

برآورد فرسایش کناره‌ای رودخانه با استفاده از مدل BSTEM

محمد مهدی حسین‌زاده^{۱*} و رضا اسماعیلی^۲

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

۲. دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای دانشگاه مازندران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۶

چکیده

فرسایش کناره‌ای یکی از منابع اصلی تولید رسوب در رودخانه‌ها شناخته می‌شود، هرچند تعیین و برآورد سهم رسوب از فرسایش کرانه رود مشکل است. هدف این مقاله نشان دادن کارایی مدل BSTEM به‌عنوان یک ابزار مناسب برای تعیین و تشخیص شرایط حاکم بر کرانه رودخانه در راستای حفاظت از رود و ارزیابی اهمیت فرسایش رودخانه‌ای و ویژگی‌های پوشش گیاهی و فشار آب منفذی نزدیک کرانه است. مدل پایداری کرانه و فرسایش پای آن (BSTEM) به‌منظور پیش‌بینی پس‌روی کرانه رودخانه به علت فرسایش رودخانه‌ای و شکست ژئوتکنیکال طراحی شده است. در این تحقیق همچنین مدل BSTEM برای شبیه‌سازی فرسایش هیدرولیک در پای کرانه و پایداری کرانه در طول یک سری وقایع جریان (دبی لبالی، دبی متوسط سیلاب و دبی حداکثر سیلاب) به‌منظور ارزیابی تغییرات فعلی (موجود) و بالقوه در فراوانی شکست کرانه (فاکتور ایمنی یا FS) و بار رسوبی حاصل از کرانه رود استفاده شده است. موقعیت مورد مطالعه در بخش خروجی رودخانه لایچ از کوهستان در منطقه پارک کشپل (چمستان-نور) قرار دارد. در این بخش هر ساله فرسایش کناره‌ای قابل توجهی به‌واسطه وقوع سیلاب‌های بزرگ رخ می‌دهد. مطالعات نشان داد که در کرانه رودخانه لایچ با لایه‌بندی متفاوت پس‌روی قابل توجهی در طول وقایع جریانی بزرگ رخ می‌دهد. در واقع سیلاب‌هایی که با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال رخ می‌دهند، نقش اصلی در فرسایش کناره‌ای و فرایند پس‌روی عرضی بر عهده دارند. نتایج تحلیل مدل نشان می‌دهد که پس‌روی اندازه‌گیری شده در کرانه رود در سناریوهای مختلف از صفر تا ۸۱ سانتی‌متر تغییر می‌کند و شرایط پایداری کرانه نیز در اولین سناریو ناپایدار ($FS=0.9$) و در سناریوی دوم و سوم تقریباً پایدار ($FS=1.15-1.26$) است. اضافه شدن پوشش گیاهی بالای کرانه مقاومت چسبندگی در یک متر بالای کرانه را افزایش داده و منجر به کاهش بیشتر فراوانی و حجم شکست کرانه می‌شود. نتایج نشان داده است که در نتیجه دخالت حفاظت‌های انجام‌گرفته بر روی کرانه‌های فرسایش پذیر، حجم کلی رسوبات فرسایش یافته از کرانه را می‌توان کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش رودخانه‌ای، BSTEM، رودخانه لایچ، فرسایش کرانه رود، پایداری کرانه رود.

مقدمه

موارد فعالیت‌های انسانی مانند تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه و به دنبال آن افزایش رواناب ناشی از بارش، تخریب و نابودی پوشش گیاهی حاشیه رودخانه و تنظیم و بهسازی کانال رود (مستقیم کردن و تعریض کانال) تغییراتی

فرسایش، یک فرآیند بیرونی است که باعث جابجایی سنگ و خاک می‌شود و فرسایش کناره‌ای رودخانه نیز یک رفتار طبیعی در سیستم رودخانه‌ای است، اما در بسیاری از

* نویسنده مرتبط: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

کرانه رود در ارتباط هستند. این بدین معنی است که عملکرد فرایندهای فرسایشی در کرانه‌های رودخانه‌ای با لایه‌های مختلف رسوبی شامل رسوبات چسبنده، غیرچسبنده و ترکیبی متفاوت خواهد بود (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴). کنترل پای کرانه هم اهمیت زیادی در نیمرخ، شکل، پایداری و میزان پس‌روی کرانه‌های رود دارد. این نقش کنترلی برای رودهای با اندازه‌های مختلف و ساختار مواد رسوبی متفاوت، اهمیت مشابهی دارد. رسوبات موجود در مجاورت کرانه رودخانه یا از بالادست رود و یا در نتیجه فرسایش کرانه و گسیختگی آن تغذیه می‌شوند. این رسوبات وارد شده به کانال رود ممکن است به پایین‌دست رود جابجا شوند و یا در نتیجه جریان‌های ثانویه در کانال و عمل امواج به وسط رودخانه منتقل شوند. این شار رسوب، موجب تعادل یا عدم تعادل در پای کرانه رود شده و یک عامل کنترلی مهم برای فرسایش کرانه رود محسوب می‌شود. در شرایطی که خروجی رسوب بیشتر از ورودی آن باشد، فرسایش ایجاد می‌شود. در این حالت بستر رود و کرانه فرسایش یافته و ارتفاع و زاویه کرانه افزایش می‌یابد، در نتیجه پایداری کرانه کاهش یافته و موجب حرکات توده‌ای می‌شود.

مشکلات مرتبط با فرایندهای فرسایش کرانه رود در نواحی مختلف دنیا خیلی مهم قلمداد شده (Dapporto et al., 2013) و در طول دهه‌های اخیر افزایش یافته است (Rinaldi and Simon, 1998). مطالعه ناپایداری کرانه رود از اواخر ۱۹۶۰ (Lohnes and Handy, 1968) و به‌ویژه از اوایل ۱۹۸۰ (Little 1980; Thorne et al., 1981 and 1996; Osman and Thorne, 1988; Simon, 1989; Simon et al., 1991; Thorne, 1992 and 1998) به‌طور ویژه بر مواد تشکیل‌دهنده کرانه متمرکز شده‌اند. بعد از آن، داری و تورن (Darby and Thorne, 1996) تراز جریان و سطح ایستابی آب را مورد بررسی قرار داده‌اند و در ادامه این مطالعات نیز رینالدی و کاساگلی (Rinaldi and Casagli, 1999) روش‌های مبتنی بر مکانیزم خاک غیراشباع را برای مطالعه مشکلات ناپایداری کرانه رود آغاز کرده‌اند.

در ایران نیز بررسی فرسایش کرانه رود در مناطق مختلفی

را در سیستم رودخانه‌ای ایجاد می‌کند که نتیجه آن تسریع و افزایش فرسایش کناره‌ای رود است. تغییرات صورت گرفته در سیستم رودخانه‌ای می‌تواند منجر به افزایش نرخ فرسایش تا هزاران بار بیشتر از مقداری شود که در رودخانه‌های طبیعی متعادل رخ می‌دهد.

عملکرد سیستمی رودخانه موجب می‌شود هر تغییری در مؤلفه‌های کانال رود، بر سایر متغیرها نیز تأثیر بگذارد. کرانه رود هم بخشی از سیستم کنش-واکنش رودخانه محسوب می‌شود و به دلایل زیر اهمیت دارند:

- بخشی از رسوباتی که وارد جریان رودخانه می‌شود از کرانه‌های رود تغذیه می‌شوند.
- تغییرات ابعاد کانال مانند عرض و عمق با ویژگی‌های کرانه و فرسایش آن‌ها در ارتباط است.
- ویژگی‌های الگوی رود هم با فرسایش کرانه رود ارتباط دارد.

فرسایش کرانه رود یکی از علل عمده آلودگی غیرنقطه‌ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه‌ها است (Rosgen, 2001; Simon and Darby, 1999; Sekely et al., 2008; Evans et al., 2006; Wilson et al., 2002). افزایش فرسایش کناره‌ای نه تنها موجب افزایش بار رسوب می‌شود بلکه موجب ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال هم می‌شود. از این رو طی چند دهه‌ی اخیر بار رسوب و ناپایداری کناره‌ای رودخانه‌ها، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهان ایجاد کرده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره‌های رود صرف شده است (Lavendel, 2002; Bernhardt et al., 2005).

تورن (Thorne, 1982) فرایندهای فرسایشی کرانه رود را به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد: الف) سایش رودخانه‌ای (عمل هیدرولیک) که رابطه نزدیکی با ویژگی‌های جریان خصوصاً سرعت جریان در نزدیک کرانه و آشفتگی محلی دارد. ب) سست شدگی و هوازدگی رسوبات و خاک که به ویژگی‌های مواد رسوبی کرانه، اندازه، خصوصیات هندسی و ساختار کرانه بستگی دارد. مهم‌ترین فرایندهای فرسایش کناره‌ای رود عبارتند از: فشار منفذی آب، تناوب مرطوب و خشک شدن، یخبندان و ذوب یخ، شستشو و یا آبشویی و عوامل انسانی. فرایندهای فوق با ویژگی‌های رسوبات و خاک

محمد مهدی حسین زاده و رضا اسماعیلی

کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش کرانه کانال، شبیه‌سازی فرسایش کناره‌ای در رویدادهای سیل مختلف بر اساس عمق و دوره جریان در وضعیت‌های متفاوت است.

موقعیت مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه در حوضه آبریز لایوچ رود و در محدوده پارک جنگلی کشپل قرار دارد. این پارک جنگلی در بخش جنوبی شهر چمستان (شهرستان نور) و در استان مازندران واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه در بالادست سایت مورد مطالعه ۱۴۶ کیلومتر مربع است. از نظر سنگ‌شناسی، حوضه از سنگ‌های رسوبی تشکیل شده و از دوره پرمین تا کواترنر را شامل می‌شود. پارک جنگلی کشپل بر روی مخروط افکنه لایوچ رود قرار دارد. در نتیجه تغییرات سطح اساس دریای خزر در دوره‌های گذشته و فروسایبی جریان رود، سه سطح پادگانه‌ای در آن شکل گرفته است. بستر این رودخانه از رسوبات گراولی و قلوه‌سنگی تشکیل شده و به علت فروسایبی رود، ارتفاع کرانه پنج تا ۱۵ متر نسبت به رود اصلی ارتفاع دارد. مقدار بارش سالانه حوضه در پارک جنگلی کشپل طبق داده‌های ایستگاه هواشناسی چمستان ۸۶۵ میلی‌متر است که به سمت بالادست حوضه (بخش جنوبی) به ۳۰۰ میلی‌متر هم 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 است و حداکثر دبی ثبت شده در طی دوره آماری (۱۳۳۷-۱۳۹۰) ۱۷۵ مترمکعب در ثانیه بوده است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی مکانیسم‌های اصلی بی‌ثباتی کناره‌های رود و ارائه استراتژی‌های پیشنهادی جهت ایجاد ثبات در آن، معمولاً از مدل‌های پایداری کناره جریان استفاده می‌شود. یکی از مدل‌های پرکاربرد و پیشرفته در خصوص پایداری کناره رودخانه، مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM)^۱ است که به وسیله آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد-می‌سی‌سی‌پی در آمریکا توسعه یافته

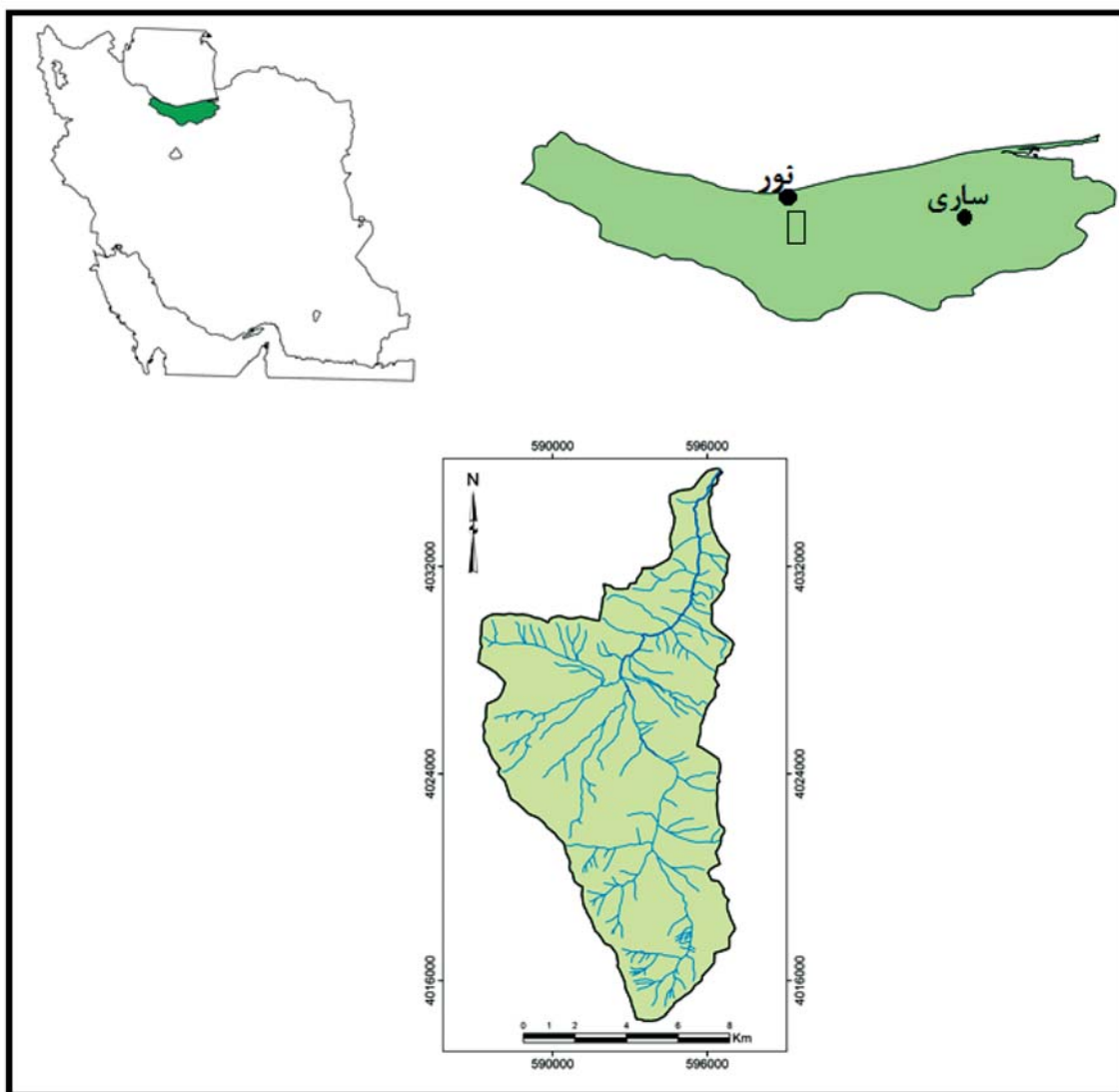
صورت گرفته است. تلوری (۱۳۷۹) نقش ویژگی‌های مواد دیواره‌ها در فرسایش کناره‌ای رودخانه کارون را مورد مطالعه قرار داده و عدم کفایت مقاومت برشی ذرات ناپیوسته به‌خصوص در لایه‌های زیرین و همچنین املاح موجود در مواد یا ذرات پیوسته کناره‌ها، همراه با شرایط کلی جریان رودخانه در دشت رسوبی ریزدانه را، از عوامل مؤثر در فرسایش کناره‌ای بیان کرده است. رضائی مقدم و پیروزی نژاد (۱۳۹۳) نیز تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب را مطالعه کرده‌اند. غفاری و همکاران (۱۳۸۵) تغییرات مورفولوژیکی کناره‌ای آبراهه را در رودخانه بابل، نوحه‌گر و یمانی (۱۳۸۲) وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب، نوحه‌گر و همکاران (۱۳۸۹) تغییرات ژئومورفولوژیک نیمرخ طولی و عرضی علیای رودخانه میناب (از سد تا پل میناب) و یمانی و همکاران (۱۳۸۵) هیدرودینامیک رودخانه‌های تالار و بابل و نقش آن در ناپایداری و تغییر مشخصات هندسی آنها را بررسی کرده‌اند.

اما مدل BSTEM در ابتدا توسط پولین و سیمون (Pollen and Simon, 2005) و پولین بنک هید و سیمون (Pollen-Bankhead and Simon, 2009) برای مطالعه پایداری نسبی کرانه تحت شرایط پوشش گیاهی و آب منفذی مشخص شروع و با مطالعات سیمون و همکاران (Simon et al., 2008) برای بررسی الگوی شیب کرانه پایدار و کانسین نه و همکاران (Cancienne et al., 2008) برای مطالعه زیربری و زاویه کرانه و فشار آب منفذی ادامه یافت. سیمون و کولیسن (Simon and Collison, 2002) و سیمون و همکاران (Simon et al., 2006) از این مدل جهت مطالعه تأثیرات مکانیکی و هیدرولوژیکی پوشش گیاهی حاشیه رود (ری‌پارین) استفاده کرده‌اند. سیمون و همکاران (Simon et al., 2010) برای بررسی پایداری کرانه در طی حوادث سیلابی و پتانسیل تغییرات کرانه بهره گرفته‌اند.

هدف این مقاله نشان دادن کارایی مدل BSTEM به‌عنوان یک ابزار مناسب برای تعیین و تشخیص شرایط حاکم بر کرانه رودخانه لایوچ در راستای حفاظت از رود و ارزیابی اهمیت فرسایش رودخانه‌ای، شناخت میزان پس‌روی

1. Bank Stability and Toe Erosion Model

2. National Sedimentation Laboratory in Oxford, Mississippi, USA



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه در استان مازندران

گسیختگی) در امتداد یک سطح شکست بالقوه است. نیروی مقاوم به وسیله معادله مور-کلمب (رابطه ۱) تعریف می‌شود (Midgley et al., 2012).

$$sr = c' + (\sigma - \mu w) \tan(\varphi') \quad (\text{رابطه ۱})$$

که sr : مقاومت برشی خاک (کیلو پاسکال)، c' : چسبندگی مؤثر (کیلو پاسکال)، σ : تنش نرمال (کیلو پاسکال)، μw : فشار منفذی آب (کیلو پاسکال) و φ' : زاویه داخلی مؤثر اصطکاک برحسب درجه است (Fredlund and Rahardjo, 1993). نیروی محرک نیز به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

است (Midgley et al., 2012). این مدل از زمان ایجاد آن تاکنون توسط نویسندگان مختلف به طور پیوسته اصلاح و بهبود یافته است. در این مقاله از مدل نسخه ۱.۴.۵ استفاده شده است که از دو بخش متفاوت شامل پایداری کرانه و فرسایش پای کرانه تشکیل می‌شود.

در این مدل، پایداری کرانه با محاسبه فاکتور ایمنی (FS) تعیین می‌شود. فاکتور ایمنی نیز در حالت‌های مختلف کرانه شامل لایه‌های افقی، لغزش‌های قائم و شکست برشی همراه با پیش‌آمدگی کرانه محاسبه می‌شود. در حالت کلی فاکتور ایمنی، گویای نسبت بین نیروی مقاومت برشی و نیروی تنش برشی (نیروی محرک

1. Factor of Safety

(Pollen, 2007; 2004). به‌ویژه در نتیجه حضور علف‌های چندساله، مقاومت چسبندگی اضافی بر روی کرانه کانال ایجاد خواهد شد. حضور این پوشش، ویژگی‌های فرسایش رودخانه‌ای را تغییر داده و مقاومت مواد و لایه بالایی کرانه رود که توسط علف‌ها پوشیده شده است را در برابر فرسایش افزایش می‌دهد.

مراحل انجام مدل BSTEM به‌صورت زیر بوده است:

- ورود داده‌های هندسی کرانه که شامل داده‌های نیم‌رخ کرانه، ضخامت لایه‌های خاک و پارامترهای کانال و جریان است. داده‌های موردنیاز این بخش از طریق برداشت‌های میدانی جمع‌آوری شد. به این منظور با استفاده از شاخص نقشه‌برداری و متر لیزری مختصات نقاط مختلف کرانه، شامل ارتفاع از بستر و فاصله کرانه اندازه‌گیری شد. در ادامه تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه (حداکثر تا پنج لایه) مشخص 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 و میانگین عمق جریان در حالت دبی لبالی و دبی سیلاب بر طبق آثار برجای‌مانده در حاشیه رودخانه و طول مدت جریان نیز بر پایه مشاهدات ساکنان محلی به دست آمد.

- مواد تشکیل‌دهنده کرانه^۳: بخش دیگری از داده‌ها مربوط به ویژگی‌های خاک و مواد تشکیل‌دهنده لایه‌های کرانه و پای کرانه است. در بازه مورد مطالعه نوع خاک از نظر بافت مشخص گردید و وارد مدل شد. این بخش هم‌چنین حاوی محاسباتی برای برآورد تنش برشی بحرانی بر پایه قطر ذرات و یا ورود مقدار تنش برشی محاسبه‌شده در بازه است که برای بازه مورد مطالعه مقدار تنش برشی بر پایه اندازه‌گیری‌های به‌عمل‌آمده و از طریق رابطه ۵ محاسبه شد و هم‌چنین مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری برای خاک کرانه نیز از طریق رابطه ۶ برآورد شد

$$S_d = W \sin(\beta) \quad (\text{رابطه } ۲)$$

که S_d : نیروی برشی (کیلو پاسکال)، W : وزن بلوک خاک مرطوب در واحد مساحت سطح شکست (کیلو نیوتن بر مترمربع) و β : زاویه سطح شکست برحسب درجه (Simon et al., 2000).

مدل BSTEM قابلیت محاسبه این نیروها را بر اساس ویژگی‌های کرانه دارا است و با توجه به ویژگی‌های خاک (با محاسبه و برآورد زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مؤثر، واحد وزن خاک، فشار آب منفذی)، زاویه پایداری کرانه رودخانه، اندازه‌گیری و برآورد می‌شود. هم‌چنین می‌توان زیربری کرانه رود را که به‌وسیله فرسایش رودخانه‌ای ایجاد می‌شود، برآورد کرد (Simon et al., 2000). این مدل، فرسایش را بر اساس معادله تنش برشی مازاد ارائه‌شده به‌وسیله پارزنیاداس (Partheniades, 1965) پیش‌بینی می‌کند (رابطه ۳).

$$\varepsilon = \kappa (\tau_0 - \tau_c)^a \quad (\text{رابطه } ۳)$$

که 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 یک در نظر گرفته می‌شود. ضریب فرسایش‌پذیری و تنش برشی بحرانی تابع ویژگی‌های متفاوت خاک هستند. برای خاک‌های غیرچسبنده، تنش برشی بحرانی بر پایه متوسط قطر ذرات خاک برآورد می‌شود (Garcia, 2008). میانگین تنش برشی نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\tau_0 = \gamma_w R S \quad (\text{رابطه } ۴)$$

که γ_w : وزن واحد آب (۹/۸۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب)، R : شعاع هیدرولیک (متر) و S : شیب کانال (متر بر متر) است.

مدل‌سازی عددی و بررسی‌های میدانی هم‌چنین نشان می‌دهد که اضافه شدن ریشه‌ها به کرانه‌ها، پایداری را در شرایط هیدرولوژیکی متفاوت بهبود می‌بخشد (Abernathy and Rutherford, 2000; Wynn et al.,

1. Bank
2. Toe
3. Bank material

(Hanson and Simon, 2001).

مورد بررسی قرار دهد. داده‌های مرتبط با پوشش گیاهی از طریق مطالعه میدانی مشخص شد.

$$\tau_c = \theta_e g d (\rho_s - \rho_w) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که τ_c : تنش برشی بحرانی (N/m^2)، d : اندازه ذرات رسوبی بستر، این عدد تقریباً نشان‌دهنده قطر d_{50} رسوبات است. ρ_s : چگالی رسوب است که تقریباً 2650 کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. θ_e : مقدار ثابت بی‌بعد شیلدز است که تابع شکل ذره، ویژگی‌های سیال و آرایش ذرات سطح است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰).

$$K = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

K : فرسایش‌پذیری برای خاک ($cm_3 (N-s)^{-1}$)

- خروجی مدل کرانه: این بخش از مدل نشان‌دهنده فرایند شبیه‌سازی و فاکتور ایمنی (FS)، هندسه کرانه، زاویه و ارتفاع وقوع سطح شکست است. در این بخش لازم است عمق سطح آب نزدیک کرانه یا فشار آب منفذی در عمق‌های مختلف را وارد کرد. به‌منظور تعیین اهمیت ارتفاع سطح آب نزدیک کناره از روش شبیه‌سازی پاسخ فوری^۲ استفاده شود. در این روش، سطح آب نزدیک کرانه به‌طور خودکار منطبق با ارتفاع مراحل جریان رودخانه (فاصله بالاترین نقطه کرانه تا سطح آب رودخانه) مدنظر قرار گرفت.

- بخش خروجی فرسایش پای کرانه^۳: به کاربر اجازه اجرای مدل‌سازی فرسایش پای کرانه را برای دوره‌های جریانی خاص می‌دهد. این بخش از نتایج مدل، شامل تنش برشی محاسبه‌شده، میزان پس‌روی کرانه، میزان رسوبات حمل شده از کرانه و پای کرانه، نیم‌رخ جدید کرانه و مقدار فرسایش است.

- بخش پوشش گیاهی و حفاظت‌های اعمال شده بر روی کرانه و پای کرانه^۴: در این بخش کاربر می‌تواند نوع و مشخصه‌های پوشش گیاهی موجود (درصد پوشش و تراکم ریشه‌ها) بر روی کرانه و پای کرانه را به کار گیرد. همچنین حفاظت‌های مختلفی که امکان اعمال آن بر روی کرانه وجود دارد را مشخص و اثر آن را بر روی پایداری کرانه

بحث

در این مطالعه، بازه‌ای از رودخانه لایچ در محل پارک کشپل به‌منظور شناخت میزان پس‌روی کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش کرانه کانال شبیه‌سازی گردید. این شبیه‌سازی برای دبی لبالی، میانگین دبی سیلاب رودخانه و حداکثر دبی قابل انتظار که نماینده جریان‌های بزرگ رودخانه لایچ است، انجام گرفته است. این بازه بر اساس وجود شرایط مناسب از نظر تنوع لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه، امتداد مستقیم کانال به طول بیش از 100 متر، شیب یکنواخت بستر، وجود بخش پای کرانه، قابلیت اندازه‌گیری اندازه رسوب، آثار مرتبط با ارتفاع جریان در سیل اخیر و مقادیر دبی لبالی و در نهایت در دسترس بودن بازه انتخاب شده است. تنش برشی بحرانی دبی سیل انتخابی بیشتر از اندازه ذرات تشکیل‌دهنده رسوبات پای کرانه بوده است. در این شبیه‌سازی لازم است دبی هر بازه تبدیل به عمق جریان در بازه مورد مطالعه شود که برای هر سه دبی، این تبدیل صورت گرفته است.^۱

هندسه کانال: در اولین مرحله داده‌های مرتبط با ژئومتری کرانه از طریق اندازه‌گیری میدانی تهیه و وارد مدل گردید. این داده‌ها شامل مختصات کرانه (جدول ۱)، ارتفاع و شیب کرانه، طول و زاویه پای کرانه (جدول ۲) و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه (جدول ۳) است. بر اساس مختصات وارد شده، نیم‌رخ کرانه ترسیم گردید (شکل ۲). در ادامه پارامترهای جریان و کانال استخراج و وارد مدل شدند (جدول ۴ و ۵).

1. Bank model output

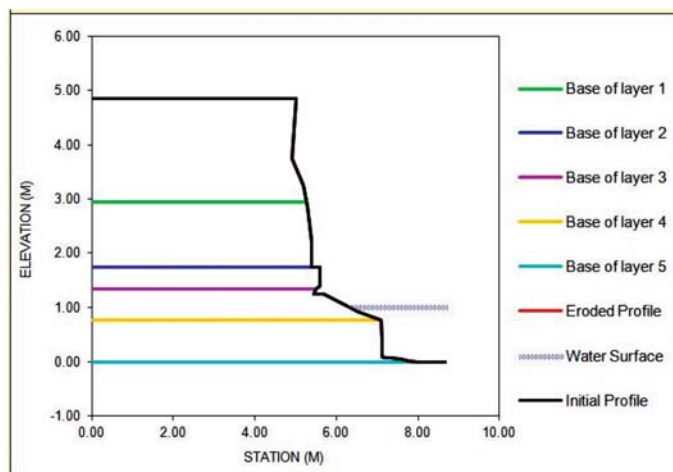
2. Instant response

3. Toe erosion output

4. Bank vegetation and protection

جدول ۱. مختصات کرانه، شامل ارتفاع و فاصله از مبدأ نقاط انتخابی بر روی کرانه، در بازه مورد مطالعه

ردیف	ارتفاع به متر	فاصله از مبدأ به متر	ردیف	ارتفاع به متر	فاصله از مبدأ به متر
۱	۴/۸۵	۰	۱۳	۰/۹۲	۶/۵۴
۲	۴/۸۵	۵	۱۴	۰/۷۷	۷/۰۹
۳	۳/۷۵	۴/۹۰	۱۵	۰/۴۰	۷/۱۳
۴	۳/۲۵	۵/۲۰	۱۶	۰/۲۰	۷/۱۳
۵	۲/۸۵	۵/۲۹	۱۷	۰/۱۰	۷/۱۳
۶	۲/۲۰	۵/۳۹	۱۸	۰/۰۹	۷/۲۴
۷	۱/۷۵	۵/۳۹	۱۹	۰/۰۸	۷/۳۵
۸	۱/۷۵	۵/۶۰	۲۰	۰/۰۵	۷/۵۷
۹	۱/۴۰	۵/۶۰	۲۱	۰/۰۳	۷/۷۸
۱۰	۱/۳۴	۵/۵۰	۲۲	۰	۸
۱۱	۱/۲۵	۵/۴۵	۲۳	۰	۸/۶۸
۱۲	۱/۲۵	۵/۷۰			



شکل ۲. نیمخ کرانه بر اساس مختصات وارد شده شامل مختصات، ارتفاع و شیب کرانه، طول و زاویه پای کرانه و ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده آن

جدول ۲. ارتفاع و شیب کرانه، طول و زاویه پای کرانه در بازه مورد مطالعه

پارامتر	ارتفاع کرانه (متر)	شیب کرانه (زاویه)	طول پای کرانه (متر)	شیب پای کرانه (زاویه)
مقدار	۴/۹	۷۷/۲	۳/۸	۲۱

جدول ۳. ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده کرانه در بازه مورد مطالعه

ترتیب لایه از بالا	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴	لایه ۵
ضخامت لایه (متر)	۱/۹۰	۱/۲۰	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۷۷

جدول ۴. پارامترهای جریان و کانال جهت شبیه‌سازی در بازه مورد مطالعه

پارامتر	طول بازه (متر)	شیب بازه (متر بر متر)	دبی لب‌آبی		متوسط دبی سیلاب رودخانه		حداکثر دبی قابل انتظار	
			عمق (متر)	طول مدت جریان (ساعت)	عمق (متر)	طول مدت جریان (ساعت)	عمق (متر)	طول مدت جریان (ساعت)
مقدار	۱۰۰	۰/۰۳	۱	۲۴	۱/۲۵	۲۴	۱/۵	۲۴

مواد تشکیل دهنده کرانه

تشکیل دهنده کرانه، مشخصه‌های پیش فرض مدل شامل زاویه اصطکاک، چسبندگی، وزن بلوک خاک مرطوب و زاویه شکست تعیین گردید. در این بخش تنش برشی بحرانی برای حرکت یک ذره مورد نیاز است. با استفاده از رابطه ۵ تنش برشی مورد نیاز برای حرکت ذرات تشکیل دهنده بازه (d_{50}) محاسبه شد.

کرانه رودخانه در بازه مورد مطالعه از پنج لایه متفاوت تشکیل شده که به صورت افقی لایه‌بندی شده است. این مواد به ترتیب از بالا به پایین شامل گراول، قلوه‌سنگ، گراول، سیلت فرسایش پذیر و سیلت مقاوم بوده است. همچنین مواد تشکیل دهنده پای کرانه نیز از ماسه زاویه‌دار درشت همراه با گراول تشکیل شده است (جدول ۶). بر اساس مواد

جدول ۵. مواد تشکیل دهنده کرانه در بازه مورد مطالعه

ترتیب لایه از بالا	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴	لایه ۵	پای کرانه
ضخامت لایه (متر)	گراول	قلوه‌سنگ	گراول	سیلت فرسایش پذیر	سیلت مقاوم	ماسه زاویه‌دار درشت همراه با گراول

است) و تغییر در هندسه منطقه پای کرانه تعیین شود. در اولین سناریو، برای انجام این شبیه‌سازی مقادیر انواع دبی‌ها به صورت مستقل و بدون تأثیر بر یکدیگر وارد مدل شد. در ضمن پوشش گیاهی نیز دخالت داده نشد و کرانه بدون حفاظت لحاظ گردید. میزان فرسایش ناشی از جریان‌های مختلف سیل در یک دوره ۲۴ ساعته در جدول ۶ نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز نتایج این شبیه‌سازی در دبی‌های مختلف نشان داده شده است.

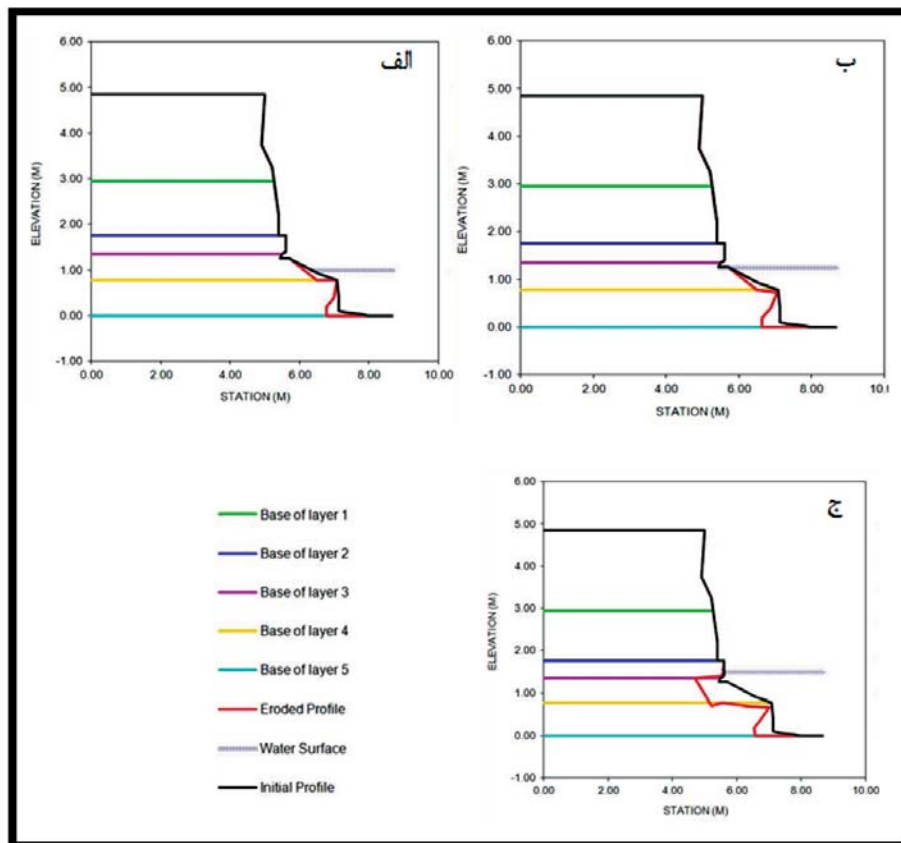
با توجه به اینکه d_{50} ذرات بازه ۳۰ میلی‌متر است، پس مقدار تنش برشی بحرانی بازه معادل $29/16$ نیوتن بر مترمربع یا پاسکال تخمین زده شده است. بر پایه تنش برشی بحرانی محاسبه شده ضریب فرسایش پذیری $(cm^3/N-s)$ به دست آمد. شبیه‌سازی فرسایش پای کرانه: در این مرحله سناریوهای مختلف تأثیرات دبی‌های مختلف جریان سیل (دبی لبالی، متوسط دبی سیلاب و حداکثر دبی قابل انتظار) شبیه‌سازی می‌شود تا مقدار فرسایش هیدرولیک (اگر صورت گرفته

جدول ۶. میزان فرسایش ناشی از دبی‌های مختلف جریان در دوره ۲۴ ساعته برای بازه مورد مطالعه

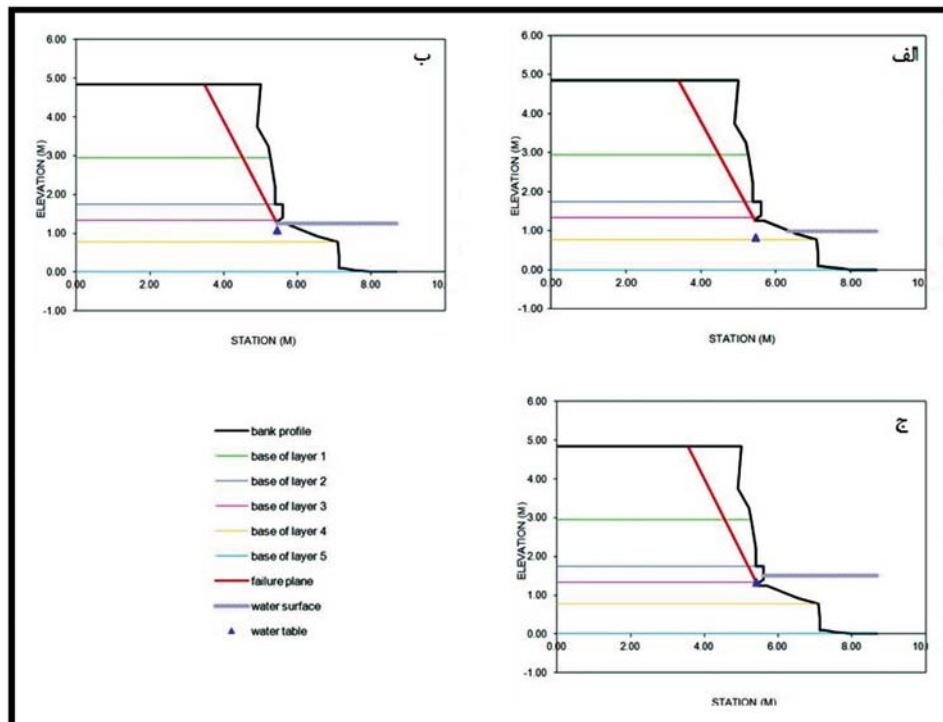
پارامتر	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	حداکثر پس‌روی عرضی (سانتی‌متر)	مساحت فرسایش یافته کرانه (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته پای کرانه (مترمربع)	کل مساحت فرسایش یافته (مترمربع)
دبی لبالی	۱۸۸/۲۹	۰	۰/۲۴۳	۰/۰۶۱	۰/۳۰۴
متوسط دبی سیلاب	۲۱۶/۳۲	۰	۰/۳۲۶	۰/۰۶۸	۰/۳۹۴
حداکثر دبی قابل انتظار	۲۴۴/۷۵	۸۱/۲۵	۱/۱۲	۰/۰۷۲	۱/۱۹

هندسه جدید کانال به بخش پایداری کرانه منتقل شد تا میزان پایداری نسبی کرانه و نتایج اعمال شده بر کرانه استخراج شود (شکل ۴). جدول ۷ نشان‌دهنده میزان پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی‌های مختلف جریان سیل در دوره ۲۴ ساعته بر روی کرانه مورد مطالعه است. در مرحله قبل شبیه‌سازی فرسایش کناره‌ای برای هر یک از دبی‌های مورد مطالعه به صورت مستقل صورت گرفت؛ اما در ادامه یعنی سناریو دوم، توالی دبی‌های مختلف سیل شبیه‌سازی شده و تأثیر آن بر مورفومتری کرانه کانال مورد

بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله در ابتدا تأثیرات اولین جریان (دبی لبالی) شبیه‌سازی می‌شود تا مقدار فرسایش هیدرولیک و تغییر در هندسه منطقه پای کرانه تعیین گردد. هندسه جدید کانال به بخش مدل پایداری کرانه منتقل شده تا میزان پایداری نسبی کرانه مشخص شود. اگر ضریب ایمنی (FS) بزرگ‌تر از یک باشد، هندسه کانال به‌روز نخواهد شد و واقعه جریانی جدیدی شبیه‌سازی می‌شود. اگر ضریب ایمنی (FS) کمتر از یک باشد، شکست کرانه شبیه‌سازی و به‌روز می‌شود و نتایج سطح شکست هندسه جدید کرانه برای



شکل ۳. نتایج شبیه‌سازی فرسایش کرانه در ترازهای مختلف، الف) دبی لبالی، ب) متوسط دبی سیلابی، ج) حداکثر دبی منتظره



شکل ۴. میزان پایداری نسبی کرانه، الف) دبی لبالی، ب) متوسط دبی سیلاب، ج) حداکثر دبی منتظره

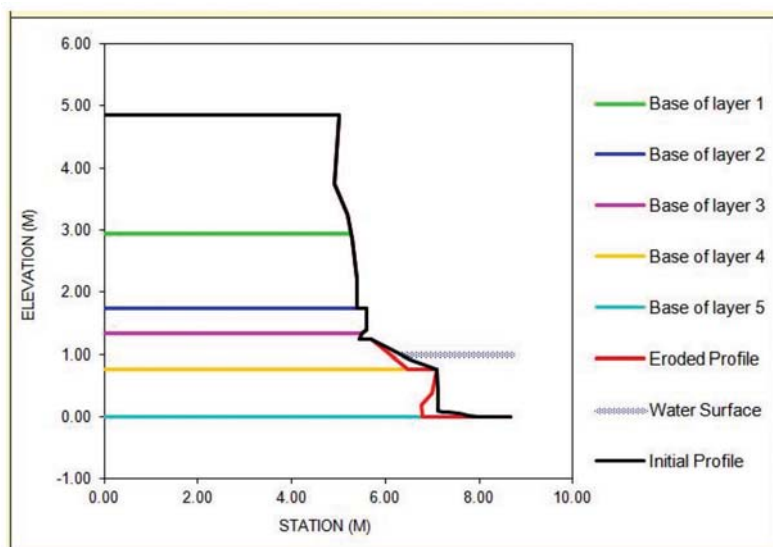
جدول ۷. پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی‌های مختلف جریان در دوره ۲۴ ساعته بر روی کرانه

پارامتر	ضریب ایمنی (FS)	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (درجه)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (تن)	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)
دبی لبالی	۰/۹۷	۱/۳	۶۰/۳	۱/۶۰	۲۸۳	۵۳۰/۲۴	۴
متوسط دبی سیلاب	۰/۹۱	۱/۳	۶۱/۳	۱/۵۲	۲۶۸	۵۰۸/۰۶	۳/۷۵
حداکثر دبی قابل انتظار	۰/۸۵	۱/۳	۶۲/۱	۱/۴۵	۲۵۶	۴۸۸/۲۷	۳/۵

و تعداد ریشه با ضخامت‌های مختلف اعمال گردید تا اثر آن بر روی فرسایش و ناپایداری مشخص شده و در ادامه روند شبیه‌سازی مدنظر قرار گیرد. از نظر پوشش گیاهی تقریباً ۴۵ درصد تحت پوشش گیاهان علفی منطقه مرطوب (۱ ساله)، ۱۵ درصد تحت اشغال بوته‌های تمشک وحشی (۲ ساله)، ۱۰ درصد نیز توسط درختان توسکا (بیش از ۱۰ سال) پوشیده شده و ۳۰ درصد سطح نیز خاک‌های برهنه و فاقد پوشش گیاهی بوده است. همچنین کرانه و پای آن بدون حفاظت در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی فرسایش پای کرانه برای رویداد جریانی جدید (متوسط دبی سیلاب و حداکثر دبی قابل انتظار) استفاده خواهد شد.

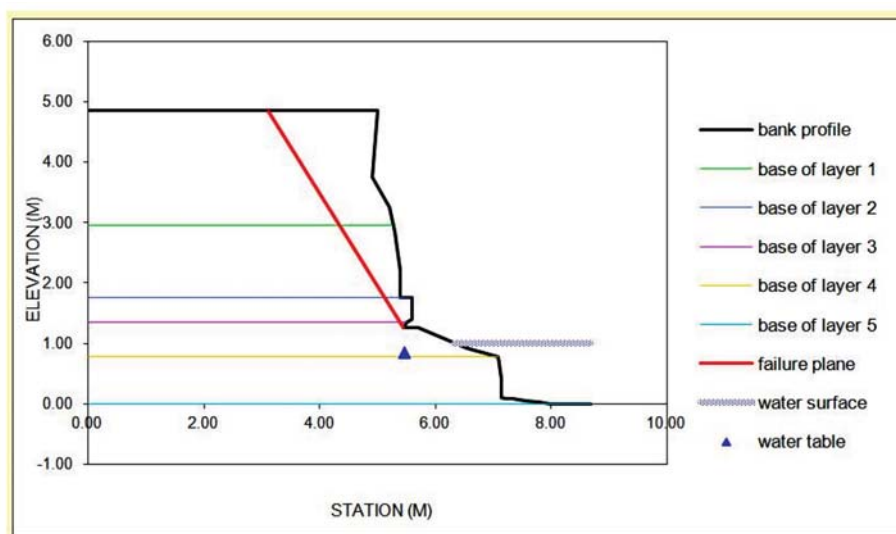
در بازه مورد مطالعه، در ابتدا تأثیرات دبی لبالی در مدل اعمال گردید (شکل ۵). نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش پای کرانه و میزان ناپایداری آن در جدول ۶ و ۷ نشان داده شده است. به منظور تعیین نقش پوشش گیاهی روی کرانه، در بخش پوشش گیاهی و حفاظت اعمال شده بر روی کرانه و پای کرانه، نوع پوشش و ویژگی‌های آن از نظر تراکم



شکل ۵. شبیه‌سازی کرانه در دبی لبالی در سناریوی دوم

و ۹. در ادامه چون ضریب ایمنی (FS) همچنان بزرگ‌تر از ۱ یعنی ۱/۶۷ بود (شکل ۷ ب)، هندسه کانال به‌روز نشده و واقعه جریانی جدید (حداکثر دبی قابل انتظار) شبیه‌سازی شد. (شکل ۸ الف) و میزان پایداری نسبی (شکل ۸ ب) و نتایج آن در جدول‌های ۸ و ۹ آمده است.

با اجرای مدل با شرایط جدید وضعیت فرسایش و ناپایداری کرانه به شرح جدول‌های ۸ و ۹ است. در ادامه چون ضریب ایمنی (FS) بزرگ‌تر از ۱ یعنی ۱/۶۷ بود (شکل ۶)، هندسه کانال به‌روز نشده و واقعه جریانی جدید (متوسط دبی سیلاب) شبیه‌سازی شد (شکل ۷ الف) و جدول‌های ۸



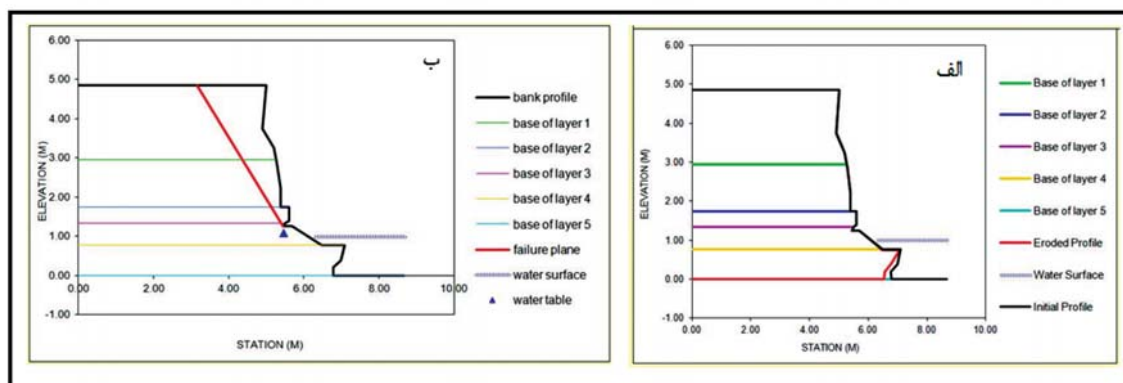
شکل ۶. میزان پایداری نسبی کرانه در دبی لبالی در سناریوی دوم

جدول ۸. میزان فرسایش ناشی از دبی‌های مختلف در دوره ۲۴ ساعته با اعمال پوشش گیاهی موجود برای بازه مورد مطالعه

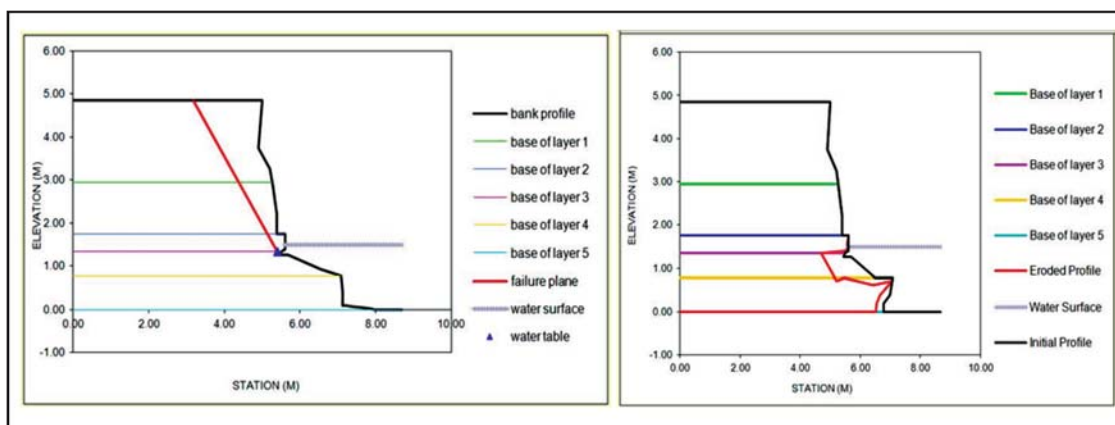
پارامتر	متوسط تنش برشی حداکثر پس روی عرضی (سانتی‌متر)	مساحت فرسایش یافته (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته کل (مترمربع)	فرسایش یافته (مترمربع)
دبی لبالی	۰	۰/۲۴۳	۰/۰۶۱	۰/۳۰۴
متوسط دبی سیلاب	۰	۰/۱۶۵	۰	۰/۱۶۵
حداکثر دبی قابل انتظار	۸۱/۲۵	۱/۱۲	۰/۰۷۲	۱/۹۰

جدول ۹. پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی‌های مختلف در دوره ۲۴ ساعته با اعمال پوشش گیاهی موجود بر روی کرانه

پارامتر	ضریب ایمنی (FS)	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (درجه)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (تن)	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)
دبی لبالی	۱/۲۶	۱/۳	۵۶/۹	۱/۹	۳۳۶	۶۳۰/۱	۴
متوسط دبی سیلاب	۱/۲۰	۱/۳	۵۷/۵	۱/۸۵	۳۲۶	۶۱۶/۸۳	۳/۷۵
حداکثر دبی قابل انتظار	۱/۱۵	۱/۳	۵۸	۱/۸۰	۳۱۸	۶۰۶/۶۱	۳/۵



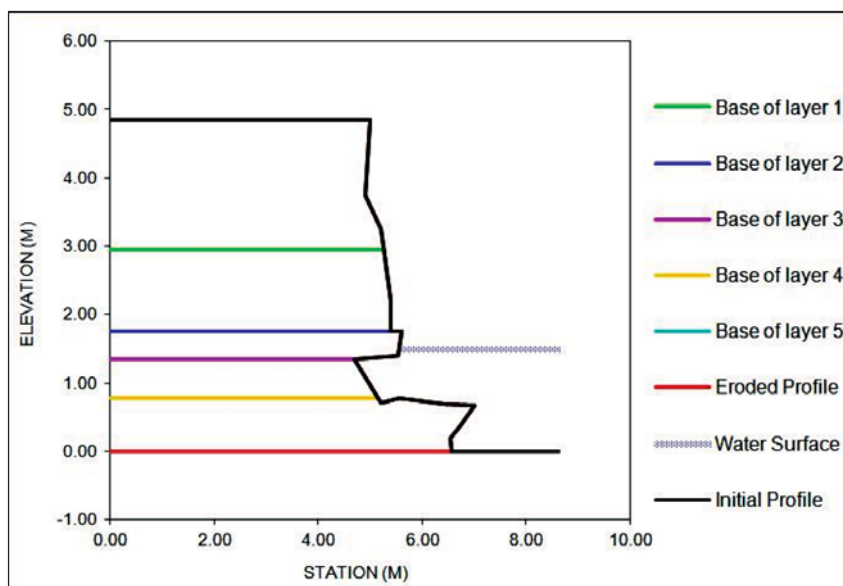
شکل ۷. الف) شبیه‌سازی کرانه در متوسط دبی سیلاب، ب) میزان پایداری نسبی کرانه در متوسط دبی سیلاب در سناریوی دوم



شکل ۸. الف) شبیه‌سازی کرانه در حداکثر دبی قابل انتظار، ب) میزان پایداری نسبی کرانه در حداکثر دبی قابل انتظار در سناریوی دوم

واریزه‌های چوبی بزرگ و برای پای کرانه ریپ‌رپ (با ذرات ۳۰ سانتی‌متری) لحاظ گردید و مدل اجرا شد. جدول ۱۰ نشان‌دهنده میزان فرسایش ناشی از دبی‌های مختلف جریان سیل در دوره ۲۴ ساعته برای بازه مورد مطالعه در سناریوی سوم است. بر اساس مدل‌سازی فوق در دبی‌های مختلف، هندسه جدید کرانه به صورت شکل ۱۰ خواهد بود.

در صورت اعمال تأثیرات دبی‌های متوالی بر روی کرانه، هندسه جدید کرانه به صورت شکل ۹ خواهد بود. در سناریوی آخر فرض شد اگر با وضع موجود پوشش گیاهی کرانه و دبی‌های مورد استفاده در سناریوی اول و دوم، حفاظت‌هایی بر روی کناره اعمال شود، چه تغییری بر روی نتایج ناپایداری کرانه و فرسایش‌های صورت گرفته رخ می‌دهد. به این منظور برای کرانه حفاظت از نوع

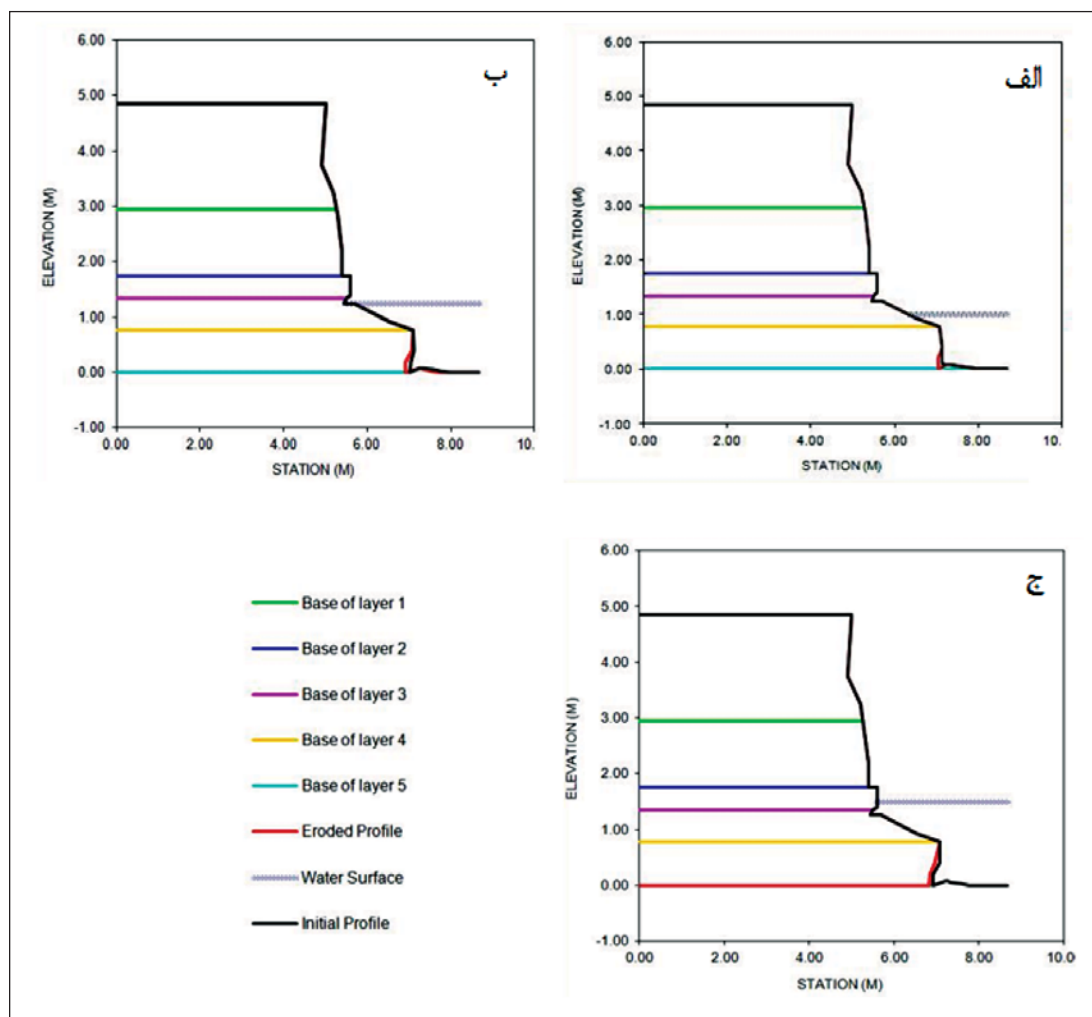


شکل ۹: شبیه‌سازی کرانه در دبی‌های متوالی بر روی کرانه در سناریوی دوم

محمد مهدی حسین زاده و رضا اسماعیلی

جدول ۱۰. میزان فرسایش ناشی از دبی‌های مختلف جریان در دوره ۲۴ ساعته برای بازه مورد مطالعه در سناریوی سوم

پارامتر	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	حداکثر پس‌روی عرضی (سانتی‌متر)	مساحت فرسایش یافته کرانه (مترمربع)	مساحت فرسایش یافته پای کرانه (مترمربع)	کل مساحت فرسایش یافته (مترمربع)
دبی لبالی	۱۸۸/۲۹	۰	۰/۰۲۴	۰/۰۰۶	۰/۰۳
متوسط دبی سیلاب	۲۰۴/۰۵	۰	۰/۰۴۹	۰/۰۱	۰/۰۵۹
حداکثر دبی قابل انتظار	۲۲۱/۱۳	۰	۰/۰۵۴	۰	۰

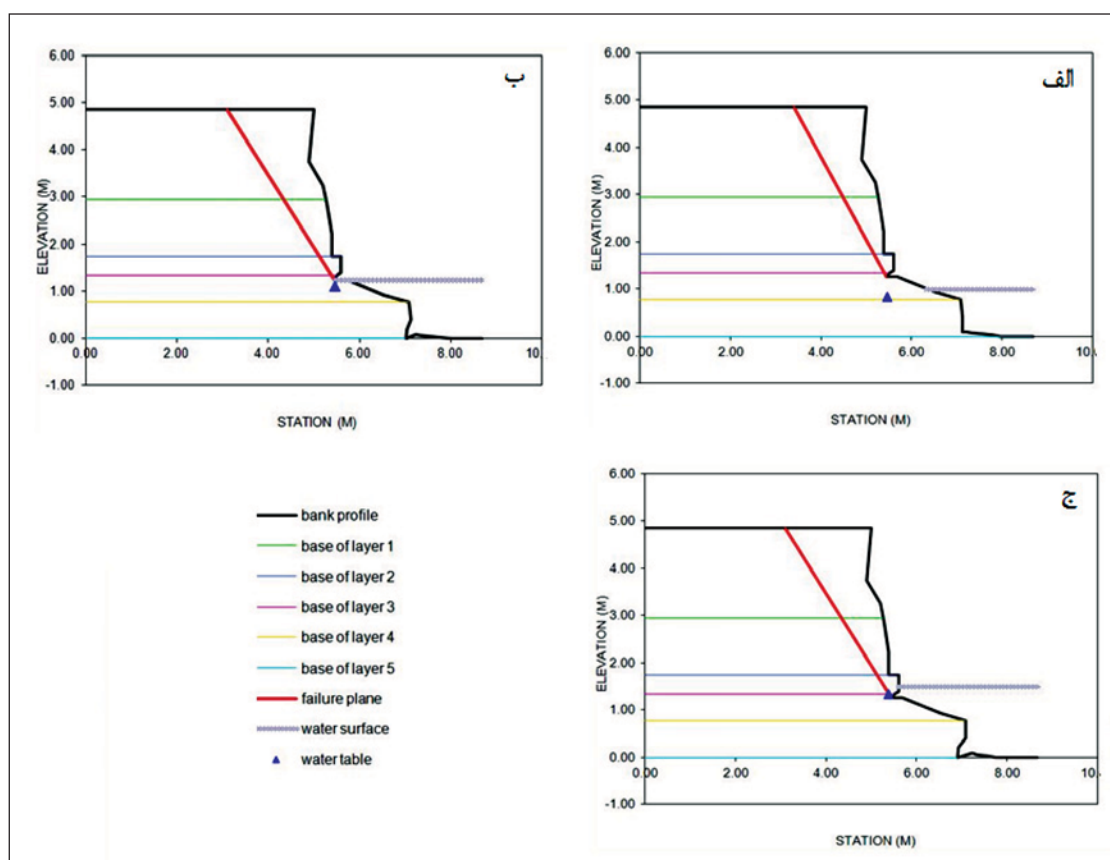


شکل ۱۰. شبیه‌سازی کرانه در سناریوی سوم (الف) در دبی لبالی، (ب) متوسط دبی سیلاب، (ج) حداکثر دبی قابل انتظار

وضعیت ناپایداری کرانه و بار رسوب ایجاد شده در دبی‌های مختلف در سناریوی سوم در جدول ۱۱ آمده است. همچنین نیمرخ حاصل از شبیه‌سازی در سناریوی سوم از نظر پایداری نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱. پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی‌های مختلف جریان در دوره ۲۴ ساعته با اعمال پوشش گیاهی موجود و حفاظت‌های ایجادشده بر روی کرانه

پارامتر	ضریب ایمنی (FS)	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (درجه)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (تن)	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)
دبی لبالی	۱/۲۶	۱/۳	۵۶/۹	۱/۹	۳۳۶	۶۳۰/۱	۴
متوسط دبی سیلاب	۱/۲۰	۱/۳	۵۶/۹	۱/۹	۳۳۶	۶۳۵/۳۸	۳/۷۵
حداکثر دبی قابل انتظار	۱/۱۵	۱/۳	۵۶/۹	۱/۹	۳۳۶	۶۴۰/۶۶	۳/۵



شکل ۱۱. میزان پایداری نسبی کرانه در سناریوی سوم (الف) دبی لبالی، (ب) متوسط دبی سیلاب، (ج) حداکثر دبی قابل انتظار

نتیجه‌گیری

سیل با پوشش گیاهی موجود کرانه رودخانه و توالی سیلاب با پوشش گیاهی موجود و حفاظت‌های ممکن بر روی کرانه انجام گرفت. پسروی محاسبه شده کناره در سناریوهای مختلف در بازه مورد مطالعه در رودخانه لایچ متغیر بوده است. در سناریوی اول فقط در دبی‌های حداکثر می‌توان انتظار

به‌منظور شناخت میزان پس‌روی کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش کرانه کانال، شبیه‌سازی فرسایش کناره‌ای در رویدادهای سیل مختلف بر اساس عمق و دوره جریان در وضعیت‌های متفاوت شامل سیل‌های مستقل بدون دخالت پوشش گیاهی، توالی جریان

در رودخانه‌ها جلوگیری کرد، زیرا بخش عمده رسوب تولیدی در رودخانه‌ها در نتیجه فرسایش کناره‌ای است. فرسایش کرانه رود به واسطه شکست توده‌ای، نشان‌دهنده یکی از اشکال مهم تنظیم کانال و یک منبع قابل توجه از رسوبات در جریان‌های آشفته بوده و تولید ۸۰-۶۰ درصد بار رسوب معلق را به خود اختصاص می‌دهد (Simon and Rinaldi, 2006). نتیجه دیگر حاصل از این شبیه‌سازی گویای آن است که کرانه بازه مورد مطالعه به دلیل دارا بودن چندلایه شامل لایه‌های سیلت مقاوم و ریزدانه که توسط لایه‌های گراول و قلوه سنگ تحکیم نیافته پوشیده شده است فقط در جریان‌های سیلابی بزرگ فرسایش یافته و پس‌روی، زیربری دامنه و ناپایداری رخ می‌دهد و در جریان‌های معمولی که پایین‌تر از دبی لبالی است نمی‌توان انتظار فرسایش کناره‌ای و پس‌روی کرانه را داشت. حتی دبی لبالی که به‌طور متوسط با دوره بازگشت دو ساله نیز رخ می‌دهد تأثیر چندانی بر فرسایش و تغییر هندسه کانال نداشته و به‌طور مختصر رسوبات پای کرانه را فرسایش می‌دهد. در واقع دبی‌های شکل‌دهنده که بالاتر از دبی لبالی است و در رودخانه لایچ با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال رخ می‌دهد، نقش مهمی در فرسایش رودخانه‌ای و فرایندهای پس‌روی عرضی کانال بر عهده دارند.

مشاهدات انجام گرفته در بازه مورد مطالعه بعد از سیل ۱۳۹۴/۴/۲۹ نشان داد که بیشتر شکست‌های رخ داده در زمان سیل به واسطه زیربری پای کرانه در سیلت‌های مقاوم و ریزدانه بوده که منجر به سقوط گراول‌های لایه‌های بالایی متشکل از گراول‌های تحکیم نیافته شده است. این نتایج گویای پیوند قطعی و حساس بین زیربری رودخانه و ثبات ژئوتکنیکی لایه‌های فوقانی در این رودخانه آبرفتی است.

منابع

- اسماعیلی، ر.، حسین‌زاده، م.م. و متولی، ص.، ۱۳۹۰. تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، انتشارات لاهوت، ۲۲۸ ص.
- تلوری، ع.، ۱۳۷۹. نقش ویژگی‌های مواد دیواره‌ها در فرسایش کناره‌ای رودخانه کارون، پژوهش و سازندگی،

فرسایش را داشت و میزان آن در حدود ۸۱/۲۵ سانتی‌متر و کل مساحت فرسایش یافته نیز ۱/۱۹ مترمربع بوده است. در سناریوی دوم نتایج مدل‌سازی و وضعیت فرسایش مشابه سناریوی اول بوده است اما در سناریوی سوم هیچ‌گونه پس‌روی و فرسایشی مشاهده نشد. این برآورد گویای نقش پوشش گیاهی و حفاظت از کرانه در تحکیم کرانه و جلوگیری از پس‌روی کرانه رود است.

از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) نیز در سناریوی اول در هر سه وضعیت جریان رودخانه، دامنه ناپایدار است و ضریب ایمنی کمتر از ۱ محاسبه شده و با افزایش عمق جریان و کاهش سطح آب زیرزمینی در کرانه، ناپایداری کرانه بیشتر شده است. در سناریوی دوم به دلیل دخالت و حضور پوشش گیاهی، ضریب ایمنی افزایش یافته و در حدود ۱/۱۵ تا ۱/۲۶ محاسبه شده که نشان‌دهنده وجود شرایط نسبتاً پایدار در کرانه بوده است. لازم به ذکر است که با وجود افزایش پایداری کرانه، به دلیل افزایش عرض شکست احتمالی، در صورت شکست کرانه میزان بار رسوب تولیدی بیشتر از سناریوی اول خواهد بود. در سناریوی سوم شرایط پایداری کرانه تقریباً مشابه سناریوی دوم بوده و کرانه رودخانه در بازه مورد مطالعه در شرایط نسبتاً پایدار قرار داشته است.

بنابراین در سناریوی اول ناپایداری کرانه و پس‌روی کرانه رخ داده در حالی که در سناریوی دوم شکستی رخ نداده اما فرسایش رسوب از کرانه مشاهده شده و میزان پس‌روی کرانه نیز به ۸۱/۲۵ سانتی‌متر رسیده است. در سناریوی سوم با اعمال حفاظت صورت گرفته به‌صورت واریزه‌های چوبی بر روی کرانه و ریپ‌رپ بر روی پای کرانه، میزان احتمال شکست کرانه کاهش یافته و میزان فرسایش کناره و پس‌روی آن به صفر رسیده است.

درواقع حضور پوشش گیاهی با افزایش مقاومت چسبندگی اضافی، میزان ناپایداری و جابجایی رسوب را در سناریوی دوم و سوم کاهش داده است. این نتیجه گویای نقش قاطع و مؤثر پوشش گیاهی در حفظ هندسه کانال، الگوی رود و تولید رسوب است و با تقویت و حفظ پوشش گیاهی می‌توان از فرسایش کناره‌ای و تولید رسوب

- the stability of root-reinforced streambanks, *Earth Surf. Processes Landforms*, 33(8), 1769-1786.
- Darby, S.E. and-Thorne, C.R., 1996. Development and testing of river-bank stability analysis, *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(8), 443-454.
 - Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N. and Vannocci, P., 2003. Mechanisms of river bank failure along the Arno 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.
 - Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics of Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 536.
 - Garcia, M., 2008. Sediment transport and morphodynamics. In: Garcia, M. (ed.), *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 21-164.
 - Hanson, G. and Simon, A., 2001. Erodibility of cohesive sediment in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15, 23-28.
 - Lavendel, B., 2002. The business of ecological restoration, *Ecological Restoration*, 20, 173-178.
 - Little, W.C., Thorne, 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. ۱۳(۲)، ۵۷-۵۲.
 - حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۴. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای. مفاهیم، اشکال و فرآیندها، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۳۳۸ ص.
 - غفاری، گ.، سلیمانی، ک. و مساعدی، ا.، ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مرفولوژی کناری آبراهه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (بابلرود مازندران)، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۸ (۵۷)، ۶۱-۷۱.
 - رضایی مقدم، م.ح. و پیروزی نژاد، ن.، ۱۳۹۳. بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۸ (۴۷)، ۱۳۲-۱۰۹.
 - نوحه‌گر، ا.، حسین‌زاده، م.م. و افشار، ط.، ۱۳۸۹. تغییرات ژئومورفولوژیک نیمرخ طولی و عرضی علیای رودخانه میناب (از سد تا پل میناب)، مجله جغرافیا، ۸ (۲۴)، ۱۳۷-۱۵۸.
 - نوحه‌گر، ا. و یمانی، م.، ۱۳۸۴. بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان‌رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین‌دست سد میناب)، ۳۷ (۵۱)، ۶۵-۸۴.
 - یمانی، م.، حسین‌زاده، م.م. و نوحه‌گر، ا.، ۱۳۸۵. هیدرودینامیک رودخانه‌های تالار و بابل و نقش آن در ناپایداری و تغییر مشخصات هندسی آنها، ۳۸ (۵۵)، ۳۳-۱۵.
 - Abernathy, B. and Rutherford, I. D., 2000. The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 921-937.
 - Bernhardt, E. S., Palmer, M. A., Allan, J. D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad-Shah, J., Galat, D., Gloss, S., Oodwin, P., Hart, D., Hassett, B., Jenkinson, R., Katz, S., Kondolf, G. M., Lake, P. S., Lave, R., Meyer, J. L., O'Donnell, T. K., Pagano, L., Powell, B. and Sudduth, E., 2005. Synthesizing U. S. river restoration efforts, *Science*, 308, 636-637.
 - Cancienne, R. M., Fox, G. and Simon, A., 2008. Influence of seepage undercutting on

- Slope angles in friable loess, *Journal of Geology*, 76(3), 247-258.
- Midgley, T. L., Fox, G. A. and Heeren, D. M., 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks, *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. Paper 312., *Geomorphology*, 145-146, 107-114
 - Osman, A.M. and Thorne, C.R., 1988. Riverbank stability analysis. Part I: Theory. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 114(2), 125-150.
 - Partheniades, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers*, 91 (1), 105-139.
 - Pollen, N. and Simon, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model, *Water Resources Research*, 41, W07025, doi: 10.1029/2004WR003801.
 - Pollen, N., 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture, *Catena*, 69, 197-205.
 - Pollen-Bankhead, N. and Simon, A., 2009. Enhanced application of root-reinforcement algorithms for bank-stability modeling, *Earth Surface Processes Landforms*, 34(4), 471-480.
 - Rinaldi, M. and Casagli, N., 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy), *Geomorphology*, 26(4), 253-277.
 - Rinaldi, M. and Simon, A., 1998. Bed-level adjustments in the Arno River, Central Italy, *Geomorphology*, 22, 57-71.
 - Rosgen, D., 2001. A practical method of computing stream bank erosion rate. p. 9-15. In *Proc. 7th Federal Interagency Sedimentation Conf.*, Reno, NV. 25-29 Mar. 2001. Vol. 2. USGS, Reston, VA.
 - 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, 452.
 - 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, 243-250.
 - Simon, A. and 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., Curini, A., Darby, S. E. and Langendoen, E. J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*, 35, 183-217.
 - Simon, A. and Rinaldi, M., 2006. Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response, *Geomorphology*, 79, 361-383.
 - Simon, A., Derrick, D., Alonso, C. V. and Pollen-Bankhead, N., 2008. Application of a deterministic bank-stability model to design a reach-scale restoration project, in *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahupua'a [CD-ROM]*, edited by R. W. Babcock Jr. and R. Walton, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.

- Simon, A., Pollen, N. and Langendoen, E., 2006. Influence of two woody riparian species on critical conditions for stream bank stability: Upper Truckee River, California, *Journal of American Water Resource Associates*, 42(1), 99-113.
- Simon, A., Bankhead, N. and Thomas, R. E., 2010. Iterative bank stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions, paper presented at Joint Federal Interagency Conference, Subcommittee on Hydrology and Sedimentology Advisory Committee on Water Info. Las Vegas, Nevada., 27 June to 1 July.
- Simon, A., 1989. A model of channel response in disturbed alluvial channels, *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 11-26.
- 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.
- Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion, gravel bed rivers, editors by Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R., John Wiley & Sons Ltd. 227-271.
- 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., 1998. *Stream Reconnaissance Handbook*. Geomorphological investigation and analysis of river channels. John Wiley & Sons: Chichester, 142.
- Lohnes, R.A. and Handy, R.L., 1968. Slope angles in friable loess, *Journal of Geology*, 76 (3), 247-258.
- 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. J., 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., Burger, J. A., Harpold, A. A., Henderson, M. B. and Henry, L. A., 2004. Variation in root density along stream banks, *Journal of Environmental Quality*, 33, 2030-2039.
- Wynn, T. M. 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*, 42(1), 69-82.