

## بررسی پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای ناشی از جریان سطحی با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه بشار)

مجید خزایی<sup>۱</sup>، احمد نوحه‌گر<sup>۲\*</sup>، رسول مهدوی نجف‌آبادی<sup>۳</sup> و عبدالرسول تلوری<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه هرمزگان

۲. استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

۳. عضو هیئت علمی آبخیزداری دانشگاه هرمزگان

۴. سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری کشور

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۴/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۶/۱۹)

### چکیده

یک نیاز حیاتی برای مدیریت رودخانه، درک و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای است. بیشتر مدل‌های موجود؛ فرسایش کناره‌ای را به‌طور صریح بررسی نمی‌کنند. مدل BSTEM از پرکاربردترین مدل‌های استفاده‌شده در بسیاری از پروژه‌های مهندسی رودخانه در دنیاست. داده‌های مورد نیاز برای این مدل مختص به نیروهای کمی محرک و مقاوم‌کننده کناره رودخانه است که فرایندهای هیدرولیک و ژئوتکنیک را که روی بانک وارد می‌شود کنترل می‌کنند. داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های ژئومتری، هیدرولیکی و ژئوتکنیکی است. این داده‌ها با نمونه‌برداری، اندازه‌گیری میدانی و بررسی آزمایشگاهی به‌دست آمدند. نتایج مدل‌سازی در مقاطع بررسی‌شده نشان داد که در مقایسه بین مقاطع دارای پوشش و فاقد پوشش تفاوت شایان توجهی از نظر پایداری مشاهده شده است. میزان ضریب ایمنی در مقاطع فاقد پوشش کمتر از ۱ بوده است که بیانگر ناپایداری کناره رودخانه در این مقاطع است. در میان مقاطع دارای پوشش تنها مقطع ۳ در رگبار ۴ ضریب ایمنی کمتر از ۱ داشته است که از لحاظ میزان پایداری، ناپایدار بوده است. مقایسه مقاطع بررسی‌شده از نظر فاکتور ایمنی نشان داده‌اند که ناپایدارترین بازه‌ها به‌ترتیب مقاطع ۵، ۶، ۸، ۷، ۳، ۱، ۴ و ۲ بوده است. در مقایسه رگبارهای مختلف نیز به‌ترتیب رگبارهای ۴، ۲، ۱ و ۳ بیشترین تأثیر را روی ناپایداری مقاطع نشان داده‌اند. نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی نشان داد که فاکتور ایمنی بیشترین میزان حساسیت را نسبت به ارتفاع جریان، تراز آب و چسبندگی بین ذرات به‌ترتیب با ضریب تغییرات ۵۵، ۱۷ و ۱۰ درصد داشته است.

**کلیدواژگان:** رودخانه بشار، فاکتور ایمنی، فرسایش پنجه‌ای، فرسایش کناری، مدل، ناپایداری.

## مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده آب برای انسان و سایر موجودات به‌شمار می‌آیند. یک نیاز حیاتی برای مدیریت رودخانه، درک و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای و فرایندهای رودخانه‌ای است. از جمله آسیب‌های ناشی از فرسایش کناره‌ای رودخانه‌ها مشکلات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی شایان توجه است [۳۳ و ۳۵]. مطالعات متعددی فرسایش کناره‌ای را به‌عنوان عامل اصلی مسائل مختص به کیفیت آب و تخریب رودخانه‌ها [۱۲، ۲۶ و ۳۰]؛ و منبع اصلی بار رسوب معلق رودخانه‌ها دانسته‌اند [۳، ۱۵ و ۳۴]. در سراسر جهان روش‌های مختلفی برای بررسی میزان فرسایش کناره‌ای رودخانه‌ای استفاده شده است. تصاویر لیدار<sup>۱</sup>، میخ فرسایشی، رادیونوکلئیدهای پرتوزا و مدل‌های عددی، همگی به‌منظور برآورد فرسایش کناره‌ای رودخانه استفاده شده‌اند. مدل یکی از روش‌های ارزیابی فرسایش کناره‌ای است. از بین مدل‌های ارائه‌شده توسط محققان، مدل‌های عددی فرسایش کناره‌ای را به‌طور صریح بررسی نمی‌کنند، در نتیجه، استفاده محدودی برای بررسی پاسخ ژئومرفیک رودخانه دارند. از میان مدل‌های عددی، مدل‌های یک‌بعدی قادر به مدل‌سازی فرسایش کناره‌ای یا فرایند پیچان‌رودی نیستند زیرا آنها نمی‌توانند جریان پیچیده را که در رودخانه‌ها رخ می‌دهد مدل کنند. از طرفی مدل‌های چندبعدی مستلزم داده‌های ورودی زیادی برای شبیه‌سازی فرسایش کناره‌ای هستند [۵، ۲۰، ۲۸ و ۳۱] و در نتیجه بررسی فرسایش کناره‌ای در این مدل‌ها هزینه‌بر و مشکل است. همچنین مدل‌های عددی از نظر واسنجی و اعتبارسنجی محدودیت دارند.

بسیاری از مدل‌های فرسایش در حوضه آبخیز ماژول‌هایی برای پیش‌بینی حمل رسوب، روندیابی و فرسایش بستر دارند، اما اغلب به سهم فرسایش کناره‌ای در بار رسوب توجهی نمی‌کنند [۲۱]. مدل‌های پایداری دیواره کناره کناری رودخانه عمومی‌ترین مدل‌های استفاده‌شده برای بررسی مکانیسم پایداری کناره رودخانه و پیشنهاد استراتژی‌های پایداری رودخانه است. از عمومی‌ترین و پیشرفته‌ترین مدل‌های استفاده‌شده در این زمینه مدل پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM)<sup>۲</sup> است که

توسط آزمایشگاه ملی رسوب‌گذاری<sup>۳</sup> آمریکا ایجاد شده و توسعه یافته است [۳۱]. این مدل به‌منظور پیش‌بینی فرایند گسترش کانال توسعه یافته است که یک مدل دقیق، قوی و انعطاف‌پذیر است و در بسیاری از پروژه‌های مهندسی رودخانه در دنیا به‌کار رفته است [۱۷ و ۱۸]. این مدل از دو جزء مختلف پایداری کناره رودخانه و فرسایش پنجه‌ای تشکیل شده است. مدل BSTEM تا کنون برای بررسی فرایندهای مختلف از جمله شبیه‌سازی پایداری کناره و عقب‌نشینی جانبی رودخانه [۳۲]، تخمین بار رسوب معلق رودخانه [۳۲] و اقدامات احیا و بازسازی رودخانه [۲۰] به‌کار گرفته شده است. با این حال، مطالعات اندکی کاربرد مدل BSTEM را برای بررسی فرسایش کناره‌ای و پایداری رودخانه مطالعه کرده است [۵ و ۲۲]. مکانیسم‌هایی از جمله فرسایش پنجه‌ای در نتیجه زیرشویی کناره رودخانه و پوسته‌ای شدن دیواره رودخانه در نتیجه حذف مکش ماتریکس به ایجاد شکست دیواره کناره رودخانه و بارگذاری رسوب می‌انجامد [۸ و ۳۰] که این فرایندها در مدل BSTEM بررسی می‌شود. مدل پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM) به خصوصیات فیزیکی و ژئومتریک کناره رودخانه از جمله چسبندگی مؤثر، طول صفحه گسیختگی دیواره کناره، زاویه و شیب دیواره کناره، زاویه گسیختگی دیواره، مکش ماتریکس یا فشار منفذی آب و هوا، بستگی دارد [۴]. در ارتباط با استفاده از مدل‌های پایداری برای بررسی فرایندهای رودخانه‌ای تحقیقات معدودی انجام شده است که در بخش زیر به تعدادی از آنها اشاره شده است.

امیری تکلدانی و همکارانش [۲]، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۵۱ محل در مسیر رودخانه می‌سی‌سی‌پی، مدل تحلیل پایداری ساحل رودخانه (EMSAR)<sup>۴</sup> را ارائه دادند. صمدی و همکارانش [۲۹] یک مدل گسترده برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه و به زبان برنامه‌نویسی فورترن ارائه دادند. در این مدل تحلیل پایداری ساحل رودخانه براساس تئوری‌های مبتنی بر روش گسیختگی محتمل صورت می‌پذیرد. پارکر و همکارانش [۲۴] اثر تغییرپذیری خصوصیات مواد کناره رودخانه را روی پایداری رودخانه با استفاده از مدل

3. National Sedimentation Laboratory

4. Extensive Model of Stability Analysis of Riverbank

1. Lidar

2. Bank Stability and Toe Erosion Model

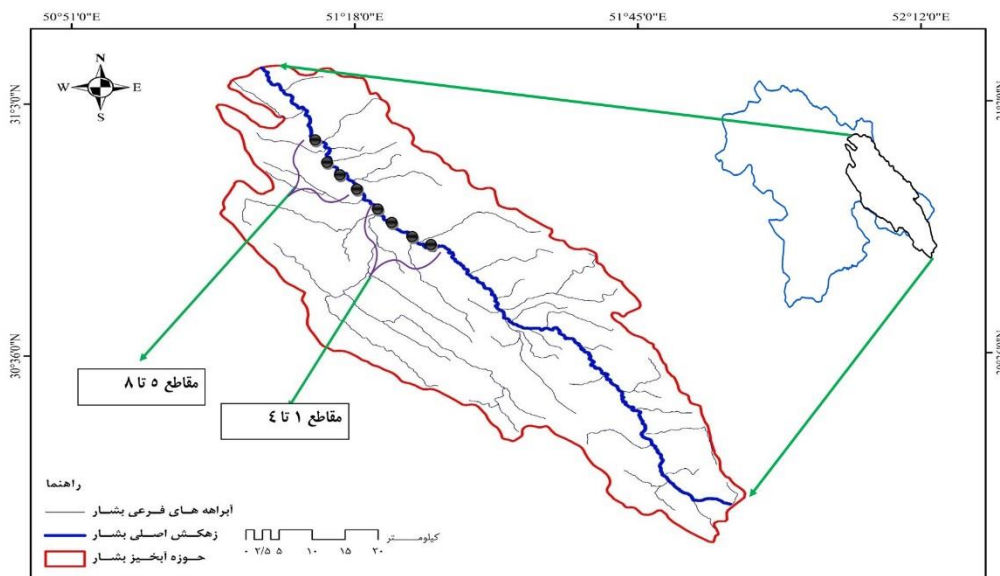
صورت گرفته نشان داده است که در داخل کشور مدل جامعی انجام نشده است که به بررسی پایداری کناره، فرسایش پنجه، پیش‌بینی میزان عقب‌نشینی و تعیین میزان گسیختگی پرداخته باشد. منابع خارجی نیز بیانگر اعتبار زیاد مدل پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای در بررسی پایداری رودخانه‌هاست. هدف از این تحقیق، بررسی پایداری و ناپایداری، میزان عقب‌نشینی و تعیین میزان گسیختگی ناشی از فرسایش کناری و پنجه‌ای در بازه‌ای از رودخانه‌ی بشار با استفاده از مدل پایداری و فرسایش پنجه‌ای BSTEM برای مدیریت رودخانه است.

### مواد و روش

#### منطقه مطالعه شده

بر این اساس تحقیق حاضر در رودخانه‌ی بشار به لحاظ اهمیتی که این رودخانه در توسعه و بهره‌برداری از آن در سطح ملی و همچنین مسائل زیست‌محیطی دارد، صورت گرفته است. حوضه‌ی آبخیز بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد در محدوده‌ی جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۸ درجه ۵۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۲۵ دقیقه تا ۵۱ درجه ۵۶ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). بررسی مطالعات زمین‌شناسی نشان داد که رودخانه‌ی بشار از سازندهای آسماری، پابده و گورپی، سازند گچساران، طبقات سنگ آهک سازند آسماری، کنگلومرای بختیاری، طبقات تبخیری و آواری مارنی-کنگلمویرایی سازند رازک عبور می‌کند. از لحاظ اقلیمی رودخانه‌ی بشار در اقلیم سرد واقع شده است. متوسط ریزش‌های جوئی این حوضه معادل ۸۵۸ میلی‌متر بوده است. براساس آمار ایستگاه هیدرومتری پاتاوه واقع در پایین‌دست حوضه‌ی آبخیز بشار، متوسط آبدهی این رودخانه برابر ۵۳/۴ مترمکعب بر ثانیه است که بیشترین و کمترین آبدهی به ترتیب برابر با ۱۰۶/۵ و ۱۸/۵۵ مترمکعب بر ثانیه است. ارتفاع رواناب معادل آورد سالیانه برابر با ۲۷۸/۵ میلی‌متر و دبی ویژه ۸/۸ لیتر در ثانیه در کیلومترمربع است.

BSTEM بررسی کردند. نتایج نشان داد که هیچ اختلاف معناداری بین تغییرات درون‌مکانی (مقیاس میکرو) و بین‌مکانی (مقیاس مزو) در خصوصیات مواد کناری وجود ندارد. در حالی که هر دو اثر معناداری روی پایداری کناری رودخانه دارند. میدگلی و همکارانش [۲۲] با استفاده از مدل BSTEM عقب‌نشینی دیواره‌ی کناری رودخانه‌ی Barren Fork Creek در شمال شرق اوکلاهاما<sup>۱</sup> در فاصله‌ی زمانی آپریل تا اکتبر ۲۰۰۹ را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان عقب‌نشینی جانبی رودخانه در اواسط تا اواخر ماه می تا سپتامبر به علت رگبارهای سیلابی اتفاق افتاده است. مدل BSTEM برای رودخانه‌ی مطالعه‌شده هشت مرتبه با داده‌های ورودی پیش‌فرض و اندازه‌گیری شده مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل یادشده میزان فرسایش واقعی را کمتر از میزان واقعی تخمین زده است. کارماکر و همکارانش [۱۴] گزارش دادند در محل‌هایی از رودخانه‌ی آبرفتی که گسیختگی کناری غالب است، فرسایش ناشی عامل مهمی در گسیختگی کناری است که اغلب نادیده گرفته می‌شود. بر این اساس رابطه‌ای بین نسبت فرسایش ناشی و متغیرهای کنترل‌کننده با استفاده از آزمایش‌های لیسمتری برقرار کردند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد لایه‌های سیلتی در پروفیل کناره‌ی رودخانه سبب اثر معنادار در زمان تخریب کناره‌ی رودخانه دارد. نسبت فرسایش ناشی پیش‌بینی شده توسط مدل مطابقت زیادی با میزان عقب‌نشینی اندازه‌گیری شده نشان داده است. کانسوئر و همکارانش [۱۶] تغییرات مکانی در مقاومت کناره‌ها به فرسایش در مئاندرهای بزرگ در رودخانه‌ی آبرفتی-کوهستانی را با استفاده از مدل BSTEM و تصاویر لیدار برای ارزیابی پتانسیل خصوصیات مواد کناری برای تعدیل نسبت و مکانیسم عقب‌نشینی کناره‌ی رودخانه بررسی کردند. نتایج نشان داد که خصوصیات مواد کناری، چسبندگی خاک و تنش برشی بحرانی بین دو خم (پیچ) متفاوت و تغییرات زیادی بین دو پیچ در حالت‌های عمودی و جانبی دارد. نتایج این مطالعه بیانگر تغییرپذیری زیاد خصوصیات مقاوم به فرسایش مواد کناری کانال به‌عنوان یک فاکتور مهم تغییرپذیری مکانی در مکانیسم فرسایش کناری بوده است. جمع‌بندی مرور منابع

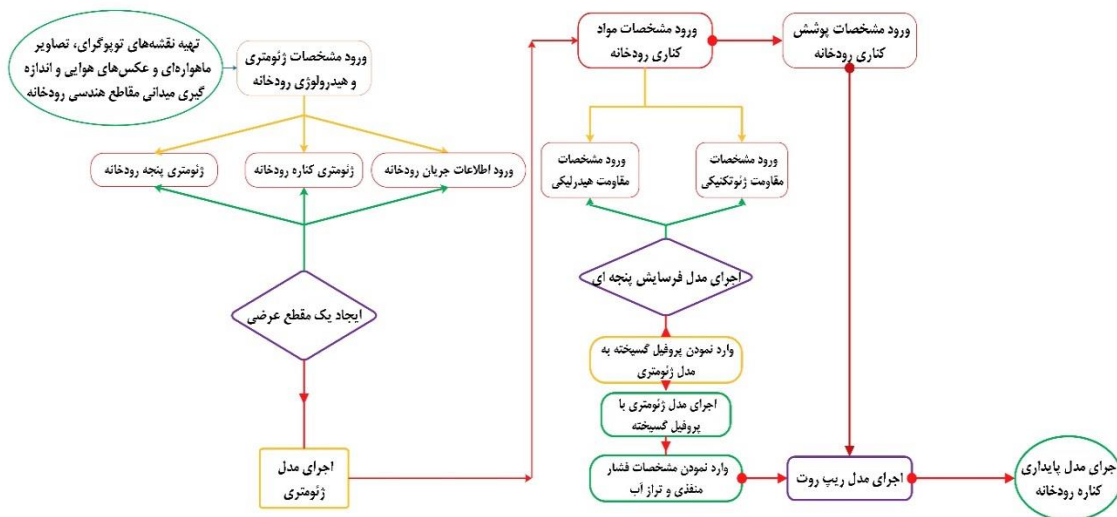


شکل ۱. نمایی از نقشه استان کهگیلویه و بویر احمد، حوضه آبخیز رودخانه بشار و مکان‌های بررسی شده

روش کار

ابتدا توسط نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای نقشه رودخانه اصلی بشار تهیه، سپس از طریق بازدیدهای صحرائی مسیر رودخانه بررسی شد. از طریق نقشه‌برداری‌های صورت‌گرفته، نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۰۰۰ رودخانه تهیه و ریخت رودخانه از طریق نرم‌افزار AutoCAD بررسی شد. با توجه به نقشه وضعیت

فرسایش کناری به‌دست‌آمده از بازدیدهای صحرائی، نقشه توپوگرافی، ریخت‌سنجی و زمین‌شناسی چهار مکان از رودخانه برای مطالعات پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای تعیین شد. در بخش زیر در ارتباط با چگونگی استفاده از مدل BSTEM توضیحات لازم ارائه شده است. در شکل ۲ نمایی از مراحل مدل‌سازی فرسایش کناری و پنجه‌ای با استفاده از مدل BSTEM ارائه شده است



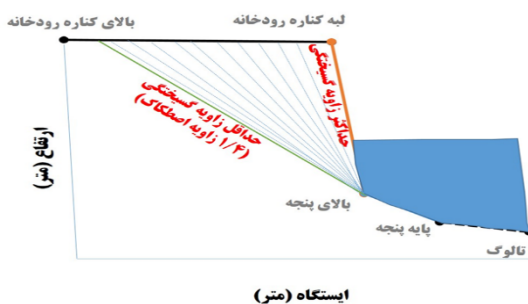
شکل ۲. روند نمایی از مدل‌سازی فرسایش کناری و پنجه‌ای با استفاده از مدل BSTEM

چگونگی مدل‌سازی پایداری کناره رودخانه با استفاده از مدل پایداری BSTEM در مکان‌های انتخاب

۱. ورود خصوصیات ژئومتریکی (هندسه) رودخانه مثل مشخصات پروفیل کناره از جمله ارتفاع کناره، ارتفاع پنجه، زاویه کناره و پنجه، ضخامت لایه‌های خاک، پارامترهای جریان (ارتفاع جریان، زمان جریان آب در بازه، شیب جریان) و نقطه ظهور سطح برشی.

اندازه‌گیری این پارامترها در عرصه با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و اندازه‌گیری دستی انجام گرفت.

تنظیم مقطع عرضی برای سواحل چپ و راست گام بسیار مهمی در ایجاد گسیختگی‌های مناسب از لحاظ فیزیکی است. اجزای تشکیل‌دهنده یک مقطع عرضی شامل بخش‌های زیر است (شکل ۳):



شکل ۳. تعیین نقاط ایستگاهی برای نیمه از مقطع عرضی مدل BSTEM

۳. خصوصیات حفاظتی و پوشش گیاهی کناره: اجرای مدل تقویت ریشه

۴. ورود مشخصات عمق تراز آب و عمق ترک کششی. اندازه‌گیری این پارامترها به صورت دستی و روش‌های محاسباتی صورت گرفت.

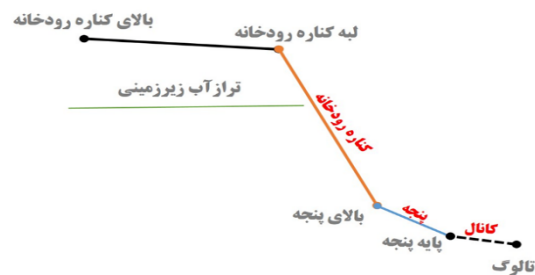
در مدل BSTEM فاکتور ایمنی از نسبت بین میزان نیروهای مقاوم نسبت به نیروهای فرساینده محاسبه می‌شود که نیروی مقاوم از طریق رابطه موهر-کلمب<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود:

$$S_r = c + (\delta - \mu_w) \tan \phi \quad (1)$$

که در این رابطه  $S_r$  مقاومت برشی خاک برحسب کیلوپاسکال،  $c$  ضریب چسبندگی خاک برحسب کیلوپاسکال،  $\delta$  تنش نرمال برحسب کیلوپاسکال،  $\mu_w$  فشار منفذی آب برحسب کیلوپاسکال و  $\phi$  زاویه مؤثر داخلی خاک به درجه

مدل دینامیک پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM-Dynamic)

مدل BSTEM از سه روش تعادل حدی برای محاسبه فاکتور ایمنی در چندین لایه دیواره کناری رودخانه استفاده می‌کند [۲۲ و ۳۰]. روش‌های به کاررفته در این مدل برای لایه‌های افقی، قطعات عمودی و مایل به کار می‌رود. مدل یادشده نیاز به تعیین خصوصیات ژئومتریکی (ارتفاع، طول، شیب، شکل، پروفیل کناره، ضخامت لایه خاک)، پارامترهای کانال (عرض، عمق، شیب و درجه انحنا)، پارامترهای جریان (سرعت، تنش برشی)، ویژگی‌های خاک (توزیع اندازه ذرات، ضخامت لایه‌های خاک)، خصوصیات هیدرولیکی و مواد کناری رودخانه (اندازه، درجه بندی و میزان چسبندگی، پوشش گیاهی) است.



در شکل ۳، بالای کناره بخش نسبتاً عریض مقطع عرضی؛ کناره، عمیق‌ترین بخش مقطع عرضی؛ پنجه، شیب ملایم بین کناره و کانال است که از بلوک‌های از موادی که سقوط کردند و در انتهای کناره جمع شده‌اند و پنجه را حفاظت کرده‌اند اطلاق می‌شود و کانال، ناحیه بین پنجه و تالوک است.

۲. خصوصیات مواد کناری رودخانه: مثل خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی از جمله زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی مؤثر، وزن مخصوص مواد کناره، تنش برشی بحرانی، فرسایش‌پذیری مواد کناره، دانه بندی ذرات خاک. برای اندازه‌گیری این پارامترها از طریق نمونه‌برداری به وسیله استوانه و جک هیدرولیکی و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مکانیک خاک اداره راه و اندازه‌گیری از روش دستگاه برش مستقیم صورت گرفت.

برای خاک‌های غیرچسبنده نیز استفاده می‌شود. تنش برشی میانگین براساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$t_o = \gamma_w RS \quad (4)$$

که در آن  $\gamma_w$  وزن واحد حجم خاک ( $\lambda/9$ )، R شعاع هیدرولیکی برحسب متر و S شیب کانال برحسب متر بر متر است.

این مدل پروفیل کناره را به چندین گره جداگانه تقسیم می‌کند و برای هر یک از گره‌ها میزان  $\tau_o$  محاسبه می‌شود. با توجه به زیادبودن معادلات، برای توضیحات بیشتر در ارتباط با مدل BSTEM به منابع [۷، ۲۸، ۳۳، ۳۰، ۳۱ و ۳۲] مراجعه شود.

#### بررسی گسیختگی ژئوتکنیکی

در مدل پایداری کناره از الگوریتم جست‌وجوی تصادفی برای حداقل کردن FS استفاده می‌شود. FS از نسبت بین نیروهای مقاوم به نیروهای گسیختگی محاسبه می‌شود. مقدار واحد نشان می‌دهد که نیروهای گسیختگی نسبت به نیروهای مقاوم مساوی هستند و شکست حتمی است (FS = 1.0). ناپایداری تحت هر شرایطی که نیروهای محرک از حدی پایدار زمانی تجاوز کند اتفاق می‌افتد ( $FS < 1$ )، شرایط تا  $1/3$  باشد و در حالت شرایط پایدار کناره  $FS > 1/3$ . عامل ایمنی (FS) در روش لایه افقی برابر است با:

$$\frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - \mu_{ai} L_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi_i^i)}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin[\alpha - \beta])} \quad (5)$$

#### مدل ریپرپ

بررسی تأثیرات چسبندگی بر اثر پوشش کناری وو و همکارانش [۳۵] معادله‌ای توسعه دادند که افزایش مقاومت برشی را به‌عنوان تابعی از مقاومت کششی ریشه، تراکم فضایی و کج‌شدگی ریشه را در طول برش برآورد می‌کند.

$$C_r = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^I T_r A_r [SIN(90 - \zeta) + \cos(90 - \zeta) \tan \phi] \quad (6)$$

است [۹]. وزن خاک به‌عنوان نیروی محرک است که به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$S_d = w \sin(\beta) \quad (2)$$

که در آن  $S_d$  تنش محرک ناشی از وزن خاک و w وزن قطعه خاک مرطوب در هر واحد سطح گسیختگی دیواره برحسب ( $KN.M^2$ ) و  $\beta$  زاویه سطح گسیختگی برحسب درجه است [۳۱].

مؤلفه‌های مدل فرسایش پنجه‌ای، زیرشویی خاک را در نتیجه فرسایش رودخانه‌ای تخمین می‌زند. این مدل فرسایش را براساس معادله تنش برشی پیش‌بینی می‌کند. در این معادله نسبت فرسایش به‌صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$E = K (t_o - t_c) \quad (3)$$

که در آن K ضریب فرسایش‌پذیری،  $\tau_o$  تنش برشی میانگین و  $\tau_c$  تنش برشی بحرانی خاک است. این پارامترها تابع خصوصیات خاک هستند و براساس قطر متوسط ذرات خاک محاسبه می‌شوند [۱۲]. پارامترهای k و  $\tau_c$  تابع خصوصیات متعددی از خاک هستند. به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیکی رودخانه (K و  $\tau_c$ ) برای خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده از طریق محاسبه  $D_{50}$  برآورد می‌شود [۳۱]. این روابط به‌صورت تجربی برای خاک‌های چسبنده توسعه داده شدند، در صورتی که توسط BSTEM

که در آن  $C_i^i$  چسبندگی مؤثر لایه i ام (کیلوپاسکال)،  $L_i =$  طول صفحه شکست گنجانده‌شده در لایه i ام  $(M)$ ،  $W_i =$  وزن لایه i ام (KN)،  $P_i =$  نیروی محدودکننده هیدرواستاتیکی به‌علت سطح آب اضافی (کیلونیوتن بر متر) که در لایه i ام وارد می‌سازد،  $\beta =$  زاویه صفحه شکست (درجه از افق)،  $\alpha =$  زاویه بانک محلی (درجه از افقی) و I = تعداد لایه.

از اطلاعات نقشه ۱/۲۰۰۰، از طریق اندازه‌گیری‌های صحرایی مشخصات سواحل از جمله ارتفاع کناره، زاویه کناره، طول کناره، طول پنجه، زاویه پنجه، زاویه خروج سطح برشی، شیب کانال، زاویه سطح برشی به دست آمد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

تمام اطلاعات یادشده در بخش ژئومتریک مدل وارد شد. علاوه بر مشخصات ژئومتریک، ضخامت لایه‌های خاک در کناره‌هایی که لایه‌های خاک چینه‌بندی داشت نیز در بخش ژئومتریک مدل وارد شد. کناره‌های دیوار رودخانه را می‌توان به وسیله داخل کردن ضخامت لایه کناره، تقسیم‌بندی کرد. استفاده از چندین لایه با خصوصیات خاک مشابه به علت لحاظ مؤلفه‌های پایداری کناره، فشار مغذی آب و وزن خاک غیراشباع سبب زیاد شدن اعتبار نتایج تحقیق می‌شود. مشخصات ژئوتکنیکی که در مدل پایداری مورد نیاز است شامل قطر متوسط ذرات، قطر ذرات غیرچسبنده، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی، فرسایش‌پذیری و وزن مخصوص اشباع خاک و تنش برشی بحرانی است. مشخصات ژئوتکنیکی برای تعدادی از مقاطع اندازه‌گیری شده در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین بعد از بررسی سیل‌های سال‌های مختلف با توجه به نوع سیل مورد نیاز برای ورود به مدل، چهار سیل انتخاب شد که مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

که در آن  $C_r$  چسبندگی به علت ریشه‌ها (کیلوپاسکال)،  $T_r$  مقاومت کششی ریشه (کیلوپاسکال)،  $A_r$  مساحت ریشه‌ها در نیم‌رخ سطح برشی (مترمربع)،  $A$  مساحت سطح برشی (مترمربع)،  $I$  تعداد کل ریشه‌ها در مقطع عرضی صفحه برشی است.

### یافته‌ها

در این تحقیق به علت اهمیت رودخانه بشار در شهرستان یاسوج و تغییرات مرفولوژی و ریخت‌سنجی آن بر اثر عوامل انسانی و سیلاب‌های سالانه و ناپایداری بازه‌هایی از رودخانه‌ها به اندازه‌گیری پارامترهای ضروری برای اجرای مدل اقدام شد. بر این اساس ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، خط ساحل رودخانه در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی رقومی شد. سپس مشخصات ریخت‌سنجی رودخانه در نرم‌افزار AUTOCAD محاسبه شد. همچنین بعضی از مشخصات رودخانه نیز با نقشه‌برداری از بازه‌هایی که از مطالعات صحرایی ناپایداری بیشتری در آنها قابل مشاهده بود به دست آمد.

مشخصات ریخت‌سنجی که بیشترین کاربرد را در مدل پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای دارد؛ شعاع انحنا، عرض رودخانه و ارتفاع جریان است که ارتفاع جریان در بخش مدل پایداری و شعاع انحنا و عرض رودخانه در مرحله اجرای مدل فرسایش پنجه‌ای مورد نیاز است. برای انجام اندازه‌گیری‌های ژئومتریک ساحل رودخانه علاوه بر استفاده

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف خاک برای ورود به مدل BSTEM

شماره پروفیل	لایه	زاویه اصطکاک	چسبندگی	وزن مخصوص اشباع	مکش ماتریک
۱	۱	۳۵/۸	۰/۱	۱۹	۱۰
	۲	۳۱	۰/۴	۱۸	۱۰
۲	۱	۳۸/۲	۰	۱۸	۱۰
	۲	۳۵	۰/۱	۱۸	۱۰
۳	۱	۳۷	۰/۳	۱۸	۱۰
	۲	۲۹	۱/۲	۱۶/۵	۱۰
۴	۱	۲۹	۴/۶	۱۷	۱۰
	۲	۲۷	۱/۴	۱۶/۳۳	۱۰

جدول ۲. مشخصات هیدرولوژیکی رگبارهای انتخاب شده برای مدل سازی پایداری رودخانه

رگبار ۴	رگبار ۳	رگبار ۲	رگبار ۱	
۹۳	۹۸	۹۸	۹۳	اشل پایه
۲۷۰	۳۳۵	۲۴۵	۲۷۶	اشل پیک
۳	۴/۱۵	۲/۳۵	۲/۳	ارتفاع کناره
۰/۵	۱/۵	۰/۸	۱	ارتفاع تراز آب در پایین کناره
۲	۳	۱/۷	۱/۵	ارتفاع جریان ورودی
۲۴	۴۱	۷۳	۲۴	مدت جریان ورودی

جدول ۳. وضعیت و درصد پوشش گیاهی و سازه های حفاظتی در پروفیل های بررسی شده

چسبندگی ناشی از پوشش	گونه های درختی موجود در کناره رودخانه بشار					
	مقطع	گزر	بید	بلوط	چنار	فاقد پوشش
۱/۹	۱۰	-	-	۵۰	۴۰	۱
۱/۴	۳۰	-	-	۴۰	۳۰	۲
۱	۵۰	-	-	۲۵	۲۵	۳
۰/۸	۷۰	-	-	۱۵	۱۵	۴
۰	۱۰۰	-	-	-	-	۵
۰	۱۰۰	-	-	-	-	۶
۰	۱۰۰	-	-	-	-	۷
۰	۱۰۰	-	-	-	-	۸

### اطلاعات پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی برای ورود به مدل

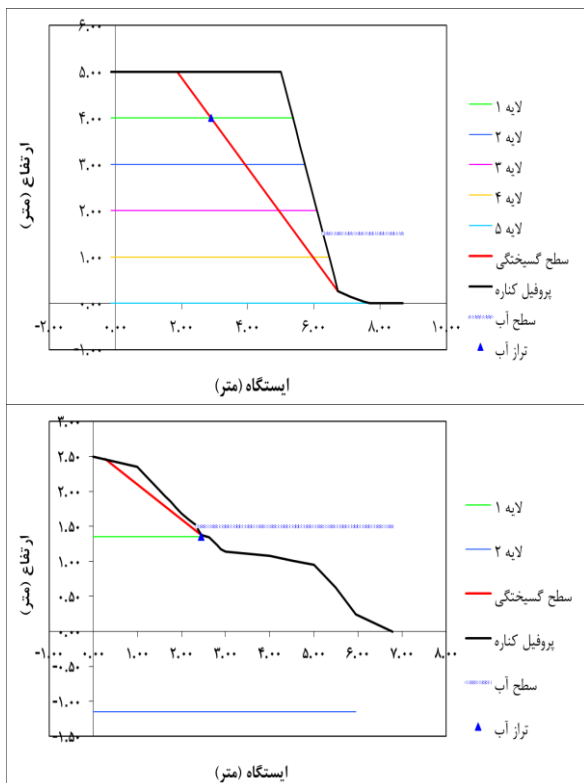
مدل BSTEM قابلیت بررسی تأثیرات پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی رودخانه را نیز در قالب مدل ریپروت ارائه کرده است. با توجه به تأثیرات تثبیت کننده پوشش مخصوصاً پوشش درختی تأثیرات گونه های موجود بر پایداری کناری رودخانه نیز بررسی شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. در زیرمدل ریپرپ مقادیر چسبندگی بر اثر پوشش گیاهی با دانستن سن گونه ها و مساحت تحت پوشش قابل محاسبه است.

یکی از مؤلفه های مهم کلیدی نیروهای مقاوم کننده مقاومت برشی در برابر نیروهای برشی، مقاومت ژئوتکنیکی مواد کناری است. مطالعات زیادی اهمیت مقاومت مواد ژئوتکنیکی خاک را در پایداری رودخانه ها گزارش داده اند [۹، ۲۸ و ۳۱]. در این میان زاویه اصطکاک ( $\Phi$ ) یک پارامتر ژئوتکنیکی کلاسیک است که مقاومت برشی خاک را مشخص می کند. زاویه اصطکاک از معیار گسیختگی موهر-کلمب به دست می آید که زاویه تمایل در دیاگرام موهر-

کلمب کلاسیک است؛ که معیاری برای محاسبه مقاومت خاک است و نباید با زاویه پاسخ اشتباه شود. در مواردی که ارتفاع آب زیرزمینی بیشتر از ارتفاع سطح آب کناره باشد، مقاومت اصطکاکی کناره کاهش می یابد و کناره تنها با چسبندگی نگه داشته می شود که این عامل زاویه سطح گسیختگی سطحی تری (کم عمق تری) ایجاد می کند. این پارامتر به وسیله جمع آوری نمونه های خاک در صحرا و انجام آزمایش های برش مستقیم در آزمایشگاه اندازه گیری شد. یکی دیگر از پارامترهای ژئوتکنیکی بسیار مهم در مقاومت برشی و فرسایش پذیری کناره، چسبندگی بین ذرات است. چسبندگی نیروی جاذب بین ذرات خاک معمولاً نتیجه نیروهای پیوند بیولوژیکی و الکتروشیمیایی است. این نیروها سبب افزایش مقاومت ماتریک خاک می شود. به طور کلی، چسبندگی در خاک های درشت دانه مثل گراول و بزرگ تر، صفر است، ولی برای خاک های چسبنده مثل سیلت و رس این میزان افزایش می یابد. چسبندگی از داده های مشابه با زاویه اصطکاک محاسبه شده است. در ارتباط با مواد کناری رودخانه، تنش مؤینگی (زاویه ای که رابطه بین مکش ماتریک برشی و



[۲۴] گزارش داده‌اند که متغیرهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و وزن واحد خاک تغییرپذیری زیادی از لحاظ مکانی دارد و باید در هر مکان این خصوصیات اندازه‌گیری شود. بدین‌علت در جایی که به مقادیر واقعی و درست احتیاج است، به جمع‌آوری داده‌ها توسط کاربر نیازمندیم. در این تحقیق بخشی از داده‌های ژئوتکنیکی به‌صورت نمونه‌برداری در مکان و اندازه‌گیری در آزمایشگاه و بخشی نیز به‌صورت اندازه‌گیری در مکان‌های بررسی‌شده تعیین شدند. این نکته در خورد یادآوری است که به‌منظور اعتبارسنجی مدل، در بخش ورود مواد کناری رودخانه، خصوصیات خاک‌شناسی و ژئوتکنیکی مواد کناری از جمله زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی، وزن مخصوص اشباع خاک و مکش ماتریک (فشار منفذی مثبت یا منفی) در چند مکان اندازه‌گیری و نتایج با مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار ارزیابی شدند. همچنین برای تعیین میزان حساسیت مدل به پارامترهای ورودی به محاسبه فاکتور ایمنی در مقادیر مختلف عمق ترک کششی، زاویه و ارتفاع بانک، ارتفاع جریان، تراز آب، چسبندگی و مکش ماتریک اقدام شد که فاکتور ایمنی واکنش‌های متفاوتی را نسبت به تغییر این پارامتر نشان داده است (شکل ۵).



شکل ۴. نمودار گسیختگی عرضی مقاطع بررسی‌شده

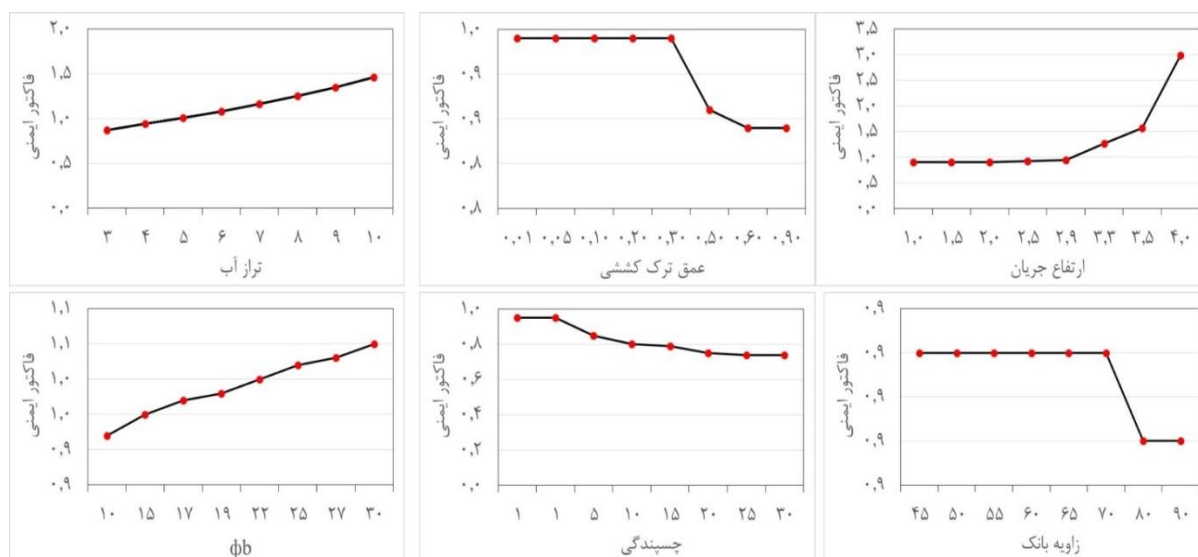
چسبندگی ظاهری را نشان می‌دهد) سبب ایجاد فشار منفذی یا مکش ماتریک می‌شود. مکش سبب مقاومت گسیختگی کناره و افزایش مقاومت برشی ماتریک خاک می‌شود. در الگوریتم‌های گسیختگی کناره، مکش به‌عنوان چسبندگی ظاهری یا معادل افزایش چسبندگی مورد نیاز برای افزایش مقاومت برشی شناخته می‌شود. تنش موئینگی تابع رطوبت خاک است. به‌طور کلی، برای بیشتر مواد این عامل بین ۱۰ تا ۳۰ درجه و بسته به نوع خاک متغیر است. اندازه‌گیری این پارامتر بسیار مشکل است. در بیشتر مطالعات صورت‌گرفته این ضریب از ۱۰ و ۱۵ شروع می‌شود. هنگامی که مواد کناری اشباع باشد، این ضریب سبب حداکثر کردن زاویه اصطکاک می‌شود. به‌علت طبیعت برآوردی این پارامتر از آن به‌عنوان فاکتور واسنجی استفاده و مقادیر آن از ۱۰ تا ۳۰ تغییر داده شد.

پارامترهای فرسایش‌پذیری از جمله تنش برشی بحرانی و تنش برشی کناره مجموعه‌ای ثانوی از پارامترها هستند که بیشتر آنالیز گسیختگی کناره را مشخص می‌کنند. آنها فرسایش‌پذیری خاک‌ها را در پاسخ به نیروهای هیدرودینامیک اندازه‌گیری می‌کنند. بهترین روش برای برآورد این پارامترها تست جت و آزمایش‌های SEDFLUME است. با توجه به نبود این دستگاه در بسیاری از کشورها، رابطه‌ای برای محاسبه این پارامترها در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده ارائه کردند که در تحقیق حاضر نیز از آنها استفاده و نتایج در جدول ۱ ارائه شد. بعد از محاسبه و اندازه‌گیری هر یک از پارامترها، مدل پایداری کناره اجرا شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. این مدل می‌تواند عرض، حجم گسیختگی، میزان بارگذاری رسوب در کل بازه و بیشترین عقب‌نشینی جانبی در محل اندازه‌گیری‌شده را مشخص کند. همچنین با استفاده از خصوصیات اندازه‌گیری‌شده، مدل فرسایش پنجه‌ای نیز اجرا شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شد.

همان‌طور که گفته شد داده‌های پارامتری مثل، زاویه اصطکاک داخلی خاک، مقاومت برشی خاک، چسبندگی، فرسایش‌پذیری، مکش ماتریک و تنش برشی بحران تغییرپذیری طبیعی و عدم قطعیت دارند و تغییرپذیری در هر یک از این فاکتورها سبب ایجاد عدم قطعیت در پیش‌بینی عقب‌نشینی کناره رودخانه می‌شود. در این زمینه بول [۴] نیز نتایج مشابهی گزارش داده است. همچنین پارکر و همکارانش

جدول ۴. نتایج خروجی مدل پایداری کناره و فرسایش پنجاهی در بازه‌های شبیه‌سازی شده

سیلاب ۱								فرسایش پنجاهی مدل پایداری	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر) مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع) عرض گسیختگی (متر) حجم گسیختگی (مترمکعب) فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
دارای پوشش				فاقد پوشش					
مقطع ۱	مقطع ۲	مقطع ۳	مقطع ۴	مقطع ۵	مقطع ۶	مقطع ۷	مقطع ۸		
۱۵/۴۰	۲۲/۱۲	۸/۶۱	۵۰/۵۸	۱۴/۶۴	۱/۴۲	-۰/۳۴	۷/۳۲	فرسایش	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)
۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	پنجاهی	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)
				-۰/۸۷	۲/۵۰	۳/۱۳	۲/۲۰	مدل	عرض گسیختگی (متر)
				۱۰/۸۱	۱۵۷۴	۱۴۸۴	۴۴۰	پایداری	حجم گسیختگی (مترمکعب)
۲/۲۱	۱۱/۵۶	۱/۳۷	۴/۹۲	-۰/۱۳	-۰/۲۷	۱	۰/۶۳		فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
سیلاب ۲								فرسایش پنجاهی مدل پایداری	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر) مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع) عرض گسیختگی (متر) حجم گسیختگی (مترمکعب) فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
دارای پوشش				فاقد پوشش					
مقطع ۱	مقطع ۲	مقطع ۳	مقطع ۴	مقطع ۵	مقطع ۶	مقطع ۷	مقطع ۸		
۵۲/۷۵	۲۰/۴۵	۴۴/۴۷	۶۷/۸۴	۱۴/۶۴	۵/۵۶	۱/۳۸	۷/۳۲	فرسایش	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)
۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۵۵	۱/۵۳	۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰	پنجاهی	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)
				-۰/۴۷	۲/۳۸	۳/۰۹	۲/۲۷	مدل	عرض گسیختگی (متر)
				۴۷۰	۱۵۰۰	۱۴۶۶	۹۹۰	پایداری	حجم گسیختگی (مترمکعب)
۱/۶۳	۱۸/۸۳	۱/۳۷	۲/۶۳	-۰/۱۱	-۰/۲۶	-۰/۹۸	۰/۶۲		فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
سیلاب ۳								فرسایش پنجاهی مدل پایداری	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر) مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع) عرض گسیختگی (متر) حجم گسیختگی (مترمکعب) فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
دارای پوشش				فاقد پوشش					
مقطع ۱	مقطع ۲	مقطع ۳	مقطع ۴	مقطع ۵	مقطع ۶	مقطع ۷	مقطع ۸		
۷۱/۰۲	۸۴/۷۷	۶۴/۶۴	۵۷/۰۸	۱۴/۶۴	۷/۵۹	۹/۱۳	۷/۳۲	فرسایش	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)
۱/۱۹	۱/۲۶	۱/۲۵	۱/۹۳	۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰	پنجاهی	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)
				-۰/۸۴	۲/۷۴	۲/۱۱	۲/۱۱	مدل	عرض گسیختگی (متر)
				۱۰۴۰	۱۷۴۱	۹۱۹	۹۱۹	پایداری	حجم گسیختگی (مترمکعب)
۴/۶۴	۶/۴۸	۱/۰۵	۴/۱۱	-۰/۲۶	-۰/۳۱	۱/۳۱	۱/۰۱		فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
سیلاب ۴								فرسایش پنجاهی مدل پایداری	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر) مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع) عرض گسیختگی (متر) حجم گسیختگی (مترمکعب) فاکتور ایمنی (بی‌بعد)
دارای پوشش				فاقد پوشش					
مقطع ۱	مقطع ۲	مقطع ۳	مقطع ۴	مقطع ۵	مقطع ۶	مقطع ۷	مقطع ۸		
۴۱/۰۶	۳۰/۰۷	۱۸/۷۹	۷۰/۷۷	۱۴/۶۴	۲/۴۴	۰/۶۲	۷/۳۲	فرسایش	بیشترین عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)
۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۳۲	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	پنجاهی	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)
				-۰/۱۱	۲/۱۷	۳/۰۲	۲/۱۳	مدل	عرض گسیختگی (متر)
				۳۷/۳۳	۷۹/۵۰	۱۴۳۱	۹۲۸	پایداری	حجم گسیختگی (مترمکعب)
۲/۴۸	۵/۳۴	۰/۵۸	۳/۲۹	-۰/۰۵	-۰/۲۳	-۰/۹۷	۰/۵۹		فاکتور ایمنی (بی‌بعد)



شکل ۵. میزان حساسیت مدل به تغییرات بعضی از پارامترهای ورودی

نظر گرفته شده است که تأثیرات پوشش را بر پایداری بررسی کرده است. در مجموع، نتایج مدل فرسایش کناری و پنجه‌ای مشخص است که بازه‌ای که در منطقه فاقد پوشش قرار دارد با توجه به وضعیت هندسی‌ای که دارد از نظر پایداری، ناپایدار است و در مسائل مهندسی رودخانه و سیلاب به ساماندهی و مدیریت نیاز دارد. نمودار گسیختگی نیم‌رخ عرضی رودخانه در دو مقطع به صورت نمونه ارائه شده است (شکل ۴).

در ارتباط با ضریب ایمنی این نکته درخور یادآوری است که استفاده از لایه‌های چینه‌شناسی براساس جنس لایه‌ها (شن، سیلت و رس)، سبب تقریب فرسایش خواهد شد. در این حالت عدم قطعیت شایان توجه و تغییرات زیادی در مقادیر انتخاب شده برای هر نوع مواد وجود دارد. از این رو به کاربران توصیه می‌شود که یک حاشیه امن در زمان استفاده از بانک چندلایه برای ضریب اطمینان لحاظ شود مخصوصاً زمانی که بانک، به‌عنوان ساحل پایدار طبقه‌بندی می‌شود. این حاشیه ایمن ممکن است بین ۱/۳ - ۱/۵ بسته به چگونگی وضعیت ساحل رودخانه (بانک) قرار می‌گیرد.

به‌منظور دستیابی به نتایج قطعی‌تر باید عواملی مثل شعاع انحنای مسیر رودخانه و ترک کششی نیز بررسی شود به این دلیل که وضعیت انحنای رودخانه در جهت جریان مؤثر بوده است که خود عامل مهمی در میزان فرسایش کناری است. این عوامل نیز توسط نویسنده انجام شده است که با توجه به حجم گسترده تحقیق آنها در تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

نتایج مختص به آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی از جمله عمق ترک کششی، ارتفاع و زاویه کناره رودخانه، تراز و ارتفاع جریان، چسبندگی و مکش ماتریک نشان می‌دهد که با تغییر ارتفاع جریان آب از ۱ تا ۴ متر ( $CV=0.40$ )، فاکتور ایمنی بیشترین تغییرات را داشته است ( $CV=0.55$ ). میزان تغییرات تراز آب از ۳ متر تا ۱۰ متر ( $CV=0.37$ ) بوده است به طوری که ضریب تغییرات فاکتور ایمنی حدود ۱۷ درصد بوده است. میزان تغییرات پارامترهای دیگر روی ضریب تغییرات ضریب ایمنی ناچیز بوده است. از طرفی با افزایش تراز جریان، تراز آب و مکش ماتریک ضریب ایمنی بیشتر می‌شود و با افزایش چسبندگی، عمق ترک کششی و زاویه بانک تغییرات فاکتور ایمنی معکوس است و

نتایج مدل‌سازی پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای در مقاطع بررسی شده نشان داده است که به‌طور کلی در مقایسه بین مقاطع دارای پوشش و فاقد پوشش تفاوت شایان توجهی از نظر پایداری وجود دارد. به طوری که میزان ضریب ایمنی در مقاطع فاقد پوشش کمتر از ۱ بوده است که بیانگر ضریب ایمنی پایین و ناپایدار کناره رودخانه در این مقاطع است. در میان مقاطع دارای پوشش تنها مقطع ۳ در رگبار ۴ ضریب ایمنی کمتر از ۱ داشته است که از نظر پایداری ناپایدار بوده است. به این دلیل که پوشش کناری رودخانه با تأثیرات ریشه روی مقاومت برشی سبب افزایش چسبندگی ذرات خاک و مقاومت در برابر تنش برشی ناشی از جریان‌ات رودخانه‌ای می‌شود. افزایش چسبندگی ناشی از گونه‌های درختی نیز در جدول ۴ ارائه شد. به طوری که مشاهده شد میزان چسبندگی در گونه‌های مختلف بسته به نوع گونه (درختی، درختچه‌ای و علفی) عمق ریشه (کم، متوسط، زیاد)، سن گونه‌ها (جوان، نیمه‌بالغ و بالغ)، و تراکم ریشه متفاوت است. از نظر فاکتور ایمنی ناپایدارترین بازه‌ها به ترتیب مقاطع ۵، ۶، ۸، ۷، ۳، ۱، ۴ و ۲ بوده است. از مقایسه رگبارهای مختلف به ترتیب رگبارهای ۴، ۲، ۱ و ۳ بیشترین تأثیر را روی ناپایداری بازه‌های نشان داده‌اند. مقایسه بین مدل‌ها از لحاظ مؤلفه‌های پایداری و فرسایش پنجه‌ای نشان داده است که میزان فرسایش کناری در بازه‌های فاقد پوشش بیشتر از بازه‌های دارای پوشش است در حالی که میزان مؤلفه‌های فرسایش پنجه‌ای (میزان عقب‌نشینی و فرسایش کناری) در بازه‌های دارای پوشش بیشتر از مقاطع فاقد پوشش بوده است. دلیل این امر ماهیت هندسی بازه‌های انتخابی در مناطق فاقد پوشش بوده است. به طوری که در مناطق فاقد پوشش، کناره شیب مستقیمی داشت و پنجه رودخانه بسیار ناچیز بود. به‌بیانی بیشتر قسمت کناره رودخانه، بخش سطح کناره بود و سطح پنجه‌ای بسیار کم بوده است. در صورتی که در مناطق انتخابی برای مقاطع دارای پوشش میزان سطح پنجه بخش زیادی از کناره رودخانه تشکیل داده است. از طرفی در مقاطع دارای پوشش کناری، تنها قسمت سطح کناری رودخانه پوشش داشته است و قسمت پنجه‌ای فاقد پوششی به‌منظور جلوگیری از فرسایش پنجه‌ای بوده است که نقش مستقیم پوشش درختی را در حفاظت کناره و پنجه نشان می‌دهد. این نکته درخور یادآوری است که نتایج تحقیق برای شرایطی در

نتیجه فشار منفذی ایجاد می‌شود و مقادیر آن از ۱۰ تا ۳۰ تغییر می‌کند. با تغییر مکش ماتریک مقادیر ضریب ایمنی تغییرات شایان توجهی نکرده است (۰/۹ تا ۱/۱). در این ارتباط کاساگلی و همکارانش [۶] ارتباط مکش ماتریک و مقاومت برشی خاک را نشان دادند.

### نتیجه‌گیری

فرسایش کناری و عقب‌نشینی کناری یک فرایند فرسایشی مهم در رودخانه‌های آبرفتی و یک مشکل مدیریت زمین در تمام دنیاست. فرایند عقب‌نشینی رودخانه اغلب با پاسخ کانال رودخانه نسبت به برش و تنظیم کانال همراه شده است. با توجه به اینکه اغلب مدل‌های موجود برای بررسی فرسایش نمی‌توانند میزان فرسایش کناری را پیش‌بینی کنند. در این تحقیق برای نخستین بار از یک مدل پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای که معمولاً در دنیا برای پروژه‌های بزرگ مهندسی رودخانه به کار می‌رود در رودخانه بشار استفاده شده است. این مدل علاوه بر تعیین میزان عقب‌نشینی رودخانه، وضعیت پایداری، میزان عرض و حجم گسیختگی، میزان بارگذاری رسوبات، فرسایش پنجه‌ای و ضریب ایمنی را ارائه می‌دهد. به‌منظور اجرای این مدل نیاز به اندازه‌گیری فاکتورهای مختلف اعم از ریخت‌سنجی رودخانه، ژئومتری کناره رودخانه، خصوصیات جریان، مشخصات ژئوتکنیکی مواد کناری و خصوصیات پوشش گیاهی و حفاظتی است. این تحقیق در چهار مکان از رودخانه بشار که از نظر پیشروی حساس بود، به مدل‌سازی اقدام شد. بدین منظور با استفاده از ترکیبی از مطالعات و اندازه‌گیری‌های صحرائی، آزمایشگاهی و تصاویر و نقشه‌های توپوگرافی و ماهواره‌ای، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل تهیه شد. نتایج اجرای مدل پایداری و فرسایش پنجه‌ای بیانگر عدم پایداری رودخانه مقاطع فاقد پوشش با توجه به ضریب ایمنی کمتر از یک ( $F_s < 1$ ) بوده است. نتایج اعتبارسنجی مدل نیز بیانگر تغییرپذیری نتایج مدل با تغییر خصوصیات ورودی مدل از جمله مشخصات ژئوتکنیکی و زاویه و ارتفاع جریان بوده است. نتایج آنالیز حساسیت مدل، نشان‌دهنده ضریب تغییرات ۵۵ درصدی فاکتور ایمنی با تغییر ارتفاع جریان بوده است. رابطه بین مقادیر تراز و ارتفاع جریان و مکش ماتریک با ضریب ایمنی مثبت و رابطه بین زاویه بانک، عمق ترک کششی و

فاکتور ایمنی کوچک‌تر می‌شود. به‌بیان دیگر افزایش چسبندگی، عمق ترک کششی و زاویه بانک سبب افزایش ناپایداری کناری رودخانه می‌شود و بیشتر بودن ارتفاع جریان رودخانه، آب زیرزمینی و مکش ماتریک سبب پایداری کناره رودخانه می‌شود. در این ارتباط آدام [۱] گزارش داد که سطح آب کانال سبب فراهم‌شدن مقاومت به گسیختگی کناره می‌شود. وقتی سطح آب کانال کاهش می‌یابد این مقاومت انفعالی نمی‌تواند طولانی باشد و سبب گسیختگی سریع کناره می‌شود. او همچنین گزارش داد که بانک‌های با شیب تندتر نسبت به بانک‌های نسبتاً مسطح مقاومت برشی کمتری دارند. امیری تکلدانی و همکارانش [۲۹] زاویه ساحل را جزء مؤثرترین پارامتر در برآورد ضریب ایمنی گزارش دادند. در ارتباط با تراز آب زیرزمینی، بالا بودن میزان تراز آب سبب فشار منفذی بیشتر و مقاومت برشی کمتر می‌شود. از طرفی مقاومت برشی کمتر، سبب ناپایداری کناره در مقابل گسیختگی کناره و افزایش میزان فرسایش می‌شود. سطح بالای آب زیرزمینی می‌تواند سبب ایجاد فرسایش نشتی نیز شود [۲]. وزن واحد خاک نیز یکی دیگر از پارامترهای ورودی است که در میزان ضریب ایمنی تأثیرگذار است. عملکرد این پارامتر مشابه با فاکتورهای عمق ترک کششی، چسبندگی و زاویه بانک است که سبب کاهش پایداری کناره می‌شود. بول [۴] نشان داد وزن واحد خاک در نتیجه نفوذپذیری آب به داخل خاک افزایش می‌یابد. ایشان همبستگی فاکتور ایمنی و وزن واحد خاک را به‌صورت معکوس گزارش داد. پارکر و همکارانش [۲۴] گزارش دادند که با تغییر وزن واحد خاک از صفر تا ۱۰۰ درصد، ضریب ایمنی تغییر شایان توجهی نمی‌کند و تقریباً ثابت است ولی زاویه اصطکاک و چسبندگی تأثیر معناداری روی ضریب ایمنی داشته است. با توجه به تأثیرپذیری ناچیز عمق ترک کششی روی ضریب ایمنی، امیری تکلدانی و همکارانش [۲] گزارش دادند عمق ترک کششی تنها در تعیین عرض بلوک گسیختگی مؤثر است و در تعیین مقدار زاویه صفحه و حجم بلوک گسیختگی چندان تأثیرگذار نیست. آنها گزارش دادند با توجه به تأثیر بسیار ناچیز عمق ترک کششی در محاسبه ضریب اطمینان به‌عنوان فاکتور اصلی و تعیین‌کننده پایداری ساحل نتیجه می‌شود که حتی در صورت وجود ۳۰ درصد خطا در تخمین مقدار عمق ترک کششی ضریب اطمینان پایداری ساحل چندان تغییری نخواهد کرد. همان‌طور که قبلاً گفته شد مکش ماتریک در

- [10]. Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993. Soil Mechanics of Unsaturated Soils. John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.
- [11]. 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, pp. 21–164.
- [12]. Grimshaw, D.L., Lewin, J., 1980. Source identification of suspended solids. Journal of Hydrology 42, 151–162.
- [13]. Henshaw, A.J., Thorne, C.R., Clifford, N.J. 2012. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. Catena 100, 107–119.
- [14]. Karmakera, T., Duttab, Subashisa. 2013, Modeling seepage erosion and bank retreat in a composite river bank. Journal of Hydrology 476: 178–187.
- [15]. Kessler Andrew C., Gupta Satish C., Brown Melinda K. (2013). Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement. Geomorphology (201):12–322.
- [16]. Konsoer, Kory M., Rhoads, Bruce Lane, Langendoen, Eddy J., Best, James L., Ursic, M. E., Abad, Jorge D. 2015. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. Geomorphology. 252. 80–97.
- [17]. Lai, Y. G. and Greimann, B.P. (2010). "Predicting contraction scour with twodimensional depth averaged model." Journal of Hydraulic Research, 48(3), 383–387.
- [18]. Lai, Y.G., Greimann, B.P. (2008). Rock erosion modeling on selected alluvial rivers in Taiwan," Technical Report SRH-2008-08, Technical Service Center, Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- [19]. Lai, Yong G., Greimann, Blair P. 2011. SRH Model Applications and Progress Report on Bank Erosion and Turbidity Current Models. Technical Report No. SRH-2010-22. PP. 170.
- [20]. Lindow, N., Fox, G.A., Evans, R.O., 2009. Seepage erosion in layered stream bank material. Earth Surface Processes and Landforms 24, 1693–1701.
- [21]. Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. 2003: A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling and Software 18: 761–799.

چسبندگی معکوس بوده است. این نکته درخور یادآوری است که در این تحقیق، مدل برای شرایط بدون لحاظ خصوصیات پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی اجرا شده است که می‌تواند نتایج ارائه شده در این تحقیق را تغییر دهد. بر این اساس توصیه می‌شود که مدل برای شرایط نوع پوشش گیاهی، تعداد ریشه، سن گیاه و نقش اقدامات حفاظتی نیز بررسی و مدل‌سازی شود.

#### منابع

- [1]. Abam. T.K.S. 1993. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger delta. Engineering geology. 35: 123–133.
- [2]. Amiri-Tokaldani, E., Samadi, A., Rahimi, H. 2006. Effect of the location and depth of tension crack of river bank stability. Journal of agriculture engineering research. Vol. 6. No.25. 77–94.
- [3]. Belmont, P., Gran, K.B., Schottler, S.P., Wilcock, P.R., Day, S.S., Jennings, C., Lauer, J.W., Viparelli, E., Willenbring, J.K., Engstrom, D.R., Parker, G., 2011. Large shift in source of fine sediment in the Upper Mississippi River. Environmental Science and Technology 45, 8804–8810.
- [4]. Bull, L.J., 1997. Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK. Earth Surface Processes and Landforms 22, 1109–1123.
- [5]. Cancienne, R., Fox, G.A., Simon, A., 2008. Influence of seepage undercutting on the root reinforcement of river banks. Earth Surface Processes and Landforms 33, 1769–1786.
- [6]. Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A., Curini, A., 1999. Monitoring of pore water pressure and stability of streambanks: results from an experimental site on the Sieve River, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 24, 1095–1114.
- [7]. Crosato, A., 2007. Physical explanations of variations in river meander migration rates from model comparison. Earth Surface Processes and Landforms 34, 2078–2086.
- [8]. Crosta, G., di Prisco, C., 1999. On slope instability induced by seepage erosion. Canadian Geotechnical Journal 36, 1056–1073.
- [9]. Darby, S.E., Gessler, D., Thorne, C.R., 2000. Computer program for stability analysis of steep, cohesive riverbanks. Earth Surface Processes and Landforms 25, 175–190.

- [22]. Midgley Taber L., Fox Garey A., Heeren Derek M. 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology* 145–146 (2012) 107–114.
- [23]. Morgenstern, N.R., and Price, V.R., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- [24]. Parker Chris, Simon Andrew, Thorne Colin R.. 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology* 101 (2008) 533–543.
- [25]. Pollen, N., Simon, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41. <http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003801> (W07025).
- [26]. Prosser, I.P., Rutherford, I.D., Olley, J.M., Young, W.J., Wallbrink, P.J., Moran, C.J., 2001. Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. *Marine and Freshwater Research* 52, 81–99.
- [27]. Rinaldi, M., Casagli, N., 1999. Stability of river banks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology* 26, 253–277.
- [28]. Rinaldi, M., Mengoni, B., Luppi, L., Darby, S.E., Mosselman, E., 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resources Research* 44, W09428. doi:10.1029/2008WR007008.
- [29]. Samadi, A., Amiri Tkldany, I., Davoudi, M.H, Rahimi, H. Determine of the effect of parameters uncertainty on the results of validation of stability analysis overhanging arches on the banks of a multilayer streambank. *Journal of water research*. Vol. 4. No 7. 69-80.
- [30]. Simon, A., Collison, A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 527–546.
- [31]. Simon, A., Curini, A., Darby, S.E. and Langendoen, E.J., 2000, Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*, 35, 193-217.
- [32]. Simon, A., Pollen-Bankhead, N., Mahacek, V., Langendoen, E., 2009. Quantifying reductions of mass-failure frequency and sediment loadings from streambanks using toe protection and other means: Lake Tahoe, United States. *Journal of the American Water Resources Association* 45, 170–186.
- [33]. Ta, W.Q., Xiao, H.L., Dong, Z.B., 2008. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs' operation. *Geomorphology* 97, 249–259.
- [34]. Thoma, D.P., Gupta, S.C., Bauer, M.E., Kirchoff, C.E., 2005. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sensing of Environment* 95, 493–501.
- [35]. Wu, J.M., Wang, R.S., Yao, J.H., 2006. Remote sensing monitoring and study on the change of the Yellow River course in Yinchuan plain sector. *Remote Sensing for Land & Resources* 4, 36–40 (in Chinese).