسیت مواد بستر نسبت به فرسایش در بازه‌های اندازه‌گیری شده رودخانه هفت‌چشمه

مقطع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
طبقه‌بندی در مدل	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم
کلاس طبقه‌بندی ونت ورت	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)	گراول (ریگ)
	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط	درشت تا متوسط
امتیاز مدل	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

۳. شیب کناره‌ای رودخانه

یک وابستگی مثبت بین ناپایداری کناره و فاکتور شیب وجود دارد. شیب بیشتر به معنی بیشتر شدن خطر فرسایش کناره‌ای است. در این پژوهش با استفاده از رابطه ۳ مقدار شیب کناره اندازه‌گیری شده است.

$$S = S_a \times S_h \quad (3)$$

S = فاکتور شیب، S_a = زاویه شیب کناره‌ای، S_h = ارتفاع شیب

زاویه و ارتفاع کناره را می‌توان با استفاده از مطالعات میدانی به‌دست آورد و همچنین با استفاده از دستگاه شیب‌سنج نیز بر حسب درجه و درصد محاسبه می‌شود. برای نتیجه بهتر، پروفیل‌های هر کناره را با استفاده از مطالعات میدانی و اندازه‌گیری فاصله افقی خط آب در قسمت‌های کناره تعیین می‌کنند. فاصله افقی و تغییرات ارتفاع دو فاکتوری هستند که مقدار شیب را آشکار می‌کنند (جدول ۴).

جدول ۴. پارامترهای اندازه‌گیری شده شیب کناره‌ای

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شیب راست	۹/۹۶	۱۳/۹۳	۲۰/۸۴	۱۰/۹	۹/۳۲	۳۱/۵۱	۳۰/۸۵	۱۷/۱۵	۱۳/۰۲	راست ۱ (۲۱/۳) راست ۲ (۵۴)
کناره‌ای (m/m) چپ	۴/۲۹	۳۸/۴۵	۲۳/۹۷	۱۴/۱۳	۲۰/۲۸	۴/۹۵	۱۳/۰۴	۷/۳۵	چپ ۱ (۳۷/۸) چپ ۲ (۱۰/۹۲) چپ ۳ (۲۷/۷۲)	۲۰/۴

۴. شاخص پیچان رودی

معمولاً برای محاسبه پیچان رودی از مفاهیمی نظیر سینوسیته، ضریب خمیدگی، و درصد انحنا استفاده می‌شود. ضریب خمیدگی یک رودخانه نسبت طول رودخانه به طول دره‌ای است (در امتداد محور دره اندازه‌گیری می‌شود) که رودخانه در آن جریان دارد. همچنین، ذکر این نکته لازم است که اگر رودخانه مستقیم باشد و ضریب پیچان رودی برابر ۱ باشد، حداقل امتیاز اختصاص‌یافته برای این شاخص معادل ۰/۵ خواهد بود. اگر رودخانه مستقیم نباشد، برای ارزیابی و تحلیل این شاخص و تعیین فرورفتگی‌های کناره هر پیچان رود از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$MI = \frac{ACB}{AB} \quad (۴)$$

MI = شاخص پیچان رودی، ACB = طول قوس، AB = طول دره

رودخانه مورد مطالعه به شش قسمت از نظر الگو تقسیم و بر اساس این طبقه‌بندی برای هر کدام از بازه‌ها الگوی رودخانه مشخص شده است. در ابتدا، میزان ضریب خمیدگی برای هر کدام از بازه‌ها محاسبه شد. به این صورت که طول رودخانه تقسیم به طول دره شد و بر اساس طبقه‌بندی بریرلی و فریرس (۲۰۰۵: ۷۵) رودخانه به طبقات مختلف شامل مستقیم، سینوسی، و پیچان رودی طبقه‌بندی شد (جدول ۵).

جدول ۵. ضریب خمیدگی رودخانه هفت چشمه

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ضریب خمیدگی	۱/۲۹	۱/۱	۱/۳۷	۱/۲۱	۱/۰۷	۱/۰۳
نوع رودخانه	سینوسی	سینوسی	پیچان‌رودی	سینوسی	سینوسی	سینوسی

۵. شیب طولی رودخانه

برای برآورد شیب طولی رودخانه و محاسبه منطقه آسیب‌پذیر به فرسایش کناره‌ای، با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه، مسافت و ارتفاع عمودی بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه رودخانه از روی منحنی‌های میزان اندازه‌گیری شد. در نهایت، شیب طولی رودخانه هفت چشمه با استفاده از رابطه ۵ برآورد شد.

$$\text{شیب طولی} (\theta_i) = \tan^{-1} \frac{AB_i}{CB_i} \quad (۵)$$

$i\phi$ = شیب طولی رودخانه، ABi = اختلاف ارتفاع بین بالاترین و پایین‌ترین منحنی میزان، CBi = فاصله بین بالاترین و پایین‌ترین منحنی میزان

۶. تنش برشی نزدیک کرانه

محاسبه نیروی تنش برشی وارد بر کناره با استفاده از شیب بستر (s) (متر به متر) و حداکثر عمق دبی لبالی (ho) (متر) و شیب کناره (θ_1) (درجه) از طریق رابطه ۶ محاسبه شده است (جدول ۶). در پارامتر تنش برشی نزدیک کرانه بیشتر بازه‌ها در طبقه خیلی کم تا متوسط قرار دارند؛ ولی بازه ۴ چپ در طبقه شدید و بازه‌های ۷ چپ و ۹ راست در طبقه خیلی شدید قرار گرفته‌اند. همچنین، بازه ۹ چپ (دوم) جزو طبقه خیلی خیلی شدید قرار دارد.

$$\tau = \gamma h_o s \cos \theta_1 \quad (۶)$$

جدول ۶. پارامترهای محاسبه‌شده تنش برشی کناره رودخانه هفت‌چشمه

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تنش برشی	۳۴/۶	۴۳/۶۷	۱۹/۷۵	۴۴/۳۸	۴۱/۴۳	۵۲/۹۷	۶۸/۷۷	۱۲/۳	۱۲۷/۵۷	راست ۱ (۴۴/۴۹) راست ۲ (۰)
نزدیک کرانه	۳۹/۵۵	۷۶/۶۳	۱۴/۵۳	۴۰/۲۹	۳۶/۲۵	۹۶/۱۳	۱۰۹/۸	۱۴/۴	چپ ۱ (۰) چپ ۲ (۱۳۳/۵۸) چپ ۳ (۶۰/۰۳)	۴۵/۰۴
(N/m ²)										

۷. شاخص فرسایش خاک (فرسایش‌پذیری K)

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، محل نمونه‌برداری در محدوده مورد مطالعه تعیین و نمونه‌برداری خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری انجام شد. نمونه‌های خاک به‌منظور تعیین بافت خاک و همچنین تعیین میزان نفوذپذیری از روی بافت خاک آزمایش شد. بافت خاک نسبتی از ذرات خاک شامل سیلت، رس، و ماسه است که سهم هر کدام در خاک توسط بافت خاک سنجیده می‌شود. برای الک کردن نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متر استفاده می‌شود. برای تعیین میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌ها برای هر کدام از طریق رابطه ۷ محاسبه شد (جدول ۷).

$$k = 0.0035 \times 0.0388 \times \exp\left(-0.5 \times \left(\frac{\log Dg + 1.519}{0.7584}\right)^2\right) \quad (۷)$$

Dg = میانگین هندسی قطر ذره‌های خاک به میلی‌متر (D_{50})

جدول ۷. پارامترهای محاسبه‌شده برای فرسایش‌پذیری خاک رودخانه هفت‌چشمه

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
فرسایش خاک	۵/۳۴	۲/۸۲	۳/۷۱	۱/۹۲	۱/۵	۱/۵	۲/۴۹	۸/۲۹	۳/۹۶	۹۶/۳
(k)	۹/۷۴	چپ بالا ۶۱/۴ چپ میانی ۱/۸ چپ پایین ۳/۵۳	۲/۶۹	۱/۵۳	چپ بالا ۱/۶۱ چپ پایین ۷/۴۸	۲/۱۵	۳/۳۸	۸/۹۱	۳/۶۴	۰

۸. پوشش گیاهی

برای تخمین پوشش گیاهی رودخانه هفت‌چشمه و تعیین تراکم پوشش گیاهی از روش تعیین نوع گروه‌های پوشش گیاهی (بدون پوشش گیاهی، پوشش گیاهی کم، پوشش گیاهی فراوان) استفاده شد و همچنین برای امتیازدهی به تراکم ریشه از روش مدل BEHI استفاده شده است (جدول ۸).

جدول ۸. میزان درصد و امتیاز پوشش گیاهی رودخانه هفت‌چشمه

بازه	کرانه	درصد میزان ریشه (%)	نوع پوشش گیاهی چوبی	نوع گروه
۱	راست	۲۵	باغ- درخت و دو ردیف درخت	پوشش گیاهی کم ۲
	چپ	ندارد	باغ- درخت و دو ردیف درخت	پوشش گیاهی کم ۲
۲	راست	ندارد	بوته‌های تمشک و علف‌های بلند دارای دو ردیف درخت	پوشش گیاهی کم ۲
	چپ	۵۰	درخت چنار و گردو و مرتع علفی	پوشش گیاهی کم ۲
۳	راست	۲۵	بوته‌های کم‌ارتفاع و یک ردیف درخت	پوشش گیاهی کم ۲
	چپ	۲۵	بوته‌های کم‌ارتفاع و یک ردیف درخت	پوشش گیاهی کم ۲
۴	راست	۲۵	باغ- درختان چنار و گردو	پوشش گیاهی زیاد ۳
	چپ	۲۵	تمشک وحشی- نیزار	پوشش گیاهی زیاد ۳
۵	راست	ندارد	باغ- علفزار- دارای بیش از دو ردیف درخت چنار و گردو	پوشش گیاهی زیاد ۳
	چپ	۷۰	باغ- علفزار- دارای بیش از دو ردیف درخت چنار و گردو	پوشش گیاهی زیاد ۳
۶	راست	۲۵	پوشش درختی پراکنده- درختان بید و چنار	بدون پوشش گیاهی ۱
	چپ	ندارد	پوشش درختی پراکنده- مرتع	بدون پوشش گیاهی ۱
۷	راست	۷۰	دو ردیف درخت- چنار و بید	پوشش گیاهی کم ۲
	چپ	۵۰	دو ردیف درخت- چنار و بید	پوشش گیاهی کم ۲
۸	راست	۵۰	دو ردیف درخت- چنار و گردو	پوشش گیاهی کم ۲
	چپ	۲۵	دو ردیف درخت- چنار و گردو	پوشش گیاهی کم ۲
۹	راست	۷۰	بیش از دو ردیف درخت - چنار نیزار تمشک وحشی	پوشش گیاهی زیاد ۳
	چپ	۵۰	بیش از دو ردیف درخت - چنار نیزار تمشک وحشی	پوشش گیاهی زیاد ۳
۱۰	راست	۵۰	درختچه و علفزار	بدون پوشش گیاهی ۱
	چپ	۵۰	درختچه و علفزار	بدون پوشش گیاهی ۱

۹. فعالیت‌های انسانی

در این مطالعه نخست در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی حریم شش‌متری برای هر کناره از رودخانه تعیین شد و سپس در طول محدوده مورد مطالعه با استفاده از مطالعات میدانی تأثیر فعالیت‌های انسانی در محدوده مورد مطالعه ارزیابی شد. این عوامل شامل جاده، عبور جاده از عرض رودخانه، سد رسوبی و تغییر مسیر جریان، پل، ساختمان‌سازی است و در انتها مخاطره انسانی تأثیرگذار در رودخانه هفت‌چشمه شناسایی شد. روش کار به این صورت است که در ابتدا تعداد فعالیت‌های انسانی فعال در حریم رودخانه با استفاده از بازدیدهای میدانی بررسی شد و مسافت درگیرکننده در هر بازه با استفاده از متر اندازه‌گیری می‌شود. ابتدا طول بازه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سپس، به مقدار مسافتی که فعالیت انسانی در آن تأثیر گذاشته بود اندازه‌گیری می‌شود. عدد به‌دست‌آمده از فعالیت انسانی تقسیم به مسافت هر بازه می‌شود و در صد ضرب می‌شود که مقدار درصد تحت تأثیر فعالیت انسانی محاسبه می‌شود (جدول ۹).

جدول ۹. فعالیت‌های انسانی و میزان تأثیر آن بر رودخانه هفت‌چشمه

بازه	نوع فعالیت	مقدار (متر)	درصد تحت تأثیر (%)
بازه ۱ تا ۵	باغ و کشاورزی	"	بیش از ۵۰ از هر مقطع
بازه ۶	جاده در حریم طولی رودخانه	۷	۷۰
بازه ۷	-	-	-
بازه ۸	پل	۵	۵۰
بازه ۹	ساختمان‌سازی نزدیک کناره	۴	۴۰
بازه ۹	سد رسوبی	۷	۷۰
بازه ۱۰	عبور جاده از عرض رودخانه	۳/۵	۳۵

نتایج

متغیرهای اندازه‌گیری شده شامل شیب بستر، سرعت جریان، عرض دبی لبالی، نمونه‌برداری رسوبات کرانه، نمونه‌برداری رسوبات بستر با گراول متر، تعیین نوع فعالیت‌های انسانی و پوشش گیاهی است که از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آمد. بعد از مشخص شدن هر یک از اطلاعات و با استفاده از پارامترهای موجود، به بررسی بازه‌های انتخابی با استفاده از پارامترها پرداخته شد و بر اساس نتایج هر پارامتر وزن‌دهی انجام گرفت. قسمت وزن‌دهی به این صورت است که طبقه‌بندی به پنج طبقه خیلی آرام، آرام، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد انجام می‌گیرد و به ترتیب به هر طبقه اعداد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ اختصاص می‌یابد. در انتها زمانی که همه بازه‌ها امتیازدهی شد نقشه مناطق حساس به ناپایداری و آسیب‌پذیری کرانه تهیه شد. امتیازات در این مدل در محدوده کمتر از ۶-۱۲، ۱۲-۱۸، ۱۸-۲۴، و بیشتر از ۲۴ است.

۱. شیب کناره‌ای

بر اساس ویژگی‌های کانال رودخانه به ده بازه تقسیم شد و بر اساس مدل مقاطع حساس به فرسایش شناسایی شد که در جدول ۱۰ آمده است. شکل ۴ نقشه‌های پهنه‌بندی پارامتر شیب کناره‌ای را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شیب کناره‌ای نشان می‌دهد که میزان ناپایداری در بیشتر مقاطع آرام تا متوسط است به جز بازه ۱۰ که در کرانه راست آن میزان ناپایداری شدید است (شکل ۳).

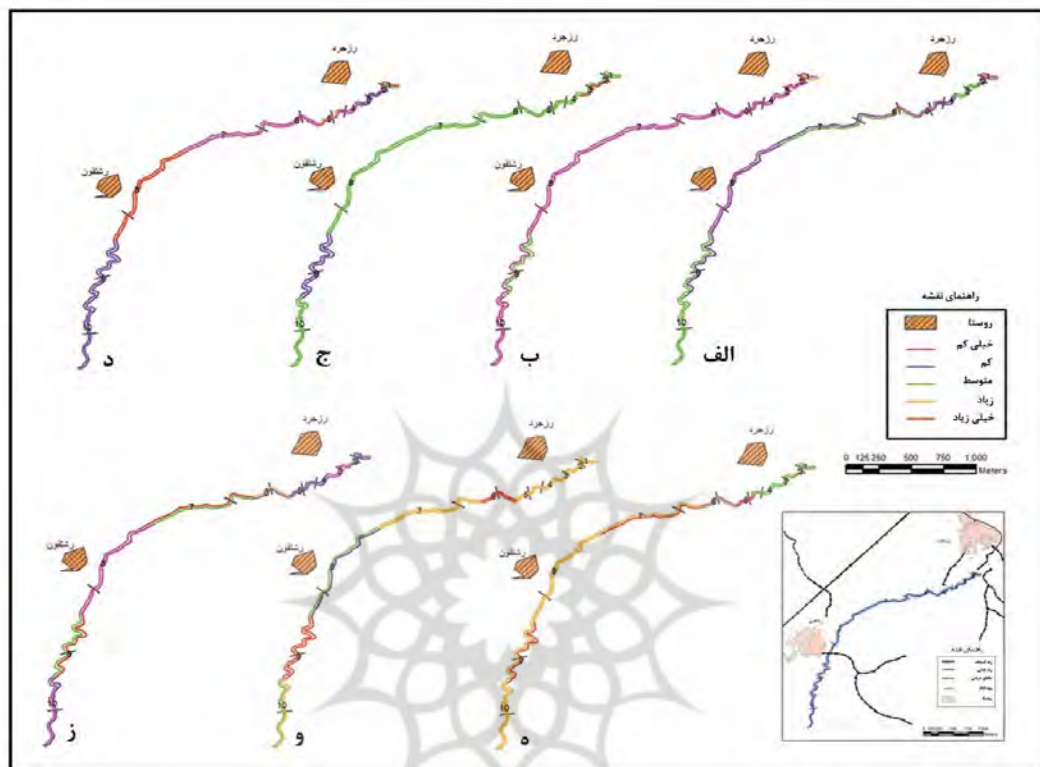
۲. پیچان رودی

در این پارامتر رودخانه به شش بازه تقسیم و در هر بازه مقدار آن اندازه‌گیری شد. نتایج محاسبه شده در مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای در جدول ۱۰ آمده است. همچنین، نقشه‌های پهنه‌بندی برای هر بازه در شکل ۵ آمده است. در شاخص پیچان رودی منطقه مورد مطالعه به ۶ بازه تقسیم شد که در هر بازه قوس‌ها جداگانه بررسی شد و با توجه به نتایج در بازه اول قوس شماره یک در طبقه پیچان‌رودی قرار داشت و بقیه آن‌ها در طبقه مستقیم قرار گرفت. همچنین، در بازه دوم همه قوس‌ها در طبقه مستقیم قرار داشتند. در بازه سوم قوس‌های شماره ۲۹ پیچان‌رودی، ۳۰ و ۳۷ و ۳۸ در طبقه متوسط و بقیه مستقیم بودند. بازه‌های چهارم، پنجم، و ششم در همه قوس‌ها در طبقه مستقیم قرار گرفته‌اند (شکل ۳).

۳. فرسایش خاک

یافته‌های حاصل از آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده از کرانه‌های هر مقطع با استفاده از نرم‌افزار Gradstat در جدول ۱۰ آمده است. بر اساس یافته‌های فوق، نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت برای هر بازه ترسیم شد.

در فاکتور فرسایش‌پذیری خاک بیشتر نمونه‌های اندازه‌گیری شده در طبقه خیلی آرام تا آرام قرار داشتند. همچنین، نمونه کرانه چپ بازه یک، کرانه راست و چپ بازه هشت در طبقه خیلی شدید قرار دارند و فقط کرانه چپ قسمت پایین در طبقه تند قرار دارد. در فاکتور سنگ‌شناسی کرانه، همه مقاطع در طبقه متوسط قرار دارند و فقط بازه دو، کرانه چپ پایین در طبقه خیلی شدید قرار گرفته است. همچنین، در بستر همه بازه‌ها جزو طبقه کم قرار دارند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه حساسیت به فرسایش کناره در پارامترهای مورد مطالعه: الف) متغیر شیب کناره‌ای؛ ب) متغیر طبقه‌بندی پیچان رودی؛ ج) متغیر شیب طولی رودخانه؛ د) متغیر فرسایش خاک؛ ه) متغیر پوشش گیاهی؛ و) متغیر فعالیت‌های انسانی؛ ز) متغیر تنش برشی در بازه‌های ۱ تا ۱۰

۴. شیب طولی رودخانه

با استفاده از نقشه توپوگرافی و اندازه‌گیری‌های میدانی، شیب طولی رودخانه محاسبه و نقشه‌های آسیب‌پذیری مربوط به این پارامتر ترسیم شد (جدول ۱۰ و شکل ۷). در فاکتور شیب طولی رودخانه، همه موارد اندازه‌گیری شده در طبقه آرام تا متوسط قرار داشتند و فقط در ارتفاع ۱۷۱۰-۱۷۲۰ و ۱۶۹۰-۱۷۰۰ طبقه تند را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳).

۵. پوشش گیاهی

برای تعیین نوع گروه‌های پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، گروه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند و درصد پوشش گیاهی هر مقطع سنجیده می‌شود. در انتها با استفاده از مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای به امتیازدهی و تهیه نقشه‌های آن پرداخته شد (شکل ۳). در پارامتر پوشش گیاهی بیشتر بازه‌ها جزو طبقه پراکنده‌اند و همچنین بازه‌های ۴، ۵، و ۹ دارای پوشش گیاهی زیاد هستند (جدول ۱۰).

۶. فعالیت‌های انسانی

با توجه به تعداد فعالیت‌های تأثیرگذار در رودخانه و مسافتی که باعث تأثیرگذاری در رودخانه شده است، به درصدبندی تأثیر هر پارامتر اقدام شد و در انتها امتیازبندی انجام گرفت و نقشه پارامتر فعالیت انسانی تهیه شد (شکل ۳). در فعالیت‌های انسانی در بازه‌های یک تا پنج، به دلیل کاربری کشاورزی و باغ، بازه هشت و بازه ده تأثیر فعالیت‌های انسانی در طبقه متوسط است. در بازه شش و نه فعالیت انسانی در طبقه انبوه است (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. امتیازدهی مدل به بازه‌های رودخانه هفت‌چشمه

طبقه‌بندی مدل	کرنانه	شیب کناره‌ای	پیچان رودی	شیب طولی	فرسایش خاک	پوشش گیاهی	فعالیت‌های انسانی	تنش برشی
		خیلی آرام	آرام	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	خیلی شدید	
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	
		A	B	C	D	E	F	
۱	راست	۱	۴	۳	۳	۳	۴	۲
	چپ	۱	۱	۳	۵	۳	۴	۲
۲	راست	۲	۱	۴	۲	۱	۴	۲
	چپ	۳	۱	۳	۲	۴	۴	۳
۳	راست	۳	۱	۴	۲	۳	۴	۱
	چپ	۳	۱	۳	۲	۳	۴	۱
۴	راست	۲	۱	۳	۱	۳	۴	۲
	چپ	۲	۱	۳	۱	۳	۴	۲
۵	راست	۱	۱	۳	۱	۱	۴	۲
	چپ	۳	۱	۳	۴	۵	۴	۲
۶	راست	۳	۱	۳	۱	۳	۵	۲
	چپ	۱	۱	۳	۱	۱	۵	۴
۷	راست	۳	۱	۳	۱	۵	۴	۳
	چپ	۲	۱	۳	۱	۴	۴	۵
۸	راست	۲	۱	۳	۵	۴	۳	۱
	چپ	۱	۱	۳	۵	۳	۴	۱
۹	راست	۲	۳	۲	۲	۵	۵	۵
	چپ	۳	۱	۲	۲	۴	۵	۳
۱۰	راست	۳	۱	۳	۲	۴	۴	۲
	چپ	۳	۱	۳	۲	۴	۳	۱

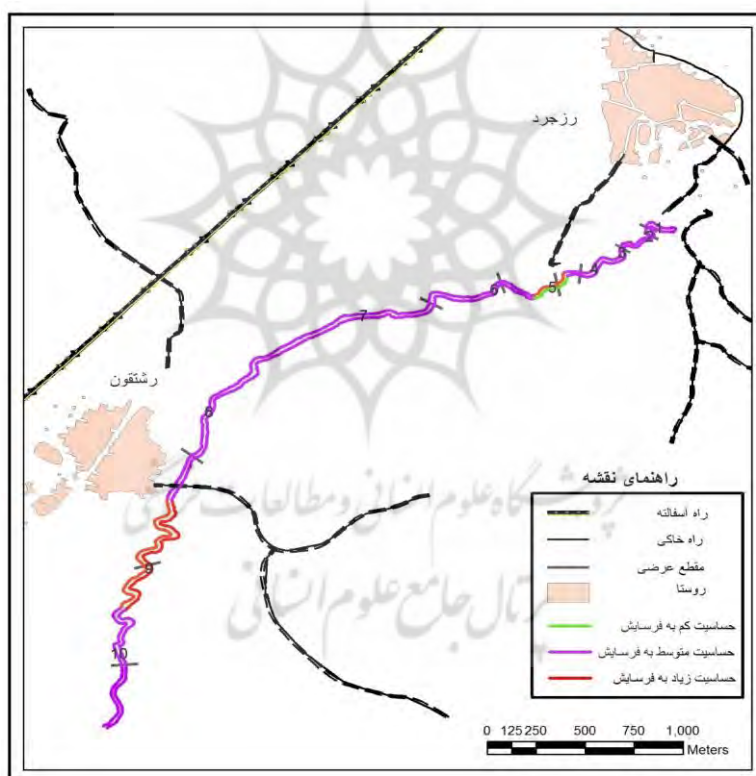
نتیجه‌گیری پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای

روش کار و نتایج ارائه شده در این مطالعه به منظور پیش‌بینی حساسیت فرسایش کناره رودخانه هفت‌چشمه بوده است. تفاوت این روش نسبت به مطالعات قبلی کمی‌سازی و تعدد متغیرهای مورد استفاده در برآورد پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کناره رودخانه بوده است. یافته‌های موجود در این پژوهش نشان می‌دهد که کناره‌های رودخانه‌ها در این رودخانه دارای حساسیت بالا نسبت به فرسایش هستند. در نقشه‌های تهیه شده (شکل ۴) و با استفاده از جدول ۱۰ به پهنه‌بندی رودخانه هفت‌چشمه از نظر ناپایداری فرسایش کناره‌ای اقدام شد. همچنین، در جدول ۱۱ میزان فرسایش هر بازه به تفکیک کرانه تعیین شد.

با توجه به نتایج به دست آمده، همه بازه‌ها به جز بازه‌های ۵ و ۹ امتیاز متوسط گرفته‌اند. وجه مشترک همه این بازه‌ها نرخ متوسط آسیب‌پذیری فرسایش کناره بوده است. بازه‌های ۱ تا ۴، با توجه به امتیازات جدول و مشاهدات روی زمین، دارای پوشش گیاهی زیاد بوده است. در نتیجه، پارامتر فرسایش خاک نیز در این بازه‌ها در رده آرام قرار دارد و شاخص پیچان‌رودی نیز دارای کمترین امتیاز است.

جدول ۱۱. میزان حساسیت به فرسایش کناره در بازه‌های مورد مطالعه

بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
کرائه راست	۲۰	۱۵	۱۸	۱۶	۱۴	۱۸	۲۰	۲۰	۲۵	۱۷	امتیاز نهایی مدل
کرائه چپ	۱۹	۲۱	۱۸	۱۶	۲۳	۱۶	۲۰	۱۸	۲۳	۱۷	
کرائه راست	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	آرام	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	میزان فرسایش
کرائه چپ	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	
کرائه راست	C	C	C	C	B	C	C	C	D	C	علامت اختصاری
کرائه چپ	C	C	C	C	D	C	C	C	D	C	



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی ناپایداری آسیب‌پذیری فرسایش کناره‌ای بازه‌های ۱ تا ۴

این تفاوت ناشی از تفاوت پوشش گیاهی و تأثیر آن یعنی تراکم و عمق ریشه‌ها بوده است. در واقع، پوشش گیاهی هر سه فرایند فرسایشی کناره (فرسایش هیدرولیک رودخانه، حرکات توده‌ای، و تنش برشی مکانیکی و هیدرولیکی مواد کناره) را که لاولر^۱ (۱۹۹۵) آن را بیان کرده تحت تأثیر قرار می‌دهد (وین و مستقیمی^۱، ۲۰۰۶: ۷۴). وین و مستقیمی (۲۰۰۶) مشخص

1. Lawler

کرده‌اند که تراکم ریشه تأثیر قابل‌توجهی در روی فرسایش کناره در جنوب غربی ویرجینیای امریکا دارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد پوشش گیاهی درختی نرخ فرسایش را از طریق اتلاف انرژی ستون آب کاهش می‌دهد. این فرایند از طریق افزایش زبری و مقاومت کششی ناشی از افزایش چسبندگی فراهم‌شده به‌وسیله ترکیب ریشه و خاک انجام می‌گیرد (تورن^۲، ۱۹۹۰: ۱۲۴؛ گنت و همکاران، ۲۰۰۵: ۴؛ پولین^۳، ۲۰۰۷: ۱۹۸). علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد تفاوت گونه‌های مختلف گیاهی نیز مقادیر متنوعی از مقاومت کششی را نسبت به خاک فراهم می‌کند (گنت و همکاران، ۲۰۰۵: ۴؛ پولین، ۲۰۰۷: ۱۹۹).

کرانه راست بازه ۵ دارای نرخ آرام فرسایش است، اما در کرانه چپ بازه حساسیت به فرسایش زیاد است. چون وجود قوس در بازه ۵ باعث شده است که در کرانه چپ شیب دیواره زیاد شود و به‌رغم پوشش گیاهی زیاد باعث فرسایش بیشتر شده است و ریشه‌های درختان در این کرانه نیز بیرون‌زدگی زیادی را نشان می‌دهد. ولی در کرانه راست، وجود موانع گراولی حاشیه (پوینت بار) باعث شده شیب دیواره کم باشد و میزان تنش برشی اعمال‌شده بر آن کم باشد. در نتیجه آسیب‌پذیری نسبت به فرسایش کمتر است. کرانه راست و چپ در بازه ۹ دارای آسیب‌پذیری زیاد است. زیرا در مطالعات میدانی در بالادست این بازه یک سد رسوبی مشاهده شد که باعث شده بود مسیر جریان تغییر یابد و هر دو طرف کرانه دارای دیواره‌هایی با شیب زیاد بودند. تنش برشی در این بازه دارای امتیاز خیلی زیاد بوده است و همچنین فعالیت انسانی هم بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. حساسیت فرسایش محاسبه‌شده در بازه‌های مختلف هفت‌چشمه نشان می‌دهد فرسایش بیشتر در بخش‌هایی رخ می‌دهد که پوشش گیاهی وجود ندارد؛ یعنی جایی که پوشش گیاهی کم است حساسیت به فرسایش نیز بیشتر است (شکل ۵).



شکل ۵. تصاویر بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه هفت‌چشمه

1. Wynn and Mostaghimi
2. Thorne
3. Pollen

نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده و نمونه‌گیری‌های انجام‌گرفته، مشخص شد فرسایش کناره‌ای از پدیده‌های غالب و فعال در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه هفت‌چشمه محسوب می‌شود، که در بازه‌های مختلف موجب آثار و پیامدهای گوناگونی چون تغییر الگوی رودخانه، گسترش شعاع انحنا در قوس‌های رودخانه، و گسترش عرض رودخانه در مسیرهای مستقیم شده است. ایجاد پدیده‌های فوق و بروز این تغییرات در مورفولوژی رودخانه باعث ایجاد خسارات به زمین‌ها و تأسیسات اطراف رودخانه شده است. این یافته با نتایج مطالعه حسین‌زاده و همکاران بر روی رودخانه قرانقوچای مطابقت دارد و در آن رودخانه نیز فرسایش کناره‌ای آثار مشابهی به دنبال داشته است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۶۲). در جهت جلوگیری از تحمیل خسارات و اثرهای سوء در منطقه، به شناخت کلی رفتار و جریان رودخانه نیاز است که در نهایت با شناسایی مناطق مستعد برای این نوع از فرسایش و انجام‌دادن تمهیدات و اقدامات کنترلی در سطح این منطقه می‌توان آثار و پیامدهای این پدیده را کاهش داد یا به حداقل رساند.

این مطالعه نشان داد که پوشش گیاهی و حفاظت کناره‌ها نقش اساسی در حفظ پایداری کناره در این منطقه دارد. ارزیابی فرسایش کناره با استفاده از مدل پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کناره نشان می‌دهد پوشش گیاهی یک عامل محافظت‌کننده در طول مسیر رودخانه است و بر عکس آن فعالیت‌های انسانی و پیچان‌رودی دو عامل محرک در ایجاد حساسیت و فرسایش کناره‌هاست.

منابع

- اسماعیلی، ر.؛ حسین‌زاده، م.م. و متولی، ص. (۱۳۹۰). تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، تهران: لاهوت.
- حسین‌زاده، محمدمهدی و اسماعیلی، رضا (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مفاهیم، اشکال، و فرایندها، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- حسین‌زاده، محمدمهدی؛ خالقی، سمیه و واحدی‌فر، فراز (۱۳۹۶). ارزیابی تغییرات مورفولوژیک پایداری رودخانه قرانقوچای هشترود با استفاده از مدل BEHI، هیدروژئومورفولوژی، ۱۰: ۱۴۵-۱۶۴.
- حسین‌زاده، محمدمهدی و متش بیرانوند، سعیده (۱۳۹۳). بررسی نقش عوامل ژئومورفیک در فرسایش کناری رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)، فصل‌نامه علمی، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۴: ۳۳-۳۹.
- حسین‌زاده، محمدمهدی؛ خالقی، سمیه و رستمی، میلاد (۱۳۹۶). مقایسه روش‌های برآورد خطر فرسایش کرانه‌ای با استفاده از مدل NBS (مطالعه موردی: رودخانه گل‌لالی‌قروه)، مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۶(۱۴): ۱۴۱-۱۵۲.
- رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا و اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۳۹۱). تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از روش‌های تنشی برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱: ۳۳-۴۶.
- غفاری، غلامرضا؛ سلیمانی، کریم و مساعدی، علی (۱۳۸۶). تغییرات مورفولوژی جانبی کانال با استفاده از GIS (بابل‌رود مازندران)، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۸(۵۷): ۶۱-۷۱.
- یمانی، مجتبی و شرقی، سیامک (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۴۵(۱): ۱۵-۳۲.
- Bandyopadhyay, S.; Ghosh, G. and Kumar, S. D. (2014). A Proposed Method of Bank Erosion Vulnerability Zonation and its Application on the River Haora, Tripura, India, *Geomorphology*, 224: 111-125.
- Bertrand, F. and Papanicolaou, A. N. (2009). Effects of Freezing and Thawing Process on Bank Stability, *World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers, New Mexico*.
- Brierley, G. J. and Fryirs, K.A. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*, Blackwell Publishing.
- Esmaili, R.; Hosseinzadeh, M.M. and Motevalli, S. (2011). *Field Techniques in Fluvial Geomorphology*, Lahot Publishing, Tehran.
- Genet, M.; Stokes, A.; Salin, F.; Mickovski, S. B.; Fourcaud, T. and Dumail, J.F. (2005). The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots, *Plant and Soil*, 278: 1-9.
- Ghaffari, G.; Soleimani, K. and Masaedi, A. (2007). Lateral morphology changes of canal using GIS (Babol River, Mazandaran), *Geographical Research Quarterly*, 57: 61-72.
- Ghosh, K.G.; Pal, S. and Mukhopadhyay, S. (2016). Validation of BANCS Model for Assessing Stream Bank Erosion Hazard Potential (SBEHP) in Bakreshwar River of Rarh Region, Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2: 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0044-z>
- Hosseinzadeh, M.M. and Esmaili, R. (2018). *Fluvial Geomorphology, Concepts, Forms and Processes*, Tehran: Shahid Beheshti University Press.

- Hosseinzadeh, M.M. and MateshBayranvand, S. (2014). The Effective Geomorphological Processes in Rivers Bank Erosion (Case Study: kashkan River), *Journal of ENVIRONMENTAL EROSION RESEARCH*, 4(2): 23-39.
- Hosseinzadeh, M.M.; Khaleghi, S. and Vahedifar, F. (2017). The Analysis and Assessment of Bank Erosion and Stability in the Qaranqoo River Using BEHI Model, *Hydrogeomorphology*, 10(3): 145-164.
- Hosseinzadeh, M.M.; Khaleghi, S. and Vahedifar, F. (2018). Comparison of Stream Bank Erosion Hazard Methods Using NBS Model (Case Study: Galali River, Ghorveh), *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(14): 141-152.
- Lawler, D.M. (1995). The Impact of Scale on the Processes of Channel-Side Sediment Supply: A Conceptual Model, Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality (Proceedings of alioulderSymposium, July 1995). *IAHS Publ*, 226: 175-184.
- Minghui, Y.; Hongyan, W.; Yanjie, L. and Chunyan, H. (2010). Study on the Stability of Noncohesive River Bank, *International Journal of Sediment Research*, 25: 391-398.
- Pollen, N. (2007). Temporal and Spatial Variability in Root Reinforcement of Streambanks: Accounting for Soil Shear Strength and Moisture, *Catena*, 69: 197-205.
- Razaimoghadam, M.H.; Sarvati, M.R. and Asghari Saraskanrud, S. (2012). Analysis of the Stability of River Channels Using Methods of Bed Shear Stress and the Relative Strength Index (Ranging Between 30 km Miyaneh City to the Zanjan Political Boundaries), *Quantitative Geomorphological Research*, 1: 33-46.
- Rosgen, D. (2001). A Practical Method of Computing Stream bank Erosion Rate, *Wildland Hydrology, Inc. Pagosa Springs, Colorado*.
- Thi, T.D. and Minh, D.D. (2019). Riverbank Stability Assessment Under River Water Level Changes and Hydraulic Erosion, *Water*, 11(12): 1-20, <https://doi.org/10.3390/w11122598>.
- Thorne, C. R. and Tovey, N. K. (1981). Stability of Composite River Banks, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6: 469-484.
- Thorne, C.R. (1990). Effects of Vegetation on Riverbank Erosion and Stability, *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, Thornes, J.B. (Editor), John Wiley & Sons Ltd. West Sussex.
- Tokaldany, E. A.; Darby, S. E. and Tosswell, P. (2007). Coupling Bank Stability and Bed Deformation Models to Predict Equilibrium Bed Topography in River Bends, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133: 1167-1175.
- Wischmeler, W.H. and Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall-Erosion Losses-a Guide to Conservation Planning. *USDA Agr. Handbk*, 537.
- Wynn, T.M. and Mostaghimi, S. (2006). The Effects of Vegetation and Soil Type on Streambank Erosion, Southwestern Virginia, USA, *Journal of the American Water Resources Association*, 42(1): 69-82.
- Yamani, M. and Sharafi, S. (2012). Geomorphology and effective factors on lateral erosion in Hor Rood River, Lorestan province, *Geography and Environmental Planning Journal*, 45(1): 15-27.