

برآورد میزان فرسایش کناری رودخانه با استفاده از مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه. مطالعه موردی: رودخانه لایج - شهرستان نور

محمد مهدی حسین زاده^۱، سیدحسن صدوق^۲، سعیده متش بیرانوند^{۳*}، رضا اسماعیلی^۴

^۱دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

^۲استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

^۳دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی*

^۴استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه مازندران

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۳

چکیده

فرسایش کناری رودخانه یکی از مشکلات اصلی در مدیریت و سازمان دهی کانال های آبرفتی است. از آنجاکه هر ساله سازه ها و زمین های کشاورزی مجاور رودخانه لایج با خطر تغییر بستر رودخانه و فرسایش کناری مواجه هستند، از این رو هر گونه عملیات اجرایی و تأسیساتی در حاشیه این رودخانه مستلزم آگاهی از جابه جایی های آتی الگوی این رودخانه و پیش بینی میزان فرسایش کناری رودخانه است. در سال های اخیر استفاده از مدل های عددی جهت تعیین تحرک کانال و در نتیجه برآورد میزان فرسایش پذیری کانال پیشرفت های زیادی داشته است. در این مقاله با استفاده از مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM^۱)، فرسایش کناری رودخانه لایج (بازه ای ۲۰ متری) شبیه سازی گردید. هدف از این شبیه سازی پیش بینی میزان پسروی کناره رودخانه لایج (فرسایش رودخانه ای و گسیختگی ژئوتکنیکال) و همچنین برآورد میزان رسوب تولیدی ناشی از این پسروی است. بدین منظور داده های ژئومتریک مربوط به مقطع رودخانه، داده های دبی و جریان رودخانه، اطلاعات ژئوتکنیک لایه های تشکیل دهنده کرانه و اطلاعات پوشش کرانه وارد مدل گردید. سپس عمل شبیه سازی برای دو جریان در حالت دبی لبالبی و دبی حداکثر لحظه ای انجام شد. نتایج شبیه سازی شرایط رودخانه لایج با استفاده از این مدل در دبی های لبالبی و حداکثر لحظه ای نشان داد که فاکتور امنیت (FS) کرانه در هر دو مورد کمتر از ۱ است و این بدین معناست که در هر سیلابی که دبی جریان به دبی لبالبی و یا دبی حداکثر لحظه ای برسد امکان فرسایش کناری، ناپایداری و سقوط کرانه را فراهم می کند. میزان پسروی و فرسایش کرانه در جریان حاصل از دبی حداکثر لحظه ای بالاتر از (تقریباً ۲/۵ برابر) میزان فرسایش در جریان حاصل از دبی لبالبی بود؛ همچنین مشخص شد میزان پسروی کرانه در لایه های پایینی که عمدتاً از رسوبات غیرمتراکم گراول و قلوه سنگ هستند، به مراتب بیشتر از لایه متراکم بالایی است. با توجه به اینکه مدل BSTEM از جمله مدل هایی است که در آن اهمیت پارامترهای ژئوتکنیک در میزان پسروی کرانه لحاظ شده است، مدل مناسبی برای کرانه های مرکب از چند لایه با تراکم متفاوت است. از آنجاکه این مدل همزمان پارامترهای ژئومتری کانال، هیدرولوژی جریان و ژئوتکنیک رسوبات کرانه را در برآورد پایداری لحاظ می کند، پیشنهاد می گردد. به منظور بررسی اثر حفاظت های به کار گرفته شده در کاهش میزان فرسایش کناری رودخانه و انتخاب بهترین نوع حفاظت کناره از این مدل در مدیریت رودخانه ها استفاده شود.

واژه های کلیدی: فرسایش کناری، ناپایداری کرانه رودخانه، مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM)، رودخانه لایج.

مقدمه و طرح مسئله

عقب‌نشینی کناره کانال یک فرآیند بااهمیت در مورفودینامیک رودخانه است که تغییرپذیری کانال، تکامل دشت سیلابی و توسعه زیستگاهها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زمین‌های حاشیه رودخانه تحت تأثیر عقب‌نشینی کناره کانال رودخانه همواره در معرض تخریب سواحل هستند که خساراتی از جمله تخریب زمین‌های کشاورزی، پل‌ها، سازه‌های ساحلی و... را به دنبال دارد. مهندسی رودخانه و اجرای هرگونه عملیات تأسیساتی در رودخانه و کناره‌های آن باید مبتنی بر کمیت فرسایش کناری رودخانه باشد. فرسایش کناری رودخانه همچنین یکی از منابع اصلی تولید رسوبات رودخانه است که سبب کدورت آب، مشکلات مواد مغذی و آلودگی‌های آب، همچنین پر شدن دریاچه‌های ذخیره آب می‌گردد؛ بنابراین مشاهده می‌گردد که فرسایش کناری اغلب به صورت یک مخاطره طبیعی مطرح است که باید سعی در جلوگیری و کنترل آن داشت (پگی^۱ و همکاران، ۲۰۰۵: ۷۷۳).

همان‌گونه که ذکر شد فرسایش کناری رودخانه یکی از مشکلات اصلی در مدیریت و سازمان‌دهی کانال‌های آبرفتی است. در پژوهش‌های اخیر لزوم بازنگری سیاست‌های گذشته در ارتباط با مدیریت و سازمان‌دهی رودخانه‌های آبرفتی (با توجه به ماهیت فرسایش کناری) مورد توجه قرار گرفته است. افزایش آگاهی‌ها سبب بازنگری نسبت به فرآیند فرسایش کناری شده است: (۱) طبیعت برخی از حفاظت‌های مهندسی‌شده برای کناره‌ها که سبب افزایش ناپایداری می‌گردد. برای مثال احداث بعضی از سازه‌های حفاظتی سبب کاهش ذخیره رسوب رودخانه می‌گردد که این امر ممکن است سبب آغاز زیربری‌های جدید و آسیب به سازه‌ها در قسمت‌های پایین دست شود، (۲) هزینه‌های بالای اقتصادی سازه‌های حفاظتی، (۳) نقش کلیدی فرسایش کناری در دینامیک کانال و (۴) و دست‌یابی به این شناخت مهم که فرسایش کناری نقش مهمی در ایجاد و توسعه سرویس‌های اکوسیستم

دارد (پگی^۲ و همکاران، ۲۰۰۵: ۷۷۳)؛ بنابراین لزوم توجه به این موارد در آنالیزهای هزینه-فایده برای برنامه‌ریزی حفاظت کناره رودخانه ضروری به نظر می‌رسد.

حوضه آبخیز لایوچ 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.

وجود روش‌های قابل‌اعتماد 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. مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM^۳) یکی از مدل‌های شبیه‌سازی عددی است که با هدف پیش‌بینی پسروری کناره (ناشی از فرسایش رودخانه‌ای و گسیختگی ژئوتکنیکال) توسعه یافته است.

مدل BSTEM مدلی دقیق و انعطاف‌پذیر در شبیه‌سازی پایداری کرانه، تخمین بار رسوب و مطالعات بازسازی رودخانه است. با این وجود برای بررسی میزان فرسایش کناری و پایداری کرانه، مطالعات اندکی با این مدل انجام شده است. پارکر و همکاران^۴ (۲۰۰۸) پایداری کرانه رودخانه را در بازه‌های با مواد کناری متفاوت را با استفاده از مدل BSTEM بررسی نمودند. میدگلی و همکاران^۵ (۲۰۱۲) با استفاده از مدل BSTEM میزان پسروری کناری رودخانه بارن فورک کریک^۶ را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد بیشترین میزان عقب‌نشینی کرانه از ماه می تا سپتامبر به علت رگبارهای سیلابی

2. Piegay et al., 2005
3. Bank Stability and Toe Erosion Model
4. Parker et al., 2008
5. Midgley et al., 2012
6. Barren Fork Creek

1. Piegay et al., 2005

در اندازه‌گیری فرسایش رودخانه‌ای (برای مثال جدا شدن مواد کناره در اثر عمل نیروی‌های هیدرولیک)، شامل استفاده و توسعه تکنیک‌های خاص برای اندازه‌گیری پارامترهای فرسایش‌پذیری رسوبات کناره (تالورس و همکاران^۳، ۱۹۹۹:۲۸۱، هنسون و سیمون، ۲۰۰۱:۱۹۳، وین و مستقیمی^۴، ۲۰۰۶:۶۹، کلارک و وین^۵، ۲۰۰۷:۹۵)، همچنین ایجاد روش‌هایی برای مدل‌سازی جریان نزدیک کناره با استفاده از محاسبات دینامیک سیالات و دیگر تکنیک‌ها (دربی و همکاران^۶، ۲۰۰۴:۲۶۸، کین و اسمیت^۸، ۲۰۰۶، مک‌براید و همکاران^۹، ۲۰۰۷:۲۱۹، جولین و تورس^{۱۰}، ۲۰۰۶:۱۹۳، پاپانیوکولا و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۷:۱۰۵) ساز و کار گسیختگی ساحل رودخانه، عبارت از اختلاط جریان رودخانه با مواد بستر و دیواره جریان در سطح پایه ساحل (محل تلاقی ساحل و بستر) است (صمدی و امیری تکلدانی، ۱۳۹۴). لحظه شروع حرکت ذره رسوبی که در اصطلاح به آن آستانه حرکت می‌گویند در پیش‌بینی فرسایش کرانه رودخانه اهمیت فراوان دارد. نظری و حیدری (۱۳۹۰) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، آستانه حرکت ذرات رسوبی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند، نتایج ایشان نشان داد، شروع حرکت ذرات رسوبی نه تنها به اندازه ذرات رسوب وابسته بوده بلکه به نسبت عمق جریان به قطر ذرات نیز بستگی دارد. از طرفی به دلیل طبیعت تصادفی حرکت رسوب در طول یک بستر آبرفتی، تعیین دقیق شرایط جریانی که در آن یک ذره رسوب به حرکت درخواهد آمد دشوار است (خزیمه نژاد و شفافی بجستان، ۱۳۸۹).

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی جهت پیش‌بینی تحرک کانال و در نتیجه برآورد میزان فرسایش‌پذیری کانال پیشرفت‌های زیادی داشته است.

اتفاق افتاده است. کانسور و همکاران^۱ (۲۰۱۵) تغییرات مکانی در مقاومت کرانه‌ها به فرسایش را در محل مائندره‌های بزرگ با استفاده از مدل BSTEM مورد بررسی قرار دادند و نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد خصوصیات مکانیکی خاک کرانه، فاکتوری مهم در تغییرپذیری مکانی فرسایش کناری است. مدل BSTEM را اولین بار در ایران خزایی و همکاران (۱۳۹۵) برای بررسی فرسایش کناری رودخانه بشار به کاربرند و نتیجه گرفتند میزان پایداری کناره‌های رودخانه در مقاطع دارای پوشش گیاهی بسیار کمتر از مقاطع فاقد پوشش گیاهی است. شرفی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه اترک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند و نتیجه گرفتند وجود سازندهای فرسایش‌پذیر در کرانه رودخانه و توأم شدن آن با افزایش بار بستر و عوامل انسانی سبب فرسایش کناری رودخانه و تغییر مسیر رودخانه شده است. در منطقه مورد مطالعه حسین زاده و همکاران (۱۳۹۶) پایداری رسوبات بستر و کرانه رودخانه لایوچ را با استفاده از روش دبی واحد بحرانی و تنش برشی بحرانی بررسی نمودند، نتایج کار نشان داد در مقاطع عرضی که شیب بستر بیشتر و عرض کانال فعال کمتر است، تمامی اندازه ذرات مورد بررسی در دبی لبالی شروع به حرکت خواهند نمود.

در این مقاله بر آنیم که با استفاده از مدل BSTEM عقب‌نشینی کرانه کانال رودخانه لایوچ در بازهای به طول ۲۰ متر شامل کرانه مرکب را در طول یک دوره هیدرولیکی فعال دبی متوسط جریان و هم در دبی حداکثر لحظه‌ای جریان بررسی نماییم.

مبانی نظری

عقب‌نشینی کناره شامل ترکیبی از فرآیندهاست، اخیراً پیشرفت‌های زیادی در مورد اندازه‌گیری دو فرآیند مهم در عقب‌نشینی کناره‌ها یعنی فرسایش رودخانه‌ای و شکست توده‌ای انجام گرفته است (رینالدی و دربی^۲، ۲۰۰۸:۲۱۳). برای مثال پیشرفت

3. Tolhurst et al., 1999
4. Hanson and Simon, 2001
5. Wynn and Mostaghimi, 2006
6. Clark and Wynn, 2007
7. Darby et al., 2004
8. Kean and Smith, 2006a, 2006b
9. McBride et al., 2007
10. Julian and Torres, 2006
11. Papanicolaou et al., 2007

1. Konsoer et al, 2015
2. Rinaldi and Derby, 2008

سطح مستعد شکست و گسیختگی، نرخ فرسایش را تخمین می‌زند.

روش تحقیق

مدل BSTEM یکی از مدل‌های شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی پسروری کناره رودخانه است که با در نظر گرفتن توأم نیروهای مقاومت خاک و نیروهای محرک در طول سطح مستعد شکست و گسیختگی، نرخ فرسایش را تخمین می‌زند. در این مدل، پایداری کرانه با محاسبه فاکتور ایمنی (FS) تعیین می‌شود. در حالت کلی فاکتور ایمنی گویای نسبت بین نیروی مقاومت برشی و نیروی تنش برشی (نیروی محرک گسیختگی) در امتداد یک سطح شکست بالقوه است. مدل BSTEM فرسایش را بر اساس معادله تنش برشی مازاد ارائه شده به وسیله پارسنایدس^۷ (۱۹۶۵) (رابطه ۱) پیش‌بینی می‌کند.

$$\varepsilon = \kappa (\tau_0 - \tau_c) a \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه ε نرخ فرسایش (متر بر ثانیه)، κ ضریب فرسایش‌پذیری (مترمکعب بر نیوتن بر ثانیه)، τ_0 میانگین تنش برشی (کیلو پاسکال)، τ_c تنش برشی بحرانی خاک (کیلو پاسکال) و a توانی است که معمولاً معادل ۱ در نظر گرفته می‌شود. ضریب فرسایش‌پذیری و تنش برشی بحرانی تابع ویژگی‌های متفاوت خاک هستند. برای خاک‌های غیر چسبنده، تنش برشی بحرانی بر پایه متوسط قطر ذرات خاک برآورد می‌گردد (گارسیا^۸، ۲۰۰۸: ۲۱). میانگین تنش برشی نیز با استفاده از رابطه شماره ۲ محاسبه می‌شود:

$$\tau_0 = \gamma_w R S \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه γ_w وزن واحد آب (۹/۸۱ کیلونیوتن بر مترمکعب)، R شعاع هیدرولیک (متر) و S شیب کانال (متر بر متر) است (میدلی^۹، ۲۰۱۲: ۱۰۷).

آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد-

می‌سی‌سی‌پی، مدل BSTEM را به صورت یک ماکرو در محیط نرم‌افزاری اکسل تدارک دیده است. برای

باین وجود، مدل‌سازی تغییرات کانال در عمل، یک مشکل چالش برانگیز است. از آنجایی که جریان آب و رسوب به صورت پیوسته در طول زمان از میان کناره‌های با مواد اغلب متنوع در حرکت است، این پیوستگی و تنوع، دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها را کاهش می‌دهد، به طوری که اکثر مدل‌ها برای شبیه‌سازی شرایط خاص کالیبره شده‌اند (دربی و وندویل^۱، ۲۰۰۳: ۲۶۳).

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عددی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای در طول ۲۰ سال گذشته به سرعت افزایش یافته است. در ابتدا مدل‌ها منحصر به یک بُعد از فضا بودند، اما پیشرفت در سخت‌افزارهای محاسباتی اکنون قابلیت شبیه‌سازی با دو یا سه بُعد را فراهم کرده است (کندولف و دربی^۲، ۲۰۰۲: ۴۷۱). عنصر کلیدی در مدل‌سازی عددی، تفسیر فرآیندهای طبیعی درون مجموعه‌ای از معادلات است که می‌تواند به وسیله تعدادی از الگوریتم‌ها حل شود. توصیفات ریاضی از فرآیندهای طبیعی یا به صورت تئوری به دست آمده است (برای مثال معادلات حرکت سیال) یا به طور تجربی (برای مثال بیشتر معادلات حمل رسوب)، اما رویکرد اخیر بیشتر در ژئومورفولوژی معمول است (کایرکی^۳، ۱۹۹۶).

مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM^۴) یکی از مدل‌های شبیه‌سازی عددی است که باهدف پیش‌بینی پسروری کناره (ناشی از فرسایش رودخانه‌ای و گسیختگی ژئوتکنیکال) توسعه یافته است. مدل BSTEM یکی از مدل‌های پرکاربرد و پیشرفته در خصوص پایداری کناره رودخانه است که به وسیله آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد-می‌سی‌سی‌پی در آمریکا^۵ توسعه یافته است (سیمون و همکاران^۶، ۲۰۰۳: ۱۸۳). این مدل در نظر گرفتن توأم نیروهای مقاومت خاک و نیروهای محرک در طول

1. Darby and Vandewiel, 2003
2. Kondolf and Piegay, 2002
3. Kirkby, 1996
4. Bank Stability and Toe Erosion Model
5. National Sedimentation Laboratory in Oxford, Mississippi, USA
6. Simon et al., 2000

7. Partheniades
8. Garcia, 2008
9. Midgley et al., 2012

خاک، مدل می‌تواند مقادیر این پارامترها را تخمین بزند. در این مطالعه مقادیر تخمینی مدل استفاده شده است. در این قسمت همچنین محاسباتی برای برآورد تنش برشی بحرانی بر پایه اندازه ذرات وجود داد.

ج) پوشش گیاهی و سایر مواد پوشاننده کناره در منوی Bank Vegetation and Protection: در مدل BSTEM نوع پوشش‌های حفاظتی ایجاد شده توسط انسان و یا مقادیر پوشش گیاهی موجود بر روی کرانه در میزان پسروری کرانه لحاظ شده است. در بازه مورد نظر پوشش حفاظتی انسانی وجود نداشت و پوشش گیاهی روی کرانه شامل مقدار اندکی از ریشه‌های درخت توسکا بود که در این قسمت به مدل معرفی شد.

پس از ورود اطلاعات ذکر شده به مدل، در منوی Bank Model Output هندسه کرانه قابل مشاهده است. در صورتی که اطلاعات به صورت کامل و صحیح وارد شده باشد با اجرای مدل در این مرحله فاکتور ایمنی کرانه (FS)، هندسه کرانه، زاویه و ارتفاع وقوع سطح شکست ارائه می‌گردد. در مرحله بعد با ورود به بخش Toe Model Output مدل سازی فرسایش پای کرانه برای دوره‌های جریانی خاص انجام می‌شود. در این بخش می‌توان نتایج مدل شامل تنش برشی محاسبه شده، میزان پسروری کرانه، میزان رسوبات حمل شده از کرانه و پای کرانه، نیمرخ جدید کرانه و مقدار فرسایش را مشاهده نمود.

محدوده و قلمرو پژوهش

بازه مورد مطالعه در حوضه آبریز لایچ رود و در محدوده پارک جنگلی کشتیل در قسمت جنوبی شهر چمستان (شهرستان نور) و در استان مازندران واقع شده است (شکل ۱). سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی مجاور این رودخانه همواره با خطر پسروری و فرسایش کناری دیواره‌ها مواجه هستند که علاوه بر وارد آوردن خسارت بر سازه‌ها و زمین‌های زراعی مجاور، سبب ایجاد مشکلات ثانویه مرتبط با افزایش مقدار بار رسوب نیز می‌گردد. بازه مورد مطالعه در این پژوهش یکی از مستعدترین قسمت‌های رودخانه به فرسایش و

اجرای این مدل، داده‌های زیر به عنوان ورودی به ماکرو BSTEM معرفی شد:

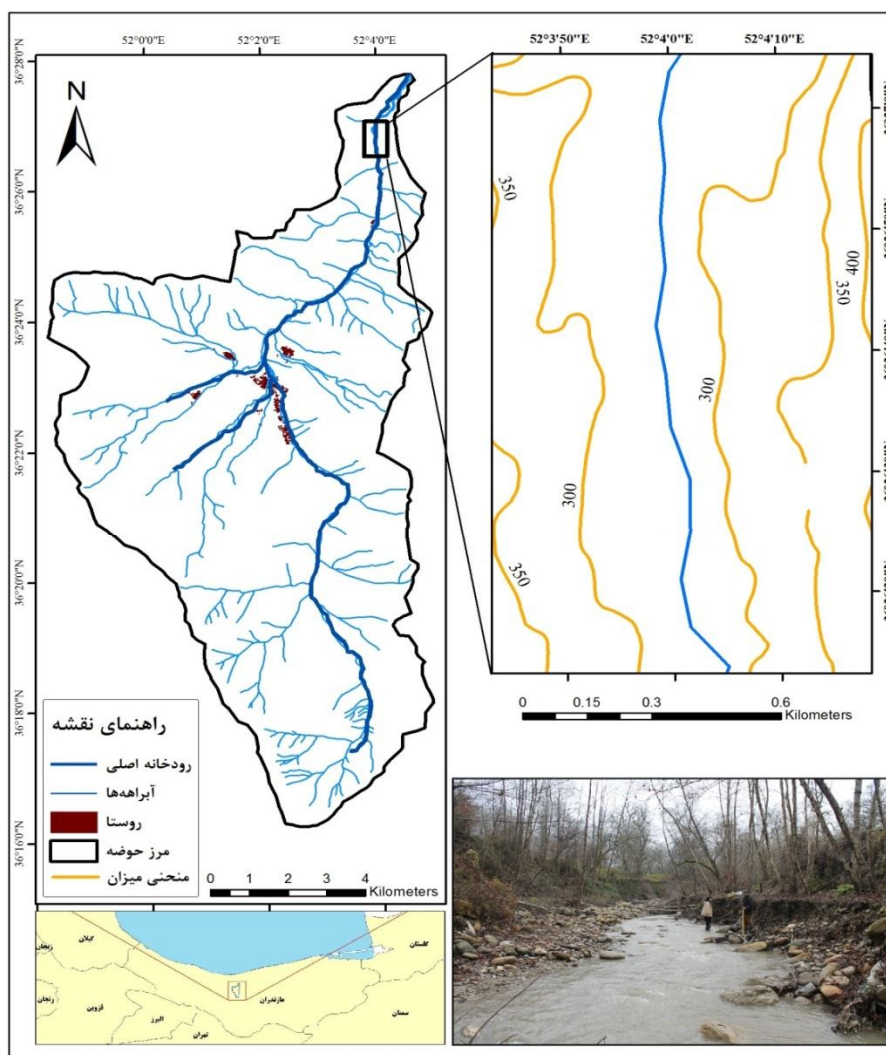
الف) پروفیل کناره و پارامترهای جریان در منوی Input Geometry: داده‌های مورد نیاز این بخش از طریق بررسی میدانی جمع‌آوری شد. به این منظور با استفاده از شاخص نقشه برداری و متر لیزری مختصات نقاط مختلف کرانه شامل ارتفاع از بستر و فاصله کرانه از شاخص اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که می‌توان تا ۲۳ نقطه را جهت ورود به مدل و ترسیم کرانه تعریف کرد. در ادامه تعداد لایه‌های تشکیل دهنده کرانه و ضخامت هر یک مشخص گردید؛ همچنین داده‌های ارتفاعی و شیب کرانه^۱، طول و شیب پای کرانه^۲ نیز اندازه‌گیری شد. پارامترهای جریان شامل طول و شیب بازه با استفاده از متر لیزری اندازه‌گیری شد. میانگین عمق جریان در حالت دبی لبالی و دبی سیلاب و طول مدت جریان نیز بر پایه مشاهدات ساکنان محلی و آثار برجای مانده در حاشیه رودخانه به دست آمد (تصویر موجود در شکل شماره ۱ برداشت‌های میدانی از بازه مورد مطالعه را نشان می‌دهد). حد پایینی پوشش گیاهی کناره‌ها، سطح بالایی پوینت بارها، شکستگی شیب در امتداد کرانه رود و تغییرات در اندازه رسوبات کرانه مهم‌ترین شاخص‌هایی بودند که جهت تخمین دبی لبالی در بازدیدهای میدانی استفاده شدند.

ب) پارامترهای ژئوتکنیکال (زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مؤثر، فشار آب منفذی، وزن مخصوص خاک اشباع) خاک کناره در منوی Bank Material: اندازه ذرات نمونه‌های خاک برداشت شده در بازدیدهای میدانی، پس از انتقال به آزمایشگاه با استفاده از روش گرانولومتری تعیین گردید و وارد مدل شد (جدول ۲). یکی از ویژگی‌های مهم مدل BSTEM قابلیت تخمین پارامترهای ژئوتکنیک خاک با توجه به اندازه و بافت خاک است. در صورتی که امکان اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیک برای پژوهشگر وجود نداشته باشد، با وارد کردن اندازه ذرات

1. Bank
2. Toe

تغییر می‌کند. بیش از ۷۵ درصد مساحت حوضه تحت پوشش جنگل‌های انبوه دامنه‌های شمالی البرز قرار دارد. میانگین دبی سالانه حوضه ۱/۷ مترمکعب در ثانیه می‌باشد و حداکثر دبی ثبت‌شده در طی دوره آماری (۱۳۳۷-۱۳۹۰) ۱۷۵ مترمکعب در ثانیه بوده است.

پسروی کناره می‌باشد؛ بنابراین پیش‌بینی میزان فرسایش کناری در این بازه از رودخانه لایچ امری ضروری به نظر می‌رسد. مقدار بارش سالانه این حوضه در پارک جنگلی کشپل طبق داده‌های ایستگاه هواشناسی چمستان ۸۶۵ میلی‌متر است که به سمت بالادست حوضه (قسمت جنوبی) به ۳۰۰ میلی‌متر هم



شکل ۱: محدوده منطقه مورد مطالعه در استان مازندران

که شرایط ژئومتریک کانال و شرایط ژئوتکنیک رسوبات دیواره یکسان باشد، قابل تعمیم است، درجایی که شرایط ژئومتریک کانال و ژئوتکنیک رسوبات شروع به تغییر می‌کند، شرایط فرسایشی کرانه نیز متفاوت خواهد شد. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط فرسایشی در کرانه رودخانه در مدل BSTEM ابتدا با استفاده از

یافته‌های تحقیق

در این پژوهش به‌منظور بررسی میزان پسروی کرانه و حجم رسوب تولیدشده در بازه‌ای به طول ۲۰ متر از کانال رودخانه لایچ اقدام به شبیه‌سازی کرانه در مدل BSTEM شده است. قابل ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از مدل BSTEM در هر کرانه، تا جایی

آزمایشگاه به مدت سه هفته در فضای آزاد قرار گرفته تا خشک شوند، سپس قطر ذرات رسوبات کرانه با روش گرانولومتری با استفاده از الک‌های با شماره مش‌های مختلف مشخص گردید و وارد مدل شد. در شکل ۲ نیمرخ کرانه و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده آن مشاهده می‌شود. تصاویر مربوط به نیمرخ‌های کرانه (شکل‌های ۳ تا ۹)، نمودارهای خروجی حاصل از ماکرو BSTEM در محیط نرم‌افزاری اکسل می‌باشند، به جهت تفکیک لایه‌های مختلف کرانه و وضوح بیشتر چگونگی پسروری و شکست کرانه، نمودارها به محیط نرم‌افزاری ARCGIS انتقال داده شده و طرح شماتیک، کرانه از روی این نمودارها تهیه شد.

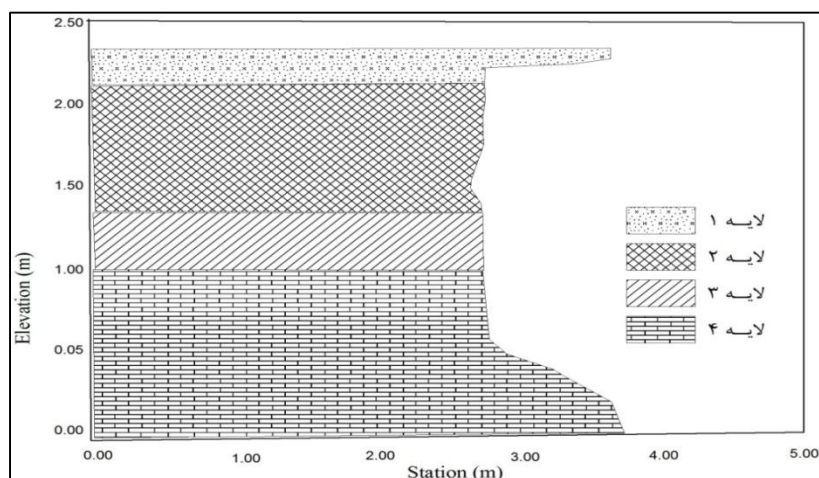
شاخص و دوربین نقشه‌برداری مقطع رودخانه نقشه‌برداری شد. ارتفاع نقاط مختلف کرانه از بستر و فاصله کرانه از شاخص استخراج و وارد مدل گردید (جدول ۱). در ادامه تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه و ضخامت هر یک مشخص گردید و در قسمت مربوطه وارد شد (جدول شماره ۲). میانگین عمق جریان در حالت دبی لبالی و متوسط دبی لحظه‌ای و طول مدت جریان نیز بر پایه داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری لایوچ (در طی دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۳۷) وارد مدل گردید (جدول ۳). در بازدیدهای میدانی از بازه مورد مطالعه، از رسوبات دیواره کانال نمونه‌های مخلوط تهیه شد، نمونه‌ها پس از انتقال به

جدول ۱: مشخصات مقطع نقشه‌برداری شده در بازه مورد مطالعه

ردیف	ارتفاع	فاصله از مبدأ
۱	۲۳۵	۰
۲	۲۳۵	۳/۶
۳	۲۳۰	۳/۶
۴	۲۲۸	۳/۵
۵	۲۲۴	۲/۲
۶	۲۳۰	۳/۶
۷	۲	۲/۲
۸	۱۸۰	۲/۲
۹	۱۵۰	۲/۶
۱۰	۱۴۸	۲/۶
۱۱	۱۴۰	۲/۲
۱۲	۱۲۰	۲/۲
۱۳	۰/۹۴	۲/۲
۱۴	۰/۶۰	۲/۲
۱۵	۰/۵۰	۲/۱۵
۱۶	۰/۴۵	۲
۱۷	۰/۴۰	۳/۲
۱۸	۰/۳۰	۳/۴
۱۹	۰/۲۰	۳/۶
۲۰	۰	۳/۷
۲۱	۰	۳/۷۵
۲۲	۰	۳/۸۵
۲۳	۰	۴

جدول ۲: جنس و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه در بازه مورد مطالعه

ترتیب لایه از بالا	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴
ضخامت لایه (متر)	۰,۲۰	۰,۸۰	۰,۳۵	۰,۱
مواد تشکیل‌دهنده کرانه	سیلت	قلوه‌سنگ	ماسه متوسط	گراول



شکل ۲: نیمرخ کرانه و لایه‌های تشکیل‌دهنده آن

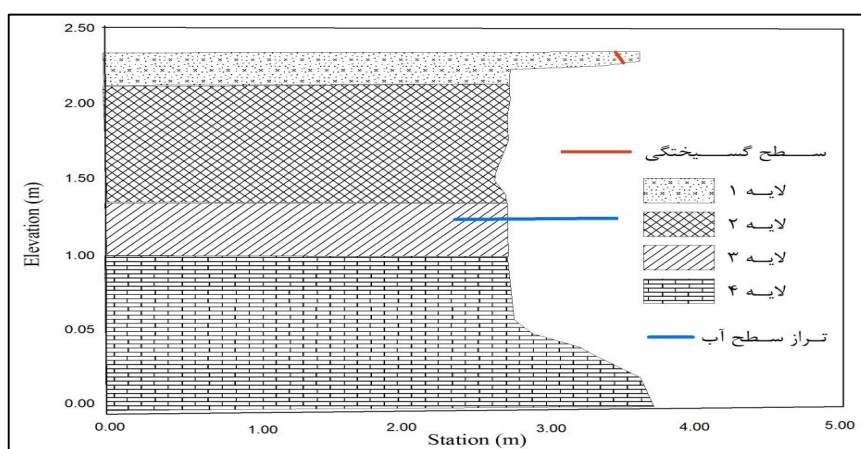
جدول ۳: پارامترهای جریان و کانال

دبی حداکثر لحظه‌ای		دبی لبالبی		شیب بازه (متر بر متر)	طول بازه (متر)	پارامتر
طول مدت جریان (ساعت)	عمق (متر)	طول مدت جریان (ساعت)	عمق (متر)			
۲۴	۲,۳۵	۲۴	۱/۰۵	۰/۰۲	۲۰	مقدار

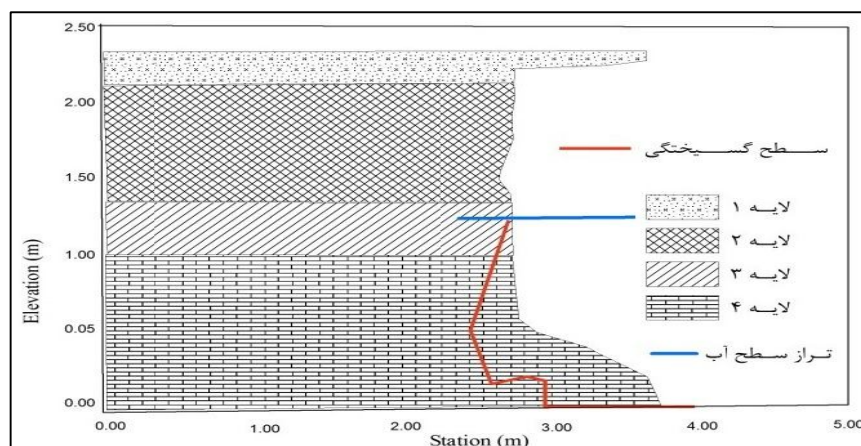
(دبی لبالبی و حداکثر دبی قابل انتظار) در مدل شبیه‌سازی شد تا مقدار فرسایش هیدرولیک و تغییر در هندسه منطقه پای کرانه تعیین گردد. نتایج این شبیه‌سازی و تأثیرات دبی لبالبی بر کرانه و پای کرانه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده است:

شبیه‌سازی کرانه برای دو سناریوی دبی لبالبی و حداکثر دبی لحظه‌ای صورت گرفت. در مدل BSTEM شبیه‌سازی کرانه و پای کرانه به صورت مجزا انجام می‌گیرد:

شرایط دبی لبالبی: تأثیرات دبی‌های مختلف جریان



شکل ۳: شبیه‌سازی پسروری کرانه در دبی لبالبی



شکل ۴: شبیه‌سازی پسروری پای کرانه در دبی لبالبی

زیربری خواهد شد. در مرحله بعدی هندسه جدید کانال به بخش مدل پایداری کرانه منتقل تا میزان پایداری نسبی کرانه مشخص شود. اگر ضریب امنیت (FS) بزرگ‌تر از ۱ بود، هندسه کانال به روز نخواهد شد و واقعه

در شرایط فعلی دیواره بازه موردنظر در دبی‌های لبالبی و حداکثر لحظه‌ای با تداوم ۲۴ ساعت به صورت آنچه در تصاویر قابل ملاحظه است (خط قرمز رنگ در تصاویر ۳ و ۴ پروفیل فرسایشی است) دچار پسروری و

ناپایدار دارد. در جدول ۴ همچنین میزان عرض شکستگی، کرانه حجم شکت کرانه، بار رسوب تولیدی، متوسط تنش برشی مرزی، مساحت فرسایش یافته کرانه و پای کرانه، مساحت فرسایش یافته بستر و در نهایت کل مساحت فرسایش یافته در بازه ۲۰ متری مورد نظر آمده است.

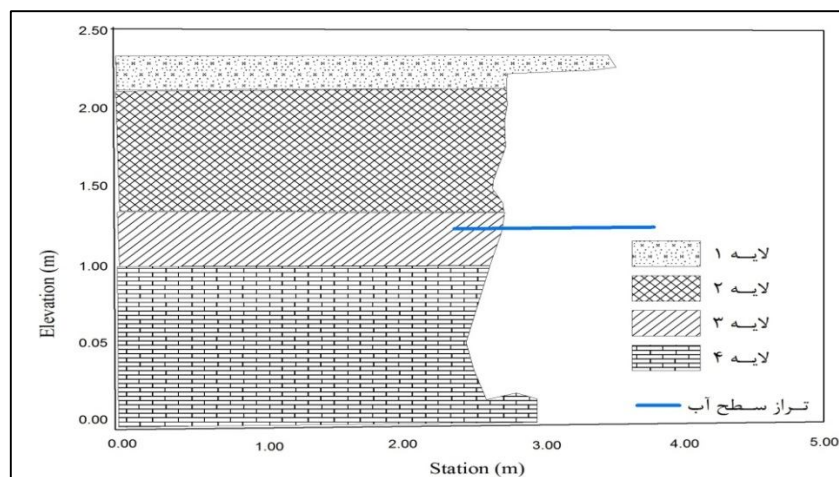
جریانی جدید شبیه سازی می شود. اگر ضریب ایمنی (FS) کمتر از ۱ بود، بدین معناست که کرانه ناپایدار بوده و شکست کرانه شبیه سازی شده و هندسه جدید کرانه برای شبیه سازی ها به روز خواهد شد.

همان گونه که در جدول ۴ آمده است فاکتور امنیت (FS) کرانه در شرایط اعمال دبی لبالبی حوضه، ۰/۴۲ است. این بدین معناست که کرانه شرایط

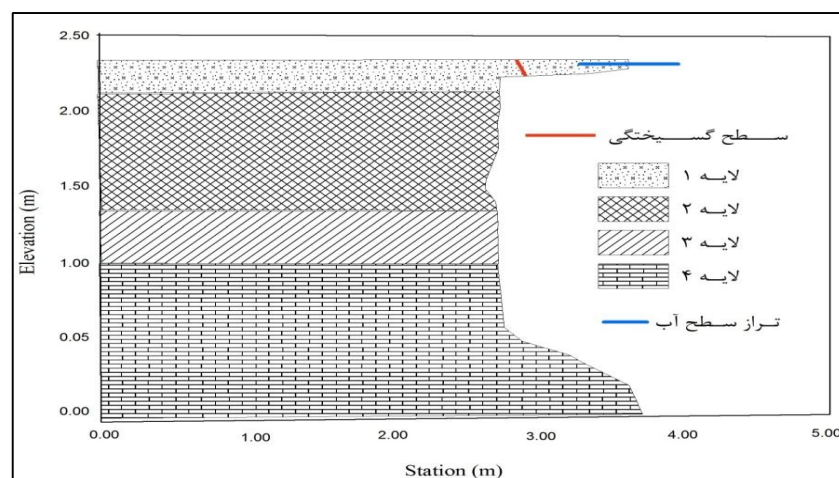
جدول ۴: پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی لبالبی جریان در دوره ۲۴ ساعته بر روی کرانه

پارامتر	فاکتور امنیت (FS)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (کیلوگرم)	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	مساحت فرسایش یافته کرانه (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته بستر (مترمربع)	کل مساحت فرسایش یافته (مترمربع)
دبی لبالبی	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۳	۲۴۵	۱۵۵/۲۹۰	۰/۴۲۴	۰/۱۵۷	۰/۵۸۱

پس از اعمال شرایط ذکر شده، هندسه کانال به صورت آنچه در شکل ۵ آمده تغییر خواهد کرد.



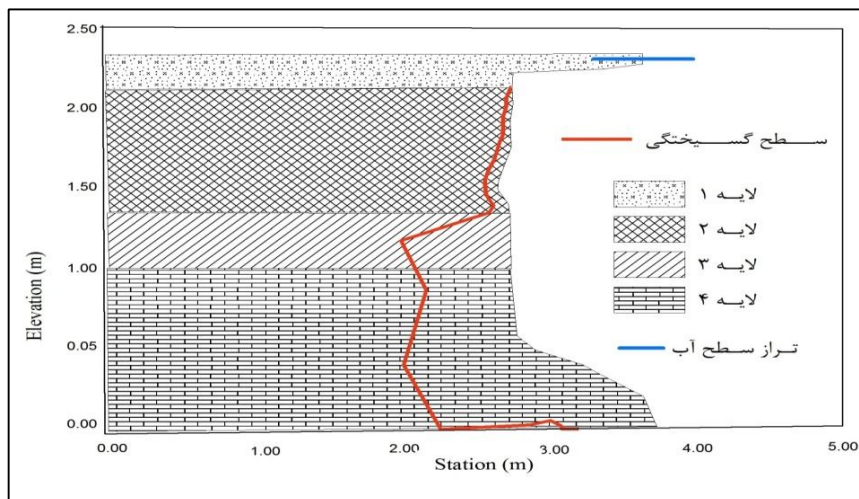
شکل ۵: نیم رخ کرانه بعد از اعمال شرایط شکست و زیربری کرانه در سناریوی دبی لبالبی



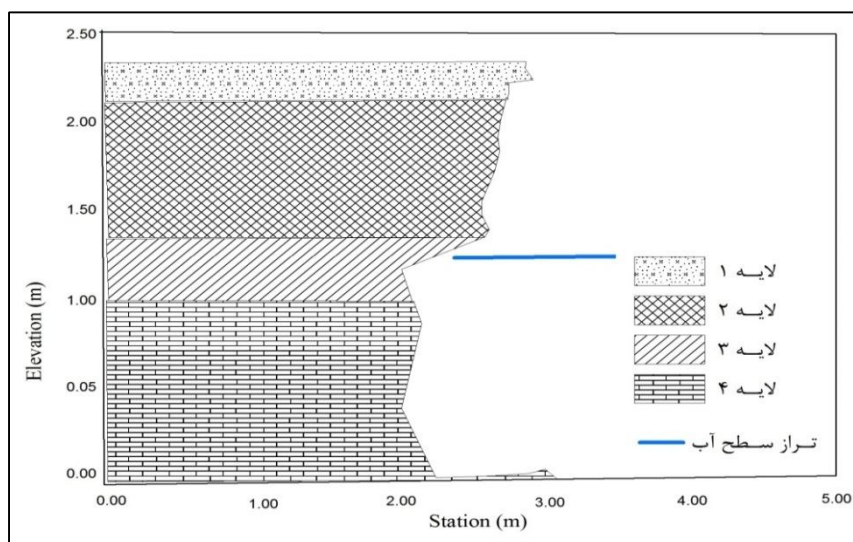
شکل ۶: شبیه سازی پسروری کرانه در دبی حداکثر لحظه ای

در شکل‌های شماره‌های ۶ و ۷ خط شکست و زیربری در کرانه و پای کرانه قابل ملاحظه است.

شرایط دبی حداکثر لحظه‌ای: شرایط کرانه در دبی حداکثر لحظه‌ای نیز در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد و تأثیر این دبی در کرانه و پای کرانه استخراج گردید.



شکل ۷: شبیه‌سازی پسروری پای کرانه در دبی حداکثر لحظه‌ای



شکل ۸: نیمرخ کرانه بعد از اعمال شرایط شکست و زیربری کرانه در سناریوی دبی حداکثر لحظه‌ای

جدول ۵ آمده است فاکتور امنیت کرانه در شرایط دبی حداکثر لحظه‌ای ۰/۵۱ و بنابراین ناپایدار است. بعد از اعمال شکست کرانه و زیربری پای کرانه، نیمرخ کرانه به صورت آنچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود دیده خواهد شد.

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد در صورتی ضریب ایمنی (FS) کمتر از ۱ بود، یعنی کرانه ناپایدار است و شکست کرانه شبیه‌سازی شده و نتایج سطح شکست کرانه و پای کرانه اعمال شده و هندسه جدید کرانه استخراج می‌شود. طبق نتایج به دست آمده که در

جدول ۵: پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی حداکثر لحظه‌ای جریان در دوره ۲۴ ساعته بر روی کرانه

پارامتر	فاکتور امنیت (FS)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (کیلوگرم)	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	مساحت فرسایش یافته کرانه (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته‌های کرانه (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته بستر (مترمربع)	کل مساحت فرسایش یافته (مترمربع)
دبی حداکثر لحظه‌ای	۰/۵۱	۰/۷۴	۱	۲۲۷۳	۵۲۹/۹۲۰	۰/۷۴۹	۰/۶۰۳	۰/۰۵۹	۱/۴۱۲

نتیجه‌گیری

در این مقاله باهدف بررسی کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی در پیش‌بینی میزان پسروری کرانه رودخانه، از مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه استفاده شده است. مدل BETEM از جمله مدل‌های شبیه‌سازی عددی است که با در نظر گرفتن توأم پارامترهای رودخانه‌ای، ژئوتکنیک خاک، همچنین دخالت دادن تراز آب رودخانه و تأثیر آن در فشار آب منفذی خاک، می‌تواند میزان پسروری و زیربری کرانه را واقعی‌تر پیش‌بینی کند. نتایج شبیه‌سازی شرایط رودخانه لایوچ با استفاده از این مدل در دبی‌های لبالی و حداکثر لحظه‌ای نشان داد که فاکتور امنیت (FS) کرانه در هر دو مورد کمتر از ۱ است و این بدین معناست که در هر سیلابی که دبی جریان به دبی لبالی و یا دبی حداکثر لحظه‌ای برسد امکان فرسایش کناری، ناپایداری و سقوط کرانه را فراهم می‌کند. در شرایط دبی لبالی ۰/۵۸۱ مترمربع و در شرایط دبی حداکثر لحظه‌ای ۱/۴۱۲ مترمربع از کرانه فرسوده خواهد شد.

متأسفانه در منطقه مورد مطالعه به علت تراکم بالای جنگل‌ها امکان پایش میزان پسروری کرانه‌های کانال بر روی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در طول زمان وجود ندارد. به همین علت نتایج مدل با نتایج حاصل از پژوهشی دیگر از نویسندگان که در همین بازه از رودخانه با استفاده از روش دبی واحد بحرانی و تنش برشی بحرانی انجام داده (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۶) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج هر دو پژوهش نشان داد ذرات تشکیل‌دهنده کرانه رودخانه در دبی لبالی شروع به حرکت خواهند نمود و فرسایش و سقوط آغاز خواهد شد.

در کرانه چندلایه‌ای رودخانه لایوچ که شامل خاک‌های متراکم در بالا و گراول‌های غیرمتراکم در پایین است، پسروری قابل ملاحظه‌ای در طی جریانات صورت می‌گیرد. همان‌گونه که در تصاویر شماره ۵ و ۸ مشهود است پسروری کانال در لایه‌های غیر چسبنده پایین کرانه بیشتر از لایه اولیه است که چسبندگی بیشتری دارد. این نکته نشان‌دهنده اهمیت شرایط ژئوتکنیکال خاک در پسروری و زیربری کرانه توسط فرآیندهای رودخانه‌ای است. با توجه به اینکه مدل BSTEM از جمله مدل‌هایی است که در آن اهمیت پارامترهای ژئوتکنیک در میزان پسروری کناره لحاظ شده است، مدل مناسبی برای کرانه‌های مرکب از چند لایه با تراکم متفاوت است. نظر به این‌که این مدل برای کرانه‌های داری پوشش گیاهی یا حفاظت مکانیکی نیز قابل اجرا است، در پایان پیشنهاد می‌گردد به منظور بررسی اثر این حفاظت‌ها در کاهش میزان فرسایش کناری رودخانه و انتخاب بهترین نوع حفاظت کناره از این مدل در مدیریت رودخانه‌ها استفاده شود.

منابع

- حسین زاده، محمد مهدی، سیدحسن صدوق و سعیده متش‌بیرانوند و رضا اسماعیلی. ۱۳۹۶. بررسی پایداری رسوبات بستر رودخانه لایوچ با استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی. پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۹.
- خزایی، مجید. احمد نوحه‌گر و رسول مهدوی نجف‌آبادی و عبدالرسول تلوری. ۱۳۹۵. بررسی پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای ناشی از جریان سطحی با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه بشار)، آکو هیدرولوژی. شماره ۱.

13. Julian, Jason P. and Raymind Torres. 2006. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*, 76.
14. Kandolf, G. Mathias and Hervé, Piegay. 2003. *Tools in fluvial geomorphology*, Wiley & Sons.
15. Kean, Jason, W. and Dungan Smith, J. 2006a. Form drag in rivers due to small-scale natural topographic features: 1. Regular sequences, *J. Geophys. Res.*, 111: F04009.
16. Kean, Jason, W. and Dungan Smith, J. 2006b. Form drag in rivers due to small-scale natural topographic features: 2. Irregular sequences, *J. Geophys. Res.*, 111: F04010.
17. Kirkby, Michael J. 1996. *Earth Surface Processes and Landforms*, John Wiley and Sons, Chichester.
18. Konsoer, Kory M. Rhoads, Bruce Lane, Eddy J. Langendoen, James L. Best, Mike, E Ursic, Jorge D Abad and Marcelo H. Garcia. 2015. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. *Geomorphology*, 252.
19. McBride, Maeve. W. Cully Hession, Donna M. Rizzo, and Douglas M. Thompson. 2007. The influence of riparian vegetation on near-bank turbulence: A flume experiment. *Earth Surf. Processes Landforms*, 32(13).
20. Midgley Taber. Garey A. Fox and Derek M. Heeren. 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Biological Systems Engineering, Geomorphology*, 145-146.
21. Papanicolaou, Athanasios, N. Mohamd Elhakeem and Robert Hilldale. 2007. Secondary current effects on cohesive river bank erosion. *Water Resour., Res.*, 43: W12418.
22. Parker Chris. Simon Andrew and Thorne Colin R. 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology*, 101.
23. Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of*
۳. خزیمه‌نژاد، حسین. مهوش شفاعی بجنستان. ۱۳۸۹. بررسی شرایط آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده در کانال‌های روباز دارای شیب ملایم و مقطع مستطیلی مهندسی آبیاری و آب، شماره ۲.
۴. شرفی، سیامک. ابوالفضل شامی و مجتبی یمانی. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه اترک در یک بازه زمانی ۲۰ ساله. آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۴، شماره ۱۴.
۵. صمدی، امیر. ابراهیم امیری تکلدانی. ۱۳۹۴. فرسایش توده‌ای سواحل و رودخانه‌ها فرآیندها و سازوکارها. انتشارات دانشگاه تهران.
۶. نظری، اکبر. محمدمهدی حیدری. ۱۳۹۰. آستانه حرکت رسوبات یکنواخت. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
7. Clark, L.A. and Wynn, T.M. 2007. Methods for determining stream bank critical shear stress and soil erodibility: Implications for erosion rate predictions, *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50: 95-106.
8. Crosato, Alessandra. 2007. Effects of smoothing and regriding in numerical meander migration models. *Water resources research*, 43.
9. Darby Stephen, E. Marco, J Van de Wiel, M.J. 2003. *Models in fluvial geomorphology*, John Wiley and Sons: Chichester.
10. Darby, Stephen, E. Meropi, N Spyropoulos, Neil. W Bressloff and Massiom Rinaldi. 2004. Fluvial bank erosion in meanders: A CFD modeling approach, in *Aquatic Habitats. Analysis and Restoration*, vol. 1, edited by D. Garcia de JalonLastra, and P.V. Martinez, Int. Assoc. of Hydraul. Eng. and Res., Madrid, Spain.
11. Garcia, and Marcelo H. 2008. Sediment transport and morphodynamics. *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. American Society of Civil Engineers*, Reston, VA.
12. Hanson, Gregory J. and Andrew Simon. 2001. Erodibility of cohesive sediment in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes* 15.

- Process Understanding to River Restoration. *Earth Surf. Processes*, Vol. 11, edited by H. Habersack et al., pp. 213–239, Elsevier, New York.
27. Rinaldi, Massimo. Beatrice Mengoni, Laura, Luppi, Stephen E. Darby and Erik Mosselman. 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resources Research*, 44: W09428.
28. Simon, Andrew, Andera Curini, Stephen E. Darby and Eddy. J Langendoen. 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology* 35: 1.
29. Wynn, Theresa and Mostaghimi, S. 2006. The effects of vegetation and soil type on stream bank erosion, southwestern Virginia, USA. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 42(1).
- the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers, 91 (HY1).
24. Piegay, Hervé, Stephen E. Darby, Erik Mosselman and Nicola Surian. 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River research and application*, 21.
25. Tolhurst, Trevor. Kevin. S Black, A.S. Shayler, Se Mather, Iris Black, K Baker, and David M. Paterson. 1999. Measuring the in situ erosion shear strength of intertidal sediments with the Cohesive Strength Meter (CSM). *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 49.
26. Rinaldi, Massimo and Stephen E. Darby. 2008. Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: Progress towards fully coupled simulations, in *Gravel-Bed Rivers From*

