

## ارزیابی و برآورد میزان خطر فرسایش کناره‌های رودخانه با استفاده از مدل BANCS

(مطالعه موردی: رودخانه واز استان مازندران)

میلاذ رستمی<sup>۱</sup>، محمدمهدی حسین‌زاده<sup>۲\*</sup>، رضا اسماعیلی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی- مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه مازندران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۱/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۴/۱۵)

## چکیده

فرسایش و انتقال رسوب از جمله فرایندهای هیدرودینامیکی مهمی است که بسیاری از سیستم‌های هیدرولیکی نظیر حوضه‌های آبریز، رودخانه‌ها، سواحل و بنادر، سدها، پل‌ها، جاده‌ها، کشتزارها و تأسیسات عمرانی را متأثر می‌سازد. رودخانه واز یکی از رودخانه‌های مهم دامنه شمالی البرز در استان مازندران است. هدف این پژوهش، بررسی وضعیت پایداری کناره رودخانه واز با استفاده از مدل BANCS که شامل دو شاخص NBS و BEHI است. برای برآورد میزان فرسایش کناره‌ای در رودخانه واز، بازه ۳ کیلومتری انتخاب شد. سپس، با انتخاب ۸ مقطع عرضی با استفاده از برداشت میدانی و نقشه‌برداری پارامترهای ارتفاع کناره، زاویه کناره، ارتفاع کناره، عرض دبی لبالبی، عمق متوسط در دبی لبالبی، بیشترین عمق متوسط کناره در دبی لبالبی، شعاع انحنا و جنس مواد کناره در دو شاخص مورد نظر اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای هر یک از مقاطع در دو شاخص خطر فرسایش کناره و تنش برشی نزدیک کناره و مقایسه آنها با مشاهدات میدانی کناره‌های با خطر فرسایش کناره‌ای بیشتر و کناره‌های پایدارتر مشخص شد. مقایسه نتایج از این دو شاخص با مشاهدات میدانی نشان داد مدل BEHI نسبت به مدل NBS برای رودخانه واز کارآمدتر است. با توجه به نتایج شاخص BEHI میزان خطر فرسایش کناره ۸ مقطع و در هر دو کناره وجود دارد، به طوری که در کناره چپ مقاطع ۳، ۵ و ۶ و کناره راست مقاطع ۱، ۴ و ۷ میزان فرسایش زیاد بوده است و در کناره راست مقاطع ۲، ۳ و ۶ و کناره چپ مقاطع ۱ و ۶ فرسایش کم بوده و در سایر کناره‌ها فرسایش متوسط بوده است.

کلیدواژگان: رودخانه واز، شاخص BEHI، شاخص NBS، فرسایش کناره‌ای مدل BANCS.

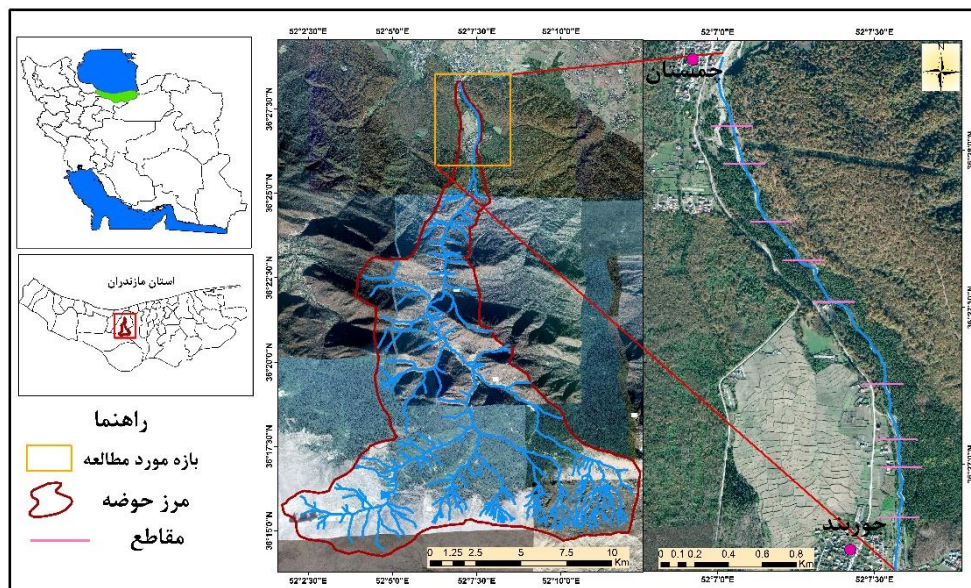
## مقدمه

فرسایش کناره رود یکی از علل عمده آلودگی غیر نقطه‌ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌ها است [۱]. رودخانه‌ها به خودی خود طی سال‌های متمادی دست‌خوش تغییرات می‌شوند، اما امروزه انسان‌ها با دخالت و دست‌کاری طبیعت توسط ایجاد سازه‌هایی مانند ساخت جاده‌ها پل‌ها و... به تسریع این فرایند دامن زده‌اند. جریان دبی لبالی رودخانه که هنگام ذوب برف یا بارندگی‌ها اتفاق می‌افتد، باعث فرسایش کناره‌ای می‌شود، که نتیجه آن افزایش بار رسوب و آلودگی آب آشامیدنی و از بین رفتن زمین‌های کناره رودخانه می‌شود [۲]. فرسایش کناره‌ای نقش اساسی در دینامیک رودخانه‌های آبرفتی ایفا می‌کند [۳]. با توجه به این مشکل، دانشمندان توجه خود را به طرف فرسایش حوضه آبخیز و کناره رودخانه معطوف کرده‌اند. برای بهینه‌سازی و پیشگیری از فرسایش کناره در مرحله نخست، نیاز به پیش‌بینی و شناسایی آسیب‌پذیرترین مناطق رودخانه است [۲]. میزان فرسایش کناره رودخانه وابسته به ساختار مورفولوژی، جنس، محافظت سطحی و حضور پوشش گیاهی کناره رودخانه است [۴] در سراسر جهان از ابتدای مطالعات رودخانه‌ای تا کنون مطالعات فراوانی با روش‌های متفاوت برای پیش‌بینی، بررسی و برآورد فرسایش کناره‌ای صورت گرفته است که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود: بررسی فرسایش کناره‌ای با استفاده از بین‌های فرسایشی [۳]، روش BSTEM [۵-۹] تنش برشی [۱۱] دندروژئومورفولوژی [۱۲-۱۴]، روش راسگن [۱، ۲، ۴ و ۱۴-۱۹]. در داخل کشور نیز از روش‌های متفاوتی برای بررسی فرسایش کناره‌ای استفاده شده است که می‌توان به مدل BSTEM [۲۰] تنش برشی [۲۱-۲۸] مدل راسگن، NBS و BEHE [۲۹-۳۱] اشاره کرد. مدل BANCS یک فرایند به‌خوبی پذیرفته‌شده برای پیش‌بینی پتانسیل خطر فرسایش کناره است. با توجه به اینکه فرسایش کناره‌ای جزء مخاطرات رودخانه‌های شمالی کشور است و باعث می‌شود بخش‌های مختلف رودخانه توسط فعالیت هیدرولیکی رودخانه فرسوده شود و موجب پس‌روی کناره‌ها و تغییر در مسیر جریان و آسیب رسیدن به سازه‌های کناره رودخانه از جمله جاده‌ها، پل‌ها و مناطق مسکونی شود. با توجه به اهمیت فرسایش کناره‌ای در رودخانه‌ها و از این مطالعه به بررسی و مطالعه شرایط پایداری رودخانه‌ها و از با استفاده از مدل (BANCS) که شامل دو شاخص تنش برشی

کناره NBS و شاخص خطر فرسایش کناره BEHE است، پرداخته می‌شود.

## منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز واز با جهت شمالی- جنوبی و با وسعتی معادل ۱۴۰/۹ کیلومتر مربع در دامنه شمالی رشته‌کوه‌های البرز و در جنوب شهر چمستان واقع شده که رواناب‌های آن با عنوان «رود واز» به دریای خزر می‌ریزد. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی، در شهرستان نور از استان مازندران قرار دارد. قسمت جنوبی حوضه (سرآب) پهن‌تر از قسمت شمالی حوضه (نقطه خروجی) است (شکل ۱). قسمت جنوبی این حوضه در مختصات جغرافیایی بین  $52^{\circ} 1' 59''$  و  $52^{\circ} 12' 56''$  طول شرقی و  $36^{\circ} 25' 17''$  عرض شمالی قرار گرفته است که هر چه به طرف شمال حوضه پیش برویم، حوضه یادشده باریک‌تر شده و نقطه خروجی آن در  $52^{\circ} 7' 33''$  طول شرقی و  $37^{\circ} 14' 17''$  عرض شمالی قرار گرفته است. حوضه واز در شمال، به حوضه رودخانه‌ها نور؛ در شرق، به حوضه‌های ناپلارود و آلس‌رود؛ در جنوب، به حوضه رود هراز و در غرب، به حوضه لایچ رود منتهی می‌شود. متوسط بارندگی سالیانه منطقه برابر  $694/6$  میلی‌متر در سال است. میانگین دمای سالانه حوضه از  $14$  درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات  $300$  متر تا حدود  $5$  درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات بیش از  $3$  هزار متر متغیر است. از نظر زمین‌شناسی حوضه آبخیز واز جزء زون البرز است و از دیدگاه چینه‌شناسی و تکنیک جزء البرز مرکزی است که با سایر واحدهای البرز اختصاصات یکناختی ندارد و ساختمان آن نتیجه دو کوه‌زایی مهم پرکامبرین و دیگری، مربوط به دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک و متشکل از سازندهای الیکا و شمشک است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه نیز برابر  $694/6$  میلی‌متر در سال است. میانگین دمای سالانه حوضه از  $14$  درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات  $300$  متر تا حدود  $5$  درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات بیش از  $3$  هزار متر متغیر است. از کل مساحت این حوزه منطقه‌ای با وسعت  $86/7$  کیلومتر مربع را عرصه جنگل و  $54/26$  کیلومتر مربع را عرصه مرتع در بر گرفته است. از کل مساحت این حوزه، منطقه‌ای با وسعت  $86/7$  کیلومتر مربع را عرصه جنگل و  $54/26$  کیلومتر مربع را عرصه مرتع در بر گرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه‌شده

## روش کار

روش‌های متفاوتی برای بررسی فرسایش کناره‌ای وجود دارد که یکی از آنها روش راسگن است. براساس روش راسگن، خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در چهار سطح مختلف بررسی می‌شود و به ترتیب از سطح یکم که شناخت مشخصات کلی و بر مبنای تجزیه سطحی است، تا سطح چهارم که ارزیابی بسیار دقیق و با جزئیات کامل از ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه ارائه می‌دهد، انجام می‌شود. برای پیش‌بینی میزان فرسایش کناره رودخانه، از روش ارزیابی کناره برای پیامد منع غیر نقطه‌ای رسوب BANCS استفاده می‌شود که توسط راسگن (۲۰۰۱) ارائه شده و برای محاسبه آن، دو روش تخمین فرسایش‌پذیری کناره استفاده می‌شود: ۱- شاخص خطر فرسایش کناره BEHI؛ ۲- تنش برشی نزدیک کناره NBS. که در این پژوهش با توجه به شرایط رودخانه واز و هدف پژوهش که بررسی خطر فرسایش کناره در این رودخانه است، از روش شاخص خطر فرسایش کناره و تنش برشی نزدیک کناره استفاده شده است (شکل ۲). سپس، برای ارزیابی پتانسیل فرسایش‌پذیری کناره رودخانه واز در استان مازندران ابتدا روی نقشه ۸ مقطع در یک بازه ۳ کیلومتری با توجه به امکان دسترسی، میزان فرسایش و تفاوت در ریخت و الگوی رودخانه انتخاب شد و با توجه به مشاهدات میدانی، میزان پس‌روی کناره که در محل قوس رودخانه به بیشترین مقدار خود می‌رسد، بیشتر مقاطع در محل قوس‌ها گرفته شد. در

ادامه، برای اندازه‌گیری پارامترهای یادشده در مدل‌های BEHI و NBS اقدام به نمونه‌گیری و نقشه‌برداری پارامترهای مورد نظر در رودخانه واز شد.

## شاخص خطر فرسایش کناره (BEHI)

شاخص خطر فرسایش کناره فرایند یکپارچه‌ای است که برای ارزیابی آسیب‌پذیری و فرسایش کناره با استفاده از متغیرهای شناخته‌شده انجام می‌شود که میزان فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

در این شاخص بر اساس پارامترهای ارتفاع کناره، ارتفاع مقطع پر، عمق ریشه، تراکم ریشه، زاویه کناره، درصد محافظت کناره، ترکیب مواد کناره و ساختار مواد کناره، پتانسیل فرسایش‌پذیری کناره رودخانه ارزیابی می‌شود.

پارامترهای ارتفاع کناره، ارتفاع مقطع پر، عمق ریشه، زاویه کناره با استفاده از نقشه‌برداری میدانی به دست آمده است. همچنین، پارامترهای تراکم ریشه و درصد محافظت کناره با توجه به مشاهدات میدانی به دست آمده و ترکیب مواد کناره و ساختار مواد کناره نیز با استفاده از نمونه‌برداری از کناره‌ها و انتقال آن به آزمایشگاه ژئومورفولوژی و انجام آزمایش گرانولومتری و هیدرومتری به دست آمده است [۲۴ و ۲۹].

فرایند نمره‌دهی به این هفت پارامتر بر مبنای ۱ تا ۱۰ است، عدد ۱ حساسیت کم و استعداد کم به فرسایش و عدد ۱۰ حساسیت و استعداد زیاد به فرسایش را نشان می‌دهد (جدول ۱).

محافظة سطح کناره که به وسیله چمن، چوب‌های بزرگ باقی‌مانده در کناره، آوار و پوشش گیاهی محافظت می‌شود. محافظت بیشتر خطر فرسایش کمتری را نشان می‌دهد.

- تعدیل و تنظیم مواد کناره (۱۰ تا ۱۰-)؛ تنوع مواد کناره، نرخ‌های فرسایشی مختلفی دارند، بنابراین بر اساس مواد تشکیل‌دهنده کرانه، نمره محاسبه‌شده از پارامترهای قبلی تغییر خواهد کرد.
- طبقه‌بندی مواد کناره (۱ تا ۱۰)؛ لایه‌ها در عمق خاک می‌توانند باعث ایجاد ضعف روی سطح کناره شوند، بنابراین، اگر طبقه‌بندی وجود دارد، به‌خصوص در بالاتر از طبقه کناره پر (مقطع پر) تا حدود ۱۰ نمره ممکن است به نمره محاسبه‌شده اضافه شود. در نهایت، با جمع کردن اعداد به‌دست‌آمده از هر پارامتر، نمره نهایی محاسبه و شرایط کرانه رودخانه از نظر حساسیت به فرسایش طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۲).

نسبت‌های اندازه‌گیری و متغیرها به شرح زیر است:

- نسبت ارتفاع کناره به ارتفاع دبی لبالی (مقطع پر) (۱ تا ۱۰)؛ به بیان دیگر ارتفاع کل کناره تقسیم بر ارتفاع کناره پر برای جبران و تعدیل اندازه جریان، که نسبت نزدیک به عدد ۱، کمترین میزان خطر فرسایش برای کناره است.
- عمق ریشه (۱ تا ۱۰)، نسبت عمق ریشه به میزان ارتفاع کناره مطالعه‌شده؛ به بیان دیگر عمق غالب حجم ریشه تقسیم بر ارتفاع کناره کل
- وزن تراکم ریشه به درصد (۱ تا ۱۰)؛ تراکم ریشه که به صورت مشاهده‌ای ارزیابی می‌شود، ضرب در عمق ریشه و عدد به‌دست‌آمده تقسیم بر ارتفاع کناره محاسبه‌شده.
- زاویه کناره به درجه (۱ تا ۱۰)؛ زاویه کناره‌ای تندتر و یا شیب کناره بیشتر، خطر بیشتر تخریب توده‌ای کناره به دلیل نیروی گرانشی و برشی.
- محافظت سطحی کناره (۱ تا ۱۰)؛ اندازه‌گیری درصد

جدول ۱. خلاصه شاخص خطر فرسایش کناره (BEHI) [۳۲]

راهنمای امتیازدهی خطر فرسایش کناره رودخانه واز							
امتیاز کل	حفاظت سطحی (%)	زاویه کناره (درجه)	تراکم ریشه (%)	عمق ریشه/ارتفاع کناره	ارتفاع کناره/ ارتفاع دبی لبالی	طبقه‌بندی خطر فرسایش	
						مقدار	خیلی کم
۹/۵-۵	۱/۹-۱	۲۰-۰	۱۰۰-۸۰	۱-۰/۹	۱/۱-۱	مقدار	کم
۱۹/۵-۱۰	۳/۹-۲	۶۰-۲۱	۷۹-۵۵	۰/۸۹-۰/۵	۱/۱۹-۱/۱۱	مقدار	
۲۹/۵-۲۰	۵/۹-۴	۸۰-۶۱	۵۹-۳۰	۰/۴۹-۰/۳	۱/۵-۱/۲	مقدار	متوسط
۳۹/۵-۳۰	۷/۹-۶	۹۰-۸۱	۲۹-۱۵	۰/۲۹-۰/۱۵	۲-۱/۶	مقدار	زیاد
۴۵-۴۰	۹-۸	۱۱۹-۹۱	۱۴-۵	۰/۱۴-۰/۰۵	۲/۸-۲/۱	مقدار	خیلی زیاد
۵۰/۴۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	مقدار	
	<۱۰	<۱۱۹	<۵	<۰/۰۵	<۲/۸	مقدار	شدید
	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	شاخص	

جدول ۲. طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش کناره

مقادیر عددی	توصیف
۹/۵-۵	استعداد فرسایش خیلی کم
۱۹/۵-۱۰	استعداد فرسایش کم
۲۹-۲۰	استعداد فرسایش متعادل
۳۹-۳۰	استعداد فرسایش بالا
۴۵-۴۰	استعداد فرسایش خیلی بالا
۷۰-۴۶	استعداد فرسایش بیش از حد

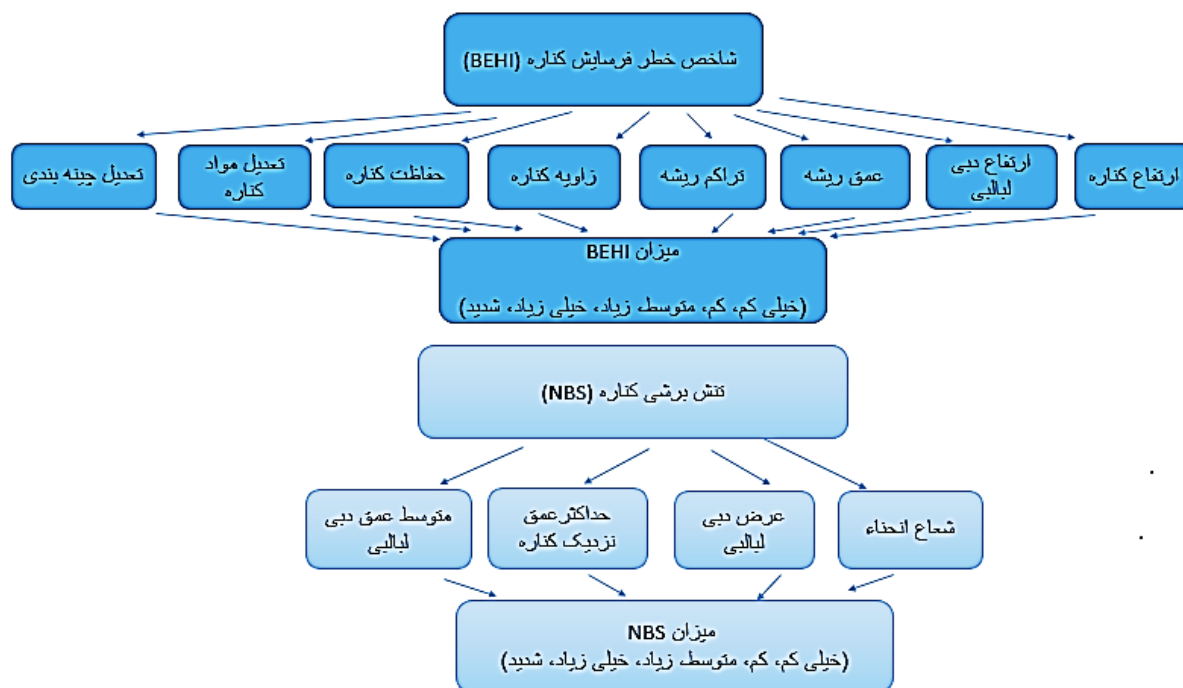
**شاخص تنش برشی نزدیک کرانه (NBS)**

در شاخص تنش برشی نزدیک کرانه از هفت روش الگوی مجرا و ارزیابی بارها، نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالبی (مقطع پر)، نسبت شیب خیزاب به میانگین شیب سطح آب، نسبت شیب خیزاب به شیب تنداب، نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه<sup>۱</sup> به متوسط عمق دبی لبالبی، نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی لبالبی و گرادیان سرعت برای ارزیابی ناپایداری کرانه استفاده می‌شود (کوربات، ۲۰۱۴: ۱۱). انتخاب روش مناسب تابع شرایط منطقه است. با توجه به ویژگی‌های

کناره رودخانه‌ی واز، دو روش نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالبی  $(R_c/W_{bkf})$ ، نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق دبی لبالبی  $(d_{nb}/d_{bkf})$  انتخاب شد. برای هر یک از کناره‌ها، پارامترهای عرض و عمق دبی لبالبی و حداکثر عمق نزدیک کرانه با استفاده از برداشت میدانی نقشه‌برداری شد. شعاع انحنا نیز با استفاده از تصاویر گوگل ارث و نرم‌افزار اتوکد به دست آمد. در نهایت، طبق پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه در سطوح مختلف از خیلی کم تا شدید تعیین شد (جدول ۳).

جدول ۳. حدود تغییرات شاخص‌های مؤثر بر میزان فرسایش کرانه [۳۳]

نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالبی $(\frac{R_c}{W_{bkf}})$	نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق دبی لبالبی $(\frac{d_{nb}}{d_{bkf}})$	میزان فرسایش‌پذیری کرانه (NBS)
بیشتر از ۳	کمتر از ۱	خیلی کم
۳ - ۲/۲۱	۱ - ۱/۵	کم
۲/۲۰ - ۲/۰۲	۱/۸۰ - ۱/۵۱	متوسط
۲/۰۱ - ۱/۸۰	۲/۵۰ - ۱/۸۱	زیاد
۱/۸۰ - ۱/۵۰	۳ - ۲/۵۰	خیلی زیاد
کمتر از ۱/۵۰	بیشتر از ۳	شدید



شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام مدل BANCS

## نتایج و بحث

دو طرف رودخانه ۲ تا ۳ سطح پادگانه‌ای شناسایی شده است. مشاهدات میدانی نشان داد کرانه رودخانه طی سیلاب‌های متعدد تحت تأثیر فرسایش کناره‌ای قرار گرفته است. به منظور ارزیابی حساسیت کرانه، پارامترهای استفاده‌شده در مدل شاخص خطر فرسایش کناره محاسبه و اندازه‌گیری شد (جدول ۴).

بازة مطالعه‌شده بخشی از رودخانه واز به طول ۳ کیلومتر حد فاصل روستای جوربند و شهر چمستان است که در گروه رودخانه‌های گراولی است و از نظر موقعیت کانال در وضعیت نسبتاً محدود قرار دارد. در این بازه اشکال غالب ژئومورفیک شامل موانع درون کانالی و متصل به کرانه بوده و به صورت متناوب دشت سیلابی در حاشیة رودخانه تکرار شده است. در

جدول ۴. مقادیر پارامترهای استفاده‌شده در شاخص خطر فرسایش کناره در رودخانه واز

محافظة سطحی (درصد)		زاویه کناره (درجه)		تراکم ریشه (درصد)		عمق ریشه به (متر)		ارتفاع دبی لبالی (متر)	ارتفاع کناره (متر)		مقطع عرضی
L	R	L	R	L	R	L	R	L R	L	R	
۷۰	۴۰	۵۹	۸۸	۵۰	۴۰	۰/۸	۱/۵	۰/۹	۰/۹	۱/۸۰	۱
۲۰	۶۰	۸	۴۳	۲۵	۲۰	۱	۰/۲۸	۰/۳۴	۱/۰۶	۰/۳۴	۲
۵۰	۴۰	۵۳/۳	۳۸/۵	۵۰	۴۳	۰/۵	۰/۹	۰/۵۷	۱/۱۰	۰/۵۷	۳
۱۰	۲۰	۸۵	۳۴/۷	۱۵	۱۰	۰/۱	۰/۱	۰/۶۱	۰/۶۱	۱/۲۰	۴
۵۰	۵۰	۳۴/۵	۸۰	۲۰	۸۰	۰/۲	۲	۰/۴۹	۰/۴۹	۲/۲۰	۵
۱۰	۵۰	۸۰	۱۶	۳۰	۲۵	۱/۵	۰/۱	۰/۳۹	۲/۱۰	۰/۳۹	۶
۶۰	۱۰	۲۹	۹۰	۵۰	۱۰	۰/۵	۰/۱	۰/۵۰۸	۰/۵۰۸	۱/۷۰	۷
۳۰	۶۰	۸۰	۱۰	۵۰	۱۰	۰/۱	۱/۵	۰/۲۶	۰/۲۶	۲/۱۵	۸

L = چپ R = راست

بر اساس داده‌های مدل در مقاطع مختلف (جدول ۴)، خطر فرسایش کناره رودخانه واز مشخص شد (جدول ۵). امتیاز نهایی هر مقطع محاسبه و بر اساس آن حساسیت و

جدول ۵. نتایج کلی رده‌بندی خطر فرسایش کناره (BEHI) در کناره راست و چپ مقاطع مطالعه‌شده

مقطع عرضی	BEHI امتیاز	خطر فرسایش کناره راست	BEHI امتیاز	خطر فرسایش کناره چپ
۱	۳۰/۸	استعداد فرسایش زیاد	۱۶/۴۷	استعداد فرسایش کم
۲	۱۴/۸	استعداد فرسایش کم	۲۴/۸۵	استعداد فرسایش متوسط
۳	۱۷/۴	استعداد فرسایش کم	۳۱/۲	استعداد فرسایش زیاد
۴	۳۸/۹	استعداد فرسایش زیاد	۲۵/۰۵	استعداد فرسایش متوسط
۵	۲۵/۳	استعداد فرسایش متوسط	۳۲/۹۵	استعداد فرسایش زیاد
۶	۱۹/۴۵	استعداد فرسایش کم	۳۳/۷	استعداد فرسایش زیاد
۷	۳۶/۵	استعداد فرسایش زیاد	۱۵/۱	استعداد فرسایش کم
۸	۱۹/۳	استعداد فرسایش کم	۳۱/۶	استعداد فرسایش زیاد

مشاهدات میدانی مقاطعی که فرسایش کم را نشان می‌دهند، معمولاً در طرف کوژ مقطع که تمرکز جریان آب کمتر است و پوشش گیاهی و میزان ریشه زیاد است، قرار دارند. همچنین، کناره‌هایی که در این مدل به صورت فرسایش زیاد نشان داده شده است با توجه به مشاهدات میدانی در قسمت تمرکز جریان قرار داشته و میزان ریشه در این کناره‌ها کمتر

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شاخص BEHI در کرانه چپ مقاطع ۲ و ۴ و در کرانه راست مقطع ۵ فرسایش به صورت نرمال و متوسط است. با توجه به نتایج شاخص در کناره چپ مقاطع ۱ و ۷ همچنین، در کرانه راست مقاطع ۲، ۳، ۶ و ۸ فرسایش کم نشان داده شده است و در سایر کرانه‌ها و مقاطع فرسایش زیاد را نشان می‌دهد. با توجه به

چپ مقاطع محاسبه شد و بر اساس امتیازهای به‌دست‌آمده وضعیت استعداد خطر فرسایش کناره و ناپایداری کناره‌ها تعیین شد (جدول ۷).

بوده است. پارامترهای استفاده‌شده در شاخص تنش برشی نزدیک کرانه نیز برای بازه مطالعه‌شده با استفاده از برداشت میدانی به دست آمد (جدول ۶). سپس، مقادیر نسبت‌های تعریف‌شده در هر دو روش برای هر یک از کناره‌های راست و

جدول ۶. مقادیر پارامترهای استفاده‌شده در شاخص تنش برشی نزدیک کرانه در رودخانه‌ی واز

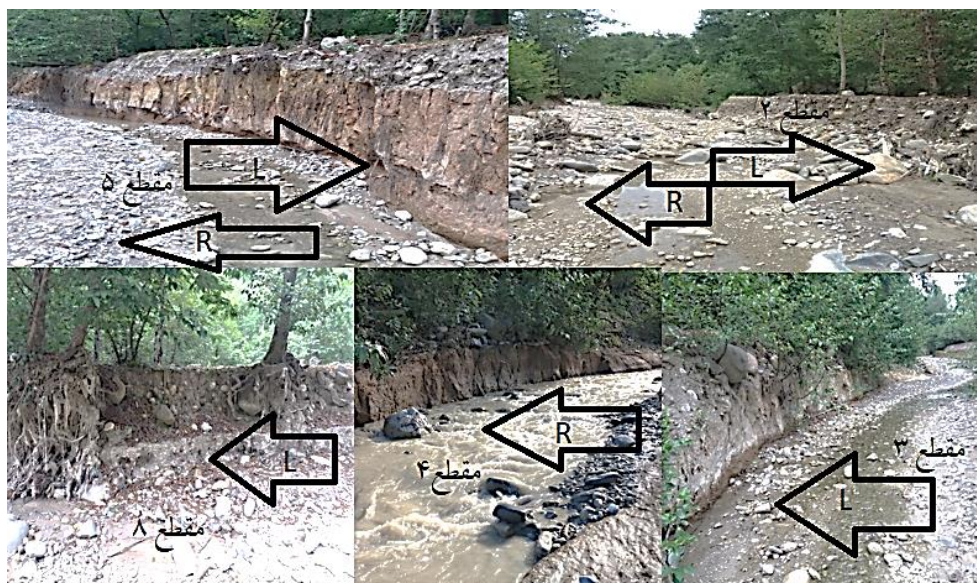
مقطع عرضی	شعاع انحنا	شیب (درصد)	عرض دبی / لبالی (متر)	عرض دشت سیلابی (متر)	حد اکثر عمق نزدیک کرانه راست	حد اکثر عمق نزدیک کرانه چپ	متوسط عمق دبی لبالی
۱	۱۱	۰/۰۲۹	۱۶	۳۵	۱/۲۴	۱/۲۴	۰/۹
۲	۱۲	۰/۰۱۲	۸/۸۵	۴۱	۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۳۴
۳	۲۶	۰/۰۲۱	۱۳	۲۸	۰/۳۴	۰/۴۸	۰/۵۷
۴	۱۰	۰/۰۴۴	۶/۱۰	۳۸	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۶۱
۵	۱۵	۰/۰۳۴	۸/۲۰	۴۵	۰/۷۳	۰/۳۳	۰/۴۹
۶	۱۸	۰/۰۱۷	۸	۴۸	۰/۵۴	۰/۲۴	۰/۳۹
۷	۱۴	۰/۰۴۱	۱۰/۱۰	۵۴	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۵۰۸
۸	۱۲	۰/۰۱۴	۹	۶۹	۰/۴۶	۰/۱۳	۰/۲۶

جدول ۷. نتایج کلی رده‌بندی مقاطع مطالعه‌شده بر اساس شاخص تنش برشی نزدیک کرانه در کناره‌ی راست و چپ

مقطع عرضی	$(R_c/W_{bkf})$	NBS	$(d_{nb}/d_{bkf})$ کرانه‌ی راست	NBS	$(d_{nb}/d_{bkf})$ کرانه‌ی چپ	NBS
۱	۰/۶۹	شدید	۱/۳۸	کم	۱/۳۷	خیلی زیاد
۲	۱/۳۶	شدید	۱/۱۵	کم	۱/۱۵	کم
۳	۲	زیاد	۰/۸۴	خیلی کم	۰/۸۴	کم
۴	۱/۶۴	خیلی زیاد	۰/۹۷	خیلی کم	۰/۹۸	کم
۵	۱/۸۳	زیاد	۱/۴۹	کم	۰/۶۷	خیلی کم
۶	۲/۲۵	کم	۱/۳۸	کم	۰/۶۱	خیلی کم
۷	۱/۳۹	خیلی زیاد	۱/۳۲	کم	۱/۲۴	خیلی زیاد
۸	۱/۳۳	خیلی زیاد	۱/۷۷	متوسط	۰/۵	خیلی کم

مقطع ۸ میزان فرسایش متوسط و در کناره‌ی چپ مقاطع ۱ و ۷ میزان فرسایش خیلی زیاد است. با توجه به مشاهدات میدانی (شکل ۳)، نتایج به‌دست‌آمده از مدل خطر فرسایش کناره به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در نتیجه مدل بهتری برای برآورد فرسایش کناره در رودخانه‌ی واز است، که از دلایل مؤثر بودن مدل خطر فرسایش کناره می‌توان در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر از جمله پوشش کناره که شامل ریشه، پوشش گیاهی، محافظت سطحی و جنس مواد کناره را نام برد که باعث می‌شود دقت و کاربرد مدل خطر فرسایش کناره نسبت به تنش برشی کناره بیشتر باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شاخص نسبت شعاع انحنا به دبی لبالی میزان استعداد فرسایش کناره در مقاطع ۱ و ۲ شدید است و در مقاطع ۳ و ۵ میزان فرسایش زیاد، در مقاطع ۴، ۷ و ۸ میزان مستعد بودن کناره در برابر فرسایش کناره خیلی زیاد و مقطع ۶ بر اساس این شاخص، میزان فرسایش کم است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از حداکثر عمق نزدیک به کناره‌ی چپ و راست هر مقطع، میزان فرسایش در کناره‌ی راست مقاطع ۱، ۲، ۵، ۶، ۷ و کناره‌ی چپ مقاطع ۲، ۳ و ۴ کم است. همچنین، در کناره‌ی راست مقاطع ۳ و ۴ و کرانه‌ی چپ مقاطع ۵، ۶ و ۸ خیلی کم است. در کناره‌ی راست



شکل ۳. تصویری از میزان فرسایش کناره‌ها در مقاطع مختلف

### نتیجه‌گیری

میزان فرسایش کناره خیلی زیاد و شدید است، اما در مقاطع دیگر میزان فرسایش کم و زیاد است. امتیاز شاخص نسبت حداکثر عمق کناره به متوسط عمق دبی لبالی میزان فرسایش کناره را در کناره راست مقاطع ۳ و ۴ و کناره چپ مقطع ۵ خیلی کم و میزان فرسایش کناره در کناره چپ مقاطع ۱، ۲، ۵، ۶ و ۷ و کناره راست مقطع ۸ میزان فرسایش کم است. اما در کناره راست مقطع ۸ میزان فرسایش متوسط است و در سایر کناره‌ها خیلی زیاد است. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از شاخص نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق دبی لبالی، به نتایج به‌دست‌آمده از مدل خطر فرسایش کناره‌ای نزدیک تر هستند و با توجه به مقایسه نتایج با مشاهدات میدانی این دو شاخص برای بررسی فرسایش کناره رودخانه واز مؤثرترند. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با سایر مقالات کارشده در زمینه فرسایش کناره‌ای با این روش‌ها در رودخانه‌های دیگر از جمله مقایسه روش‌های برآورد خطر فرسایش کناره‌ای با استفاده از مدل NBS [۲۴]، مقایسه و ارزیابی نتایج مدل NBS و BEHI در فرسایش کناره‌ای رودخانه قراقرقچای هشترود [۳۱]، برآورد خطر فرسایش کناره‌ای رودخانه طالقان با استفاده از مدل BEHI [۲۹]، نشان می‌دهد شاخص برآورد خطر فرسایش کناره دقت بیشتری دارد که دلیل آن، بررسی پارامترهای متعدد مؤثر بر میزان فرسایش کناره از جمله میزان پوشش گیاهی و ریشه، جنس مواد کناره و زاویه کناره است.

افزایش فرسایش کناره‌ای علاوه بر اینکه افزایش بار رسوب را به دنبال دارد، موجب ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال نیز می‌شود. راهکارها و روش‌های مختلفی برای شناسایی کناره‌های ناپایدار و برآورد میزان فرسایش در کناره‌ها وجود دارد. در این مطالعه از مدل BANCS که شامل دو شاخص خطر فرسایش کناره و تنش برشی کناره است، استفاده شد. با توجه به شرایط رودخانه واز ۸ مقطع در یک بازه ۳ کیلومتری انتخاب و با توجه به جمع‌آوری داده‌ها امتیازدهی به شاخص‌های مدل خطر فرسایش کناره و تنش برشی کناره انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از مدل خطر فرسایش کناره با توجه به جدول ۵ میزان خطر فرسایش کناره ۸ مقطع و در هر دو کناره وجود دارد. به طوری که در کناره چپ مقاطع ۳، ۵ و ۶ و کناره راست مقاطع ۱، ۴ و ۷ میزان فرسایش زیاد بوده و در کناره راست مقاطع ۲، ۳ و ۶ و کناره چپ مقاطع ۱ و ۶ فرسایش کم بوده و در سایر کناره‌ها فرسایش متوسط بوده است. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص خطر فرسایش کناره و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد در رودخانه واز در قسمت‌هایی که پوشش گیاهی و ریشه‌ها کمتر بوده‌اند، میزان فرسایش بیشتر است. با توجه به مشاهدات میدانی، نتایج به‌دست‌آمده از مدل خطر فرسایش کناره‌ای در رودخانه واز به واقعیت نزدیک بوده است که نشان می‌دهد این مدل برای برآورد خطر فرسایش در رودخانه واز کارآمد است. اما نتایج به‌دست‌آمده از تنش برشی کناره در شاخص شعاع انحنا به عرض دبی لبالی در مقاطع ۱، ۲، ۴، ۷ و ۸



## منابع

- [11]. Hosseinzadeh, M, Khaleghi S, Rostami M. Bank stability and morphometry analysis of Galali river in order to its stabilization against erosion (Qorveh, Kurdistan). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*. 2018;11(4):160-171[Persian].
- [12]. Hosseinzadeh, M., Rostami, M., River floor instability analysis using critical shear stress and discharge critical unit (Galali river case study, Qorveh, Kurdistan). *Iranian Natural Ecosystems Quarterly*, 2017;8(2): 1-11[Persian].
- [13]. Jugie M, Gob F, Virmoux C, Brunstein D, Tamisier V, Le Coeur C, Grancher D. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of hydrology*. 2018; 563:418-34.
- [14]. Khastar Boroujeni, M., Samadi Boroujeni, H., Ismaili K. Experimental study of shear stress threshold of sediments deposited clay - silt at different concentrations, *Iranian Water Research Journal*. 2013;7(13):131-138[Persian].
- [15]. Klavon K, Fox G, Guertault L, Langendoen E, Enlow H, Miller R, Khanal A. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017; 42(1):191-213.
- [16]. Kwan H, Swanson S. Prediction of annual streambank erosion for Sequoia National Forest, California. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014;50(6):1439-47.
- [17]. Layeghi P, Karam A. Hydrogeomorphological classification of Jajroud river with Rozgen model. *Quantitative geomorphological research*. 2014; 3:130-143[Persian].
- [18]. Malik I, Matyja M. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River—Czech Republic). *Geomorphology*. 2008 ;98(1-2):126-42.
- [19]. Malik I, Matyja M. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River—Czech Republic). *Geomorphology*. 2008;98(1-2):126-42.
- [20]. Mandal S. Assessing the instability and shifting character of the river bank Ganga in Manikchak Diara of Malda district, west bengal using bank
- [1]. Allmanová Z, Vlčková M, Jankovský M, Jakubis M, Allman M. Bank erosion of the Třstie stream: BANCS model predictions vs. real bank erosion. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2019;67(2):121-8.
- [2]. Bernhardt ES, Palmer MA, Allan JD, Alexander G, Barnas K, Brooks S, Carr J, Clayton S, Dahm C, Follstad-Shah J, Galat D. Synthesizing US river restoration efforts.
- [3]. Bigham KA. Evaluation and application of the Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment (BANCS) model developed to predict annual streambank erosion rates (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- [4]. Coryat M. Analysis of the Bank assessment for non-point source consequences of sediment (BANCS) Approach for the prediction of streambank stability and erosion along Stony Clove Creek in the Catskills (Doctoral dissertation, Syracuse University).
- [5]. Etmnan Z, Rostami M, Nosrati, K. Evaluation of River Bank Stability against Erosion and Management Practices of Taleghan River Bank Using LIN Method, *Journal of Echo Hydrology*, 2021;7(1):111-119[Persian].
- [6]. Fooladfar, H., Shafaei Bajestan, M. Fathi Moghadam, M., Experimental study and modeling of critical shear stress for cohesive sediment erosion, *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*. 2012;2(4):78-94[Persian].
- [7]. Ghomshi M, Vajdani N. Critical shear stress of erosion of cohesive sediment and its trace in design of open channels. *International Journal of Engineering Sciences, Iran University of Science and Technology*. 2005; 3:83-93[Persian].
- [8]. Ghosh KG, Pal S, Mukhopadhyay S. 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*. 2016; 2(2):1-5.
- [9]. Hoseynzadeh M.M, Esmaeilzadeh R. Estimation of stream bank erosion by BSTEM model, 2018,45(12):53-70 [Persian].
- [10]. Hosseinzadeh M.M, Khaleghi S, Vahedifar F. Comparison and Evaluation of NBS and BEHI Models' Results in Bank Erosion of Hashtrood Qaranqoo Chai River. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 2017;6(24): 41-61[Persian].

- Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference 2001 Mar 24 (Vol. 1).
- [28]. Rosgen DL. Natural channel design: fundamental concepts, assumptions, and methods. *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools*, Geophys. Monogr. Ser. 2011; 194:69-93.
- [29]. Rostami M, Hosseinzadeh M.M, Esmaili, R, Assessment of bank-river stability versus erosion and factors for its management strategy in the Vaz river, Mazandaran province, 2021;11(44):1-14. [Persian].
- [30]. Sass CK, Keane TD. Application of Rosgen's BANCS Model for NE Kansas and the Development of Predictive Streambank Erosion Curves 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2012; 48(4):774-87.
- [31]. Simon A, Bankhead N, Thomas R. Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting streambank loading rates and potential load reductions. *USDA-ARS, National Sedimentation Laboratory*. 2010 Jun 27.
- [32]. Stoffel M, Corona C, Ballesteros-Cánovas JA, Bodoque JM. Dating and quantification of erosion processes based on exposed roots. *Earth-Science Reviews*. 2013; 123:18-34.
- [33]. Stotts S, O'Neal M, Pizzuto J, Hupp C. Exposed tree root analysis as a dendrogeomorphic approach to estimating bank retreat at the South River, Virginia. *Geomorphology*. 2014 Oct 15; 223:10-8.
- erosion hazard index (BEHI), RS & GIS. *European Journal of Geography*. 2017; 8(4):6-25.
- [21]. Mazumdar N, Talukdar B. Assessment Of River Bank Erosion Potential In Brahmaputra River In Lower Assam Region Using Modified Rosgen's Bank Erosion Hazard Index Method. *Assessment*. 2018;8(8).
- [22]. McMillan M, Hu Z. A watershed scale spatially-distributed model for streambank erosion rate driven by channel curvature. *Geomorphology*. 2017; 294:146-61.
- [23]. Midgley TL, Fox GA, Heeren DM. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology*. 2012; 145:107-14.
- [24]. Nusrati K, Rostami M, Azarpar Kiwi, M. Estimation of Taleghan river bank erosion risk using BEHI model. *Journal of Natural Environmental Hazards* 2021;9(26):129-144[Persian].
- [25]. Rezaei Moghadam M, Thorati M, Asghari Saraskanrood P. 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 Zanzan Political Boundaries). *Journal of Quantitative Research*. 2012;1(1):33-46[Persian].
- [26]. Rosgen DL, Silvey HL. *Applied river morphology*. Pagosa Springs, CO: Wildland Hydrology; 1996.
- [27]. Rosgen DL. A practical method of computing streambank erosion rate. In *Proceedings of the*