

مطالعه فرسایش پذیری کناره و عوامل مؤثر بر آن در رودخانه لایچ (استان مازندران، چمستان)

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

صفحات: ۱۱۹-۱۳۶

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، بابلسر، ایران.

Email: r.esmaili@umz.ac.ir

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

Email: S64.biranvand@gmail.com

چکیده

عقب‌نشینی کناره کانال یک فرآیند مهم در مورفودینامیک رودخانه است که تغییرپذیری کانال، تکامل دشت سیلابی و توسعه زیستگاه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرساله سازه‌های عمرانی و زمین‌های کشاورزی که حاشیه رودخانه لایچ قرار دارند با خطرات ناشی از تغییر بستر مواجه‌اند. از این رو وجود روشی قابل‌اعتماد 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 لایچ، 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 لایچ به‌جز مقاطع ۲ و ۶ همه مقاطع دارای شدت فرسایش خیلی زیاد و زیاد می‌باشند. بر اساس شاخص (dmb/dbkf) میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه لایچ به‌جز مقاطع ۴ و ۵ تقریباً با روند فرسایشی به‌دست‌آمده از شاخص اول (tnb/tbkf) هم‌خوانی دارد. بر اساس مدل BEHI مقاطع ۱، ۳، 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. مقطع ۷ و ۲ وضعیت ناپایداری خیلی زیاد را نشان می‌دهد که استعداد خیلی زیاد برای فرسایش کناره‌ای و تولید رسوب دارد. در نهایت جهت بررسی میزان انطباق نتایج با استفاده از آزمون آماری کروسکال-والیس باهم برآزش 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 لایچ، 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 جانبی و مشخصات مورفولوژیکی آن‌ها در طول زمان و پیوسته در حال تغییرند. ناپایداری مجرا 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 مواقع میزان قابل توجهی از مجموع کل رسوباتی را شامل می‌شود که جریان رود آن را حمل می‌کند. ناپایداری مجرا 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 عمده آلودگی غیر نقطه‌ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌ها است (رزگن^۳، ۲۰۰۱؛ سایمون و دربی^۴، ۱۹۹۹: ۱۸؛ سکلی و همکاران^۵، ۲۰۰۲: ۵۴۵؛ اونس و همکاران^۶، ۲۰۰۶: ۹۵؛ ویلسون و همکاران^۷، ۲۰۰۸: ۵۲۹). مطالعات متعددی فرسایش کناره‌ای را به عنوان عامل اصلی مسائل مختص به کیفیت آب و تخریب رودخانه‌ها (سایمون و همکاران^۸، ۲۰۰۲: ۵۳۰؛ پروسر و همکاران^۹، ۲۰۰۱: ۸۲؛ گریمشاو و همکاران^{۱۰}، ۱۹۸۰: ۱۶۰)؛ و منبع اصلی بار رسوبات معلق رودخانه دانسته‌اند (توما و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۵؛ کسلر و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۳: ۳۱۲؛ بلمونت^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۱: ۸۸۰۵) در سراسر جهان روش‌های مختلفی برای بررسی میزان فرسایش کناره‌ای رودخانه استفاده شده است. تصاویر سنجنده لیدار، پین‌های فرسایشی، رادیونوکلئیدها، دندروژنومورفولوژی 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 (داپورتو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۳۰۳) و در طول دهه‌های اخیر افزایش یافته است (رینالد و سایمون^{۱۴}، ۱۹۹۸: ۵۸). مطالعه ناپایداری کرانه رود از اواخر ۱۹۶۰ (لوهنس و هندی^{۱۵}، ۱۹۶۸: ۲۴۹) و به ویژه 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، ۱۹۹۲:۹۷ و ۱۹۹۸؛ سایمون و همکاران^۲، ۱۹۹۱:۱۵؛ عثمان و تورن^۳، ۱۹۸۸:۱۳۰؛ لیتل و همکاران^۴، ۱۹۸۲ و ۱۹۹۶:۱۳۲۵؛ تورن و همکاران^{۱۹۸۱}) به طور ویژه بر مواد تشکیل دهنده کرانه متمرکز شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم فرسایش کرانه‌ای رود نسبت به دیگر شکل‌های فرسایش، تداوم و فعال بودن آن است، درحالی‌که 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 تحرک کانال و در نتیجه برآورد میزان فرسایش‌پذیری کانال پیشرفت‌های زیادی داشته است. شاخص خطر فرسایش کناری یک فرآیندی یکپارچه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری فرسایش کناری رودخانه با استفاده از متغیرهایی مختلف می‌باشد، که نرخ فرسایش را برای ما محاسبه می‌کند. ارزیابی فشار برشی نزدیک کناره در پیش‌بینی فرسایش بسیار بااهمیت است به طوری‌که نشان دهنده توزیع انرژی جریان در مقطع عرضی مجرا 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 فرساینده و عوامل فرسایش‌پذیری. عوامل فرساینده 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، چسبندگی 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 لایویج 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 این رو 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 زمینه ناپایداری و فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مدیریت حفاظت از کرانه‌ها انجام گرفته است. از جمله: کریشنا و همکاران^۵ (۲۰۱۶) به اعتبار 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 پرداختند نتایج نشان داد که مقدار شاخص خطر فرسایش کرانه در قسمت‌های بالادست و محل تلاقی بالاست اما مقدار تنش برشی نزدیک کرانه کمتر است. کانسولر و همکارانش^۱ (۲۰۱۵) تغییرات مکانی در مقاومت کناره‌ها به فرسایش در مئاندرهای بزرگ در رودخانه آبرفتی - کوهستانی را با استفاده از مدل BSTEM و تصاویر لیدار برای ارزیابی پتانسیل خصوصیات مواد کناری برای تعدیل نسبت و مکانیسم عقب‌نشینی کناره رودخانه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که خصوصیات مواد کناری، چسبندگی خاک و تنش برشی بحرانی بین دو خم (پیچ) متفاوت و تغییرات زیادی بین دو پیچ در حالت‌های عمودی و جانبی دارد. دلی و همکاران^۲ (۲۰۱۵) از مدل BSTEM برای تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش کناره رودخانه‌ای و گسیختگی، استفاده کردند و اندازه‌ی عقب‌نشینی را با گذشت زمان (دوره‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) در رودخانه‌ی بارن فورک کریک در اوکلاهامای غربی برآورد کردند. نتایج نشان داد که نسبت عقب‌نشینی حدود ۷۴/۸ تا ۴/۱ (به‌طور میانگین برابر با ۴۹/۲) در ده نقطه‌ی مورد بررسی، متغیر بوده است. کوریت^۳ (۲۰۱۴) به تحلیل و ارزیابی کانال با روش پیامدهای منیع غیر نقطه‌ای رسوب (BANCS) برای پیش‌بینی فرسایش و پایداری کرانه‌ی رودخانه در استونی کولو کریک در کت اسکیلز پرداخته است. این مطالعه نشان داد که نتایج به‌دست‌آمده از طریق روش BANCS ممکن است منجر به بهبود مدیریت آینده‌ی حوضه‌ی استونی کولو شود. کوان و سوانسن^۴ (۲۰۱۴) به پیش‌بینی فرسایش سالانه کرانه رودخانه با استفاده از شاخص خطر فرسایش کرانه و روش تنش برشی نزدیک کرانه برای جنگل ملیسکوایا در کالیفرنیا پرداختند. کارماکر و همکارانش^۵ (۲۰۱۳) گزارش دادند در محل‌هایی از رودخانه آبرفتی که گسیختگی کناری غالب است، فرسایش ناشستی عامل مهمی در گسیختگی کناری است که اغلب نادیده گرفته می‌شود. بر این اساس رابطه‌ای بین نسبت فرسایش ناشستی 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 ناشستی پیش‌بینی‌شده 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 اوکلاهاما 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 Daly et al.,

^۲ Coryat et al.,

^۴ Kwan and Swanson

^۵ Karmakera et al.,

^۶ Midgley et al.,

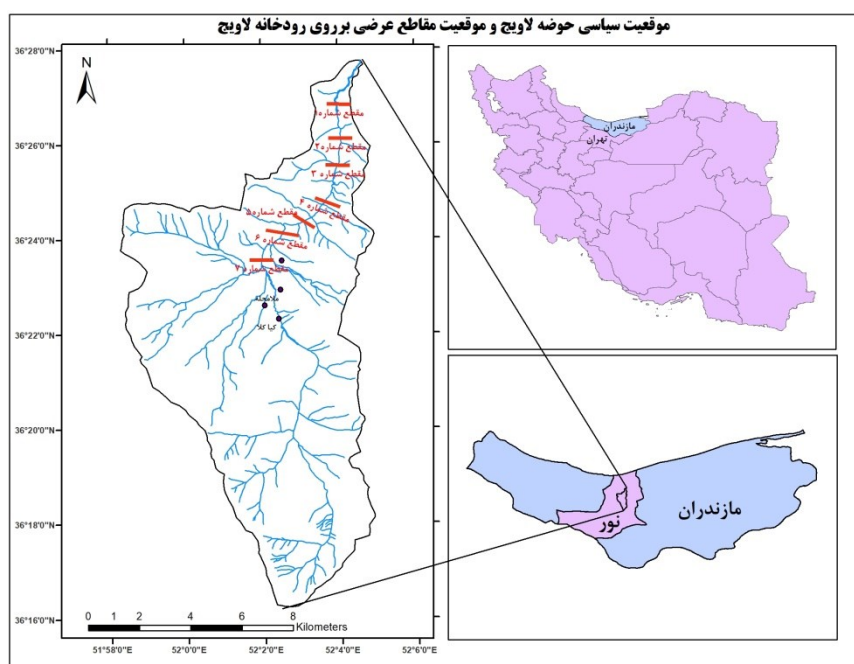
پیش فرض و اندازه گیری شده مدل سازی شد. نتایج نشان داد که مدل یاد شده میزان فرسایش واقعی را کمتر از میزان واقعی تخمین زده است. پارکر و همکارانش (۲۰۰۸) اثر تغییرپذیری خصوصیات مواد کناری رودخانه را روی پایداری رودخانه با استفاده از مدل BSTEM بررسی کردند. نتایج نشان داد که هیچ اختلاف معناداری بین تغییرات درون مکانی (مقیاس میکرو) و بین مکانی (مقیاس مزو) در خصوصیات مواد کناری وجود ندارد. در حالی که هر دو اثر معناداری روی پایداری کناری رودخانه دارند. راسگن (۲۰۰۱) در پژوهشی برای ارزیابی مدل های پایداری کانال رود در منطقه چشمه پاسوگا برای ارزیابی و پیش بینی فرسایش کناره های و نیز میزان رسوب از طبقه بندی سلسله مراتبی راسگن استفاده کرده است و با بهره گیری از متغیرهایی چون تغییرات در شاخص های کنترل فرم کانال رود در درجه اول و رژیم رسوب، پوشش گیاهی و تغییرات فیزیکی این محدوده در درجه دوم این سیستم طبقه بندی را مورد اعتبارسنجی قرار داده است. حسین زاده و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به منظور ارزیابی تغییرات مورفولوژیک و پایداری رودخانه قرانقوچای هشتروند با استفاده از مدل شاخص خطر فرسایش کرانه پرداختند که نتایج نشان داد که فرسایش کناره ای در هر دو کناره راست و چپ مقاطع عرضی وجود دارد به طوری که در کناره سمت راست رودخانه، میزان خطر فرسایش در تمامی مقاطع از متوسط تا خیلی زیاد است و فقط در یکی از مقاطع میزان خطر فرسایش خیلی کم بوده و همچنین در کناره های چپ رودخانه در مقاطع مذکور میزان خطر فرسایش کناره از خیلی کم تا شدید برآورد شده 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 داده های جمع آوری شده از ۵۱ محل در مسیر رودخانه می سی سی پی، 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 مدل های شاخص خطر فرسایش کرانه و تنش برشی نزدیک کرانه در رودخانه لایویج است.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز لایویج در دامنه های شمالی رشته کوه البرز در جنوب شهر چمستان واقع شده است. از نظر تقسیمات سیاسی، این حوضه در شهرستان نورا استان مازندران قرار دارد (شکل ۱). حوضه دارای جهت شمالی - جنوبی می باشد و سطح اساس رودخانه های این حوضه دریای خزر است. حوضه آبخیز لایویج از غرب به حوضه گلندرود، از شرق به حوضه واز و از جنوب به حوضه آبخیز هراز منتهی می شود. رود مهم حوضه آبخیز لایویج نام دارد؛ سه رود کوچک تر به نام های نومه هراز، تیلن رود و کرچی رود در قسمت داخلی منطقه لایویج جریان دارند که در پای ارتفاعات شمالی و در مدخل تنگه لایویج، رودخانه لایویج رود را بوجود می آوردند. میانگین دبی سالانه رودخانه

لاویج $1/24 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 لاویج رود و در محدوده پارک جنگلی کشپل واقع شده است. جهت بررسی میزان خطر فرسایش کناری و شناسایی مناطق مستعد فرسایش کناری رودخانه لاویج 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 لاویج 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 به واسطه 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- تعدیل و تنظیم مواد کناره ۷- طبقه بندی مواد کناره این امتیازات جهت تعیین نمره کلی به هم اضافه شده و نمره کامل به دست می آید، بنابراین تمامی متغیرها از وزن یکسانی جهت امتیازدهی برخوردار هستند. این نمرات عددی به یک میزان در امتیازبندی توصیفی برای میزان حساسیت کناره ها به فرسایش مربوط می شوند. در جدول (۱) شاخص های مدل شاخص خطر فرسایش کناره و راهنمای نمره دهی به شاخص ها 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 کناره رودخانه						
طبقه بندی خطر فرسایش	ارتفاع کناره/ارتفاع دبی مقطع پر	عمق ریشه/ارتفاع کناره	تراکم ریشه (%)	زاویه کناره (درجه)	حفاظت سطحی (%)	
خیلی کم	مقدار	۱،۱-۱	۱۰۰-۸۰	۲۰-۰	۱۰۰-۸۰	
	شاخص	۱،۹-۱	۱،۹-۱	۱،۹-۱	۱،۹-۱	
کم	مقدار	۱،۱۱-۱،۱۹	۰،۸۹-۰،۵	۲۱-۶۰	۵۵-۷۹	
	شاخص	۳،۹-۲	۳،۹-۲	۳،۹-۲	۳،۹-۲	
متوسط	مقدار	۱،۲-۱،۵	۰،۳-۰،۴۹	۶۱-۸۰	۳۰-۵۴	
	شاخص	۵،۹-۴	۵،۹-۴	۵،۹-۴	۵،۹-۴	
زیاد	مقدار	۱،۶-۲	۰،۱۵-۰،۲۹	۸۱-۹۰	۱۵-۲۹	
	شاخص	۷،۹-۶	۷،۹-۶	۷،۹-۶	۷،۹-۶	
خیلی زیاد	مقدار	۲،۱-۲،۸	۰،۰۵-۰،۱۴	۹۱-۱۱۹	۱۰-۱۴	
	شاخص	۹-۸	۹-۸	۹-۸	۹-۸	
شدید	مقدار	< ۲،۸	< ۰،۰۵	< ۱۱۹	< ۱۰	
	شاخص	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	

جدول (۲). طبقه بندی پتانسیل فرسایش کناره

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 کناره (NBS)

ارزیابی فشار برشی نزدیک کناره در پیش‌بینی فرسایش بسیار بااهمیت است به طوری که نشان‌دهنده توزیع انرژی جریان در مقطع عرضی مجرا 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 مورد استفاده برای ارزیابی و تخمین تنش برشی نزدیک کرانه عبارت‌اند از:

۱- الگوی مجرا و ارزیابی بارها ۲ - نسبت شعاع انحناء به عرض مقطع پر ۳- نسبت شیب خیزاب به میانگین شیب سطح آب ۴- نسبت شیب خیزاب به شیب تنداب 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 (کوربات، ۲۰۱۴)

با توجه به ویژگی‌های کناره جریان رودخانه لایچ 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_{bkt}) جهت اجرای این مدل انتخاب شد.

مراحل کار به این صورت است که پس از جمع‌آوری داده‌ها و اندازه‌گیری ابعاد هندسی مقاطع مختلف و پارامترهای مورد نیاز، (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 برحسب 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 کرانه (NBS)	نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق مقطع پر $(\frac{d_{nb}}{d_{bkt}})$	نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر
خیلی کم	کمتر از ۱	کمتر از 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 انتها 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.

$$H_0 = BEHI = NPS$$

رابطه (۱)

$$H_1 = BEHI \neq NPS$$

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 تعریف شده در هر دو مدل، برای هر کدام از مقاطع، محاسبه شده و با استفاده از راهنمای تنش نزدیک کناره 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 نزدیک کناره به تنش برشی مقطع پر و نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق مقطع پر (d_{nb}/d_{bkr}) 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

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

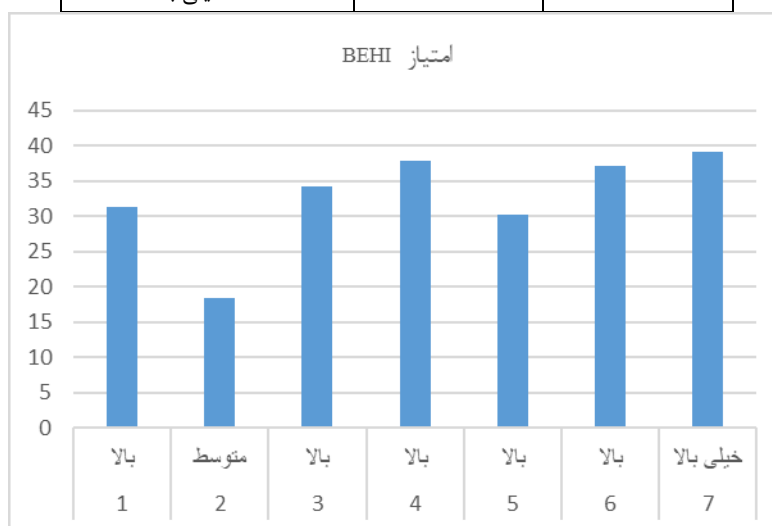


شکل (۲). نمودار تغییرات شاخص‌های NBS در مقاطع عرضی

در روش شاخص خطر فرسایش کناره بر اساس داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده 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 جمع کردن 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 لایچ

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



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

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

می‌باشند. بر اساس شاخص نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق مقطع پر، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لایویج 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) هم‌خوانی دارد.

بر اساس شاخص خطر فرسایش کناره مقاطع ۱، ۳، 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 فرسایش پذیری 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

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

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 لایویج کاملاً واضح و مشخص است. تنش برشی در میزان پستی کرانه‌های رودخانه لایویج نقش مهمی دارد. میزان تنش برشی برآورد 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 می‌باشند در میزان پایداری کرانه‌های رودخانه مؤثرتر از عوامل فرسایش پذیری خاک (اندازه ذرات خاک، ویژگی‌های تشکیل کلوخه، چسبندگی ذرات خاک،

ساختمان خاک، ظرفیت نفوذ و کلوئیدهای موجود در خاک) هستند. در شکل (۴) پسروری کرانه از رسوبات بسیار ریزدانه تشکیل شده است کاملاً واضح است درحالی که در مجاور همین محل کرانه پسروری نداشته و رسوبات دانه درشت در حد قلوه سنگ به صورت لایه ای حفاظتی مانع از پسروری کرانه شده است حال آنکه در شکل (۵) مشاهده می شود که با وجود ذرات درشت دانه در رسوبات، کرانه پسروری داشته است؛ بنابراین می توان بیان کرد میزان پسروری کرانه های رودخانه لاویج در سایت های مورد مطالعه را نمی توان فقط با اندازه رسوبات تفسیر کرد. در بیشتر مسیر رودخانه لاویج، کرانه ها از نوع کرانه های با رسوبات ترکیبی هستند. این کرانه ها دارای لایه های مختلفی از رسوبات چسبنده (رس) و بدون چسبندگی (ماسه و ریگ) می باشند. با توجه به اینکه یکی از عوامل مهم در فرسایش پذیری کرانه های رودخانه وضعیت پوشش گیاهی کرانه است، نمی توان نقش پوشش گیاهی را نادیده گرفت. خاک پوشیده از گیاه مقاومت بیشتری در برابر جریان آب دارد، از این رو تراکم پوشش گیاهی، نوع گیاه و ارتفاع آنها می تواند در برابر نیروهای فرساینده مقاومت ایجاد نماید. در واقع پوشش گیاهی هر سه فرآیند فرسایشی کناره (فرسایش هیدرولیک رودخانه، حرکات توده ای و تنش برشی مکانیکی و هیدرولیکی مواد کناره) که توسط لاولر^۱ (۱۷۹:۱۹۹۵) بیان شده را تحت تأثیر قرار می دهد (وین و مستقیمی^۲، ۷۰:۲۰۰۶). وین و مستقیمی (۷۹:۲۰۰۶) مشخص کرده اند که تراکم ریشه تأثیر قابل توجهی بر روی فرسایش کناره در جنوب غربی ویرجینیای آمریکا دارد. مطالعات قبلی نشان می دهد، پوشش گیاهی درختی نرخ فرسایش را از طریق اتلاف انرژی ستون آب کاهش می دهد. این فرآیند از طریق افزایش زبری و مقاومت کششی ناشی از افزایش چسبندگی فراهم شده به وسیله ترکیب ریشه و خاک صورت می گیرد (شوم^۳، ۱۹۷۳؛ تورن^۴، ۱۹۹۰؛ گورنیل^۵، ۱۹۹۷؛ گنت و همکاران^۶، ۲۰۰۵ و پولین^۷، ۲۰۰۷). علاوه بر این نتایج نشان می دهد که تفاوت گونه های مختلف گیاهی نیز مقادیر متنوعی از مقاومت کششی را نسبت به خاک فراهم می کند (گنت و همکاران، ۲۰۰۵ و پولین، ۲۰۰۷). در مقطع شماره ۲ محافظت سطحی کرانه توسط ریشه و پوشش گیاهی باعث شده مقدار فرسایش پذیری 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

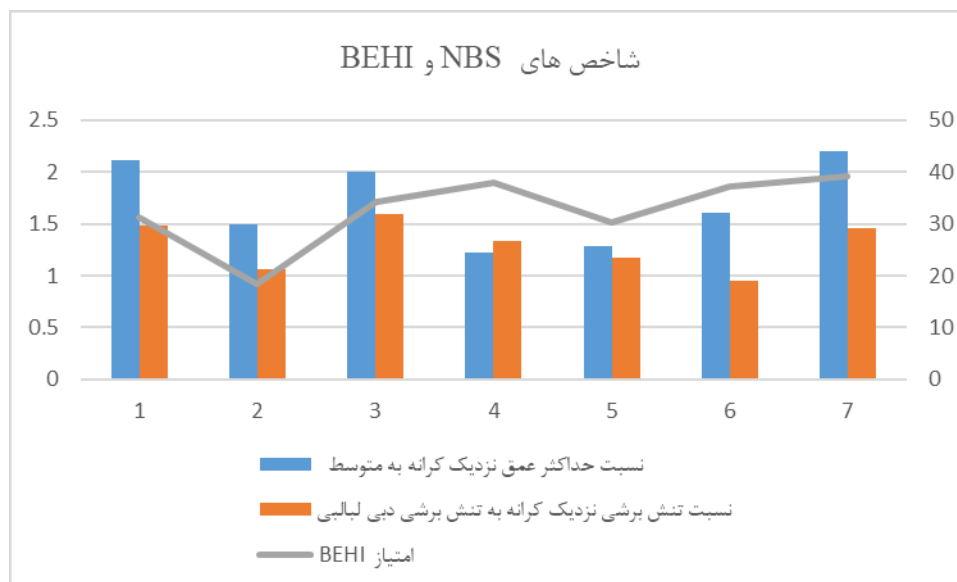
آزمون کروسکال-والیس برای شاخص خطر فرسایش کناره و شاخص‌های تنش برشی نزدیک کرانه برای هر مقطع در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد جداول (۸ و ۷) نتایج نشان می‌دهد فرض H صفر در سطح خطای ۵ درصد تأیید شده و نتایج نشان می‌دهد سه تا شاخص در ارزیابی فرسایش کناری در هر مقطع تقریباً یکسان عمل کرده است. شکل (۷) نمودار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

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لاویج به جز مقاطع ۶ و ۲ همه مقاطع داری شدت خیلی زیاد و زیاد می باشند. مقطع ۲ دارای شدت متوسط و مقطع ۶ دارای شدت کم را نشان می دهد. بر اساس شاخص نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به متوسط عمق مقطع پر، میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه لاویج به جز مقاطع ۵ و ۴ تقریباً با روند فرسایشی به دست آمده از شاخص اول (نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی مقطع پر) هم خوانی دارد. شاخص خطر فرسایش کناره مقاطع ۶ و ۵، ۴، ۳، ۱ وضعیت ناپایداری کناره را زیاد نشان می دهند مقطع ۲ وضعیت ناپایداری را متوسط نشان می دهد و همچنین مقطع ۷ وضعیت ناپایداری خیلی زیاد را نشان می دهد. میزان تنش برشی، شیب کرانه و محافظت سطحی کرانه مانند ریشه و پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش کناره در مقاطع مورد مطالعه می باشد و همچنین میزان فرسایش کناره های رودخانه لاویج در سایت های مورد مطالعه را نمی توان فقط با اندازه رسوبات تفسیر کرد. تنوع در لایه بندی کناره های رودخانه لاویج سبب عدم برقراری ارتباط بین اندازه رسوبات کرانه با میزان فرسایش کناری رودخانه شده است. نتایج آزمون کروסקال-والیس نشان می دهد فرض H صفر در سطح خطای ۵ درصد تأیید شده و نتایج نشان می دهد 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 نشان دهنده عملکرد تقریباً یکسانی بوده است با توجه به داده ها و اطلاعات جمع آوری شده و نمونه گیری های انجام گرفته، مشخص شد فرسایش کناره های از پدیده های غالب و فعال در مقاطع مورد مطالعه رودخانه لاویج محسوب می شود، 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 مهدی. (۱۳۹۴). مقایسه روش های روزگن و استیل رود در طبقه بندی رودخانه های کوهستانی، مطالعه موردی البرز شمالی، حوضه آبریز لاویج، پژوهش های دانش زمین، ۲۱ (۳): ۶۴-۷۹.
- ثروتی، محمدرضا. رضایی مقدم، محمدحسین. اصغری، صیاد. (۱۳۹۱) تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه ی قزل اوزن با استفاده از روش های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرائی، پژوهش های 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 کناره های رودخانه قرائقو چای هشترود، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۴(۳): ۱۶-۱۶.
- 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 offshore 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 Vannocci, 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 informed 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 post European 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 Raichur 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. و Thome. C.R. and Murphey. 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 Strem 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.

- Thorne, 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: John Wiley & 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 streambank erosion, Southwestern Virginia, USA**. Journal of the American Water Resources Association, 42(1), 69-82.