

## شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مخاطرات آن با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه)

محمد مهدی حسین زاده<sup>۱</sup>

سمیه خالقی<sup>۲</sup>

میلااد رستمی<sup>۳</sup>

### چکیده

تغییرات کانال رودخانه، فرسایش کناره‌ای و رسوب گذاری کناره‌ای، فرآیندهای طبیعی رودخانه‌های آبرفتی هستند که باعث تخریب زمین‌های کشاورزی اطراف و خسارت به تأسیسات انسانی اطراف رودخانه می‌شود. هدف این مقاله برآورد میزان پسروی و فرسایش کرانه‌ای در رودخانه گلالی (در بخش خروجی رودخانه از کوهستان در مابین دو روستای گلالی و شیروانه) به منظور ارزیابی تغییرات فعلی (موجود) و بالقوه در فراوانی شکست کرانه (فاکتور ایمنی یا FS) و بار رسوبی حاصل از کرانه رود در دو سناریوی متفاوت ۱۲ و ۲۴ ساعته در سه در بازه مورد مطالعه با استفاده از مدل BSTEM می‌باشد. در این رودخانه هر ساله فرسایش کرانه‌ای قابل توجهی بواسطه وقوع سیلاب‌های بزرگ رخ می‌دهد و چون در پایین دست این قسمت سدهای آبخیز داری احداث شده است برآورد فرسایش و میزان رسوب مهم است. نتایج تحلیل مدل نشان می‌دهد که کل مساحت فرسایش یافته در سناریو اول در بازه‌های مختلف به ترتیب در بازه اول ۰/۲۴۴، در بازه دوم ۰/۳۷۲ و در بازه سوم ۰/۰۵۴ متر مربع بوده است و در سناریو دوم کل مساحت فرسایش

<sup>۱</sup> . دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۲</sup> . استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> . دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

یافته در بازه اول ۰/۲۷۲، در بازه دوم ۰/۱ و در بازه سوم ۰/۰۵۴ بوده است. از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) نیز در سناریو اول در هر سه مقطع ناپایدار بوده و ضریب ایمنی کمتر از یک محاسبه گردیده است اما در سناریو دوم و به دلیل تداوم بارش ضریب ایمنی افزایش یافته که در بازه ۱ و ۲ نزدیک به یک و در بازه ۳ پایدار شده یعنی به بالای ۱ رسیده است. بنابراین که در نتیجه دخالت حفاظت‌های انجام گرفته بر روی کرانه‌های فرسایش پذیر، حجم کلی رسوبات فرسایش یافته از کرانه را می توان کاهش داد.

### واژگان کلیدی: فرسایش کرانه، BSTEM، پایداری کرانه رود، رودخانه گلالی

#### مقدمه

تغییرات کانال رود شامل فرسایش کناره‌ای و ایجاد بریدگی‌ها و رسوب گذاری کناره‌ای فرایندهای طبیعی رودخانه‌ها هستند که باعث تحمیل تغییرات فراوان در حاشیه‌های رودخانه و ایجاد مشکلات طبیعی و خسارات انسانی می شود (گریگوری، ۲۰۰۶: ۲۷۹). فرسایش کناره‌ای در رودخانه‌ها هر ساله خسارات زیادی را به زمین‌های کشاورزی، ساختمان ها، سازه‌های کنار رودخانه، جاده ها، پل‌ها و غیره وارد می کند؛ به علاوه باعث انتقال مقادیر قابل توجهی رسوب به مخازن سدها می شود (حبیبی و همکاران، ۱۳۸۲: ۲۲۷). 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 رود، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهان ایجاد نموده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره‌های رود صرف شده است (Lavendel, 2002: 174). تورن (۱۹۸۲) فرایندهای فرسایشی کرانه رود را به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی نمود: الف) سایش رودخانه ای (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. راه حل‌های متعددی جهت مدل سازی فرسایش کناره‌ای وجود دارد از جمله آنها روش BSTEM می باشد که در این پژوهش از این مدل سازی فرسایش کرانه‌ای در رودخانه

گلالی قروه استفاده شده است. تاکنون تحقیقات زیادی توسط محققین داخلی و خارجی در زمینه مدل‌سازی و فرسایش کناره‌ای صورت گرفته است از جمله: رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) به تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر پرداخته و نتایج با مطالعات صحرایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش‌های مذکور برای بازه‌های آبرفتی نتایج خوبی دارد و بازه اول که ترکیبی از شکل شریانی و پیچانرودی در بستر آبرفتی است، به عنوان بازه ناپایدار و بازه دوم و سوم را که رودخانه بوسیله سنگ بستر و کناره‌ها محدود شده است به عنوان بازه کمابیش پایدار معرفی کردند. اصغری سراسکانرود و زینالی (۱۳۹۲) به بررسی مقاومت ذرات رسوبی در برابر فرسایش رودخانه سراسکاند چای هشتروند پرداختند. نتایج نشان داد که هیچگونه رابطه معنی‌داری بین اندازه قطر دانه‌های رسوبی وجود ندارد و علت آن دخالت عوامل انسانی در تغییر ترکیب طبیعی قطر دانه‌های رسوبی می‌باشد و در اکثر نقاط رودخانه میزان تنش برشی بحرانی بیشتر از تنش برشی کل است که نشان‌دهنده این است که ذرات رسوبی موجود در بستر رودخانه نسبت به فرسایش در بستر رودخانه مقاوم می‌باشند بنابراین رودخانه حالت پایداری دارد و میزان تغییرات رودخانه در آینده بسیار کم و به صورت مقطعی خواهد بود. رضایی مقدم و پیروزی نژاد (۱۳۹۳) به بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب طی ۵۶ سال اخیر پرداختند. نتایج نشان داد سطوح فرسایش یافته بیشتر از سطوح رسوبگذاری شده می‌باشد که این مسئله به دلیل جا به جایی و تغییر مسیر رودخانه بوده است. خالقی و ملکانی (۱۳۹۴) در پژوهشی به برآورد فرسایش کرانه رودخانه ليقوانچای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن پرداخته‌اند که نتایج نشان داد که روش  $(R_c/W_{bkf})$ ، میزان فرسایش‌پذیری کرانه در اکثر مقاطع به جز مقطع ۱۰، کم تا خیلی کم بوده و در روش  $(d_{nb}/d_{bkf})$  در اکثر مقاطع فرسایش‌پذیری کرانه‌ها در حد کم تا متوسط است. اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵) در بررسی تغییرات مورفولوژیک رودخانه شهرچای ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۳ نتیجه گرفت که تغییر الگوی رودخانه کم بوده و میزان تنش برشی کل بیشتر از تنش برشی بحرانی بوده است. اصغری سراسکانرود (۱۳۹۶) در تحلیل شکل مجرای رودخانه قرانقو در بازه کوهستانی نتیجه گرفت که فرسایش

پذیری و تغییرات مجرا توسط لیتولوژی کنترل می‌گردد. سیمون و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی مدل سازی فرسایش کرانه‌ای با استفاده از مدل BSTEM پرداخته‌اند، که نشان داده‌اند کارایی مدل BSTEM به عنوان 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. حسین زاده و همکاران (۱۳۹۶) پایداری رسوبات بستر رودخانه لاویج با استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی را بررسی نمودند و در نهایت نتایج به دست آمده از هر دو روش همخوانی بالایی داشتند و این خود تأییدی بر استفاده از این روش‌ها برای مطالعات پایداری و تولید رسوب رودخانه‌ها می‌باشد. میدگلی و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی تحت عنوان ارزیابی مدل پایداری کناره و فرسایش پای کناره (BSTEM) به پیش‌بینی و عقب‌نشینی کناره رودخانه فارک کریک<sup>۱</sup> در شمال شرقی اکلاهما<sup>۲</sup> پرداختند. بر اساس ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی چندین هیدروگراف را برای جریان‌های مختلف و ویژگی‌های متفاوت در محیط مدل BSTEM شبیه سازی کردن به این نتیجه رسیدن اصلی‌ترین عامل شکست کناره‌ای خصوصیات ژئوتکنیک می‌باشد. هدف این تحقیق بررسی وضعیت پایداری کرانه و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گلالی بوده تا بازه‌های حساس به فرسایش شناسایی شود همچنین کارایی مدل BSTEM در شناسایی مناطق حساس به فرسایش و نرخ پسروری کرانه رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. کوان و سوانسن<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) به پیش‌بینی فرسایش سالانه کرانه رودخانه با استفاده از شاخص خطر فرسایش کرانه (BEHI) و روش تنش برشی نزدیک کرانه (NBS) برای جنگل ملیسکوایا در کالیفرنیا پرداخته‌اند. کلون و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی فرایند پایداری کناره رودخانه و فرسایش پای کناره (BSTEM) پرداخته و به این نتایج دست یافتند که عقب‌نشینی کناره رودخانه یک فرایند پیچیده‌ای است که توسط فرآیندهای زیربری، جریان فرسایشی، آلودگی فرسایشی،

<sup>۱</sup>. Fork Creek

<sup>۲</sup>. Oklahoma

<sup>۳</sup>. Kwan and Swanson

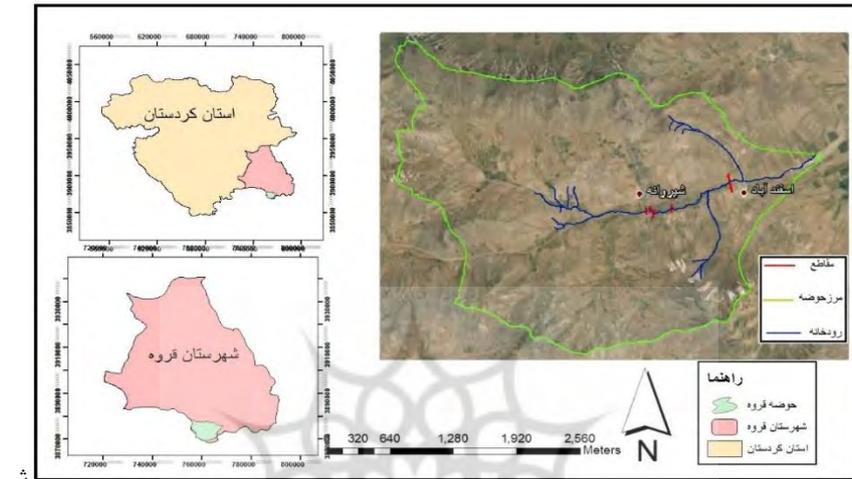
<sup>۴</sup>. Klavon

شکست‌های ژئوتکنیک، توسط جنس خاک، کنترل می‌شوند. مک میلان و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای تحت عنوان "ارزیابی چهارچوب فرسایش کرانه‌ای جریان در دشت ساحلی شمال خلیج مکزیکو" دریافت‌اند که این چهارچوب به پژوهشگران رودخانه اجازه پیش بینی سالانه رسوب حاصل از فرسایش کرانه‌ای در یک منطقه هیدروفیزیوگرافی را می‌دهد. میانگین نرخ اندازه گیری شده فرسایش در بیش از دو سال بیانگر بیشترین تغییرپذیری، در مطالعات انجام شده بر روی کناره‌های رودخانه است. در نتیجه، از نظر آماری انطباق معنی داری را با نرخ اندازه گیری شده فرسایش نشان نداد. تغییرپذیری بالا در نرخ فرسایش اندازه گیری شده به دلیل سیستم هیدرولوژی منطقه و کاراکترهای آب و هوایی دشت‌های ساحلی خلیج مکزیکو و نیز رخداد‌های بزرگ و نادر بارشی می‌باشد. دیگر منابع تغییرپذیری شامل تنوع در پوشش گیاهی کناره رودخانه و هیدرو مورفودینامیک پیچیده کانال‌های مئاندری با بستر ماسه‌ای است. کین و ساس (۲۰۱۷) مقاله‌ای تحت عنوان مدل‌های تکامل کانال به عنوان پیشگوه‌های میزان رسوب را ارائه دادند. آنها در این مقاله بیان نمودند که پارامترهای کمی کانال اجازه پیش بینی فرم پایدار کانال و تولید رسوب هم زمان را می‌دهد. نرخ‌های اندازه گیری شده فرسایش و منحنی‌های فرسایش کناره‌ای خاص حوضه در پیش بینی چهارچوب زمانی توالی کانال جریان کمک کننده هستند. مک میلان و هو (۲۰۱۷) در مقاله یک مدل توزیع فضایی در مقیاس حوضه آبریز برای نرخ فرسایش کرانه جریان مشتق شده توسط پیچش کانال توضیح دادند که فرسایش کرانه‌ای جریان منبع اصلی رسوب رودخانه است اما مدل‌های توزیع فضایی کمی بزرگ مقیاس برای کمی کردن نرخ‌های فرسایش کرانه‌ای وجود دارند. آنها بیان کردند که مدل آنها برای فرسایش کرانه‌ای جریان برای کانال‌های سینوسی و تک کانالی کاربردی و مناسب است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** حوضه آبخیز گلالی در فاصله ۴۳ کیلومتری شهر قروه، در جنوب شرقی استان کردستان و در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه طول جغرافیایی، ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه ۷۵/۲۷ کیلومترمربع، مرتفع ترین قله آن ۳۱۲۴ متر و

کمترین ارتفاع آن ۱۸۲۷ متر است.



کل ۱: حوضه گالالی و بازه مورد مطالعه

برای بررسی مکانیسم‌های اصلی بی‌ثباتی کناره‌های رود و ارائه‌ی 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<sup>۱</sup> (BSTEM) است که بوسیله آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد- می‌سی‌سی‌پی در آمریکا<sup>۲</sup> توسعه یافته است (Taber et al., 2012: 145). این مدل از زمان ایجاد آن تاکنون توسط نویسندگان مختلف به طور پیوسته اصلاح و بهبود یافت. مدل مورد استفاده در این مقاله نسخه ۵.۴.۱ 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<sup>۳</sup>) تعیین می‌شود. فاکتور ایمنی نیز در حالت‌های مختلف کرانه شامل لایه‌های افقی، لغزش‌های قائم و شکست برشی همراه با پیش آمدگی کرانه محاسبه

<sup>۱</sup>-Bank Stability and Toe Erosion Model

<sup>۲</sup>-National Sedimentation Laboratory in Oxford, Mississippi, USA

<sup>۳</sup>- Factor of Safety

می شود. 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 قابلیت محاسبه این نیروها را بر اساس ویژگی های کرانه دارا بوده و با توجه به ویژگی های خاک (با محاسبه و برآورد زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مؤثر، واحد وزن خاک، فشار آب منفذی)، زاویه پایداری کرانه رودخانه مشخص، اندازه گیری و برآورد می شود. همچنین می توان زیربری کرانه رود را که به وسیله فرسایش رودخانه ای ایجاد می شود، برآورد نمود (Simon et al., 2000: 188). این مدل فرسایش را بر اساس معادله تنش برشی مازاد ارائه

شده بوسیله پارزنیادس (Partheniades, 1965: 115) پیش بینی می کند (رابطه ۱).

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

که: نرخ فرسایش (متر بر ثانیه)،: ضریب فرسایش پذیری (مترمکعب بر نیوتن بر ثانیه)،  $\kappa$ : میانگین تنش برشی (کیلوپاسکال)،  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی خاک (کیلوپاسکال) و  $a$ : توانی است که معمولاً معادل ۱ در نظر گرفته می شود. ضریب فرسایش پذیری و تنش برشی بحرانی تابع ویژگی های متفاوت خاک هستند. برای خاک های غیر چسبنده، تنش برشی بحرانی بر پایه متوسط قطر ذرات خاک برآورد می گردد (Garcia, 2008: 38). میانگین تنش برشی نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می شود.

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

که  $\gamma_w$ : وزن واحد آب (۹/۸۱ کیلونیوتن بر متر مکعب)،  $R$ : شعاع هیدرولیک (متر) و  $S$ : شیب کانال (متر بر متر) است. مراحل انجام مدل BSTEM به صورت زیر بوده است:  
**ورود داده های هندسی کرانه<sup>۱</sup>:** این داده ها شامل داده های نیمرخ کرانه، ضخامت لایه های خاک و پارامترهای کانال و جریان است. داده های مورد نیاز این بخش از طریق برداشت های میدانی جمع آوری شد. به این منظور با استفاده از شاخص نقشه برداری و متر لیزری مختصات نقاط مختلف کرانه شامل ارتفاع از بستر و فاصله کرانه اندازه گیری شد. در ادامه تعداد لایه های تشکیل دهنده کرانه مشخص و ضخامت هر یک مشخص گردید. همچنین داده های ارتفاعی و شیب کرانه<sup>۲</sup>، طول و شیب پای کرانه<sup>۱</sup> نیز اندازه گیری شد.

<sup>۱</sup>-Input Geometry

<sup>۲</sup>- Bank

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 برجای مانده در حاشیه رودخانه و طول مدت جریان نیز بر پایه مشاهدات ساکنان محلی بدست آمد.

- **مواد تشکیل دهنده کرانه<sup>۲</sup>**: بخش دیگری از داده‌ها مربوط به ویژگی‌های خاک و مواد تشکیل دهنده لایه‌های کرانه و پای کرانه است. در بازه مورد مطالعه ویژگی‌های خاک از نظر بافت مشخص و وارد مدل شد. این بخش همچنین حاوی محاسباتی برای برآورد تنش برشی بحرانی بر پایه قطر ذرات و یا ورود مقدار تنش برشی محاسبه شده در بازه است که برای بازه مورد مطالعه مقدار تنش برشی بر پایه اندازه‌گیری‌های به عمل آمده و از طریق رابطه ۳ محاسبه و همچنین مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری برای خاک کرانه نیز از طریق رابطه ۴ برآورد گردید (Hanson and Simon, 2001, 25).

$$\tau_c = \theta_c g d (\rho_s - \rho_w) \quad \text{رابطه ۳}$$

که  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی ( $N/m^2$ )،  $d$ : اندازه ذرات رسوبی بستر، این عدد تقریباً نشان‌دهنده قطر  $d_{50}$  رسوبات است.  $\rho_s$ : چگالی رسوب است که تقریباً ۲۶۵۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته می‌شود.  $\theta_c$ : مقدار ثابت بی بعد شیلدز است که تابع شکل ذره، ویژگی‌های سیال و آرایش ذرات سطح است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۲۸).

$$\kappa = 2 \times 10^{-7} \tau_c^{1/2} \quad \text{رابطه ۴}$$

: فرسایش‌پذیری برای خاک (cm<sub>3</sub> (N-s)<sub>-1</sub>)

- **خروجی مدل کرانه<sup>۳</sup>**: 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. به منظور تعیین اهمیت ارتفاع سطح آب نزدیک کناره از روش شبیه‌سازی پاسخ فوری<sup>۴</sup> استفاده گردید. در این روش، سطح آب نزدیک کرانه به طور اتوماتیک منطبق با ارتفاع

<sup>۱</sup>- Toe

<sup>۲</sup>- Bank Material

<sup>۳</sup>- Bank Model Output

<sup>۴</sup>-Instant Response

مراحل جریان رودخانه (فاصله بالاترین نقطه کرانه تا سطح آب رودخانه) مد نظر قرار گرفت. - **خروجی فرسایش پای کرانه**<sup>۱</sup>: این مرحله از مدل، به کاربر اجازه اجرای مدل سازی فرسایش پای کرانه را برای دوره های جریانی خاص می دهد. این بخش از 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 است.

### یافته ها و بحث

به منظور بررسی نرخ فرسایش کرانه ای رودخانه گلالی از مدل BSTEM استفاده شد. در این مطالعه سه مقطع از رودخانه گلالی در فاصله بین روستاهای شیروانه و گلالی به منظور میزان پسروری کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش کرانه کانال شبیه سازی گردید. این شبیه سازی برای دبی لبالی در سه مقطع مورد نظر بر اساس شرایط مناسب از نظر تنوع لایه های تشکیل دهنده کرانه، امتداد مستقیم کانال، در هر بازه ۱۰ متر، شیب یکنواخت بستر، وجود بخش پای کرانه، قابلیت اندازه گیری اندازه رسوب، آثار مرتبط با ارتفاع جریان در دبی لبالی و در نهایت در دسترس بودن بازه ها انتخاب شده است. تنش برشی بحرانی در دبی انتخابی، بیشتر از اندازه ذرات تشکیل دهنده رسوبات پای کرانه یعنی تنش مورد نیاز برای حرکت ذرات فوق بوده است. در این شبیه سازی لازم است دبی هر بازه تبدیل به عمق جریان در بازه های مورد مطالعه شود که برای هر سه بازه این تبدیل صورت گرفته است.

برای هر کدام از مقاطع ابتدا هندسه کانال، ضخامت لایه های مواد تشکیل دهنده کرانه، زاویه شیب، عمق دبی لبالی، مدت زمان جریان دبی لبالی، اندازه رسوبات و تنش برشی وارد مدل گردید و سپس ضریب فرسایش پذیری پای کرانه و میزان فرسایش ناشی از دبی لبالی جریان تخمین زده شد.

<sup>1</sup> - Toe Erosion Output

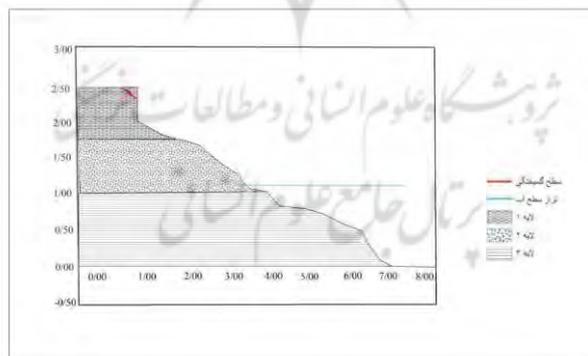
**هندسۀ کانال:** در اولین مرحله داده‌های مرتبط با ژئومتری کرانه از طریق اندازه‌گیری میدانی تهیه و وارد مدل گردید (جدول ۱ و ۲). بر اساس مختصات وارد شده نیمرخ کرانه‌ها ترسیم و پارامترهای جریان استخراج و وارد مدل شد (شکل ۲) (جدول ۳) شکل ۳ نیز تصویر کرانه و چگونگی اندازه‌گیری میدانی را درمنطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱: ارتفاع و شیب کرانه، طول و شیب پای کرانه در بازه مورد مطالعه

مقاطع	ارتفاع کناره (متر)	شیب کرانه (زاویه)	طول پای کرانه (متر)	شیب پای کرانه (زاویه)
۱	۱/۷	۲۳/۳	۰/۸	۲۳/۲
۲	۳/۸	۳۱/۰	۱/۰	۱۷/۴
۳	۱/۴	۲۲/۹	۰/۸	۲۰/۵

جدول ۲: ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده کرانه در بازه مورد مطالعه

ترتیب لایه از بالا	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴
ضخامت لایه‌ها در مقطع ۱	۰/۷۰	۰/۷۵	۱/۰۰	-
ضخامت لایه‌ها در مقطع ۲	۲/۷۰	۱/۷۰	۰/۵۰	-
ضخامت لایه‌ها در مقطع ۳	۱/۱۰	۰/۳۰	۱/۲۰	۰/۵۵



شکل ۲: نیمرخ کرانه بر اساس مختصات وارد شده شامل مختصات، ارتفاع و شیب کرانه، طول و زاویه پای کرانه و ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده آن در مقطع یک



شکل ۳: تصویر کرانه رودخانه گلالی و نحوه اندازه گیری پروفیل کرانه رودخانه.

جدول ۳: پارامترهای جریان و کانال جهت شبیه سازی در بازه مورد مطالعه

مقاطع	طول بازه (متر)	شیب بازه (متر بر متر)	عمق دبی لبالی (متر)	مدت زمان جریان دبی لبالی (ساعت)
۱	۱۰	۰/۰۲۳	۱/۱۰	۱۲
۲	۱۰	۰/۰۲۴	۰/۷۵	۱۲
۳	۱۰	۰/۰۱۷	۰/۷۵	۱۲

**مواد تشکیل دهنده کرانه:** کرانه رودخانه در بازه اول از سه لایه تشکیل شده که به صورت افقی لایه بندی شده است، این مواد به ترتیب از بالا به پایین شامل شن و ماسه ریز، شن و ماسه درشت و گراول است و مواد پای کرانه نیز از گراول تشکیل شده است. بازه دوم از نظر لایه بندی رسوبات تشکیل دهنده کرانه مشابه بازه اول بوده است. در بازه سوم کرانه رودخانه از چهار لایه تشکیل شده که به صورت افقی لایه بندی شده است؛ این مواد به ترتیب از بالا به پایین شامل ماسه ریز، ماسه درشت، ماسه و قلوه سنگ و قلوه سنگ تشکیل شده است و مواد پای کرانه از گراول تشکیل شده است (جدول ۴).

جدول ۴: مواد تشکیل دهنده کرانه در بازه مورد مطالعه

ترتیب لایه از بالا	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴
مواد تشکیل دهنده در مقطع ۱	شن و ماسه ریز	شن و ماسه درشت	گراول و قلوه سنگ	-
مواد تشکیل دهنده در مقطع ۲	ماسه	ماسه درشت و گراول	گراول	
مواد تشکیل دهنده در مقطع ۳	ماسه ریز	ماسه درشت	ماسه قلوه سنگ	قلوه سنگ

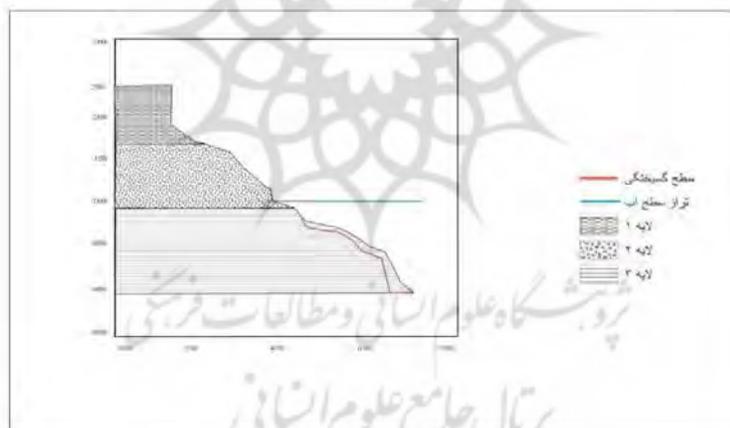
بر اساس مواد تشکیل دهنده کرانه، مشخصه‌های پیش فرض مدل شامل زاویه اصطکاک، چسبندگی، وزن بلوک خاک مرطوب و زاویه شکست مربوط به هر یک از مقاطع تعیین گردید. در این بخش تنش برشی بحرانی برای حرکت یک ذره مورد نیاز است. با استفاده از رابطه ۳ تنش برشی مورد نیاز برای حرکت ذرات تشکیل دهنده کرانه (d) در هر سه مقطع محاسبه شد. با توجه به اینکه (d) برای بازه اول ۶۴ میلیمتر است، در نتیجه مقدار تنش برشی بحرانی ۹۵/۶۶ نیوتن بر متر مربع یا پاسکال تخمین زده شده است. بر پایه تنش برشی بحرانی محاسبه شده ضریب فرسایش پذیری  $0/01 (cm^3/N-s)$  بدست آمد و در مقطع دوم با توجه به اینکه (d) برای بازه دوم ۹۰ میلیمتر است در نتیجه مقدار تنش برشی بحرانی بازه ۱۰۹/۲۴ نیوتن بر متر مربع یا پاسکال تخمین زده شده است. بر پایه تنش برشی بحرانی محاسبه شده ضریب فرسایش پذیری برای مقطع دوم  $0/01 (cm^3/N-s)$  به دست آمد اما در مقطع سوم با توجه به اینکه (d) برای بازه سوم ۹۰ میلیمتر است در نتیجه مقدار تنش برشی بحرانی ۶۴/۰۴ نیوتن بر متر مربع یا پاسکال تخمین زده شده است. بر پایه تنش برشی بحرانی محاسبه شده ضریب فرسایش پذیری  $0/012 (cm^3/N-s)$  بدست آمد. با وجود تفاوت مقدار تنش برشی بحرانی در مقاطع دوم و سوم، به دلیل اختلاف زیاد شیب در این دو بازه، ضریب فرسایش پذیری آنها نزدیک به هم و تقریباً مشابه شده است.

**شبیه سازی پای کرانه:** در این مرحله تأثیرات دبی لبالی در هر سه مقطع شبیه سازی گردید تا مقدار فرسایش هیدرولیک (در صورت وقوع) و تغییر هندسه پای کرانه تعیین گردد. برای انجام این شبیه سازی مقادیر دبی لبالی برای مقاطع مورد نظر وارد مدل گردید. میزان فرسایش ناشی از جریان دبی لبالی در یک دوره ۱۲ ساعته برای مقاطع مورد نظر در جدول ۵ نشان داده شده است. شکل ۳ نتیجه شبیه سازی دبی لبالی بر روی کناره کانال در بازه‌های مورد مطالعه را نشان می دهد.

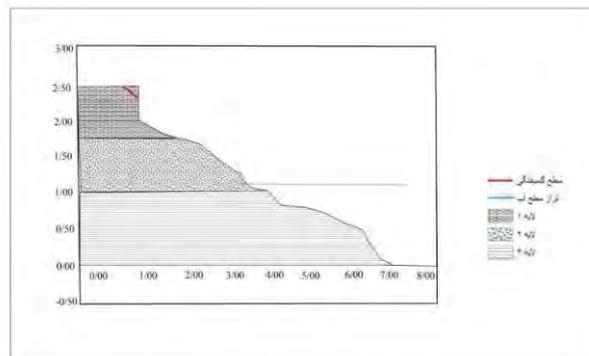
جدول ۵: میزان فرسایش ناشی از دبی لبالبی جریان در دوره ۱۲ ساعته برای بازه‌های مورد مطالعه

مقاطع	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	حداکثر پسروی عرضی (سانتی متر)	مساحت فرسایش یافته کرانه (متر مربع)	مساحت فرسایش یافته پای کرانه (متر مربع)	مساحت فرسایش یافته بستر (متر مربع)	کل مساحت فرسایش یافته (متر مربع)
۱	۸۲/۰۳	۰	۰/۰۴۲	۰/۲۰۲	۰	۰/۲۴۴
۲	۸۴/۶۴	۰	۰	۰/۳۰۶	۰/۰۶۶	۰/۳۷۲
۳	۶۶/۶۴	۰	۰	۰/۰۵۴	۰	۰/۰۵۴

هندسسه جدید کانال به بخش محاسبه پایداری کرانه منتقل تا میزان پایداری نسبی کرانه و نتایج اعمال شده بر کرانه استخراج شود ( شکل ۴). جدول ۶ نشان دهنده میزان پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی لبالبی سیل در دوره ۱۲ ساعته بر روی کرانه‌های مورد مطالعه است.



شکل ۴: نتایج شبیه سازی فرسایش کرانه در تراز دبی لبالبی در مقطع ۱



شکل ۵: میزان پایداری کرانه در دبی لبالبی در مقطع ۱

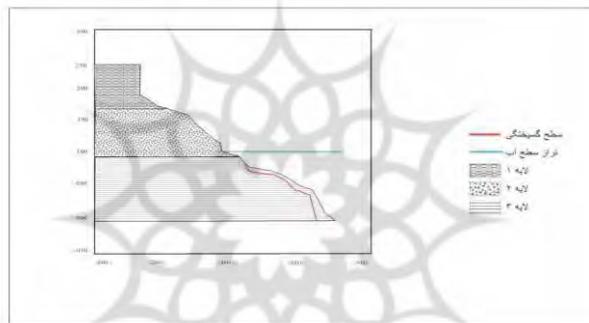
جدول ۶: پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی لبالبی در دوره ۱۲ ساعته بر روی کرانه

مقاطع	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (درجه)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (متر مکعب)	بار رسوب تولیدی (تن)	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)
۱	۲/۳	۶۰	۰/۱۰	۰	۰/۱۳۶	۰
۲	۰/۷۳	۳/۶	۴۵	۰/۳۵	۳	۶/۶۲۳
۳	۰/۹۳	۱/۹	۲۸/۷	۰/۰۲	۰	۰/۶

در مرحله قبل شبیه سازی فرسایش کرانه‌ای برای دبی لبالبی در مقطع مورد مطالعه به صورت مستقل صورت گرفت. اما در ادامه یعنی سناریو دوم، توالی دبی سیل شبیه سازی شده و تأثیر آن بر مورفومتری کرانه کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله در ابتدا تأثیرات اولین جریان (دبی لبالبی) شبیه سازی می‌شود تا مقدار فرسایش هیدرولیک و تغییر در هندسه منطقه پای کرانه تعیین گردد. هندسه جدید کانال به بخش مدل پایداری کرانه منتقل تا میزان پایداری نسبی کرانه مشخص شود. اگر ضریب ایمنی (FS) بزرگتر از ۱ باشد، هندسه کانال به روز نخواهد شد و واقعه جریانی جدید شبیه سازی می‌شود. اگر ضریب ایمنی (FS) کمتر از ۱ باشد، شکست کرانه شبیه سازی شده و نتایج سطح شکست هندسه جدید کرانه برای شبیه سازی فرسایش پای کرانه برای رویداد جریانی جدید (دبی لبالبی)

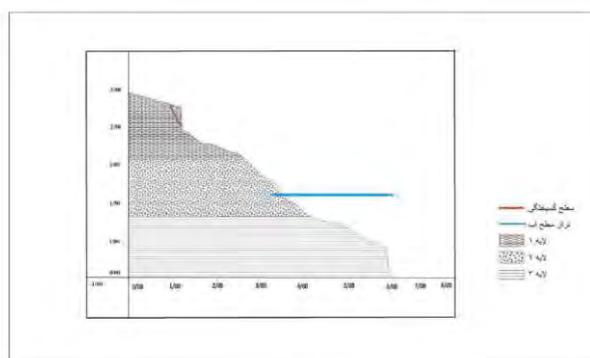
خواهد شد. لازم به ذکر است که ضریب ایمنی (FS) بزرگتر از ۱ نشانه پایداری کانال و ضریب ایمنی (FS) کمتر از ۱ نیز نشان دهنده ناپایداری و فرسایش پذیری کرانه کانال است.

در بازه مورد مطالعه، در ابتدا تأثیرات دبی لبالبی در مدل اعمال گردید ( شکل ۵). نتایج حاصل از شبیه سازی در بخش پای کرانه و کرانه و میزان ناپایداری آن در جدول ۹ نشان داده شده است. در بازه مورد نظر، کرانه و پای آن از لحاظ پوشش گیاهی بدون حفاظت در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: شبیه سازی کرانه در دبی لبالبی در سناریوی دوم

با اجرای مدل با شرایط جدید، وضعیت فرسایش و ناپایداری کرانه به شرح جدول ۹ و ۱۰ خواهد بود. در ادامه چون ضریب ایمنی (FS) در مقطع ۱ کوچکتر از ۱ یعنی ۰/۷۸، در مقطع ۲ کوچکتر از ۱ یعنی ۰/۵۹ بود (شکل ۶)، هندسه کانال به روز شده و واقعه جریانی جدید (دبی لبالبی) شبیه سازی شده و نتایج آن در جدول ۹ و ۱۰ ذکر شده است. اما در مقطع سوم چون ضریب ایمنی (FS) برابر ۱ بود، هندسه کانال به روز نشده و واقعه جریانی جدید (دبی لبالبی) شبیه سازی شده و نتایج آن در جدول ۹ و ۱۰ آمده است.



شکل ۷: میزان پایداری نسبی کرانه در دبی لبالی در سناریوی دوم در مقطع

جدول ۹: میزان فرسایش ناشی از دبی لبالی در دوره ۱۲ ساعته در سناریو دوم برای بازه مورد مطالعه

مقاطع	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	حداکثر پسروی عرضی (سانتی متر)	مساحت فرسایش یافته کرانه (متر مربع)	مساحت فرسایش یافته پای کرانه (متر مربع)	مساحت فرسایش یافته بستر (متر مربع)	کل مساحت فرسایش یافته (متر مربع)
۱	۸۸/۵۹	۰	۰/۰۹۶	۰/۱۷۶	۰	۰/۲۷۲
۲	۹۷/۵۶	۰	۰	۰/۱	۰	۰/۱
۳	۷۲/۷۶	۰	۰	۰/۰۵۴	۰	۰/۰۵۴

جدول ۱۰: پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی لبالی در دوره ۱۲ ساعته در سناریو دوم

مقاطع	FS	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (درجه)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (متر مکعب)	بار رسوب تولیدی (تن)	عمق سطح آب زیرزمینی (متر)
۱	۰/۷۸	۲	۴۵	۰/۳۲	۰	۰/۲۸	۰
۲	۰/۵۹	۰/۴	۴۵	-۶/۶۵	۳۱	۳۸/۴۶۷	۰
۳	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰

### نتیجه گیری

به منظور شناخت پسروی کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش

کرانه کانال، شبیه سازی فرسایش کرانه‌ای در سه مقطع مختلف بر اساس عمق و دوره جریان در وضعیت سیل ۱۲ ساعته و ۲۴ ساعته بر روی سه بازه از رودخانه گلالی انجام گرفت. پسروری محاسبه شده کناره در سناریوی‌های مختلف و در بازه‌های مورد مطالعه در این رودخانه متغیر بوده است. کل مساحت فرسایش یافته در سناریوی اول در بازه‌های مختلف به ترتیب در بازه اول ۰/۲۴۴، در بازه دوم ۰/۳۷۲ و در بازه سوم ۰/۰۵۴ متر مربع بوده است. و در سناریوی دوم کل مساحت فرسایش یافته در بازه اول ۰/۲۷۲، در بازه دوم ۰/۱ و در بازه سوم ۰/۰۵۴ بوده است. از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) نیز در سناریو اول در هر سه مقطع ناپایدار بوده و ضریب ایمنی کمتر از یک محاسبه گردیده است. اما در سناریو دوم و به دلیل تغییر شیب کناره ناشی از جریان اولیه، ضریب ایمنی افزایش یافته که در بازه ۱ و ۲ نزدیک به یک و در بازه ۳ پایدار شده یعنی به بالای ۱ رسیده است. لازم به ذکر است که با وجود افزایش پایداری کرانه‌ها، به دلیل افزایش عرض شکست احتمالی، در صورت شکست کرانه میزان بار رسوب تولیدی بیشتر از سناریوی اول خواهد بود. بنابراین در سناریوی اول شاهد ناپایداری کرانه‌ها و پسروری کرانه‌ها بوده در حالی که در سناریوی دوم شکستی رخ نداده اما فرسایش رسوب از کرانه‌ها مشاهده شده و میزان پسروری کرانه در مقاطع مختلف نزدیک به سناریوی اول بوده است. نتیجه حاصل از این شبیه سازی گویای این امر است که کرانه‌های مختلف به دلیل دارا بودن چند لایه از جنس متفاوت و میزان شیب کرانه و پای کرانه متفاوت دارای فرسایش و بار رسوبی متفاوتی هستند. به این دلیل که لایه‌های شن و ماسه ریز و درشت که توسط گراول و قلوه سنگ درشت تحکیم نیافته اند فقط در جریان‌های سیلابی بزرگ فرسایش یافته و زیر بری دامنه و ناپایداری رخ می دهد اما در جریان‌های معمولی که پایینتر از دبی لبالی است نمی توان انتظار فرسایش کناره‌ای و پسروری کناره را داشت. علت فرسایش و ناپایداری بیشتر در مقطع ۱ بالا بودن میزان شیب پای کرانه، شیب بستر و ارتفاع کرانه می باشد و در مقطع ۲ نیز به دلیل بالا بودن ارتفاع کرانه، طول پای کرانه و شیب پای کرانه نسبت به مقطع سوم است. اما مقطع سوم نسبت به مقاطع اول و دوم پایدارتر است که علت آن پایین بودن شیب بستر، شیب پای کرانه و ارتفاع پای کرانه است. بیرانوند (۱۳۹۶) در مطالعه مشابه با استفاده از مدل BSTEM بر روی رودخانه لاریج به این نتیجه رسیده است که با استفاده از مدل

BSTEM می‌توان پس‌روی دیواره و پنجه کناره رودخانه و همچنین میزان حجم رسوبات را در سناریوهای مختلف (دبی‌های متفاوت) در رودخانه‌های مناطق کوهستانی به دست آورد. همچنین کلون و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی فرآیند پایداری کناره رودخانه و فرسایش پای کرانه با استفاده از مدل BSTEM پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که عقب‌نشینی کناره رودخانه یک فرآیند پیچیده است که توسط فرآیندهای زیر بری، جریان فرسایشی، آلودگی فرسایشی، شکست‌های ژئوتکنیک و جنس خاک کنترل می‌شوند. نتایج به دست آمده از این مدل با مشاهدات میدانی مورد بررسی قرار گرفت. شواهد بررسی شده در سه مقطع نشان داد که نتایج به دست آمده با واقعیت همپوشانی داشته و نشان می‌دهد می‌توان از مدل BSTEM جهت مطالعه و برآورد فرسایش کرانه‌ای و وضعیت پایداری رودخانه مورد مطالعه و حتی رودخانه‌های منطقه استفاده کرد.

**منابع:**

- اسماعیلی، رضا؛ حسین زاده، محمد مهدی؛ متولی، صدر الدین، (۱۳۹۰)، *تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه ای*، انتشارات لاهوت، صص ۲۲۸.
- اصغری سراسکانرود، (۱۳۹۵)، بررسی پتانسیل تغییرات مورفولوژیک رودخانه‌ها هر چای ارومیه، *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۵۷، صص ۴۹-۶۲.
- اصغری سراسکانرود، (۱۳۹۶)، تحلیل شکل مجرای رودخانه قرقو در بازه کوهستانی (حدفاصل روستای خراسانک شهرستان هشتروود تا شهرستان میانه)، *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۶۰، صص ۱۹-۲۵.
- اصغری سراسکانرود، صیاد؛ زینالی، بتول، (۱۳۹۲)، بررسی مقاومت ذرات رسوبی در برابر فرسایش رودخانه سراسکانرود با استفاده از روش‌های ریاضی، *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، سال سوم، شماره ۱۲، صص ۳۰-۴۲.
- حسین زاده، محمد مهدی؛ صدوق، سید حسن؛ متش بیرانوند، سعیده؛ اسماعیلی، رضا، (۱۳۹۶)، بررسی پایداری رسوبات بستر رودخانه لاریج با استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی. *پژوهش‌های دانش زمین*، شماره ۸ (۱)، صص ۷۵-۸۶.
- حسین زاده، محمد مهدی؛ اسماعیلی، رضا، (۱۳۹۴)، *ژئومورفولوژی رودخانه ای، مفاهیم، اشکال و فرآیندها*، تهران، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- حبیبی، مهدی؛ جواهری، نصرالله، (۱۳۸۲)، مدل ریاضی پیش بینی فرسایش کناری در پیچان رودها، *نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران*، جلد ۳۷، شماره ۲، صص ۲۲۷-۲۳۴.
- خالقی، سمیه، (۱۳۹۴)، تعیین دبی مقطع پر و توان جریان رودخانه ليقوان چای بر اساس ویژگی‌های مورفومتری کانال، *پژوهش‌های دانش زمین*، ۷(۴)، صص ۱۳۹-۱۵۲.
- خالقی، سمیه؛ ملکانی، لیلا، (۱۳۹۴)، برآورد فرسایش کرانه رودخانه ليقوان چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن، تهران، کنگره بین المللی جغرافیا و توسعه پایدار.
- رضایی مقدم، محمد حسین؛ پیروزی نژاد، نوشین، (۱۳۹۳)، بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- رضایی مقدم، محمد حسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد، (۱۳۹۱)، وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، شماره ۱، صص ۳۳-۴۶.

- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H., (1993), *Soil Mechanics of Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 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.
- Gregory, K.J., (2006), The Human role in changing River Channels *Geomorphology*, 84, pp. 277-296.
- Hanson, G.J.; Simon, A., (2001), Erodibility of cohesive sediment in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15, pp. 23° 28.
- Keane, T. D.; Sass, C. K., (2017), Channel Evolution Models as Predictors of Sediment Yield, *Journal of the American Water Resources Association*, 53(6), pp.1513-1529.
- Kwan, H.; Swanson, S., (2014), Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California, *Journal of the American Water Resources Association*, 50(6), pp. 1439-1447.
- Klavon, K.; Fox, G.; Guertault, L.; Langendoen, E.; Enlow, H.; Miller, R.; Khanal, A., (2017). Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), pp.191-213.
- Lavendel, B., (2002), The business of ecological restoration, *Ecological Restoration*, 20, pp. 173° 178.
- McMillan, M.; Hu, Z., (2017), A watershed scale spatially- distributed model for streambank erosion rate driven by channel curvature, *Geomorphology*, 294, pp. 146-161.
- McMillan, M.; Liebens, J.; Metcalf, C., (2017), Evaluating the BANCS Streambank Erosion Framework on the Northern Gulf of Mexico Coastal Plain. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(6), pp.1393-1408.
- Partheniades, E., (1965), Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers*, 91 (1), pp. 105° 139.
- Simon, A.; Curini, A.; Darby, S. E., Langendoen, E. J., (2000), Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*, 35,

pp.183° 217.

- Simon, A.; Bankhead, N.; 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, Subcomm. On Hydrol. And Sediment., Advis. Comm. on Water Info. Las Vegas, Nev., 27 June to 1 July.
- Taber L.; Midgley, T. L.; Fox, G. A.; Heeren, D. M., (2012), Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite stream banks, *Geomorphology*, 145, pp. 107-114.
- 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.

