بررسی اثرات مقاومت برشی درختی بر پایداری رودخانه (بازه‌ای از رودخانهٔ بشار استان کهگیلویه و بویراحمد شهر یاسوج)

فاطمه روشن‌نسب: *دانش آموخته مهندسی علوم جنگل، گروه جنگل مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج*

محمدرضا میرزایی*: *استادیار گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج*

مجید خزایی: *استادیار پژوهشی بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۶)

20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6

چکیده

درک و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای، نیازی حیاتی برای مدیریت رودخانه است. در این پژوهش از مدل پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM)، به‌منظور بررسی پایداری بازه‌ای از رودخانهٔ بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد استفاده شد. این مدل، یکی از جامع‌ترین مدل‌های مورد استفاده در عملیات مهندسی و ساماندهی رودخانه در دنیاست که علاوه بر پایداری، امکان محاسبهٔ میزان گسیختگی، ضریب ایمنی، میزان فرسایش، میزان بارگذاری رسوبات و پیشروی رودخانه را فراهم می‌سازد. به‌منظور افزایش دقت در اجرای مدل، با بررسی نقشهٔ توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشهٔ زمین‌شناسی و بررسی‌های صحرایی، بازه‌ای از رودخانهٔ بشار انتخاب شد که از نظر مورفولوژی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی شرایط یکسانی داشت (طول بازهٔ انتخابی ۶۰۰ متر). این بازه به دو بخش شاهد (بدون پوشش) و آزمایشی (دارای پوشش) تقسیم شد. با توجه به ماهیت مدل BSTEM، به انتخاب تعدادی از مقاطع در بازهٔ انتخابی پرداخته شد؛ بدین منظور، از هر بخش سه مقطع به فاصله‌های مساوی ۱۰۰ متری انتخاب و مشخصات هندسی مقطع، خصوصیات ژئوتکنیکی، خاک-شناسی، پوشش گیاهی، هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و مقاومت برشی گونه‌های درختی در هر یک از آنها اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل مقایسهٔ داده‌ها نیز با نرم‌افزار HEC-RAS و مدل BSTEM انجام شد. نتایج اجرای این مدل نشان داد که از نظر پایداری، بین مقاطع دارای پوشش (Fs<1) و فاقد پوشش (Fs>1) تفاوت زیادی وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که میانگین عرض و حجم گسیختگی کنارهٔ رودخانه به ترتیب در بازهٔ فاقد پوشش، ۲/۷۲ متر و ۶۲۸۰ مترمکعب و در بازهٔ دارای پوشش، به میزان ۱/۴۲ متر و ۱۶۸۶/۳۳ مترمکعب است.

واژگان کلیدی: پوشش گیاهی، فرسایش کناری، گسیختگی، رودخانه، مدل پایداری.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

۱ـ مقدمه

بخش زیادی از رسوبات حمل شده توسط رودخانه، در اثر فرسایش کناره‌ای رخ می‌دهد. در مواقع سیلابی، نیروی برشی جریان رودخانه از مقاومت برشی مواد کرانهٔ رودخانه پیشی می‌گیرد و پیچان‌رود ایجاد می‌شود. جلوگیری از پیشروی رودخانه در اراضی سیلاب‌دشت، مستلزم شناخت رودخانه و اجرای عملیات مدیریت و ساماندهی آن به‌ویژه در بازه‌های فرسایشی است. با توجه به اینکه فرسایش رودخانه معمولاً در طول نسبتاً زیادی از آبراهه اتفاق می‌افتد و به دلیل بالا بودن هزینه‌ها، تثبیت سازه‌ای آن تنها به‌صورت موضعی ممکن است؛ بنابراین برای کاهش این پدیده، احیای مجدد پوشش‌های گیاهی کنار رودخانه‌ها ضروری است و در چند دههٔ اخیر، استفاده از پوشش‌های گیاهی به نام روش‌های زیست مهندسی در حال گسترش است (Surian and Rinaldi, 2003). در روش زیست مهندسی، درختان بومی به دلیل سازگاری با شرایط منطقه در اولویت هستند (Jarvela, 2002). داده‌های موردنیاز، کاربر پسند بودن و تحقیقات صورت گرفته در خصوص اعتبار نتایج مدل سبب شده‌است که نرم‌افزار HEC-RAS، یکی از برترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارها در رشتهٔ علوم و مهندسی آب در زمینهٔ تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی و سیستم تحلیل رودخانه است که توسط ادارهٔ مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافت. سپس به یکی از نرم‌افزارهای پیشرو در مدل‌سازی تبدیل شد و با بهره‌گیری از فناوری GIS، نتایجی واضح، عینی و دقیق ایجاد کرد. به علت حساسیت این نرم‌افزار به عوامل ورودی مانند توپوگرافی و ضریب زبری مانینگ، HEC-RAS ابزاری مفید و عالی برای بررسی رفتار رودخانه و ارزیابی تأثیر تغییر عوامل بر رفتار رودخانه و حوضه آبریز آن است (Hubble et al, 2010).

مدل عددی HEC-RAS برای اجرای محاسبات هیدرولیکی در چهار جزء طراحی شد که عبارت است از: محاسبات پروفیل سطح آب در جریان ثابت، شبیه‌سازی جریان ناپایدار، انتقال رسوب و مرز متحرک، و تجزیه و تحلیل کیفیت آب.

به این دلیل که مدل پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای نسخه‌های مختلفی دارد؛ بنابراین در یکی از نسخه‌ها، مدل پایداری کناری رودخانه و فرسایش پنجه‌ای (BSTM)[1] با مدل HEC-RAS ادغام شد (Nardi and Rinaldi, 2010). مدل BSTEM، از پرکاربردترین مدل‌های به‌کار رفتهٔ دنیا در بیشتر پروژه‌های مهندسی رودخانه است که آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد می‌سی‌سی‌پی در آمریکا[2] آن را توسعه داده‌است (Gholinejad et al, 2011 & Hosseanzadea and Esmaeili, 2018). مدل BSTEM ابتدا به وسیلهٔ پولین و سیمون و پولین بنک‌هید و سیمون، برای بررسی پایداری کرانهٔ رودخانه تحت شرایط پوشش گیاهی و آب منفذی مشخص ایجاد شد (Nardi and Rinaldi, 2010 & Midgley et al, 2012). سپس سیمون و همکاران، این الگو را بررسی کردند (Pallen-Bankhead and Simon, 2009) و در ادامه، با مطالعهٔ کانسین‌نه و همکاران و بررسی زبری و زاویهٔ کرانه و فشار آب منفذی ادامه یافت (Simon et al, 2008). BSTEM،

[1] Bank Stability and Toe Erosion Mode
[2] National Sedimentation Laboratory in Oxford, Mississippi, USA

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

یک مدل فرسایش کناره‌ای است که فرایندهای هیدرولیکی، فرسایش پنجه‌ای و گسیختگی کناره‌ای در لایه‌های همگن و کناره‌ها را بررسی می‌کند و ابزاری مناسب برای تعیین و تشخیص شرایط حاکم بر کرانهٔ رودخانه برای حفاظت از آن، ارزیابی اهمیت فرسایش رودخانه‌ای و ویژگی‌های این فرسایش، پوشش گیاهی و فشار آب منفذی نزدیک کرانه است. این مدل، کنارهٔ رودخانه را به پنج لایهٔ قابل تعریف توسط کاربر تقسیم کرده‌است که هر کدام خصوصیات ژئوتکنیک متفاوت دارند. همچنین از این مدل برای پیش‌بینی پسروی کنارهٔ رودخانه در اثر فرسایش رودخانه‌ای و شکست ژئوتکنیکال و مدل‌سازی اثرات پوشش گیاهی و مکانیکی استفاده می‌شود (Casermeiro et al, 2004 & Micheli and Kirchner, 2002 & Simon et al, 2002). به‌طور کلی، از این مدل به‌منظور بررسی تأثیرات مکانیکی و هیدرولوژیکی پوشش گیاهی حاشیهٔ رودخانه، بررسی پایداری کناره در هنگام حوادث سیلابی و توان این تغییرات استفاده می‌شود (Hosseanzadea and Esmaeili, 2018 & Simon et al, 2010). این مدل، وضعیت پایداری، تعیین میزان عقب‌نشینی رودخانه، میزان عرض و حجم گسیختگی، فرسایش پنجه‌ای، میزان بارگذاری رسوبات و ضریب ایمنی را ارائه می‌دهد.

Ranwell (۱۹۸۳) شیوه‌های استفاده از گیاهان گوناگون برای نگهداشت کناره‌ها را از دید زیست محیطی و اقتصادی در اروپا، آفریقا و استرالیا بررسی کرد. وی پیشنهاد داد برای جلوگیری از فرسایش آبی از گیاهان بومی استفاده شود. Shirdeli (۲۰۱۳) با بررسی‌های زیست مهندسی در تثبیت سواحل رودخانه‌ها و شیب‌ها به این نتیجه رسید که درختان گز، پده، نارون و بید به افزایش مقاومت برشی خاک به میزان سی تا پنجاه درصد منجر می‌شود. Gholinejad و همکاران (۲۰۱۱) به این نتیجه رسیدند که پوشش گیاهی، اثر متقابل جریان بین مقطع اصلی و دشت سیلابی را افزایش می‌دهد و به کاهش سرعت و دبی جریان در دشت‌های سیلابی و کل کانال منجر می‌شود. Khazaei و همکاران (۲۰۱۸) نیز برای نخستین بار در ایران، از یک مدل پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM) که معمولاً در دنیا از آن برای پروژه‌های بزرگ مهندسی رودخانه استفاده می‌شود ــ در رودخانهٔ بشار استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان ضریب ایمنی در مقاطع فاقد پوشش، کمتر از یک است که ناپایداری کنارهٔ رودخانه در این مقطع را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی نیز بیشترین حساسیت شاخص ایمنی را نسبت به ارتفاع جریان، تراز آب و چسبندگی بین ذرات نشان می‌دهد. Pallen-Bankhead و همکاران (۲۰۰۹) نیز به برآورد حجم گسیختگی کناره تحت شرایط موجود پرداختند و از مدل پایداری BSTEM به‌منظور ارزیابی توان کاهش بارگذاری رسوبات رودخانه‌ها استفاده کردند. آنها دریافتند که حفاظت پنجهٔ کناره با سنگ با ارتفاع یک متر، به کاهش فرسایش رودخانه‌ای منجر می‌شود. همچنین در هر دورهٔ شبیه‌سازی، تعداد گسیختگی در بیشتر موارد فقط یک مورد است.

Khazaei و همکاران (۲۰۱۶) از ترکیب مدل‌های BSTEM و HEC-RAS برای بررسی پایداری بازه‌ای از رودخانهٔ بشار در پنج رگبار ــ با شدت کم تا خیلی زیاد ــ استفاده کردند. طبق نتایج، میانگین اندازهٔ عقب‌نشینی جانبی در مقاطع موردبررسی به ترتیب به‌اندازهٔ ۱۲۸ ، ۲۱۰ ، ۲۰۰ ، ۳۷ و ۶۵ سانتیمتر بود. Midgley و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل BSTEM، به پیش‌بینی عقب‌نشینی دیوارهٔ کناره‌ای رودخانه ــ هم به دلیل

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

فرسایش و هم به دلیل شکست ژئوتکنیکی این دیوار ـ پرداختند. آنها برای اجرای این مطالعه، رودخانهٔ Barren Fork Creek در شمال شرق اوکلاهاما را در فاصلهٔ زمانی آوریل تا اکتبر ۲۰۰۹ انتخاب کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان عقب‌نشینی جانبی رودخانه در اواسط تا اواخر ماه می تا سپتامبر رخ داده و این امر به علت رگبارهای سیلابی بوده‌است. مدل BSTEM برای رودخانهٔ موردمطالعه، هشت مرتبه با داده‌های ورودی پیش‌فرض و اندازه‌گیری شده مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور، میزان فرسایش واقعی را کمتر از میزان واقعی تخمین زده‌است. ولی با درک توزیع تنش برشی، اندازه‌گیری میزان این تنش برای خاک‌های ناچسبنده و دینامیک فشار منفذی آب، عملکرد مدل بیشتر شد.

Konsoer و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات مکانی در زمینهٔ مقاومت کناره‌ها به فرسایش را در پیچان‌رودهای بزرگ در رودخانهٔ آبرفتی ـ کوهستانی بررسی کردند و با استفاده از مدل BSTEM و تصاویر لیدار، به ارزیابی توان خصوصیات مواد کناره‌ای در تعدیل نسبت و مکانیسم عقب‌نشینی کنارهٔ رودخانه پرداختند. آنها ناهمگنی عمودی و جانبی خصوصیات مواد کناره‌ای را در دو پیچان‌رود، با ترکیب بستر سنگی ـ آبرفتی با استفاده از بررسی‌های ژئوتکنیکی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که خصوصیات مواد کناره‌ای، چسبندگی خاک و تنش برشی بحرانی بین دو خم (پیچ) متفاوت است و تغییرات زیادی بین دو پیچ در حالت‌های عمودی و جانبی وجود دارد. نتایج این مطالعه حاکی از تغییرپذیری بالای خصوصیات مقاوم به فرسایش مواد کناره‌ای کانال، به‌عنوان یک شاخص مهم تغییرپذیری مکانی در مکانیسم فرسایش کناره‌ای است.

جمع‌بندی بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که مدل پایداری مشخصی در ایران به‌صورت کامل بررسی نشده‌است. مرور منابع صورت گرفته نشان می‌دهد که هر چند مدل BSTEM مدل با سابقه و معتبری است (بر اساس پروژه‌ها، مقالات و پایان‌نامه‌های دانشگاهی متعدد صورت‌گرفته) و از آن در کشورهای مختلف و در بررسی وضعیت کرانه، پایداری و فرسایش کناری رودخانه‌های مهم دنیا بسیار استفاده شده، در ایران مطالعات اندکی بر روی آن صورت گرفته‌است که به بررسی بیشتر این مدل نیازمند است. بنابراین، این تحقیق با استفاده از مدل BSTEM برای بررسی پایداری کنارهٔ رودخانه با توجه به گونه‌های گیاهی موجود، در بازه‌ای از رودخانهٔ بشار در نزدیکی شهر یاسوج طراحی شد.

۲ـ معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

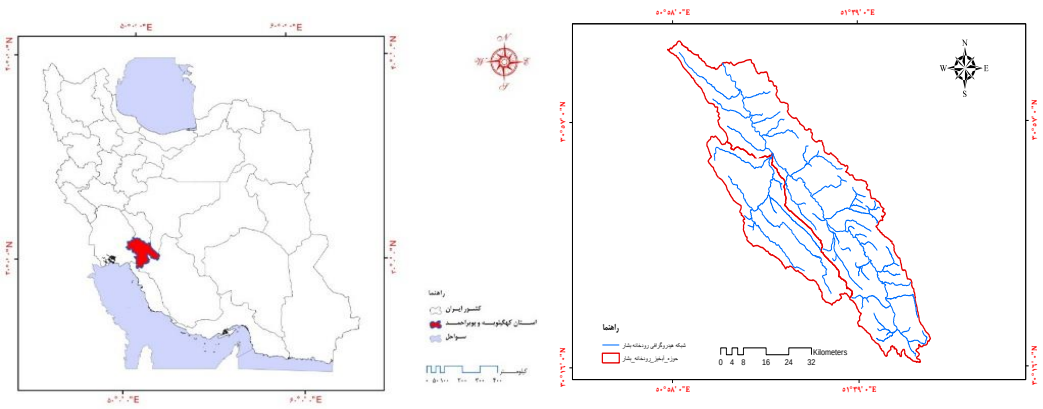
استان کهگیلویه و بویراحمد، مساحتی بیش از ۱۶۲۶۴ کیلومتر مربع یعنی ۱٪ مساحت کشور را به خود اختصاص داده‌است. این استان در جنوب غربی ایران بین مدارهای ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۲۹ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقهٔ عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

برای اجرای این پژوهش، بخشی از رودخانهٔ بشار واقع در منطقهٔ دارشاهی در ۲۵ کیلومتری یاسوج انتخاب شد. موقعیت حوضه آبخیز بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد دارای طول جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه (شکل ۱) است. متوسط ریزش‌های جوی و متوسط آب‌دهی این حوضه به ترتیب ۸۵۸ میلی‌متر و ۵۳/۴ مترمکعب بر ثانیه است. بیشینهٔ ارتفاع از سطح دریا ۴۴۳۷ متر، کمینه‌ی آن ۱۳۵۷ و میانگین ارتفاع آن ۲۱۹۹ متر است.

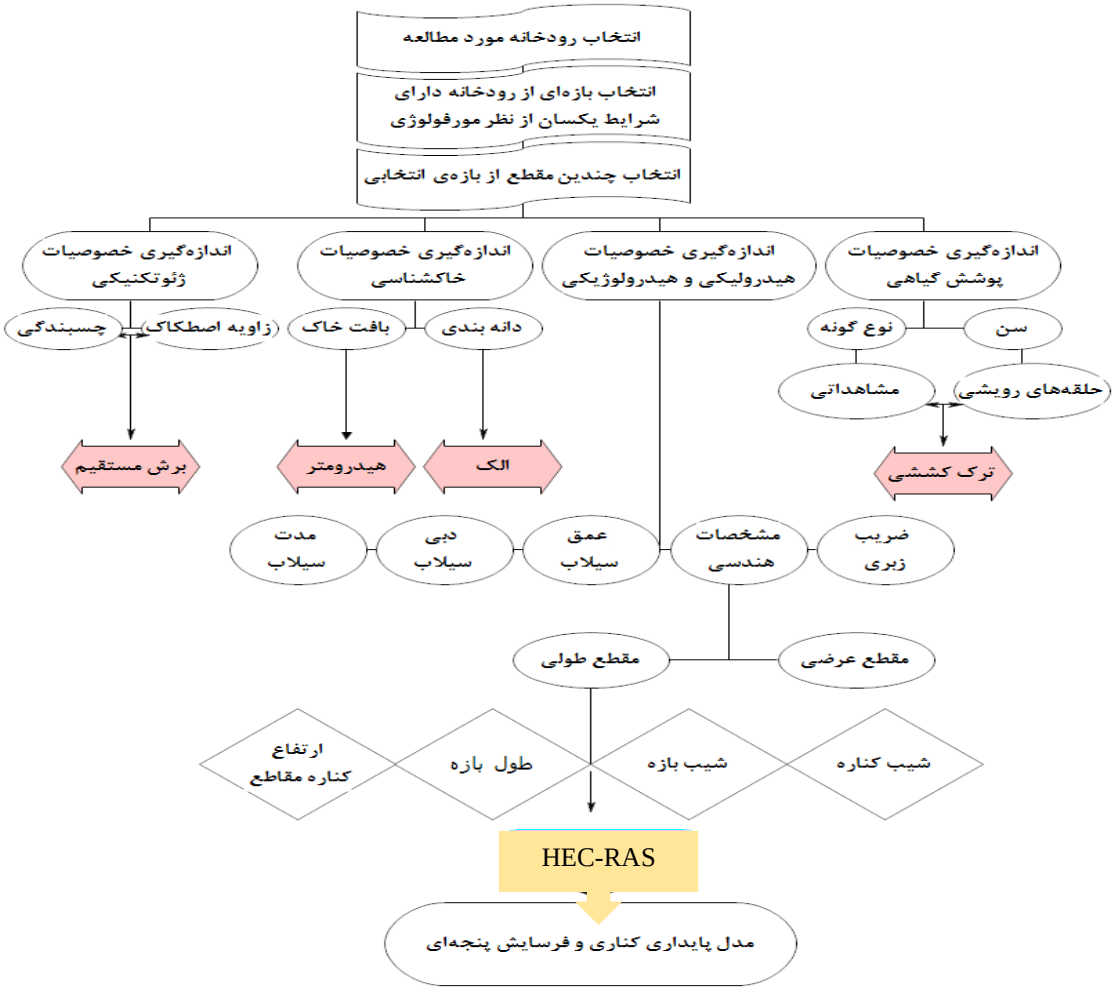
۳ـ مواد و روش‌ها

روش کلی اجرای این تحقیق در فلوچارت شکل ۲ ذکر شده‌است. در ابتدا بایستی بازهٔ مناسبی از رودخانه انتخاب شود که شرایط موردنظر را برای مطالعه داشته باشد؛ یعنی هم آثار مشخص فرسایش کناری دیواره‌ها را در بخش بدون پوشش داشته باشد، هم تأثیر پوشش گیاهی بر پایداری دیوارهٔ کناری رودخانه در آن مشاهده شود و هم شرایط یکسان مورفولوژیکی داشته باشد. به همین منظور، نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی از منطقه تهیه شد. سپس با کمک این داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، بازه‌های متعدد اولیه‌ای از رودخانهٔ بشار انتخاب شد. برای تعیین نهایی بازهٔ مناسب، از این بازه‌های اولیه نیز بازدید میدانی صورت گرفت. در نهایت، بازه‌ای از رودخانهٔ بشار (شکل ۳) در نزدیکی منطقهٔ دارشاهی انتخاب شد. سپس بازهٔ انتخابی، به دو بخش شاهد (بدون پوشش) و آزمایشی (دارای پوشش) با طول یکسان ۳۰۰ متری انتخاب و هر بخش، به سه مقطع صد متری تقسیم شد.



شکل ۱: نقشهٔ موقعیت حوضه آبخیز بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]



شکل ۲: فلوچارت روش کار



شکل ۳: نمایی از بازه‌های انتخابی با پوشش و فاقد پوشش رودخانهٔ بشار در منطقهٔ دارشاهی

در هر مقطع، درصد شیب با استفاده از شیب‌سنج سونتو و طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا، با استفاده از GPS با حداکثر خطای پنج‌متر اندازه‌گیری شد. به‌منظور افزایش دقت در اجرای مدل، با بررسی نقشهٔ توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشهٔ زمین‌شناسی و بررسی‌های صحرایی، بازه‌ای از رودخانهٔ بشار

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

انتخاب شد که از نظر مورفولوژی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی شرایط یکسانی داشت (طول بازه انتخابی ۶۰۰ متر). این بازه به دو بخش شاهد (بدون پوشش) و آزمایشی (دارای پوشش) تقسیم شد. با توجه به ماهیت مدل BSTEM، نیاز بود تعدادی از مقاطع در بازه موردنظر انتخاب شود؛ بدین منظور، از هر بخش سه مقطع با فاصله‌های مساوی صد متری انتخاب و مشخصات هندسی مقطع، خصوصیات ژئوتکنیکی، خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و مقاومت برشی گونه‌های درختی در آن مقطع اندازه‌گیری شد. خصوصیات ژئولوژیکی موردبررسی در هر مقطع شامل (زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی)، خصوصیات خاک-شناسی هر مقطع شامل (دانه‌بندی و بافت خاک)، پوشش گیاهی در هر مقطع شامل (نوع گونه و سن آن) و خصوصیات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی هر مقطع شامل (ضریب زبری، مشخصات هندسی، عمق سیلاب، دبی سیلاب و مدت سیلاب) اندازه‌گیری شد. به‌منظور تجزیه و تحلیل مقایسهٔ داده‌ها، از نرم‌افزار HEC-RAS و مدل BSTEM استفاده شد. در هر شش مقطع، دیوارهٔ کناری رودخانه از چند لایه خاک تشکیل شده بود، پس به‌طور تصادفی قسمتی از آن مشخص و نمونه‌های خاک از هر لایه به‌طور مجزا (شکل ۴) تهیه شد (برای تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی، نمونه‌هایی به اندازهٔ کافی و تا حد امکان تهیه و به آزمایشگاه حمل شد). عمق هر لایه خاک، اندازه‌گیری و مختصات محل برداشت نمونه‌ها با استفاده از GPS تعیین شد. سپس نمونه‌ها برای اجرای آزمایش به آزمایشگاه مکانیک خاک اداره راه یاسوج منتقل شد. نمونه‌های خاک برداشتی، از لایه‌های مختلف پروفیل و از سطح لایه تا عمق پنجاه سانتی‌متر تهیه شد.

۳ـ۱ـ اندازه‌گیری خصوصیات پوشش گیاهی (سن گونه و نوع آن)

پس از تعیین نوع گونهٔ گیاهان، سن گونه نیز از طریق قطع درختان و شمارش دوایر سالیانه (شکل ۵) تعیین شد. گونه‌های موجود در بازه عبارتند از: Salix sp، Platanus orientali، Fraxinus rotundifolia، Elaeagnus angustifolia، Tamarix sp . اما اکثر پوشش درختی از گونهٔ Salix sp است.



شکل ۴: نحوهٔ نمونه‌برداری از کنارهٔ رودخانه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]



شکل ۵: قطع درختان و شمارش دوایر سالیانه

۳ـ۲ـ اندازه‌گیری خصوصیات هندسی

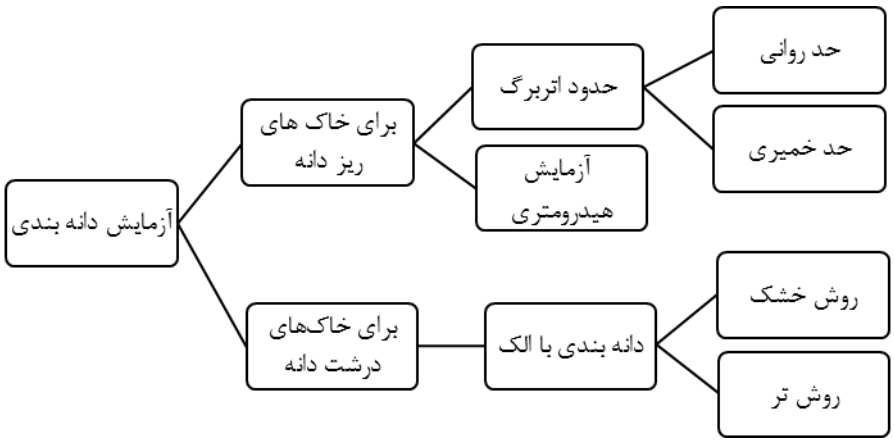
مشخصات هندسی شامل مقاطع عرضی و طولی است که مقاطع طولی مانند شیب کناره، شیب بازه، طول بازه و ارتفاع کنارهٔ مقاطع، از طریق برداشت‌های میدانی با استفاده از GPS، متر نواری، شیب‌سنج و اندازه‌گیری دستی جمع‌آوری شد.

۳ـ۳ـ اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

عمق، دبی و مدت سیلاب از طریق مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب در نرم‌افزار HEC-RAS به دست آمد. سرعت سیلاب نیز از طریق اندازه‌گیری سرعت جسم شناور محاسبه شد.

۳ـ۴ـ اندازه‌گیری خصوصیات خاک‌شناسی

این خصوصیات شامل دانه‌بندی و بافت خاک (شکل ۶) است. برای اندازه‌گیری این عوامل، نمونه‌ای از لایه‌های مختلف دیواره‌ها تهیه و به آزمایشگاه مکانیک خاک انتقال یافت، سپس طبق روش‌های زیر به دست آمد.



شکل ۶: فلوچارت روش آزمایش دانه‌بندی

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

۳ـ۵ـ اندازه‌گیری خصوصیات ژئوتکنیکی

این خصوصیات شامل چسبندگی خاک و زاویهٔ اصطکاک است. برای تعیین چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک، نمونه به آزمایشگاه مکانیک خاک اداره راه منتقل و با دستگاه برش مستقیم اندازه‌گیری شد.

رابطهٔ ۱ $t_t = ۵۰\ t_{۵۰}$

در این رابطه، t_t زمان تقریبی آزمایش تا لحظهٔ گسیختگی بر حسب دقیقه، $t_{۵۰}$ زمان لازم برای رسیدن به ۵۰٪ تحکیم تحت تنش قائم موردنظر بر حسب دقیقه است.

۳ـ۶ـ تنش برشی مقاوم

رابطهٔ ۲ $$\tau = \frac{F}{A}$$

در این رابطه، τ تنش برشی مقاوم بر حسب کیلو پاسکال، F نیروی برشی بر حسب N و A سطح مقطع اولیهٔ نمونه بر حسب سانتی‌متر مربع است.

تابع خطی، زیر معیار گسیختگی موهر ـ کلمب است که طبق آن زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ۳ $$\tau = C + \sigma_n tan\varphi$$

که در این رابطه، τ تنش برشی مقاوم بر حسب کیلو پاسکال، C چسبندگی خاک، σ تنش عمودی روی سطح گسیختگی و φ زاویهٔ اصطکاک داخلی است.

نسبت فرسایش به‌صورت رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

رابطهٔ ۴ $$E = K(t_e - t_c)$$

که در آن:

K = ضریب فرسایش‌پذیری خاک بر حسب cm^3/NS؛

τe = تنش برشی هیدرولیکی؛

τc = تنش برشی مقاوم بر حسب Kpa.

این عوامل تابع خصوصیات خاک است و بر اساس قطر متوسط ذرات خاک محاسبه می‌شود.

۴ـ نتایج و بحث

به دلیل ارزش و اهمیت رودخانهٔ بشار در شهرستان یاسوج، تغییرات مورفولوژی و ریخت‌شناسی آن بر اثر عوامل انسانی و سیلاب‌های سالانه و ناپایداری بازه‌هایی از رودخانه‌ها، به بررسی پایداری بازهٔ همگنی این رودخانه پرداخته شد. بر این اساس با توجه به اثرات پوشش درختی کنارهٔ رودخانه بر مقاومت کناری، بازهٔ انتخابی به دو بخش فاقد پوشش و دارای پوشش تقسیم و با استفاده از مدل BSTEM، مؤلفه‌های پایداری این بازه از رودخانه بررسی شد. بعد از اندازه‌گیری‌های صحرایی و تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی، مدل اجرا شد که نتایج آن در ادامه ذکر می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

۴-۱- نتایج بررسی‌های هندسی بازهٔ انتخابی

در مدل پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای، مشخصات هندسی شامل ارتفاع کناره، ارتفاع پنجه، شیب کناره و پنجه دارای بیشترین کاربرد است. پس مشخصات هندسی و ضخامت لایه‌های کناره‌ها به بخش ژئومتریک مدل وارد شد که نتایج آن در جدول ۱ و ۲ ذکر شده‌است. مطابق مختصات وارد شده، نیمرخ کناره‌ها و پارامترهای جریان ترسیم و به مدل وارد شد.

جدول ۱: نتایج هندسی بازهٔ انتخابی رودخانهٔ بشار

مقاطع	ارتفاع کناره (متر)	شیب کناره (زاویه)	طول پنجه (متر)	شیب پنجه (زاویه)
۱	۶	۹۰	۰	۰
۲	۱۰	۹۰	۰	۰
۳	۶	۹۰	۰	۰
۴	۵	۸۰	۱	۱۵
۵	۴/۵	۸۵	۱/۵	۱۵
۶	۵	۸۰	۱	۱۰

در مقاطع یک تا سه، ارتفاع ساحل کناری به‌صورت عمود و جریان آب در تماس با دیوارهٔ عمودی بود که در این حالت، مقطع عرضی فاقد پنجهٔ کناری است. در مقاطع سه تا شش با توجه به شیب بالای کناره‌ها (بالای ۸۰ درجه) و ارتفاع و طول کم پنجهٔ کناره، دیوار کناره به‌صورت نزدیک به عمود بود. با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از هر کدام از مقاطع عرضی، میزان ارتفاع کناره در مقطع عرضی دو، بیشترین و در مقطع عرضی پنج، کمترین است.

جدول ۲: ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهندهٔ کناره در بازهٔ مورد مطالعه

ترتیب لایه‌ها از بالا	لایهٔ۱	لایهٔ۲	لایهٔ۳	لایهٔ۴
ضخامت لایه‌ها در مقطع۱	۳	۳	–	–
ضخامت لایه‌ها در مقطع۲	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
ضخامت لایه‌ها در مقطع۳	۲	۲	۲	–
ضخامت لایه‌ها در مقطع۴	۵	–	–	–
ضخامت لایه‌ها در مقطع۵	۴/۵	–	–	–
ضخامت لایه‌ها در مقطع۶	۵	–	–	–

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

۴ـ۲ـ نتایج تجزیه و تحلیل هیدرولیکی بازهٔ انتخابی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS

نتایج شبیه‌سازی سیلاب در مدل HEC-RAS در مقطع یک دارای پوشش و مقطع چهار فاقد پوشش از بازهٔ انتخابی نشان داد که در سیلاب دو ساله، سرعت متوسط جریان در وسط مقطع عرضی به ترتیب معادل ۲/۱۸ و ۱/۴۱ متر بر ثانیه (سرعت برآورد شده از مدل HEC-RAS) و ارتفاع جریان، معادل ۱/۳۹ و ۲/۷۲ متر بود. با توجه به اینکه حداکثر ارتفاع دیوار ساحل چپ در مقطع یک دارای پوشش شش متر است، در سیلاب دو ساله ارتفاع جریان از ارتفاع کنارهٔ سیلاب پایین‌تر است. در مقطع چهار فاقد پوشش، با توجه به اینکه حداکثر ارتفاع دیوار ساحل چپ پنج متر است، در سیلاب‌های ده و صد ساله، ارتفاع جریان از ارتفاع کنارهٔ سیلاب فراتر رفته‌است.

۴ـ۳ـ نتایج مواد تشکیل‌دهندهٔ کناره

مواد تشکیل‌دهندهٔ مقطع اول، ماسه با دانه‌بندی خوب همراه با لای در لایهٔ اول، و شن با دانه‌بندی بد همراه با رس لای‌دار در لایهٔ دوم بود. در مقطع دوم نیز ماسه با دانه‌بندی خوب همراه با لای در لایهٔ اول، شن با دانه‌بندی بد همراه با رس لای‌دار در لایهٔ دوم، ماسهٔ لای‌دار در لایهٔ سوم و شن با دانه‌بندی خوب همراه با لای و ماسه در لایهٔ چهارم وجود داشت. همچنین مواد تشکیل‌دهندهٔ مقطع سوم، شن با دانه‌بندی بد همراه با ماسه در لایهٔ اول، شن با دانه‌بندی خوب همراه با ماسه در لایهٔ دوم و شن با دانه‌بندی بد همراه با لای و ماسه در لایهٔ سوم، و مقاطع ۴، ۵ و۶ متشکل از یک لایهٔ کلی شن با دانه‌بندی خوب همراه با ماسه بود.

۴ـ۴ـ نتایج تجزیه و تحلیل خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی بازهٔ انتخابی

در این بخش، خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی از جمله قطر متوسط ذرات، زاویهٔ اصطکاک، چسبندگی، وزن مخصوص مواد کناره، دانه‌بندی، تنش برشی بحرانی و فرسایش‌پذیری خاک محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ ذکر شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

جدول ۳: مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف خاک برای ورود به مدل BSTEM

مشخصات مواد کناره					
شمارهٔ مقطع	لایه	زاویهٔ اصطکاک (degrees)	چسبندگی (kPa)	وزن مخصوص اشباع (kN/m^3)	مکش ماتریک (degrees)
۱	۱	۲۸/۳	۰/۴	۱۸/۵	۱۵
	۲	۳۶	۰	۲۰	۱۵
۲	۱	۲۷	۰/۴	۱۸/۵	۱۵
	۲	۳۳	۰/۴	۱۸/۵	۱۵
	۳	۲۶	۰/۴	۱۸/۵	۱۵
	۴	۲۹	۰/۴	۱۸/۵	۱۵
۳	۱	۳۳	۰/۲	۱۸	۱۵
	۲	۳۴	۰/۳	۱۹	۱۵
	۳	۲۹	۰/۱	۱۸	۱۵
۴	۱	۴۳	۰	۱۹	۱۵
۵	۲	۴۳/۲	۰	۱۸	۱۵
۶	۱	۴۳/۲	۰	۱۸	۱۵

جدول ۴: تنش برشی و ضریب فرسایش‌پذیری با توجه به قطر متوسط ذرات هر مقطع (D_{50})

مقاطع	لایه	قطر متوسط ذرات D_{50} (mm)	تنش برشی بحرانی c (pa)	ضریب فرسایش‌پذیری K ($cm^3/N-s$)
۱	۱	۵	۴/۸۶	۰/۰۴۵
	۲	۱۷	۱۶/۵۲	۰/۰۲۵
	۱	۵	۴/۸۶	۰/۰۴۵
	۲	۱۷	۱۶/۵۲	۰/۰۲۵
۲	۳	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۳۳
	۴	۹/۵	۹/۲۳	۰/۰۳۳
۳	۱	۱۲	۱۱/۶۶	۰/۰۲۹
	۲	۱۴	۱۳/۶۱	۰/۰۲۷
	۳	۴/۲	۴/۰۸	۰/۰۵۰
۴	۱	۱۵	۱۴/۵۸	۰/۰۲۶
۵	۱	۱۳	۱۲/۶۴	۰/۰۲۸
۶	۱	۱۱	۱۰/۶۹	۰/۰۳۱

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

تنش برشی بحرانی برای جابه‌جایی یک ذره لازم است. نتایج محاسبهٔ تنش برشی و ضریب فرسایش‌پذیری در جدول ۴ ذکر شده‌است. برمبنای رابطهٔ ۵، تنش برشی لازم برای به حرکت در آوردن ذرات تشکیل‌دهندهٔ کناره (D_{50}) در هر شش مقطع تعیین شد. D_{50} برای بازهٔ اول پنج میلی‌متر است؛ بنابراین، مقدار تنش برشی بحرانی ۴/۸۶ پاسکال محاسبه شد. با توجه به تنش برشی بحرانی محاسبه شده، ضریب فرسایش‌پذیری برمبنای رابطهٔ ۶ به میزان ۰/۰۴۵ ($cm^3/N\text{-}s$) حاصل شد.

مقاومت ژئوتکنیک مواد کناره، یکی از عوامل مهم و کلیدی نیروهای مقاوم‌کنندهٔ مقاومت برشی در مقابل نیروهای برشی است. محققان زیادی از جمله Darby و همکاران (۲۰۰۰)، Simon و همکاران (۲۰۰۹) و Rinaldi و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کرده‌اند که مقاومت مواد ژئوتکنیکی خاک در پایداری رودخانه‌ها اهمیت زیادی دارند. زاویهٔ اصطکاک Φ، یک پارامتر ژئوتکنیکی کلاسیک است که مقاومت برشی خاک را نشان می‌دهد. اگر ارتفاع آب زیرزمینی بیش از ارتفاع سطح آب کناره باشد، مقاومت اصطکاکی کناره کاهش می‌یابد و کناره فقط با چسبندگی نگه داشته می‌شود که این عامل زاویه، سطح گسیختگی کم‌عمق‌تری را تشکیل می‌دهد. در این زمینه Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که عامل زاویهٔ اصطکاک می‌تواند بیانگر عامل پایداری کناره (پوشش گیاهی یا چسبندگی خاک کناره‌ها) باشد. در نتیجه با افزایش زاویهٔ اصطکاک، مقاومت کناره‌ها افزایش می‌یابد و سواحل رودخانه در برابر فرسایش کناره‌ها مقاوم‌تر می‌شود که نتایج حاصل از مدل عددی Dastorani و Rajabimohamadi (۲۰۱۲) نیز این امر را تأیید می‌کند. چسبندگی بین ذرات، یکی دیگر از پارامترهای ژئوتکنیکی مهم و کلیدی در مقاومت برشی و فرسایش‌پذیری کناره است. در نتیجه نیروهای پیوند بیولوژیکی و الکتروشیمیایی، چسبندگی نیروی جاذبه بین ذرات خاک است که این نیروها مقاومت ماتریک خاک را افزایش می‌دهد. به طور کلی، در خاک‌های درشت‌دانه مثل گراول و بزرگ‌تر، چسبندگی صفر است و خاک‌های چسبنده مثل سیلت و رس چسبندگی بیشتری دارند. Commandeur (۱۹۹۲) در مطالعهٔ خود به این نتیجه رسید که با افزایش وزن مخصوص ظاهری و خرده سنگ‌های ضخیم، میزان نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین فرسایش خاک با حجم رواناب همبستگی مثبتی دارد و تحت‌تأثیر شیب، پوشش سطحی و بافت خاک است. Simon و همکاران (۲۰۰۸) طی مطالعهٔ خود دریافتند که حفاظت پنجهٔ کناره با سنگ با ارتفاع یک متر به کاهش فرسایش رودخانه‌ای منجر می‌شود. همچنین در هر دوره شبیه‌سازی، تعداد گسیختگی در بیشتر موارد فقط یک مورد است.

۴ـ۵ـ نتایج مشخصات گونه‌های درختی

تأثیرات تثبیت‌کنندهٔ پوشش درختی در مقاطع دارای پوشش، به افزایش ضریب ایمنی و پایداری این مقاطع منجر می‌شود. گونهٔ بید دارای بیشترین درصد است و چنار، سن بیشتری نسبت به سایر گونه‌ها دارد. نتایج مربوطه در جدول ۵ ذکر شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

جدول ۵: وضعیت پوشش درختی در پروفیل‌های بررسی شده (نوع، سن گونه و درصد پوشش)

مقاطع	نوع گونه	قطر برابر سینه (cm)	رویش سالیانه (cm)	سن	درصد پوشش
۱.۲.۳ فاقد پوشش	-	-	-	-	-
	Salix sp	۳۳	۲/۰۵	۱۶	۹۰
۴	Platanus orientalis	۴۶	۱/۵	۳۷	۱۰
	Salix sp	۳۳	۲/۰۵	۱۶	۸۰
۵	Elaeagnus angustifolia	۲۴	۱/۲	۲۰	۱۰
	Fraxinus rotundifolia	۴۵	۱/۹۳	۲۳	۱۰
	Salix sp	۳۳	۲/۰۵	۱۶	۸۰
۶	Tamarix sp	۱۰	۱	۱۰	۱۰
	Elaeagnus angustifolia	۲۴	۱/۲	۲۰	۱۰

Pervan و Hosseni (۲۰۰۲) گزارش کردند که بازه‌هایی با پوشش گیاهی از نوع درخت بید و صنوبر، فرسایش کمتری دارند و در بازه‌هایی با ترکیب پوشش درختی و علفی، عملکرد پوشش در تثبیت جداره‌های رودخانه بسیار مؤثرتر و مقدار فرسایش به مراتب کمتر است. Shirdeli (۲۰۱۳) بیان کرد که درختان گز، پده، نارون و بید نیز به افزایش مقاومت برشی خاک به میزان سی تا پنجاه درصد منجر می‌شود.

۴ـ۶ـ نتایج فرسایش پنجهٔ کناره

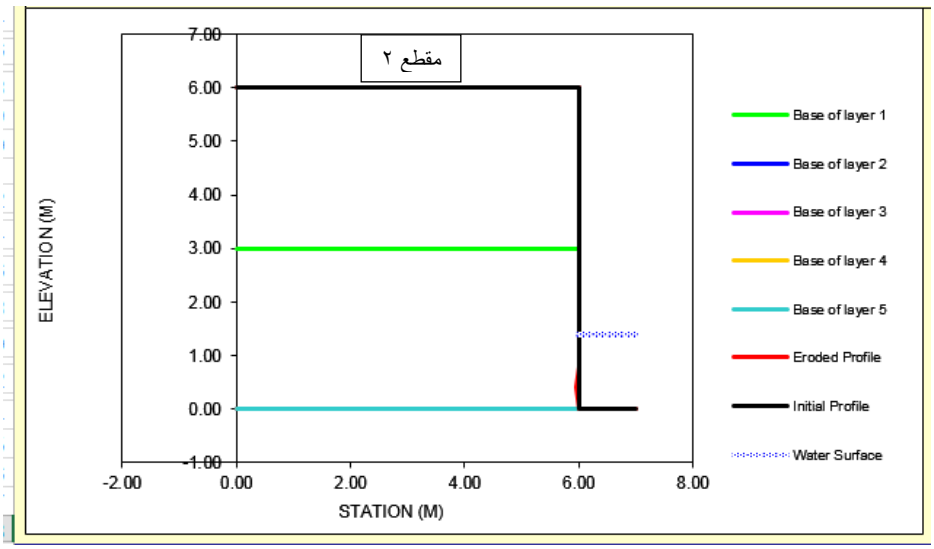
در این مرحله، ابتدا اثرات دبی لبالبی در هر شش مقطع شبیه‌سازی شد تا میزان فرسایش هیدرولیک و تغییر هندسهٔ پای کناره مشخص شود. به‌منظور اجرای این شبیه‌سازی، داده‌های دبی دو ساله برای مقاطع مورد بررسی به مدل وارد شد. نتایج این بخش از مدل شامل تنش برشی مرزی، حداکثر پسروی کناره، مساحت فرسایش-یافتهٔ کناره، پنجه و بستر و کل مساحت فرسایش‌یافتهٔ ناشی از جریان دبی دو ساله در یک دورهٔ ۴۸ ساعته برای مقاطع موردبررسی است که در جدول ۶ ذکر شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

جدول ۶: نتایج مدل فرسایش پنجه‌ای ناشی از دبی دو سالهٔ جریان در دورهٔ ۴۸ ساعته برای بازه‌های مورد مطالعه

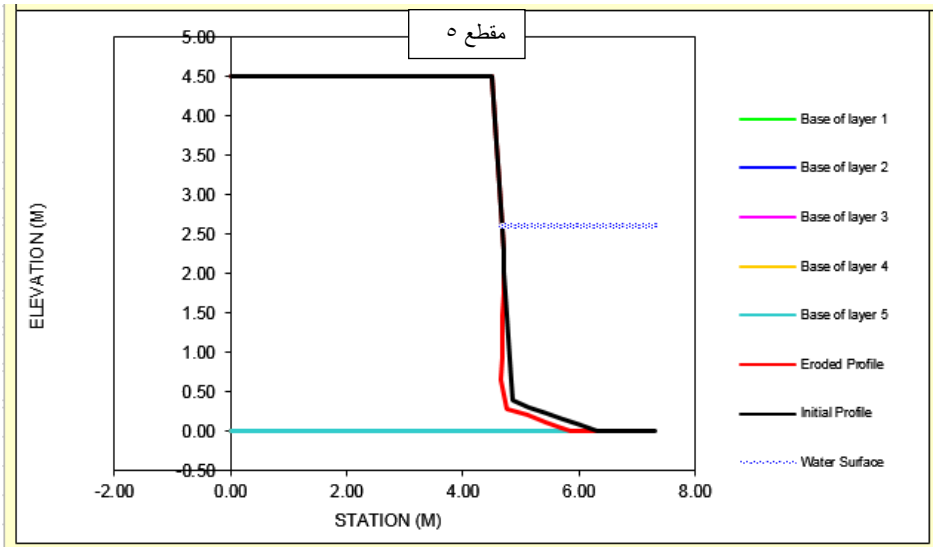
مقاطع	متوسط تنش برشی مرزی (پاسکال)	حداکثر پسروی کناره (سانتیمتر)	مساحت فرسایش‌یافتهٔ کناره (مترمربع)	مساحت فرسایش‌یافتهٔ پنجه (مترمربع)	مساحت فرسایش‌یافتهٔ بستر (مترمربع)	کل مساحت فرسایش‌یافته (مترمربع)
۱ فاقدپوشش	۱۴/۹۴	۳/۵۹	۰/۰۱۴	–	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴
۲ فاقد پوشش	۲۲/۵۱	۱۴/۹۴	۰/۱۴	–	۰/۰۰۰	۰/۱۴
۳ فاقد پوشش	۱۷/۷۱	۲۳/۲۲	۰/۱۸	–	۰/۰۰۰	۰/۱۸
۴ با پوشش	۳۱/۶۱	۱۵/۸۶	۰/۱۷	۰/۰۹۵	۰/۰۰۰	۰/۳۳
۵ با پوشش	۲۸/۸۵	۱۷/۷۶	۰/۱۸	۰/۱۵۴	۰/۰۰۰	۰/۳۳
۶ با پوشش	۲۷/۵۴	۱۹/۸۲	۰/۲۲	۰/۰۸۴	۰/۰۰۰	۰/۳۱

مقایسه بین مؤلفه‌های مدل پایداری و مدل فرسایش پنجه‌ای نشان داد که در مقاطع فاقد پوشش، میزان فرسایش کناری بیش از مقاطع دارای پوشش بود؛ در صورتی که میزان مؤلفه‌های فرسایش پنجه‌ای (میزان فرسایش کناری و عقب‌نشینی) در مقاطع دارای پوشش، بیش از مقاطع فاقد پوشش بود که ماهیت هندسی مقاطع انتخابی در مناطق فاقد پوشش دلیل این امر می‌باشد؛ به‌طوری که شیب کناره در مناطق فاقد پوشش، مستقیم و فاقد پنجه بود ولی در مقاطع دارای پوشش، پنجه بخشی از کنارهٔ رودخانه را تشکیل می‌داد. این نتایج با یافته‌های Khazaei و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت داشت. Casermeiro و همکاران (۲۰۰۴) به این نتیجه رسیدند که پوشش گیاهی و درصد ماده آلی خاک، عوامل اصلی کنترل‌کنندهٔ فرسایش است و بیشتر متغییرهای اندازه‌گیری شده در خاک، همبستگی ضعیفی با میزان فرسایش داشته‌است.



شکل ۸: تصویر صفحهٔ مدل فرسایش پنجه‌ای در مقاطع عرضی ۲، از بازهٔ انتخابی در سیلاب دو ساله

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]



شکل ۹: تصویر صفحهٔ مدل فرسایش پنجه‌ای در مقاطع عرضی ۵، از بازهٔ انتخابی در سیلاب دو ساله

۵ـ۶ـ نتایج مدل کناره

با اجرای مدل فرسایش پنجه‌ای، هندسهٔ جدید کانال در مقاطع مختلف (به طور نمونه شکل ۹) به دست آمد که به پایداری کناره وارد شد تا مقدار پایداری نسبی آن مشخص شود. این بخش از مدل شامل فرایند شبیه‌سازی و شاخص ایمنی (FS)، هندسهٔ کناره، زاویه و ارتفاع وقوع سطح شکست است که لازم است عمق سطح آب منفذی در این بخش وارد شود. میزان پارامترهای ناپایداری ناشی از دبی دو سالهٔ سیل در دورهٔ ۴۸ ساعته کناره‌های موردنظر، در جدول ۷ وارد و به طور نمونه، نمودارهای گسیختگی نیمرخ عرضی دو مقطع ۳ و ۵ در شکل ۱۰ ارائه شد.

ضریب ایمنی بزرگ‌تر از یک، نشانهٔ پایداری کانال و کوچک‌تر از یک، نشان‌دهندهٔ ناپایداری و فرسایش‌پذیری کنارهٔ کانال است.

نتایج در جدول ۷ نشان می‌دهد که این ضریب در مقاطع با پوشش گیاهی، بالاتر از یک بود که بیانگر پایداری کناره است؛ در حالی که در مقاطع بدون پوشش، کناره‌ها وضعیت ناپایدار دارد. همان طور که نتایج مدل نشان می‌دهد ارتفاع ظهور تنش در مقاطع با پوشش بیشتر است، اما میزان فرسایش بر حسب کیلوگرم در تمامی مقاطع بدون پوشش از مقاطع با پوشش بیشتر می‌باشد. در زمینهٔ ضریب ایمنی نیز استفاده از لایه‌های چینه‌شناسی مطابق جنس لایه‌ها (شن، سیلت و رس) به کاهش فرسایش منجر خواهد شد. با افزایش تراز جریان، تراز آب و مکش ماتریک ضریب ایمنی افزایش و با افزایش چسبندگی، عمق ترک کششی و زاویهٔ بانک تغییرات شاخص ایمنی کاهش می‌یابد. به طور کلی افزایش چسبندگی، عمق ترک کششی و زاویه بانک، ناپایداری کنارهٔ رودخانه را افزایش می‌دهد و با افزایش ارتفاع جریان رودخانه، آب زیرزمینی و مکش ماتریک، پایداری کنارهٔ رودخانه افزایش می‌یابد. این نتایج با مطالعات Khazaei و همکاران (۲۰۱۸) و Khazaei و همکاران (۲۰۱۶) همسویی دارد. مطالعهٔ Abam (۱۹۹۳) در این ارتباط نشان داد که سطح آب

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

کانال، مقاومت در برابر گسیختگی کناره را افزایش می‌دهد؛ به طوری که وقتی سطح آب کانال کم می‌شود، این مقاومت نمی‌تواند به مدت زیادی ادامه یابد و به گسیختگی سریع کناره منجر می‌شود. ایشان همچنین بیان کردند که بانک‌های با شیب تندتر، مقاومت برشی کمتری نسبت به بانک‌های نسبتاً مسطح دارند. طبق نتایج به دست آمده، بیشتر ناپایداری کناره‌ای رودخانه به دلیل گسیختگی بخشی از کناره بر اثر عوامل هیدرولیکی مانند تراز آب زیرزمینی، تراز سیلاب، تنش برشی و آب‌دهی بیشینهٔ سیلاب، و عوامل هندسی مانند شیب کناره، زاویهٔ کناره نسبت به پنجه و وزن تودهٔ کناره صورت گرفته‌است. معمولاً گسیختگی در قسمتی از کناره رخ می‌دهد که ناپایداری دارد و به علت گسیختگی و ریزش بخشی از کناره در پایین پنجه، خود به خود شیبی ملایم بر دیوارهٔ کنارهٔ رودخانه ایجاد می‌شود.

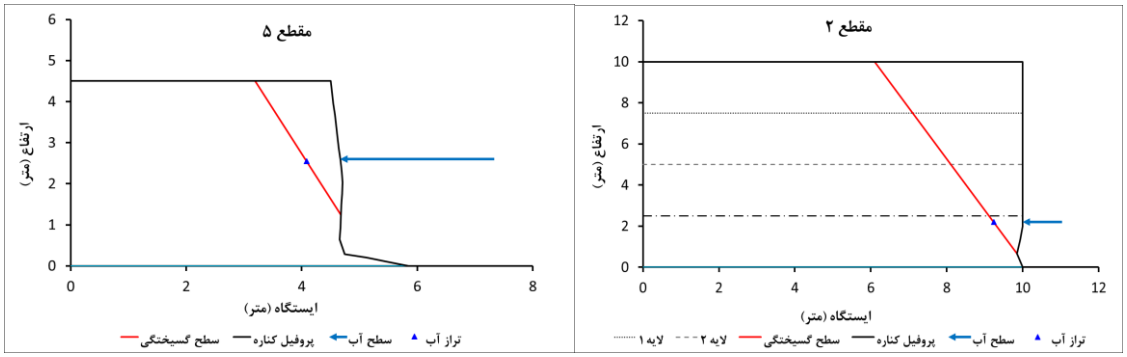
جدول ۷: پارامترهای ناپایداری ناشی از سیلاب دو ساله در دورهٔ ۴۸ ساعته بر روی کناره

مقاطع	ضریب ایمنی (FS)	ارتفاع ظهور تنش (متر)	زاویه سطح تنش (سانتیمتر)	عرض شکست (متر)	حجم شکست (مترمکعب)	بار رسوب تولیدی (کیلوگرم)	تراز آب زیرزمینی (متر)
۱ فاقد پوشش	۰/۵۷	۰/۴	۶۷/۶	۲/۳۴	۳۹۹۳	۶۹۰۶۳۲۹	۴/۶۱
۲ فاقد پوشش	۰/۵۶	۰/۷	۶۸/۵	۳/۹۰	۱۱۲۷۹	۱۸۰۵۵۴۹۰	۷/۸
۳ فاقد پوشش	۰/۴۹	۰/۴	۷۳	۱/۹۴	۳۵۶۸	۶۲۲۲۶۳۳	۴/۳۰
۴ با پوشش	۱/۰۵	۱/۲	۶۲/۱	۱/۴۵	۱۷۲۵	۳۳۴۹۵۱۹	۲/۲۸
۵ با پوشش	۱/۰۱	۱/۲	۶۵/۴	۱/۳۱	۱۳۵۲	۲۴۵۴۲۵۵	۱/۸۵
۶ با پوشش	۱/۰۳	۰/۹	۶۲/۸	۱/۵۲	۱۹۸۲	۳۵۹۰۹۳۴	۲/۵۲

با ورود سیلاب‌های بعدی بر دیوارهٔ کنارهٔ تشکیل‌شده بر اثر سیلاب‌های قبلی، مقطع کناره‌ای نسبتاً پایدار می‌شود اما این به معنای پایداری رودخانه نیست، بلکه دلیل آن ملایم‌تر شدن شیب کناری از حالت عمودی به حالت مایل است. با کاهش شیب عمودی و دیوار کناری رودخانه با وجود هر سیل، سیلاب طغیان می‌کند و سیل به زمین‌های اطراف سرریز می‌شود و بستر رودخانه گسترش می‌یابد. با بالاتر رفتن ارتفاع سیلاب در کناره‌های عرضی رودخانه، جریان به کناره وارد و به اشباع شدن آن منجر می‌شود. سپس بعد از تخلیه و فروکش کردن سیلاب، جریان آب از کناره به طرف رودخانه هدایت و به سست شدن و مستعد شدن کناره برای ریزش و ناپایداری منجر می‌شود و در نهایت، به فرسایش شیاری در کنارهٔ رودخانه می‌انجامد. نتایج تحقیق Gholinejad و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که پوشش گیاهی، اثر متقابل جریان بین مقطع اصلی و دشت سیلابی را افزایش می‌دهد و به کاهش سرعت و دبی جریان در دشت‌های سیلابی و کل کانال منجر می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

Marqus و همکاران (۲۰۰۷) دربارهٔ اثر پوشش گیاهی بر رواناب و فرسایش خاک به این نتیجه رسیدند که می‌توان از مقدار رسوب و رواناب در پلات‌های دارای پوشش چشم‌پوشی کرد، اما در پلات‌های فاقد پوشش مقدار رسوب و رواناب زیاد است. میزان ضریب ایمنی در مقاطع فاقد پوشش کمتر از یک بود که بیانگر ناپایداری بازهٔ انتخابی است. ضریب ایمنی برحسب سیلاب، ویژگی‌های هندسی کنارهٔ رودخانه، زاویهٔ کناره، پوشش کناری، تراز آب زیرزمینی و عمق، ترک کششی دارد؛ به‌طوری که Amiri Takledani و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعهٔ خود نشان دادهاندکه زاویهٔ ساحل از مؤثرترین عوامل در برآورد ضریب ایمنی است. بالا بودن میزان تراز آب زیرزمینی به افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی منجر می‌شود؛ بنابراین، کاهش مقاومت برشی به ناپایداری کناره در مقابل گسیختگی آن و در نتیجه به افزایش میزان فرسایش منجر می‌شود. سطح بالای آب زیرزمینی نیز فرسایش نشتی را در پی دارد. Parker و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی بر روی ضریب ایمنی تأثیر معنی‌داری دارد. نتایج مدل‌سازی پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای در بازه‌های موردبررسی نشان داد که از نظر پایداری بین مقاطع دارای پوشش و فاقد پوشش تفاوت قابل‌توجهی وجود دارد؛ به نحوی که در مقاطع فاقد پوشش، ضریب ایمنی کمتر از ۱ است که نشان می‌دهد در این مقاطع، ضریب ایمنی پایین و کنارهٔ رودخانه ناپایدار است. Khazaei و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای ناشی از جریان سطحی با استفاده از مدل BSTEM در رودخانهٔ بشار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میزان ضریب ایمنی در مقاطع فاقدپوشش، کمتر از یک است که ناپایداری کنارهٔ رودخانه در این مقطع را نشان می‌دهد و با یافته‌های این تحقیق همخوانی دارد.



شکل ۱۰: نمودار گسیختگی عرضی مقطع ۲ و ۵

۵ـ نتیجه‌گیری

از مدل BSTEM برای تعیین وضعیت پایداری، میزان عقب‌نشینی رودخانه، میزان بارگذاری رسوبات، میزان عرض و حجم گسیختگی، فرسایش پنجه‌ای و ضریب ایمنی استفاده می‌شود. اجرای این مدل، به اندازه‌گیری ریخت‌سنجی رودخانه، ژئومتری کنارهٔ رودخانه، مشخصات ژئوتکنیکی مواد کناری، خصوصیات جریان و خصوصیات پوشش گیاهی و حفاظتی نیازمند است. نتایج اجرای این مدل نشان داد که از نظر پایداری، بین

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

مقاطع دارای پوشش و مقاطع فاقد پوشش تفاوت قابل‌توجهی وجود دارد؛ به طوری که در مقاطع دارای پوشش با توجه به ضریب ایمنی بیش از یک (1<Fs)، رودخانه پایدار بود و در مقاطع فاقد پوشش، ضریب ایمنی کمتر از یک (Fs<1) بود که ناپایداری رودخانه را نشان می‌دهد. مقادیر تراز و ارتفاع جریان و مکش ماتریک با ضریب ایمنی رابطهٔ مثبت داشته و زاویه بانک، عمق ترک کششی و چسبندگی رابطهٔ معکوس داشته‌است. به‌طور کلی، نتایج مدل فرسایش کناری و پنجه‌ای نشان می‌دهد که مقاطع فاقد پوشش با توجه به وضعیت هندسی‌ای که دارد، از نظر پایداری، ناپایدار است. بنابراین، نیاز است در مسائل مهندسی رودخانه و سیلاب به ساماندهی و مدیریت آن پرداخته شود.

پیشنهادات

با توجه به نیاز آبی کشور و افزایش خسارت‌های ناشی از فرسایش و رسوب و وقوع سیل در کشور، بحث مدیریت و حفاظت رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و مسیل‌ها اهمیت زیادی دارد. بنابراین، ارائه الگوها و استانداردهای مناسب برای مدیریت و استفادهٔ بهینه برای مهار فرسایش‌های نامطلوب، کاهش خطرات وقوع سیل و بهره‌برداری بهینه از منابع آب اهمیت دارد تاپاسخگوی نیازهای فعلی و نسل‌های آینده باشد. برای جلوگیری از فرسایش بستر یا کنار رودخانه، شناخت گیاهان سازگار با اقلیم و شرایط فرسایشی امری لازم و ضروری است. پس پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از فرسایش آبی، به گیاهان بومی و ریخت‌های متفاوت گیاهی توجه شود. همچنین بررسی مقایسه‌ای سایر گونه‌های درختی بر پایداری کناری رودخانه و اجرای مطالعات مشابه در سایر رودخانه‌های استان، ارزیابی سناریوهای مختلف بیولوژیکی و مکانیکی در ساماندهی رودخانه‌های استان و بررسی مقایسه‌ای مقاومت برشی گونه‌های مختلف درختی استان بر پایداری رودخانه از پیشنهادهای دیگر است.

منابع

1. Abam, T. K. S., 1993. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger delta, *Engineering geology*, 35(1), 123-133.
2. Amiri Takledani, A.; Samadi, A.; & H. Rahimi, 2005. Effect of position and depth of cracks in the stability of the river bank, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 25(6), 77-93. (In Persian).
3. Casermeiro, A.; Molina, A.; Caravaca, L.; Costa, H.; Massanet, H.; & S. Moreno, 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate, *Catena*, 57(1), 91-107.
4. Commandeur, P. R., 1992, Soil erosion studies using rainfall simulation on forest harvested areas in British Columbia. Erosion. Debris Flows and Environment in Mountain Regions Proceedings of the Chengdu Symposium, IAHS Publ, cool-season perennial grasses, *Soil Science, Society, Amercan, Journal*, 58(209), 1194-99.
5. Darby, E.; Gessler, D.; & R. Thorne, 2000. Computer program for stability analysis of steep. Cohesive riverbanks, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 175-190.
6. Dastorani, M.; & F. Rajabimohamadi, (2012). Determining the mechanical and hydrological effects of plants along the riverbank on the stability of the river (Case

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

Study: The hana River). Third National Conference on Water Resources Management, Sari, Iran, University and Agriculture. (20-21, September), 1-7. (In Persion).
7. Ebrahimi, N.; Shirdle, E.; Nikkhah, A.; & M. Hoseani, 2016. Effect of vegetation on stream bed and bed form, *Scientific journal of engineering and watershed management*, 8(2), 182-192. (In Persion).
8. Gholinejad, J.; Zahiri, A.; & A. Dehghani, 2011. Study Effect of vegetation on the flood plains on hydraulic flow in compound channels, Fifth nationwide conference watershed and Water and Water Resources Management. Kerman, Iran, Association of Water and Water Engineering. (9-10 March). (In Persion).
9. Hosseanzadea, M., & R. Esmaeili., (2018). Estimating the erosion of the riverbank using the model BSTEM, *Geological Survey of Iran*, 11(45), 53-70. (In Persion).
10. Hubble, T. C. T.; Docker, B. B.; & I. D. Rutherfurd, 2010. The role of riparian trees in maintaining experience and practice. Riverbank stability: A review of Australian, *Ecological Engineering*, 36, 292-304.
11. Husseini, E.; Shfaei, M.; & H. Mousavi, 2013. The study of the root system of the tamarix is on the slope of the river simrae, *Science and irrigation engineering journal*, 36(4), 89-99. (In Persion).
12. Jarvela, J., 2002. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants, *Journal of Hydrology*, 269 (1-2), 44-54.
13. Khademian, A., & Y. Daneshmand., (2017). Introduction to the application of HEC-RAS software in the analysis and optimal design of hydraulic structures. 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Crisis Management, 1-8. (In Persion).
14. Khazaei, M.; Nouhegar, A.; Mahdavi, R.; & E. Telori, 2018. Study of the Streambank Erosion Using BSTEM Model in a reach of the Bashar River, *watershed researches journal*, (119), 64-78. (In Persion).
15. Khazaei, M.; Nouhegar, A.; Mahdavi, R.; & E. Telori, 2016. The investigation of Bank Stability and Toe Erosion Because of Surface Flow Using BSTEM Model (Case Study: Beshar River), *Ecohydrology journal*, 3(1), 55-68. (In Persion).
16. Khazaei, M.; Telori, E.; Nouhegar, A.; Mahdavi, R.; & M. Farzin, 2018. Checking the side - off state by using the BSTEM model (Case Study: River Bashar), *Watershed Research*, (119), 65-78. (In Persion).
17. Konsoer, K. M., 2015. Rhoads, Bruce Lane, Langendoen, Eddy J., Best, James L., Ursic, M. E., Abad, Jorge D. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river, *Geomorphology*, 252, 80-97.
18. Mahmoudi, A., & M. Asadineari., (2015). Prevent the erosion of the river side by using biological protection (the case study of the Barzand River in Ardabil province), 10th International Seminar on River Engineering, Ahvaz, Iran, Shahid Hamran University. (29 january-1 February). (In Persion)
19. Marqus, J.; Jimenez, L.; Perez-Rodrlguez, R.; Garcia-Ormaechea., S.; & R. Bienes, 2007. Reducing mapping soil erodibility based on Joint Sequential Simulation, *Catena*, 73,1-14.
20. Micheli, R., & W. Kirchner., (2002). Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics. *Earth Surface Processes and Landforms*. 27, 687-697.
21. Midgley, L.; Fox, A.; & M. Heeren, 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

Biological Sysems Engineering: Papers and Publications. Paper 312, Geomorphology. 145-146.
22. Nardi, L., & M. Rinaldi., (2010). Modelling riverbank retreat by combining reach-scale hydraulic models with bank-scale erosion and stability analyses. *River Flow*. 1285-1292.
23. Pallen-Bankhead, N., & A. Simon., (2009). Enhanced application of root-reinforcement algorithms for bank-stability modeling, *Earth Surface Processes Landforms*, 34(4), 471-480.
24. Parker, C.; Simon, A.; & C. R. Thorne, 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek. Mississippi, *Geomorphology*, 101(4), 533-543.
25. Pervan, H., & A. Hosseni., (2002). Role of plant cover at the side of the river for Karachay. The final report of the research plan, the Department of Water Resources Research and Water Resources Research Organization. 209.
26. Pollen, N., & A. Simon., (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).
27. Ranwell, S., 1983. Use of Vegetation in Shoreline Procection, Shore line procettion. Thomas Telford Ltd, London, 105- 110.
28. Rinaldi, M.; Mengoni, B.; Luppi, L.; Darby, S.; & E. Mosselman, 2008. Eumerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend, *Water Resources Research*, 44 W09428. Doi: 10.1029/2008WR007008.
29. Shirdeli, E., 2013. Survey Examination of the biology on the banks of rivers. Iran-Watershed Management, *Science & Engineering*, 7(23), 53-62. (In Persion).
30. Simon, A.; Pollen-Bankhead, N.; Mahacek, V.; & E. Langendoen, 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.
31. Simon, A.; Curini, A.; Darby, E.; & J. Langendoen, 2010. Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*, 35, 193-217.
32. Simon, A., & A. Collison., (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream bank stability. Earth Surface Processes and Landforms. *Explore this journal*. 27, 527-546.
33. Simon, A., & M. Rinaldi., (2006). Distur bance, stream incision, and channel evolution: the roles of excess transport capacity and bound ary materials in controlling channel response. *Geomorphology*. 79, 361-383.
34. Simon, A.; Bankhead, N.; & R. E. Thomas, 2010. Iterative bank stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions, Joint Federal Interagency Conference, Subcom mite on Hydrolgy and Sedimentoloogy Advistory Commite on Water Info. Las Vegas, Nevada, 27 June to 1 July.
35. Simon, A.; Derrick, D.; Alonso, C. V.; & N. Pollen-Bankhead, 2008. Application of a deterministic bank-stability model to design a reach-scale restoration progect. In Proceedings if the World Environmental and Water Resources Congress 2088 Ahupua (CD-ROM), edited by R. W. Babcock Jr. and R. Walton, Am. Soc. Of Civ. Eng., Reston, Va. Tion and analysis of river channels. John Wiley & Sons: Chichester, 142 p.
36. Surian, N., & M. Rinaldi., (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*. 50, 307-326.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

Effects of Tree Shear Strength on River Stability (Reach of BESHAR River)

Fatemeh Roushan Nasab: *Graduate Student of Forest Science Engineering, Forest-Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran*

MohammadReza Mirzaei*: *Assistant Professor, Forest-Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran*

Majid Khazaei: *Assistant Professor of Forests, Rangelands and Watershed Management Engineering, Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension, Yasouj, Iran*

Article History (Received: 2021/03/19 **Accepted:** 2021/11/7**)**

Extended Abstract

1- Introduction

So much of the river sediment occurrs due to bank erosion. Understanding and predicting bank erosion is a vital requirement for river management. During a flood, river flow shear stress exceeds river bank materials shear strength and causes a meandering. To prevent a river accresion in a floodplain, it is necessary to understand the river and perform river management and organization operations, especially in erosion reaches. Bank erosion occurs commonly during a relatively long reaches of the river. Due to the high cost, stabilization practices are only possible locally. In order to reduce this phenomenon, it is necessary to create vegetation in river reaches. The Bank Stability and Toe Erosion (BSTEM) model is one of the most widely used models in the world in most river engineering projects developed by the National Sediment Laboratory in Oxford, Mississippi, USA. The BSTEM model was initiallly developed by Pallen Benkhead and Simon to investigate riverbank stability under vegetation and water conditions. Subsequently, in BESTEM model, various plant and hydraulic parameters such as slope patterns, roughness, angle, and pore water pressure are used. BSTEM is a bank erosion model that examines hydraulic processes, toe erosion and bank failure in soil homogeneous layers and is a suitable tool for determining riverbank conditions in order to protect river from streamflow erosion. A review of the research studies conducted in this regard showed that although the BSTEM model is a model with a long history and validity (based on numerous projects, articles and dissertations) and had been used in different countries and important rivers of the world to study the stability and bank erosion. In Iran, few studies have been done on the BSTEM model, which shows the need to conuct further studies for the purpose of validating this model. Therefore, this study was designed using the BSTEM model to investigate the stability of the river bank with respect to existing plant species in a section of the Bashar River in the city of Yasuj.

2- Methodology

In this study, the Bank Stability and Toe Erosion (BSTEM) model has been used to investigate the stability of the reach of Bashar River in Kohgiluyeh and BoyerAhmad Province. This model is one of the most comprehensive models used for river engineering and management operations in the world, which besides stability, the failure rate, safety factor, erosion rate, sediment loading rate, and river accrestion rate are calculated. The appropriate reaches of the Bashar River for modeling, should have the same characteristics in terms of morphology, geology, land use and have a suitable length (300 meters). The study was condcuted by analyzing two parts: control (without cover, length = 300 meter) and experimental (with cover, length = 300 meter). Because

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]

of using the BSTEM model, it has been necessary to select several sections in the selected range. For this purpose, topographic maps and aerial photographs of the area were prepared. Then, with the help of these maps and Google Earth satellite images, a reach of the Bashar River was selected near the Darshahi region for modeling. Then, the selected reach was divided into two parts: control (without cover) and experimental (with cover) with the same length of 300 meters, and each part was divided into 3 sections of 100 meters. Shear strength of tree species was measured in cross-sections. The reserachers performed data comparison analysis with HEC-RAS software and BSTEM model.

3- Results

The results of flood simulation in the HEC-RAS model in section 1 with cover reach and section 4 without cover reach showed that, in a 2-year flood, the average flow velocity in the middle of the cross section is 2.18 and 1.41 m/s, respectively (the estimated speed of the HEC-RAS model), and the flow height were 1.39 and 2.72 meters, respectively. The results of this study also showed that in terms of stability, there is a difference between sections with land cover (Fs <1) and no cover land (Fs <1). The results also pointed to the fact that the average width and volume of failure of the river bank in the no land cover section was 2.72 meters and 6280 cubic meters, respectively, and in the land cover section was 1.42 meters and 1686.33 cubic meters.

4- Discussion & Conclusion

The results showed that in terms of stability, there is a significant difference between covered and no covered sections because of the safety factor, which confirmed the instability of the studied reach. Based on the results of uncovered sections, due to fact that their geometric condition are unstable, the need for river management operations intesifies. The results showed that for sections with vegetation, the safety factor is higher than one, which indicated the bank stability in the studied reach, while in sections of no cover, the river is unstable. Increasing tensile crack depth, and bank angle resulted in bank instability, and increasing river flow level, groundwater level and suction matrix can lead to bank stability. In order to prevent bank river erosion, cultivation and growth of plants that are compatible with the climate and the erosive conditions are necessary. Therefore, it is suggested that native plants and other various plant forms be used to prevent bank river erosion. In addition, comparative studies need to be performed on other species in order to determie the role of plant cover on river bank stability in other rivers.

Key Words: **Bank Erosion, Failure, Land Cover, River, Stability Model**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6]