

ارزیابی کمی خطر فرسایش کناری رودخانه تروال (حوضه بالادست ایستگاه حسن خان) -

هادی نیری* - استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
خالد اوسطی - استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. عضو گروه پژوهشی مطالعات محیطی دریاچه
زریبار، پژوهشکده کردستان شناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
اختر امانی - دانشجوی کاشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

چکیده

رودخانه‌ها سیستم‌هایی پویا هستند که جهت نیل به تعادل بستر، به‌طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کنند. تخریب کناره رودخانه‌ها می‌تواند سالانه خسارات و مخاطرات زیادی را به همراه داشته باشد. جهت تعدیل خسارات مذکور، عملیات اصلاحی متعددی در رودخانه‌ها می‌تواند مدنظر قرار گیرد و لازمه انتخاب روش‌های درست، شناخت دقیق وضعیت رودخانه و بخصوص وضعیت فرسایش کناری رودخانه است. بر این اساس در این پژوهش، فرسایش کناری رودخانه تروال به‌عنوان هدف پژوهش مدنظر قرار گرفته است. رودخانه تروال یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه سفیدرود است که در شرق استان کردستان قرار دارد. در این پژوهش ۶۷ مقطع عرضی از رودخانه برداشت گردید و میزان فرسایش کناری با استفاده از شاخص‌های BEHI کامل و BEHI اصلاح‌شده مورد بررسی قرار گرفت و نقش پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص BEHI کامل، بر اساس آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشتر بخش‌های رودخانه تروال از نظر فرسایش کناری در کلاس وضعیت فرسایش کناری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرند و مقاطع بحرانی از نظر فرسایش، در بالادست حوضه قرار داشته و با حرکت به سمت پائین‌دست از مقدار فرسایش کناری کاسته شده و رودخانه حالت متعادل‌تری به خود می‌گیرد. احیا و تقویت پوشش گیاهی خصوصاً با گونه‌های بومی دارای ریشه‌های عمیق به‌عنوان راهکاری کلیدی جهت تعدیل فرسایش کناری رودخانه تروال توصیه می‌گردد.

واژگان کلیدی: سفیدرود، شاخص BEHI، BEHI/اصلاح‌شده، فرسایش آبی، ANOVA

مقدمه

ژئومورفولوژی رودخانه به بررسی پلان، نیمرخ طولی بستر و مقطع عرضی رودخانه، ارتباط بین آن‌ها و فرآیندهای مؤثر بر آن‌ها می‌پردازد (نیری، ۱۳۸۹). فرسایش یکی از فرآیندهایی است که اثرات آن در بستر رودخانه‌ها به صورت تخریب دیواره‌ها، تغییر نیمرخ جریان و تغییر در فرم رودخانه‌ها نمایان می‌شود (فاتحی و هنر بخش، ۲۰۱۳: ۲). همچنین تغییرات مجرای رودخانه باعث تخریب زمین‌های کشاورزی و ایجاد خسارت به تأسیسات اطراف آن خواهد شد. از سوی دیگر، توسعه فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری اراضی، باعث تغییر در ماهیت دینامیک و مورفولوژی رودخانه‌ها می‌شوند (گریگوری^۱، ۲۰۰۶: ۱۷۲، به نقل از رضایی مقدم و پیروزی نژاد، ۱۳۹۳).

فرسایش ضمن تغییر رودخانه، می‌تواند به‌عنوان منبع اصلی تولید رسوب تا ۸۰ درصد از بار رسوبی سالانه در یک مجرای جریان را به خود اختصاص دهد (سیمون^۲ و تورن، ۱۹۹۶) و مخاطرات اقتصادی و زیست‌محیطی متعددی را به دنبال داشته باشد (فاتحی و هنر بخش، ۲۰۱۳: ۲). یافتن راه‌کارهای فنی مناسب، مستلزم شناخت مناسب رفتار رودخانه و عوامل ژئومورفولوژیکی و هیدرولیکی مؤثر بر فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری آن می‌باشد (حققی آبی و امام قلی زاده، ۱۳۹۴: ۱۲۵) و اغلب برای مهندسين ضروری است که رفتار رودخانه‌ها را مطالعه کنند همان‌طور که هاورمکین (۱۹۷۳) اشاره می‌کند تا آن‌ها بتوانند با رودخانه‌ها کار کنند نه آنکه صرفاً بر روی آن‌ها کار کنند (به نقل از نیری، ۱۳۸۹) و آسیب‌پذیری آن‌ها را کاهش دهند.

برای شناخت روند تغییرات و عوامل مؤثر بر رودخانه مطالعات متعددی صورت گرفته است. اختر و همکاران (۲۰۱۱)، تاکور و همکاران^۳ (۲۰۱۲)، کسلر و همکاران^۴ (۲۰۱۳)، باندیوپادهای و همکاران^۵ (۲۰۱۴)، نیری و رضایی مقدم (۱۳۸۴)، یمانی و شرفی (۱۳۹۱)، بیاتی خطیبی (۱۳۹۱) رضایی مقدم و پیروزی نژاد (۱۳۹۳)، غفاری و همکاران (۱۳۸۵)، حق آبی و امام قلی زاده (۱۳۹۴)، در مطالعاتشان از عملیات صحرائی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ها و نرم‌افزارهای متعددی برای مطالعه فرسایش و تغییرات کناره بستر استفاده کرده‌اند. سوپهانکار و سوتاپا^۶ (۲۰۱۵)، در شمال بنگال برای یک بازه زمانی ۲۴ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) با استفاده از مطالعات میدانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مطالعه رودخانه Duduya_Rehti پرداختند و مشخص کردند که روند فرسایش و تغییرات عرض بستر نامنظم است به‌طوری‌که در بخش‌های پایین دست حالت افزایشی داشته درحالی‌که در بخش میانی حالت انقباضی و کاهشی را دارا بود و این امر را به فرآیندهای متقابل فرسایش و رسوب مرتبط دانسته‌اند. هنش و همکاران^۷ (۲۰۱۳)، تغییرات زمانی و مکانی میزان فرسایش کناری را با مطالعه ترکیبی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه و مدل تحلیل سلسله مراتبی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که میانگین نرخ فرسایش کناری در حوضه‌های کوهستانی ساحل انگلیس با مقادیر گزارش شده از حوضه‌های مناطق کوهستانی با اقلیم معتدله در سایر مناطق قابل مقایسه است اما حوضه‌های مورد مطالعه تغییرات زمانی و مکانی زیادی به لحاظ فرسایش داشتند. اغلب محققین با کمی کردن داده‌های مربوط به شرایط رودخانه‌ها، سعی در اولویت‌بندی بازه‌های رودخانه از نظر میزان فرسایش در امتداد رودخانه داشته‌اند (طلایی و همکاران، ۱۳۸۵: ۱). یکی از روش‌های کارا در این زمینه شاخص BEHI^۸ است. شاخص BEHI توسط دیو رزگن^۹ در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است و

1. Gregory

2. Simon & Thorne

3. Thakur et al.

4. Kessler et al.

5. Bandyopadhyay et al.

6. Subhankar & Sutapa

7. Henshaw

8. Bank erosion hazard index

9. Rosgen

یکی از روش‌های ارزیابی وضعیت فعلی و پتانسیل فرسایش کناری رودخانه است و با اختصاص مقادیر کمی به جنبه‌های مختلف از وضعیت کناره و محاسبه یک نمره کلی، می‌تواند در تعیین وضعیت کناره جریان در یک محدوده بزرگ، اولویت-بندی کناره‌های فرسایش‌پذیری برای اعمال اقدامات اصلاحی و ... مورد استفاده قرار گیرد. شریا و همکاران^۱ (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای با عنوان اعتبار سنجی مدل BEHI برای ارزیابی فرسایش کناری در امتداد رودخانه هائورا^۲ در هند بیان داشتند که نتایج این مدل کاملاً منطبق بر قوانین تجربی است زیرا از پارامترهای مختلفی جهت برآورد فرسایش کناری رودخانه استفاده می‌کند. آن‌ها در طول مسیر رودخانه ۶۰ مقطع را در هر دو کناره چپ و راست رودخانه مورد پایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش به دست آمده با روش تجربی و روش BEHI در ۷۵٪ از مسیر رودخانه هائورا یکسان است. بر اساس این نتایج آن‌ها مناسب بودن شاخص BEHI را جهت برآورد میزان فرسایش کناری گزارش نمود. همچنین آلمانوا و همکاران^۳ (۲۰۱۹) این شاخص و شاخص NBS^۴ را با داده‌های برداشت شده مقایسه کردند و برتری شاخص BEHI ($R^2=0.72$) نسبت به شاخص NBS ($R^2=0.53$) را نشان دادند.

رودخانه تروال در شرق استان کردستان دارای موقعیت دره‌ای جانبی نامحدود می‌باشد؛ به طوری که کمتر از ۱۰ درصد از مجرای رودخانه در مجاورت دره است. دشت سیلابی به صورت پیوسته در حاشیه رود قرار دارد و ممکن است دبی‌های بالایی را در دوره سیلابی تجربه کند. مطالعات اوسطی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که خصوصیات مقطع مجرای رودخانه در زیرحوضه‌های با اندازه‌های مختلف متفاوت بوده و دارای تفاوت مکانی آشکاری بوده که آن را به تغییر رابطه بارش - رواناب و اثر احتمالی فعالیت‌های انسانی در قسمت‌های پایاب دارای سطح حوضه بالادست بزرگ‌تر مرتبط دانسته‌اند. نتایج بررسی نیری و همکاران (۱۳۹۶) نیز تفاوت در وضعیت پایداری استیل‌های مختلف رودخانه تروال را نشان داد. رودخانه تروال از نظر نوع سازند و جنس مواد بستر نسبت به فرسایش حساس است (عثمانی، ۱۳۹۴: ۴) و در بخش‌هایی از مسیر دارای فرسایش کناری زیادی می‌باشد (خالدیان و خدری تاژان ۱۳۸۴). علیرغم اینکه این رودخانه در دهه‌های اخیر تحت تأثیر فعالیت‌های متعدد انسانی و طبیعی قرار گرفته است، هنوز مشخص نیست که کدام یک از محدوده‌های رودخانه دارای بیشترین فرسایش کناری و کدام عامل بر میزان فرسایش کناری تأثیرگذارتر است؟ لذا در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از مطالعات صحرایی و اندازه‌گیری‌های کمی مختلف، وضعیت فرسایش کناری رودخانه تروال در بازه‌های مختلف رودخانه، واقع در حوضه بالادست ایستگاه حسن خان مورد بررسی قرار گیرد و عوامل مؤثر بر فرسایش کناری مورد بحث و بررسی قرار داده شوند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

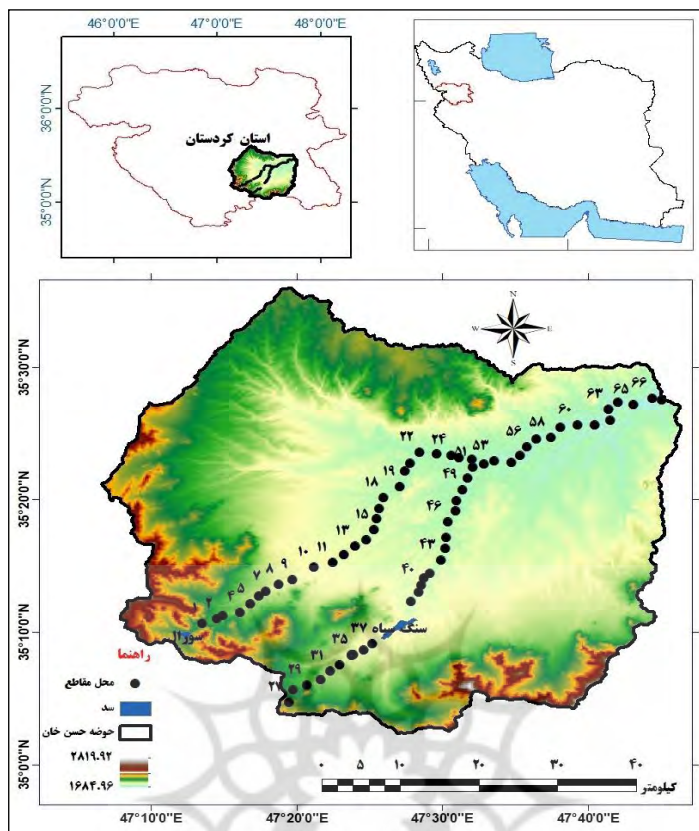
رودخانه تروال، به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های حوضه سفیدرود در شرق استان کردستان قرار دارد و به علت عبور از روستای تروال به همین نام خوانده می‌شود. از نظر موقعیت جغرافیایی این بخش از حوضه تروال بین مختصات ۴۷ درجه ۶ دقیقه و ۳۸ ثانیه و ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه و ۲۱ ثانیه طول شرقی و مختصات ۳۵ درجه و ۲ دقیقه و ۲۲ ثانیه و ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه و ۵۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه با امتداد جنوب‌غربی-شمال شرقی به حوضه قزل‌اوزن می‌ریزد.

1. Sherya et al.

2. Haora River

3. Allmanová

4. Near Bank Stress



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه (بالادست ایستگاه حسن خان) در استان کردستان، ایران

روش تحقیق

در این تحقیق دستگاه GPS مدل Garmin Etrex، متر لیزری D8 لایکا با برد ۲۰۰ متر، دقت ۱ میلی‌متر و زوم X4 و بسته‌های نرم‌افزاری Arc GIS 10.2، Google Earth Pro، Microsoft office_Excel، SPSS 22 و استفاده شد. به منظور برداشت پارامترهای شاخص‌های BEHI و BEHI اصلاح شده، بازدیدهای میدانی در تاریخ ۱۴ تا ۲۶ خرداد ۱۳۹۶ انجام گرفت و داده‌های مربوط به شاخص BEHI شامل نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع بانکفول، نسبت عمق ریشه به ارتفاع کرانه، تراکم ریشه و حفاظت سطحی؛ طی بازدیدهای میدانی و با توجه به جدول استاندارد شاخص BEHI تعیین شدند. مختصات هر یک از مقاطع مورد بررسی با GPS مدل Garmin Etrex ثبت شد. لازم به ذکر است که مقاطع انتخاب شده با فاصله حدود ۲ کیلومتری مد نظر قرار گرفت. البته در محل مخزن سدهای سنگ سیاه و سورال، قاعدتاً مقطع برداری صورت نگرفته است و در محل‌هایی که دست‌کاری بستر در اثر عواملی مانند برداشت شن و ماسه صورت گرفته بود، محل مقاطع جایجا شد.

زاویه کرانه که یکی از پنج پارامتر شاخص BEHI می‌باشد، بر اساس پروفیل مقاطع برداشت شده توسط متر لیزری لایکا D8 و با انجام محاسبات هندسی به دست آمد. مشخصات دیگری از جمله وضعیت لایه‌بندی خاک کناره رودخانه، فاصله کاربری اراضی فعلی از کناره رودخانه و نوع کاربری کناره‌ها طی مشاهدات میدانی یادداشت شد. داده‌های برداشت شده با تصاویر تهیه شده از مقاطع انطباق داده شده و مقادیر پارامترهای شاخص BEHI محاسبه شدند.

شاخص ارزیابی خطر فرسایش کناری رودخانه (BEHI)

شاخص BEHI شاخص ارزیابی خطر فرسایش کناری است که برای برآورد میزان فرسایش کناری در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش توسط رزگن در سال ۲۰۰۱ ارائه شد (آلمانوا و جاکوبیس، ۲۰۱۶: ۱۱۰۸). شاخص

BEHI ابزاری کمی برای برآورد پتانسیل و وضعیت فرسایش کناری است که بر اساس ترکیبی از متغیرهای فرسایش-پذیری به دست می‌آید (گوپال گوش و همکاران^۱، ۲۰۱۶). در مطالعات قبلی از دو نسخه رایج از شاخص BEHI یعنی BEHI کامل و BEHI اصلاح شده استفاده شده است. شاخص BEHI کامل به شناسایی مقطع پر جریان نیاز دارد اما در شاخص BEHI اصلاح شده، نیازی به شناسایی مقطع پر جریان نمی‌باشد.

شاخص BEHI کامل: گام نخست در محاسبه مقادیر شاخص BEHI آن است که هر کدام از پارامترهای مورد استفاده در شاخص BEHI در بازدهی‌های میدانی تعیین شوند. شاخص BEHI کامل، متشکل از پنج پارامتر است که چهار پارامتر آن به روش مشاهده‌ای تعیین می‌شود و برای تعیین زاویه کرانه نیاز به اندازه‌گیری پروفیل مقطع می‌باشد. ۵ پارامتر مورد استفاده عبارت‌اند از:

- نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان
- نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه که برحسب درصد بیان می‌شود (سها و ماخوپادهای^۲ ۲۰۱۴: ۲۱۷)
- تراکم ریشه‌ها برحسب درصد
- زاویه کرانه برحسب درجه
- حفاظت سطحی برحسب درصد

شاخص BEHI اصلاح شده: رزگن پیشنهاد داده است که محققین فاقد تجربه کافی در شناسایی مقطع پر جریان و استفاده از BEHI کامل، از شاخص BEHI اصلاح شده استفاده نمایند و از این رو در شاخص BEHI اصلاح شده، پارامتر "نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان" حذف می‌شود (رزگن، ۲۰۰۱). بر این اساس؛ شاخص BEHI اصلاح شده بر اساس چهار پارامتر دیگر محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر کمی هر پارامتر با توجه به جداول استاندارد BEHI کامل و پارامترهای BEHI اصلاح شده برای هر کرانه از مقطع رودخانه تعیین می‌شود و جمع امتیازات کل پارامترها به عنوان مقدار شاخص محاسبه می‌گردد. بر اساس عدد محاسبه شده برای شاخص و کلاس‌بندی ارائه شده در جداول استاندارد مربوطه، وضعیت فرسایش کناری رودخانه کلاس‌بندی می‌شود.

بررسی تأثیر پارامترهای مورد استفاده در مدل BEHI بر نتایج حاصل از کلاس‌بندی میزان فرسایش کناری
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص BEHI بر کلاس‌بندی وضعیت فرسایش کناری، کلاس‌های شدت فرسایش (چهار کلاس خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم) مشخص شده در دو کرانه راست و چپ رودخانه در حوضه بالادست ایستگاه حسن خان به عنوان تیمارهای مورد بررسی مد نظر قرار گرفت و اختلاف بین مقادیر پارامترهای شاخص BEHI در کلاس‌های چهارگانه با استفاده از آزمون تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا نرمال بودن مقادیر باقیمانده داده‌ها بر اساس آزمون کولموگروف - اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها بر اساس آزمون لیون انجام گرفت. همچنین برای کلاس‌بندی تیمارها در صورت معنی‌دار شدن نتیجه آزمون F، از آزمون مقایسه‌ای دانکن استفاده شد.

بحث و یافته‌ها

جهت تعیین پتانسیل فرسایش کناری رودخانه تروال، اندازه‌گیری‌های اولیه از هر دو کرانه چپ و راست رودخانه در تمام ۶۷ مقطع طی بازدهی‌های صحرایی انجام شد و داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شد. سپس مقادیر پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های BEHI و BEHI اصلاح شده برای هر کدام از کرانه‌های راست و چپ مقاطع محاسبه شده و با استفاده از جدول راهنمای شاخص خطر فرسایش کناری (BEHI)، امتیازات هر کدام از پارامترها تعیین و با جمع

¹ Gopal Ghosh et al.

² Saha & Mukhopadhyay

زدن امتیازات پارامترها، مقادیر شاخص‌های BEHI و اصلاح شده تعیین گردید و طبق کلاس‌بندی مقادیر شاخص‌ها، وضعیت خطر فرسایش کناری مشخص شد.

شاخص BEHI کامل

بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از مقاطع مختلف، امتیازدهی به پارامترهای شاخص BEHI کامل انجام گرفت که نتایج این امتیازدهی در جدول ۱ ارائه شده است. یافته‌های شاخص BEHI کامل نشان می‌دهد که فرسایش کناری در هر دو کرانه صورت می‌گیرد و تفاوت‌های مکانی بین مقاطع مختلف و کرانه‌های راست و چپ هر مقطع دیده می‌شود. در کرانه راست بازه‌های مورد مطالعه رودخانه تروال، میزان خطر فرسایش کناری در ۱۷ مقطع دارای پتانسیل کم، در ۲۱ مقطع دارای پتانسیل متوسط، در ۲۵ مقطع دارای پتانسیل زیاد و در ۴ مقطع دارای پتانسیل خیلی زیاد است. در کرانه چپ وضعیت رودخانه از نظر پتانسیل خطر فرسایش کناری با اندکی تفاوت به این شرح بوده است که رودخانه در ۱۳ مقطع دارای پتانسیل کم، ۲۳ مقطع دارای پتانسیل متوسط، ۲۸ مقطع دارای پتانسیل زیاد و در ۳ مقطع دارای پتانسیل خیلی زیاد است. نتایج بررسی وضعیت خطر فرسایش کناری بر اساس BEHI کامل نشان می‌دهد که در کرانه راست مقاطع ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ میزان خطر فرسایش کناری خیلی زیاد است. در کرانه راست مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۶ در پایین‌دست سد سورال و مقاطع ۳۵، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲ و ۴۳ در پایین‌دست سد سنگ سیاه، میزان خطر فرسایش کناری زیاد است اما به سمت خروجی حوضه از میزان خطر فرسایش کناری کاسته می‌شود؛ به طوری که کرانه راست مقاطع ۵، ۱۹، ۲۴، ۲۵، ۲۸، ۲۹، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۶، ۳۷، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲ و ۶۷ دارای خطر فرسایش کناری متوسط و مقاطع ۲۷، ۳۰، ۳۱، ۳۱، ۳۱، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲ و ۶۳ خطر فرسایش کناری کم را نشان می‌دهند. این وضعیت در کرانه چپ رودخانه با اندکی تفاوت بدین شرح است که مقاطع ۲۱، ۴۰ و ۴۴ دارای خطر فرسایش کناری خیلی زیاد، مقاطع ۱، ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۸، ۳۹، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۵۳، ۵۷، ۶۱ و ۶۲ دارای خطر فرسایش کناری زیاد، مقاطع ۲، ۵، ۱۵، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۲، ۳۴، ۳۶، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۲، ۵۴، ۵۵، ۵۹، ۶۰، ۶۴، ۶۵، ۶۶ و ۶۷ دارای خطر فرسایش کناری متوسط و مقاطع ۲۷، ۳۰، ۳۱، ۳۳، ۳۵، ۳۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۶، ۵۸ و ۶۳ دارای خطر فرسایش کناری کم هستند.

جدول ۱: مقادیر شاخص BEHI کامل و وضعیت فرسایش کناری در کرانه‌های راست و چپ مقاطع مورد مطالعه در حوضه بالادست ایستگاه حسن خان

شماره مقطع	مقادیر شاخص BEHI کامل		شماره مقطع	وضعیت فرسایش کناری		مقادیر شاخص BEHI کامل		وضعیت فرسایش کناری
	R	L		R	L	R	L	
A ۱	۳۱/۴	۳۱/۴	A ۳۵	زیاد	زیاد	۲۵/۲۵	۱۰/۲۵	کم
A ۲	۲۴/۸	۲۲/۷۵	A ۳۶	زیاد	متوسط	۱۸/۷۵	۱۵/۷۵	متوسط
A ۳	۲۹/۹	۳۲/۹	A ۳۷	زیاد	زیاد	۱۵/۲۵	۱۳/۷۵	کم
A ۴	۲۸/۳۵	۲۸/۳۵	A ۳۸	زیاد	زیاد	۳۱/۴	۲۹/۹	زیاد
A ۵	۲۱/۲۵	۱۷/۷۵	A ۳۹	متوسط	متوسط	۳۱/۴	۳۲/۹	زیاد
A ۶	۲۸/۴	۲۹/۹	A ۴۰	زیاد	زیاد	۳۲/۹	۳۴/۹	خیلی زیاد
A ۷	۳۳/۴	۳۲/۹	A ۴۱	زیاد	زیاد	۳۴/۴	۳۴/۴	زیاد
A ۸	۳۱/۴	۳۱/۴	A ۴۲	زیاد	زیاد	۳۱/۴	۳۴/۴	زیاد
A ۹	۳۷/۹	۳۲/۹	A ۴۳	خیلی زیاد	زیاد	۲۸/۳۵	۲۸/۳۵	زیاد
A ۱۰	۳۴/۴	۳۱/۴	A ۴۴	زیاد	زیاد	۱۷/۷۵	۳۸/۴	خیلی زیاد

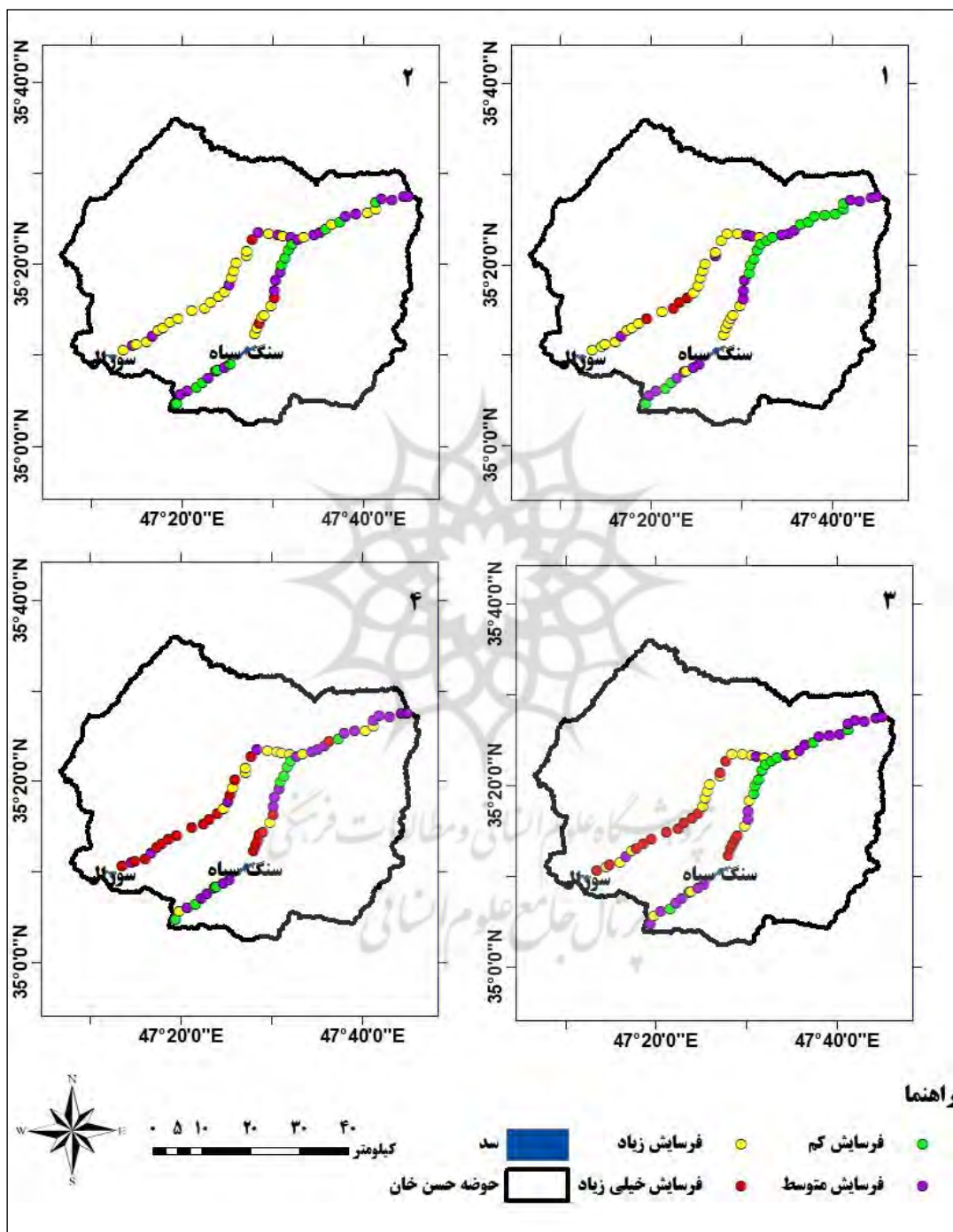
متوسط	متوسط	۲۰/۸	۱۹/۳	A۴۵	خیلی زیاد	زیاد	۳۶/۴	۳۴/۴	A۱۱
متوسط	متوسط	۲۱/۷۵	۲۲/۷۵	A۴۶	خیلی زیاد	زیاد	۳۴/۹	۳۱/۴	A۱۲
کم	متوسط	۱۲/۲۵	۱۶/۷۵	A۴۷	خیلی زیاد	زیاد	۳۷/۹	۳۲/۹	A۱۳
کم	کم	۸/۷۵	۸/۷۵	A۴۸	زیاد	زیاد	۳۲/۹	۲۸/۳۵	A۱۴
کم	کم	۱۰/۲۵	۸/۷۵	A۴۹	زیاد	متوسط	۳۳/۸۵	۲۱/۳	A۱۵
کم	کم	۱۰/۲۵	۱۱/۷۵	A۵۰	زیاد	زیاد	۳۳/۹	۳۲/۹	A۱۶
کم	کم	۱۳/۲۵	۱۱/۷۵	A۵۱	زیاد	زیاد	۲۶/۸۵	۳۱/۸۵	A۱۷
کم	متوسط	۱۱/۷۵	۱۹/۲۵	A۵۲	زیاد	زیاد	۲۹/۸۵	۲۹/۹	A۱۸
کم	زیاد	۱۳/۲۵	۲۶/۸۵	A۵۳	متوسط	زیاد	۲۳/۳	۲۸/۳۵	A۱۹
متوسط	متوسط	۱۷/۲۵	۱۷/۲۵	A۵۴	زیاد	زیاد	۳۲/۹	۳۱/۹	A۲۰
متوسط	متوسط	۲۱/۷۵	۱۵/۷۵	A۵۵	زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴	۳۷/۹	A۲۱
متوسط	کم	۱۹/۲۵	۱۳/۷۵	A۵۶	زیاد	متوسط	۲۸/۴	۲۰/۸	A۲۲
کم	زیاد	۱۳/۷۵	۳۴/۴	A۵۷	زیاد	زیاد	۲۸/۴	۲۸/۴	A۲۳
کم	کم	۱۰/۲۵	۸/۷۵	A۵۸	متوسط	متوسط	۲۱/۷۵	۲۱/۷۵	A۲۴
کم	متوسط	۱۳/۷۵	۱۷/۲۵	A۵۹	متوسط	زیاد	۱۹/۷۵	۲۸/۳۵	A۲۵
کم	متوسط	۱۳/۷۵	۱۵/۲۵	A۶۰	زیاد	متوسط	۲۶/۸	۲۳/۳	A۲۶
کم	زیاد	۱۳/۷۵	۲۸/۸	A۶۱	کم	کم	۱۳/۷۵	۱۳/۷۵	A۲۷
کم	زیاد	۱۲/۲۵	۲۹/۸۵	A۶۲	متوسط	متوسط	۲۳/۷۵	۲۳/۷۵	A۲۸
کم	کم	۱۳/۷۵	۱۳/۷۵	A۶۳	متوسط	متوسط	۱۷/۲۵	۱۷/۲۵	A۲۹
متوسط	متوسط	۱۷/۲۵	۱۶/۷۵	A۶۴	کم	کم	۱۲/۲۵	۱۲/۲۵	A۳۰
متوسط	متوسط	۱۷/۷۵	۲۱/۲۵	A۶۵	کم	کم	۱۴/۲۵	۱۴/۲۵	A۳۱
متوسط	متوسط	۱۹/۲۵	۱۷/۷۵	A۶۶	متوسط	متوسط	۱۵/۲۵	۱۷/۲۵	A۳۲
متوسط	متوسط	۱۵/۲۵	۱۵/۲۵	A۶۷	متوسط	کم	۱۵/۷۵	۱۲/۲۵	A۳۳
					متوسط	متوسط	۱۷/۷۵	۲۲/۷۵	A۳۴
L کرانه چپ					R کرانه راست				

شاخص BEHI اصلاح شده

نتایج شاخص BEHI اصلاح شده (جدول ۲) نشانگر آن است که در کرانه راست رودخانه در محدوده مورد مطالعه، ۱۷ مقطع دارای خطر فرسایش کناری خیلی زیاد، ۱۷ مقطع دارای خطر فرسایش کناری زیاد، ۲۲ مقطع دارای خطر فرسایش کناری متوسط و ۱۱ مقطع دارای خطر فرسایش کناری کم هستند. در کرانه چپ رودخانه وضعیت فرسایش کناری بدین صورت است که ۲۱ مقطع (مقاطع ۱، ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۲۱، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۴ و ۵۷) دارای خطر فرسایش کناری خیلی زیاد، ۱۳ مقطع (مقاطع ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۸، ۴۳، ۵۳، ۶۱ و ۶۲) دارای خطر فرسایش کناری زیاد، ۲۴ مقطع (مقاطع ۲، ۵، ۱۵، ۲۲، ۲۹، ۳۱، ۳۲، ۳۴، ۳۶، ۳۷، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۲، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۹، ۶۰، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶ و ۶۷) دارای خطر فرسایش کناری متوسط و ۹ مقطع (مقاطع ۲۷، ۳۰، ۳۳، ۳۵، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱ و ۵۸) دارای خطر فرسایش کناری کم هستند (شکل ۲).

بر اساس این نتایج محدوده بالادست رودخانه از نظر خطر فرسایش کناری بر اساس هر دو شاخص BEHI کامل و BEHI اصلاح شده در یک وضعیت متوسط تا زیاد قرار دارد (شکل ۲). از آنجا که شاخص BEHI کامل پارامتر بسیار حساس "نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان" را که نشانگر تغییرات جانبی رودخانه طی سال‌های متمادی است

در نظر می‌گیرد و امتیازدهی‌ها بر اساس پنج پارامتر نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان، نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه، تراکم ریشه، زاویه کرانه و حفاظت سطحی انجام می‌شود، نسبت به شاخص BEHI اصلاح شده روش کامل‌تری برای شناخت فرسایش کناری است. اما نتایج این بررسی نشان می‌دهد که روش BEHI اصلاح شده



شکل ۲: وضعیت فرسایش کناری در کرانه‌های رودخانه تروال در محدوده بالادست ایستگاه حسن خان ۱ BEHI کامل

کرانه راست ۲ BEHI کامل کرانه چپ ۳ BEHI اصلاح شده کرانه راست و ۴ BEHI اصلاح شده کرانه چپ

نتایج تقریباً مشابهی با BEHI کامل داشت و می‌توان بیان نمود که دلیل توصیه رزگن (۲۰۰۱) مبنی بر اینکه "زمانی که محققین فاقد تجربه کافی در شناسایی مقطع پر جریان و استفاده از BEHI کامل هستند، از شاخص BEHI اصلاح شده استفاده نمایند" مشخص می‌گردد.

جدول ۲: مقادیر شاخص BEHI اصلاح شده و وضعیت فرسایش کناری در کرانه‌های راست و چپ مقاطع مورد مطالعه در حوضه بالادست ایستگاه حسن خان

وضعیت فرسایش کناری		مقادیر شاخص BEHI اصلاح شده		شماره مقطع	وضعیت فرسایش کناری		مقادیر شاخص BEHI اصلاح شده		شماره مقطع
L	R	L	R		L	R	L	R	
کم	زیاد	۸/۸	۲۰/۳	A۳۵	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۲۸/۴۵	A۱
متوسط	متوسط	۱۴/۳	۱۵/۸	A۳۶	متوسط	زیاد	۱۹/۸	۲۳/۳۵	A۲
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۲/۳	A۳۷	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۲۸/۴۵	A۳
خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۸/۴۵	۲۸/۴۵	A۳۸	خیلی زیاد	زیاد	۲۶/۹	۲۶/۹	A۴
خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴۵	۲۹/۹۵	A۳۹	متوسط	متوسط	۱۶/۶	۱۹/۸	A۵
خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۳۱/۴۵	A۴۰	خیلی زیاد	زیاد	۲۸/۴۵	۲۶/۹۵	A۶
خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۲/۹۵	۳۲/۹۵	A۴۱	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴۵	۲۸/۴۵	A۷
خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴۵	۲۹/۹۵	A۴۲	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۲۹/۹۵	A۸
زیاد	زیاد	۲۶/۹	۲۶/۹	A۴۳	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴۵	۳۲/۹۵	A۹
خیلی زیاد	متوسط	۳۱/۴۵	۱۶/۳	A۴۴	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۳۱/۴۵	A۱۰
متوسط	متوسط	۱۷/۸۵	۱۷/۸۵	A۴۵	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۲/۹۵	۳۱/۴۵	A۱۱
متوسط	زیاد	۱۷/۸	۲۰/۳	A۴۶	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۹/۹۵	۲۹/۹۵	A۱۲
متوسط	کم	۱۳/۸	۱۰/۸	A۴۷	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۱/۴۵	۹۵/۳۲	A۱۳
کم	کم	۷/۳	۷/۳	A۴۸	زیاد	خیلی زیاد	۲۶/۹	۲۹/۹۵	A۱۴
کم	کم	۷/۳	۷/۳	A۴۹	متوسط	زیاد	۱۹/۸۵	۲۶/۹	A۱۵
کم	کم	۱۰/۳	۸/۸	A۵۰	خیلی زیاد	زیاد	۳۱/۴۵	۲۵/۴	A۱۶
کم	کم	۱۰/۳	۱۱/۸	A۵۱	زیاد	زیاد	۲۶/۹	۲۵/۴	A۱۷
متوسط	کم	۱۴/۳	۱۰/۳	A۵۲	خیلی زیاد	زیاد	۲۸/۴۵	۲۶/۹	A۱۸
زیاد	کم	۲۵/۴	۱۰/۳	A۵۳	زیاد	زیاد	۲۵/۴	۲۱/۸۵	A۱۹
متوسط	متوسط	۱۵/۸	۱۴/۳	A۵۴	زیاد	خیلی زیاد	۲۶/۹۵	۳۱/۴۵	A۲۰
متوسط	زیاد	۱۴/۳	۲۰/۳	A۵۵	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۳۲/۹۵	۲۹/۹۵	A۲۱
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۴/۳	A۵۶	متوسط	زیاد	۱۷/۸۵	۲۹/۹۵	A۲۲
خیلی زیاد	متوسط	۳۱/۴۵	۱۲/۳	A۵۷	زیاد	زیاد	۲۶/۹۵	۲۹/۹۵	A۲۳
کم	کم	۷/۳	۸/۸	A۵۸	زیاد	زیاد	۲۰/۳	۲۰/۳	A۲۴
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۲/۳	A۵۹	زیاد	متوسط	۲۵/۴	۱۸/۳	A۲۵
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۲/۳	A۶۰	زیاد	زیاد	۲۱/۸۵	۲۱/۸۵	A۲۶
زیاد	متوسط	۲۱/۸۵	۱۲/۳	A۶۱	کم	متوسط	۱۰/۸	۱۲/۳	A۲۷
زیاد	کم	۲۶/۹	۱۰/۸	A۶۲	زیاد	زیاد	۲۲/۳	۲۲/۳	A۲۸
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۲/۳	A۶۳	متوسط	متوسط	۱۴/۳	۱۵/۸	A۲۹

متوسط	متوسط	۱۳/۸	۱۵/۸	A۶۴	کم	کم	۱۰/۸	۱۰/۸	A۳۰
متوسط	متوسط	۱۶/۳	۱۶/۳	A۶۵	متوسط	متوسط	۱۲/۸	۱۲/۸	A۳۱
متوسط	متوسط	۱۶/۳	۱۶/۳	A۶۶	متوسط	متوسط	۱۴/۳	۱۳/۸	A۳۲
متوسط	متوسط	۱۲/۳	۱۳/۸	A۶۷	کم	کم	۱۰/۸	۱۰/۸	A۳۳
					متوسط	متوسط	۱۷/۸	۱۶/۳	A۳۴
L کرانه چپ					R کرانه راست				

بررسی تأثیر پارامترهای مورد استفاده در مدل BEHI بر نتایج حاصل از کلاس‌بندی میزان فرسایش کناری نتایج تجزیه واریانس ارائه شده بین کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل در جدول (۳) ارائه شده است؛ که نشان می‌دهد اختلاف معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین مقادیر "نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان"، "نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه"، "تراکم ریشه‌ها" و "حفاظت سطحی" کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل وجود دارد. این امر نشان می‌دهد که این چهار پارامتر مورد استفاده در محاسبه BEHI کامل، در تعیین کلاس‌های فرسایش کناری حوضه مورد بررسی نقش مؤثرتری داشته‌اند. در ادامه شواهدی از تأثیر این پارامترها در محاسبات شاخص BEHI و کلاس‌بندی وضعیت فرسایش کناری رودخانه تروال ذکر می‌گردد.

نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان: نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان یکی از پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص BEHI کامل است و دو شاخص BEHI کامل و BEHI اصلاح‌شده به واسطه این فاکتور از هم تمییز داده می‌شوند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از شاخص BEHI اصلاح‌شده و عدم بررسی پارامتر "نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان" می‌تواند بر نتایج کلاس‌بندی وضعیت فرسایش کناری در حوضه مورد بررسی مؤثر باشد. از این رو استفاده از روش BEHI کامل می‌تواند سیمای بهتری از وضعیت فرسایش کناری رودخانه تروال را ارائه دهد. البته با توجه به نتایج تقریباً مشابه BEHI و BEHI اصلاح‌شده در صورتی که محققین فاقد تجربه کافی در شناسایی مقطع پر جریان و استفاده از BEHI کامل هستند، می‌توانند از شاخص BEHI اصلاح‌شده استفاده نمایند.

جدول ۳: نتایج آزمون تجزیه واریانس (F) بین کلاس‌های مختلف فرسایش کناری

پارامتر مورد بررسی	منبع تغییرات	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	درجه آزادی	F	سطح معنی‌داری (sig)
نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان	بین گروهی	۷۴/۷۵۷	۲۴/۹۱۹	۳	۱۴/۳۰۳	۰/۰۰۰**
	درون گروهی	۲۲۶/۴۸۵	۱/۷۴۲	۱۳۰		
	کل	۳۰۱/۲۴۲		۱۳۳		
نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه	بین گروهی	۶۴۴/۴۵۱	۲۱۴/۸۱۷	۳	۱۷۵/۸۰۲	۰/۰۰۰**
	درون گروهی	۱۵۸/۸۵۰	۱/۲۲۲	۱۳۰		
	کل	۸۰۳/۳۰۱		۱۳۳		
تراکم ریشه‌ها	بین گروهی	۸۷۵/۵۱۲	۲۹۱/۸۳۷	۳	۱۹۱/۷۴۹	۰/۰۰۰**
	درون گروهی	۱۹۷/۸۵۷	۱/۵۲۲	۱۳۰		
	کل	۱۰۷۳/۳۷۰		۱۳۳		
بین گروهی	۸۹۹/۲۳۷	۲۹۹/۷۴۶	۳	۱۵۳/۳۳۷	۰/۰۰۰**	

حفاظت	درون گروهی	۲۵۴/۱۲۶	۱/۹۵۵	۱۳۰
سطحی	کل	۱۱۵۳/۳۶۳		۱۳۳
زاویه کرانه	بین گروهی	۳/۶۷۶	۱/۲۲۵	۳
	درون گروهی	۷۱/۲۵۱	۰/۵۴۸	۱۳۰
	کل	۷۴/۹۲۷		۱۳۳

** معنی داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد، * معنی داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد، ^{ns} غیر معنی دار

نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه: بر اساس نتایج جدول (۳) اختلاف معنی داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین مقادیر "نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه" کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل وجود دارد و این امر نشان‌دهنده تفاوت مکانی زیاد این پارامتر و نقش مهم آن تعیین کلاس‌های فرسایش کناری حوضه مورد بررسی است. در مقاطع نمونه‌برداری برای این پارامتر، مقادیر متنوعی ثبت شده، اما در کل این پارامتر نشان‌دهنده نبود گیاهان با ریشه‌های عمیق در بیشتر سواحل جانبی مقاطع مورد بررسی رودخانه است و در بیشتر موارد کناره‌ها دارای پوشش گیاهی از نوع گیاهان علفی بوده و کمتر پوشش درختی به چشم می‌خورد و حتی گاهی هیچ‌گونه پوشش گیاهی در کناره‌ها دیده نمی‌شود. اشکال ۳، ۴، ۵ و ۶ مربوط به مقاطع ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ است؛ که در آن‌ها میزان خطر فرسایش کناری بالایی برآورد شده است و یکی از دلایل آن وجود پوشش زراعی و علفی و در مواردی عدم وجود پوشش گیاهی می‌باشد.



شکل ۴: تصویری از مقطع شماره ۱۱



شکل ۳: تصویری از مقطع شماره ۹



شکل ۶: تصویری از مقطع شماره ۱۳



شکل ۵: تصویری از مقطع شماره ۱۲

تراکم ریشه‌ها: بر اساس نتایج جدول (۳) اختلاف معنی داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین مقادیر "تراکم ریشه‌ها" کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل وجود دارد و این امر نشان‌دهنده تفاوت مکانی زیاد این پارامتر و نقش مهم آن در تعیین کلاس‌های فرسایش کناری حوضه مورد بررسی است. این پارامتر در واقع تعیین‌کننده میزان زبری بستر و کناره‌هاست و به طور مستقیم با نوع پوشش گیاهی کف و کناره‌ها در ارتباط است. هرچه میزان تراکم ریشه زیاد باشد؛ فرسایش به میزان زیادی کاهش می‌یابد. میزان فرسایش در مقاطع ۲۷، ۳۰، ۳۱، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲ و ۶۳ کم گزارش شده است. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر پوشش

گیاهی و تراکم ریشه در مقاطع ۴۷ و ۴۸ بارز است، اما در مورد مقاطع ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲ عوامل دیگری غیر از تراکم ریشه سبب کاهش خطر فرسایش کناری شده است زیرا تراکم ریشه در این مقاطع کم می‌باشد.



شکل ۸: تصویری از مقطع شماره ۴۸



شکل ۷: تصویری از مقطع شماره ۴۷

حفاظت سطحی: این پارامتر غیر از پوشش گیاهی، بقایای شاخ و برگ درختان و وجود پوشش‌های سنگی در کف و کناره‌های رودخانه را نیز شامل می‌شود. بر اساس نتایج جدول (۳)، اختلاف معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین مقادیر "حفاظت سطحی" کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل، وجود دارد و این امر نشان‌دهنده تفاوت مکانی زیاد این پارامتر و نقش مهم آن در تعیین کلاس‌های فرسایش کناری حوضه مورد بررسی است.

زاویه کرانه: زاویه‌ای است میان خط پائینی کرانه و جریان آب که تشخیص بصری آن امکان‌پذیر می‌باشد و در حالت کلی با میزان فرسایش کناری رابطه معکوسی دارد. در تمام ۶۷ مقطع مورد بررسی، زاویه کرانه رودخانه، فقط در ۳ کلاس از ۶ کلاس جدول استاندارد امتیازبندی BEHI قرار گرفت. از این رو عدم وجود اختلاف معنی‌دار برای پارامتر "زاویه کرانه" بین کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل، می‌تواند به دلیل تشابه زیاد زاویه کرانه مقاطع مورد بررسی باشد و بدین دلیل تأثیر معنی‌داری در تفکیک کلاس‌های فرسایش کناری نداشته است.

یکی از مهم‌ترین مباحث در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، بحث پیشروی و پسروی کناره‌های رودخانه، در نتیجه فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری است. از آنجا که رودخانه تروال در اغلب مسیر، دارای حرکت جانبی زیادی می‌باشد؛ با برداشت ۶۷ مقطع و با به‌کارگیری شاخص‌های BEHI کامل و BEHI اصلاح‌شده خطر فرسایش کناری آن مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های موجود در این مطالعه، هم‌راستا با یافته‌های مطالعات دیگر از جمله خالدیان و خدروی تاژان (۱۳۸۴)، احمدی و خانجانی (۱۳۹۲)، زندی (۱۳۹۴) و عثمانی (۱۳۹۴) است که در سطح منطقه به‌ویژه در بازه محدود مورد مطالعه صورت گرفته است و نشان می‌دهند که کناره‌های رودخانه در بیشتر بازه‌ها دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش کناری هستند. نتایج ما نشان داد که حساسیت مقاطع و کناره‌های راست و چپ به فرسایش کناری براساس هر دو شاخص سطح BEHI کامل و BEHI اصلاح‌شده یکسان نیست. با این وجود بر اساس هر دو شاخص BEHI کامل و BEHI اصلاح‌شده، مقاطع بالادست نسبت به مقاطع پایین‌دست از حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش کناری برخوردارند. تفاوت مکانی خطر فرسایش کناری در بازه‌های مورد مطالعه در مقاطع مختلف عمدتاً به دلیل تفاوت در تراکم ریشه‌ها، عمق ریشه‌ها و حفاظت سطحی بوده است. حتی در مقاطعی که کناره راست و چپ دارای تفاوت حساسیت بوده‌اند، این تفاوت عمدتاً ناشی از نقش پوشش گیاهی و تأثیر آن از طریق تاج پوشش و ریشه‌ها بوده است. در واقع پوشش گیاهی هر سه فرآیند فرسایشی که توسط لاولر^۱ (۱۹۹۵) مورد مطالعه قرار گرفته است را تحت تأثیر قرار می‌دهد (وین^۲ و مستقیمی،

1. Lawler

2. Wynn

۲۰۰۶). پوشش گیاهی با بالا بردن مقاومت برشی خاک دیواره، باعث تقلیل فرسایش کناری شده و با افزایش ضریب زبری بستر، سرعت جریان و تنش برش را پایین آورده و نتیجه آن کاهش مقدار فرسایش و امتیاز کم مقاطع در محاسبات شاخص‌ها به منظور تعیین خطر فرسایش‌پذیری کناره بود. گونه‌های مختلف گیاهی، مقادیر متنوعی از مقاومت کششی را نسبت به خاک فراهم می‌کند (گنت و همکاران^۱، ۲۰۰۵ و پولین^۲، ۲۰۰۷). در محدوده بازه‌های مورد مطالعه اغلب زمین‌های حاشیه رودخانه، دارای کاربری زراعی بوده و فاصله اندکی را از کناره رودخانه دارند و پوشش درختی در این مناطق خیلی کم است و تنها پایه‌هایی از درختان بید و سپیدار دیده می‌شود. کلاس‌های خطر فرسایش کناری تعیین شده در مقاطع مختلف رودخانه تروال در محدوده بازه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل فرسایش کناری در بخش‌هایی وجود دارد که فاقد پوشش گیاهی است و در نتیجه حساسیت به فرسایش بالاتر است.

متغیرهای دیگری که در محاسبات این شاخص‌ها لحاظ نمی‌شود اما می‌تواند در حساسیت کناره‌ها نسبت به فرسایش دخالت داشته باشد؛ نوع کاربری اراضی و بافت خاک کناره رودخانه هستند، که عملاً و مستقیماً حساسیت کناره را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاربری اراضی کناره رودخانه به‌عنوان یک متغیر تعدیلی و تنظیم‌کننده مواد کناره شناخته می‌شود. همچنین تفاوت در بافت خاک کناره‌ها می‌تواند بر چسبندگی ذرات خاک، وزن مخصوص خاک و پایداری دامنه تأثیر گذاشته و زمان فرسایش را کم یا زیاد نماید. به‌علاوه کناره‌های دارای پوشش درختی نسبت به کناره‌های با کاربری زراعی دارای تراکم خاک بیشتر بوده و حساسیتشان نسبت به فرسایش کم است (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش وضعیت فرسایش کناری رودخانه تروال (حوضه بالادست ایستگاه حسن خان)، با محاسبه شاخص ارزیابی کمی خطر فرسایش کناری (BEHI) در ۶۷ مقطع نمونه‌برداری شده مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده محدوده مورد مطالعه از نظر خطر فرسایش کناری، در بیشتر بازه‌ها در وضعیت خطر متوسط تا زیاد قرار دارد و میزان فرسایش از بالادست به سمت پائین دست حوضه کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که مقاطع پایین دست به علت تراکم بالاتر پوشش گیاهی، انسجام ذرات و تغییر اندک و کم ابعاد بستر نسبت به مقاطع بالادست به پایداری رسیده‌اند، درحالی‌که مقاطع بالادست به علت وجود گسل‌ها، افزایش شیب، وجود مقاطع با پهنای کم و عمق بیشتر و افزایش سرعت جریان آب، ناپایدارند.

شاخص BEHI، شاخص جهانی ساده‌ای برای تعیین کمی میزان فرسایش کناری بر اساس خصوصیات مختلف مقاطع رودخانه است که به‌صورت شاخص BEHI کامل و BEHI اصلاح شده قابل محاسبه است. استفاده از روش BEHI کامل می‌تواند سیمای بهتری از وضعیت فرسایش کناری رودخانه تروال را ارائه دهد. البته با توجه به نتایج تقریباً مشابه BEHI و BEHI اصلاح‌شده، در صورتی‌که محققین فاقد تجربه کافی در شناسایی مقطع پر جریان و استفاده از BEHI کامل هستند، می‌توانند از شاخص BEHI اصلاح شده استفاده نمایند. نتایج تجزیه واریانس ارائه شده بین کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل، نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین مقادیر "نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع مقطع پر جریان"، "نسبت عمق متوسط ریشه به ارتفاع کرانه"، "تراکم ریشه‌ها" و "حفاظت سطحی" کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل وجود داشت. این امر نشان می‌دهد که این چهار پارامتر مورد استفاده در محاسبه BEHI کامل در تعیین کلاس‌های فرسایش کناری حوضه مورد بررسی نقش موثرتری داشته‌اند. عدم وجود اختلاف معنی‌دار برای پارامتر "زاویه کرانه" بین کلاس‌های مختلف فرسایش کناری مشخص شده بر اساس روش BEHI کامل، می‌تواند به دلیل تشابه زیاد زاویه کرانه مقاطع مورد

1. Genet et al.

2. Pollen

بررسی باشد. بررسی این پارامترها نشان‌دهنده نقش بارز پوشش گیاهی در حفاظت کناره‌هاست. از این رو جهت کاهش فرسایش کناری رودخانه، تقویت پوشش گیاهی و اجرای عملیات بیولوژیک خصوصاً با استفاده از گونه‌های درختی دارای ریشه‌های عمیق توصیه می‌گردد.

منابع

- اوسطی، خ.، نیری، ه.، عثمانی، پ.، ۱۳۹۵. برآورد عملکرد مدل‌های رگرسیون توانی در تعیین هندسه هیدرولیکی مقطع پر کانال‌های پایدار (مطالعه موردی: حوضه تروال)، تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۲، شماره ۳، صص ۱۸۹-۲۰۰.
- نیری، ه.، اوسطی، خ.، عثمانی، پ.، ۱۳۹۶. ارزیابی تعادل ژئومورفولوژیکی با استفاده از روش‌های رزگن و چهارچوب استیل رود (مطالعه موردی: رودخانه تروال، کردستان)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۹، شماره ۳، صص ۵۵۶-۵۴۱.
- احمدی، ا.، خانجانی، م. ح.، ۱۳۹۲. اثر تعداد کلاس‌های رسوب بر روی بده‌های مواد بستر محاسبه‌شده با روش اینشتین (مطالعه موردی رودخانه تروال در استان کردستان)، اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.
- بیاتی خطیبی، م.، ۱۳۹۱. بررسی و تحلیل نوع و مدت‌زمان جابه‌جایی‌ها در مسیر رودخانه مائندری و نقش جابه‌جایی‌ها در فرسایش کناری در نواحی نیمه‌خشک رودخانه قره‌آغاج، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۷، صص ۱۰۲-۸۹.
- حبیب پورگنابی، ک.، صفری شالی، ر.، ۱۳۹۰. راهنمای جامع کاربرد *SPSS* در تحقیقات پیمایشی، چاپ سوم، انتشارات متفکران - لویه، تهران.
- حسین زاده، م.، اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۴. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای؛ اشکال، مفاهیم و فرایندها، تهران، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- حق‌آبی، ا. ح.، امام‌قلی زاده، ص.، ۱۳۹۴. پیش‌بینی فرسایش کناری بخش‌های پیچان‌رودی رودخانه کشکان، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۰، صص ۱۳۸-۱۲۵.
- خالدیان، ح.، خدزی تاژان، ب.، ۱۳۸۴. بررسی عوامل هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی و فرسایش رودخانه تروال، دومین کنفرانس سراسری آب‌خیزداری و مدیریت منابع آب‌و خاک، دانشگاه شهید باهنر، ایران.
- رضایی مقدم، م. ح.، پیروزی نژاد، م.، ۱۳۹۳. بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۸، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- زندی، س.، (۱۳۹۴). تأثیر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی بستر رود بر روی کیفیت آب حوضه رودخانه تروال، پایان‌نامه ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان. استاد راهنما هادی نیری.
- طلایی، ر.، حسینی، ا. ح.، عظیمی، ف.، ۱۳۸۵. نحوه برآورد و ارزیابی شاخص رودخانه‌ها و کاربرد آن در مدیریت این منابع در حوزه قره‌سو علیا- استان اردبیل، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود، شهرکرد.
- عثمانی، پ.، (۱۳۹۴). بررسی و تحلیل تعادل ژئومورفولوژیکی رودخانه تروال در استان کردستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، استاد راهنما هادی نیری.

- غفاری، گ.، سلیمانی، ک.، مساعدی، ا.، ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مورفولوژی کناری آبراهه با استفاده از GIS (مطالعه موردی بابل رود مازندران)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۷، صص ۷۱-۶۱.
- نیری، ه.، رضایی مقدم، م. ح.، ۱۳۸۴. تغییرات ژئومورفولوژیک مجاری آبرفتی دشت سیلابی زیرنه‌رود و سیمینه‌رود و مخاطرات ناشی از آن‌ها، کنفرانس مخاطرات زمین، بلایای طبیعی و راهکارهای مقابله با آن، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز، تبریز.
- نیری، ه.، (۱۳۸۹)، تحلیل دینامیک و شکل مجرا در حوضه آبریز رودخانه مهاباد، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشگاه تبریز، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، استاد راهنما شهرام روستایی.
- وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پایگاه داده‌های علوم زمین کشور، نقشه-های زمین‌شناسی قروه و سندج مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- ولی پور، ط.، حسین زاده، م. م.، اسماعیلی، ر.، متش بیرانوند، س.، ۱۳۹۹. مطالعه فرسایش‌پذیری کناره و عوامل مؤثر بر آن در رودخانه لایوچ رود (استان مازندران، چمستان). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیستم، شماره ۵۹.
- یمانی، م.، شرفی، س.، ۱۳۹۱. پارامترهای هندسی و نقش آن‌ها در تغییرات زمانی-مکانی بستر رودها، رودخانه هر سرشاخه رود کرخه در استان لرستان، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۶، صص ۳۵-۴۸.
- یمانی، م.، شرفی، س.، ۱۳۹۱. ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۴۵، صص ۱۵-۳۵.
- Akhtar, M. P. Sharma, N. and Ojha, C. S. P., 2011. Braiding process and bank erosion in the Brahmaputra River, *International Journal of Sediment Research*, Vol 26, pp. 431-444.
- Allmanová, Z. and Jakubis, M., 2016. Is the BEHI index (part of the BANCS model) good for prediction of streambank erosion, *Acta Universitatis agricul Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, Vol 64, pp. 1107-1114.
- Allmanová, Z. Vlčková, M. Jankovský, M. Allman, M. and Hlavatá H., 2019. Predicting the annual erosion rates on a small stream by the BANCS model, *Soil and Water Research*, Vol 14, pp. 200-211.
- Bandyopadhyay, Sh. and Ghosh, K., Kumar De, S., 2014. A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India, *Geomorphology*, Vol 224, pp.: 111-121.
- C, Kessler. And A, C Gupta. And S, K Brown. M., 2013. Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota River Post European Sttlement, pp. 312-322.
- Fathi, M. and Honarbakhsh. A., 2013. Morphological Simulation of Bank Erosion in a Natural River, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol, 4 (11), pp. 3292-3300.
- Gopal, Ghosh. And K, Ades. and Sw, Pal. and Mukhopadhyay. S., 2016. Validation of BANCS model for assessing stream bank erosion hazard potential (SBEHP) in Bokreshwar River of Rarh region Eastern India., *Model. Earth Syst. Environ*, pp. 1-15.
- H, Piegay. And S E, Darby. and E, Mosselman. And N, Surian., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor asustainable approach to managing bank erosion, *River Research and Application Explore this journal* pp. 773-789.
- J, Henshaw. and A, R, Thame. and C. J Cifford, N., 2013, Identifying causes and controls of river bank erosion in a British Upland Catchment, *CATENA*, Volume 100, Pp. 107-119.

- K, Thakur. and P, Laha, Ch. and Aggarwal, S. P. 2012. River bank erosion hazard study of river Ganga, upstream of Farakka barrage using remote sensing and GIS, Nat Hazards, pp. 967-987.
- Rosgen, D.L., 2001. A Strem Channel Stability Assessment Methodology, Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference.
- Saha, S. and Mukhopadhyay, S., 2014. Assessment of bank erosion probability: a study on Kunu River, Eastern India International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences ISSN, Vol 4 (2), pp. 216-223.
- Shreya, B. and Susmita, S. and Kapil, G. and Sunil, K. D., 2013. Validation of BEHI Model through Field Generated Data for Assessin Bank Erosion along the River Haora West Tripura, India, Earth Science India , vol 6(III) . pp. 126-135.
- Simon, A., and Thorne, C. R.1996. Channel Adjustment of an Unstable Coarse-Grained Alluvial Stream: Opposing Trends of Boundary and Critical shear stress, and the Applicability of Extremal Hypothesis. Earth Surface Processes and Landforms. 21, 155-180.
- Subhankar, Ch. and Sutapa, M., 2015. Riverbank Erosion and Channel Width Adjustments across a Meandering Channel of North Bengal, India, Earth Science India, Vol 8, Pp. 61-78.
- Wynn, T.M. and Mostaghimi,S., 2006. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion ,southwestern Virginia, USA, Journal of American Water Resores Association, 42(1),pp.69-82.

