نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ٤، زمستان ١٤٠٠
صفحات ٢٧ – ٤٠

# تحلیل خطر فرسایش کرانه رود با روش BEHI
# مورد مطالعه: رودخانه سجادرود(استان مازندران)

**رضا اسماعیلی [1]؛ دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.**
**فاطمه عابدینی زاده؛ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.**

**دریافت مقاله :۱۳۹۹/۰۶/۱۶ پذیرش نهایی:۱۴۰۰/۰۵/۲۲**

**چکیده**

**فرسایش کرانه رود یک فرایند طبیعی و پیچیده است و تخمین فرسایش‌پذیری کرانه رود همواره با مشکلاتی همراه است. در این تحقیق، شاخص خطر فرسایش کرانه رود (BEHI) و روش BEHI اصلاح شده، در امتداد بخشی از رودخانه سجادرود در استان مازندران مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این تحلیل فرسایش‌پذیری کرانه رود در رودخانه‌های کوهستانی و مقایسه دو روش فوق در فرسایش‌پذیری کرانه رود بوده است. شاخص‌های مختلف BEHI اصلی شامل نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی، عمق ریشه، تراکم ریشه، زاویه کرانه، حفاظت کرانه، ترکیب رسوبات کرانه و لایه‌بندی آنها در ۴ بازه و ۳۶ سایت مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. ۹۲ درصد سایت‌های مورد مطالعه در طبقات فرسایشی زیاد و خیلی زیاد قرار گرفتند. روش BEHI اصلاح شده نسبت به BEHI اصلی برآورد بالاتری (اغراق آمیز) داشته است. امتیاز کل دو روش BEHI با ضریب همبستگی ۰.۲۱ نشان دهنده ارتباط ضعیف بین نتایج این دو روش است. ضرایب رگرسیونی شاخص‌های BEHI نشان می‌دهد که حفاظت کرانه و نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی بیشترین تاثیر را در فرسایش‌پذیری کرانه رود داشته‌اند. در بازه‌های مورد مطالعه که رودخانه فروسایی شده است (تیپ A) به علت افزایش ابعاد کانال و ظرفیت انتقال جریان، رسوبات درشت‌تر به عنوان عامل حفاظتی در پای کرانه عمل نموده و فرسایش‌پذیری کرانه در دبی لبالبی کاهش می‌یابد. اما طی جریانهای سیلابی با دوره بازگشت طولانی‌تر فرسایش‌پذیری به علت ارتفاع زیاد کرانه، عمق و تراکم کم ریشه و رسوبات منفصل آبرفتی افزایش می‌یابد.**

**واژه های کلیدی : فرسایش کرانه رود، BEHI، سجادرود، مازندران.**

۱ نویسنده مسئول: Email: r.esmaili@umz.ac.ir

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

**مقدمه**

فرسایش کرانه رود یک فرایند طبیعی پیچیده است و نقش مهمی در تعادل دینامیکی رود دارد. میزان فرسایش کرانه بر پلان رود، نیمرخ عرضی و ابعاد رودخانه تأثیر می‌گذارد(Kwan and Swanson, ۲۰۱٤) و عامل اصلی کنترل کننده‌ی جابجایی کانال و تکامل پلانفرم رود است(Konsoer et al, ۲۰۱٥). هم چنین، رها شدن رسوبات درشت از کرانه رود و نهشته شدن آنها در کانال رود شرایط را برای تشکیل زیستگاههای آبی فراهم می‌آورد(Florsheim, ۲۰۰۸).

فرسایش کرانه رود یک فرایند تعدیل کننده طبیعی در رودخانه است، با این وجود، با تخریب زمین‌های اطراف رودخانه، تشدید سیلاب، ورود رسوبات و مواد آلاینده به جریان رود، رسوبگذاری در پشت سدها و مخازن، تخریب سازه‌های انسانی در کانال و حاشیه رود و از بین بردن زیستگاههای آبی به عنوان یک مخاطره محسوب می‌شود. تخمین زده می‌شود که هشتاد درصد کل رسوبات در رودخانه‌های جهان به طور مستقیم با فرسایش کرانه رود در ارتباط هستند (Bull,۱۹۹۷; Fox et al, ۲۰۰۷). از این رو، گام اول جهت کاهش خطرات ناشی از فرسایش کرانه رود، شناسایی مناطق خطر در امتداد رودخانه است.

روشهای مختلفی برای تخمین فرسایش کرانه رود و پیش‌بینی آن در سطح جهان به وجود آمده است و تحقیق در این زمینه همچنان ادامه دارد. لاولر(Lawler, ۱۹۹۳) هفت تکنیک عمده را برای تعیین میزان فرسایش کرانه رود و تغییرات جانبی کانال در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف مورد بحث قرار داد که عبارتند از: شواهد رسوب‌شناسی، منابع تاریخی، شواهد گیاهی، بررسی‌های پلانیمتری، تکرار نقشه‌برداری از مقاطع عرضی، میله‌های فرسایشی و تکرار فتوگرامتری زمینی.

اگرچه توسعه تکنیک‌های جدید مانند فتوگرامتری دیجیتالی و اسکن لیزری می‌توانند شرایط خوبی را برای کسب داده‌های توپوگرافی کرانه رود فراهم نمایند(Simon et al, ۲۰۱٦). اغلب این روشها پیچیده و پرهزینه هستند و استفاده از آنها در کارهای میدانی با مشکلاتی همراه هست. از این رو مدل‌هایی برای بررسی پایداری و ناپایداری کرانه رود و تخمین فرسایش آن ارائه شده است. شاخص خطر فرسایش کرانه رود[۱] (BEHI) نمونه‌ای از این مدل‌ها است که توسط روزگن (Rosgen, ۱۹۹٦, ۲۰۰۱) ارائه گردید. تاکنون تحقیقات متعددی در ارتباط با روش BEHI انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

سیمپسون و همکاران (Simpson et al, ۲۰۱٤) برای بررسی وضعیت اکولوژیکی نزدیک کرانه رودخانه روش BEHI را مورد استفاده قرار دادند و نتایج آنها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به عنوان ابزاری برای ارزیابی یکپارچگی فیزیکی و بیولوژیکی در رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. در تعدادی از مقالات هم خطر فرسایش کرانه رود با روش BEHI مورد بررسی قرار گرفتند و کرانه‌های با سطوح مختلف خطر شناسایی شدند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) فرسایش کرانه‌ای رودخانه قرانقوچای را با روش BEHI مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان خطر فرسایش در تمامی مقاطع از متوسط تا خیلی زیاد است. پایین بودن تراکم ریشه گیاهان در کرانه‌های راست رودخانه و مواد سست در کرانه‌های چپ رود عامل اصلی فرسایش زیاد معرفی شدند. ولی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) فرسایش کرانه رود را در ۷ مقطع از رودخانه لاویج در البرز شمالی را با روش BEHI مورد بررسی قرار دادند که همه این مقاطع دارای میزان فرسایش‌پذیری زیاد تا خیلی زیاد بودند. از جمله تحقیقات دیگری که با این روش انجام شده است می‌توان به

۱ - Bank Erosion Hazard Index

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

کارهای;Bandyopadhyay et al, ۲۰۱۳; Das and Bhowmik, ۲۰۱۳ Mazumdar and Talukdar, ۲۰۱۸ اشاره کرد. روش BEHI معمولاً برای رودخانه‌های با رتبه پایینتر به کار می‌رود واغلب برای رودخانه‌های بزرگ مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (Rosgen, ۲۰۰۱). روزگن (Rosgen, ۲۰۰۱) برای تخمین مقدار فرسایش رسوبات از کرانه رود روش BANCS[۱] که تلفیق دو روش BEHI و NBS[۲] است را پیشنهاد نمود. روش BEHI پتانسیل فرسایش‌پذیری کرانه را تخمین می زند وNBS تنش برشی را ارزیابی می‌کند. جهت صحت سنجی این روش، با استفاده از داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. برخی از این تحقیقات همبستگی بالای روش BANCS را با داده‌های واقعی نشان می‌دهد( Sass and Keane, ۲۰۱۲; Kwan and Swanson, ۲۰۱٤; Mandal, ۲۰۱۷; Allmanová et al, ۲۰۱۹; Lan et al ۲۰۱۹). از طرفی دیگر، تحقیقات گوشه و همکاران(Ghosh et al, ۲۰۱٦) در رودخانه کوپایی هند و مک میلان و همکاران(McMillan et al, ۲۰۱۷) در خلیج مکزیک، رابطه ضعیف بین BEHI و NBS را با میزان فرسایش واقعی نشان می‌دهد. رتبان(Rathbun, ۲۰۰٤) روش BEHI اصلاح شده را مطرح نمود که در آن شاخص نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی به علت وجود مشکلات در اندازه‌گیری دبی لبالبی از روش BEHI اصلی حذف گردید و امتیاز این شاخص از امتیاز کل، کم شد

این تحقیق با دو هدف اصلی انجام شد.

- تحلیل فرسایش‌پذیری کرانه رود در رودخانه‌های فروسایی شده مناطق کوهستانی؛
- مقایسه فرسایش‌پذیری کرانه رود با دو روش BEHI اصلی و BEHI اصلاح شده.

## داده‌ها و روش کار

### الف) منطقه مورد مطالعه

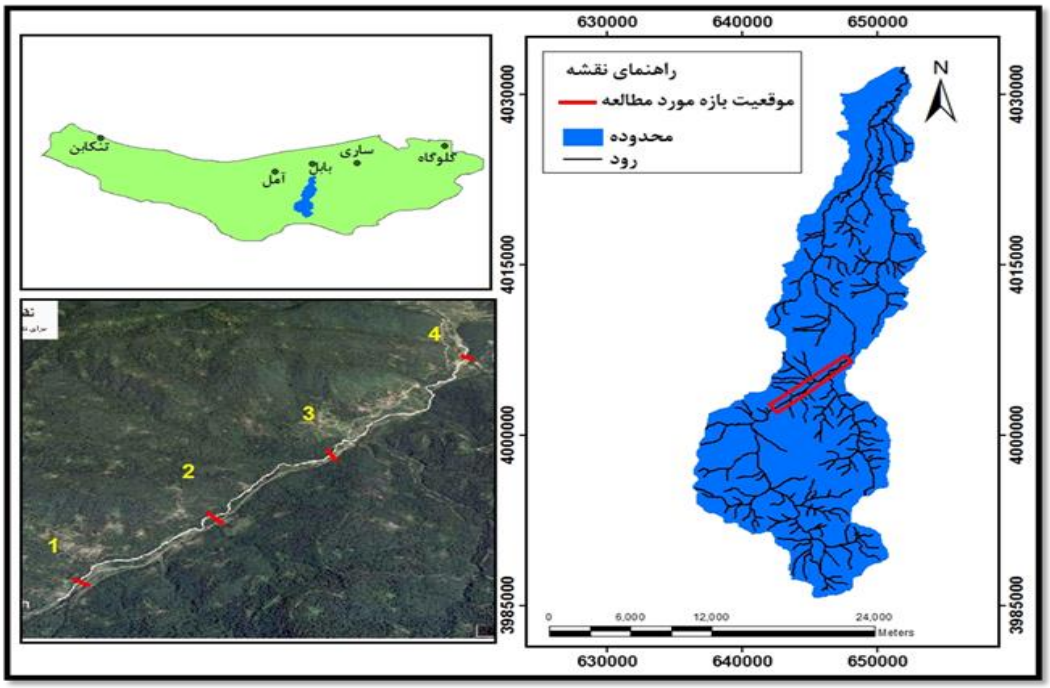
حوضه‌ی آبریز سجاد رود در قسمت جنوب بخش بندپی شرقی شهرستان بابل در استان مازندران واقع است(شکل ۱). این حوضه آبریز بین طول‌های جغرافیایی ´۳۱ °۵۲ تا ´۴۲ °۵۲ شرقی و عرض‌های جغرافیایی °۳۶ تا ´۲۴ و °۳۶ شمالی قرارگرفته است. حوضه سجاد رود یکی از زیرحوضه‌های بابل رود است و ۳۵۹ کیلومترمربع مساحت دارد. سنگ‌شناسی حوضه مربوط به دوران دوم و سوم زمین‌شناسی است و سازند شمشک (شیل، لایه‌های زغالی و ماسه سنگ مزوزوئیک) با ۳۷ درصد مساحت بیشترین پراکنش را دارد. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه بین ۳۷۱۲ تا ۲۹ متر از سطح دریا متغیر است. میانگین بارش سالانه (۱۳۸۲-۱۳۹۷) در ایستگاه فیروزجا حوضه ۹۶۲ میلیمتر ثبت شده است (ایستگاه وزارت نیرو، آب منطقه‌ای مازندران). میانگین دمای سالانه در همین دوره ۱۲.۶ درجه سلسیوس بوده است. بیشترین پوشش سطح زمین در حوضه جنگل و مرتع است که به ترتیب ۵۳ و ۳۰ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. میانگین دبی سالانه رود طی سالهای ۹۶-۱۳۸۰ در ایستگاه گلوگاه بندپی ۱.۶ مترمکعب در ثانیه محاسبه شده است(آب منطقه‌ای مازندران).

۱ - Bank Assessment for Nonpoint source Consequences of Sediment (BANCS)
۲- Near Bank Stress



[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]




**شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سجادرود و بازه‌های مورد مطالعه**

**ب) روش کار**

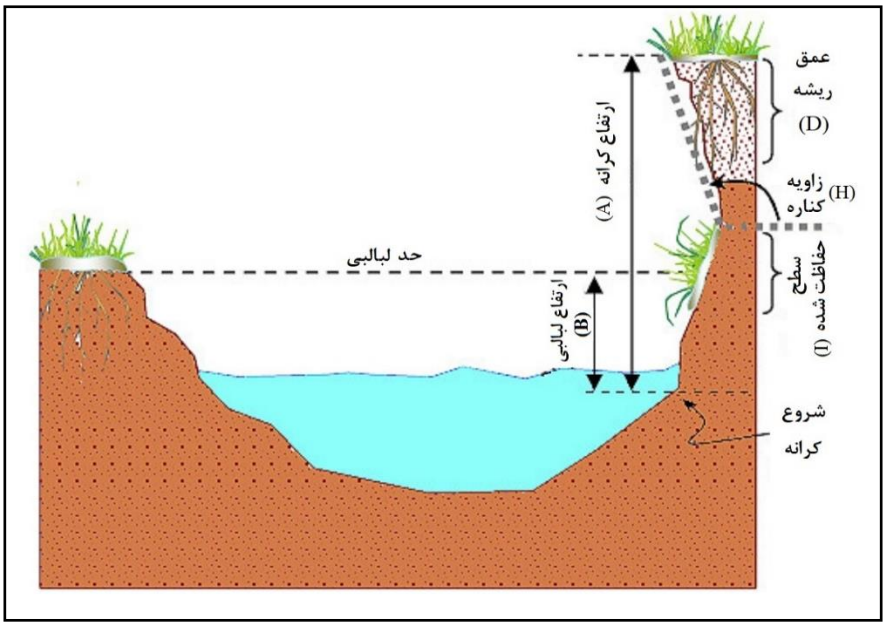
در این تحقیق، شاخص خطر فرسایش کرانه رود (BEHI) با روش اصلاح شده آن مورد مقایسه قرار گرفت. روش اصلی BEHI توسط دیوید روزگن در سال ۲۰۰۱ در ویلدلند هیدرولوژی[۱] مطرح شد. BEHI یک روش نیمه کمی چند شاخصه است که میزان فرسایش‌پذیری کرانه رود را با اندازه‌گیریهای میدانی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای این کار، چند پارامتر شامل ارتفاع کرانه، ارتفاع دبی لبالبی، زاویه کرانه، عمق ریشه، تراکم ریشه، سطح حفاظت‌شده، ساختار مواد کرانه و لایه‌بندی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند(شکل۲ و جدول۱). از پارامترهای فوق، ارتفاع کرانه و لبالبی، عمق ریشه و زاویه کرانه قابل اندازه‌گیری هستند. اما شاخص‌هایی مانند تراکم ریشه گیاهان و محافظت کرانه به صورت بصری و به درصد تخمین زده می‌شوند. درصد محافظت کرانه، شامل پوشش گیاهی کرانه، ریشه‌های فشرده و قطعه سنگهای بزرگ، تنه‌های افتاده درختان چوبی و مواد حاصل از سازه‌های انسانی است که در مجموع کرانه رود را از فرسایش جریان آب حفظ می‌کنند.

پس از محاسبه پارامترها و شاخص‌های فوق که در جدول ۱ به آنها اشاره شده است، دو شاخص مواد کرانه و لایه‌بندی آنها موجب تعدیل مجموع امتیازات BEHI می‌شوند. بدین معنی که رسوبات منفصل و سست که فرسایش‌پذیری بیشتری دارند و در لایه‌بندی رسوبات کرانه هم وجود دارند موجب افزایش امتیاز کل می‌شوند و سنگهای مقاوم و قطعه سنگهای بزرگ موجب کاهش امتیاز می‌شوند. جزییات بیشتر این تعدیل در جدول ۱ مشخص شده است.

۱ - Wildland Hydrology

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]




**شکل ۲. پارامترهای مورد اندازه‌گیری در روش BEHI**

**جدول ۱.اندازه‌گیری پارامترها و شاخص‌های BEHI (مستخرج از روزگن، ۲۰۰۶)**

| ردیف | پارامترها | علامت اختصاری | شاخص‌های مورد محاسبه BEHI | |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ارتفاع کرانه (m) | A | نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی (C) | C= A/B |
| ۲ | ارتفاع دبی لبالبی (m) | B | | |
| ۳ | عمق ریشه (m) | D | نسبت عمق ریشه به ارتفاع کرانه (E) | E=D/A |
| ۴ | تراکم ریشه (٪) | F | تراکم ریشه به درصد (G) | G=F*E |
| ۵ | زاویه کرانه (درجه) | H | زاویه کرانه به درجه | H |
| ۶ | سطح حفاظت شده (٪) | I | سطح حفاظت شده به درصد | I |
| ۷ | ساختار مواد کرانه و لایه‌بندی آنها | M | امتیاز کل BEHI با توجه به مواد کرانه و لایه‌بندی آنها تعدیل می‌شوند. سنگ بستر: فرسایش خیلی کم، قطعه سنگ‌های بزرگ : فرسایش کم، قلوه سنگ متوسط و بزرگ ۱۰ امتیاز کم می‌شود، مخلوط شن و ریگ بستگی به درصد آنها ۵ تا ۱۰ امتیاز اضافه می‌شود، ماسه : ۱۰ امتیاز اضافه می‌شود، سیلت و رس تغییری در امتیاز ایجاد نمی‌شود. لایه‌بندی هم با توجه به موقعیت قرارگیری لایه ناپایدار نسبت به ارتفاع لبالبی ۵ تا ۱۰ امتیاز اضافه می‌شود. | | |

امتیاز هر شاخص BEHI از ۱ تا ۱۰ متغیر است. در مجموع امتیاز کل همه شاخصها در ۶ گروه بسیارکم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد و شدید طبقه‌بندی می‌شوند(جدول ۲).

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

**جدول۲. مقادیر و امتیازهای مورد محاسبه در روش BEHI (روزگن، ۲۰۰۱)**

| طبقات | مقادیر و امتیاز | نسبت ارتفاع کرانه (m/m) | عمق ریشه (m) | تراکم ریشه (٪) | زاویه کرانه (درجه) | حفاظت سطحی (٪) | امتیاز کل |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| بسیارکم | مقدار | ۱-۱.۱ | ۱۰۰-۸۰ | ۱۰۰-۸۰ | ۰-۲۰ | ۱۰۰-۹۰ | |
| | امتیاز | ۱-۲ | ۱-۲ | ۱-۲ | ۱-۲ | ۱-۲ | ≤۱۰ |
| کم | مقدار | ۱.۱-۱.۲ | ۸۰-۵۵ | ۸۰-۵۵ | ۲۰-۶۰ | ۹۰-۵۰ | |
| | امتیاز | ۲-۴ | ۲-۴ | ۲-۴ | ۲-۴ | ۲-۴ | ۱۰-۲۰ |
| متوسط | مقدار | ۱.۲-۱.۵ | ۵۵-۳۰ | ۵۵-۳۰ | ۶۰-۸۰ | ۵۰-۳۰ | |
| | امتیاز | ۴-۶ | ۴-۶ | ۴-۶ | ۴-۶ | ۴-۶ | ۲۰-۳۰ |
| زیاد | مقدار | ۱.۵-۲ | ۳۰-۱۵ | ۳۰-۱۵ | ۸۰-۹۰ | ۳۰-۱۵ | |
| | امتیاز | ۶-۸ | ۶-۸ | ۶-۸ | ۶-۸ | ۶-۸ | ۳۰-۴۰ |
| خیلی زیاد | مقدار | ۲-۲.۸ | ۱۵-۵ | ۱۵-۵ | ۹۰-۱۲۰ | ۱۵-۵ | |
| | امتیاز | ۸-۹ | ۸-۹ | ۸-۹ | ۸-۹ | ۸-۹ | ۴۰-۴۵ |
| شدید | مقدار | > ۲.۸ | <۵ | <۵ | >۱۲۰ | <۵ | |
| | امتیاز | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | >۴۵ |

نیوتن و درنتن(Newton and Drenten, ۲۰۱۵) بر اساس روش BEHI اصلاح شده (Rathbun, ۲۰۰٤) روشی را برای تخمین فرسایش‌پذیری کرانه رود پیشنهاد نمودند. بر این اساس، ابتدا طولی از کرانه‌های رودخانه‌ای مشابه با عنوان مقاطع همگن مشخص می‌شوند. این مقاطع همگن با توجه به تفاوت در شیب کرانه، تفاوت در رسوبات کرانه و اختلاف واضح در پوشش گیاهی کرانه قابل شناسایی هستند. سپس ویژگیهای مقاطع همگن، در یک پرسشنامه پیش غربالگری که شامل شش سوال است مورد ارزیابی قرار می‌گیرد(جدول ۳).

**جدول ۳. پرسشنامه پیش غربالگری برای روش BEHI تغییر یافته (نیوتن و درنتن، ۲۰۱۵)**

| سوال | توضیحات |
|---|---|
| آیا در بازه همگن کرانه، کمتر یا مساوی ۵۰ درصد از کرانه محافظت می‌شود؟ | پایین کرانه به طور متوسط ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر زیر آب باشد. حفاظت شامل قطعه سنگهای بزرگ، تنه درختان و گیاهان ریشه‌دار است که مانع فرسایش می‌شوند. |
| آیا بیش از۵۰ درصد بازه همگن دارای زیربری حداقل ۱۵ سانتیمتری است؟ | منظور زیربری و فرسایشی است که به صورت عمقی حفر شده باشد. |
| آیا بیش از ۵۰ درصد کرانه دارای لایه‌بندی است؟ | حداقل یک لایه فرسایش‌پذیر(شامل ماسه، گراول و مخلوط) وجود داشته باشد. |
| آیا بیش از ۵۰ درصد کرانه ارتفاع بیشتر از ۳ متر و با بیش از ۵۰ درصد رخنمون خاک است؟ | اغلب اوقات این شرایط نشان‌دهنده یک کانال فروسایی شده است. |
| آیا بیش از ۵۰ درصد کرانه دارای ریشه‌های گیاهی فاقد خاک هستند؟ | - |
| آیا بیش از ۵۰ درصد از کرانه فاقد گیاهان ریشه‌دار است؟ | - |

در صورتی که پاسخ دو یا چند سوال "بله" باشد، احتمال فرسایش زیاد وجود دارد و ارزیابی BEHI انجام می‌شود. در غیر این صورت به علت اینکه فرسایش کم یا بسیار کم است، اندازه‌گیری انجام نمی‌شود. در این پروتکل، شاخص نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی حذف شده و تغییراتی در امتیازدهی این روش صورت گرفت.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

## شرح و تفسیر نتایج

محدوده مورد مطالعه به چهار بازه تقسیم شد(شکل ۳) و در مجموع ۳۶ سایت از این بازه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. بازه‌های مورد مطالعه، دارای بستر عمیق (فروسایی شده)، شیب زیاد، سینوسیته کم، نسبت عرض به عمق کم و رسوبات غالب قلوه سنگ در بستر هستند(جدول ۴) و بر اساس طبقه‌بندی رود روزگن در گروه A۳ قرار می‌گیرند.




**شکل ۳. تصاویر بخشی از بازه‌های ۱ تا ۴ در محدوده مورد مطالعه از رودخانه سجادرود**

**جدول ۴. مشخصات بازه‌های مورد مطالعه رودخانه سجادرود بر اساس روش روزگن**

| بازه | طول بازه به متر | تعداد سایت | نسبت حفرشدگی | سینوسیته | نسبت عرض به عمق | شیب (m/m) | رسوبات غالب بستر | نوع رودخانه (روزگن) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۵۲ | ۱۰ | ۱.۲ | ۱.۱ | ۱۰ | ۰.۰۶ | قلوه سنگ | A۳ |
| ۲ | ۹۰ | ۸ | ۱.۳ | ۱.۱ | ۱۱ | ۰.۰۵ | قلوه سنگ | A۳ |
| ۳ | ۱۲۰ | ۸ | ۱.۲ | ۱.۱ | ۱۰ | ۰.۰۶ | قلوه سنگ | A۳ |
| ۴ | ۹۳ | ۱۰ | ۱.۴ | ۱.۱ | ۱۲ | ۰.۰۵ | قلوه سنگ | A۳ |

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

**جدول۵ . خلاصه آماری و آنالیز واریانس شاخص‌های فرسایش کرانه رود در بازه‌های مورد مطالعه**

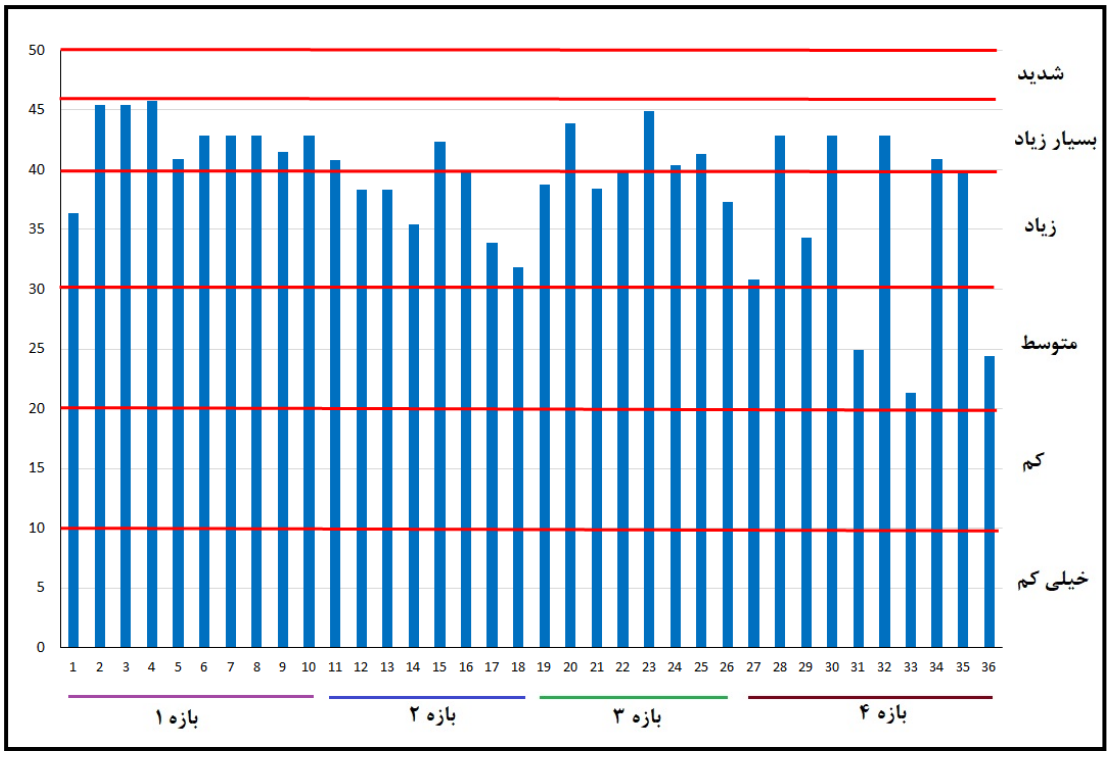
| شاخص | بازه | میانگین | انحراف معیار | حداقل | حداکثر | Sig | تفاوت/عدم تفاوت در بازه‌ها |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ارتفاع کرانه | ۱ | ۳.۸۸ | ۱.۹۵ | ۱.۸ | ۶.۶۵ | ۰.۰۳۹ | تفاوت دارد |
| | ۲ | ۱.۴۷ | ۰.۳۹ | ۰.۸۷ | ۲.۰۴ | | |
| | ۳ | ۳.۰۸ | ۳.۲۸ | ۰.۴۲ | ۹.۷۰ | | |
| | ۴ | ۱.۸ | ۰.۹۲ | ۰.۶۹ | ۳.۴۹ | | |
| | کل | ۲.۵۹ | ۲.۰۹ | ۰.۴۲ | ۹.۷۰ | | |
| ارتفاع لبالبی | ۱ | ۰.۴۲ | ۰.۱۲ | ۰.۲۵ | ۰.۶۷ | ۰.۴۹۶ | تفاوت ندارد |
| | ۲ | ۰.۴۳ | ۰.۱۳ | ۰.۳۱ | ۰.۶۹ | | |
| | ۳ | ۰.۴۲ | ۰.۲ | ۰.۱۵ | ۰.۸۵ | | |
| | ۴ | ۰.۵ | ۰.۱۳ | ۰.۳۳ | ۰.۶۹ | | |
| | کل | ۰.۴۴ | ۰.۱۵ | ۰.۱۵ | ۰.۸۵ | | |
| عمق ریشه | ۱ | ۰.۲۹۵ | ۰.۶۲ | ۰.۱ | ۲.۰۵ | ۰.۹۶۵ | تفاوت ندارد |
| | ۲ | ۰.۴۲ | ۰.۲۹ | ۰.۱ | ۰.۹۶ | | |
| | ۳ | ۰.۲۸ | ۰.۵۳ | ۰.۱ | ۱.۶ | | |
| | ۴ | ۰.۳۶ | ۰.۷۵ | ۰.۱ | ۲.۵ | | |
| | کل | ۰.۳۴ | ۰.۵۶ | ۰.۱ | ۲.۵ | | |
| تراکم ریشه | ۱ | ۲.۴ | ۴.۴ | ۱ | ۱۵ | ۰.۶۱۲ | تفاوت ندارد |
| | ۲ | ۷.۷۵ | ۱۱.۱ | ۱ | ۳۵ | | |
| | ۳ | ۱۰.۵ | ۲۶.۰۷ | ۱ | ۷۵ | | |
| | ۴ | ۳.۸ | ۷.۵۵ | ۱ | ۲۵ | | |
| | کل | ۵.۸ | ۱۳.۸ | ۱ | ۷۵ | | |
| زاویه کرانه | ۱ | ۴۲.۸ | ۷.۷۷ | ۳۱ | ۵۷ | ۰.۰۱۵ | تفاوت دارد |
| | ۲ | ۵۶ | ۱۶.۹ | ۳۳ | ۸۷ | | |
| | ۳ | ۶۲.۳۷ | ۱۸ | ۳۵ | ۹۰ | | |
| | ۴ | ۴۶.۹ | ۸.۱۷ | ۳۴ | ۵۸ | | |
| | کل | ۵۱.۲ | ۱۴.۶ | ۳۱ | ۹۰ | | |
| حفاظت کرانه | ۱ | ۴۴ | ۸.۷۵ | ۳۵ | ۶۵ | ۰.۰۳۸ | تفاوت دارد |
| | ۲ | ۳۷.۵ | ۱۱ | ۲۵ | ۵۵ | | |
| | ۳ | ۳۶.۲ | ۱۱.۲ | ۲۵ | ۶۰ | | |
| | ۴ | ۴۹ | ۹.۳۶ | ۳۵ | ۶۰ | | |
| | کل | ۴۲.۲ | ۱۰.۹ | ۲۵ | ۶۵ | | |

هریک از پارامترهای موردنیاز روش BEHI برای سایت‌های مختلف مورد اندازه‌گیری قرارگرفتند که خلاصه آماری آنها در جدول ۵ نشان داده شده است. ارتفاع کرانه‌ها (A) نسبت به ابعاد رود بلند بوده و میانگین آن ۲.۶ متر با حداقل و حداکثر ۰.۴ تا ۹.۷ متر متغیر بوده است. ارتفاع لبالبی (B) به طور میانگین ۰.۴۴ متر بوده و از ۰.۱۵ تا ۰.۸۵ متر تغییر داشته است. از این رو، شاخص نسبت ارتفاع کرانه به دبی لبالبی (C) بالا بوده است. به علت ارتفاع زیاد کرانه‌ها، عمق ریشه گیاهان کم و میانگین آنها ۰.۳۴ متر بوده است. هم چنین به علت عمق کم ریشه، تراکم آنها هم کم بوده و به طور

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]
[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

میانگین ۵.۷ درصد بوده است. زاویه کرانه رود از ۳۱ تا ۹۰ درجه و به طور میانگین ۵۱.۲ درجه محاسبه شده است. درصد حفاظت کرانه (I) بین ۲۵ تا ۶۵ درمتغیر که میانگین ارتفاع کرانه، زاویه کرانه و درصد حفاظت از کرانه در بازه‌های مورد مطالعه متفاوت بوده است. اما مقادیر ارتفاع لبالبی، عمق و تراکم ریشه در این بازه‌ها تفاوت معناداری نداشته است. بررسی پارامترهای فوق نشان می‌دهد که کرانه‌های رود در بازه‌های مورد مطالعه، با ارتفاع و زاویه زیاد، عمق کم و تراکم پایین ریشه گیاهی و رسوبات آبرفتی منفصل، به صورت بالقوه فرسایش‌پذیری زیادی خواهند داشت.

مجموع امتیاز کل BEHI سایت‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۴ و ۵، برحسب طبقات فرسایشی کرانه رود نشان داده شده است. از مجموع ۳۶ سایت مورد مطالعه، ۸ درصد در گروه فرسایش متوسط، ۳۹ درصد درطبقه فرسایش زیاد، ۵۳ درصد در گروه فرسایش خیلی زیاد قرار گرفته‌اند.



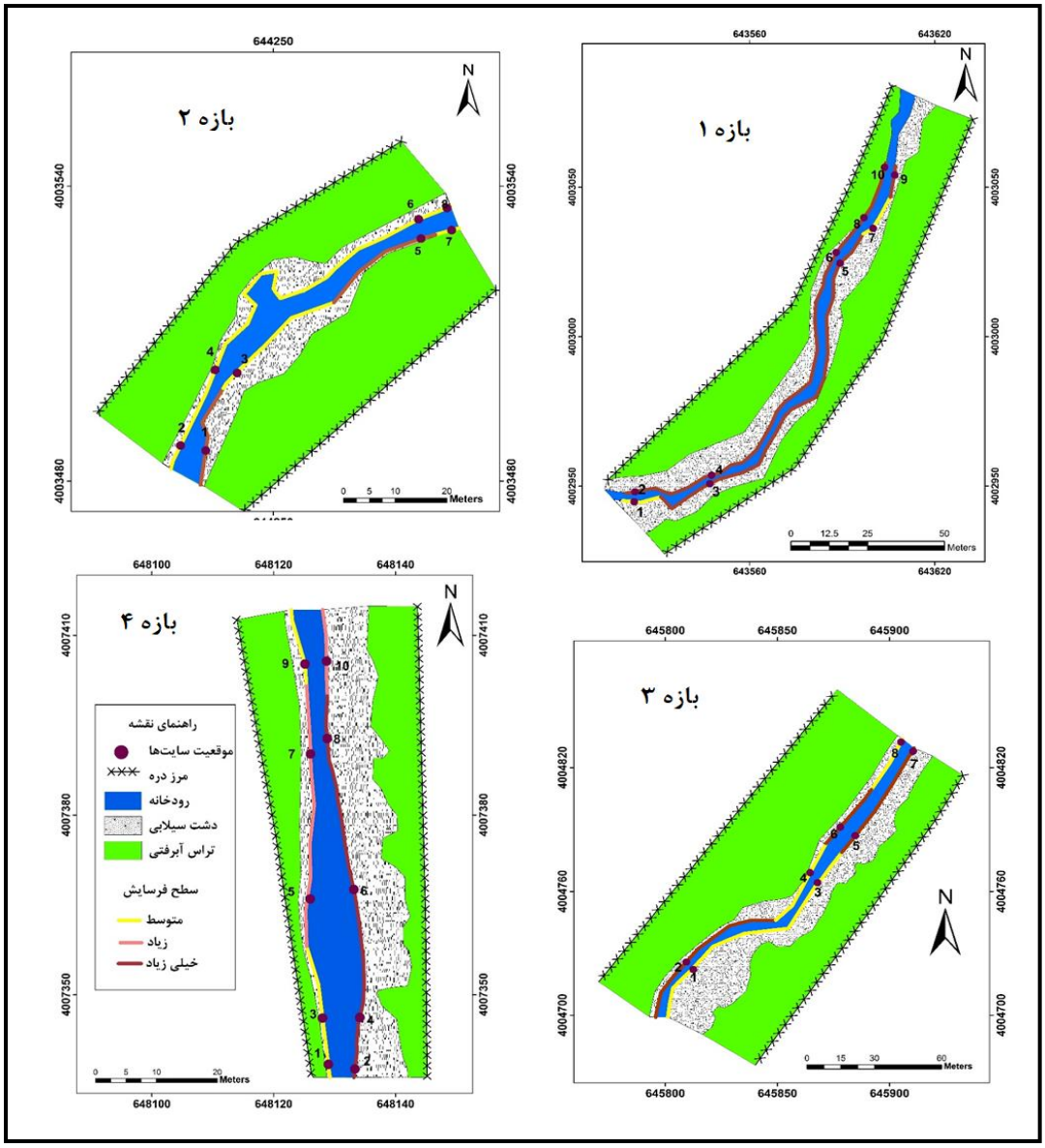

**شکل ۴. امتیاز نهایی شاخص BEHI در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه سجادرود**

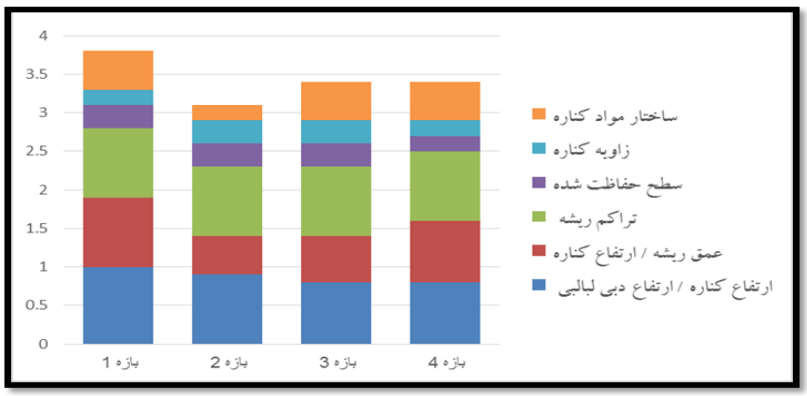
با محاسبه امتیازات بی بعد هر شاخص (امتیاز هر شاخص به حداکثر امتیاز آن شاخص) و محاسبه میانگین آنها در هر بازه، میزان تأثیر هر شاخص در کسب امتیاز مجموع BEHI مورد بررسی قرار گرفت. از میان شاخص‌ها، میزان تراکم ریشه گیاهان، نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی و نسبت عمق ریشه به ارتفاع کرانه به ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۳ بیشترین امتیازهای نسبی را کسب کردند(شکل۶). بازه‌های مورد مطالعه فروسایی زیادی داشته و بستر رودخانه در فاصله کمی از لبه کانال به پادگانه‌های آبرفتی متصل می‌شود. این فروسایی موجب تشکیل کرانه‌های نسبتاً مرتفع با رسوبات منفصل آبرفتی شده است که عمدتاً تراکم و عمق ریشه گیاهان در آنها ناچیز بوده و بالقوه می‌توانند شرایط مناسبی را برای فرسایش کرانه رود فراهم آورند.



[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]




**شکل ۵. طبقه‌بندی فرسایش‌پذیری کرانه رود در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه سجادرود با روش BEHI**

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

**شکل ۶ . امتیازات بی بعد روش BEHI در بازه‌های مورد مطالعه رودخانه سجادرود**

| سایت | BEHI | | MBEHI | | BEHI | سایت | | MBEHI | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳۶/۳۵ | زیاد | ۲۵.۵ | زیاد | ۳۸/۸ | ۱۹ | زیاد | ۳۴ | خیلی زیاد |
| ۲ | ۴۵/۴ | خیلی زیاد | ۳۳.۳ | خیلی زیاد | ۴۳/۹ | ۲۰ | خیلی زیاد | ۳۶ | خیلی زیاد |
| ۳ | ۴۵/۴ | خیلی زیاد | ۳۳.۳ | خیلی زیاد | ۳۸/۴ | ۲۱ | زیاد | ۳۲.۳ | خیلی زیاد |
| ۴ | ۴۵/۸ | خیلی زیاد | ۳۴.۵ | خیلی زیاد | ۳۹/۸۵ | ۲۲ | زیاد | ۳۲.۳ | خیلی زیاد |
| ۵ | ۴۰/۹ | خیلی زیاد | ۳۲.۵ | خیلی زیاد | ۴۴/۹ | ۲۳ | خیلی زیاد | ۳۷ | شدید |
| ۶ | ۴۲/۹ | خیلی زیاد | ۳۵ | خیلی زیاد | ۴۰/۳۵ | ۲۴ | خیلی زیاد | ۳۵ | خیلی زیاد |
| ۷ | ۴۲/۹ | خیلی زیاد | ۳۴.۳ | خیلی زیاد | ۴۱/۸۵ | ۲۵ | خیلی زیاد | ۳۴.۸ | خیلی زیاد |
| ۸ | ۴۲/۹ | خیلی زیاد | ۳۲.۳ | خیلی زیاد | ۳۷/۳ | ۲۶ | زیاد | ۲۵.۵ | زیاد |
| ۹ | ۴۱/۵ | خیلی زیاد | ۳۳.۳ | خیلی زیاد | ۳۰/۸ | ۲۷ | زیاد | ۳۲.۵ | خیلی زیاد |
| ۱۰ | ۴۲/۹ | خیلی زیاد | ۳۳.۳ | خیلی زیاد | ۴۲/۹ | ۲۸ | خیلی زیاد | ۲۲.۳ | زیاد |
| ۱۱ | ۴۰/۸۵ | خیلی زیاد | ۲۶.۸ | زیاد | ۳۴/۳۵ | ۲۹ | زیاد | ۳۱.۸ | خیلی زیاد |
| ۱۲ | ۳۸/۳۵ | زیاد | ۳۵ | خیلی زیاد | ۴۲/۹ | ۳۰ | خیلی زیاد | ۳۳.۸ | خیلی زیاد |
| ۱۳ | ۳۸/۳۵ | زیاد | ۲۷ | زیاد | ۲۴/۹ | ۳۱ | متوسط | ۳۲.۵ | خیلی زیاد |
| ۱۴ | ۳۵/۴ | زیاد | ۳۳.۵ | خیلی زیاد | ۴۲/۹ | ۳۲ | خیلی زیاد | ۳۴.۵ | خیلی زیاد |
| ۱۵ | ۴۲/۳۵ | خیلی زیاد | ۳۱ | زیاد | ۲۱/۳۵ | ۳۳ | متوسط | ۲۹.۳ | زیاد |
| ۱۶ | ۳۹/۸۵ | زیاد | ۲۸ | زیاد | ۴۰/۹ | ۳۴ | خیلی زیاد | ۳۲.۵ | خیلی زیاد |
| ۱۷ | ۳۳/۸۵ | زیاد | ۳۵ | خیلی زیاد | ۳۹/۹ | ۳۵ | زیاد | ۳۴ | خیلی زیاد |
| ۱۸ | ۳۱/۸۵ | زیاد | ۳۰.۵ | زیاد | ۲۴/۴ | ۳۶ | متوسط | ۳۲ | خیلی زیاد |

مقدار پارامترهای مختلف روش BEHI با رگرسیون چندمتغیره و به صورت مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. در تحلیل رگرسیون، مقدار β یا ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد شده سهم نسبی هر متغیر مستقل را در تبیین تغییرات متغیر وابسته مشخص می‌نماید(زارع چاهوکی، ۱۳۹۲: ۱۱۱). در بین متغیرهای مختلف، ضرایب β شاخص حفاظت کرانه و نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی به ترتیب ۰.۶۲- و ۰.۵۱ بدست آمد. ضریب منفی (۰.۶۲-) شاخص حفاظت کرانه، بیانگر تأثیر منفی در مقدار نهایی فرسایش کرانه است، بدین معنی که وجود عوامل حفاظتی خصوصاً قطعه سنگ‌های بزرگ در پای کرانه به عنوان مانعی برای ایجاد فرسایش در طی جریانهای لبالبی است. ضریب β مثبت(۰.۵۱) نسبت



[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

ارتفاع کرانه به ارتفاع لبالبی، بیانگر نقش بالقوه ارتفاع زیاد کرانه‌های رودخانه در فرسایش‌پذیری است. سایر متغیرها از ضرایب β رگرسیون حذف شدند.

برای محاسبه روش BEHI اصلاح شده، ابتدا همه بازه‌ها مطابق جدول پیش غربالگری(جدول۲) مورد بررسی قرار گرفتند و بیش از دو پاسخ "بله" برای هر بازه مورد تأیید قرار گرفت. از این رو، این روش برای همه سایت‌های مورد مطالعه محاسبه شد. امتیاز کل بدست آمده از هر دو روش BEHI در جدول ۶ نشان داده شده است. در روش BEHI اصلاح شده ۲۶ سایت از ۳۶ سایت در گروه فرسایش بسیار زیاد قرار گرفتند. اما در روش BEHI اصلی ۱۹ سایت در گروه بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. تعداد و درصد مربوط به سایر گروهها هم در جدول ۷ نشان داده شده است. امتیاز کل سایت‌های مورد مطالعه با دو روش BEHI با ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفتند که ضریب ۰.۲۱ نشان دهنده‌ی همبستگی نسبتاً پایین بین آنهاست. بدین ترتیب، حذف یک پارامتر و امتیازدهی مجدد در BEHI اصلاح شده نتوانسته است نتایج BEHI اصلی را کسب نماید.

**جدول ۷. تعداد و درصد سایت‌های مورد مطالعه در گروههای مختلف فرسایشی BEHI و BEHI اصلاح شده**

| طبقات فرسایش | متوسط | | زیاد | | بسیار زیاد | | شدید | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | تعداد | درصد | تعداد | درصد | تعداد | درصد | تعداد | درصد |
| BEHI | ۳ | ۸ | ۱۴ | ۳۹ | ۱۹ | ۵۳ | - | - |
| MBEHI | - | - | ۹ | ۲۵ | ۲۶ | ۷۲ | ۱ | ۳ |

## نتیجه‌گیری

رودخانه سجادرود به علت فروسایی ایجادشده در کانال رود، دارای کرانه‌های مرتفع و پرشیب هست، لذا به علت افزایش ظرفیت کانال حتی در جریانهای سیلابی با دوره بازگشت طولانی، جریان آب در کانال رود متمرکز بوده و قدرت زیادی ایجاد می‌کند. از این رو نهشته‌گذاری قطعه سنگهای بزرگ در پای کرانه رود موجب حفاظت آن شده و جریانهای سیلابی لبالبی و پرتکرار (با دوره بازگشت ۲ ساله) توان حمل این قطعه سنگها را ندارند. با این شرایط، محاسبه نسبت ارتفاع کرانه به ارتفاع دبی لبالبی نمی‌تواند بیانگر فرسایش‌پذیری کرانه در حالت لبالبی باشد. با این وجود پتانسیل فرسایش‌پذیری کرانه برای جریانهای سیلابی بزرگتر مصداق دارد.

مقایسه روش BEHI اصلی با BEHI اصلاح شده نشان داد که روش اصلاح شده برآورد بیشتری (اغراق آمیز) نسبت به BEHI اصلی دارد. نیوتن و درنتن (۲۰۱۵) شاخص نسبت ارتفاع به ارتفاع لبالبی را به علت مشکلات اندازه‌گیری حد لبالبی حذف نمودند تا با سرعت بیشتری بتوان فقط بازه‌های با فرسایش کرانه بیش از متوسط را مورد ارزیابی قرار داد. با این وجود تخمین روش اصلاح شده نسبت به روش اصلی برآورد بیشتری را نشان می‌دهد. از این رو، با توجه به کاربرد وسیع روش BEHI نسبت به سایر روشها، بهتر است روش BEHI در انواع رودخانه‌ها و در مدت زمان چندساله به صورت میدانی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بر اساس آن دقت روش تعیین و تغییرات احتمالی آن مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع

حسین‌زاده، محمدمهدی؛ سمیه خالقی، فراز واحدی‌فر. ۱۳۹۶. ارزیابی تغییرات مورفولوژیک و پایداری رودخانه قرانقوچای هشترود با استفاده از مدل BEHI ، *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۰: ۱۴۵-۱۶۴

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

زارع چاهوکی، محمدعلی. ۱۳۹۲. *تجزیه و تحلیل داده‌های در پژوهش‌های منابع طبیعی با نرم افزار SPSS*، چاپ دوم. انتشارات جهاد دانشگاهی، تهران.

ولی‌پور، طاهر؛ محمد مهدی حسین زاده، رضا اسماعیلی، سعیده متش بیرانواند. ۱۳۹۹. مطالعه فرسایش پذیری کناره و عوامل موثر بر آن در رودخانه لاویج (استان مازندران، چمستان). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. **۵۹**: ۱۱۹-۱۳۶.

Allmanová, Z.; M. Vlčková, M. Jankovský, M. Jakubis, and M. Allman. ۲۰۱۹. Bank erosion of the Tŕstie stream: BANCS model predictions vs. real bank erosion. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. **٦٧(٢)**, ١٢١. **DOI**: https://doi.org/١٠,٢٤٧٨/johh-٢٠١٨-٠٠٤٠

Bandyopadhyay, S.; S. Saha, K. Ghosh, and S.K. De. ٢٠١٣. Validation of BEHI Model through field generated data for assessing bank erosion along the River Haora, West Tripura. *Earth Sci. India*, ***6*(III)**: ١٢٦-١٣٥.

Bull, L. J. ١٩٩٧. Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Group*, ***22*(١٢)**: ١١٠٩-١١٢٣.

Das, N.; and M. Bhowmik. ٢٠١٣. Qualitative assessment of river bank erosion risk in Jirania rural development block, Tripura. *Indian Journal of Applied Research*, **٣(٦):** ٢٧٤-٢٧٦.

Florsheim, J. L.; J.F. Mount, and A. Chin. ٢٠٠٨. Bank erosion as a desirable attribute of rivers. *BioScience*, ***58*(٦)**: ٥١٩-٥٢٩.

Fox, G. A.; G.V. Wilson, A. Simon, E.J. Langendoen, O. Akay, and J.W. Fuchs. ٢٠٠٧. Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, ***32*(١٠)**: ١٥٥٨-١٥٧٣.

Ghosh, K. G.; S. Pal, and S. Mukhopadhyay. ٢٠١٦. 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*, **٢(٢)**, ٩٥. **DOI**:١٠,١٠٠٧/s٤٠٨٠٨-٠١٦-٠١٧٢-٠

Konsoer, K. M.; B.L. Rhoads, E.J. Langendoen, J.L. Best, M.E. Ursic, J.D. Abad, and M.H. Garcia. ٢٠١٦. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. *Geomorphology*, **٢٥٢**: ٨٠-٩٧.
**DOI**: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geomorph.٢٠١٥,٠٨,٠٠٢

Kwan, H.; and S. Swanson. ٢٠١٤. Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California. *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA) **٥٠( ٦)**: ١٤٣٩- ١٤٤٧, DOI: ١٠,١١١١/jawr.١٢٢٠٠

Lan, P. T. H.; L.M. Nguyet, and L. T. V. Hoa. ٢٠١٩. Assessing the instability of Dong Nai River in Bien Hoa District using Bank Erosion Hazard Index (BEHI) and Remote Sensing and GIS. In *Proceedings of the ICA* (Vol. ٢, pp. NA-NA). Copernicus GmbH.

Lawler, D.M. ١٩٩٣. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surf. Process. Landforms*, ١٨: ٧٧٧-٨٢١. **DOI**:١٠,١٠٠٢/esp.٣٢٩٠١٨٠٩٠٥

Mandal, S. ٢٠١٧. Assessing the instability and shifting character of the river bank ganga in Manikchak Diara of Malda district, west bengal using bank erosion hazard index (BEHI), RS & GIS. *European Journal of Geography*, *8*(٤), ٦-٢٥.

Mazumdar, N.; and B. J. A. Talukdar. ٢٠١٨. Assessment of River Bank Erosion Potential in Brahmaputra River in Lower Assam Region Using Modified Rosgen's Bank Erosion Hazard Index Method, *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, **٨(٨)**: ٢١-٢٧.

McMillan, M.; J. Liebens, and C. Metcalf. ٢٠١٧. Evaluating the BANCS streambank erosion framework on the northern Gulf of Mexico Coastal Plain. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, ***53*(٦)**: ١٣٩٣-١٤٠٨.

Newton, S. E.; and D.M. Drenten. ٢٠١٥. Modifying the bank erosion hazard index (BEHI) protocol for rapid assessment of streambank erosion in northeastern Ohio. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*. **٩٦**. e٥٢٣٣٠.



[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]

Rathbun, J. ۲۰۰٤. Standard operating procedure: Assessing bank erosion potential using Rosgen's Bank Erosion Hazard Index (BEHI). Water Bureau, Michigan Department of Environmental Quality, Lansing, MI.http://www.michigan.gov/documents/deq/ wb-nps-BEHI-SOP_٢٤٦٨٧٣_٧.doc.

Rosgen, D.L. ١٩٩٦. Applied River Morphology. Wildland Hydrology, Fort Collins, Colorado, ISBN-١٣: ٩٧٨-٠٩٦٥٣٢٨٩٠٦.

Rosgen, D. L. ٢٠٠١. A practical method of computing streambank erosion rate. Paper presented at the Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference.

Rosgen, D.L., ٢٠٠٦. Watershed Assessment of River Stability and Sediment Supply (WARSSS). *Wildland Hydrology*, Fort Collins, Colorado, ISBN-١٣: ٩٧٨-٠٩٧٩١٣٠٨.

Sass, C. K.; T.D. Keane. ٢٠١٢. Application of Rosgen's BANCS Model for NE Kansas and the Development of Predictive Streambank Erosion Curves١. **٤٨(٤)**: ٧٧٤-٧٨٧. doi:١٠,١١١١/j.١٧٥٢-١٦٨٨,٢٠١٢. ٠٠٦٤٤.x

Simon, A.; J. Castro, and M. Rinaldi. ٢٠١٦. Channel form and adjustment: characterization, measurement, interpretation and analysis. *Tools in Fluvial Geomorphology*, ٢٣٥-٢٥٩.

Simpson, A., I. Turner, E. Brantley, and B. Helms. ٢٠١٤. Bank erosion hazard index as an indicator of near-bank aquatic habitat and community structure in a southeastern Piedmont stream, *Ecological Indicators*. ٤٣: ١٩-٢٨.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03 ]

[ DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.27 ]