



دوره ۳۱، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۱۹، تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۶۴-۷۸
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMEJ.2018.121118.1098

پژوهش‌های آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

بررسی وضعیت فرسایش کناری با استفاده از مدل BSTEM در بازه‌یی از رودخانه‌ی بشار

* مجید خزایی

(نویسنده‌ی مسئول) * دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد

عبدالرسول تلوری

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، خوزستان، اهواز

احمد نوحه‌گر

استاد دانشکده‌ی محیط‌زیست، گروه مهندسی طراحی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

رسول مهدوی نجف‌آبادی

گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

محسن فرزین

استادیار دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه یاسوج

تاریخ دریافت: اسفند ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: مرداد ۱۳۹۷

* Corresponding Email: Khazayi64@gmail.com

چکیده

نیاز حیاتی مدیریت رودخانه، درک و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای است. فرسایش کناره‌ای، یکی از منابع اصلی رسوب‌گذاری در بسیاری از رودخانه‌های جهان است. در این پژوهش از ترکیب مدل‌های BSTEM و HEC-RAS، برای بررسی پایداری بازه‌یی از رودخانه‌ی بشار در پنج رگبار، با شدت کم تا خیلی زیاد استفاده شد. مقادیر ارتفاع سیلاب و مشخصات هندسی مقاطع عرضی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS و HECGEORIS برای جریان غیرماندگار استخراج شد. مقادیر ژئوتکنیکی ورودی به مدل BSTEM نیز از طریق نمونه‌برداری از لایه‌های مختلف مقاطع عرضی در آزمایشگاه و جدول‌های مدل BSTEM به‌دست آمد. طبق نتایج میانگین اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی در مقاطع یک تا پنج، به‌ترتیب به‌اندازه‌ی ۱۲۸، ۲۱۰، ۲۰۰، ۳۷ و ۶۵ سانتی‌متر، میانگین اندازه‌ی مساحت فرسایش‌یافته به‌ترتیب ۲/۰۱، ۴/۱، ۵/۳۶، ۰/۷ و ۲/۶۵ مترمربع، عرض گسیختگی به‌ترتیب ۱/۷۳، ۳/۱۲، ۲/۳۲، ۸/۵۶ و ۲/۶۵ متر و میانگین ضریب ایمنی، به‌ترتیب ۰/۳۴، ۰/۳۳، ۰/۲۷، ۱/۰۷ و ۰/۷۹ بود که حاکی از ناپایداری مقاطع است. میانگین بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی و کمینه‌ی ضریب ایمنی در سیلاب‌هایی با آب‌دهی اوج ۵۳۷ و ۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه رخ داده است. به‌طور کلی ناپایداری بازه‌ی انتخابی از رودخانه‌ی بشار پی‌آمد اجرای مدل BSTEM را در بازه‌ی انتخابی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رگبار، ضریب ایمنی، فرسایش پنجه‌ای، مهندسی رودخانه، ناپایداری

Study of the Streambank Erosion Using BSTEM Model in a reach of the Bashar River

Majid Khazaei*

(Corresponding Author)* Ph.D. Watershed Management, Hormozgan University

Abdolrasol Telvari

Civil Engineering, Science and Research Branch Islamic Azad University (Ahwaz Branch)

Ahmad Nohegar

Professor of Environmental Engineering Department of the Environment, Tehran University

Rasol Mahdavei

Faculty of Agricultural & Natural Resources, Hormozgan University

Mohsen Farzin

College of Agriculture, Yasuj University

Abstract

The vital need for river management and prediction of bank erosion processes is obvious. Riverbank erosion is one of the major sources of sediment for many rivers across the world. In this research, a combination of morphology methods, satellite imagery and BSTEM model were used for stability analysis of Bashar River. Comparison of the results of the BSTEM model indicated that the averages of maximum lateral retreat in cross sections of 1 to 5 were 128, 210, 200, 37 and 65 cm; the average of total eroded area were 2.01, 4.1, 5.36, 0.7 and 2.65 m²; the failure width were 1.73, 3.12, 2.32, 8.56 and 2.65 m, and the factor of safety were 0.34, 0.33, 0.27, 1.07 and 0.79, respectively, indicating the instability of the studied cross sections. On average, the maximum lateral retreat and the minimum factor of safety occurred in the floods peaking at the 537 and 912 m³/s, respectively. The results of the application of the BSTEM model in the selected reach indicated the instability of this reach of the river.

Keywords: instability, rainstorm, river engineering, safety factor, toe erosion

مقدمه

(۱۹۹۱). تخریب کناره‌ی رودخانه زمانی رخ می‌دهد که فرسایش در پنجه‌ی کناره‌ای و بستر نهر مجاور به کناره، سبب افزایش ارتفاع و زاویه‌ی کناره‌ای رودخانه شود؛ تاجایی که اندازه‌ی نیروهای گرانشی بیش از اندازه‌ی مقاومت برشی ناشی از مواد کناره‌ای شود (سیمون و همکاران ۱۹۹۹). از اواخر سال ۱۹۹۰ مدل پایداری کناره‌ای فیزیکی تعیین^۱ به وسیله‌ی آزمایشگاه رسوب‌گذاری ملی^۲ (USDA-ARS) برای مدل‌سازی گسیختگی صفحه‌ای توسعه پیدا کرد.

مدل‌سازی رودخانه‌ها ابزاری است که به کمک آن آب‌شناس‌ها و مهندسان منابع آب می‌توانند مطالعه و درک هیدرولیکی جریان در رودخانه را برای پروژه‌های مرتبط و پیش‌بینی سیلاب‌ها و تهیه‌ی سامانه‌های هشدار سیل به کار برند (سیمون و همکاران ۱۹۹۱). مدل‌های پایداری کناره‌ای، از جمله مدل‌های رودخانه‌ای‌اند که بر اهمیت تعامل بین نیروهای هیدرولیک و نیروهای گرانشی یا ژئوتکنیکی تأکید دارند (تورن ۱۹۸۲؛ سیمون و همکاران

1- Physical-Deterministic

2- National Sedimentation Laboratory

BSTEM در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق میخ‌های فرسایش مقاطع عرضی مطابقت داشته است (گیلیام ۲۰۱۱). نتایج ایشان نشان داد که افزایش مدت جریان‌های بیشینه، سبب افزایش اندازه‌ی آب‌شستگی پنجه‌ای شده است. علاوه بر ترکیب مدل BSTEM با HEC-RAS برای محاسبات فرسایش کناری، لی و همکاران (۲۰۱۲) مدل دوبعدی SRH-2D را با مدل تعینی BSTEM برای پیش‌بینی تغییرات کناری رودخانه می‌سی‌سی‌پی در یک دوره‌ی پنج‌ساله ترکیب و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. نتایج تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده، عملکرد مطلوب مدل را در پیش‌بینی اندازه‌ی عقب‌نشینی رودخانه نشان داده است. مدل BSTEM علاوه بر محاسبه‌ی اندازه‌ی فرسایش کناری، می‌تواند نقش عوامل مؤثر بر فرسایش کناری از جمله اقدامات حفاظتی پوشش‌های کناری را نیز تعیین کند. در این راستا دلی و همکاران (۲۰۱۵) از مدل BSTEM برای تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش کنار رودخانه‌ای و گسیختگی، استفاده کردند و اندازه‌ی عقب‌نشینی را با گذشت زمان (دوره‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) در رودخانه‌ی بارن فورک کریک^۶ در اوکلاهامای غربی برآورد کردند. نتایج نشان داد که نسبت عقب‌نشینی حدود ۴/۱ تا ۷۴/۸ (به‌طور میانگین برابر با ۴۹/۲) در ده نقطه‌ی مورد بررسی، متغیر بوده است. به‌طور کلی از نتایج تحقیقات صورت‌گرفته جمع‌بندی می‌شود که مدل BSTEM با توجه به در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر بر فرسایش و امکان ترکیب با مدل‌های هیدرولیکی، به‌عنوان یک مدل جامع برای اقدامات مهندسی و مدیریت رودخانه، کاربردهای گسترده‌ای در دنیا داشته است. با وجود تحقیقات اندک صورت‌گرفته در ارتباط با بررسی فرسایش کناری، هیچ‌گونه پژوهشی در ارتباط با استفاده از مدل BSTEM به نظر نویسندگان این مقاله نرسید. در این راستا، هدف از این پژوهش، بررسی وضعیت پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای بازه‌ای از رودخانه‌ی بشار، بر اثر فرایندهای هیدرولیکی با استفاده از مدل BSTEM است.

مواد و روش‌ها

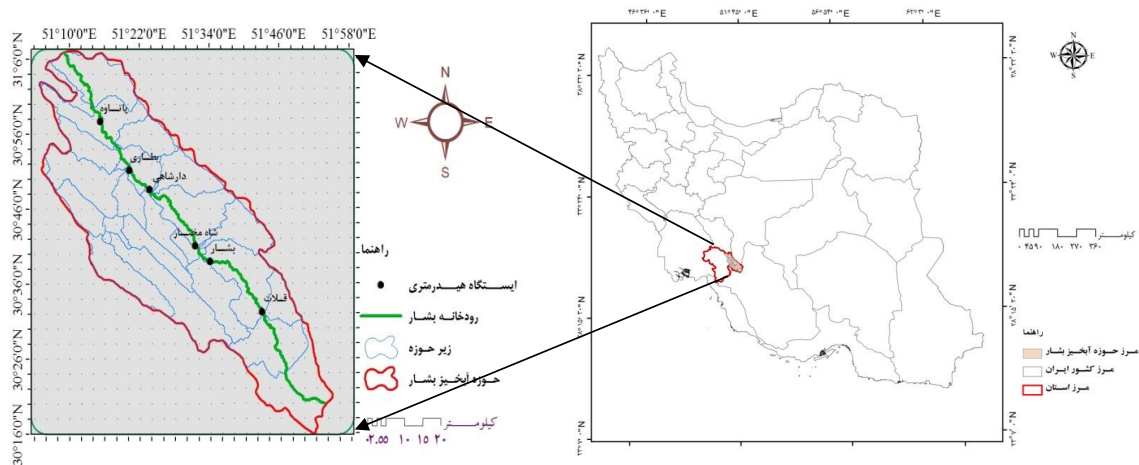
منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز رودخانه‌ی بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد، در محدوده‌ی طول‌های 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 واقع شده است. بیشینه‌ی ارتفاع حوضه ۴۴۳۷ متر از سطح دریا، کمینه‌ی آن ۱۳۵۷ متر و میانگین ارتفاع آن ۲۱۹۹ متر است (شکل ۱).

در حال حاضر این مدل یکی از پیچیده‌ترین مدل‌های فرسایش موجود است. مدل اولیه‌ی^۳ BSTEM را سیمون و همکاران (۲۰۰۰، ۱۹۹۹) ایجاد کردند که روش تعادل حدی^۴ است و در آن معیار گسیختگی موهر کلمب^۵ برای بخش اشباع کنار رودخانه و معیار فردلانند و همکاران (۱۹۸۷) برای بخش غیراشباع استفاده می‌شود. BSTEM یک مدل فرسایش کناره‌ای است که فرایندهای هیدرولیکی، فرسایش پنجه‌ای و گسیختگی کناره‌ای را در لایه‌های همگن و کناره‌های لایه‌بندی شده بررسی می‌کند. این مدل، کناره‌ی رودخانه را به پنج لایه‌ی قابل تعریف به وسیله‌ی کاربر تقسیم می‌کند که هر کدام خصوصیات ژئوتکنیکی متفاوتی دارد. مدل دارای زیرمدل پیش‌بینی فرسایش پنجه‌ای و زیرشویی کناره‌ای است که بر روش تنش برش مازاد مبتنی است و با الگوریتم‌های ژئوتکنیکی ترکیب شده است. این مدل می‌تواند اثر پوشش گیاهی و مکانیکی را نیز مدل‌سازی کند (سیمون و کولیسون ۲۰۰۲؛ میچیلی و کیچنر ۲۰۰۲؛ پولن و سیمون ۲۰۰۵). تحقیقات صورت‌گرفته در ارتباط با مدل BSTEM برای پیش‌بینی و برآورد فرسایش کناری، محدود به پژوهش‌های خارجی است و هیچ پژوهشی در داخل کشور، در ارتباط با مدل یادشده صورت نگرفته است. در این زمینه سیمون و همکاران (۲۰۰۹) به‌منظور ارزیابی پتانسیل کاهش بارگذاری رسوب‌های رودخانه‌ها، به برآورد حجم گسیختگی کناره تحت شرایط موجود با استفاده از مدل پایداری BSTEM اقدام کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که حفاظت پنجه‌ی کناره با سنگ، با ارتفاع یک متر سبب کاهش چشمگیر (۶۹-۱۰۰٪) در اندازه‌ی فرسایش رودخانه‌ای می‌شود و تعداد گسیختگی در هر دوره‌ی شبیه‌سازی، در بیشتر موارد فقط به یک رخداد می‌رسد. نتایج تحقیق سیمون و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که سهم رسوب معلق برآوردشده‌ی ناشی از فرسایش کنار رودخانه‌ای، با مدل BSTEM در شیب‌های کم، تا ۱۲٪ و در حوزه‌های جنگلی عمیق تا ۴۷٪ متغیر بوده است.

مدل پایداری کناری و فرسایش پنجه‌ای، نسخه‌های متفاوتی دارد که در یکی از نسخه‌ها این مدل با مدل HEC-RAS ادغام شده است (ناردی و رینالدی ۲۰۱۰). آن‌ها با ترکیبی از مدل‌های هیدرولیکی یک‌بعدی HEC-RAS و مدل پایداری BSTEM، اندازه‌ی عقب‌نشینی رودخانه‌ی سسیا^۶ را برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین اندازه‌ی عقب‌نشینی با شبیه‌سازی جریان پایدار در مدت سه ساعت به دست آمده است و تنش برشی محاسبه‌شده کمتر از تنش برشی بحرانی بوده است؛ در نتیجه هیچ‌گونه فرسایش آبرفتی‌ای مشاهده نشده است. بررسی مقادیر فرسایش کناری با مدل

- 3- Bank Stability and Toe Erosion Model
- 4- Limit Equilibrium Method
- 5- Mohr-Coulomb Failure Criteria
- 6- Cecina
- 7- Barren Fork Creek



شکل ۱- نقشه‌ی موقعیت ایستگاه‌های آبسنجی در حوزه‌ی آبخیز بشار.

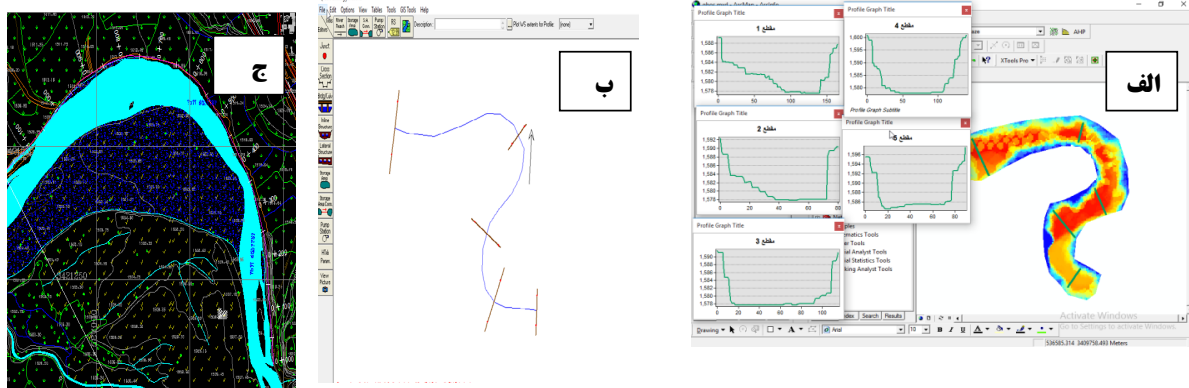
روش پژوهش

در این پژوهش برای جمع‌آوری داده‌ها از مجموعه‌ای از عملیات صحرایی، آزمایشگاهی و نقشه‌های پستی‌وبلندی استفاده شد. ترسیم مقاطع عرضی بازه‌ی انتخابی در نرم‌افزار ARCGIS 9.3 و محاسبات هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS، در شرایط ناماندگار صورت گرفت. برای تعیین اطلاعات مقاطع و بازه‌ی انتخابی از نرم‌افزار HECGIORAS استفاده شد که مشخصات کناره‌های چپ و راست در هر مقطع عرضی، به نرم‌افزار HEC-RAS وارد شد. با واردکردن مقادیر ضریب زبری و مشخصات هیدروگراف‌های سیلاب، مدل‌سازی هیدرولیکی بازه‌ی انتخابی انجام

شد. در نهایت به‌منظور بررسی پایداری کناری از نسخه‌ی فورترین نرم‌افزار BSTEM استفاده شد.

انتخاب بازه‌ی از رودخانه برای مطالعات پایداری

بعد از بررسی نقشه‌های پستی‌وبلندی، زمین‌شناسی، فرسایش کناره‌ای و بازدید صحرایی، بازه‌ی از رودخانه که از لحاظ اراضی حاشیه‌ای و وضعیت فرسایش کناره‌ای اهمیت داشت، انتخاب شد. مقاطع عرضی رودخانه‌ی بشار با استفاده از نقشه‌ی پستی‌وبلندی در مقیاس ۱/۲۰۰۰ و تهیه‌ی نقشه‌ی مدل رقمی ارتفاع در نرم‌افزار ARCGIS 9.3 به‌دست آمد (شکل ۲).

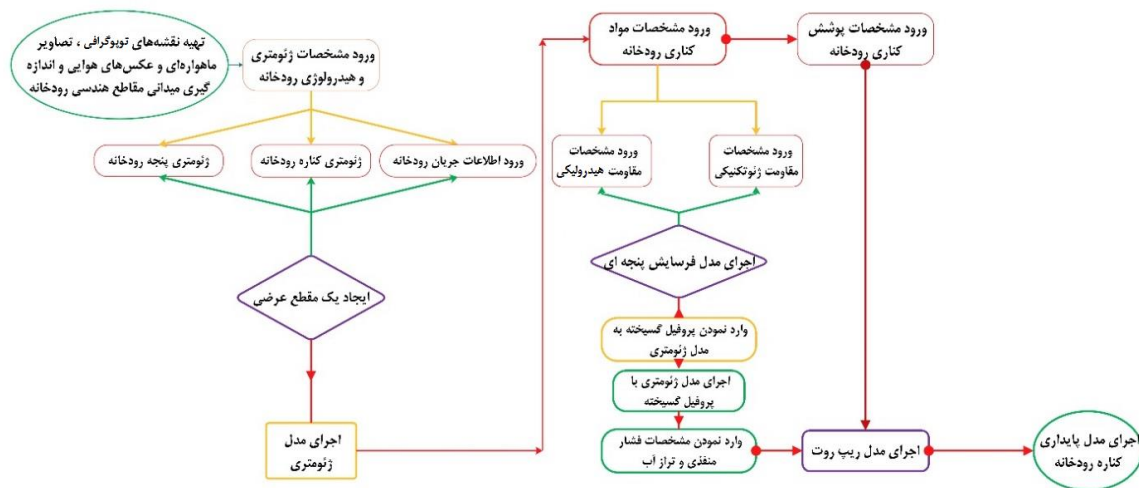


شکل ۲- تصویر مدل رقمی ارتفاع (الف) و مقاطع عرضی بازه‌ی انتخابی (ب) و نمایی از بازه‌ی از رودخانه‌ی بشار در نرم‌افزار اتوکد (ج).

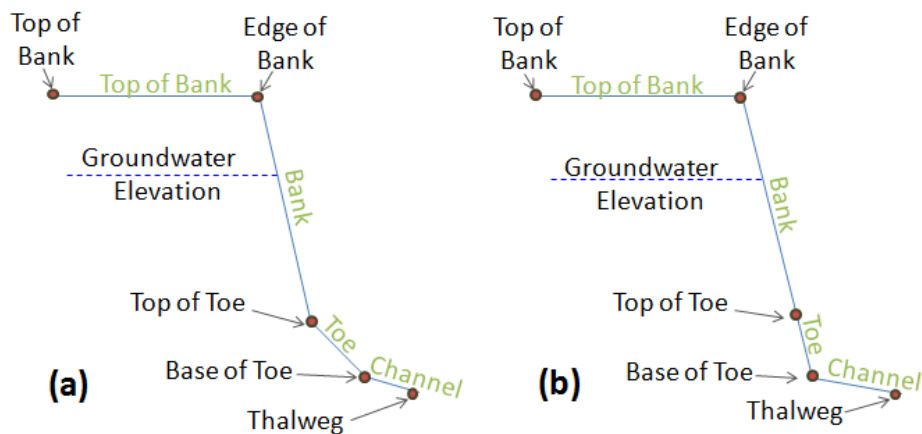
کناره، ضخامت لایه‌های خاک، ویژگی‌های نهر (عرض، عمق، شیب و درجه‌ی انحنا)، ویژگی‌های جریان (سرعت، تنش برشی)، ویژگی‌های خاک (توزیع اندازه‌ی ذرات، ضخامت لایه‌های خاک)، خصوصیات هیدرولیکی و مواد کناره‌ای رودخانه (اندازه، درجه‌بندی و اندازه‌ی چسبندگی و تعیین نوع و درصد پوشش گیاهی) دارد. روند نمایی اجرای مدل فرسایش کناره‌ای و پنجه‌ای در شکل ۳ و نحوه‌ی تعیین نقاط ایستگاهی برای تعیین مشخصات هندسی مقطع عرضی ورودی به مدل BSTEM در شکل ۴ ارائه شده است.

اجرای مدل پویا پایداری کناره و فرسایش پنجه‌ای (BSTEM- Dynamic)

مدل BSTEM یک مدل فیزیکی است؛ به طوری که داده‌های مورد نیاز برای کار با آن، همگی مربوط به نیروهای کمی محرک و مقاوم‌کننده‌ی کناره‌ی رودخانه است که فرایندهای هیدرولیک و ژئوتکنیک را که بر کناره وارد می‌شود، مهار می‌کنند. مقادیر ویژگی‌های ورودی به مدل را می‌توان از راه اندازه‌گیری‌های صحرائی یا از طریق آزمایشگاه محاسبه کرد. مدل یادشده، نیاز به تعیین خصوصیات هندسی (ارتفاع، طول، شیب، شکل، نقشه‌ی



شکل ۳- نمودار روند نمایی از مدل‌سازی فرسایش کناره‌ای و پنجه‌ای با استفاده از مدل BSTEM.



شکل ۴- تصویر تعیین نقاط ایستگاهی برای نیمی از مقطع عرضی مدل BSTEM.

$$S_r = c + (\delta - \mu_w) \tan \phi \quad \text{رابطه ۵:}$$

که در این رابطه، S_r مقاومت برشی خاک برحسب کیلوپاسکال، δ ضریب چسبندگی خاک برحسب کیلوپاسکال، δ تنش بهنجار برحسب کیلوپاسکال، μ_w فشار منفذی آب برحسب کیلوپاسکال و Φ زاویه مؤثر داخلی خاک به درجه است. وزن خاک، نیروی محرک است که با رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$S_d = w \sin(\beta) \quad \text{رابطه ۶:}$$

که در آن S_d تنش محرک ناشی از وزن خاک و w وزن قطعه‌ی خاک مرطوب در هر واحد سطح گسیختگی دیواره برحسب (KN/M-2) و β زاویه‌ی سطح گسیختگی برحسب درجه است (سیمون و همکاران ۲۰۰۰). مقاومت برشی خاک با تغییر محتویات رطوبتی خاک و ارتفاع ناحیه‌ی اشباع در توده‌ی کناره‌ای تغییر می‌کند. در بخشی از بالای کناره‌ی رودخانه که سطح آب زیرزمینی عادی است، مواد کناره‌ای غیراشباع‌اند و خلل و فرج‌ها با آب‌وهوا پر می‌شوند و فشار آب منفذی، منفی است. اختلاف $(\mu_a - \mu_w)$ بین فشار هوا μ_a و فشار آب μ_w در خلل و فرج‌ها، مکش ماتریک $(\mu_a - \mu_w)$ را نشان می‌دهد. افزایش در مقاومت برشی به‌علت افزایش در مکش ماتریک با زاویه‌ی b_ϕ نشان داده می‌شود که برای همه‌ی خاک‌ها و با محتوای رطوبتی برای خاک مشخص، متغیر است (فردلانند و رهااردجو ۱۹۹۳). درحالی‌که به‌طور کلی مقادیری بین ۱۰ تا ۲۰ با بیشینه‌زاویه‌ی اصطکاک مؤثر خاک تحت شرایط اشباع می‌گیرد. اثر مکش ماتریک ϕ^b بر مقاومت برشی در چسبندگی ظاهری (c_a) منعکس می‌شود که تلفیقی از پیوندهای الکتروشمیایی در ماتریک خاک است و با چسبندگی مؤثر (c) توضیح داده می‌شود. دلیل چسبندگی، تنش سطحی روی سطح آب-هوا در خاک‌های غیراشباع است (فردلانند و رهااردجو ۱۹۹۳) (رابطه ۷).

$$c_a = c' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b = c' + \Psi \tan \Phi_b \quad \text{رابطه ۷:}$$

که در آن c_a چسبندگی ظاهری (کیلوپاسکال)، c' چسبندگی مؤثر (کیلوپاسکال)، μ_a فشار منفذی هوا (کیلوپاسکال)، μ_w فشار منفذی آب، $\mu_a - \mu_w$ مکش ماتریک (کیلوپاسکال) و ϕ^b (بر حسب درجه) زاویه‌ای است که افزایش مقاومت برشی را به‌علت افزایش مکش ماتریک نشان می‌دهد. همان‌طور که از رابطه‌ی (۸) مشخص است:

$$t_c^* = \frac{t_c}{g(\rho_s - \rho) D_{50}} \quad \text{رابطه ۸:}$$

فشار منفذی منفی آب (مکش ماتریک مثبت) در ناحیه‌ی غیراشباع بیشتر از چسبندگی مؤثر است؛ بنابراین مقاومت برشی بیشتر می‌شود. این حالت در شیب‌های کناره‌ای تند، مشهودتر است. به‌طور معکوسی آب کناره‌ی رودخانه

محاسبه‌ی مؤلفه‌های فرسایش پنجه‌ای

مؤلفه‌های مدل فرسایش پنجه‌ای، زیرشویی خاک را در پی فرسایش رودخانه‌ای تخمین می‌زنند. این مدل، فرسایش را براساس تنش برشی پیش‌بینی می‌کند (سیمون و همکاران ۲۰۱۰). در این نسبت فرسایش با رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$E = K(t_o - t_c) \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن K ضریب فرسایش‌پذیری، t_o تنش برشی میانگین و t_c تنش برشی بحرانی خاک است. این ویژگی‌ها تابع خصوصیات خاک هستند و براساس قطر میانگین ذرات خاک محاسبه می‌شوند. ویژگی‌های ژئوتکنیکی رودخانه (K و t_c) برای خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده از راه محاسبه‌ی D_{50} برآورد می‌شود. این روابط به‌صورت تجربی برای خاک‌های چسبنده گسترش داده شدند؛ در صورتی‌که به‌وسیله‌ی BSTEM برای خاک‌های غیرچسبنده نیز استفاده می‌شوند (رینالدی و همکاران ۲۰۰۸). رابطه‌ی توسعه‌یافته‌ی سیمون و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از آزمون دستگاه جت مستغرق برای مواد چسبنده برای محاسبه‌ی فرسایش‌پذیری استفاده شده است (رابطه ۲):

$$K = 1.6t_c^{-0.82} \quad \text{رابطه ۲:}$$

و برای مواد غیرچسبنده رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود:

$$K = 0.1t_c^{-0.5} \quad \text{رابطه ۳:}$$

این رابطه به‌صورت تحلیلی با تنش برشی مازاد مبتنی بر توابع حمل بار بستر پیشنهادشده‌ی دوبوی (۱۸۷۹) مقایسه شده است که برآورد معقولی را از K برای ذراتی در حد شن درشت فراهم آورده است. تنش برشی میانگین براساس رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود (سیمون و همکاران ۲۰۰۰):

$$t_o = \gamma_w R S \quad \text{رابطه ۴:}$$

که در آن γ_w وزن واحد حجم خاک (۹/۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب)، R شعاع هیدرولیکی برحسب متر و S شیب نهر برحسب متربرمتر است.

تعیین نیروهای ژئوتکنیکی مقاوم‌کننده و محرک

در مدل BSTEM، عامل ایمنی از نسبت بین اندازه‌ی نیروهای مقاوم، به نیروهای فرساینده محاسبه می‌شود که نیروی مقاوم از رابطه‌ی موهر کلمب به‌دست می‌آید (رابطه ۵) (فردلانند و رهااردجو ۱۹۹۳).

بررسی وضعیت فرسایش کناری با استفاده از مدل...

فرض شده است که فشار منفذی هوا تحت تأثیر نیوار (اتمسفر) است (یعنی: $\mu_a = 0$). مثبت یا منفی بودن فشار منفذی آب برای نقاط میانی هر لایه براساس فشار هیدرواستاتیک محاسبه می‌شود (رابطه ی ۱۰).

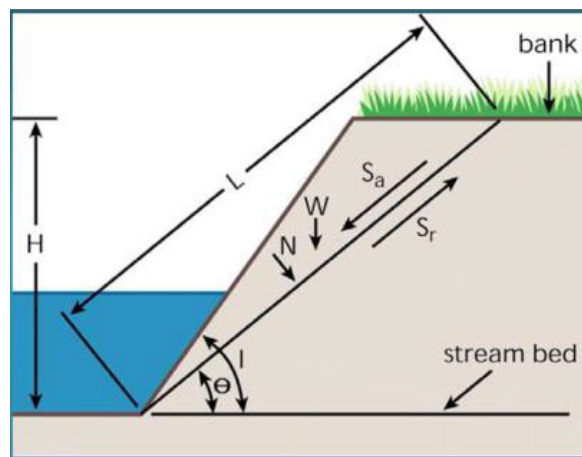
$$\mu_w = \gamma_w h \quad \text{رابطه ی ۱۰:}$$

که در آن μ_w فشار منفذی آب (کیلوپاسکال)، γ_w وزن مخصوص آب 9.807 kNm^{-3} و h ارتفاع بالای آب در نقطه‌ی میانی لایه (متر) است. نیروهای محرک ژئوتکنیکی به‌وسیله‌ی ارتفاع و شیب کناره، وزن مخصوص خاک و توده‌ی آب درون آن و اضافه‌بار ایجادشده، به‌وسیله‌ی هر شیء در بالای کناره مهار می‌شود.

و ارتفاع تراز آب، توده‌ی کناره را ضعیف‌تر و آن را به گسیختگی حساس می‌کند. با محاسبه‌ی اثر اصطکاک، مقاومت برشی خاک t_s ، با معیار مقاومت برشی موهر کلمب (رابطه ی ۹) برای خاک‌های غیراشباع محاسبه می‌شود (فردلاند و همکاران ۱۹۷۸):

$$t_s = \frac{1}{F_s} [c' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b + (\sigma - \mu_a) \tan \phi'] \quad \text{رابطه ی ۹:}$$

که در آن F_s عامل ایمنی، نسبت بین نیروهای مقاوم و محرک است که روی قطعه‌ای با توان گسیختگی عمل می‌کند و σ تنش بهنجار روی صفحه‌ی برشی (کیلوپاسکال) و ϕ' (بر حسب درجه) زاویه‌ی مؤثر اصطکاک داخلی خاک است.



شکل ۵- تصویر مؤلفه‌های مقاومت برشی کناره: H : ارتفاع کناره؛ L : طول سطح گسیختگی، S_a : نیروهای محرک؛ S_r : نیروهای مقاوم‌کننده؛ θ : زاویه‌ی سطح گسیختگی؛ N : مؤلفه‌ی معمول وزن؛ W : سطح گسیختگی.

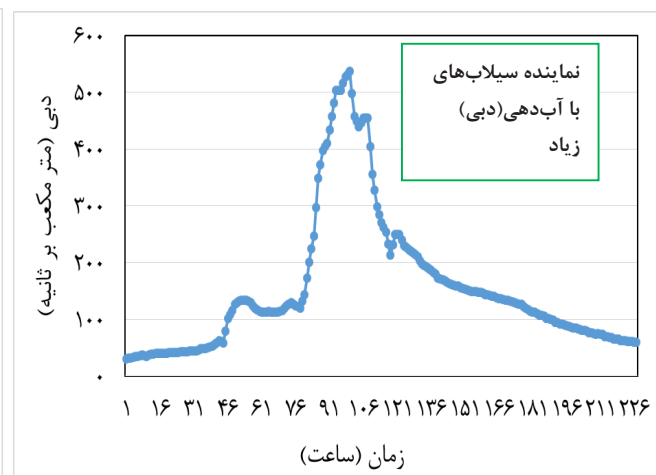
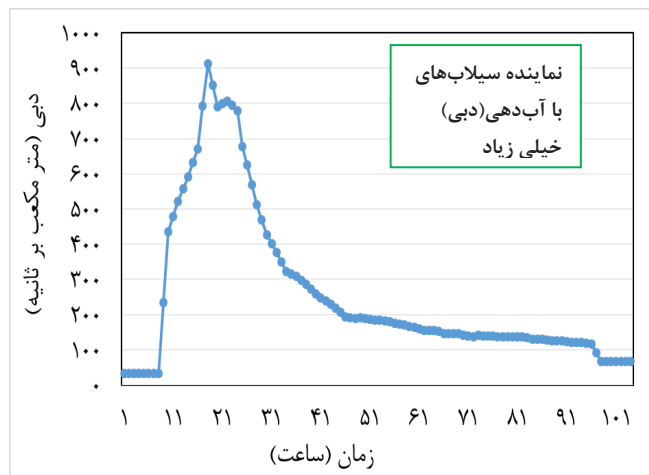
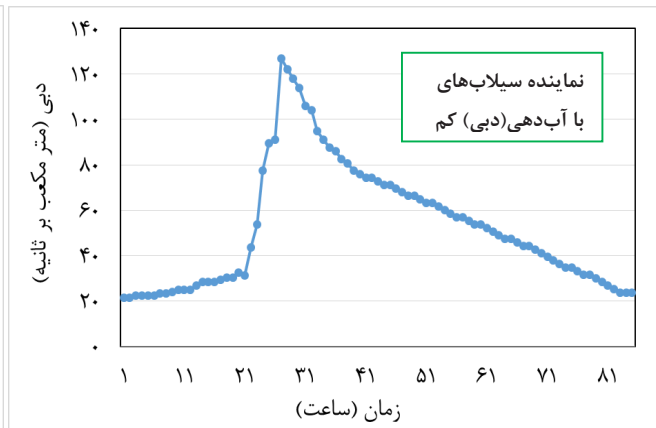
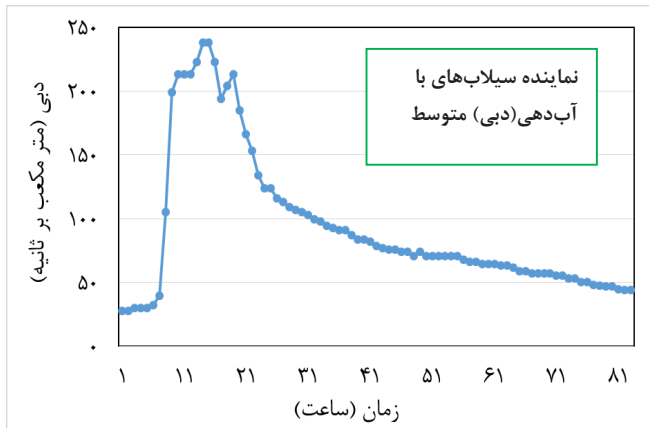
نتایج

مدل‌سازی هیدرولیکی مقاطع مورد بررسی از بازه انتخابی

یکی از داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل BSTEM، داده‌های سیلاب از جمله ارتفاع جریان است. بعد از بررسی، سیل‌های سال‌های مختلف با توجه به نوع سیل مورد نیاز برای ورود به مدل، چهار سیل انتخاب و برای محاسبه‌ی ارتفاع سیلاب در هر مقطع، به نرم‌افزار HEC-RAS وارد شدند (شکل ۶). سیلاب‌ها طوری انتخاب شدند که در طبقات سیلابی کم تا زیاد و آب‌دهی‌های کمینه تا بیشینه‌ی سیلاب‌های ثبت‌شده در ایستگاه پاتاوه را پوشش دهند. نتایج مدل‌سازی غیرماندگار سیلاب‌های یادشده در شکل ۷، در پنج مقطع عرضی مورد بررسی ارائه شده است.

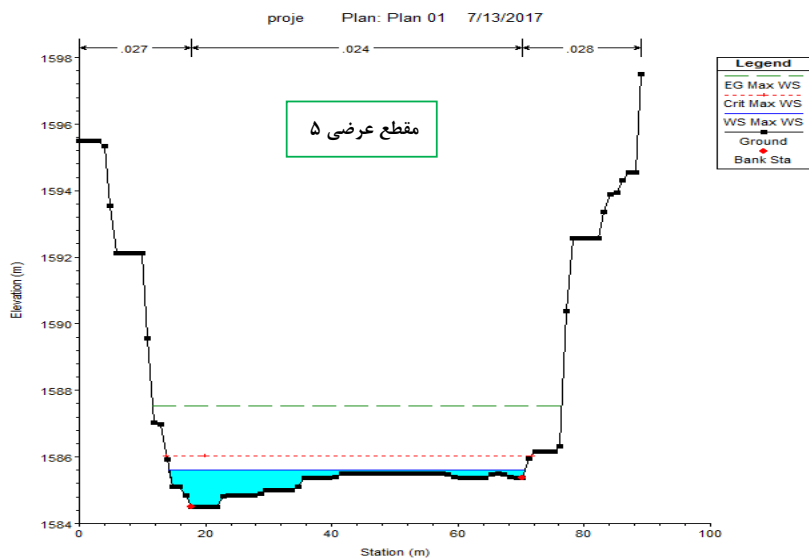
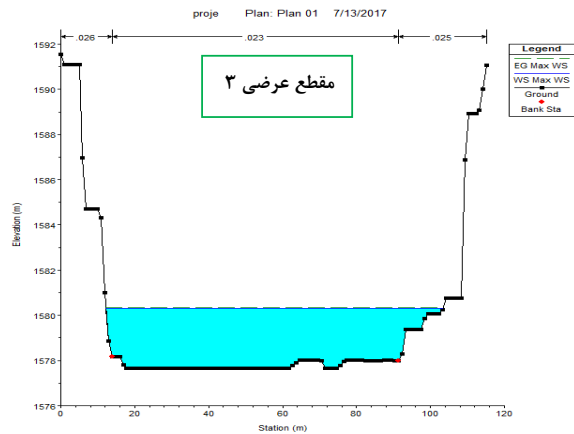
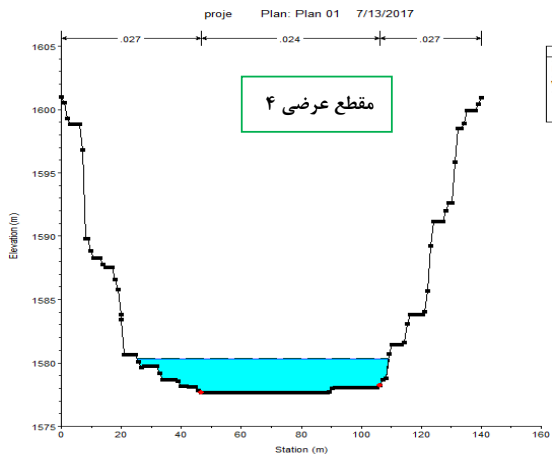
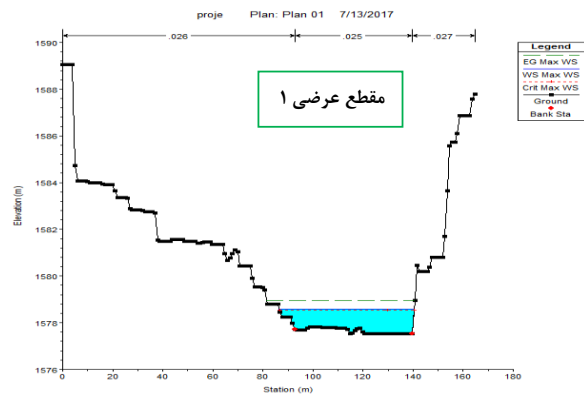
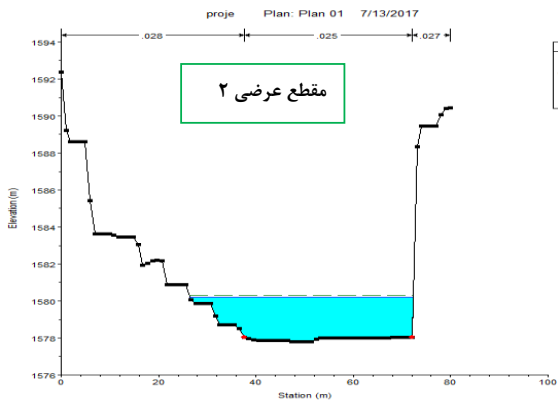
بررسی گسیختگی ژئوتکنیکی

عامل ایمنی از نسبت بین نیروهای مقاوم‌کننده و محرک که روی قطعه‌هایی با پتانسیل شکست عمل می‌کنند به‌دست می‌آید. مقدار ضریب ایمنی بیشتر از یک، نشان‌دهنده‌ی این است که گسیختگی حتمی است (قریب‌الوقوع است) در حالتی که ضریب ایمنی کمتر از یک باشد، شرایط ناپایدار و در حالت برعکس، پایدار است. شرایط تا حدی پایدار، زمانی اتفاق می‌افتد که ضریب ایمنی بین ۱ و ۱/۳ باشد.



شکل ۶- نمودارهای آبنمود سیلاب ایستگاه پاتاوه در سیلاب های انتخابی.

بررسی وضعیت فرسایش کناری با استفاده از مدل...

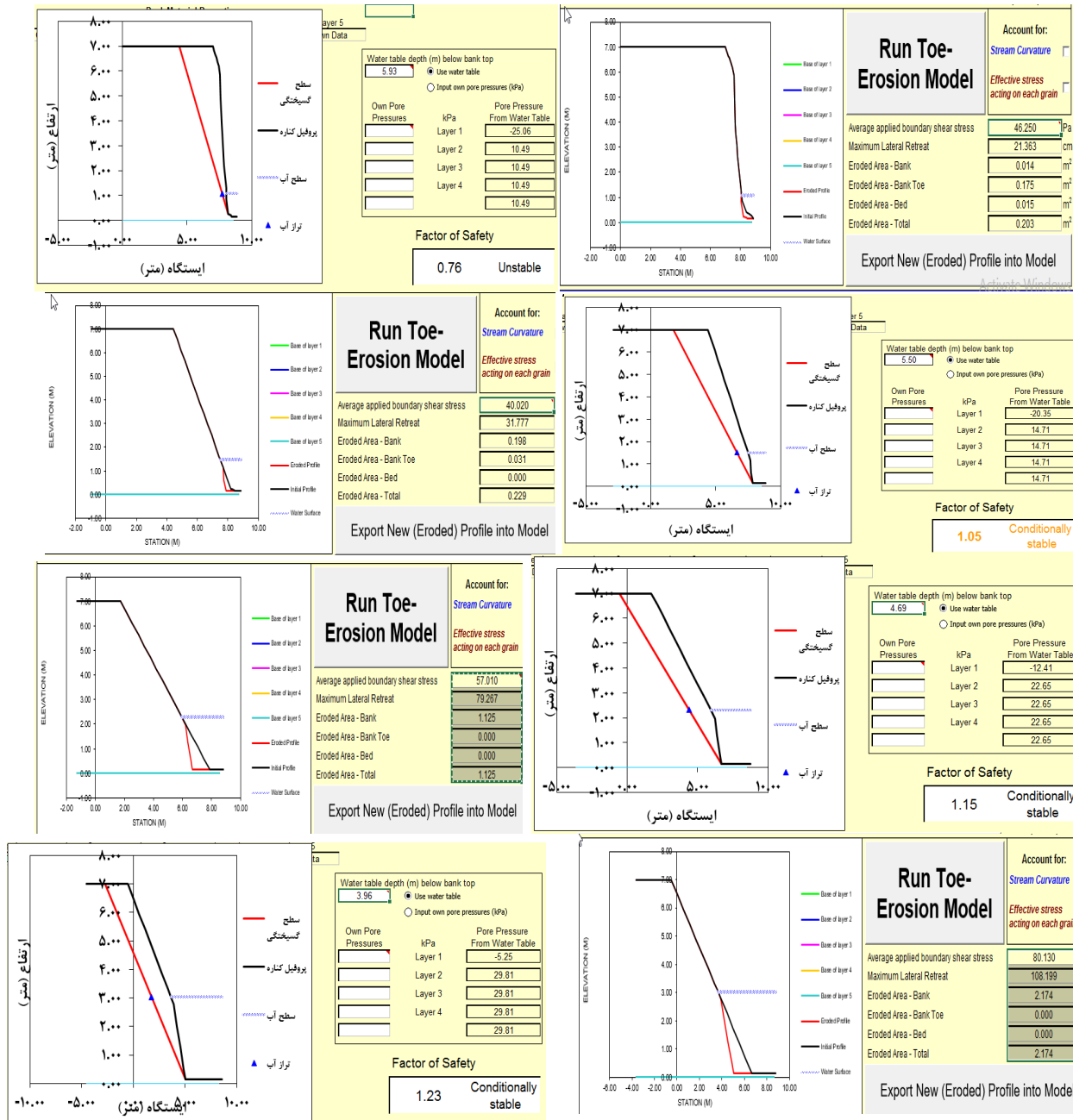


شکل ۷- تصویر مقطع عرضی شماره ۵ از بازه‌ی انتخابی در سیلاب ۱.

شامل عرض گسیختگی، حجم گسیختگی و عامل ایمنی ارائه شده است. شکل ۸ تصاویری از نتایج مدل فرسایش پنجه و پایداری کناری را در یکی از سیلاب‌ها، در دو حالت اثرهای تکراری سیلاب‌ها، یعنی اجرای مدل بر خاک‌رخ ایجادشده بر اثر هر سیل نشان داده است. نتایج مدل BSTEM در هر دو حالت اثر سیلاب بر خاک‌رخ در حالتی که کناره ثابت باشد و اثر هر سیل بر خاک‌رخ کناره‌ی اولیه بررسی شد. حالت دوم اثر سیلاب بر خاک‌رخ ایجادشده بر اثر سیلاب‌های قبلی در جدول‌های ۱ تا ۱۰ ارائه شده است.

نتایج مدل‌سازی پایداری کناره‌ای و فرسایش پنجه‌ای در بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی بشار

با لحاظ ورودی‌های هندسی، هیدرولیکی و ژئوتکنیکی در هر سیلاب و هر مقطع از بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی بشار در مدل پایداری کناره‌ای و فرسایش پنجه‌ای، نتایج مدل BSTEM شامل نتایج مدل فرسایش پنجه‌ای و نتایج مدل پایداری به‌دست آمد که مدل فرسایش پنجه‌ای شامل تنش برشی مرزی، بیشترین عقب‌نشینی رودخانه، مساحت فرسایش‌یافته و مدل کناره،



شکل ۸- تصویر صفحه‌ی مدل پنجه و پایداری کناره‌ای در مقطع عرضی ۱ از بازه‌ی انتخابی در سیلاب ۴.

بررسی وضعیت فرسایش کناری با استفاده از مدل...

جدول ۱- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره ۱ (در حالت اثر سیلاب‌های منفرد).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۱	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۴۶/۲۵	۷۰/۴	۱۲۵/۸	۱۶۷/۹
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۲۱/۳۶	۵۰/۷	۲۴۲	۲۰۱/۵
	مساحت فرسایش‌یافته -کناره (مترمربع)	۰/۰۱۴	۰/۱	۲/۳۸	۲/۹۷
	مساحت فرسایش‌یافته - پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۱۷	۰/۴	۱/۰۷	۰/۹۳
	مساحت فرسایش‌یافته - کل (مترمربع)	۰/۲۰	۰/۵	۳/۴۵	۳/۹
	عرض گسیختگی (متر)	۲/۶	۲/۲	۱/۳۲	۰/۸
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۷۶	۰/۶	۰	۰/۰

جدول ۲- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره یک (در حالت اثر سیلاب‌های متوالی).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۱	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۴۶/۲۵	۴۹/۵۲	۵۷/۰۱	۸۰/۱۳
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۲۱/۳۶	۳۱/۸	۷۹/۳۶	۱۰۸/۲
	مساحت فرسایش‌یافته-کناره (مترمربع)	۰/۰۱۴	۰/۲	۱/۱۳	۲/۱۷
	مساحت فرسایش‌یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۱۷	۰	۰	۰
	مساحت فرسایش‌یافته - کل (مترمربع)	۰/۲۰	۰/۲	۱/۱۳	۲/۱۷
	عرض گسیختگی (متر)	۲/۶	۲/۷	۲/۲۵	۲/۲۳
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۷۶	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۲۳

رودخانه شده است. دیواره‌ی کناری جدید رودخانه نیز بر اثر سیلاب بعدی که دارای آب‌دهی ۲۳۸ مترمکعب‌برثانیه نیز بوده است، در پنجه‌ی رودخانه به‌اندازه‌ی ۲۰ سانتی‌متر زیرشویی داشته است و حالت نسبتاً پایداری به وجود آورده است. به‌تدریج با واردشدن سیلاب‌های بعدی بر دیوار کناره‌ای به‌وجودآمده بر اثر سیلاب‌های قبلی، مقطع کناره‌ای نسبتاً پایدار شده است. بررسی اثر سیلاب‌ها به‌صورت مجزا بر خاک‌رخ کناری اولیه‌ی رودخانه نشان داد که بیشترین و کمترین اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی مقطع یک در رگبارهای ۳ و ۱ به‌ترتیب به‌اندازه‌ی ۲۴۲ و ۲۱ سانتی‌متر است. اندازه‌ی گسیختگی در رگبارهای مختلف نیز بین ۰/۸ تا ۲/۶ متغیر بود. اندازه‌ی عامل ایمنی در تمامی رگبارها کمتر از یک بود که حاکی از ناپایداری کناره‌ای رودخانه در حالت اثر مجزای هر رگبار بر خاک‌رخ عرضی کناره است. در رگبارهای ۳ و ۴ اندازه‌ی ناپایداری کناره‌ای بیشتر از رگبارهای دیگر بود؛ یعنی عامل ایمنی صفر بود، که با اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی در هر رگبار نیز مطابقت دارد.

مقطع کناره‌ای شماره‌ی یک در رگبار اولی (شدت کم) ناپایدار بود و در رگبارهای بعدی به حالت پایدار رسید (جدول ۱). با توجه به ناپایداری شدن مقطع کناره‌ای رودخانه در رگبار یک، رودخانه در این مقطع تا بیشینه‌ی ۲/۶ متر گسیخته شد. نتایج اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی مقطع مورد بررسی در رگبارهای مختلف نشان داد که به‌ترتیب بیشینه و کمینه‌ی اندازه‌ی عقب‌نشینی در رگبارهای شماره‌ی چهار (خیلی شدید) و یک (شدت کم) اتفاق افتاده است که با اندازه‌ی تنش برشی مرزی در این رگبارها مطابقت دارد. در مقایسه‌ی بین فرسایش در کناره‌ای و پنجه‌ای، فرسایش بیشتر در قسمت کناره‌ی رودخانه اتفاق افتاده است. بررسی خاک‌رخ‌های ایجادشده بر اثر سیلاب‌های متوالی بر خاک‌رخ کناری اولیه، حاکی از این است که مقطع عرضی در اولین رگبار به حالت ناپایدار درآمده است که این ناپایداری سبب گسیختگی دیواره‌ی کناره‌ای رودخانه شده است (جدول ۲). گسیختگی ایجادشده در رگبار ابتدایی به‌نوبه‌ی خود سبب شیب ملایم در دیوار کناره‌ای

جدول ۳- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره دو (در حالت اثر سیلاب‌های منفرد).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۲	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۹۶/۴	۱۰۹	۱۴۸/۲	۱۸۱/۸
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۹۲/۱	۱۱۹	۳۷۴/۶	۲۶۲/۶
	مساحت فرسایش‌یافته - کناره (مترمربع)	۰/۶۵	۱/۲	۶/۷	۵/۶
	مساحت فرسایش‌یافته - پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۳۵	۰/۴	۰/۹	۰/۷۴
	مساحت فرسایش‌یافته - کل (مترمربع)	۱	۱/۶	۷/۶۳	۶/۴
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۸	۳/۵	۲/۴	۲/۸
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۵	۰/۵	۰/۰	۰/۳۱

جدول ۴- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره دو (در حالت اثر سیلاب های متوالی).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۲	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۹۶/۴	۹۳/۳	۱۳۹	۱۷۹/۲
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۹۲/۱	۱۱۵	۲۲۵/۳	۲۵۳
	مساحت فرسایش یافته-کناره (مترمربع)	۰/۶۵	۰/۶	۶/۳	۹/۲
	مساحت فرسایش یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۳۵	۱/۱	۰/۲	۰
	مساحت فرسایش یافته- کل (مترمربع)	۱	۱/۸	۶/۵	۹/۲
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۸	۳/۵۸	۲/۴۳	۲/۲۲
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۵	۰/۶۷	۰/۶	۰/۵۲

نتایج مدل BSTEM در تعیین وضعیت پایداری کناره‌ای و فرسایش پنجه‌ای مقطع ۲ از بازه‌ی انتخابی نشان داد که هنگامی که وضعیت کناره‌ای جدید رودخانه در ادامه‌ی اثر سیلاب‌های قبلی بررسی می‌شود، بعد از ایجاد شرایط ناپایدار در سیلاب اولی (عامل ایمنی به میزان ۰/۵) به علت شرایط هندسی این مقطع عرضی و ورود سیلاب‌های قوی‌تر، سبب گسیختگی دیوار کناری و ناپایداری رودخانه شده است (جدول ۳). مقادیر عقب‌نشینی جانبی نیز بسته به شرایط هیدرولیکی سیلاب از ۹۲ سانتی‌متر در سیلاب اول تا ۲۵۳ سانتی‌متر در سیلاب سوم متغیر بود. بیشترین عرض گسیختگی در

سیلاب‌های مورد بررسی به اندازه‌ی ۴ متر محاسبه شده است. بررسی پایداری کناره‌ای و فرسایش پنجه‌ای در حالتی که اثر هر سیلاب به صورت مستقل بر مقطع عرضی کناره‌ای بررسی می‌شود نشان داد که از نظر پایداری در تمامی سیلاب‌ها ناپایدار بوده است و این ناپایداری بسته به شرایط سیلابی بین صفر تا ۰/۵ متغیر بود. اندازه‌ی فرسایش در رگبارهای ۳ و ۴ بیشترین بود که دلیل آن زیادبودن تنش برشی سیلاب در این رگبارها است. بیشینه‌ی اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی در این مقطع عرضی تا ۳۷۴ سانتی‌متر نیز رسید (جدول ۴).

جدول ۵- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره سه (در حالت اثر سیلاب های منفرد).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۳	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۷۲/۰	۹۳/۴	۱۳۱	۱۶۵/۱
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۷۷/۶	۱۱۳/۴	۳۶۸/۱۲	۲۳۸/۱۳
	مساحت فرسایش یافته - کناره (مترمربع)	۰/۲	۰/۵	۵/۳	۴/۹
	مساحت فرسایش یافته - پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۱/۱	۱/۶	۴/۲۵	۳/۵
	مساحت فرسایش یافته- کل (مترمربع)	۱/۳	۲/۲	۹/۵	۸/۴۵
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۳	۲/۶	۱/۹۲	۱/۴۵
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۵۷	۰/۵	۰/۰	۰/۰

جدول ۶- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره سه (در حالت اثر سیلاب های متوالی).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۳	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۷۲/۰	۹۰/۵۴	۱۳۱	۱۷۴/۰
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۷۷/۶	۱۰۵/۳۳	۱۹۴/۱۲	۲۳۸/۰۳
	مساحت فرسایش یافته-کناره (مترمربع)	۰/۲	۰/۶۰	۵/۷	۹/۶۹
	مساحت فرسایش یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۱/۱	۱/۳۷	۰/۵۵	۰
	مساحت فرسایش یافته- کل (مترمربع)	۱/۳	۱/۹۸	۶/۲۵	۹/۶۹
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۳	۲/۷۸	۲/۲۱	۱/۷۳
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۴۲

نتایج ارزیابی سیلاب‌ها بر مقطع عرضی شماره ۳ بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی بشار نشان داد که در این مقطع مشابه به مقاطع ۱ و ۲، در سیلاب‌هایی با آب‌دهی ۵۳۷ و ۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه در وضعیت کاملاً ناپایدار و در سیلاب با آب‌دهی ۲۳۸ و ۱۲۷ مترمکعب بر ثانیه به وضعیت ناپایدار رسیده است. عرض گسیختگی تا ۳/۳ متر، اندازه‌ی فرسایش تا ۵/۹ مترمربع و بیشترین

عقب‌نشینی پنجه تا ۳۶۸ سانتی‌متر متغیر بوده است. این مقطع از بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی بشار در سیلاب با آب‌دهی ۱۲۷ مترمکعب بر ثانیه به حالت ناپایدار درآمد است و این ناپایداری به صورت گسیختگی بخشی از کناره‌ی رودخانه و ایجاد حالتی با ناپایداری کمتر شده است که بر اثر تداوم سیلاب‌های بعدی، کناره‌ی

بررسی وضعیت فرسایش کناری با استفاده از مدل...

این مقطع از رودخانه به حالت پایدار درنیا آمده است (جدول ۵). نتایج مقایسه‌ی اثر مستقل هر سیلاب بر مقطع عرضی اولیه‌ی رودخانه، از اثر ناپایدارکننده‌ی هر سیلاب بر این مقطع از رودخانه حکایت دارد. اندازه‌ی اثرگذاری سیلاب بر هر مقطع، بسته به شرایط هیدرولیکی سیلاب متفاوت بود که این تفاوت در تنش برشی مرزی، عقب‌نشینی جانبی، مساحت فرسایش‌یافته، عرض و حجم گسیختگی و عامل ایمنی خود را نمایان کرده است (جدول ۶).

جدول ۷- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره چهار (در حالت اثر سیلاب‌های منفرد).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۴	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۱۶۶/۱	۲۵۳/۲	۴۲۵/۱	۵۱۱/۴
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۸/۹	۸/۹	۸/۴	۷/۹۹
	مساحت فرسایش‌یافته-کناره (مترمربع)*	-	-	-	-
	مساحت فرسایش‌یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)*	-	-	-	-
	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)*	-	-	-	-
	عرض گسیختگی (متر)*	-	-	-	-
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۱/۱	۱/۱	۰/۸۱	۰/۸۰

*به علت وجود صخره در پنجه کناره، هیچ‌گونه فرسایشی مشاهده نگردید.

جدول ۸- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره چهار (در حالت اثر سیلاب‌های متوالی).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۴	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۱۶۶/۱	۱۲۳/۴۹	-	-
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۳۶/۷	۱۰۰/۱۴	-	-
	مساحت فرسایش‌یافته-کناره (مترمربع)*	-	-	-	-
	مساحت فرسایش‌یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)*	-	-	-	-
	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)*	-	-	-	-
	عرض گسیختگی (متر)	۸/۹	-	-	-
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۱/۱	۱/۷	-	-

*به علت وجود صخره در پنجه کناره، هیچ‌گونه فرسایشی مشاهده نگردید.

این میزان از گسیختگی، ارتفاع بالای این مقطع از رودخانه و گسیختگی آن بر اثر زیرشویی خاک در پی فرسایش جانبی بود. اندازه‌ی ضریب ایمنی در سیلاب‌های ۱ تا ۴ در مقطع عرضی ۴ به ترتیب ۱/۱، ۱/۱، ۰/۸۱ و ۰/۸۰ بود (جدول ۷ و ۸).

ارزیابی نتایج مدل BSTEM در سیلاب‌های مختلف مقطع ۴ نشان داد که این مقطع از بازه‌ی انتخابی بر اثر سیلاب‌های اتفاق افتاده به حالت پایدار رسیده است. نتایج مدل پایداری کناره در سیلاب‌های ۱ تا ۴ حاکی از زیادبودن عرض گسیختگی در مقطع ۴ است که یکی از عوامل زیادبودن

جدول ۹- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره پنج (در حالت اثر سیلاب‌های منفرد).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
مقطع ۵	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۳۳/۲	۳۹	۵۳/۷	۶۱/۷
	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۲۸/۱۶	۴۱/۳	۱۱۶/۲	۷۵/۵
	مساحت فرسایش‌یافته-کناره (مترمربع)	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۵۳	۰/۴۶
	مساحت فرسایش‌یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۱۵	۰/۲	۰/۴۸	۰/۴۴
	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)	۰/۱۶	۰/۲	۱/۰۱	۰/۹
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۱۶	۳/۱	۲/۶	۱/۸
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۸۳	۰/۸	۰/۷۲	۰/۷۸

جدول ۱۰- نتایج مدل BSTEM در مقطع عرضی شماره پنج (در حالت اثر سیلاب های متوالی).

شماره مقطع	متغیرها	کم	متوسط	شدید
	میانگین تنش برشی مرزی (پاسکال)	۳۳/۲	۳۱/۸۱	۴۵/۳
مقطع ۵	بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی (سانتی‌متر)	۲۸/۱۶	۲۱/۹۹	۳۶
	مساحت فرسایش‌یافته-کناره (مترمربع)	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱۹
	مساحت فرسایش‌یافته- پنجه‌ی کناره (مترمربع)	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۴۴
	مساحت فرسایش‌یافته- کل (مترمربع)	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۶۳
	عرض گسیختگی (متر)	۳/۱۶	۳/۷۱	-
	عامل ایمنی (بی‌بعد)	۰/۸۳	۱/۳	۱/۷۵

زاویه‌ی کناره نسبت به پنجه و وزن توده‌ی کناره رخ داده است. گسیختگی معمولاً از قسمتی از کناره اتفاق می‌افتد که ناپایداری دارد و بر اثر گسیختگی و ریزش قسمتی از کناره در پا یا پنجه‌ی کناره، خودبه‌خود شبیهی ملایم بر دیوار کناره‌ای رودخانه ایجاد شده است؛ به طوری که به تدریج با ورود سیلاب‌های بعدی بر دیوار کناره‌ای به وجودآمده بر اثر سیلاب‌های قبلی، مقطع کناره‌ای به حالت نسبتاً پایدار درآمده است؛ البته این به معنای پایداری رودخانه نیست؛ بلکه ملایم تر شدن شیب کناری از حالت عمودی به حالت مایل دلیل آن است. کاهش شیب عمودی و دیوار کناری رودخانه موجب می‌شود که با وقوع هر سیل سیلاب طغیان کند و سیل به زمین‌های اطراف سرریز شود و بستر رودخانه گسترش یابد.

بالاتر رفتن ارتفاع سیلاب در کناره‌های عرضی رودخانه سبب ورود جریان به کناره و اشباع شدن آن می‌شود؛ به طوری که بعد از تخلیه و فروکش کردن سیلاب، جریان آب از کناره به سمت رودخانه هدایت می‌شود که علاوه بر سست شدن و مستعد شدن کناره برای ریزش و ناپایداری، سبب فرسایش شیب‌های در کناره‌ی رودخانه نیز می‌گردد. در این ارتباط آدام (۱۹۹۳) گزارش داد که سطح آب نهر سبب مقاومت در برابر گسیختگی کناره می‌شود. وقتی سطح آب نهر کاهش می‌یابد، این مقاومت انفعالی نمی‌تواند طولانی باشد و سبب گسیختگی سریع کناره خواهد شد. وی گزارش داد که کناره‌هایی با شیب تندتر از کناره‌های نسبتاً مسطح، مقاومت برشی کمتری دارند.

در مقاطع بررسی شده در سیلاب‌های مستقل، اندازه‌ی ضریب ایمنی کمتر از یک بود که نشانه‌ی ناپایداری بازه‌ی انتخابی است. ضریب ایمنی علاوه بر سیلاب به خصوصیات هندسی کناره‌ی رودخانه، زاویه‌ی کناره، تراز آب زیرزمینی، پوشش کناری و عمق ترک کششی بستگی دارد؛ به طوری که امیری تکلدانی و همکاران (۲۰۰۵) زاویه‌ی ساحل را مؤثرترین ویژگی در برآورد ضریب ایمنی گزارش دادند. در ارتباط با تراز آب زیرزمینی، بالا بودن تراز آب سبب فشار منفذی بیشتر و مقاومت برشی کمتر می‌شود. مقاومت برشی کمتر هم، سبب ناپایداری کناره در مقابل گسیختگی کناره و افزایش اندازه‌ی فرسایش می‌شود. سطح بالای آب زیرزمینی می‌تواند سبب ایجاد فرسایش نشتی نیز بشود. پارکر و همکاران (۲۰۰۸) نیز تأثیر معنی‌دار زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی را روی ضریب ایمنی گزارش داده‌اند.

نتایج ارزیابی سیلاب‌ها بر مقطع عرضی ۵ بازه‌ی انتخابی رودخانه‌ی بشار بر اثر سیلاب‌های متوالی نشان داد که سیلاب با آب‌دهی ۱۲۷ متر مکعب بر ثانیه در وضعیت ناپایدار بود و در سیلاب‌های بعدی به وضعیت پایدار رسید. اثر مستقل سیلاب‌ها بر مقطع عرضی ۵ نشان داد که بیشترین تنش برشی مرزی به ترتیب در سیلاب‌های ۱ تا ۴ به اندازه‌ی ۳۳، ۳۹، ۵۳ و ۶۱ پاسکال است. بیشینه‌ی اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی و مساحت کل فرسایش‌یافته در سیلاب ۳ به میزان ۱۱۶ سانتی‌متر و ۱ مترمربع و بیشترین عرض گسیختگی تا ۳/۱۶ متر در سیلاب ۱ بوده است. نتایج ارزیابی سیلاب‌ها به صورت مجزا بر مقطع شماره ۵ نیز وضعیت ناپایدار این مقطع از رودخانه‌ی بشار را نشان داد (جدول ۹ و ۱۰).

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش در دو حالت انجام شد، در یکی اثر هر سیل با لحاظ کردن خاک‌رخ ایجادشده از سیلاب‌های قبلی، به صورت مستقل در نظر گرفته شد و در حالت دوم اثر هر سیل بی‌توجه به اثر سیلاب‌های قبلی بر خاک‌رخ کناری بررسی شد. بررسی خاک‌رخ‌های ایجادشده بر اثر سیلاب‌های متوالی بر خاک‌رخ کناری اولیه، حاکی از این بود که مقطع عرضی در همه‌ی مقاطع، در اولین رگبار به حالت ناپایدار درآمده است و ناپایداری سبب گسیختگی دیواره‌ی کناره‌ای رودخانه شده است. به طور کلی از نتایج اجرای مدل BSTEM در بازه‌ی انتخابی جمع‌بندی می‌شود که بیشترین و کمترین اندازه‌ی عقب‌نشینی جانبی در مقاطع دو و چهار، به ترتیب ۲۱۰ و ۳۷ سانتی‌متر، بیشترین و کمترین اندازه‌ی مساحت فرسایش‌یافته در مقاطع سه و چهار، به ترتیب ۵/۳۶ و ۰/۷ مترمربع و پایدارترین و ناپایدارترین مقاطع، به ترتیب مقاطع چهار و سه با میانگین ضریب ایمنی ۰/۲۷ و ۱/۰۷ است. به طور میانگین بیشینه‌ی عقب‌نشینی جانبی و کمینه‌ی ضریب ایمنی در سیلاب‌هایی با آب‌دهی اوج ۵۳۷ و ۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه رخ داده است.

نتایج نشان داد که بیشتر ناپایداری کناره‌ای رودخانه بر اثر گسیختگی قسمتی از کناره با عوامل هیدرولیکی مانند تراز سیلاب، تراز آب زیرزمینی، تنش برشی و آب‌دهی بیشینه‌ی سیلاب، و عوامل هندسی مانند شیب کناره،

- Abam TKS. 1993. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger delta. *Engineering geology*. 35(1): 123-133.
- Amiri Takledani A, Samadi A, Rahimi H. 2005. Effect of position and depth of cracks in the stability of the river bank. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 25 (6): 25. 77-93. (In Persian).
- Daly ER, Miller R, Fox GA. 2015. Modeling streambank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks. *Advances in Water Resources*. 81(1): 114-127.
- Du Boys P. 1879. Le Rho[^]ne et les rivi_ers a lit affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées, Me'moires et Documents, Serie 5, (18)*: 141-195.
- Fredlund DG, Morgenstern NR, Widger RA. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 15(3): 313-321.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics of Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y. 554 pp.
- Gilliam EA. 2011. Assessing channel change and bank stability downstream of a dam, Wyoming. Master of Science Thesis. Colorado State University. 281p.
- Lai YG, Thomas RE, Ozeren Y, Simon A, Greimann BP, Wu K. 2012. Coupling a two-dimensional model with a deterministic bank stability model. ASCE World Environmental and Water Resources Congress, Albuquerque, New Mexico, May 20-24.
- Micheli ER, Kirchner JW. 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(7): 687-697.
- Nardi L, Rinaldi M. 2010. Modelling riverbank retreat by combining reach-scale hydraulic models with bank-scale erosion and stability analyses. *River Flow, Braunschweig, Gernany*, pp. 1285-1291.
- Parker C, Simon A, Thorne CR. 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology*. 101 (4): 533-543.
- 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).
- Rinaldi M, Mengoni B, Luppi L, Darby SE, Mosselman E. 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend. *Water Resources Research* 44, W09428. doi:10.1029/2008WR007008.
- Simon A, Curini A, Darby SE, Langendoen EJ. 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*. 35(3): 193-217.
- Simon A, Bankhead N, Thomas RE. 2010. Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting streambank loading rates and potential load reductions. In: *Proceedings of the 9th Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, June 27-July 1, 2010* [On CD]. U.S. Government Printing Office: Washington, D.C.
- Simon A, Collison AJC. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*. 27(5): 527-546.
- Simon A, Curini A, Darby SE, Langendoen EJ. 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*. 35(3): 193-217.
- 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(1): 170-186.
- Simon A, Wolfe WJ, Molinas A. 1991. Mass wasting algorithms in an alluvial channel model, *Proceedings of the Fifth Federal Interagency Sedimentation Conference, Las Vegas, Nevada, 2, 8-22 to 8-29*.
- Thorne CR. 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne, (eds.), *Gravel-Bed Rivers*. John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, pp. 227-271.