

مطالعه فرسایش‌پذیری کناره و عوامل مؤثر بر آن در رودخانه لاویج (استان مازندران، چمران)

دریافت مقاله: ۹۷/۷/۱۶ پذیرش نهایی: ۹۷/۱۲/۲۶

صفحات: ۱۳۶-۱۱۹

طاهرولی پور: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

Email: t_valipour@sbu.ac.ir

محمد مهدی حسین زاده: دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.^۱

Email: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

رضا اسماعیلی: دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بالسیر، ایران.

Email: r.esmaili@umz.ac.ir

سعیده متیش بیرانوند: دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

Email: S64.biranvand@gmail.com

چکیده

عقب‌نشینی کناره کanal یک فرآیند مهم در مورفودینامیک رودخانه است که تغییرپذیری کanal، تکامل دشت سیلانی و توسعه زیستگاه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرساله سازه‌های عمرانی و زمین‌های کشاورزی که حاشیه رودخانه لاویج قرار دارند با خطرات ناشی از تغییر بستر مواجه‌اند. از این‌رو وجود روشهای قابل اعتماد برای تعیین میزان عقب‌نشینی و پیش‌بینی پایداری کناره ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه باهدف بررسی میزان خطر فرسایش کناری و شناسایی مناطق مستعد فرسایش کناری در رودخانه لاویج، با استفاده از مدل‌های BEHI و NBS خطرپذیری فرسایش کناری در ۷ مقطع از این رودخانه بررسی شد. نتایج مدل NBS با استفاده از شاخص(tnb/tbkf) نشان داد میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه لاویج در تمام بازه‌های مورد مطالعه، به‌جز مقاطع ۲ و ۶ همه مقاطع دارای شدت فرسایش خیلی زیاد و زیاد می‌باشد. بر اساس شاخص(dnb/dbkf) میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه لاویج به‌جز مقاطع ۴ و ۵ تقریباً با روند فرسایشی به‌دست‌آمده از شاخص اول(tnb/tbkf) همخوانی دارد. بر اساس مدل BEHI مقاطع ۱، ۲، ۳ و ۴ و ۵ و ۶ وضعیت ناپایداری کناره را زیاد نشان می‌دهند و استعداد زیادی برای فرسایش کناری و تولید رسوب دارند. همچنین مقطع ۲ وضعیت ناپایداری را متوسط نشان می‌دهد مقطع ۷ و ۲ وضعیت ناپایداری خیلی زیاد را نشان می‌دهد که استعداد خیلی زیاد برای فرسایش کناره‌ای و تولید رسوب دارد. درنهایت جهت بررسی میزان انطباق نتایج با استفاده از آزمون آماری کروسکال-والیس باهم برازش داد شد و نتایج نشان داد هر سه شاخص در ارزیابی فرسایش کناری در هر مقطع تقریباً یکسان عمل کرده‌اند.

کلید واژگان: فرسایش کناری رودخانه، مدل BEHI، مدل NBS، رودخانه لاویج، آزمون آماری کروسکال-والیس

۱. نویسنده مسئول: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی. دانشکده علوم زمین، گروه جغرافیا

مقدمه

رودخانه‌ها سیستم‌های کاملاً پویایی هستند که مرزهای جانی و مشخصات مورفولوژیکی آن‌ها در طول زمان و پیوسته در حال تغییرند. ناپایداری مجرأ و سواحل رودخانه و رسوبات ناشی از آن نه تنها موجب تخریب اراضی حاشیه رودخانه و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه می‌شود (کسلر و همکاران^۱:۲۰۱۳، ۱۸۰)، بلکه رسوبات حاصل از فرسایش رودخانه‌ای در برخی موقع میزان قابل توجهی از مجموع کل رسوباتی را شامل می‌شود که جریان رود آن را حمل می‌کند. ناپایداری مجرأ و سواحل رودخانه به دلیل تأثیرگذاری بر میزان فرسایش و خصوصیات مجاری رودخانه‌ها به دلیل تأثیرگذاری بر میزان فرسایش در توسعه پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد (مینگوی و همکاران^۲:۳۹۸، ۲۰۱۰). فرسایش کناری رود یکی از علل عدمه آلودگی غیر نقطه‌ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌ها است (رزگن^۳:۲۰۰۱، سایمون و دربی^۴:۱۹۹۹، سکلی و همکاران^۵:۵۲۹:۲۰۰۸، ۹۵:۲۰۰۶؛ ویلسون و همکاران^۶:۲۰۰۸، ۷:۵۴۵:۲۰۰۲). مطالعات متعددی فرسایش کناره‌ای را به عنوان عامل اصلی مسائل مختص به کیفیت آب و تخریب رودخانه‌ها (سایمون و همکاران^۷:۲۰۰۲، ۵۳۰؛ پروسه و همکاران^۸:۲۰۰۱، ۸۲؛ گریمشاو و همکاران^۹:۱۹۸۰، ۱۰؛ و منبع اصلی بار رسوبات متعلق رودخانه دانسته‌اند (توما و همکاران^{۱۱}:۲۰۰۵؛ کسلر و همکاران^{۱۰}:۲۰۱۳، ۳۱۲؛ بل蒙ت^{۱۲} و همکاران^{۱۳}:۲۰۱۱، ۸۸۰۵) در سراسر جهان روش‌های مختلفی برای بررسی میزان فرسایش کناره‌ای رودخانه استفاده شده است. تصاویر سنجنده لیدار، پین‌های فرسایشی، رادیونوکلئیدها، دندروزئومورفولوژی و مدل‌های عددی و بصری همگی به منظور برآورد فرسایش کناره‌ای رودخانه استفاده شده‌اند.

امروزه مشکلات مرتبط با فرایندهای فرسایش کرانه رود در نواحی مختلف دنیا بسیار مهم قلمداد می‌شود (دپورتو^{۱۳} و همکاران^{۱۴}:۲۰۱۳، ۱۳۰۳) و در طول دهه‌های اخیر افزایش یافته است (رینالد و سایمون^{۱۵}:۱۹۹۸، ۵۸؛ لوهنس و هندی^{۱۶}:۱۹۶۸، ۱۵؛ بل蒙ت^{۱۷} و هویزه از

^۱ Kessler et al.,^۲ Minghui et al.,^۳ Rosgen^۴ Simon and Darby^۵ Sekely et al.,^۶ Evans et al.,^۷ Wilson et al.,^۸ Simon et al.,^۹ Prosser et al.,^{۱۰} Grimshaw et al.,^{۱۱} Thome^{۱۲} Belmont et al.,^{۱۳} Dapporto et al.,^{۱۴} Rinaldi and Simon^{۱۵} Lohnes and Handy

اوایل ۱۹۸۰ (تورن^۱، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۸؛ سایمون و همکاران^۲، ۱۹۹۱، ۱۵؛ عثمان و تورن^۳، ۱۹۸۸؛ لیتل و همکاران^۴، ۱۹۸۲ و ۱۹۹۶؛ تورن و همکاران^۵، ۱۹۸۱) به طور ویژه بر مواد تشکیل‌دهنده کرانه متمرکز شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم فرسایش کرانه‌ای رود نسبت به دیگر شکل‌های فرسایش، تداوم و فعال بودن آن است، در حالی که انواع دیگر فرسایش فقط در زمان بارندگی و یا کمی پس از شروع آن فعال می‌شوند. وجود روش‌های قابل اعتماد برای پیش‌بینی پایداری کناره و میزان عقب‌نشینی آن ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی جهت پیش‌بینی تحرك کانال و درنتیجه برآورد میزان فرسایش‌پذیری کانال پیشرفت‌های زیادی داشته است. شاخص خطر فرسایش کناری یک فرآیندی یکپارچه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری فرسایش کناری رودخانه با استفاده از متغیرهای مختلف می‌باشد، که نرخ فرسایش را برای ما محاسبه می‌کند. ارزیابی فشار برشی نزدیک کناره در پیش‌بینی فرسایش بسیار بالاهمیت است به طوری که نشان‌دهنده توزیع انرژی جریان در مقطع عرضی مجرماً می‌باشد و این توزیع نامتناسب انرژی جریان می‌تواند منجر به فرسایش کناره شود. دو گروه از عوامل در فرسایش آبی نقش دارند که عبارت‌اند از: عوامل فرسایندگی و عوامل فرسایش‌پذیری. عوامل فرسایندگی شامل نیروهایی هستند که موجب جدا شدن ذرات خاک از هم می‌شوند که در مورد فرسایش کناری رودخانه‌های دائمی مقدار آب، عمق جریان، سرعت، فراوانی و بزرگی و تداوم جریان و مقدار رسوبات موجود آب در میزان فرسایش آبی دخالت دارد.

عوامل فرسایش‌پذیری عواملی هستند که در برابر جدا شدن ذرات خاک مقاومت می‌کنند و بیشتر شامل ویژگی‌های خاک از جمله اندازه ذرات خاک، ویژگی‌های تشکیل کلوخه، چسیندگی ذرات خاک، ساختمان خاک، ظرفیت نفوذ و کلوئیدهای موجود در خاک است. عوامل دیگری مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و بهره‌برداری از زمین نیز در فرسایش‌پذیری خاک مهم است (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴: ۶۷). حوضه آبخیز لاویج رود با مساحت ۱۴۶ کیلومترمربع از حوضه‌های مستقل البرز شمالی است. همه‌ساله سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی مجاور رودخانه در این حوضه با خطر تغییر بستر رودخانه و فرسایش کناری و همچنین سیلاب مواجه هستند. از این‌رو تخمین جابه‌جایی الگوی این رودخانه و همچنین تعیین شاخص فرسایش کناری این رودخانه ضروری به نظر می‌رسد.

روش‌های مختلفی برای محاسبه تنش برشی نزدیک کناره وجود دارد در این مقاله از روش روسگن با عنوان روش تنش برشی نزدیک کرانه (NBS) و شاخص خط فرسایش کرانه (BEHI) استفاده شده است. تاکنون تحقیقات زیادی توسط محققان داخلی و خارجی در زمینه‌ی ناپایداری و فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مدیریت حفاظت از کرانه‌ها انجام گرفته است. از جمله: کریشنا و همکاران^۶ (۲۰۱۶) به اعتیار سنجی مدل BANCS جهت

^۱ Thorne

^۲ Simon et al.,

^۳ Osman and Torne

^۴ Little et al.,

^۵ Krishna et al.,

ارزیابی پتانسیل خطر فرسایش کرانه رودخانه بکر شوار در هند شرقی پرداختن نتایج نشان داد که مقدار شاخص خطر فرسایش کرانه در قسمت‌های بالادست و محل تلاقی بالاست اما مقدار تنفسی برشی نزدیک کرانه کمتر است. کانسولر و همکارانش^۱ (۲۰۱۵) تغییرات مکانی در مقاومت کناره‌ها به فرسایش در میاندرهای بزرگ در رودخانه آبرفتی - کوهستانی را با استفاده از مدل BSTEM و تصاویر لیدار برای ارزیابی پتانسیل خصوصیات مواد کناری برای تعديل نسبت و مکانیسم عقب‌نشینی کناره رودخانه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که خصوصیات مواد کناری، جسبندگی خاک و تنفسی برشی بحرانی بین دو خم (بیچ) متفاوت و تغییرات زیادی بین دو بیچ در حالت‌های عمودی و جانبی دارد. دلیل همکاران^۲ (۲۰۱۵) از مدل BSTEM برای تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش کناره رودخانه‌ای و گسیختگی، استفاده کردند و اندازه‌ی عقب‌نشینی را باگذشت زمان (دوره‌ی زمانی ۳۰۰۳ تا ۲۰۱۰) در رودخانه‌ی بارن فورک کریک در اوکلاهامی غربی برآورد کردند. نتایج نشان داد که نسبت عقب‌نشینی حدود ۱/۴ تا ۸/۷۴ (به طور میانگین برابر با ۴۹/۲) در ده نقطه‌ی مورد بررسی، متغیر بوده است. کوریت^۳ (۲۰۱۴) به تحلیل و ارزیابی کانال با روش پیامدهای منبع غیر نقطه‌ای رسوب (BANCS) برای پیش‌بینی فرسایش و پایداری کرانه‌ی رودخانه در استونی کلوو کریک در کت اسکیلز پرداخته است. این مطالعه نشان داد که نتایج بدست‌آمده از طریق روش BANCS ممکن است منجر به بهبود مدیریت آینده‌ی حوضه‌ی استونی کلوو شود. کوان و سوانسن^۴ (۲۰۱۴) به پیش‌بینی فرسایش سالانه کرانه رودخانه با استفاده از شاخص خطر فرسایش کرانه و روش تنفسی برشی نزدیک کرانه برای جنگل ملیسکواایا در کالیفرنیا پرداختند. کارماکر و همکارانش^۵ (۲۰۱۳) گزارش دادند در محل‌هایی از رودخانه آبرفتی که گسیختگی کناری غالب است، فرسایش نشستی عامل مهمی در گسیختگی کناری است که اغلب نادیده گرفته می‌شود. بر این اساس رابطه‌ای بین نسبت فرسایش نشستی و متغیرهای کنترل‌کننده با استفاده از آزمایش‌های لیسمتری برقرار کردند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد لایه‌های سیلتی در پروفیل کناره رودخانه سبب اثر معنادار در زمان تخریب کناره رودخانه دارد. نسبت فرسایش نشستی پیش‌بینی شده توسط مدل مطابقت زیادی با میزان عقب‌نشینی اندازه‌گیری شده نشان داده است. میدگلی و همکارانش^۶ (۲۰۱۲) با استفاده از مدل BSTEM عقب‌نشینی دیواره کناری رودخانه Fork Creek Barren در شمال شرق اوکلاهما در فاصله زمانی آپریل تا اکتبر ۲۰۰۹ را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان عقب‌نشینی جانبی رودخانه در اواسط تا اواخر ماه می تا سپتامبر به علت رگبارهای سیلابی اتفاق افتاده است. مدل BSTEM برای رودخانه مطالعه شده هشت مرتبه با داده‌های ورودی

Konsoer et al.,

۱

^۱ Daly et al.,

^۲ Coryat et al.,

^۳ Kwan and Swanson

^۴ Karmakera et al.,

^۵ Midgley et al.,

پیش‌فرض و اندازه‌گیری شده مدل سازی شد. نتایج نشان داد که مدل یاد شده میزان فرسایش واقعی را کمتر از میزان واقعی تخمین زده است. پارکر و همکارانش (۲۰۰۸) اثر تغییرپذیری خصوصیات مواد کناری رودخانه را روی پایداری رودخانه با استفاده از مدل BSTEM بررسی کردند. نتایج نشان داد که هیچ اختلاف معناداری بین تغییرات درون مکانی (مقیاس میکرو) و بین مکانی (مقیاس مزو) در خصوصیات مواد کناری وجود ندارد. در حالی که هردو اثر معناداری روی پایداری کناری رودخانه دارند. راسگن (۲۰۰۱) در پژوهشی برای ارزیابی مدل‌های پایداری کanal رود در منطقه چشممه پاسوگا برای ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای و نیز میزان رسوب از طبقه‌بندی سلسله مراتبی راسگن استفاده کرده است و با بهره‌گیری از متغیرهایی چون تغییرات در شاخص‌های کنترل فرم کanal رود در درجه اول و رژیم رسوب، پوشش گیاهی و تغییرات فیزیکی این محدوده در درجه دوم این سیستم طبقه‌بندی را مورد اعتبارسنجی قرار داده است. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی بهمنظور ارزیابی تغییرات مورفولوژیک و پایداری رودخانه قرانقوچای هشت‌رود با استفاده از مدل شاخص خطر فرسایش کرانه پرداختند که نتایج نشان داد که فرسایش کناره‌ای در هر دو کناره راست و چپ مقاطع عرضی وجود دارد بهطوری که در کناره سمت راست رودخانه، میزان خطر فرسایش در تمامی مقاطع از متوسط تا خیلی زیاد است و فقط دریکی از مقاطع میزان خطر فرسایش خیلی کم بوده و همچنین در کناره‌های چپ رودخانه در مقاطع مذکور میزان خطر فرسایش کناره از خیلی کم تا شدید برآورده است. علت بالا بودن ضریب خطر فرسایش در کناره سمت راست، پایین بودن میزان تراکم ریشه در ساحل راست و جنس سست مواد نسبت به ساحل چپ است. امیری تکلدانی و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از ۵۱ محل در مسیر رودخانه می‌سی‌پی، مدل تحلیل پایداری ساحل رودخانه (EMSAR) را ارائه دادند. هدف این مطالعه، بررسی میزان خطر فرسایش کناری رودخانه و شناسایی مناطق مستعد در برابر فرسایش کناری در ۷ سایت با استفاده از مدل‌های شاخص خطر فرسایش کرانه و تنش برشی نزدیک کرانه در رودخانه لاویج است.

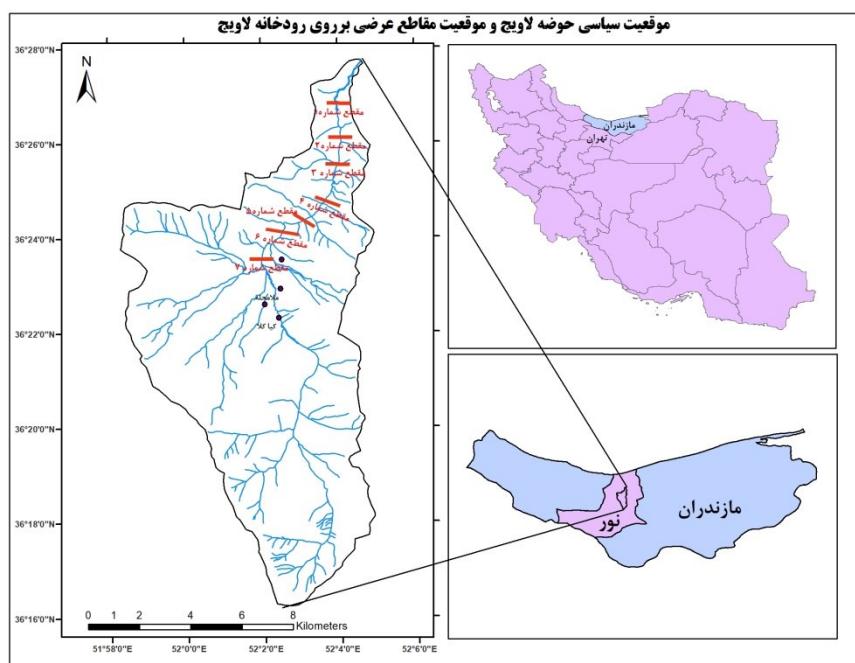
روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز لاویج در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز در جنوب شهر چمستان واقع شده است. از نظر تقسیمات سیاسی، این حوضه در شهرستان نورآستان مازندران قرار دارد شکل (۱). حوضه دارای جهت شمالی-جنوبی می‌باشد و سطح اساس رودخانه‌های این حوضه دریای خزر است. حوضه آبخیز لاویج از غرب به حوضه گلندرود، از شرق به حوضه واژ و از جنوب به حوضه آبخیز هراز منتهی می‌شود. رود مهم حوضه آبخیز لاویج نام دارد؛ سه رود کوچک‌تر به نام‌های نومه‌هراز، تیلن‌رود و کرچی‌رود در قسمت داخلی منطقه لاویج جریان دارند که در پای ارتفاعات شمالی و در مدخل تنگه لاویج، رودخانه لاویج‌رود را بوجود می‌آورند. میانگین دبی سالانه رودخانه

لایوج $1/24 \text{ m}^3/\text{s}$ بوده است. حداکثر میانگین دبی ماهانه این رودخانه مربوط به ماههای فروردین و اسفند می‌باشد که ناشی از ذوب برف‌ها است.

منطقه مورد مطالعه در پایین‌دست حوضه آبریز لایوج رود و در محدوده پارک جنگلی کشپل واقع شده است. جهت بررسی میزان خطر فرسایش کناری و شناسایی مناطق مستعد فرسایش کناری رودخانه لایوج با استفاده از مدل‌های BEHI و NBS هفت مقطع عرضی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و شاخص تهیه شد شکل(۱).



شکل(۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز لایوج و موقعیت مقاطع عرضی بر روی رودخانه

شاخص خطر فرسایش کناره (BEHI)

شاخص خطر فرسایش کناری یک فرآیندی یکپارچه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری فرسایش کناری با استفاده از متغیرهایی است که نرخ فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. شاخص خطر فرسایش کناره چندین متغیر را به‌واسطه ارزیابی‌های بصری مطرح می‌کند، که نسبت و میزان فرسایش کناری را در مناطق مستعد فرسایش نشان می‌دهند. هفت متغیر جهت ارزیابی وجود دارد و فرآیند نمره دهی به این هفت پارامتر قابل اندازه‌گیری بر مبنای ۱ تا ۱۰ می‌باشد، عدد ۱ حساسیت کم در مقابل فرسایش و عدد ۱۰ حساسیت و استعداد زیاد به فرسایش را نشان می‌دهد.

پارامترهای مدل شاخص خطر فرسایش کناره عبارت‌اند از:

۱- مطالعه و بررسی نسبت ارتفاع کناره به ارتفاع دبی مقطع پر ۲- عمق ریشه ۳- وزن تراکم ریشه (به درصد) ۴- زاویه کناره (به درجه) ۵- محافظت سطحی کناره ۶- تعديل و تنظیم مواد کناره ۷- طبقه‌بندی مواد کناره این امتیازات جهت تعیین نمره کلی به هم اضافه شده و نمره کامل به دست می‌آید، بنابراین تمامی متغیرها از وزن یکسانی جهت امتیازدهی برخوردار هستند. این نمرات عددی به یک میزان در امتیازبندی توصیفی برای میزان حساسیت کناره‌ها به فرسایش مربوط می‌شوند. در جدول (۱) شاخص‌های مدل شاخص خطر فرسایش کناره و راهنمای نمره دهی به شاخص‌ها آمده است. در جدول (۲) نیز نحوه توصیف مقدار فرسایش با توجه به مجموع نمرات قابل ملاحظه است.

جدول (۱). خلاصه شاخص خطر فرسایش کناره (BEHI)

راهنمای امتیازدهی خطر فرسایش کرانه رودخانه						
حافظت سطحی (%)	زاویه کرانه (درجه)	تراکم ریشه (%)	عمق ریشه/ارتفاع کرانه	ارتفاع کرانه/ارتفاع دبی مقطع پر	طبقه‌بندی خطر فرسایش	
۱۰۰-۸۰	۲۰-۰	۱۰۰-۸۰	۱-۰,۹	۱,۱-۱	مقدار	خیلی کم
۱,۹-۱	۱,۹-۱	۱,۹-۱	۱,۹-۱	۱,۹-۱	شاخص	
۷۹-۵۵	۶۰-۲۱	۷۹-۵۵	۰,۵-۰,۸۹	۱,۱۹-۱,۱۱	مقدار	کم
۳,۹-۲	۳,۹-۲	۳,۹-۲	۳,۹-۲	۳,۹-۲	شاخص	
۵۴-۳۰	۸۰-۶۱	۴۵-۳۰	۰,۴۹-۰,۳	۱,۵-۱,۲	مقدار	متوسط
۵,۹-۴	۵,۹-۴	۵,۹-۴	۵,۹-۴	۵,۹-۴	شاخص	
۲۹-۱۵	۹۰-۸۱	۲۹-۱۵	۰,۲۹-۰,۱۵	۲-۱,۶	مقدار	زیاد
۷,۹-۶	۷,۹-۶	۷,۹-۶	۷,۹-۶	۷,۹-۶	شاخص	
۱۴-۱۰	۱۱۹-۹۱	۱۴-۵	۰,۱۴-۰,۰۵	۲,۸-۲,۱	مقدار	خیلی زیاد
۹-۸	۹-۸	۹-۸	۹-۸	۹-۸	شاخص	
<۱۰	۱۱۹<	<۵	<۰,۰۵	۲,۸<	مقدار	شدید
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	شاخص	

جدول (۲). طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش کرانه

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

مدل تنش برشی نزدیک کرانه (NBS)

ارزیابی فشار برشی نزدیک کناره در پیش‌بینی فرسایش بسیار بالهمیت است به طوری که نشان‌دهنده توزیع انرژی جریان در مقطع عرضی مجرأ می‌باشد و این توزیع نامتناسب انرژی جریان می‌تواند منجر به فرسایش کناره شود. یکی از روش‌های محاسبه تنش برشی نزدیک کناره روش روسگن با عنوان تنش برشی نزدیک کرانه است. پارامترهای مورداستفاده برای ارزیابی و تخمین تنش برشی نزدیک کرانه عبارت‌اند از:

- ۱- الگوی مجرأ و ارزیابی بارها ۲ - نسبت شاعع انحنای به عرض مقطع پر ۳- نسبت شیب خیزاب به میانگین شیب سطح آب ۴- نسبت شیب خیزاب به شیب تنداپ ۵- نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق مقطع پر ۶- نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی مقطع پر ۷- گرادیان سرعت (کوریات، ۲۰۱۴) با توجه به ویژگی‌های کناره جریان رودخانه لاویج دو روش نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی مقطع پر و نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق مقطع پر (d_{nb}/d_{bki}) جهت اجرای این مدل انتخاب شد.

مراحل کار به این صورت است که پس از جمع‌آوری داده‌ها و اندازه‌گیری ابعاد هندسی مقطاع مختلف و پارامترهای موردنیاز، (با استفاده از دوربین نقشه‌برداری، شاخص اندازه‌گیری، متر لیزری، شیب‌سنج و مشاهده چشمی و رابطه ریاضی) بر اساس این روش‌ها میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه در سطوح مختلف از خیلی کم تا شدید تعیین می‌گردد. در جدول(۳) میزان فرسایش‌پذیری کرانه بر حسب مقدار دو روش از مدل تنش برشی نزدیک کرانه آمده است.

جدول(۳). حدود تغییرات شاخص‌های مؤثر در میزان فرسایش کناره (راسگن، ۲۰۱۱)

میزان فرسایش‌پذیری (NBS) کرانه	نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق مقطع پر ($\frac{d_{nb}}{d_{bki}}$)	نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر
خیلی کم	کمتر از ۱	۰,۸۰
کم	۱-۱/۵	۰,۸۰-۱,۰۵
متوسط	۱/۵۱-۱/۸۰	۱,۰۶-۱,۱۴
زیاد	۱/۸۱-۲/۵۰	۱,۱۵-۱,۱۹
خیلی زیاد	۲/۵۱-۳	۱,۲۰-۱,۶۰
شدید	بیشتر از ۳	بیشتر از ۱,۶۰

در انتهای با استفاده از آزمون کروسکال-والیس که یک آزمون غیرپارامتریک و از سری آزمون‌های آنالیز واریانس است برای مقایسه تفاوت و عدم تفاوت بین شاخص خطر فرسایش کناره و شاخص‌های تنش برشی نزدیک کرانه رابطه(۱) استفاده شده است.

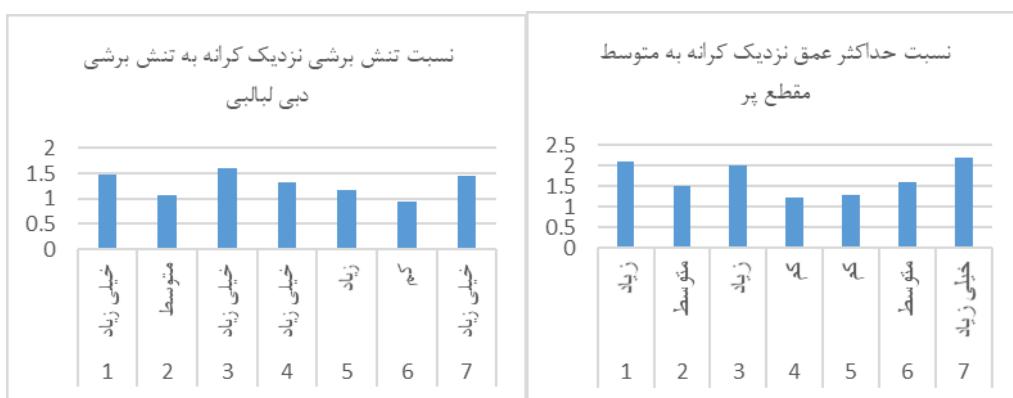
$$\begin{aligned} H_0 &= BEHI=NPS \\ H_1 &= BEHI \neq NPS \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

نتایج

در این مطالعه جهت تشخیص حساسیت کناره رودخانه لاویج نسبت به فرسایش از مدل‌های ارزیابی تنش نزدیک کناره و شاخص تعیین خطر فرسایش کناره استفاده شد. این مدل‌ها با در نظر گرفتن چندین متغیر از طریق ارزیابی بصری و نسبت‌های ارزیابی حساسیت کناره‌ها نسبت به فرسایش را تعیین می‌کنند. برای انجام این کار هفت مقطع عرضی از رودخانه انتخاب گردید. در ابتدا جمع‌آوری داده و اندازه‌گیری‌های اولیه برای هر مقطع انجام شد. سپس مقادیر نسبت‌های تعريف شده در هر دو مدل، برای هر کدام از مقاطع، محاسبه شده و با استفاده از راهنمای تنش نزدیک کرانه و شاخص تعیین خطر فرسایش کناره، امتیازات هر کدام از پارامترها تعیین و با جمع امتیازات پارامترها، میزان خطر فرسایش کناره و ناپایداری کناره تعیین شد. در مدل تنش برشی نزدیک با توجه به ویژگی‌های کناره کانال رودخانه لاویج در این تحقیق دو روش نسبت تنش برشی برشی نزدیک کناره به تنش برشی مقطع پر و نسبت حداقل عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق مقطع پر (d_{nb}/d_{bkf}) انتخاب شد. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از مقاطع مختلف، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لاویج در سطوح مختلف اندازه‌گیری شد که نتایج این برآورد طبق حدود تغییرات شاخص‌های مؤثر در فرسایش کناره‌ای در روش تنش نزدیک کناره در جدول (۴) و شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۴). میزان فرسایش پذیری رودخانه لاویج بر اساس شاخص NBS

NBS	نسبت حداقل عمق نزدیک کرانه به متوسط پر مقطع عمق $\frac{d_{nb}}{d_{bhf}}$	NBS	نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر	مقطع عرضی
زیاد	۲,۱۲	خیلی زیاد	۱,۴۸	۱
متوسط	۱,۵	متوسط	۱,۰۶	۲
زیاد	۲	خیلی زیاد	۱,۶۰	۳
کم	۱,۲۲	خیلی زیاد	۱,۳۳	۴
کم	۱,۲۸	زیاد	۱,۱۸	۵
متوسط	۱,۶۱	کم	۰,۹۵	۶
خیلی زیاد	۲,۲	خیلی زیاد	۱,۴۶	۷

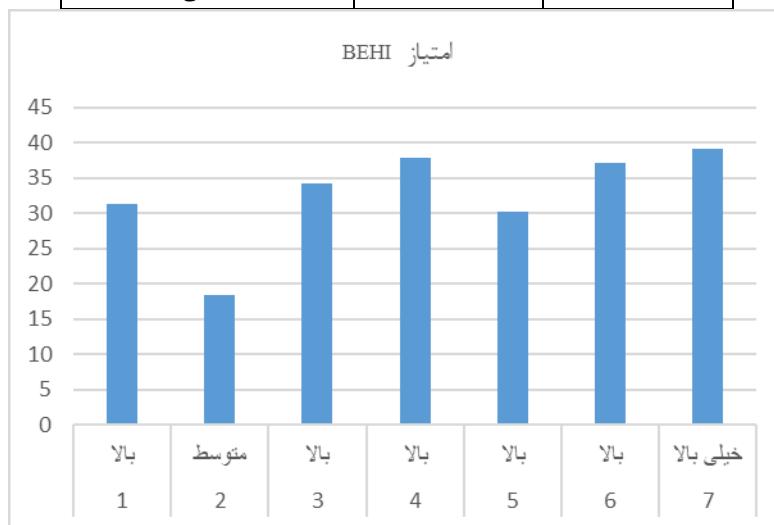


شکل (۲). نمودار تغییرات شاخص‌های NBS در مقاطع عرضی

در روش شاخص خطر فرسایش کناره بر اساس داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده از کناره هر مقطع، اقدام به محاسبه نسبت‌های مورد نیاز در مدل شاخص خطر فرسایش کناره (ارتفاع و زاویه کرانه، ارتفاع دبی مقطع پر، عمق و تراکم ریشه و محافظت سطحی کرانه) شد، سپس مقادیر به دست آمده، جهت امتیازدهی و مشخص نمودن میزان خطر فرسایش کناره با استفاده از راهنمای خطر فرسایش که توسط راسگن (۲۰۰۱) طراحی شده است سنجیده شده و امتیاز هر کدام از پارامترها مشخص شد، در نهایت با جمع‌کردن امتیازات تمامی پارامترها، امتیاز کل شاخص خطر فرسایش کناره محاسبه و میزان خطر فرسایش کناره در مناطق مستعد فرسایش برای کناره مقاطع مختلف در جدول (۵) و شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۵). نتایج کلی روش BEHI در رودخانه لاویج

خطر فرسایش کناره	امتیاز BEHI	مقطع عرضی
بالا	۳۱,۲۷	۱
متوسط	۱۸,۴	۲
بالا	۳۴,۳	۳
بالا	۳۷,۹	۴
بالا	۳۰,۲۶	۵
بالا	۳۷,۱	۶
خیلی بالا	۳۹,۲	۷



شکل (۳). نمودار تغییرات روش BEHI در مقاطع عرضی

با توجه به داده‌های جمع‌آوری‌شده و نتایج به دست آمده از نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر، میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه لاویج در تمام مقاطع مورد مطالعه، به جز مقاطع ۲ و ۶ دارای شدت خیلی زیاد و زیاد می‌باشد. مقاطع شماره ۲ دارای شدت متوسط و مقاطع شماره ۶ دارای شدت کم

می‌باشد. بر اساس شاخص نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق مقطع پر، میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه لاویج به جز مقاطع ۴ و ۵ تقریباً با روند فرسایشی به دست آمده از شاخص اول (نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر) هم خوانی دارد.

بر اساس شاخص خطر فرسایش کناره مقاطع ۱، ۴، ۵ و ۶ وضعیت ناپایداری کناره را زیاد نشان می‌دهند و استعداد زیادی برای فرسایش کناری و تولید رسوب دارند. همچنین مقطع ۲ وضعیت ناپایداری را متوسط نشان می‌دهد، مقاطع شماره ۲ و ۷ وضعیت ناپایداری خیلی زیاد را نشان می‌دهند که استعداد خیلی زیاد برای فرسایش کناره‌ای و تولید رسوب دارند. در جدول (۶) میزان فرسایش‌پذیری در هر کدام از مقاطع با هر سه روش قابل مقایسه است.

جدول (۶): مقایسه تنش برشی و زاویه کناری و محافظت سطحی کرانه با مدل‌های BEHI و NBS

خطر فرسایش کناره BEHI امتیاز	نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط $\frac{d_{nb}}{d_{bhf}}$ پر مقطع عمق	نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر	محافظت سطحی کرانه	تنش برشی	زاویه کناری	قطعه عرضی
بالا	زیاد	خیلی زیاد	۲۰درصد	۹۲,۴۱	۹۰	۱
متوسط	متوسط	متوسط	۴۰درصد		۹۰	۲
بالا	زیاد	خیلی زیاد	۳۰درصد		۹۰	۳
بالا	کم	خیلی زیاد	۱۰درصد	۸۱,۴۸	۸۰	۴
بالا	کم	زیاد	۳۰درصد		۷۵	۵
بالا	متوسط	کم	۱۰درصد	۷۰,۵۱	۶۰	۶
خیلی بالا	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۲۰درصد	۲۸۵	۸۵	۷

همان‌گونه که در جدول (۶) قابل ملاحظه است مقاطع ۱، ۳، ۷ دارای شیب کرانه بالا و کرانه در حالت کاملاً قائم یا نسبتاً قائم و همچنین محافظت سطحی کرانه پایین و تنش برشی بالا باعث شده میزان فرسایش در این مقاطع خیلی زیاد و زیاد باشد مقطع شماره ۲ از سایر سایتهای مورد مطالعه مستثنی می‌باشد زیرا شیب کناره ۹۰ درجه است اما تحت تأثیر محافظت سطحی کرانه و رسوبات درشت‌دانه دارای فرسایش متوسط است. در مقاطع ۴ و ۵ محافظت سطحی کرانه پایین باعث شده فرسایش کرانه در مدل شاخص خطر فرسایش کناره و نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر زیاد باشد. میزان فرسایش در مقطع شماره ۶ که شیب کمتری نسبت به سایر مقاطع دارند کمتر است بنابراین تأثیر میزان شیب بر فرسایش کناری در رودخانه لاویج کاملاً واضح و مشخص است. تنش برشی در میزان پسروی کرانه‌های رودخانه لاویج نقش مهمی دارد. میزان تنش برشی برآورده شده در مقطع ۷ تنش برشی بالا باعث شد که مقدار خطر فرسایش در کرانه مقطع خیلی بالا باشد و همچنین در مقطع ۶ مقدار تنش برش کم باعث شد در مدل تنش برشی نزدیک کرانه مقدار متوسط و کمی باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مؤثر در تنش برشی که شامل شعاع هیدرولیک مقطع عرضی، عمق جریان و شیب بستر جریان می‌باشد در میزان پایداری کرانه‌های رودخانه مؤثرتر از عوامل فرسایش‌پذیری خاک (اندازه ذرات خاک، ویژگی‌های تشکیل کلوخه، چسبندگی ذرات خاک،

ساختمان خاک، ظرفیت نفوذ و کلودیدهای موجود در خاک) هستند. در شکل (۴) پسروی کرانه از رسوبات بسیار ریزدانه تشکیل شده است کاملاً واضح است در حالی که در مجاور همین محل کرانه پسروی نداشته و رسوبات دانه درشت در حد قله سنگ به صورت لایه‌ای حفاظتی مانع از پسروی کرانه شده است حال آنکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با وجود ذرات درشت‌دانه در رسوبات، کرانه پسروی داشته است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد میزان پسروی کرانه‌های رودخانه لاویج در سایتها مورد مطالعه را نمی‌توان فقط با اندازه رسوبات تفسیر کرد. در بیشتر مسیر رودخانه لاویج، کرانه‌ها از نوع کرانه‌های با رسوبات ترکیبی هستند. این کرانه‌ها دارای لایه‌های مختلفی از رسوبات چسبنده (رس) و بدون چسبنده (ماسه و ریگ) می‌باشند. با توجه به اینکه یکی از عوامل مهم در فرسایش‌پذیری کرانه‌های رودخانه وضعیت پوشش گیاهی کرانه است، نمی‌توان نقش پوشش گیاهی را نادیده گرفت. خاک پوشیده از گیاه مقاومت بیشتری در برابر جریان آب دارد، ازین‌رو تراکم پوشش گیاهی، نوع گیاه و ارتفاع آنها می‌تواند در برابر نیروهای فرسایندگی مقاومت ایجاد نماید. در واقع پوشش گیاهی هر سه فرآیند فرسایشی کناره (فرسایش هیدرولیک رودخانه، حرکات توده‌ای و تنش برشی مکانیکی و هیدرولیکی مواد کناره) که توسط لاولر^۱ (۱۹۹۵:۱۷۹) بیان شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد (وین و مستقیمی، ۲۰۰۶:۲۰۰). وین و مستقیمی (۲۰۰۶:۷۹) مشخص کرده‌اند که تراکم رسه تأثیر قابل توجهی بر روی فرسایش کناره در جنوب غربی ویرجینیای آمریکا دارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد، پوشش گیاهی درختی نرخ فرسایش را از طریق اتلاف انرژی ستون آب کاهش می‌دهد. این فرآیند از طریق افزایش زبری و مقاومت کششی ناشی از افزایش چسبنده‌گی فراهم شده به وسیله ترکیب رسه و خاک صورت می‌گیرد (شوم، ۱۹۷۳؛ تورن، ۱۹۹۰؛ گورنیل، ۱۹۹۷؛ گنت و همکاران، ۲۰۰۵ و پولین، ۲۰۰۷). علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که تفاوت گونه‌های مختلف گیاهی نیز مقادیر متنوعی از مقاومت کششی را نسبت به خاک فراهم می‌کند (گنت و همکاران، ۲۰۰۵ و پولین، ۲۰۰۷). در مقطع شماره ۲ محافظت سطحی کرانه توسط رسه و پوشش گیاهی باعث شده مقدار فرسایش‌پذیری در این مقطع نسبت به مقاطع دیگر کمتر باشد. شکل (۶).

^۱ Lawler^۲ Wynn and Mostaghimi^۳ Schumm^۴ Thorne^۵ Gurnell^۶ Genet et al.,^۷ Pollen



شکل(۴). پسروی کرانه رسوبات ریزدانه



شکل(۵). پسروی کرانه در رسوبات درشت دانه



شکل (۶). محافظت سطحی کرانه توسط پوشش گیاهی و ریشه درختان

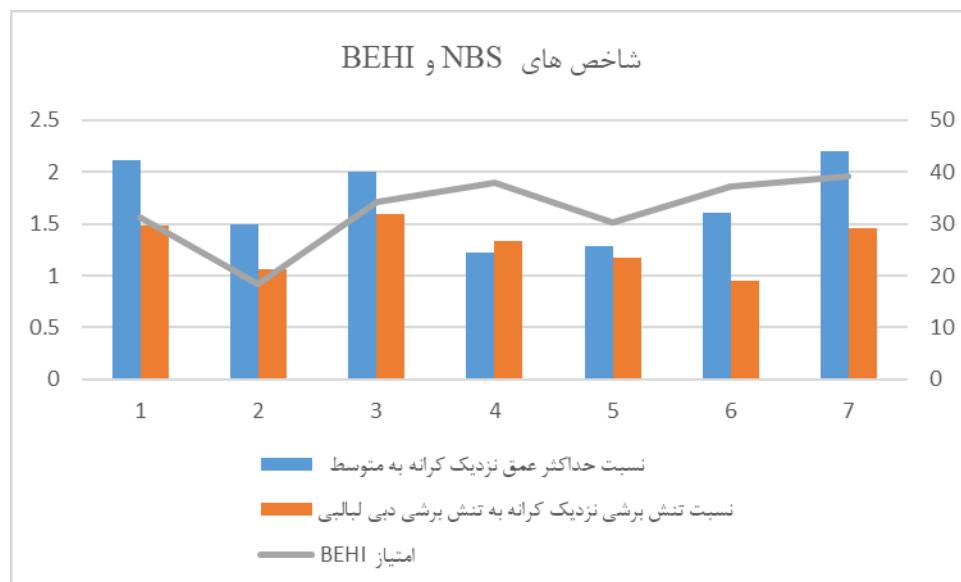
آزمون کروسکال-والیس برای شاخصخطر فرسایش کناره و شاخص‌های تنش برشی نزدیک کرانه برای هر مقطع در سطح اطمینان ۹۵درصد انجام شد جداول (۷) و (۸) نتایج نشان می‌دهد فرض H صفر در سطح خطای ۵ درصد تائید شده و نتایج نشان می‌دهد سه تا شاخص در ارزیابی فرسایش کناری در هر مقطع تقریباً یکسان عمل کرده است. شکل (۷) نمودار روند تغییرات سه شاخص برای کل مقاطع نشان دهنده عملکرد تقریباً یکسانی بوده است.

جدول (۷). نتایج آزمون آماری کروسکال-والیس برای شاخص BEHI و شاخص‌های NBS

مدل	تعداد	میانگین رتبه
۱	۷	۱۳,۲۹
۲	۷	۸,۰۷
۳	۷	۱۱,۶۴
کل	۲۱	

جدول (۸) نتایج آزمون آماری کروسکال-والیس برای شاخص BEHI و شاخص‌های NBS

مقطع	
کروسکال-والیس	۲,۸۲۹
درجه آزادی	۲
معنی‌داری	۰,۲۴۳



شکل (۷). نمودار روند تغییرات شاخص‌های BEHI و NBS در مقاطع مختلف

نتیجه‌گیری

نتایج بهدست آمده از نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لاویج به جز مقاطع ۲ و ۶ همه مقاطع داری شدت خیلی زیاد و زیاد می‌باشند. مقطع ۲ دارای شدت متوسط و مقطع ۶ دارای شدت کم را نشان می‌دهد. بر اساس شاخص نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق مقطع پر، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لاویج به جز مقاطع ۴ و ۵ تقریباً با روند فرسایشی بهدست آمده از شاخص اول (نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر) هم خوانی دارد. شاخص خطر فرسایش کناره مقاطع ۱، ۳، ۴، ۵ و ۶ وضعیت ناپایداری کناره را زیاد نشان می‌دهند مقطع ۲ وضعیت ناپایداری را متوسط نشان می‌دهد و هچنین مقطع ۷ وضعیت ناپایداری خیلی زیاد را نشان می‌دهد. میزان تنش برشی، شبیه کرانه و محافظت سطحی کرانه مانند ریشه و پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش کرانه در مقاطع مورد مطالعه می‌باشد و همچنین میزان فرسایش کرانه‌های رودخانه لاویج در سایتها مورد مطالعه را نمی‌توان فقط با اندازه رسوبات تفسیر کرد. تنوع در لایه‌بندی کرانه‌های رودخانه لاویج سبب عدم برقراری ارتباط بین اندازه رسوبات کرانه با میزان فرسایش کناری رودخانه شده است. نتایج آزمون کروسکال-والیس نشان می‌دهد فرض H صفر در سطح خطای ۵ درصد تائید شده و نتایج نشان می‌دهد سه تا شاخص در ارزیابی فرسایش کناری در هر مقطع تقریباً یکسان عمل کرده است شکل (۹) نمودار روند تغییرات سه شاخص برای کل مقاطع نشان‌دهنده عملکرد تقریباً یکسانی بوده است با توجه به داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده و نمونه‌گیری‌های انجام گرفته، مشخص شد فرسایش کناره‌ای از پدیده‌های غالب و فعال در مقطع مورد مطالعه‌ی رودخانه‌ی لاویج محسوب می‌شود، که در مقاطع مختلف آثار و پیامدهای گوناگونی چون تغییر الگوی رودخانه و گسترش عرض رودخانه در مسیرهای مستقیم داشته است.

منابع

- اسماعیلی، رضا. حسین زاده، محمد Mehdi. (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های روزگن و استیل رود در طبقه‌بندی رودخانه‌های کوهستانی، مطالعه موردي البرز شمالی، حوضه آبریز لاویج، پژوهش‌های دانش زمین، (۳): ۶۴-۷۹.
- ثروتی، محمدرضا. رضایی مقدم، محمدحسین . اصغری، صیاد. (۱۳۹۱) تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه‌ی قزل‌اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱: ۴۶-۳۳.
- حسین زاده ، محمدحسین زاده . خالقی ، سمیه . واحدی فر ، فرزاد. (۱۳۹۶) مقایسه و ارزیابی نتایج مدل NBS و BEHI در فرسایش کناره‌ای رودخانه قرانقو چای هشت‌رود: جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۴(۳): ۹۴-۱۶.
- Amiri-Tokaldani, E., Samadi, A., Rahimi, H.(2006). Effect of the location and depth of tension crack of river bank stability. Journal of agriculture engineering research, (6) 25, 77-94.

- Belmont, P., Gran, K.B., Schottler, S.P., Wilcock, P.R., Day, S.S., Jennings, C., Lauer, J.W., Viparelli, E., Willenbring, J.K., Engstrom, D.R., Parker, G. (2011). **Large shift in source offine sediment in the Upper Mississippi River.** Environmental Science and Technology 45, 8804–8810.
- Coryat, M. (2014). **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.** Master Theses, Syracuse University.
- Daly ER, Miller R, Fox GA. (2015). **Modeling streambank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks.** Advances in Water Resources. 81(1): 114–127.
- Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N. and Vannucci, P. (2003). **Mechanisms of river bank failure along the Amo River Central Italy.** Earth Surface Processes and Landforms. 28, 1303–1323.
- Evans, D. J., Gibson, C. E. and Rossell, R. S. (2006). **Sediment loads and sources in heavily-modified Irish catchments: A move towards in formed management strategies.** Geomorphology. 79, 93–113.
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Beek, R. V. (2005). **The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots.** Plant and Soil, 278, 1–9.
- Grimshaw, D.L., Lewin, J. (1980). **Source identification of suspended solids.** Journal of Hydrology 42, 151–162.
- Gurnell, A. (1997). **The hydrological and geomorphological significance of forested floodplains.** Global Ecology and Biogeography Letters, 6, 219–229.
- homa, D.P., Gupta, S.C., Bauer, M.E., Kirchoff, C.E. (2005). **Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment.** Remote Sensing of Environment, 95, 493–501.
- Karmakera, T., Duttab, Subashisa. (2013). **Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank.** Journal of Hydrology, 476, 178–187.
- Kessler, A. C., Gupta, S.C., Brown, M. K. (2013). **Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers postEuropean settlement.** Geomorphology, 201, 312–322.
- Konsoer, Kory M., Rhoads, Bruce Lane, Langendoen, Eddy J., Best, James L., Ursic, M. E., Abad, Jorge D. (2015). **Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river.** Geomorphology. 252, 80–97.
- Krishna, G. G., Pal, S., & Mukhopadhyay, S. (2016). **Validation of BANCS model for assessing stream bank erosion hazard potential (SBEHP) in Bakreshwar river of Rarh region, Eastern India.** Modeling Earth Systems and Environment, 95(2), 1–15.
- Kwan, H., Swanson, S. (2014). **Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California, JAWRA.** Journal of the American Water Resources Association, 50(6).
- Lawler, D. M. (1995). **The impact of scale on the processes of channel-side sediment supply: A conceptual model. Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality,** 226, 175–184.
- Little W.C., Thome, C.R. and Murphrey, J.B. (1982). **Mass bank failure analysis of selected Yazoo Basin streams.** American Society of Agricultural Engineers Transactions. 25(5). 1321–1328

- Lohnes, R.A. and Handy, R.L.(1968). **slop angles in friable loess**,journal of Geology, 67(3),247-258
- Midgley T. L., Fox G. A., HeerenD. M. (2012). **Evaluation of the bank stabilityand toe erosion model (BSTEM) for predictinglateral retreat on composite streambanks**.Geomorphology 145–146 (2012) 107–114
- Minghui, Y.U., Hongyan, W., Yanjie, L. and Chunyan, H.U.(2010). **Study on the stability of non-cohesive river bank**, International Journal of Sediment Research, 25(4), 391-398.
- Osman. A.M. and Thome. C.R.(1988). **Riverbank stability analysis. Part I: Theory**. Journal of theHydraulics Division. ASCE, (1142), 125-150.
- Parker.C., Simon, A., Thorne, C. (2008). **The effects of variability in bankmaterial properties on riverbank stability:Goodwin Creek, Mississippi**. Geomorphology101 (2008) 533–543
- Pollen, N. (2007). **Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks:Accounting for soil shear strength and moisture**. Catena, 69,197-205.
- Prosser, I.P., Rutherford, I.D., Olley, J.M.,Young, W.J., Wallbrink, P.J., Moran, C.J. (2001). **Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia**. Marine and Freshwater Research 52,81–99.
- Rinaldi, M. and Simon, A.(1998). **Bed level adjustments in the Amo River. Central Italy**. Geomorphology, 22, 57-71.
- Rosgen, D.L. (2011). **Watershed assessment of river stability and sediment supply(WARSSS)**. Wildland Hydrology, Fort Collins, Colorad
- Rosgen, D.L. (2001). **A Stream Channel Stability Assessment Methodology, Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference**
- Schumm, S.A. (1973)**geomorphic thresholds and complex response of drainage systems**. In M.Morisawa (Ed.), Fluvial geomorphology (299-310). New York: Publications ofGeomorphology, State University of New York, Binghamton,.
- Sekely, A. C., Mulla, D. J. and Bauer, D. W.(2002). **Stream bank slumping and its contribution to the phosphorus and suspended sediment loads of the Blue Earth River**. Minnesota, Journal of Soil and Water Conservation. 57,545-550
- Simon, A. and Darby, S. E.(1999). **The nature and significance of incised river channels**. In: Darby. S. E. Simon. A. (eds.). incised river channels. John Wiley and Sons. Chichester, UK
- Simon, A., Collison, A.J.C. (2002). **Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability**. Earth Surface Processes and Landforms 27, 527–546.
- Simon, A., Wolfe,W.J. and Molinas. A.(1991). **Mass-wasting algorithms in an alluvial channel model**. Proceedings of the 5th Federal Interagency Sedimentation Conference. Las Vegas. Nevada: 8-22.
- Thome, C.R..(1982). **Processes and mechanisms of river bank erosion, gravel bed rivers**. editors by Hey. R.D., Bathurst. J.C. and Thome. C.R.. John Wiley & Sons Ltd. 227-271.
- Thome,C.R.(1998). **Stream Reconnaissance Handbook. Geomorphological investigation and analysis of river channels**. John Wiley & Sons:Chichester. 142.

- Thome,C.R., Reed, S. and Doornkamp. J.C.(1996). **A procedure for assessing river bank erosion problems and solutions.** Research and Development Report 28. National Rivers Authority Bristol
- Thorne, C. R. (1990). **Vegetation and erosion: Processes and environments.** Chi Chester: JohnWiley & Sons Ltd.
- Thorne, C.R.,Murphey, J.B. and Little. W.C.(1981). **Bank stability and bank material properties in the bluffline streams of northwest Mississippi.** Appendix D. Report to the US Army Corps of Engineers. Vicksburg District Office. on Stream Channel Stability.
- Thorne,C.R.(1992). **Bend scour and bank erosion on the meandering Red River. Louisiana.** In **Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives.** Carling PA. Petts GE (eds). John Wiley & Sons: Chichester: 95-115.
- Wilson, C. G. Kuhnle, R.A.,Bosch, D. D., Steiner, J. L., Starks, P., Tomer, M. D. and Wilson. G. V. (2008). **Quantifying relative contributions from sediment sources in Conservation Effects Assessment Project watersheds.** Journal of Soil and Water Conservation, 63. 523-531.
- Wynn, T. M., &Mostaghimi, S. (2006). **The effects of vegetation and soil type on streambankerosion, Southwestern Virginia, USA.** Journal of the American Water ResourcesAssociation, 42(1), 69-82.