



Erosion modeling of Jajrud river banks Between Letyan and Mamlu dams Jajrud, Tehran

Ali Golestani ¹✉ , Mohammad Mahdi Hosseinzadeh ² 

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Email: Golestani@ut.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Email: m_hosseinzadeh@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Review Article

Article History:

Received:

23 May 2023

Received in revised form:

28 August 2023

Accepted:

29 September 2023

Available online:

2 November 2023

Keywords:

Jajrud River,
Letyan Dam,
Bank stability,
Bank Erosion,
BSTEM.

ABSTRACT

Rivers in their path are always struggling with a phenomenon called erosion, which on the one hand causes many changes in the geometric shape of the river section, morphology and hydraulic characteristics of its flow, and on the other hand, it brings irreparable effects to the lands adjacent to the channel. One of the main sources of sediment production is the erosion of river banks. In this regard, investigating the amount of coastal erosion is one of the management strategies. The area under study is the banks of the Jajroud River, between Letian Dam and Mamlo Dam, with a total of seven sections. In this study, for the erosion of the river bank and estimation of the amount of sediment from the method or model of estimation of the bank and foot of the bank (BSTEM) in this model, the geometrical parameters of the channel (angle of the wall and height of the bank and the distance of the toe of the bank and its angle), the height of the layers And their species, flow information and vegetation cover and other side cover materials have been extracted and used. In this research, the depth of the flow in a spiral discharge mode and the flow duration of 12 hours were used to model the bank erosion. The model models the amount of bank destruction by calculating the shear stress and soil resistance. The results of the research showed that all sections except section 6 have high erosion. The difference in erosion values in different stages was mostly due to the type of bank sediments and bank slope angle. In terms of bank stability and safety factor (FS), the most unstable bank was in section 5 and the most stable bank was in section 6 of the river.

Cite this article: Golestani, A., & Hosseinzadeh, M. M. (2023). Erosion modeling of Jajrud river banks Between Letyan and Mamlu dams Jajrud, Tehran. *Physical Geography Research Quarterly*, 55 (3), 89-109.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358931.1007770>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Rivers always struggle with a phenomenon called erosion on the one hand, it makes many changes in the geometric shape of the river section, morphology, and hydraulic characteristics of its flow, and on the other hand, it brings irreparable effects to the lands adjacent to the channel. There are different types of erosion phenomena, one of the most important and common erosion mechanisms in rivers is the mass erosion of river banks. extensive research has been done in the field of mass erosion and factors affecting it that lead to soil erosion and loss of land adjacent to the river one of the main sources of sediment production is the erosion of river banks. There are various methods and models to estimate the amount of river bank erosion, and the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) is one of the numerical simulation models. This model has been developed to predicting lateral retreat streambanks (caused by river erosion and geotechnical rupture). This model estimates the erosion rate by taking into account the soil resistance forces and driving forces along the surface prone to failure (rupture).

Methodology

This study was carried out between the Letyan and Mamlu dams in the Jajrud River in the east of Tehran city. The effects of erosion are evident along the entire length of the channel despite the dam and its controlling role. The maximum discharge of Letyan dam was 206 cubic meters per second in the water year 1994-95, and its average discharge was recorded as 1.67 cubic meters per second in the statistical period from 1988 to 2018. In this research, the cross-sections under study were selected, based on aerial photos and satellite images and then based on field visits, the selected sections (seven sections) were examined to study bank erosion by BSTEM model.

The BSTEM model is one of the most widely used and advanced models regarding the stability of the river bank. This model was developed by the National Sediment Laboratory in Oxford-Mississippi in the United States. This model estimates

the erosion rate by considering the soil resistance forces and driving forces along the failure-prone surface. The required parameters of the model include the following 1- Geometric parameters of the channel 2- The thickness of the layers and their materials 3- flow data (flow rate) 4- Vegetation and other side covering materials. After entering the mentioned data into the model, can be seen bank erosion modeling (bank geometry, angle, and height of failure surface occurrence) and bank toe erosion modeling, for specific flow periods. The bank safety factor (FS) is calculated at the end of the modeling. In this section, you can see the results of the model, including the calculated shear stress, the amount of bank retreat, the amount of sediments transported from the bank and the bank toe, the new profile of the bank, and the amount of erosion.

Results and Discussion

In this research, the bank erosion has been simulated in the BSTEM model to investigate the amount of bank retreat and the amount of sediment produced in 7 cross-sections of the Jajrud River. This research was used the scenario of flow depth in the case of bankfull and 12-hour flow duration to simulate the bank and the bank toe. Based on the simulation results, the amount of hydraulic erosion and the change in the geometry of the bank toe should be determined. The amount of erosion for the cross-sections was as follows. cross-section 1 is 21m³, back length is 0.57 m and safety factor is 0.38, cross-section 2 is 4 m³, back length is 0.63 m and safety factor is 0.05, cross-section 3 is m³, back length is 0.57 m and Safety factor 0.69, cross-section 4 6 m³, rear length 0.66 m and safety factor 0.66, cross-section 5 is 21 m³, rear length 1.28 m and safety factor 1.3, cross-section 6 is m³, Back length - m and safety factor 3.34, cross-section 7 is 9 m³, back length 0.65 m and safety factor 0.82. This model was carried to know the bank erosion and the amount of sediment production due to bank failure and erosion of the channel bank in seven cross-sections of the channel and the results of all sections except cross-section 6 show high erosion. In cross-section 6, the

top of the wall was in a low-risk state, and the foot of the wall brought an acceptable amount of sediment into the channel. The bank angle is most important and effective parameter.

Conclusion

In all cross-sections, there is a large amount of retreat, the highest of which was related to cross-section 5 with an amount of 1.28 meters, and the lowest was related to cross-section 6 (almost zero). Other cross-sections are in the range of 57 cm to 66 cm. In terms of bank stability and safety factor (FS), the most unsafe cross-section is number 5 to the amount of 0.05 and the safest section is number 6 to the amount of 3.34. Of course, the safety number of 1.3 for cross-section 5 with the condition of vegetation is also high safety. The highest weight of the fallen mass is for cross-sections 5, 1, and 7, respectively and after these sections, there is cross-section

number 4 and cross-section number 2. Field observations after one year showed that results of cross-sections No. 2, 3, and 4 are very close to reality and the walls have collapsed, which shows the high compatibility of this model with the natural conditions of the region.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.



Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مدل‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه جاجرود حدفاصل سد لتیان تا ماملو

علی گلستانی^۱ , محمد مهدی حسین زاده^۲ ^۱ - نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: Golestani@ut.ac.ir^۲ - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله مروری

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۳/۰۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۷/۰۷

تاریخ چاپ:

۱۴۰۲/۰۸/۱۱

واژگان کلیدی:

رودخانه جاجرود، سد لتیان، فاکتور ایمنی کرانه، فرسایش کرانه‌ای، BSTEM

رودخانه‌ها در مسیر خود همواره با پدیده‌ای به نام فرسایش دست‌به‌گریبان هستند که از یک‌سو تغییرات بسیاری را در شکل هندسی مقطع رودخانه، ریخت‌شناسی و مشخصات هیدرولیک جریان آن ایفا می‌کند و از سوی دیگر، اثرات جبران‌ناپذیری را برای اراضی مجاور کانال وارد می‌کند. از عمده‌ترین منابع تولید رسوبات، فرسایش سواحل رودخانه است. در همین راستا بررسی میزان فرسایش سواحل یکی از راهبردهای مدیریتی است. منطقه مورد مطالعه سواحل رودخانه جاجرود حدفاصل سد لتیان تا سد ماملو به تعداد هفت مقطع است. در این مطالعه، برای فرسایش کرانه رودخانه و برآورد میزان رسوب از روش یا مدل برآورد رسوب کرانه و پای کرانه (BSTEM) که در این مدل از پارامترهای هندسی کانال (زاویه دیوار و ارتفاع کرانه و فاصله پنجه کرانه و زاویه آن)، ارتفاع لایه‌ها و جنس آن‌ها، اطلاعات جریان و پوشش گیاهی و سایر مواد پوشاننده کناره استخراج و استفاده شده است. در این پژوهش از عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای مدل‌سازی فرسایش کرانه استفاده گردید. مدل با محاسبه تنش برشی و میزان مقاومت خاک به مدل‌سازی میزان تخریب کرانه می‌پردازد. نتایج پژوهش نشان داد که تمام مقاطع به‌جز مقطع ۶ دارای فرسایش زیاد است. تفاوت مقادیر فرسایش نیز در مقاطع مختلف بیشتر به دلیل نوع رسوبات کرانه و زاویه شیب کرانه بوده است. از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) نیز ناپایدارترین کرانه در مقطع ۵ و پایدارترین کرانه در مقطع ۶ رودخانه بوده است.

استناد: گلستانی، علی و حسین‌زاده، محمد مهدی. (۱۴۰۲). مدل‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه جاجرود حدفاصل سد لتیان تا ماملو. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۳)، ۸۹-۱۰۹.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.358931.1007770>

مقدمه

رودخانه‌ها در مسیر خود همواره با پدیده‌ای به نام فرسایش دست‌به‌گریبان هستند که از یک‌سو تغییرات بسیاری را در شکل هندسی مقطع رودخانه، ریخت‌شناسی و مشخصات هیدرولیک جریان آن ایفا می‌کند و از سوی دیگر، اثرات جبران‌ناپذیری را برای اراضی مجاور کانال وارد می‌کند. پدیده فرسایش انواع مختلفی دارد که یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین سازوکارهای فرسایش در رودخانه‌ها، پدیده فرسایش توده‌ای سواحل رودخانه است. در زمینه فرسایش توده‌ای و عوامل مؤثر بر آن که منجر به فرسایش خاک و اتلاف اراضی مجاور رودخانه می‌شود، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. از عمده‌ترین منابع تولید رسوبات، فرسایش سواحل رودخانه است (صمدی و امیری تکلدانی ۱۳۹۴: ۱۴-۱۶). نتیجه اولیه فرسایش کرانه‌ای در قالب افزایش رسوب‌گذاری در مخازن سدها است. موج‌های بزرگ رسوب تولیدشده توسط فرآیندهای شیب تپه، برش کرانه و مهاجرت کانال به‌عنوان یک تهدید بالقوه برای جانوران آبی و خشکی در نظر گرفته شده است. رسوبات ورودی به داخل جریان آب را می‌توان عامل اصلی اختلال کیفیت آب دانست (MacDonald, et all., 2000:22) که علاوه بر کاهش حجم مخازن باعث افزایش هزینه تصفیه آب و عامل حمل آلوده‌کننده‌های مثل فسفر، باکتری‌ها و فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها است. بی‌ثباتی کانال جریان ناشی از انباشت بیش‌ازحد رسوبات می‌تواند به‌شدت بر زندگی آبزیان از جمله زنجیره غذایی، تخم‌ریزی و پرورش زیستگاه، پوشش درون جریان، شدت دمای آب و سایر اجزای ساختاری و عملکردی تأثیر بگذارد. از طرفی فرسایش کرانه‌های رودخانه باعث تغییر نوع جریان و الگوی کانال هم می‌شود. از این‌رو طی چند دهه اخیر بار رسوب و ناپایداری کناره‌های رود، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهان ایجاد نموده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره‌های رود صرف شده است.

در دهه گذشته، محققان عمدتاً از پنج تکنیک میدانی برای تعیین کمیت فرسایش در حاشیه استفاده کرده‌اند: پین‌های فرسایش، تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، فتوگرامتری (کلاسیک یا فتوگرامتری با SFM) اسکن لیزری (هوایی یا زمینی)، و تکنیک دندروژئومورفولوژیکی. با این حال، اکثر مطالعات مبتنی بر کاربرد مدل‌ها بودند (۳۲/۸ درصد) و به دنبال آن مطالعات میدانی با استفاده از پین‌های فرسایش (۱۶ درصد)، تحلیل تصاویر ماهواره‌ای (۱۵/۳ درصد)، فتوگرامتری (۱۱/۵ درصد)، اسکن لیزری (۶/۹ درصد) و تکنیک دندروژئومورفولوژیکی (۱/۵ درصد) برای تخمین نرخ فرسایش استفاده شده است (De Souza Dias et al., 2022:6).

مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (BSTEM) یکی از مدل‌های شبیه‌سازی عددی است که باهدف پیش‌بینی پس‌روی کناره (ناشی از فرسایش رودخانه‌ای و گسیختگی ژئوتکنیکال) توسعه یافته است. این مدل با در نظر گرفتن توأم نیروهای مقاومت خاک و نیروهای محرک در طول سطح مستعد شکست و گسیختگی، نرخ فرسایش را تخمین می‌زند (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳۰ تا ۱۳۲). در واقع این مدل به‌منظور پیش‌بینی پس‌روی کرانه رودخانه به علت فرسایش رودخانه‌ای و شکست ژئوتکنیکال طراحی شده است.

سایمون و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی فرسایش کرانه‌ای با استفاده از مدل BSTEM را مدل‌سازی کرده‌اند. این مطالعه نشان داد که این مدل به‌عنوان یک ابزار مناسب کارایی لازم برای تعیین و تشخیص شرایط حاکم بر کرانه رودخانه در راستای حفاظت از رود و ارزیابی اهمیت فرسایش رودخانه‌ای و ویژگی‌های پوشش گیاهی و فشار آب منفذی نزدیک کرانه را دارد. تهاپا و تامراکار (۲۰۱۶) وضعیت ناپایداری کرانه در هشت سایت بر روی رودخانه کودکوخوا را با استفاده از مدل BSTEM موردپژوهش قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که نرخ ایمنی کرانه برای مقاطع با

پوشش گیاهی ضعیف و رسوبات منفصل کمتر از کرانه‌های منسجم و دارای پوشش است و فرسایش در آن‌ها بالاتر است.

کالون و همکاران (۲۰۱۶) بر روی مدل BSTEM و ادبیات این مدل تحقیق کردند تا به توسعه بهتر مدل کمک و نقاط ضعف و نیازهای آن را مشخص کنند. بر پایه این بررسی مشخص شد که این مدل لازم است در مناطق دیگر دنیا بررسی شود همچنین نیاز به توسعه بخش پارامترهای پوشش گیاهی و استرس‌های خاک در اجرای مدل است. ناراسیماهان و همکاران (۲۰۱۷) در یک بررسی از روش SWAT و میزان تنش برشی برای طبقه‌بندی، پهنه‌بندی و میزان فرسایش کرانه‌های رودخانه استفاده کردند. در این بررسی از تنش برشی، میزان فرسایش، عمق آب و هوازگی استفاده کردند.

کلون و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به ارزیابی فرایند پایداری کناره رودخانه و فرسایش پای کرانه با مدل BSTEM پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که عقب‌نشینی کناره رودخانه یک فرایند پیچیده است. که توسط فرایندهای زیر بری، جریان فرسایش، آلودگی، شکست‌های ژئوتکنیک و جنس خاک کنترل می‌شوند. ال مداحچی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل BSTEM تحقیقاتی بر روی کرانه‌های رودخانه دجله در بغداد انجام داده‌اند که با تعریف دو طرح متفاوت متوجه شدند که خاک‌های خشک بیش از خاک‌های مرطوب دچار فرسایش می‌شوند و فرسایش در پایین دست شهر بیش از بالادست آن است.

زگیا و همکاران (۲۰۲۰) از مدل BSTEM برای مطالعه توسعه خندق‌ها در اتیوپی به کاربردن تا متوجه کرانه‌های مستعد توسعه بشوند. نتایج بیانگر این بود که در حالت اشباع، کرانه‌های با عمق پنج‌متر، کرانه‌های دارای پوشش گیاهی منسجم و کرانه‌های دارای زاویه ۴۵ درجه دارای فرسایش بسیار کمتری هستند. چاکوالکا و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از سنجش‌ازدور و مدل BSTEM رودخانه نکیزی در نیجریه را مورد مطالعه قرار داده‌اند و متوجه تأثیر شدید تغییر کاربری اراضی بر فرسایش کرانه‌ها شدند که میزان فرسایش از ۶/۶ درصد تا ۴۴/۹ درصد متغیر بود است.

گوش و همکاران (۲۰۲۲) یک رودخانه پیچان‌رودی را با استفاده از HEC-RAS و BSTEM و با استفاده از داده‌های ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و مقایسه خروجی آن با داده‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ این بررسی را انجام داده‌اند و متوجه افزایش فرسایش و بار رسوبی در سال‌های جدیدتر شدند. وین کیان (۲۰۲۲) در طرح خود به بررسی یک رودخانه در کانزاس با استفاده از مدل BSTEM پرداخته که تعیین کند کدام نوع رسوب فرسایش‌پذیری کمتری دارد و اطلاعات مناسب را برای مدل از چه راه‌های می‌توان به دست آورد که در پایان به برخی نیازهای قابل اضافه کردن به مدل اشاره کرده است.

حسین زاده و اسماعیلی (۱۳۹۷) از مدل BSTEM برای برآورد فرسایش پای کرانه در مدل‌سازی‌های مختلف برای رودخانه لایچ استفاده کردند. نتیجه حاصل از این پژوهش نشان داد که سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ سال بیشترین تأثیر را بر کرانه‌ها دارد و میزان تغییرات در مدل‌سازی‌های مختلف از صفر تا ۸۱ سانتیمتر تغییر می‌کند و پوشش گیاهی باعث کاهش فرسایش و تنش شدید در کرانه می‌شود. حسین زاده و همکاران (الف ۱۳۹۸) به شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه گلالی قروه پرداختند که در این شبیه‌سازی از مدل BSTEM استفاده کردند و در پی دو مدل‌سازی‌های ۱۲ و ۲۴ ساعته متوجه شدند که از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی در طرح اول مقاطع ناپایدار بوده ضریب ایمنی کمتر از یک بوده است اما در طرح دوم به دلیل تداوم بارش ضریب ایمنی افزایش یافته است. حسین زاده و همکاران (ب ۱۳۹۸) میزان فرسایش کناره‌های رودخانه لایچ را با استفاده از مدل BSTEM برآورد کردند که نتایج حاصل نشان داد که در دبی لبالی و دبی حداکثر لحظه‌ای فرسایش و برش پای کرانه اتفاق می‌افتد و در هر دو شبیه‌سازی کرانه‌ها ناپایدار

است.

روشن نسب و همکاران (۱۴۰۱) از مدل BSTEM به منظور مقایسه بین دو بخش با پوشش و بدون پوشش کناره در رودخانه بشار استفاده نموده‌اند. نتایج حاصل شده بیانگر این است که مؤلفه‌های مدل پایداری و مدل فرسایش پای کرانه نشان داد که در مقاطع فاقد پوشش، میزان فرسایش کناره‌های بیش از مقاطع دارای پوشش بوده است؛ در صورتی که میزان مؤلفه‌های فرسایش پای کرانه (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 است؛ به طوری که شیب کناره در مناطق فاقد پوشش، مستقیم و فاقد پنجه بوده ولی در مقاطع دارای پوشش، پای کرانه بخشی از کناره رودخانه را تشکیل می‌دهد. هدف این پژوهش، مدل‌سازی عقب‌نشینی کرانه کانال در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته در هفت مقطع در امتداد رودخانه جاجرود با استفاده از مدل BSTEM بوده است.

روش پژوهش

مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل BSTEM یکی از مدل‌های پرکاربرد در خصوص پایداری کناره رودخانه است که به وسیله آزمایشگاه ملی رسوب در آکسفورد - می‌سی‌سی‌پی در آمریکا توسعه یافته است (Simon et al, 2000: 195). این مدل با در نظر گرفتن توأم نیروهای مقاومت خاک و نیروهای محرک در طول سطح مستعد شکست و گسیختگی، نرخ فرسایش را تخمین می‌زند (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳۴). در این بررسی بر پایه عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، مقاطع انتخاب و در ادامه بر اساس بازدیدهای میدانی مقاطع انتخابی (۷ مقطع) جهت مطالعه و مدل‌سازی فرسایش پایه کرانه‌ای مورد تأیید قرار گرفته‌اند. مراحل مدل‌سازی فرسایش کرانه به شرح ذیل است.

- برداشت پارامترهای هندسی کانال و ورود به مدل: نیمرخ کرانه کانال به وسیله تراز یاب نقشه‌برداری (دوربین) و شاخص برداشت‌شده همچنین بر اساس برداشت‌های میدانی زاویه دیوار و ارتفاع کرانه و فاصله پنجه کرانه و زاویه آن با شیب‌سنج برداشت شده است.

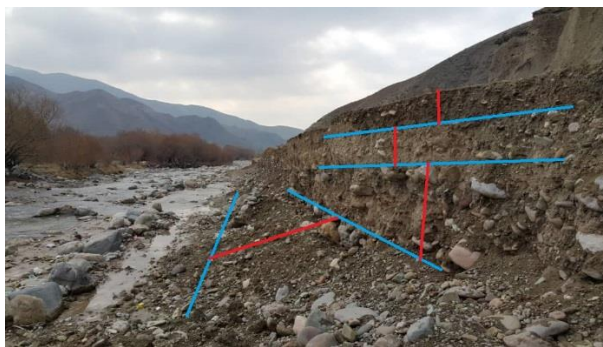
- برداشت ارتفاع لایه‌ها و جنس آن‌ها و ورود به مدل: در ادامه تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده کرانه و ضخامت و ویژگی‌های خاک و مواد تشکیل‌دهنده لایه‌های کرانه و پای کرانه مشخص گردید (شکل ۱). برای تمام لایه‌ها ارتفاع را ثبت و جنس آن لایه نیز با کار میدانی (روش شمارش ذرات) و آزمایشگاهی (روش دانه‌سنجی) ثبت و به مدل وارد می‌شود تا در روابط مدل استفاده شود. در بازه مورد مطالعه نوع خاک از نظر بافت مشخص و وارد مدل شد. با وارد کردن اندازه ذرات خاک، مدل می‌تواند مقادیر پارامترهای ژئوتکنیک خاک را تخمین بزند. این بخش همچنین حاوی محاسباتی برای برآورد تنش برشی بحرانی بر پایه اندازه ذرات و ورود مقدار تنش برشی محاسبه شده در بازه است که برای بازه مورد مطالعه مقدار تنش برشی بر پایه اندازه‌گیری‌های به عمل آمده و از طریق رابطه ۱ محاسبه و همچنین مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری برای خاک کرانه نیز از طریق روابط ذیل برآورد گردید (Hanson & Simon, 2001: 196-197).

- برداشت اطلاعات جریان و ورود به مدل: پارامترهای جریان شامل طول و شیب بازه با استفاده از متر لیزری و نقشه‌برداری اندازه‌گیری شد. میانگین و دبی سیلاب و طول مدت جریان نیز بر پایه مشاهدات ساکنان محلی و آثار برجای مانده در حاشیه رودخانه به دست آمد. در این پژوهش از عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای مدل‌سازی فرسایش کرانه استفاده گردید. حد پایینی پوشش گیاهی کناره‌ها، سطح بالایی پوینت بارها،

شکستگی شیب در امتداد کرانه رود و تغییرات در اندازه رسوبات کرانه مهم ترین شاخص هایی بودند که جهت تخمین دبی لبالبی در بازدیدهای میدانی استفاده شدند (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳۶).

- پوشش گیاهی و سایر مواد پوشاننده کناره: در مدل BSTEM نوع پوشش های حفاظتی ایجاد شده توسط انسان و یا مقادیر پوشش گیاهی موجود بر روی کرانه در میزان پس روی کرانه لحاظ شده است (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳۶ تا ۱۳۷). بر اساس برداشت های میدانی، داده های مرتبط با نوع پوشش گیاهی و مواد مصنوع بکار رفته در کرانه مشخص گردید.

پس از ورود اطلاعات ذکر شده به مدل، مدل سازی فرسایش کرانه (هندسه کرانه، زاویه و ارتفاع وقوع سطح شکست) و مدل سازی فرسایش پای کرانه برای دوره های جریانی خاص قابل مشاهده است. در انتهای مدل سازی فاکتور ایمنی کرانه (FS) محاسبه می گردد. در این بخش می توان نتایج مدل شامل تنش برشی محاسبه شده، میزان پس روی کرانه، میزان رسوبات حمل شده از کرانه و پای کرانه، نیمرخ جدید کرانه و مقدار فرسایش را مشاهده نمود. برای محاسبه نرخ فرسایش نیز از رابطه ۱ با واحد اینچ بر متر در ثانیه استفاده شد با توجه به تنش برشی بحرانی و بعد به متر در ثانیه تبدیل گردید است.

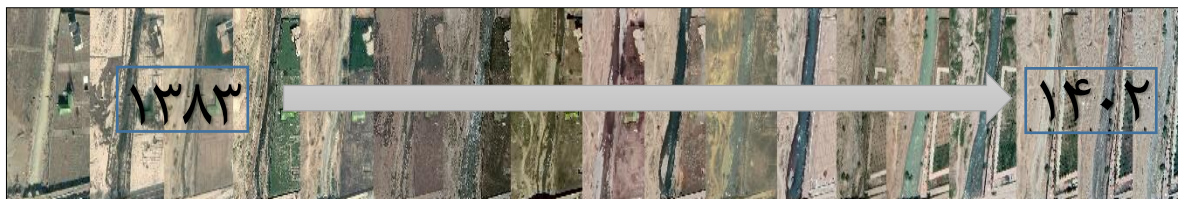


شکل ۱. طرح شما تیک ورود اطلاعات به مدل

$$Q = k \cdot t \cdot (\sigma_0 - \sigma_c) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه E فاصله فرسوده شده به متر، K ضریب تخریب برحسب مترمکعب بر نیوتن در ثانیه، t تغییرات زمان بر حسب ثانیه، σ_0 متوسط تنش برشی مرزی و σ_c تنش برشی بحرانی که هر دو تنش بر واحد کیلو پاسکال هستند.

در مرحله نهایی با استفاده از تصاویر گوگل ارث مربوط به بهار ۱۳۸۳، تا بهار ۱۴۰۲ وضعیت تغییرات کرانه رودخانه در بازه های مورد مطالعه مورد بررسی و با نتایج خروجی مدل مورد صحت سنجی قرار گرفت (شکل ۳).

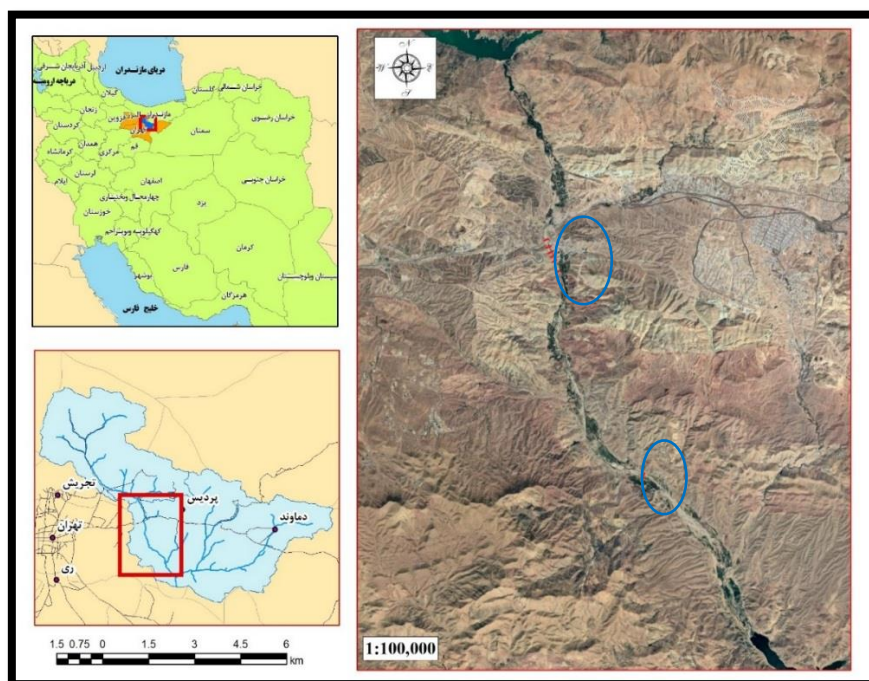


شکل ۲. طرحی از مقایسه زمانی بازه ها

محدوده مورد مطالعه

این بررسی در حدفاصل دو سد لتیان و ماملو در رودخانه جاجرود در شرق شهر تهران انجام گرفته است (شکل ۳) بیشینه ارتفاعی منطقه ۱۵۳۰ متر و کمینه ارتفاع ۱۲۷۶ متر است که بیشترین ارتفاع مربوط به خروجی سد لتیان و کمترین ارتفاع مربوط به ابتدای دریاچه سد ماملو است. کمترین میزان بارش حوضه در ایستگاه سد ماملو ۲۴۹ تا ۲۹۸ میلی‌متر در سال و در حوضه سد لتیان بین ۳۹۹ میلی‌متر تا ۶۹۷ است. کمینه دمای منطقه ۶/۷ تا ۸ درجه و بیشینه دمای ۱۶ تا ۱۷ درجه را شامل می‌شود. با وجود سد و نقش کنترلی آن آثار فرسایش در تمام طول کانال مشهود است. دبی‌های بیشینه خروجی لتیان شامل بالاترین میزان آن در سال آبی ۱۳۷۳-۷۴ با ۲۰۶ مترمکعب بر ثانیه و کمترین آن در سال ۱۳۶۸-۶۹ با ۱۲ مترمکعب بر ثانیه اتفاق افتاده است و در دوره آماری ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ میانگین دبی آن ۶۷/۱ مترمکعب بر ثانیه بوده است.

از نظر نوع سنگ و بافت خاک عمده‌ترین آن شامل سنگ‌های آذرآواری مثل توف و توفیت سنگ‌های رسوبی مثل آهک، شیل، کنگلومرا، ماسه‌سنگ است (سازمان زمین‌شناسی). در برخی نقاط برون‌زدگی‌های سنگی سخت بستر کانال و دیواره آن را تشکیل می‌دهند. بستر رودخانه از نوع گراولی است و دیواره‌های کرانه نیز از لایه‌های دارای رسوبات گراولی تا سیلت و رس تشکیل شده است. پوشش گیاهی قالب مرتعی است اما در برخی نقاط شاهد رشد درخت بید در حاشیه رودخانه و در جزایر میانی هستیم با کاهش ارتفاع و اضافه شدن دشت‌های سیلابی میانکوهی پوشش گیاهی درختچه‌ای نیز توسعه میابد در برخی نقاط نیز با تقسیم آب رودخانه در کانال‌های با عرض وسیع شاهد رشد نیزارها هستیم. سه سازه تقاطعی به جز سد‌های ابتدا و انتهای بر روی کانال قرار دارد که شامل یک پل تاریخی و دو پل جدید است. شهر جاجرود و روستاهای سعیدآباد، ترقیان و سنجریان در کنار کانال اصلی این رودخانه قرار دارند.



شکل ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

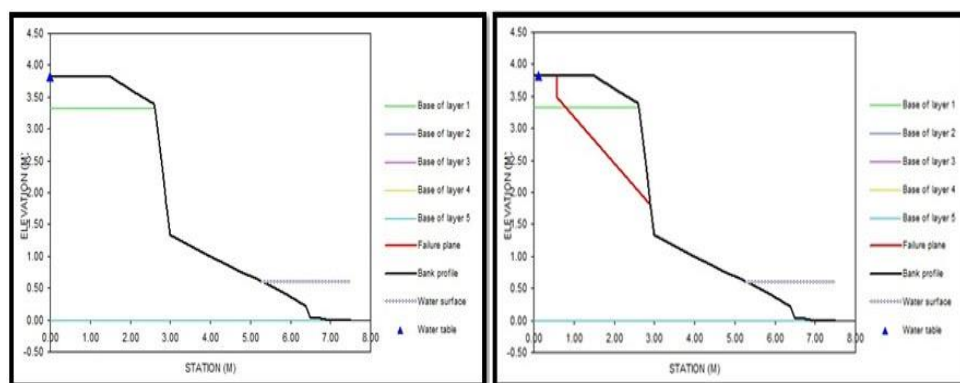
در این پژوهش به منظور بررسی میزان پس‌روی کرانه و حجم رسوب تولیدشده از سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه و پای کرانه استفاده گردید. بر پایه نتایج شبیه‌سازی مقدار فرسایش هیدرولیک و تغییر در هندسه منطقه پای کرانه تعیین گردد. قابل ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از مدل BSTEM در هر کرانه، تا جایی که شرایط ژئومتریک کانال و شرایط ژئوتکنیک رسوبات دیواره یکسان باشد، قابل‌تعمیم است. پس از اجرای مدل برای مقاطع مور نظر نتایج بررسی‌ها شامل موارد ذیل بود:

مقطع شماره ۱: در سمت چپ این مقطع دیواره‌ای به ارتفاع ۳/۸۲ متر وجود دارد. پوشش گیاهی در این ناحیه رشد نکرده و بر روی این دیواره، یک دیوار بافاصله ۴۰ سانتیمتر قرار دارد. ۵۰ سانتیمتر ابتدایی دیواره مخلوط سیلت و رس است با درصد بیشتر سیلت و باقی دیواره را رسوبات ریز تا گراول درشت تشکیل داده است (جدول ۱).

جدول ۱. اطلاعات مقطع شماره ۱

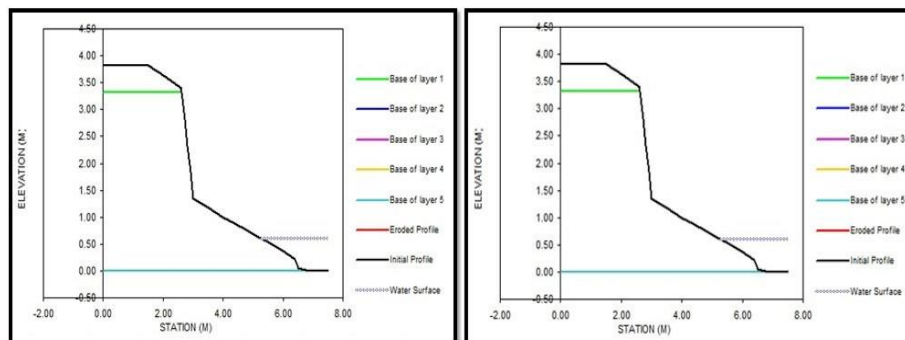
عمق دبی لبالی m	شیب بستر (متر به متر)	طول بازه m	فاکتور FS ایمنی	حجم ریزش کرانه m^3	میزان پس‌روی m	وزن کرانه ریزشی Kg
۰/۵۳	۰/۰۱۰۳	۱۰	۰/۳۸	۲۱	۰/۵۷	۴۰۹۰۸

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع اول نشان داد که امکان سقوط رأس دیواره به طول ۲ متر و با ضخامت نزدیک به ۲/۲۰ متر وجود دارد که بسیار مقدار قابل‌توجهی است و کناره در محدوده عدد فاکتور ایمنی ۰/۳۸ قرار گرفته است که به معنی عدم پایداری کرانه و مقدار ریزش دیواره برابر با ۲۱ مترمکعب و ۴۰۹۰۸ کیلوگرم رسوب است (شکل ۴).



شکل ۴. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۱

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی پای کرانه در مقطع اول نیز نشان داد که پای دیواره به دلیل جنس رسوبات، طول زیاد و شیب مناسب از ثبات بالای برخوردار بوده و تغییراتی در این بخش کرانه مشاهده نشده است (شکل ۵).



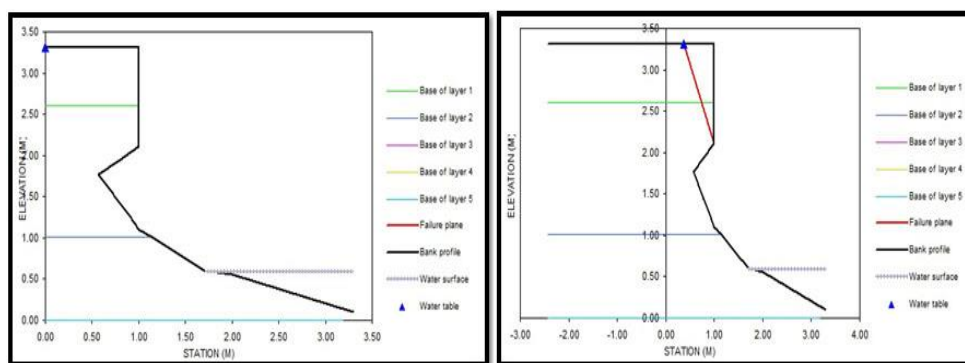
شکل ۵. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۱

مقطع شماره ۲: در سمت راست این مقطع دیواره‌ای به ارتفاع ۳/۳۰۵ متر وجود دارد پوشش گیاهی در این ناحیه رشد نکرده و این دیواره دارای زیر بری مشخص و لایه بالایی به صورت کاملاً جل‌آمده مشخص است. ۷۰ سانتی‌متر ابتدایی دیواره مخلوط ماسه درشت تا سیلت قرار دارد و ۱/۶۰ متر بعدی از گراول درشت و رسوبات ریز تشکیل شده و در پای دیواره ماسه درشت رسوبات غالب است (جدول ۲).

جدول ۲. اطلاعات مقطع شماره ۲

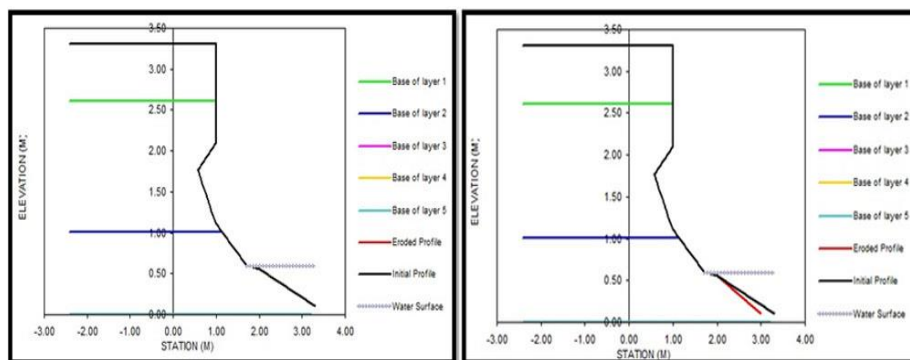
وزن کرانه Kg	میزان پس‌روی m	حجم ریزش کرانه m^3	Fs فاکتور ایمنی	طول بازه m	شیب بستر (متر به متر)	عمق دبی لبالی m
۷۲۷۱	۰/۶۳	۴	۰/۰۵	۱۰	۰/۰۰۹۱	۰/۷۴

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع اول نشان داد که امکان سقوط رأس دیواره به طول ۹۰ سانتی‌متر و با ضخامت نزدیک به ۱/۳۰ متر وجود دارد که بسیار مقدار قابل توجهی است و دیواره در محدوده عدد فاکتور ۰/۰۵ قرار گرفته که به معنی عدم پایداری کرانه است. مقدار ریزش دیواره برابر با ۴ مترمکعب و ۷۲۷۱ کیلوگرم رسوب که باعث عقب‌نشینی ۶۳ سانتی‌متری دیواره هم می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۲

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی پای کرانه در مقطع دوم نیز نشان داد پنجه دیواره در این مدل فرسایش داشته که در طول حدود ۱/۲۰ متر تأثیر فرسایش محسوس است، ۱۴ سانتی‌متر با ارتفاع ۳۰/۵ سانتی‌متر مربع حجم کلی این فرسایش در راستای دیواره است (شکل ۷).



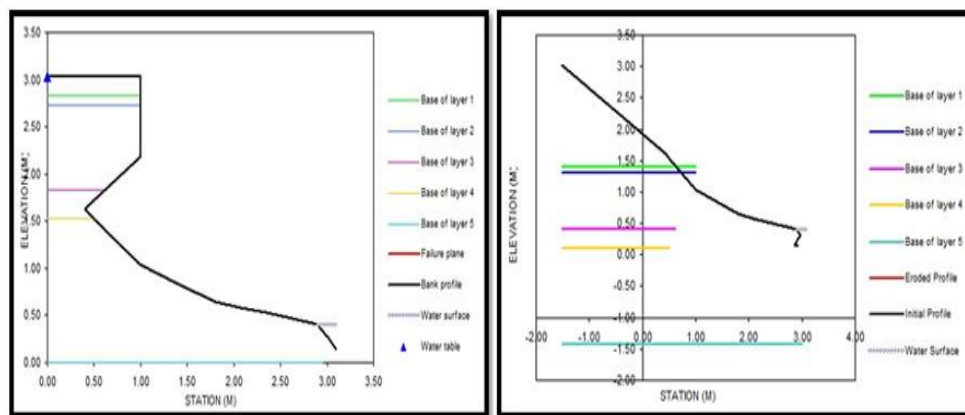
شکل ۷. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۲

مقطع شماره ۳: در سمت راست این مقطع دیواره‌ای به ارتفاع ۳/۰۳ متر وجود دارد پوشش گیاهی در این ناحیه نیز رشد نکرده و دیواره دارای زیر بری مشخص است و لایه بالایی به صورت کاملاً جلوآمده است. بیست سانتی‌متر ابتدایی دیواره مخلوط ماسه درشت و گراول، و ۱۰ سانتی‌متر سیلت مقاوم، ۹۰ سانتی‌متر گراول، رسوبات ریزدانه ۳۰ سانتی‌متر سیلت مقاوم و بعد از این لایه تا پای دیواره ماسه درشت و گراول است (جدول ۳).

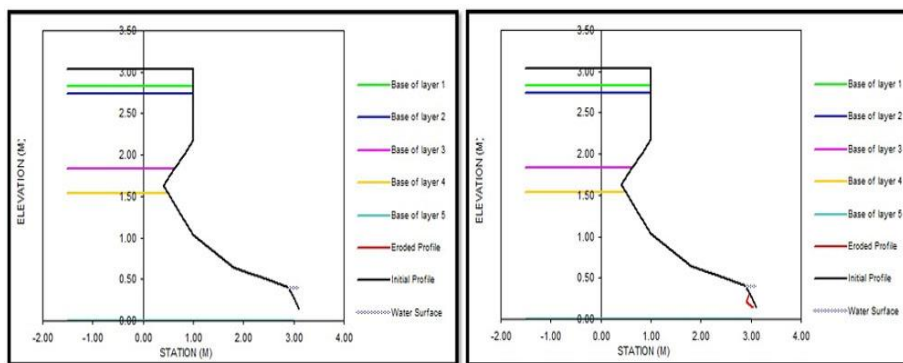
جدول ۳. اطلاعات مقطع شماره ۳

وزن کرانه Kg	میزان پس‌روی m	حجم ریزش کرانه m^3	Fs فاکتور ایمنی	طول بازه m	شیب بستر (متر به متر)	عمق دبی لبالی m
۵۴۱	۰/۵۷	-	۰/۶۹	۱۰	۰/۰۶۰۲	۰/۴۱

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع ۳ نشان داد که امکان سقوط رأس دیواره به طول ۵۰ سانتی‌متر و با ضخامت نزدیک به ۲/۴۰ متر وجود دارد و دیوار در محدوده عدم ثبات با فاکتور ۰/۶۹ قرار گرفته و به معنی عدم پایداری کرانه است. این فرسایش باعث عقب‌نشینی ۵۷ سانتی‌متری دیواره می‌شود (شکل ۸). نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی پای کرانه در مقطع اول نیز نشان داد که پنجه دیواره فرسایش‌ای در حدود چند سانتی‌متر داشته که تأثیر فرسایش محسوس نیست که علت این حجم کم جنس رسوبات است، ۹ سانتی‌متر مربع با ارتفاع ۰/۰۲۴ سانتی‌متر مربع کلی این فرسایش در راستای دیواره است (شکل ۹).



شکل ۸. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۳



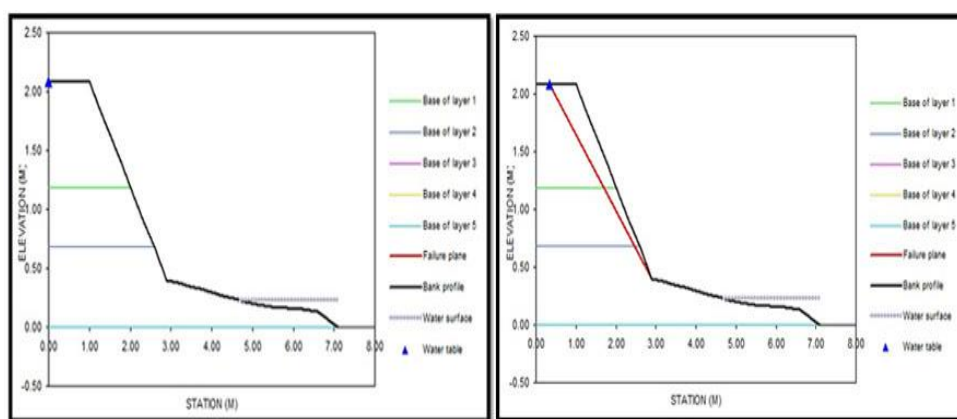
شکل ۹. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۳

مقطع شماره ۴: در سمت راست این مقطع دیواره‌ای به ارتفاع ۲/۱۰ متر وجود دارد پوشش گیاهی در این ناحیه رشد نکرده و ۱/۱۰ متر ابتدایی دیواره مخلوط ماسه درشت، گراول و رسوبات درشت‌تر، ۵۰ سانتی‌متر سیلت مقاوم و ماسه درشت و بعد از این لایه تا پای دیواره ماسه درشت و گراول است (جدول ۴).

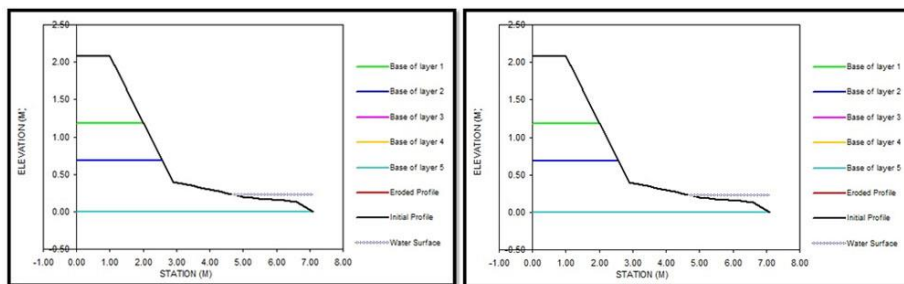
جدول ۴. اطلاعات مقطع شماره ۴

عمق دبی لبالی m	شیب بستر (متر به متر)	طول بازه m	Fs فاکتور ایمنی	حجم ریزش کرانه m^3	میزان پس‌روی m	وزن کرانه ریزشی Kg
۰/۲۳	۰/۰۰۵۵	۱۰	۰/۶۶	۶	۰/۶۶	۱۱۰۳۵

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع ۴ نشان داد که امکان سقوط دیواره به طول ۲,۵ متر وجود دارد دیواره در محدوده فاکتور ۰/۶۶ به معنی عدم پایداری کرانه است و این فرسایش باعث عقب‌نشینی ۶۶ سانتی‌متری دیواره و فروریزی توده‌ای به ابعاد ۶ مترمکعب به وزن ۱۱۰۳۵ کیلوگرم می‌شود (شکل ۱۰). برای پایه کرانه هم با اجرای مدل اتفاق فرسایشی با توجه به جنس کناره رخ نداده است. (شکل ۱۱)



شکل ۱۰. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۴



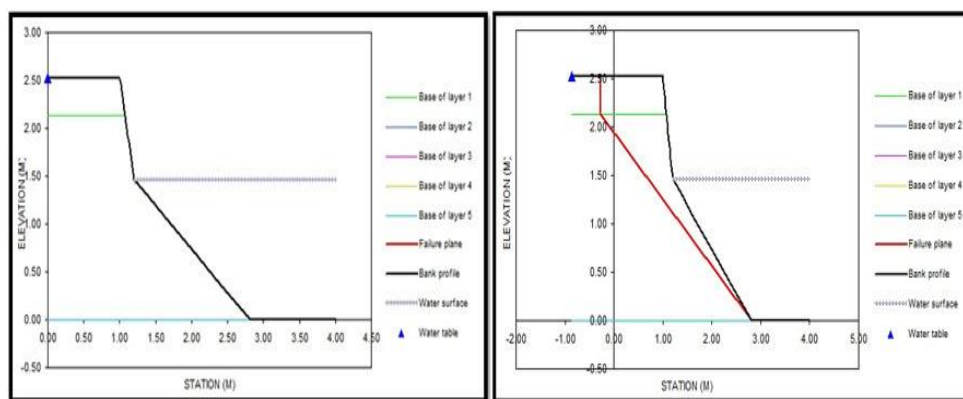
شکل ۱۱. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل سازی پای کرانه در مقطع شماره ۴

مقطع شماره ۵: در سمت چپ این مقطع دیواره ای با ارتفاع ۲/۵۳ متر قرار دارد که در روی آن پوشش گیاهی مناسبی قرار گرفته است و جنس این دیواره در ۴۰ سانتی متر اول سیلت نه چندان مقاوم است و تا انتهای دیواره از جنس گراول و ماسه درشت است (جدول ۵).

جدول ۵. اطلاعات مقطع شماره ۵

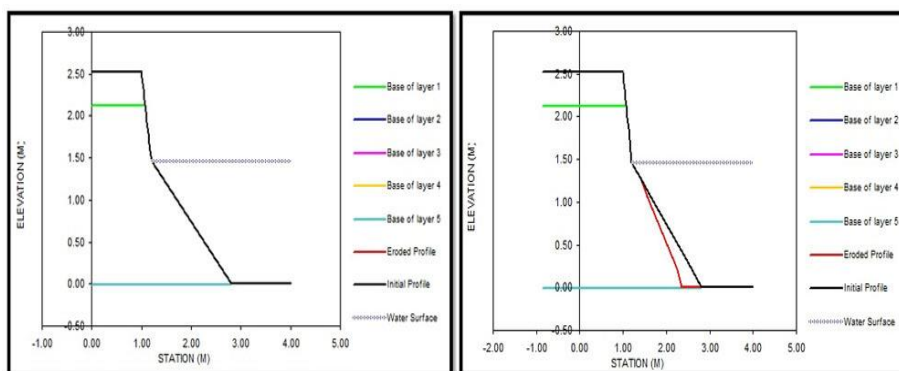
وزن کرانه ریزشی Kg	میزان پس روی m	حجم ریزش کرانه m^3	Fs فاکتور ایمی	طول بازه m	شیب بستر (متر به متر)	عمق دبی لبالی m
۴۲۰۸۵	۱/۲۸	۲۱	۱/۳	۱۵	-/۰۵۲	۱/۴۶

نتایج مدل سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه سازی کرانه در مقطع ۵ نشان داد که سقوط دیواره به طول ۳ متر ممکن است اتفاق بیفتد که بسیار مقدار قابل توجهی است و دیوار در محدوده قرار مشروط با فاکتور ۱/۳ قرار گرفته است، که یعنی در صورت فرسایش ممکن است ۱/۲۸ متر دیواره عقب برود و فروریزی توده ای به ابعاد ۲۱ مترمکعب به وزن ۴۲۰۸۵ کیلوگرم اتفاق بیفتد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل سازی کرانه در مقطع شماره ۵

نتایج مدل سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه سازی پای کرانه در مقطع اول نیز نشان داد که در طول ۸۰ سانتی متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر فرسایش وجود داشته است که به ابعاد ۴۴ سانتی متر و ۰/۵۳۴ مترمربع مواد در پای این کرانه جابه جا می شود (شکل ۱۳).

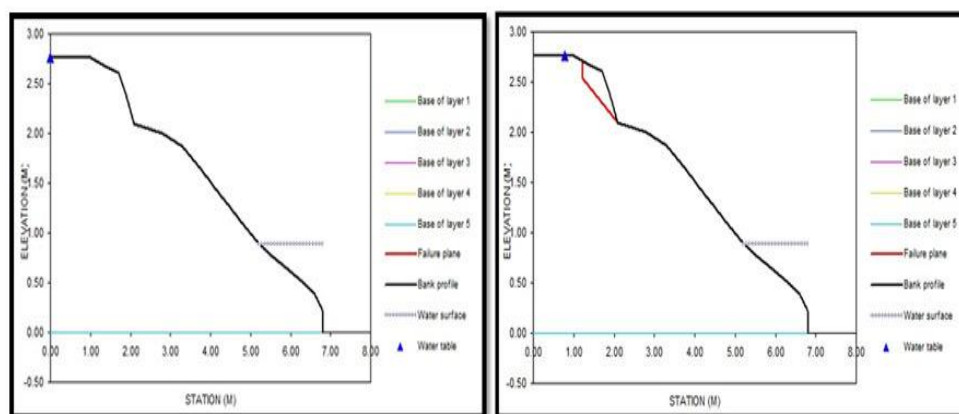


شکل ۱۳. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۵

مقطع شماره ۶: در سمت چپ این مقطع دیواره‌ای با ارتفاع ۲/۶۷ سانتی قرار دارد که در روی آن پوشش گیاهی کمی قرار دارد و جنس این دیوار از سیلت و رس نه‌چندان مقاوم تشکیل شده است (جدول ۶).

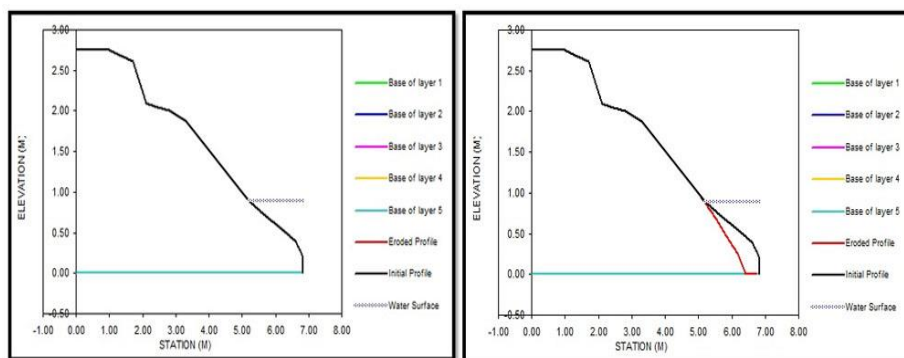
جدول ۶. اطلاعات مقطع شماره ۶

عمق دبی لبالی m	شیب بستر (متر به متر)	طول بازه m	Fs فاکتور ایمنی	حجم ریزش کرانه m^3	میزان پس‌روی m	وزن کرانه ریزشی Kg
۰/۹۰	۰/۰۱۹۵	۱۰	۳/۳۴	-	-	-



شکل ۱۴. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۶

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع ۶ نشان داد که سقوط دیواره به طول ۹۰ سانتی‌متر محتمل است و دیوار در محدوده ثبات با فاکتور ۳/۳۴ قرار گرفته که به معنی پایداری کرانه است (شکل ۱۴). نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی پای کرانه در مقطع اول نیز نشان داد که در طول ۲ متر و ارتفاع ۸۹ سانتی پایه دیواره شسته می‌شود این به خاطر عقب رفت رأس دیواره و جنس رسوبات کرانه است (شکل ۱۵).



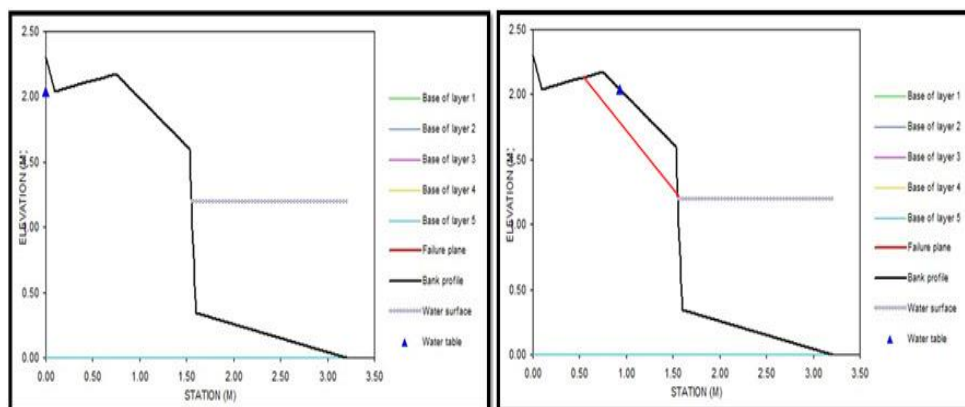
شکل ۱۵. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۶

مقطع شماره ۷: در سمت راست این مقطع دیواره‌ای به ارتفاع ۲/۳۰ متر وجود دارد. پوشش گیاهی در این ناحیه رشد نکرده و دیواره تا پایین ماسه درشت و گراول است (جدول ۷).

جدول ۷. اطلاعات مقطع شماره ۷

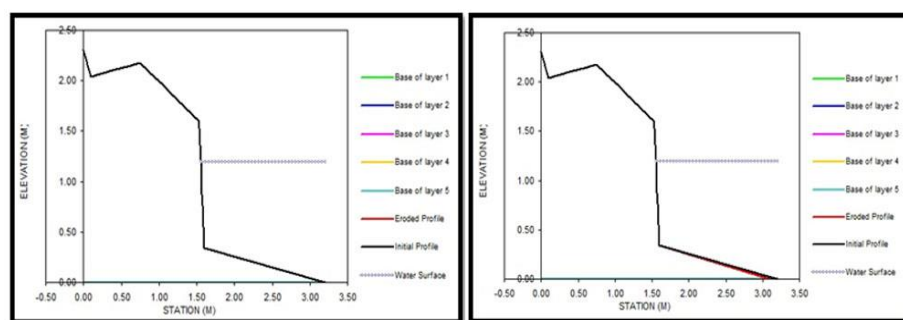
وزن کرانه Kg	میزان پس روی m	حجم ریزش کرانه m^3	Fs فاکتور ایمنی	طول بازه m	شیب بستر (متر به متر)	عمق دبی لبالی m
۱۹۳۵۷	۰/۶۵	۹	۰/۸۲	۱۵	۰/۰۴۶۶	۱/۲۰

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی کرانه در مقطع ۷ نشان داد که امکان سقوط دیواره به طول ۱ متر وجود دارد و دیوار در محدوده عدم ثبات با فاکتور ۰/۸۲ قرار گرفته است. توده فرسایش یافته برابر با ۹ مترمکعب با وزن ۱۹۳۵۷ کیلوگرم خواهد بود (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی کرانه در مقطع شماره ۷

نتایج مدل‌سازی در سناریوی عمق جریان در حالت دبی لبالی و طول مدت جریان ۱۲ ساعته برای شبیه‌سازی پای کرانه در مقطع ۷ نیز نشان داد که فرسایش در این دیواره برای پای کرانه بسیار کم است که علت آن مواد تشکیل‌دهنده و زاویه پنجه کرانه است در طول ۱/۵۰ متر مقدار ناچیزی فرسایش ایجاد شده ۱۰ سانتی در ۰/۰۳۶ مترمربع است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. تصویر قبل و بعد از اجرای مدل‌سازی پای کرانه در مقطع شماره ۷



شکل ۱۸. مقایسه زمانی مقطع شماره ۱

در امتداد دیواره شماره یک با توجه به تصاویر در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۹ در مقابل دیواره انباشت رسوب را مشاهده می‌گردد که از سال ۱۳۸۹ این روند معکوس شده و فرسایش شدیدی در سمت دیواره ایجاد شده است به صورتی که در برخی از سال‌ها دیواره ساخت شده مانع از فرسایش شده و جریان آب قسمتی از زمین‌های قبل از دیواره را هم فرسایش داده است.

از سال ۱۳۹۳ با ایجاد موانع و دست‌کاری در کانال، میزان فرسایش کاهشی شده و انباشت رسوب در پایه دیواره رخ داده است. این روند تا سال ۱۳۹۴ ادامه دارد اما از سال ۱۳۹۴ فرسایش شدید شده به صورتی که مسافت بیشتر از دیواره دچار فرسایش شده است. پس از این روند رسوب‌گذاری مجدد آغاز شده و تا سال ۱۴۰۱ ادامه یافته و در دو سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ روند فرسایش رسوبات دیواره و مجاور آن دوباره شروع شده است (شکل ۱۸).



شکل ۱۹. مقایسه زمانی بازه شماره ۲ و ۳

بررسی تصاویر در مورد دیواره‌های شماره ۲ و ۳ نشان می‌دهد که از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۷ با اضافه شدن حجم زیادی از

بار جامد توسط انسان، روند ارتفاع دیواره‌ها افزایشی است و کاهش سطح جریان نیز از روند فرسایش جلوگیری کرده است.

تا سال ۱۳۹۰ کرانه‌های رودخانه تماس کمتری با جریان آب داشته اما از این سال به بعد روند پس‌روی دیواره‌ها کاملاً قابل‌مشاهده است به صورتی که هر سال از عرض کرانه سمت راست کاسته شده و رودخانه به دامنه نزدیک‌تر شده است. دیواره‌های شماره ۴ و ۵ در محدوده‌ای واقع شدند که در سمت مقابل آن‌ها دو پوینت بار تشکیل شده است. برای سال ۱۳۸۳ روند کانال به‌گونه‌ای بوده است که دیواره شماره ۴ که در سمت راست جریان قرار دارد بعد از پوینت بار بالایی قرار گرفته است و از جریان آب دور است. دیواره شماره ۵ که در سمت چپ جریان قرار داشته است در این سال متأثر از کانال فرعی مصنوعی است و در بخش میانی کانال اصلی و فرعی قرار گرفته است یعنی دیواره مانند خط جداکننده دو کانال از هم عمل می‌کرده است.

در سال‌های بعد پوینت بار پایینی به سمت بالا دست توسعه یافته است به‌گونه‌ای که فرسایش شدید تمام رسوبات پایه کرانه دیواره شماره ۴ را حمل و دیواره به‌صورت مستقیم در معرض جریان قرار گرفته است. روند فرسایش دیواره شماره ۴ تا سال ۱۳۹۹ ادامه داشته است به‌صورتی که از سال ۱۳۹۳ به بعد روند احیا کانال پشت پوینت بار بالایی سرعت گرفته و پوینت بار به‌صورت یک مانع میانی و درنهایت به یک جزیره تبدیل شده است (شکل ۲۰).



شکل ۲۰. مقایسه زمانی بازه شماره ۴ و ۵

روند فرسایش دیواره شماره ۵ با توسعه پوینت بار پایینی توسعه یافته است به‌گونه‌ای که پس‌روی دیواره در سال ۱۳۹۴ به بعد باعث تخریب کانال مصنوعی شده و این بخش به کانال اصلی اضافه می‌شود. این روند تا سال ۱۳۹۹ نیز به‌سرعت رو به توسعه است به صورتی که مقطع برداشت‌شده در زمان پژوهش و کل پوشش گیاهی این دیواره از بین رفته است. اما در دو سال پایانی با اضافه کردن نخاله‌ها و خاکریزی به‌صورت دستی و انجام عملیات‌های عمرانی این ساحل دستخوش تغییرات جدید شده است.

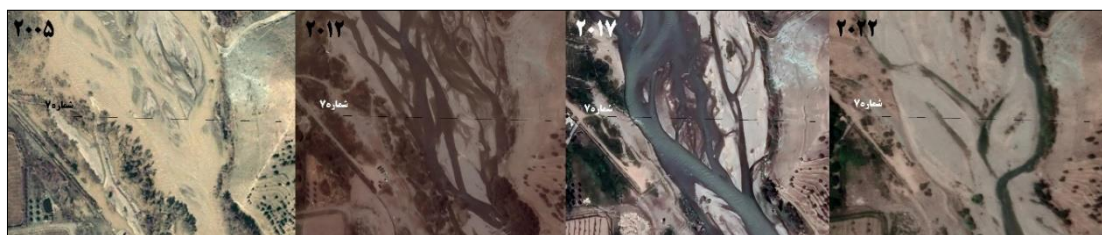
دیواره شماره ۶ در سمت چپ کانال قرار گرفته کمی جلوتر از این دیواره در سمت راست یک برجستگی توپوگرافی از جنس برون‌زدگی سنگی قرار دارد. در محل دیواره یک پوینت بار در سال‌های ۱۳۸۳ در حال (شکل‌گیری است که از سال ۱۳۸۹ شروع به فرسایش کرده است و از این سال تماس دیواره با جریان آب رو به افزایش است. در طول این سال‌ها به‌صورت دستی نیز مواد و نخاله‌ها در حاشیه کانال اضافه شده است. از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۳ این روند ادامه پیدا کرده اما قسمت‌های زیادی از پای دیواره حتی با توقف روند رسوب‌گذاری دارای رسوبات پای کرانه‌ای فراوانی است. در سال ۱۳۹۴ روند فرسایش شدت یافته به صورتی که دیوار با پس‌روی همراه است. این روند در سال ۱۳۹۶ به اوج خود رسیده و جاده کناره رودخانه نیز مورد تهدید فرسایش است. این روند با شدت کمتر تا سال ۱۳۹۸ ادامه دارد. شایان‌ذکر

است در این مدت اقداماتی برای جلوگیری از فرسایش صورت گرفته است اما فرسایش در این بخش همچنان ادامه دارد. از سال ۱۳۹۹ تا حال حاضر با کاهش جریان و دخالت‌های انسانی روند فرسایش دیواره کاهش یافته و دیواره در حال شدن از جریان اصلی رودخانه است (شکل ۲۱).



شکل ۲۱. مقایسه زمانی بازه شماره ۶

برای دیواره شماره ۷ تصاویر از سال ۱۳۸۴ موجود بوده است که در این سال دیواره بخشی از یک‌بار میانی است. این روند تا سال ۱۳۸۷ ادامه داشته ولی پس از آن با افت جریان این بخش به‌عنوان بخشی از دیواره تثبیت شده است و روند پس‌روی و فرسایش این دیواره تا سال ۱۴۰۲ مدام رو به توسعه و گسترش است به صورتی که دیواره برداشته شده در سال ۱۳۹۷ در حال حاضر وجود ندارد (شکل ۲۲).



شکل ۲۲. مقایسه زمانی بازه شماره ۷

بحث

به‌منظور شناخت پس‌روی کرانه و مقدار تولید رسوب ناشی از شکست کرانه و فرسایش کرانه کانال، شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای در هفت مقطع از کانال این مدل اجرا شد که نتایج تمام مقاطع به‌جز مقطع ۶، نشان‌دهنده فرسایش زیاد است. در مقطع شماره ۶ هم رأس دیواره در حالت کم‌خطر بود و پای دیوار حجم قابل قبولی رسوب را وارد کانال می‌کرد.

در مقطع شماره یک و دیواره اول به علت عدم انسجام کافی بین مواد دیواره و نوع قرارگیری لایه‌بندی رسوبات در زمان دبی پیک دیواره برای نزدیک شدن به زاویه قرار و پایداری از رأس دچار فروریزی می‌شود ولی پای کرانه با توجه به زاویه مناسب باینکه از جنس خود دیواره تشکیل شده است اما پایداری بالای داشته است.

مقایسه تصاویر این دیواره برای سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۲ بیانگر این است که دیواره مطابق مدل دچار عقب‌نشینی و فرسایش است البته پای کرانه برای سال‌های مختلف دارای پس‌روی و پیشروی است. مقطع بعدی یعنی مقطع شماره دو که دارای یک پیش‌آمدگی است به سه لایه اصلی از نظر رسوبی تقسیم می‌شود که

چسبندگی لایه سطحی در این دیواره نیز به علت به وجود آمدن پیشانی برون‌زده دیوار است. لایه میانی با سرعت بیشتری فرسوده می‌شود البته در دبی لبالی کل پیشانی سقوط نمی‌کند بلکه به علت زاویه مناسب‌تر از رأس ریزش اتفاق می‌افتد. با تداوم جریان در وضعیت دبی لبالی ممکن است نتایج متفاوت‌تری از شرایط موجود ایجاد شود. در پای این دیواره هم کمی فرسایش رخ داده است که شامل نیمی از یک لایه دیواره است و این بیانگر تأثیر بیشتر شیب دیواره نسبت به جنس لایه است.

در مقطع شماره سه برعکس دیواره قبلی، به علت تفاوت جنس لایه‌ها، امکان سقوط کامل رأس دیواره وجود دارد البته بیرون‌زدگی در تمام قسمت‌های این دیواره یکسان نبود و شیب کم پای کرانه در طول حدود ۳ متر نیز نشان‌دهنده این موضوع بود که قسمت‌های قبلی دیواره نیز سقوط داشته و به اصلاح دامنه و کم شیب شدن آن کمک کرده است. بر پایه خروجی مدل در این دیواره، در قسمت پای دیواره، فرسایش محدودی اتفاق خواهد افتاد.

دیواره مقطع شماره چهار در وضعیت دبی لبالی، با وجود سه لایه رسوبی متفاوت به سمت اصلاح زاویه دیواره حرکت می‌کند و در قسمت پای دیواره کاملاً پایدار است. مشاهدات میدانی نیز نشان می‌دهد که دقیقاً با کاهش تدریجی زاویه دیواره، این سمت کانال پایان یافته و به سمت مسطح شدن پیش می‌رود.

مقاطع دو تا چهار در یک سمت و در یک امتداد قرار دارند که به‌طور دقیق بعد از مقطع چهار دیواره سمت راست به‌شدت فرسوده و مسطح می‌شود.

مقایسه تصاویر نیز نشان می‌دهد که مقاطع ۲ تا ۳ که در یک‌جهت نیز قرار دارند به‌شدت دچار فرسایش و پس‌روی هستند به‌صورتی که دیواره هر سال با وجود اضافه شدن خاک‌ریزی‌ها و نخاله‌های ساختمانی باز هم عقب‌رفته است.

مقطع شماره پنج با وجود دولایه متفاوت و حتی این نکته که لایه سطحی ناشی از رسوب‌گذاری سیل، رسی و چسبیده است همچنین بر سطح این دیواره پوشش گیاهی مناسب وجود دارد اما در هر نقطه که درخت‌ها از هم فاصله می‌گیرند حتی با وجود پوشش گیاهی یک‌ساله، فرسایش کل دیواره را تغییر داده و می‌تواند حجم زیادی بار رسوبی وارد کانال کند. با وجود برون‌زدگی‌های سنگی در مقابل این مقطع و تمرکز جریان به سمت این دیواره، عمق آب در شرایط عادی نیز بسیار بالا بود و رطوبت متوالی نیز باعث افزایش فشار و هم‌سستی لایه‌ها می‌شود که باعث تشدید فرسایش شده است. نکته قابل توجه این است که فرسایش پای کرانه و زاویه پیش‌بینی خروجی مدل، روندی چرخه‌ای را در عقب‌نشینی کل دیواره نشان می‌دهد یعنی با افزایش فرسایش پای کرانه برای اصلاح زاویه رأس دیواره نیز بیشتر دچار فرسودگی می‌شود.

مقایسه تصاویر مقطع شماره ۵ برای این سال‌ها نیز نشان داده به‌جز سال آخر، روند پس‌روی کرانه و فرسایش دیواره بسیار شدید بوده به حدی که باعث از بین رفتن کل دیواره و پوشش گیاهی شده است و بر خروجی مدل برای این دیواره صحنه گذاشته است. البته دو سال آخر با دست‌کاری‌های انسانی کل دیوار از نو ایجاد شده است.

مقطع شماره شش دارای یک دیواره با دست‌کاری انسانی است. رسوبات ریزدانه اضافه‌شده به محل باعث اصلاح زاویه دیوار شده که خود روند فرسایش را کاهش داده است. با این‌وجود رأس دیواره با زاویه شیب بالا، بر اثر جریان رودخانه در شرایط دبی لبالی دچار فرسایش شده و شیب دیواره کانال کاهش خواهد یافت. همین اتفاق برای پای کرانه در این دیواره رخ می‌دهد و فرسایش در رأس و پای کرانه انجام می‌شود. در این دیواره روند اصلاح دیواره مانند پیش‌بینی زیگا و همکاران (۲۰۲۰) به سمت زاویه ۴۵ درجه و نزدیک به آن پیش می‌رود.

این دیواره در تصاویر نشان از پایداری نسبی داشته است ولی در سال‌های پس از برداشت مقطع، توسط نخاله‌های

ساختمانی و خاک‌ریزی‌های جدید به همراه کانال کلاً از بین رفته و چندین متر از حریم رودخانه پر شده است. دیواره شماره هفت دارای بافت یکپارچه است اما در پشت رأس خود دارای یک فرورفتگی است. با وجود دبی لبالبی، این دیواره از ناحیه رأس حدفاصل فرورفتگی و خط رأس دچار فرسایش می‌شود که این روند متأثر از (شکل دیواره است. در پای این دیواره فرسایش باعث اصلاح زاویه پنجه کرانه می‌شود و فرسایش بسیار کمی رخ می‌دهد. مقایسه تصاویر بازه زمانی مورد مطالعه نشان داد که بیشترین افت بستر در پای این دیواره رخ داده است و نتیجه مدل با واقعیت انطباق داشته و تمام دیواره دچار فرسایش شدید شده و بخش کوچکی از آن باقی مانده است.

نتیجه‌گیری

در تمام مقاطع میزان زیادی پس‌روی وجود دارد که بیشترین آن مربوط به مقطع شماره ۵ با میزان ۱/۲۸ متر بود و کمترین آن مربوط به مقطع شماره ۶ (نزدیک به صفر) است. سایر مقاطع با پس‌روی‌های در محدوده ۵۷ سانتی‌متر تا ۶۶ سانتی‌متر قرار دارند. از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) نیز در ناایمن‌ترین مقطع شماره ۵ با عدد ۰/۰۵ و ایمن‌ترین آن‌ها مقطع شماره ۶ با عدد ۳/۳۴ است البته عدد ایمنی ۱/۳ برای مقطع ۵ با شرط پوشش گیاهی هم ایمنی بالایی است. بیشترین وزن توده سقوط کرده هم به ترتیب برای مقاطع ۵، ۱ و ۷ است و بعد از این مقاطع مقطع شماره ۴ و بعد از آن مقطع شماره ۲ قرار دارد.

در کل بعد از بازدید میدانی پس از یک سال نتایج مقاطع شماره ۲، ۳ و ۴ بسیار به واقعیت نزدیک و دیواره‌ها ریزش نداشته‌اند (شکل ۲۵) که نشان‌دهنده انطباق بالا این مدل با شرایط طبیعی منطقه است. در مقطع شماره ۱ با فاصله ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در رأس دیواره، دیوار بلوکی احداث شده است و در مقطع شماره ۵ با فاصله یک متر، فضای سبز و تأسیسات یک بوستان قرار گرفته است. مقایسه تصاویر جدید نشان‌دهنده صحت خروجی مدل برای دیواره‌ها و نشان‌دهنده برآورد صحیح فرسایش دیواره‌ها به صورت کلی در بازه‌های مورد مطالعه بوده است.

با توجه به میزان فرسایش و خروجی سد لتیان در دوره‌های پربابی و گاه تداوم تخلیه برای بیش از یک روز احتمال فرسایش دیواره‌ها و آسیب به تأسیسات انسانی همین‌طور افزایش حجم زیادی رسوب وارد شده امکان انباشت در تأسیسات برداشت و استحصال آب از رودخانه مانند استخرهای پرورش ماهی را ممکن می‌کند و از طرفی حجم قابل توجهی از رسوب را وارد دریاچه سد ماملو در پایین دست می‌کند. راه کار جلوگیری از این آسیب‌ها برای سازه‌های انسانی رعایت حریم رودخانه و دور کردن تأسیسات دائمی و در جهت کاهش آسیب از ناحیه رسوب انسداد مجاری در صورت وجود دبی پیک از خروجی سد لتیان پیشنهاد می‌شود.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- اسماعیلی، رضا؛ حسین‌زاده، محمد مهدی و متولی، صدرالدین. (۱۳۹۰). تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای. تهران: انتشارات لاهوت.
- حسین‌زاده، محمد مهدی و اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، مفاهیم، فرم‌ها و فرایندها. چاپ اول، تهران، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- حسین‌زاده، محمد مهدی و گلستانی، علی. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات الگوی شریانی رودخانه جاجرود بر اساس شاخص‌های شریانی بریس، ریچاردز و واربودن (حداصل سد لتیان تا سد ماملو). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۲ (۱)، ۱۵۱-۱۳۲. doi: 10.22034/gmpj.2023.367566.1385
- حسین‌زاده، محمد مهدی و اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۷). برآورد فرسایش کناره‌ای رودخانه با استفاده از مدل BSTEM. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۴۵، ۵۳-۷۰. doi: 10.52547/esrj.11.4.1
- حسین‌زاده، محمد مهدی؛ خالقی، سمیه و رستمی، میلاد. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مخاطرات آن با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قره‌وه). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۶۷: ۱۲۹-۱۴۹.
- حسین‌زاده، محمد مهدی؛ صدوق، سید حسن؛ متش بیرانوند، سعید و اسماعیلی، رضا. (۱۳۹۸). برآورد میزان فرسایش کناره‌ای رودخانه با استفاده از مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه (مطالعه موردی: رودخانه لایج-شهرستان نور). مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۳۳، ۲۶۵-۲۷۸. doi 10.30488/GPS.2019.56759.2120
- روشن‌نسب، فاطمه؛ میرزایی قره‌لر، محمدرضا و خزایی، مجید. (۱۴۰۱). بررسی اثرات مقاومت برشی درختی بر پایداری رودخانه (بازه‌ای از رودخانه بشار استان کهگیلویه و بویراحمد شهر یاسوج). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۲(۱)، ۱۸۲-۱۶۰. http://dori.net/dor/20.1001.1.22517812.1401.12.1.1.6
- صمدی، امیر و امیری تکلدانی، ابراهیم. (۱۳۹۴). فرسایش توده‌های سواحل رودخانه‌ها فرایندها و سازوکارها. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- گلستانی، علی و حسین‌زاده، محمد مهدی. (۱۴۰۱). نقش توپوگرافی بر الگو و مورفولوژی رودخانه جاجرود. نهمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، تهران.
- گلستانی، علی و انصاری، رامین. (۱۳۹۷). بررسی مؤلفه هندسی پیچان‌رودها و میزان توسعه آن‌ها در استان بوشهر. یازدهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز.
- نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور شامل نقشه‌های شرق تهران، دماوند و تهران.

References

- 1:100,000 maps of the Geological and Mineral Exploration Organization of the country, including the maps of East Tehran, Damavand and Tehran
- Al-Madhhachi, A.T., Al-Mussawy, H.A., Basheer, M., & Abdul-Sahib, A.A., (2020). Quantifying Tigris Riverbanks Stability of Southeast Baghdad City using BSTEM. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 10 (3), 230-247. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.107212>

- De Souza Dias, V., de Faria, K. M. S., da Luz, M. P., & Formiga, K. T. M. (2022). Investigation and Quantification of Erosions in the Margins of Water Bodies: A Systematic Review. *Water*, 14(11), 1693. <https://doi.org/10.3390/w14111693>
- Esmaili, R., Hosseinzadeh, M. M., & Motevalli, S., (2011) *Field Techniques in Fluvial Geomorphology*. Tehran: Publishers lahut. [In Persian]
- Ghosh, A., Roy, M.B., & Roy, P.K. (2022) Evaluating lateral riverbank erosion with sediment yield through integrated model in lower Gangetic floodplain, *India. Acta Geophys*, 70, 1769–1795. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00822-7>
- Golestani, A., & Ansari. R., (2018) Investigating the geometric component of twisting rivers and their development rate in Bushehr province. *The 11th International Seminar on River Engineering*. [In Persian]
- Golestani, A., & Hosseinzadeh, M. M., (2023) Investigating changes in the braided pattern of the Jajroud River based on Brice, Richards and Warburton braiding indices (between Latian Dam and Mamlo Dam). *Quantitative geomorphology research*, 12(1), 132-151. doi: 10.22034/gmpj.2023.367566.1385 [In Persian]
- Golestani, A., & Hosseinzadeh, M. M., (2023) The role of topography on the pattern and morphology of Jajrud river. *The 9th Conference of the Iranian Association of Geomorphology*, 67013-01220. [In Persian]
- Hanson, G. J., & Simon. A., (2001), Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15 (1), 23-38. <https://doi.org/10.1002/hyp.149>
- Hosseinzadeh, M. M., & Esmaili, R., (2015). *Fluvial Geomorphology Concepts*. Tehran: Forms and Processes Publishers Shahid Beheshti University. [In Persian]
- Hosseinzadeh, M. M., & Esmaili, R., (2018) Estimation of river bank erosion using BSTEM model. *Iranian journal of geology*. [In Persian]
- Hosseinzadeh, M. M., & Sadogh, S. H., Beyranvand, M. S., & Esmaili, R., (2018) Predict the rate of bank erosion in Lavij river during a particular flow by using BSTEM. *Journal of Geographical Survey of Space*, 9(33), 265-278. doi:10.30488/gps.2019.56759.2120 [In Persian]
- Hosseinzadeh, M. M., Khaleghi, S., & Rostami, M., (2019). Simulation of river bank erosion and its hazards by BSTEM model (Case study: Galali river, Ghorveh). *Journal of geography and planning*, 23(67), 129-149. [In Persian]
- Klavon, K., Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., & Khanal, A., (2017) Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM), *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (1), 119-213, <https://doi.org/10.1002/esp.4073>
- Klavon, K., Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., & Khanal, A., (2017). Evaluating a process- based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (1), 191-213. <https://doi.org/10.1002/esp.4073>
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A., (2000) Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39 (1), 20-31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Narasimahan B., Allen P. M., Conffman S. V., Arnold J. G., & Srinivasan R. (2017) Development and Testing of a Physically Based Model of Streambank Erosion for Coupling with a Basin-Scale Hydrologic Model SWAT. *Journal of The American Water Resources Association*, 53, 344–364, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12505>
- Nieto, N., Chamorro, A., Echaveguren, T., & Escauriaza, C. (2023). Fragility curves for road embankments exposed to adjacent debris flow. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47 (1), 105–122. <https://doi.org/10.1177/0309133322111114>
- Okeke, C. A. U., Uno, J., Academe, S., Emenike, P. C., Abam, T. K. S., & Omole, D. O. (2022). An integrated assessment of land use impact, riparian vegetation and lithologic variation on streambank stability in a peri-urban watershed (Nigeria). *Scientific reports*, 12 (1), 10989. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15008-w>

- Roushannasab, F., Mirzaei, M., & Khazaei, M., (2022) Effects of Tree Shear Strength on River Stability (Reach of BESHAR River). *Journal of Environmental Erosion Research*, 12 (1), 160-182. [In Persian]
- Samadi, A., & Amiri Tokaldany, E., (2015). *Massive Erosion in Riverbanks Processes and Mechanisms*. Tehran: Publishers University of Tehran. [In Persian]
- Simon, A., Bankhead, N., & Thomas, R. E., (2010). Iterative bank stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions, paper presented at Joint Federal *Interagency Conference, Subcomm. On Hydrol. And Sediment., Advis. Comm. on Water Info. Las Vegas, Nev., 27 June to 1 July*. 38870550 - 0-11
- Simon, A.; Curini, A.; Darby, S. E., Langendoen, E. J., (2000), Bank and near-bank processes in an incised channel, *Geomorphology*, 35, 193-217 [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00036-2)
- Thapa, I., & Tamrakar, N. K. (2016). Bank stability and toe erosion model of the Kodku Khola bank, southeast Kathmandu valley, central Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*, 50 (1), 105–111.
- Wang, H., Hu, Q., Liu, W., Ma, L., Lv, Z., Qin, H., & Guo, J. (2023). Experimental and Numerical Calculation Study on the Slope Stability of the Yellow River Floodplain from Wantan Town to Liuyankou. *Toxics*, 11 (1), 1-79. <https://doi.org/10.3390/toxics11010079>
- Waterman, D. M., Liermann, M., Pollock, M.M., Baker, S. & Davies, J., (2006), Steady-state parallel retreat migration in river bends with noncohesive (composite) banks. *Water Resources Research*, 58 (3), 1-33. <https://doi.org/10.1029/2021WR030762>
- Wei, Q., (2022). *Quantifying the Effects of Water Management Decisions on Streambank Stability*. UWSpace. Master of Science in Earth Science (Water), 1-95. <http://hdl.handle.net/10012/18856>
- Wenqian. L. u., (2022). *Characterization and stability for Cottonwood riverbank-a reliability study for BSTEM*. Kansas State University. Master of Science in Department of Civil Engineering. 1-74. <https://hdl.handle.net/2097/42195>
- Zegeyea, A. D., Langendoen, E. J., Steenhuis, T. S., Mekuria, W., Tilahun, S. A., (2020) Bank stability and toe erosion model as a decision tool for gully bank stabilization in sub humid Ethiopian highlands. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20 (2), 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.02.003>