

## Investigating the Erosion of the Haft Cheshmeh River Banks in Qazvin Using the Near Bank Stress Model (NBS)

Mohammad Mehdi Hosseinzadeh <sup>1</sup>\*, Sara Pasha <sup>2</sup>

1- Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(\*Corresponding Author Email: m\_hoseinzadeh@sbu.ac.ir)

2- MSc, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### Introduction:

The flow of water and rivers is the most important phenomenon in the crustal processes that not only plays a role in the overall appearance of the earth but also determines the form of human life on the planet. As a dynamic system, a river always changes its morphological location and characteristics according to time, geomorphic, geological-hydrological factors, and sometimes due to the human intervention. Bank erosion of rivers could cause a lot of damage to agricultural lands, buildings, riverside structures, roads, bridges, etc. every year. In addition, it could cause significant amounts of sediment to be transferred to dam reservoirs. The Haft Cheshmeh River basin is located in the Rozjerd region, in the northeast of Qazvin province and on the southern slope of Alborz. In the present study, the Haft Cheshmeh River in the area from Rozjerd to Shinqar villages has been studied for approximately 11 km. The pattern of the river in this sinusoidal range with an average curvature coefficient is 1.17.

### Methodology:

In order to obtain the required data, the Haft Cheshmeh River was divided into 4 sections and 10 cross-sections, and from these cross-sections, a cross-sectional profile of the channel was prepared during 7 field works. To investigate the erosion of the Haft Cheshmeh River using the near bank stress model (NBS), the estimation of the stress applied to the shore is related to the slope flow, in which seven methods can be used in accordance with the conditions of the region.

According to the characteristics of the Haft Cheshmeh river, in this study, three methods of the ratio of the radius of curvature to the width of the bankfull ( $R_c/W_{bkf}$ ), the ratio of the maximum depth of the near bank to the depth bankfull ( $d_{nb}/d_{bkf}$ ), and the ratio of the shear stress of the near bank to the shear stress of the bankfull ( $\tau_{bkf}/\tau_{nb}$ ) were used.

After obtaining the data by field sampling and calculations, according to the measured parameters, the degree of lateral erosion in different classes was classified from very low to severe.

### Results:

To investigate the erosion of the Haft Cheshmeh River, the Near Bank Stress Model (NBS) was used. At the second level, which measures the ratio of the radius of curvature to the width of the bank, all sections, with the exception of cross-section 9, have severe erosion. Only in cross-section 9, very little erosion has been observed. At the fifth level, which is the ratio of the maximum depth of the near bank to the depth of the bankfull, low and very low erosion from the first to the eighth sections on both sides of the shore were observed. Only the ninth and tenth sections have high and severe erosion; however, even on the right bank of the tenth section, erosion is low. At the sixth level, which is the ratio of the shear stress of the near bank to the shear stress of the bankfull, the erosion has low and very low values in all cross-sections.

### Conclusion:

The use of the ratio of the radius of curvature to the width of the bankfull is appropriate for a time when a narrow radius has the maximum effect on the bend of the river. Therefore, the results obtained

from the cross-sections that were harvested at the site of the bend of the stream were consistent with the reality of the region and showed the instability of the sides. The results of the shear stress of the near bank to the shear stress of the bankfull did not correspond to reality. According to field observations and data obtained using the above-mentioned three methods, the ratio of the radius of curvature to the width of the bankfull is close to reality. Although the results of the near bank stress model show the erosive cross-sections with less intensity, if it is necessary to provide a quick and low-cost estimate of river intervals, it is reasonable to use the near bank stress model.

**Keywords:** Bank Erosion, the NBS Model, Haft Cheshmeh River.

**References:**

- Akhtar, M. P., Sharma, N., & Ojha, C. S. P. (2011). Braiding Process and Bank Erosion in the Brahmaputra River. *International Journal of Sediment Research*, 26(4), 431-444.
- Bandyopadhyay, S., Ghosh, K., & De, S. K. (2014). A Proposed Method of Bank Erosion Vulnerability Zonation and Its Application on the River Haora, Tripura, India. *Geomorphology*, 16, 111-121.
- Ghosh, K. G., Pal, S., & Mukhopadhyay, S. (2016). Validation of BANCS Model for Assessing Stream Bank Erosion Hazard Potential (SBEHP) in Bakreshwar River of Rarh Region, Eastern India. *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 95(2), 1-15.
- Islam, M. (2000). *River Bank Erosion and Sustainable Protection Strategies*. Fourth International Conference on Scour and Erosion 2000.
- Kwan, H., & Swanson, Sh. (2014). Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(6), 112-114.
- Lawlor, S. M. (2004). Determination of Channel-Morphology Characteristics, Bankfull Discharge, and Various Design-Peak Discharges in Western Montana. *Journal of Scientific Investigations Report*, 52, 1-19.
- Rosgen, D. L. (2001). A Practical Method of Computing Streambank Erosion Rate. *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 95(2), 1-15.
- Rosgen, D. L. (2011). Watershed Assessment of River Stability and Sediment Supply (WARSSS). *Journal of Wildland Hydrology*, 32, 69-93.



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۲، پیاپی ۸۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صص ۱۱۸-۱۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۴/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۰

## بررسی فرسایش پذیری کرانه‌های رودخانه هفت چشمه قزوین

### با استفاده از تنش نزدیک کناره (NBS)

محمد مهدی حسین‌زاده\*، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m\_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

ساره پاشا، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

s.p.4971@gmail.com

#### چکیده

فرسایش کناره‌ای رودخانه یک فرایند پیچیده طبیعی است که در مقیاس کانال عمل می‌کند. هدف پژوهش حاضر، بررسی وضعیت فرسایش کناره‌ای مناطق آسیب‌پذیر و عوامل ایجاد و تشدید فرسایش کناره‌ای رودخانه است؛ بر این اساس ۱۱ کیلومتر از رودخانه هفت چشمه در محدوده روستای رزگرد تا روستای شینقر با الگوی سینوسی مطالعه شد. در این پژوهش با توجه به مورفولوژی رودخانه، محدوده پژوهش به ۴ بازه و ۱۰ مقطع تقسیم شد؛ از بازه‌های مطالعه‌شده در چند نوبت بازدید میدانی شد تا داده‌های مدنظر جمع‌آوری و نیمرخ عرضی کانال تهیه شد. برای بررسی فرسایش کناره‌ای رودخانه از مدل تنش نزدیک کناره استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش حاکی است در نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی تمامی مقاطع به‌استثنای مقطع ۹ فرسایش شدید دارند؛ در نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به عمق دبی لبالی بیشتر مقاطع فرسایش کم تا متوسط داشته‌اند؛ به‌جز مقطع ۹ و ۱۰ در کرانه چپ که فرسایش زیاد و شدید داشته‌اند. در نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالی تمامی مقاطع فرسایش خیلی کم و کم داشته‌اند. در نهایت با توجه به بازدیدهای میدانی مشخص شد سطح اول مدل یعنی نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی با ویژگی‌های منطقه تناسب بیشتری دارد و با واقعیت منطقه منطبق است.

واژه‌های کلیدی: فرسایش کناره، مدل NBS، دبی لبالی، تنش برشی، رودخانه هفت چشمه

\*نویسنده مسئول

Copyright©2021, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/GEP.2021.123702.1319](https://doi.org/10.22108/GEP.2021.123702.1319)

Dor: [20.1001.1.20085362.1400.32.2.5.8](https://doi.org/10.1001.1.20085362.1400.32.2.5.8)

## مقدمه

جریان آب‌ها و رودخانه‌ها مهم‌ترین پدیده در فرایندهای پوسته زمین است که هم در سیمای کلی زمین نقش دارد و هم شکل زیستن انسان را در کره زمین تعیین می‌کند (جلیلوند و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۹۸). رودخانه به‌مثابه دستگای پویا، مکان و خصوصیات مورفولوژیکی خود را همواره برحسب زمان، عوامل ژئومورفیک، زمین‌شناختی، هیدرولوژیک و گاه در اثر دخالت بشر تغییر می‌دهد (رضایی مقدم و پیروزی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۱۰). فرسایش کناره‌ای در رودخانه‌ها هر ساله خسارات زیادی را به زمین‌های کشاورزی، ساختمان‌ها، سازه‌های کنار رودخانه‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و... وارد می‌کند و به‌علاوه باعث انتقال مقادیر زیادی رسوب به مخازن سدها می‌شود (حبیبی و حقی‌آبی، ۱۳۸۱: ۴۸).

فرسایش کناره‌ای رودخانه یک فرایند پیچیده طبیعی است که در مقیاس کانال عمل می‌کند. فرسایش بیشتر، میزان رسوب‌گذاری را تسریع و منابع آب را آلوده می‌کند. تقریباً تا ۸۰ درصد کل بار رسوب در سیستم‌های رودخانه‌ای به فرسایش کناره‌ای رود بستگی دارد (Gopal Ghosh et al., 2016: 1). ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، اشکال رودخانه‌ای و فرایندهای تشکیل‌دهنده آنها را تحلیل و تفسیر می‌کند. این اشکال و فرایندها در مقیاسی فضایی از سطح حوضه آبریز تا واحدهای ژئومورفیک کانال و در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی می‌شوند (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴: ۲).

فرسایش کناری معمولاً در دیواره‌های نهرها و رودخانه‌ها رخ می‌دهد. در این نوع فرسایش، قسمت‌های خارجی خمیدگی‌ها به شدت فرسایش می‌یابند؛ زیرا نیروی برشی آب در آن قسمت زیاد است. عمل این فرسایش متفاوت با انواع دیگر فرسایش است. این فرسایش در امتداد کناره‌ها و بستر رودخانه‌های دائمی همواره فعال است؛ در حالی که انواع دیگر فرسایش فقط در حین بارندگی یا کمی پس از شروع آن فعال‌اند. فرسایش کناره، تخریب کناره رودخانه و ناپایداری مجرای رودخانه را به دنبال دارد و هنگامی تشدید می‌شود که مجرا و بستر رودخانه آبرفتی باشد (رضایی مقدم و پیروزی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۰۹).

ایسلام<sup>۱</sup> (2000) در پژوهش‌های خود در زمینه حل مشکل سیل، پایداری کناره‌های رودخانه‌ها را از نظر فرسایش بررسی کرده است.

راسن<sup>۲</sup> (2001) در پژوهشی مدل‌های پایداری کانال رود را در منطقه چشمه پاگوسا اسپرینگ کلرادو<sup>۳</sup> در آمریکا برای ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش کناره‌ای و نیز میزان رسوب بررسی کرده و با بهره‌گیری از متغیرهایی چون تغییرات در شاخص‌های کنترل فرم کانال در درجه اول و رژیم رسوب، پوشش گیاهی و تغییرات فیزیکی این محدوده در درجه دوم، اعتبار این سیستم طبقه‌بندی را سنجیده است.

باندی اپادهی و همکاران<sup>۴</sup> (2014) فرسایش کناره‌ای را با استفاده از RS-GIS بررسی کردند. آنها با بهره‌گیری از هشت پارامتر فرسایش باران، پوشش گیاه، فاکتور سنگ‌شناسی، شیب کناره‌ای، پیچان‌رودی، شیب رودخانه،

- 
1. Islam
  2. Rosgen
  3. Pagosa Springs, Colorado
  4. Bandyopadhyay et al.

فرسایش خاک و فعالیت‌های انسانی، میزان آسیب‌پذیری رودخانه هاورا و تیپورا<sup>۱</sup> را اندازه‌گیری و منطقه را از نظر مخاطره به پنج ناحیه خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم‌بندی کرده‌اند.

گوپال گوش و همکاران<sup>۲</sup> (2016) در پژوهشی که در امتداد رودخانه بکریش وار<sup>۳</sup> در شرق هند انجام دادند، منبع رسوب و فرسایش کناره‌ای را با استفاده از مدل پتانسیل مخاطره فرسایش کناره‌ای (SBEHP) تخمین زدند. اختر و همکاران<sup>۴</sup> (2011) فرسایش کرانه‌ای را در رودخانه براهماپوترا<sup>۵</sup> در دره آسام هند بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد قدرت جریان کم رودخانه باعث تشدید الگوی شریانی می‌شود که ممکن است احتمال بیشتری از فرسایش کرانه‌ای را نشان دهد.

سیمون و همکاران<sup>۶</sup> (2010) در پژوهشی فرسایش کرانه‌ای را با استفاده از مدل BSTEM مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان داد مدل BSTEM، ابزاری مناسب و کارا برای تعیین و تشخیص شرایط حاکم بر کرانه رودخانه با هدف حفاظت از رود و ارزیابی اهمیت فرسایش رودخانه‌ای و ویژگی‌های پوشش گیاهی و فشار آب منفذی نزدیک کرانه است.

یمانی و شرفی (۱۳۹۱) عوامل مؤثر بر ناپایداری و فرسایش کناری رودخانه هررود استان لرستان را مطالعه کردند. آنها عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۴ و تصویر ماهواره‌ای IRS سال ۱۳۸۶ را به‌مثابه ابزار مقایسه زمانی تغییرات به کار بردند. نتایج کلی نشان می‌دهد برخلاف معمول، تغییرات مورفولوژی و فرسایش کناری رودخانه مطالعه‌شده از بالادست به طرف پایین دست کاهش یافته است؛ همچنین یافته‌ها نشان داد ساختمان زمین‌شناسی و لیتولوژی بستر و کناره رودخانه، مهم‌ترین عوامل تغییر پایداری بستر به شمار می‌روند.

خالقی و ملکانی (۱۳۹۳) در پژوهشی فرسایش کناره رودخانه ليقوان چای را با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کناره<sup>۷</sup> راسگن برآورد کرده‌اند.

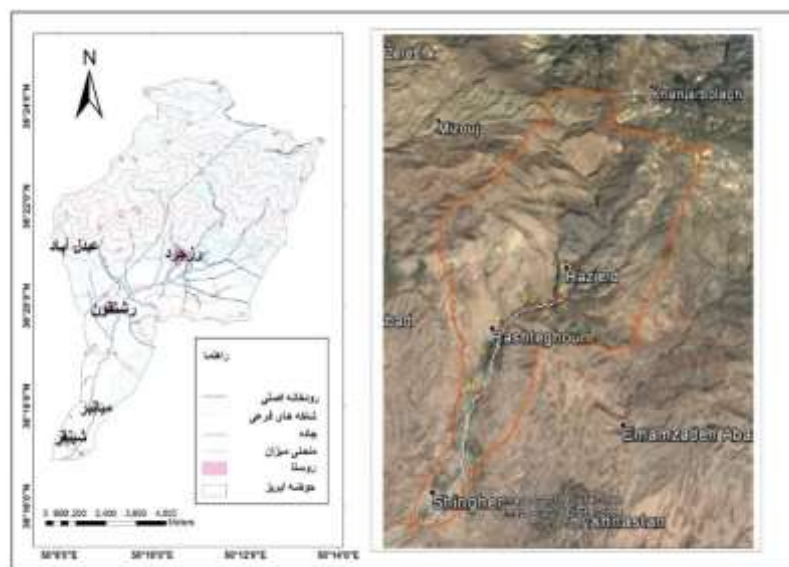
حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) برای بررسی فرسایش کرانه رودخانه گلالی قروه به‌مثابه یک رودخانه ناپایدار، از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه (NBS)<sup>۸</sup> رودخانه راسگن استفاده و پارامترهای مورفولوژی کانال و میزان فرسایش کرانه رودخانه را اندازه‌گیری کردند.

هدف این مطالعه، بررسی وضعیت فرسایش‌پذیری کرانه‌های رودخانه هفت چشمه قزوین است؛ زیرا در سال‌های اخیر بارها تخریب زمین‌ها و تأسیسات ساخته‌شده در حاشیه رودخانه مشاهده شده است و مالکان و ساکنان روستاهای منطقه به روش‌های مختلف تلاش کرده‌اند خسارات را کاهش دهند. ارزیابی تنش نزدیک کرانه در پیش‌بینی فرسایش بسیار مهم است؛ به طوری که نشان‌دهنده توزیع انرژی جریان در مقطع عرضی مجرا به‌ویژه کناره مجراست و این توزیع نامتناسب انرژی ممکن است به فرسایش کناره منجر شود.

1. Haora and Tripura
2. Gopal Ghosh et al.
3. Bakreshwar
4. Akhtar et al.
5. Brahmaputra
6. Simon et al.
7. Shear stress near bank
8. Near Bank Stress

## منطقه پژوهش

حوضه آبخیز رودخانه هفت‌چشمه در منطقه رزگرد در شمال شرقی استان قزوین و در دامنه جنوبی البرز در طول جغرافیایی  $36^{\circ} 19' 30''$  و عرض جغرافیایی  $50^{\circ} 19' 48''$  قرار دارد. از نگاه زمین‌شناسی، استان قزوین در فصل مشترک البرز باختری و لبه شمالی ایران مرکزی واقع است؛ به بیان دیگر بلندی‌های شمال استان به حاشیه جنوبی البرز و بخش بیشتر استان شامل دشت قزوین و ارتفاعات جنوب به پهنه ساختاری رسوبی ایران مرکزی تعلق دارد و به نظر می‌رسد مرز این دو پهنه بر راندگی شمال قزوین منطبق است که ارتفاعات شمال را از دشت قزوین جدا می‌کند. گستره قزوین در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز واقع است و از دیدگاه ریخت‌شناسی همانندی بسیار با گستره تهران دارد و بیشتر پهنه‌های ریخت‌شناسی تهران را می‌توان در این منطقه نیز به‌خوبی مشاهده کرد. اختلاف ارتفاع ناگهانی میان شهر قزوین که روی رسوبات آبرفتی کواترنر بنا شده با نزدیک‌ترین قله به آن در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال شرقی قزوین (قله قیزلار قلعه سی بابلندی ۲۷۰۰)، یکی از بارزترین ویژگی‌های توپوگرافی گستره قزوین است. میانگین بارش سالانه استان از ۲۱۰ میلی‌متر در مناطق شرقی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است. حداکثر بارش استان در دامنه‌های شمال شرقی الموت و بیش از ۵۵۰ میلی‌متر است. ارتفاعات شمال شرقی و شمالی استان و ارتفاعات آوج در جنوب غرب استان کمینه درجه حرارت و مناطق مرکزی دشت قزوین و اطراف دریاچه سد منجیل بیشینه درجه حرارت دارد. متوسط آب‌دهی سالانه منطقه مطالعه‌شده در ایستگاه امیرآباد  $0/42$  مترمکعب در ثانیه و در ایستگاه باراجین  $0/5$  مترمکعب در ثانیه است. در هر دو ایستگاه بیشترین مقدار دبی متوسط به فروردین مربوط است که برای ایستگاه امیرآباد  $1/73$  مترمکعب و برای ایستگاه باراجین  $2/02$  مترمکعب است. شکل ۱ حوضه و بازه مطالعه‌شده و موقعیت مقاطع بررسی‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. حوضه و بازه مطالعه‌شده و موقعیت مقاطع بررسی‌شده

(نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 1. The studied basin and reach and the location of the studied cross sections (Authors, 2019)

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌طور تقریبی ۱۱ کیلومتر از رودخانه هفت‌چشمه در محدوده روستای رزجرد تا روستای شینقر مطالعه شده است. میانگین ضریب خمیدگی این بازه ۱/۱۷ است که الگوی سینوسی را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن داده‌های مورد نیاز و با توجه به مورفولوژی، پلان هوایی و الگو، رودخانه هفت‌چشمه به ۴ بازه و براساس ویژگی بستر رودخانه، نوع پوشش گیاهی و شرایط محیطی و بررسی بصری کناره به ۱۰ مقطع تقسیم شد. برای به‌دست‌آوردن و تکمیل داده‌هایی نظیر دبی لبالبی، عمق آب، ضریب خمیدگی، شاخص گودافتادگی، عرض بستر و مساحت مقطع عرضی لازم شد از منطقه در چند نوبت بازدید میدانی شود تا تمامی داده‌های مدنظر به‌طور کامل جمع‌آوری و نیمرخ عرضی کانال تهیه شد. بازدید اول در مهر ۹۷ با هدف تعیین صحت تفکیک بازه‌ها و مقاطع و بازدیدهای بعدی در آذر، دی و بهمن ۹۷ به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای مطالعه‌شده و بازدید نهایی در اردیبهشت ۹۸ با هدف تعیین صحت یافته‌ها صورت گرفت.

برای بررسی فرسایش کناره رودخانه هفت‌چشمه با استفاده از مدل تنش نزدیک کناره (NBS)، تخمین تنش اعمال شده بر کناره در ارتباط با جریان دبی لبالبی<sup>۱</sup> است که در آن از هفت روش استفاده می‌شود و باید روش مناسب را منطبق با شرایط منطقه انتخاب کرد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۴۳).

با توجه به ویژگی‌های رودخانه هفت‌چشمه در این پژوهش از سه روش نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالبی<sup>۲</sup> (Rc/Wbkf)، نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به عمق دبی لبالبی<sup>۳</sup> (dnb/dbkf) و نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالبی<sup>۴</sup> ( $\tau_{bkf}/\tau_{nb}$ ) استفاده شده است.

تنش برشی اعمال‌شده بر کانال ( $\tau_0$ ) به‌صورت یک نیرو بر واحد سطح بستر یا کناره و برحسب نیوتن بر مترمربع ( $N/m^2$ ) یا پوند بر فوت مربع ( $Ib/Ft^2$ ) بیان می‌شود. حرکت یک ذره در کانال نیازمند تنش برشی بحرانی است. با استفاده از رابطه<sup>۱</sup>، تنش برشی مورد نیاز برای حرکت یک ذره با قطر معین تخمین زده می‌شود.

$$\tau_c = \theta cgd(\rho_s - \rho_w) \quad \text{رابطه ۱}$$

$\tau_c$ : تنش بحرانی ( $N/m^2$ )، d: اندازه ذرات رسوبی بستر (این عدد تقریباً نشان‌دهنده قطر d50 رسوبات بوده است؛ یعنی ۵۰ درصد رسوبات از این مقدار بزرگ‌تر یا کوچک‌ترند) و  $\rho_s$ : چگالی رسوب است که تقریباً ۲۶۵۰ کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته می‌شود؛  $\theta c$ : یک مقدار ثابت بی‌بعد است که تابع شکل ذره، ویژگی‌های سیال و آرایش ذرات سطح است. با استفاده از رابطه تنش برشی در بستر رود می‌توان بزرگ‌ترین ذره‌ای را محاسبه کرد که رود در شرایط هیدرولیک خاص و با سرعتی مشخص حمل می‌کند و در اصطلاح «توانش» نام دارد.

اندازه‌گیری مقطع دبی لبالبی با توجه به آثار کناره رودخانه از جمله زیربری رودخانه، تغییرات جنس کناره رودخانه، آثار خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها، تغییرات رنگ سنگ‌ها و در محل‌هایی که دشت سیلابی وجود دارد، لبه دشت سیلابی دبی لبالبی را مشخص می‌کند (شکل ۲).

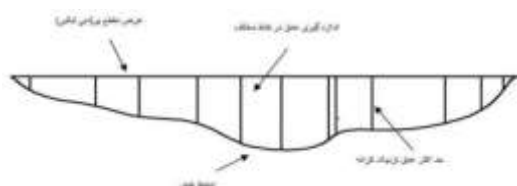
1. Bankfull
2. ratio of the radius of curvature to the width of the bankfull
3. ratio of the maximum depth near bank to the depth bankfull
4. ratio of the shear stress near bank to the shear stress of bankfull



شکل ۲. طرح شماتیک اندازه‌گیری دبی لبالی (لاولر، ۲۰۰۴)

Figure 2. Schematic diagram of bankfull discharge measurement (Lawler, 2004)

برای اندازه‌گیری متوسط عمق آب و حداکثر عمق نزدیک کناره با استفاده از شاخص نقشه‌برداری در نقاط مختلف کانال در شرایط دبی لبالی، عمق اندازه‌گیری می‌شود. میانگین عمق‌های هر مقطع به‌مثابه عمق متوسط و بیشترین عمق در یک سوم هر دو طرف رودخانه به‌مثابه حداکثر عمق نزدیک کناره در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. پارامترهای پروفیل مقطع عرضی کانال (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 3. Channel cross-sectional profile parameters (Authors, 2019)

شعاع انحنا در هر مقطع با استفاده از تصاویر گوگل ارث در محیط نرم‌افزار GIS محاسبه شد. به‌منظور تعیین شعاع قوس‌های پیچان رودی، پس از اینکه مسیر رودخانه ترسیم شد، بر هریک از قوس‌های رودخانه دوایری برآزش داده می‌شود که بیشترین و بهترین تطابق را با قوس‌ها داشته باشند. پس از ترسیم دایره، اندازه شعاع دایره اندازه‌گیری شد. ضریب خمیدگی نیز با استفاده از نسبت طول کانال به طول دره در محیط نرم‌افزار GIS محاسبه شد. پس از به‌دست آوردن داده‌ها با برداشت میدانی و محاسبات صورت گرفته، براساس پارامترهای اندازه‌گیری شده، میزان فرسایش‌پذیری کناره در کلاس‌های مختلف از خیلی کم تا شدید تعیین شد (شکل ۴).

نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی (Rc/Wbkf)	نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق دبی لبالی (dnb/dbkf)	نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی لبالی	میزان فرسایش‌پذیری کرانه (NBS)
بیشتر از ۳	کمتر از ۱	کمتر از ۰/۸۰	خیلی کم
۲/۲۱-۳	۱-۱/۵	۰/۸۰-۱/۰۵	کم
۲/۰۲-۲/۲۰	۱/۵۱-۱/۸۰	۱/۰۶-۱/۱۴	متوسط
۱/۸۱-۲	۱/۸۱-۲/۵۰	۱/۱۹-۱/۱۵	زیاد
۱/۵۰-۱/۸۰	۲/۵۱-۳	۱/۲۰-۱/۶۰	خیلی زیاد
کمتر از ۱/۵۰	بیشتر از ۳	بیشتر از ۱/۶۰	شدید

شکل ۴. حدود تغییرات شاخص‌های مؤثر بر میزان فرسایش کناره

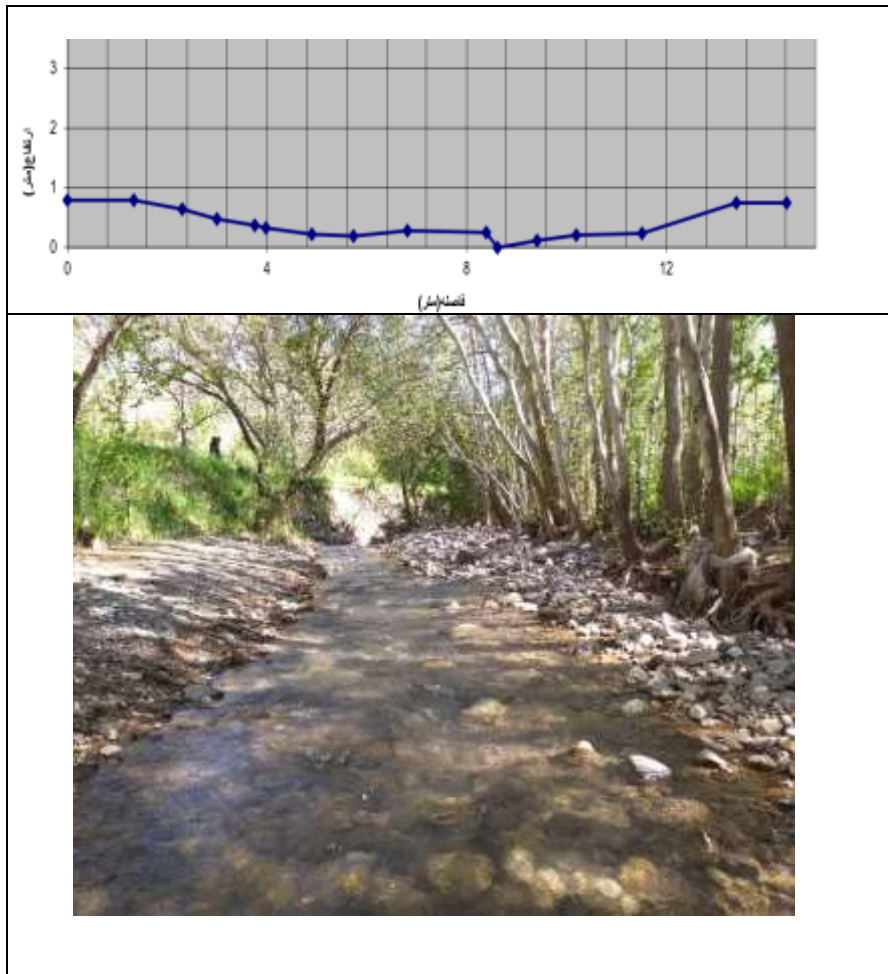
(راسگن، ۲۰۱۱: ۷۸)

Figure 4. Limits of changes in effective indicators in the rate of bank erosion (Rosgen, 2011: 78)

یافته‌های پژوهش



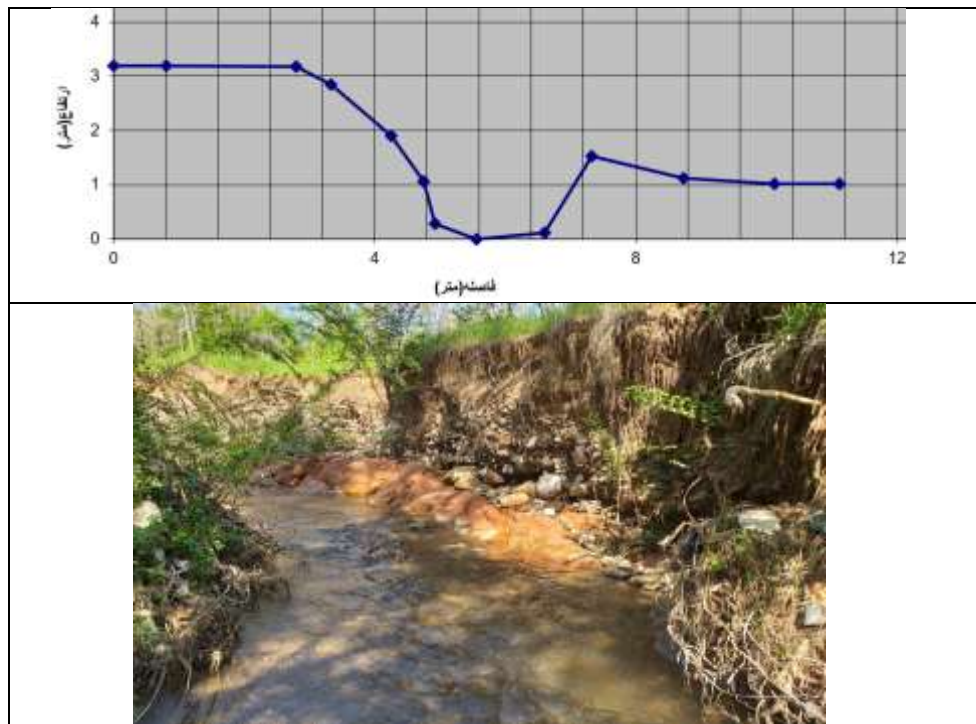
در این پژوهش به طور تقریبی ۱۱ کیلومتر از رودخانه هفت چشمه در محدوده روستای رزجرد تا روستای شینقر مطالعه شده است. میانگین ضریب خمیدگی این بازه ۱/۱۷ و نشان دهنده الگوی سینوسی است. برای به دست آوردن داده‌های مورد نیاز و با توجه به مورفولوژی، رودخانه هفت چشمه به ۴ بازه و ۱۰ مقطع تقسیم شد. مقطع ۱: اولین مقطع رودخانه هفت چشمه در بالادست این رودخانه قرار دارد و رسوبات آن بیشتر از ماسه تشکیل شده است؛ همچنین پوشش گیاهی باغ و درخت دارد. این مقطع پس از یک قوس بزرگ قرار گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع اول (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 5. Transverse profile and longitudinal direction image of the first cross section (Authors, 2019)

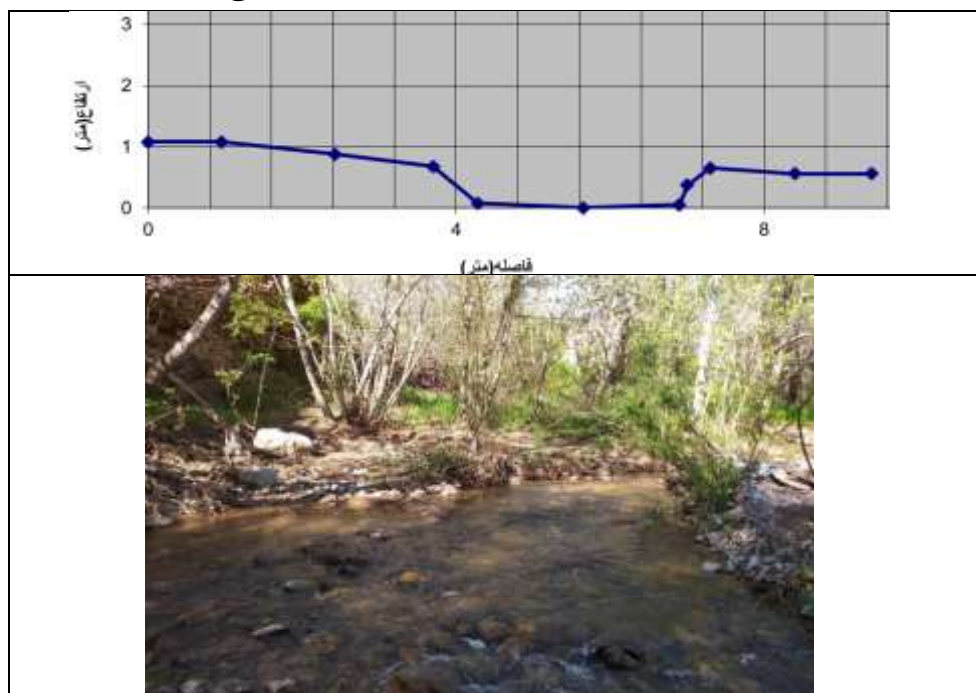
مقطع ۲: دومین مقطع ارزیابی شده نیز در بالادست رودخانه پس از یک قوس و در نزدیک روستای رزجرد قرار دارد. بیشترین رسوبات تشکیل دهنده این قسمت رودخانه ماسه درشت تا ریز است. در قسمت کرانه چپ مقطع، تخریب شدید دیواره وجود دارد که باعث شده است در قسمت‌هایی از آن سنگ بستر دیده شود. این مقطع پوشش گیاهی از نوع بوته و علف دارد (شکل ۶).



شکل ۶. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع دوم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 6. Transverse profile and longitudinal direction image of the second cross section (Authors, 2019)

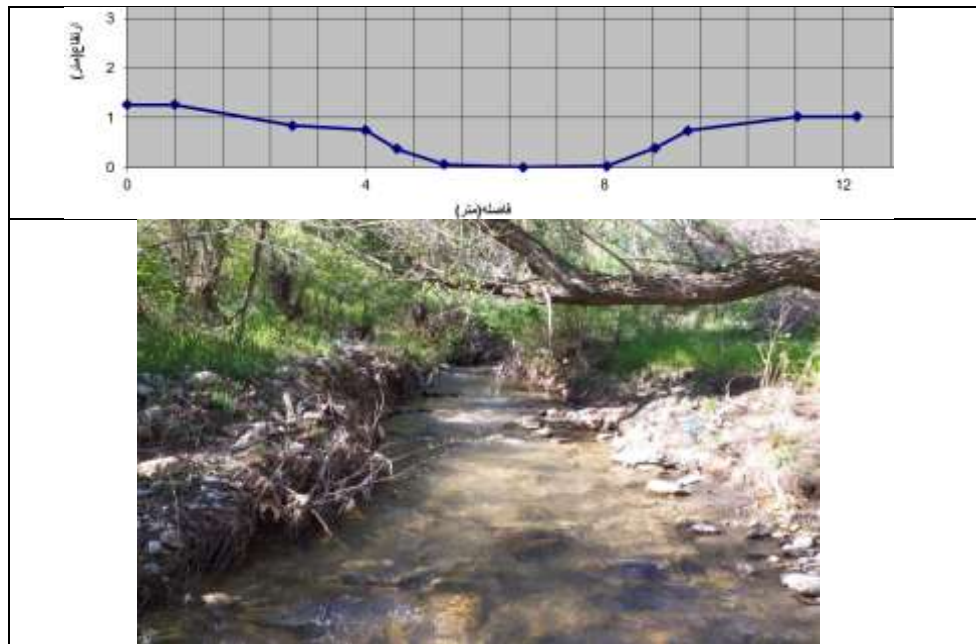
مقطع ۳: سومین مقطع در بازه اول و در حدفاصل باغ‌های رزجرد قرار دارد و ماسه‌های متوسط تا ریز رسوبات این قسمت رود را تشکیل می‌دهد و بستر رودخانه یک چالاب دارد. پوشش گیاهی این مقطع درختان پراکنده است (شکل ۷).



شکل ۷. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع سوم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 7. Transverse profile and longitudinal direction image of the third cross section (Authors, 2019)

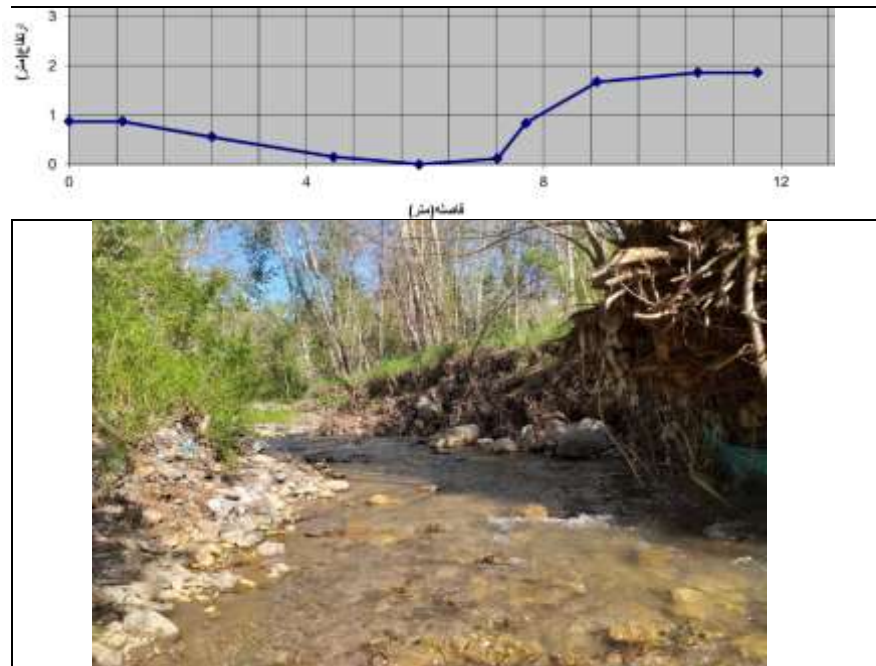
مقطع ۴: چهارمین مقطع نیز در بازه اول و در باغ‌های رزجرد قرار گرفته است و رسوبات این قسمت بیشتر از نوع ماسه درشت است. این قسمت پوشش گیاهی زیادی دارد که بیشتر از نوع بوته‌های تمشک و درخت است (شکل ۸).



شکل ۸. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع چهارم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 8. Transverse profile and longitudinal direction image of the fourth cross section (Authors, 2019)

مقطع ۵: مقطع پنجم در قسمت بالادست رودخانه و در باغ‌های رزجرد قرار گرفته است. رسوبات این مقطع بیشتر از نوع ماسه متوسط تا درشت است. پوشش گیاهی این مقطع، درخت است (شکل ۹).

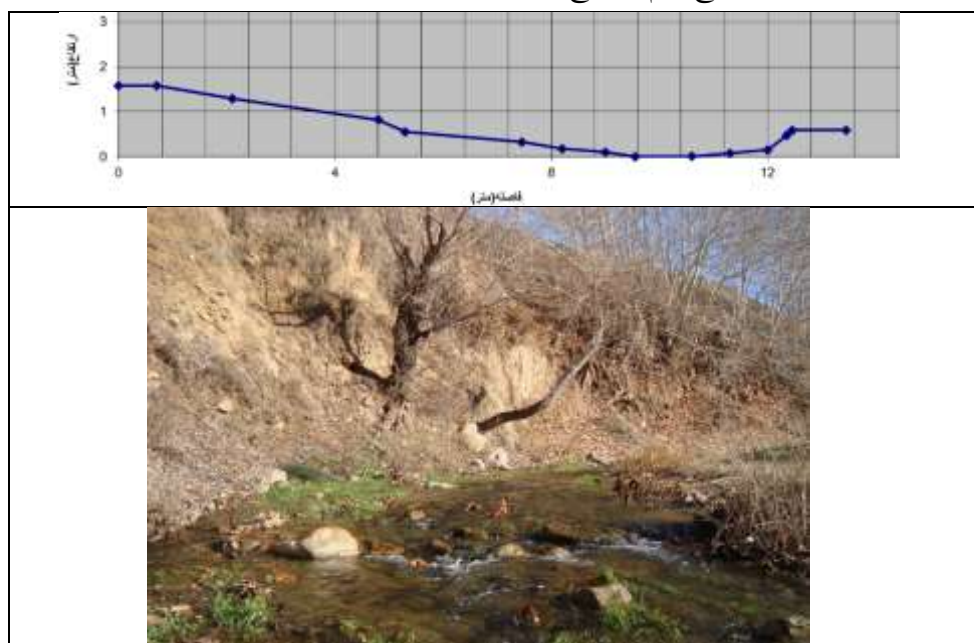


شکل ۹. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع پنجم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 9. Transverse profile and longitudinal direction image of the fifth cross section (Authors, 2019)



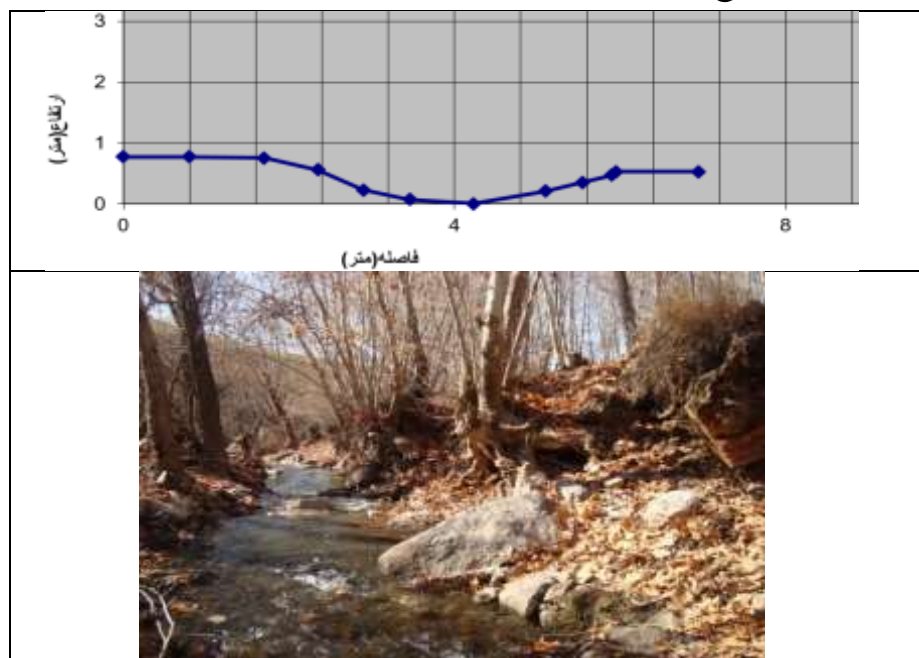
مقطع ۶: مقطع ششم در بازه اول قرار دارد که ماسه ریز تا متوسط بیشترین رسوبات این قسمت از رودخانه را تشکیل می‌دهد. پوشش گیاهی این مقطع، کم و مرتع است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع ششم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 10. Transverse profile and longitudinal direction image of the sixth cross section (Authors, 2019)

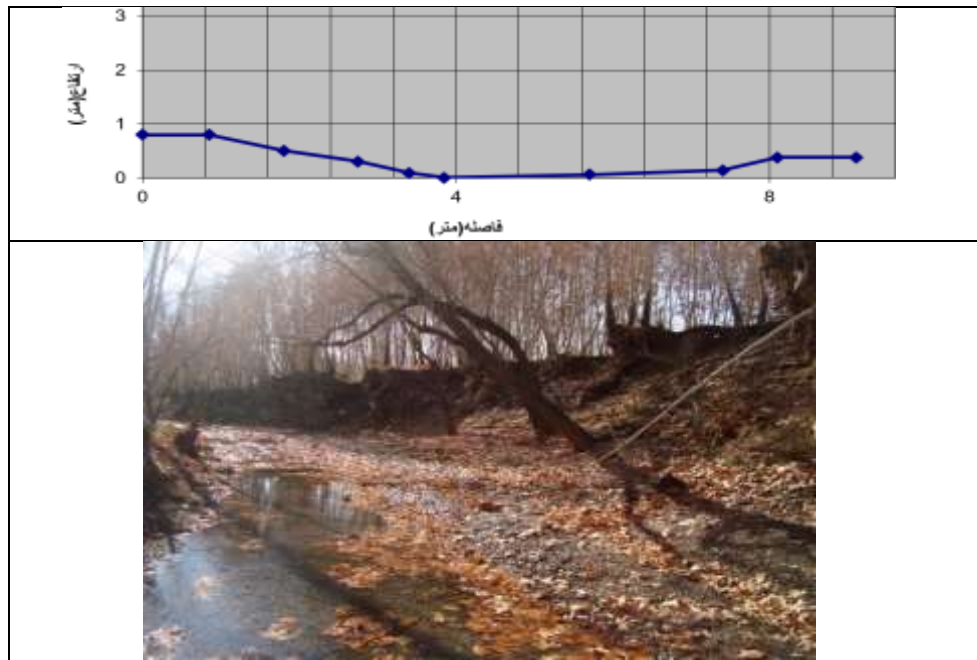
مقطع ۷: هفتمین مقطع در انتهای بازه اول قرار گرفته و رسوبات این قسمت بیشتر متشکل از ماسه درشت است. این مقطع پوشش گیاهی زیاد از نوع درخت دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع هفتم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 11. Transverse profile and longitudinal direction image of the seventh cross section (Authors, 2019)

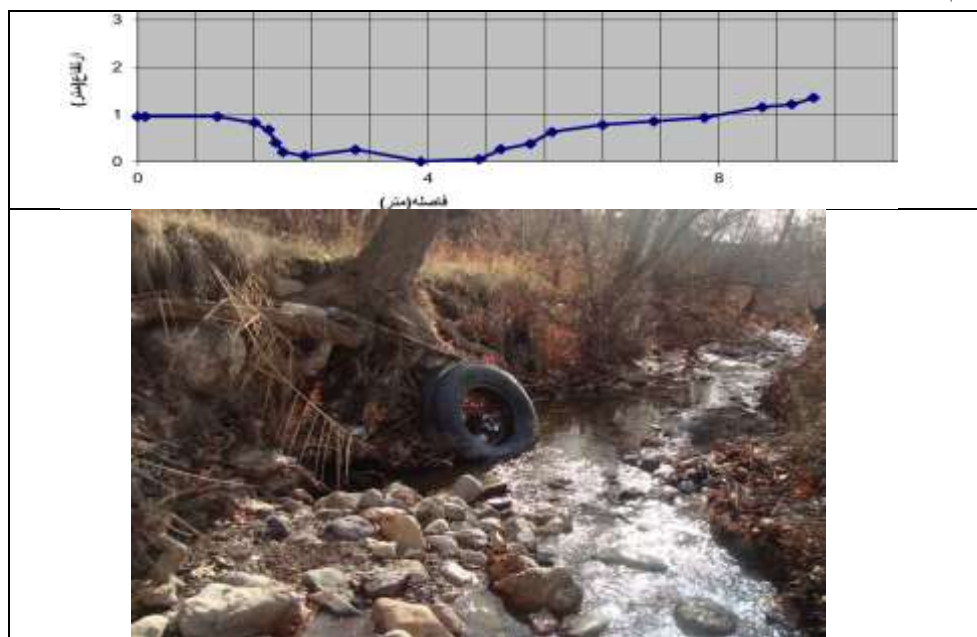
مقطع ۸: هشتمین مقطع در بازه دوم و در باغ‌های رشتقون قرار گرفته و ماسه‌های درشت بیشترین نوع رسوبات این قسمت است. پوشش گیاهی در این قسمت از نوع باغ است که درخت‌های فراوان دارد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع هشتم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 12. Transverse profile and longitudinal direction image of the eighth cross section (Authors, 2019)

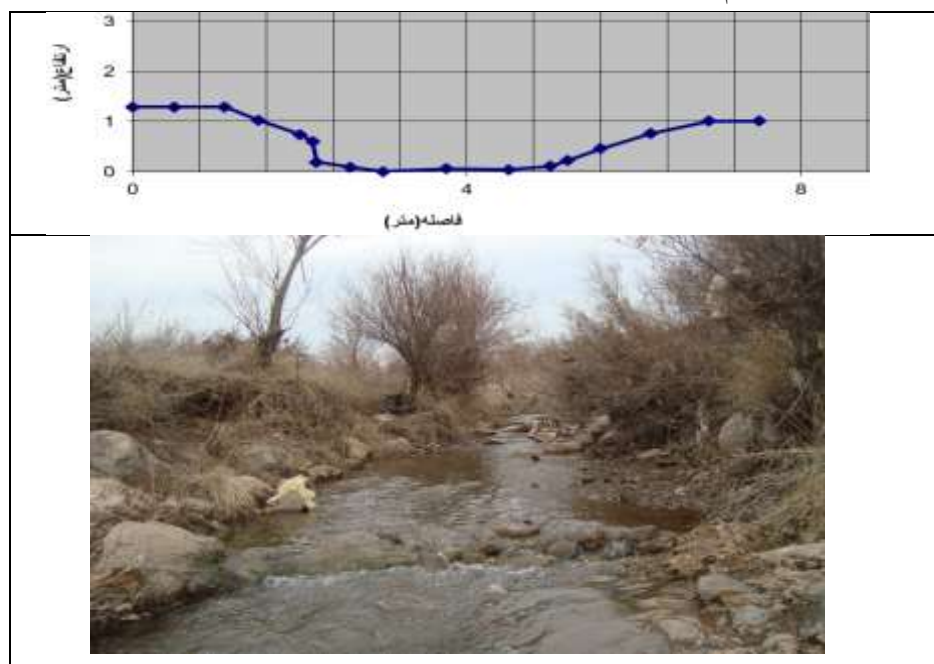
مقطع ۹: نهمین مقطع در بازه سوم قرار گرفته و رسوبات آن از نوع ماسه ریز تا متوسط است. این مقطع پوشش گیاهی بسیار کم و بوته‌های پراکنده دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع نهم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 13. Transverse profile and longitudinal direction image of the ninth cross section (Authors, 2019)

مقطع ۱۰: دهمین مقطع در بازه چهارم قرار دارد و ماسه ریز و خیلی ریز رسوبات این قسمت را تشکیل می‌دهد. این قسمت پوشش گیاهی بسیار کم و بوته‌های پراکنده دارد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. نیمرخ عرضی و تصویر راستای طولی مقطع دهم (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 14. Transverse profile and longitudinal direction image of the tenth cross section (Authors, 2019)

همان‌طور که اشاره شد، برای بررسی فرسایش کناره رودخانه هفت‌چشمه با استفاده از مدل تنش برشی نزدیک کناره، از سه روش نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی، نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به عمق دبی لبالی و نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالی استفاده شد. متغیرهای مؤثر در مدل‌سازی روش‌های یادشده به شرح شکل ۱۵ است و بخش اصلی برپایه برداشت‌های میدانی برای مقاطع مطالعه‌شده اندازه‌گیری و محاسبه شده است. در ادامه براساس داده‌های شکل ۱۵ و مدل فرسایش کناره، وضعیت ناپایداری و فرسایش‌پذیری برای ۱۰ مقطع در سه روش بیان‌شده محاسبه شد (شکل ۱۶).

شکل ۱۵. متغیرهای مؤثر بر میزان فرسایش‌پذیری کناره رودخانه هفت‌چشمه براساس مدل تنش نزدیک کناره

(نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 15. Effective variables in the erodibility of Haft Cheshmeh river bank based on the near-bank stress model (Authors, 2019)

مقطع عرضی	شعاع انحنا	شیب (درصد)	عرض دبی لبالی (متر)	عرض دشت سیلابی (متر)	متوسط عمق دبی لبالی (متر)	تنش برشی دبی لبالی	تنش برشی نزدیک کرانه (راست)	تنش برشی نزدیک کرانه (چپ)	حداکثر عمق نزدیک کرانه
۱	۵۷/۰۹	۰/۰۱	۴۷/۵۹	۹۵/۱۸	۸۴۷/۷۸	۱۳,۵۵	۷,۷۵	۱۲,۴۴	۰,۳۶
۲	۱۹/۹۳	۰/۰۲	۴۱۹/۲۰	۸۳۸	۲۰۱۷۱/۴	۷۸,۷۴	۷۳,۶۰	۴۲,۴۲	۰,۷۰
۳	۳۳/۴۶	۰/۰۱	۹۰/۴۴	۱۸۰	۲۹۹۴/۱	۲۸,۰۶	۱۴,۹۱	۱۱,۱	۰,۳۸
۴	۷۷/۱۰	۰/۰۱	۱۱۱/۸۲	۲۲۳	۲۵۸۷/۷۲	۲۷,۳۸	۲۴,۰۱	۲۱,۸	۰,۳۸

۰,۷۶	۳۷,۲۳	۴۲,۵۸	۴۴,۰۵	۶۳۲۹/۲۳	۷۸۶	۳۹۳/۳۲	۰/۰۲	۳۰/۵۸	۵
۰,۵۵	۶۵,۸۰	۳۵,۹۹	۶۶,۶۳	۱۰۶۱۹/۵۲	۱۴۲۲	۷۱۱/۵۰	۰/۰۲	۳۲/۳۲	۶
۰,۲۳	۳۵,۴	۲۲,۱	۳۸,۶۴	۳۸۳۴/۴۶	۱۷۲	۸۶/۸۲	۰/۰۳	۳۷/۰۵	۷
۰,۵۰	۸,۹	۷,۶	۹,۲۸	۵۳۵/۵۴	۷۸	۳۹/۰۹	۰/۰۳	۳/۵۱	۸
۰,۵	۶,۵۵	۶,۲۴	۷,۲۹	۲۱۶/۷۰	۴/۲۴	۲/۱۲	۰/۰۳	۱۰/۷۱	۹
۰,۶۰	۳۸,۰۸	۳۷,۴	۴۵,۹۴	۶۸۵۴/۱۹	۳۹۰	۱۹۵/۳۴	۰/۶۰	۷/۲۹	۱۰

شکل ۱۶. میزان فرسایش پذیری کناره رودخانه هفت چشمه براساس مدل تنش نزدیک کناره (نویسندگان، ۱۳۹۷)

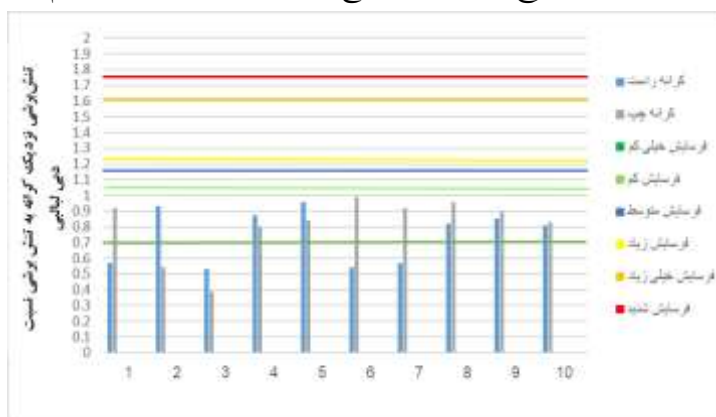
Figure 16. Erodibility rate of Haft Cheshmeh river bank based on the near-bank stress model (Authors, 2019)

نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالی				نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به عمق دبی لبالی				امتیاز NBS	نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی	مقطع عرضی
امتیاز NBS	کرانه چپ	امتیاز NBs	کرانه راست	امتیاز NBS	کرانه چپ	امتیاز NBS	کرانه راست			
کم	۰/۹۲	خیلی کم	۰/۵۷	متوسط	۱/۸	کم	۱	شدید	۱/۱۹	۱
خیلی کم	۰/۵۴	کم	۰/۹۳	کم	۱	کم	۱	شدید	۰/۰۴	۲
خیلی کم	۰/۳۹	خیلی کم	۰/۵۳	کم	۱	خیلی کم	۰/۷۶	شدید	۰/۳۶	۳
کم	۰/۸	کم	۰/۸۷	خیلی کم	۰/۹۵	کم	۱	شدید	۰/۶۸	۴
کم	۰/۸۴	کم	۰/۹۶	کم	۱/۰۸	کم	۱	شدید	۰/۰۷	۵
کم	۰/۹۹	خیلی کم	۰/۵۴	کم	۱/۱۷	کم	۱	شدید	۰/۰۴	۶
کم	۰/۹۲	خیلی کم	۰/۵۷	خیلی کم	۰/۴۳	خیلی کم	۰/۴۱	شدید	۰/۴۲	۷
کم	۰/۹۶	کم	۰/۸۲	کم	۱/۳۱	کم	۱	شدید	۰/۰۸	۸
کم	۰/۹	کم	۰/۸۵	زیاد	۲/۵	شدید	۴/۱	خیلی کم	۵/۰۵	۹
کم	۰/۸۳	کم	۰/۸۱	شدید	۸/۵	کم	۱/۲۷	شدید	۰/۰۳	۱۰

در مدل تنش برشی نزدیک کناره که سطح دوم، پنجم و ششم آن در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است، در سطح دوم که نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی است، تمامی مقاطع به استثنای مقطع ۹ فرسایش شدید دارند و فقط در مقطع ۹ فرسایش خیلی کم مشاهده شده است؛ در واقع شعاع انحنا نشان دهنده شعاع قوس های پیچان رودی رودخانه است که عدد به دست آمده نسبت به عرض رودخانه است و هرچه این نسبت کمتر باشد، فرسایش بیشتری در حاشیه رودخانه روی می دهد. پوشش گیاهی مقطع ۹ بیشتر از نوع بوته و این مقطع به صورت دشت سیلابی و با پادگانه های متفاوت و شیب متوسط است. در این مقطع بستر رودخانه بیشتر به صورت مستقیم است؛ بنابراین شعاع قوس پیچان رودی کمی را نسبت به مقاطع دیگر دارد که باعث کاهش فرسایش در این مقطع شده است (شکل ۱۷). در سطح پنجم که نسبت حداکثر عمق نزدیک کناره به عمق دبی لبالی است، هرچه حداکثر عمق نزدیک کناره به

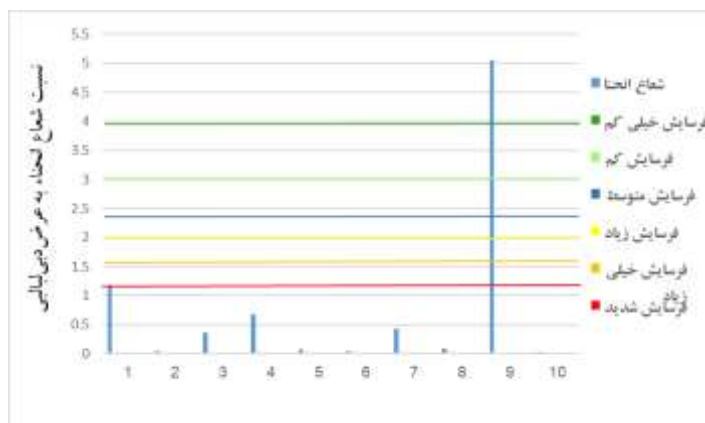
عمق دبی لبالبی کمتر باشد، از فرسایش جلوگیری می‌شود؛ بنابراین شاهد فرسایش کم و خیلی کم از مقاطع ۱ تا ۸ در دو سمت کرانه‌ایم و فقط مقاطع ۹ و ۱۰ فرسایش زیاد و شدید دارند؛ اگرچه حتی در کرانه راست مقطع ۱۰ نیز فرسایش کم است. نتایج نشان داد مقاطع ۹ و ۱۰ به دلیل عرض کم و عمق زیاد امتیاز بیشتری کم کرده‌اند. امتیاز زیاد بیان‌کننده افزایش فرسایش و ایجاد ناپایداری در این دو مقطع است؛ اگرچه در کرانه راست مقطع ۱۰ به دلیل وجود پوشش گیاهی بیشتر نسبت به کرانه چپ فرسایش کمتری مشاهده می‌شود (شکل ۱۸).

در سطح ششم که نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالبی است، فرسایش در تمامی مقاطع مقادیر کم و خیلی کم دارد. تنش برشی از حرکت آب به سمت پایین دست رود بر بستر کانال وارد می‌شود که هر زمان میزان این تنش کمتر باشد، به همان میزان نسبت فرسایش کناره کاهش می‌یابد؛ درواقع به دلیل اینکه توزیع انرژی در این رودخانه در منطقه نزدیک کناره به صورت متجانس وجود داشته و باعث شده است تغییرات تنش برشی نزدیک کناره سریع نباشد، در بررسی این سطح در تمامی مقاطع پایداری بیشتری را شاهدیم (شکل ۱۹).



شکل ۱۷. نمودار نسبت تنش برشی نزدیک کرانه به تنش برشی دبی لبالبی (نویسندگان، ۱۳۹۷)

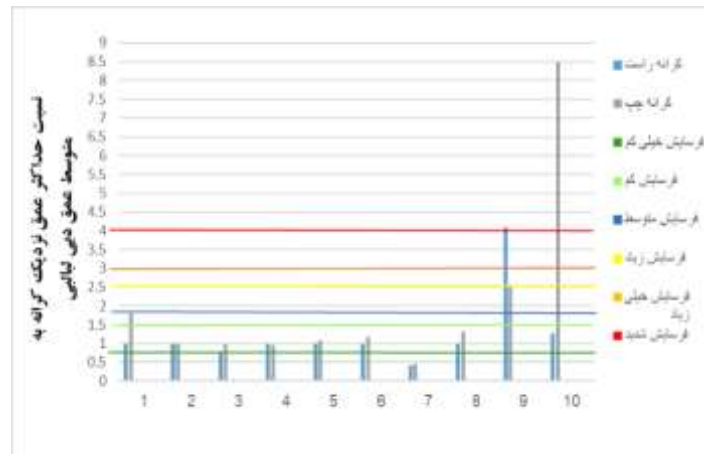
Figure 17. Diagram of the ratio of shear stress near bank to shear stress of bank full discharge (Authors, 2019)



شکل ۱۸. نمودار نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالبی (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 18. Graph of the ratio of the radius of curvature to the width of the bank full discharge (Authors, 2019)





شکل ۱۹. نمودار نسبت حداکثر عمق نزدیک کرانه به متوسط عمق دبی لبالی (نویسندگان، ۱۳۹۷)

Figure 19. Diagram of the ratio of maximum depth near bank to the average depth of bank full discharge (Authors, 2019)

### نتیجه گیری

فرسایش کناره‌ای در رودخانه‌ها هر ساله خسارات زیادی را به زمین‌های کشاورزی، سازه‌های کنار رودخانه و... وارد می‌کند و باعث انتقال مقادیر زیادی رسوب به مخازن سدها می‌شود؛ از این رو در این پژوهش وضعیت فرسایش کناره‌ای مناطق آسیب پذیر و دارای مخاطره و عوامل ایجاد و تشدید فرسایش را در حاشیه کناره‌ای رودخانه هفت چشمه قزوین بررسی کردیم. نتایج به دست آمده با استفاده از سه سطح مدل تنش برشی نزدیک کناره نشان داد در روش نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی، تمامی مقاطع به جز مقطع ۹ فرسایش شدید همراه با ناپایداری کرانه دارند. مقطع ۹ به دلیل داشتن الگوی مستقیم و ضریب پیچان رودی کم، فرسایش کمتری داشته است و بقیه مقاطع فرسایش شدید دارند؛ به جز مقطع ۹ در دو کناره و مقطع ۱۰ در کرانه چپ که فرسایش زیاد و شدید داشته‌اند و علت آن، پوشش گیاهی کم و رسوبات ریزدانه در این مقاطع نسبت به سایر مقاطع است. در نسبت تنش برشی نزدیک کناره به تنش برشی دبی لبالی به دلیل توزیع انرژی متجانس این رودخانه در منطقه نزدیک کناره و سریع نبودن تغییرات تنش برشی نزدیک کناره، تمامی مقاطع فرسایش خیلی کم و کم داشته‌اند. در مقاطع ۱، ۲، ۴ و ۷ قوس‌هایی در کنار مقاطع، و در اطراف مقاطع ۳ و ۵ زمین‌های کشاورزی مشاهده شده است و مقطع ۶ و ۸ بافت انسانی داشته‌اند؛ همچنین مقاطع ۹ و ۱۰ ارتفاع کرانه زیاد دارند که باعث فرسایش زیاد در مقاطع می‌شود؛ در نهایت بازدیدهای میدانی و برداشت میدانی و همچنین بررسی نتایج به دست آمده داده‌ها در سه سطح مدل NBS این نتیجه را در برداشت که سطح اول، که اندازه‌گیری فرسایش با توجه به نسبت شعاع انحنا به عرض دبی لبالی است، با ویژگی‌های منطقه تناسب بیشتری دارد و با واقعیت منطقه منطبق است.

## منابع

- جلیلوند، رضا، حافظی مقدس، ناصر، سلوکی، حمیدرضا، (۱۳۹۳). *مروری بر روش‌های مختلف طبقه‌بندی رودخانه‌ها و کاربرد آنها برای رودخانه سیستان*. همایش یافته‌های نوین در محیط‌زیست و اکوسیستم‌های کشاورزی، تهران.
- حبیبی، مهدی، حقی‌آبی، امیرحمزه، (۱۳۸۱). *بررسی آزمایشگاهی آستانه ایجاد کانال‌های پیمان‌رودی*، نشریه پژوهش و سازندگی، دوره ۱۵، شماره ۳-۴، ۵۵-۴۸.
- حسین‌زاده، محمدمهدی، اسماعیلی، رضا، (۱۳۹۴). *ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مفاهیم، اشکال و فرایندها*، چاپ اول، تهران، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- حسین‌زاده، محمدمهدی، خالقی، سمیه، رستمی، میلاد، (۱۳۹۶). *مقایسه روش‌های برآورد خطر فرسایش کرانه‌ای با استفاده از مدل NBS؛ مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه*، مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۶، شماره ۱۴، ۱۵۲-۱۴۱.
- خالقی، سمیه، ملکانی، لیلا، (۱۳۹۳). *برآورد فرسایش کرانه رودخانه ليقوان چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن*، شماره ۴۸، ۶۰۵-۵۸۹.
- رضایی مقدم، محمدحسین، پیروزی‌نژاد، نوشین، (۱۳۹۳). *بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹*، نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۸، شماره ۴۷، ۱۳۲-۱۰۹.
- یمانی، مجتبی، شرفی، سیامک، (۱۳۹۱). *ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان*، مجله پژوهش‌های علوم انسانی دانشگاه اصفهان، دوره ۲۳، شماره ۱، ۳۲-۱۵.
- Akhtar, M.P., Nayan, S.H., Ojha, C., (2011). **Braiding process and bank erosion in the Brahmaputra River**, International Journal of Sediment Research, Vol 26: 431-444
- Bandyopadhyay, S., Ghosh, I., kumar, D., (2014). **A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the river haora, tripura, india**, Vol 16: 111-121.
- Gopal Ghosh, K., Pal, S., Mukhopadhyay, S., (2016). **Validation of BANCS model for assessing stream bank erosion hazard potential (SBEHP) in Bakreshwar river of Rarh region, Eastern India**, Modeling Earth Systems and Environment, Vol 95 (2): 1-15
- Islam, M., (2000). **RIVER BANK EROSION AND SUSTAINABLE PROTECTION STRATEGIES**, Fourth International Conference on Scour and Erosion 2000.
- Kwan, H., Swanson, S.H., (2014). **Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California**, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, Vol 50 (6): 112-114.
- Lawlor, S.M., (2004). **Determination of Channel-Morphology Characteristics, Bankfull Discharge, and Various Design-Peak Discharges in Western Montana**, Scientific Investigations Report 2004, Vol 52: 1-19.
- Rosgen, D.L., (2001). **A PRACTICAL METHOD OF COMPUTING STREAMBANK EROSION RATE**, Modeling Earth Systems and Environment, Vol 95 (2): 1-15.
- Rosgen, D.L., (2011). **Watershed assessment of river stability and sediment supply (WARSSS)**, Wildland Hydrology, Fort Collins, Colorado, Vol 32: 69-93.
- Simon, A., Bankhead, N., Thomas, R., (2010). **Iterative Bank-Stability and Toe-Erosion modeling for predicting streambank loading rates and potential load reductions**, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1.