

## Research Paper



## Estimation of river bank erosion and effective factors in Polealmas-Gilande reach, Balkhlochai River in Ardabil



Abazar Esmali Ouri<sup>1\*</sup>, Arezoo Eshaghzadeh<sup>2</sup>, Shokrollah Asghari<sup>3</sup>, Raof Mostafazadeh<sup>4</sup>



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2024.61311.1735

**Reference to this article:** Esmali Ouri, Abazar; Eshaghzadeh, Arezoo; Asghari, Shokrollah; Mostafazadeh, Raof. (2024). Estimation of river bank erosion and effective factors in Polealmas-Gilande reach, Balkhlochai River in Ardabil. *Hydrogeomorphology*, 11(40): 87 – 101.

### Keywords

**River morphology,  
River bank erosion,  
Multivariate regression,  
Balikhlouchai River,  
Ardabil province**

Receive Date: 2024/04/22

Accept Date: 2024/07/12

Available: 2024/10/21

### ABSTRACT

Determining the extent of riverbank erosion and displaying it as a map in a GIS environment is effective in the optimal management of water and soil resources. The aim of the current research is to delineate the riverbank erosion zone from aerial photographs, perform regression modeling, and identify factors influencing the development of riverbank erosion using various spatial data including physiographic, hydrological, geological, and environmental data in different sections of the Balikhlouchai River in Ardabil Province. Initially, influential parameters in riverbank erosion in the region, including topographic, soil and land factors, hydrology, and land use changes, were calculated. Accordingly, the variables under study were obtained for four time periods: 1955 using aerial photographs, 1980 using TM satellite images, and years 2010 and 2013 using Google Earth images, and the effective extent of riverbank erosion was compared. Subsequently, multivariate regression analysis was performed using independent variables (including topographic, hydrological, soil erodibility, and land factors) and the effective extent of riverbank erosion as the dependent variable, using SPSS software, and suitable models were developed to estimate the amount of different riverbank erosion. Based on the results of regression analysis, environmental parameters such as slope of the river reaches, peak discharge, area under irrigated agriculture, concentration time, pasture coverage, and residential areas played a more significant role in exacerbating riverbank erosion.

\* Corresponding Author: Abazar Esmali Ouri

E-mail: [esmaliouri@uma.ac.ir](mailto:esmaliouri@uma.ac.ir)

1. Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. M.Sc in Watershed Management Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture and natural Resources University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran ([arezoo.eshaghzadeh@gmail.com](mailto:arezoo.eshaghzadeh@gmail.com))

3. Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture and natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran ([shasghari@uma.ac.ir](mailto:shasghari@uma.ac.ir))

4. Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran ([raoofmostafazadeh@uma.ac.ir](mailto:raoofmostafazadeh@uma.ac.ir))

## Extended Abstract

### Introduction

Determining the extent of riverbank erosion and displaying it as a map in a GIS environment is effective in the optimal management of water and soil resources. The aim of the current research is to delineate the riverbank erosion zone from aerial photographs, perform regression modeling, and identify factors influencing the development of riverbank erosion using various spatial data including physiographic, hydrological, geological, and environmental data in different sections of the Balikhouchai River in Ardabil Province.

### Methodology

Initially, influential parameters in riverbank erosion in the region, including topographic, soil and land factors, hydrology, and land use changes, were calculated. Accordingly, the variables under study were obtained for four time periods: 1955 using aerial photographs, 1980 using TM satellite images, and years 2010 and 2013 using Google Earth images, and the effective extent of riverbank erosion was compared. Subsequently, multivariate regression analysis was performed using independent variables (including topographic, hydrological, soil erodibility, and land factors) and the effective extent of riverbank erosion as the dependent variable, using SPSS software, and suitable models were developed to estimate the amount of different riverbank erosion.

### Results and Discussion

Based on the results of regression analysis, environmental parameters such as slope of the river reaches, peak discharge, area under irrigated agriculture, concentration time, pasture coverage, and residential areas played a more significant role in exacerbating riverbank erosion. Based on regression analysis, the most influential factors in riverbank erosion occurrence in the study intervals can be prioritized as follows. In the physiographic category, the slope interval and the area of the upstream area are among the important factors identified. It is noteworthy that in the hydrological variables approach, none of the variables showed a significant relationship with riverbank erosion values. Among the land factors, the variable of residential area extent was introduced as an important variable. Overall, considering all variables in the modeling process, the two environmental factors of slope interval and peak discharge have the greatest impact on the amount of riverbank erosion. The use of these relationships enables estimation of riverbank erosion in the study area based on available data.

### Conclusions

In the current study, the extent of riverbank erosion was determined from aerial photographs, followed by the identification of factors influencing the development of riverbank erosion. Subsequently, attempts were made to model riverbank erosion using various spatial data including physiographic, hydrological, geological, and environmental data. According to the results of regression equations, it was revealed that among the physiographic factors, variables such as slope interval and the extent of the upstream area are the most influential factors in the occurrence and exacerbation of riverbank erosion in the study intervals. It is worth noting that none of the variables related to hydrology showed a significant relationship with riverbank erosion values. Therefore, it can be concluded that hydrological factors alone are not effective in the changes of riverbank erosion in the Balfeluchay River area, and simultaneously, other environmental factors also play a role in exacerbating erosion. The examination of the status of riverbank erosion morphology and changes in influential variables indicates an increase in the area affected by riverbank erosion in the study area. This is while changes in factors such as effective riverbank erosion area, drainage density, average discharge, riverbank coverage, and the percentage of different land uses vary in different periods.

### References

- Das, T. K., Haldar, S. K., Gupta, I. D., & Sen, S. (2014). River bank erosion induced human displacement and its consequences. *Living Reviews in Landscape Research*, 8(3), 1-35.
- Ghosh, D., & Saha, S. (2024). Identifying river bank erosion potential zones through geo-spatial and binary logistic regression modeling approach: a case study of river Ganga in Malda district (India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1), 81-98.
- Henshaw, A. J., Thorne, C. R., & Clifford, N. J. (2013). Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena*, 100, 107-119.
- Spiekermann, R., Betts, H., Dymond, J., & Basher, L. (2017). Volumetric measurement of river bank erosion from sequential historical aerial photography. *Geomorphology*, 296, 193-208.

## مقاله پژوهشی



## برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای و تعیین عوامل موثر در بازه پل الماس-گیلانده رودخانه بالخلوچای اردبیل



اباذر اسمعلی عوری<sup>۱\*</sup>، آرزو اسحق‌زاده<sup>۲</sup>، شکراله اصغری<sup>۳</sup>، رئوف مصطفی‌زاده<sup>۴</sup>



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت‌یو کامانز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: اسمعلی عوری، اباذر؛ اسحق‌زاده، آرزو؛ اصغری، شکراله؛ مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۴۰۳). برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای و تعیین عوامل موثر در بازه پل الماس-گیلانده رودخانه بالخلوچای اردبیل. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱ (۴۰): 87-101.

DOI:10.22034/hyd.2024.61311.1735



## چکیده

تعیین وسعت فرسایش کناره رودخانه‌ای خاک و نمایش آن به صورت نقشه در محیط GIS، در مدیریت بهینه از منابع آب و خاک موثر است. هدف تحقیق حاضر تعیین محدوده فرسایش رودخانه‌ای از روی عکس‌های هوایی، مدل‌سازی رگرسیونی و تعیین عوامل موثر بر توسعه فرسایش کنار رودخانه‌ای با استفاده از داده‌های مکانی مختلف فیزیوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و محیطی در بازه‌هایی از رودخانه بالخلوچای در استان اردبیل است. ابتدا پارامترهای موثر در ایجاد فرسایش کنار رودخانه‌ای موجود در منطقه شامل عوامل توپوگرافی، خاک و زمین، هیدرولوژی، تغییرات کاربری محاسبه شدند. در این راستا، متغیرهای مورد مطالعه در چهار مقطع زمانی ۱۳۳۴ با استفاده از عکس‌های هوایی، سال ۱۳۵۹ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای TM، سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ با تصاویر Google Earth تهیه شد و سطح موثر فرسایش رودخانه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. سپس با استفاده از متغیرهای مستقل (شامل عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، فرسایش پذیری خاک و عوامل زمینی) و سطح موثر فرسایش رودخانه‌ای به‌عنوان متغیر وابسته، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS انجام و مدل‌های مناسب برآورد مقدار فرسایش کنار رودخانه‌ای مختلف به‌دست آمدند. بر اساس نتایج تحلیل رگرسیونی، پارامترهای محیط بازه، دبی اوج، مساحت تحت کشت زراعت آبی، زمان تمرکز، پوشش مرتع و مناطق مسکونی نقش مهم‌تری در تشدید فرسایش کنار رودخانه‌ای داشته‌اند.

## کلیدواژه‌ها

مورفولوژی رودخانه، فرسایش کناری رودخانه، رگرسیون چندمتغیره، حوضه بالخلوچای، استان اردبیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

\* نویسنده مسئول: اباذر اسمعلی عوری

رایانامه: [esmaliouri@uma.ac.ir](mailto:esmaliouri@uma.ac.ir)

۱- استاد گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران ([arezoo.eshaghzadeh@gmail.com](mailto:arezoo.eshaghzadeh@gmail.com))

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران ([shaghari@uma.ac.ir](mailto:shaghari@uma.ac.ir))

۳- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران ([raoofmostafazadeh@uma.ac.ir](mailto:raoofmostafazadeh@uma.ac.ir))

تامین آب شرب و کشاورزی از اصلی‌ترین نیازهای بشر است که از رودخانه‌ها تامین می‌شود. در حاشیه بعضی رودخانه‌ها فرسایش کنار رودخانه‌ای سالانه مساحت بسیاری از اراضی زیرکشت را از بین می‌برد (داس و همکاران، ۲۰۱۴: ۲). یکی از مهم‌ترین اشکال فرسایش خاک، فرسایش کنار رودخانه‌ای است که سالانه بخش قابل توجهی از اراضی مجاور را کاهش می‌دهد (مالیک و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۰۰۷۵). رودخانه‌ها و آبراهه‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و یا دخالت‌های انسان دچار فرسایش بستر، فرسایش کناره‌ها و جابه‌جایی عرضی و تغییر مورفولوژی می‌شوند (مصطفی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳: ۹۸). فرسایش کناره رودخانه‌ها عامل ناپایداری، جابه‌جایی و انتقال ذرات یا توده‌های خاک کناره است (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۲۰۱۵: ۳؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۲۱). اگرچه فرسایش در رودخانه‌ها به‌صورت فرسایش بستر و کناره‌ها توأم دیده می‌شود، ولی رخداد فرسایش در کناره‌ها به‌صورت عمومی‌تر موجب بروز مشکلات بیش‌تری نسبت به فرسایش کف می‌شود (رولند و همکاران، ۲۰۲۳). فرسایش کنار رودخانه‌ای، موجب ایجاد مشکلات فراوانی در حاشیه رودخانه‌های آبرفتی می‌شود. تعریض بستر رودخانه‌ها، تخریب اراضی کشاورزی، تخریب راه‌های مجاور ساحل رودخانه‌ها، افزایش شدید غلظت رسوب و آلودگی آب رودخانه و تهدید پایداری سازه‌های احداث شده، بخشی از مشکلات ناشی از فرسایش کنار رودخانه‌ای است (احمد و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۳۲؛ کوتالاکیس و همکاران، ۲۰۲۴: ۲۳۲). فرسایش کنار رودخانه‌ای در اثر عواملی مانند برداشت شن و ماسه، سرعت زیاد جریان، تر و خشک شدن متناوب خاک دیواره‌ها، انجماد و ذوب متناوب و تخریب و افزایش حساسیت خاک دیواره‌ها، انتقال و برخورد تنه درختان، ریشه‌ها و سایر اجسام با دیواره‌ها و تغییر جریان به سمت دیواره‌ها، و رواناب تولیدی از زمین‌های اطراف و آبشستگی تشدید می‌شوند (اصغری سراسکانرود، ۲۰۱۵: ۲؛ کوپر، ۲۰۰۴: ۳۸۸). فرسایش کنار رودخانه‌ای وسعت زمین‌های اطراف رودخانه را کاهش می‌دهد، به جاده‌های مجاور رودخانه خسارت وارد می‌سازد و با تولید مواد معلق سبب پر شدن مخازن می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۶۶). فرسایش کنار رودخانه‌ای رودخانه‌های کشور، هر ساله زیان‌های جبران‌ناپذیری را وارد می‌کند و عموماً به‌صورت‌های گوناگون و با شدت و ضعف متفاوتی در رودخانه‌های آبرفتی به‌طور طبیعی دیده می‌شود. در هنگام وقوع سیلاب و پربابی رودخانه تغییرات سریع‌تری در مقطع رودخانه و کناره‌ها رخ خواهد داد ولی دخالت‌ها و اقداماتی که بشر در حاشیه و بستر رودخانه‌ها انجام می‌دهد، در بسیاری مواقع موجب تشدید روند فرسایش و منشأ بسیاری از خسارت‌های قابل توجه شده است (کیم و همکاران، ۲۰۲۳: ۵۵۴). دلایل عمده تخریب سواحل و دیواره‌های رودخانه را می‌توان شسته شدن ذرات خاک در اثر جریان و امواج، شسته شدن پاشنه شیب سواحل و ریزش و گسیختگی داخلی آن، افزایش شیب سواحل در اثر فرسایش و آب شستگی، افزایش فشار آب منفذی در حالت کاملاً اشباع، گسیختگی درونی شیب به علت نشست آب به سمت رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زه‌آبهای کشاورزی و عوامل متعدد دیگر برشمرد (گوش و ساها، ۲۰۲۴: ۸۲). رسوبات ناشی از فرسایش حوضه‌های آبریز معمولاً پس از بارندگی‌ها به رودخانه رسیده و با رسوبات ناشی از فرسایش دیواره بستر رودخانه همراه می‌شوند (لفرانکوئیس و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۹۲۴). این رسوبات تاسیسات آبی در مسیر رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار داده و عمر مفید مخازن را کاهش می‌دهند. در ایران همه ساله پهنه‌های وسیعی از اراضی مرغوب و حاصل‌خیز سواحل رودخانه و مسیل‌ها بر اثر عبور جریان‌های سیلابی فرسایش یافته و تخریب می‌شوند (شریفی و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۱۴۱). بنابراین به‌منظور ساماندهی و مدیریت رودخانه‌ها و کنترل فرسایش لازم است که ضمن شناخت و پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی جریان، نواحی مستعد فرسایش کنار رودخانه‌ای شناسایی شده و اقدامات لازم جهت کنترل و احیای آن‌ها به عمل آید (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۲۰؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۴۷).

1 -Das et al

2 -Mallick et al

3 -Rowland et al

4 -Ahmad et al

5 -Koutalakis et al

6 -Couper

7 -Kim et al

8 -Ghosh and Sah

9 -Lefrançois et al

10 -Wang et al

فرسایش کنار رودخانه‌ای معمولاً در دیواره نهرها و رودخانه‌ها در اثر نیروی برشی آب بوجود می‌آید (جولین و تورس، ۲۰۰۶: ۱۹۴). فرسایش در امتداد کناره‌ها و بستر نهرهای دائمی همواره فعال است در حالی که فرسایش‌های دیگر فقط در حین بارندگی و یا کمی پس از شروع آن فعال هستند. کنترل این نوع فرسایش باعث حفظ اراضی کشاورزی حاشیه‌ای جاده‌ها، پل‌ها و حفظ کیفیت آب می‌شود (بویان و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۸۴). به‌طور کلی فرسایش کناره‌ای ناشی از جنس تشکیلات زمین‌شناسی دیواره و کف رودخانه، حساسیت خاک، شیب رودخانه، سرعت آب و سایر خصوصیات هیدرولیکی جریان آب و همچنین فعالیت‌های انسان است (هنشو و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰۸). از آنجا که فرسایش رودخانه‌ای مختص مناطق تحت تأثیر رودخانه‌ها است، بنابراین مکان‌یابی و مطالعه عوامل موثر بر وضعیت فرسایشی آن‌ها ضروری است که استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای مطالعه آن را تسهیل می‌کند (مظفری و همکاران، ۲۰۲۲: ۵۸؛ اسپیکرمن و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۹۴).

پژوهش‌های متعددی در خصوص ارزیابی فرسایش کناری رودخانه انجام شده است، به‌عنوان مثال، کومو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۸: ۱۰۰) با هدف آشکارسازی تغییرات کناری رودخانه میکونگ با استفاده از سنجش از دور، میزان متوسط فرسایش کنار رودخانه‌ای در دو دوره ۱۹۹۲-۱۹۹۱ و ۲۰۰۵-۱۹۹۲ را به ترتیب ۰/۸ و ۱ متر برسال و میزان انباشت را ۰/۴ و ۰/۷ متر برسال برآورد کردند. شارما و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۰: ۲۱۱) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به بررسی خطر فرسایش کنار رودخانه‌ای در حوضه رودخانه براهماپوترا پرداختند و بر کاهش اکوسیستم‌های حاشیه رودخانه و اراضی کشاورزی و آلودگی آب تأکید کردند و همچنین رفتار هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رودخانه ممکن است بی‌ثباتی رودخانه را تشدید کند. یمانی و شرفی (۲۰۱۲: ۱۵) در مطالعه ژئومورفولوژی و عوامل موثر در فرسایش کنار رودخانه‌ای هررود دریافتند که ساختمان زمین‌شناسی و لیتولوژی بستر و کناره رودخانه، مهم‌ترین عوامل تغییر پایداری بستر رودخانه به شمار می‌روند. ناث و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۳: ۴۵۴) به تجزیه و تحلیل روند فرسایش کنار رودخانه‌ای در سنگاپور بنگلادش با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور پرداختند و با ترسیم تغییرات تاریخی ساحل رودخانه نشان دادند که نرخ فرسایش در سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۰۲ بیش‌تر بوده است. رضایی مقدم و همکاران (۲۰۱۳: ۱) با ارزیابی تغییرات کناری مناطق خطر رودخانه آجی‌چای از طریق ویژگی‌های ژئومورفولوژیک، مناطق کناری حاشیه رودخانه را از نظر خطر فرسایش به سه بخش آسیب‌پذیر، بحرانی و بسیار بحرانی طبقه‌بندی کردند. حسین‌زاده و همکاران (۲۰۱۹: ۲۶۵) با هدف برآورد میزان فرسایش کناری رودخانه با استفاده از مدل پایداری کناره و فرسایش پای کرانه در رودخانه لایچ بر اساس نتایج شبیه‌سازی رودخانه با استفاده از مدل BSTEM در دبی‌های مقطع پر و حداکثر لحظه‌ای دریافتند که فاکتور امنیت کرانه در هر دو مورد کمتر از ۱ است که نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش کناری، ناپایداری و سقوط کرانه در همه جریان‌های سیلابی است که برابر دبی مقطع پر و حداکثر لحظه‌ای باشند. محمدزاده و همکاران (۲۰۲۳: ۱۸۹۰) با هدف کمی‌نمودن فرسایش کناری رودخانه آمو در افغانستان دریافتند که متوسط فرسایش کناری در سال ۵/۴ کیلومتر مربع در سال بوده است و یک رابطه خطی بین محدوده فرسایش کناری با شدت دبی و توان جریان رودخانه به‌دست آمد. حسن‌الزمان و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۲۳: ۱۱۶۳) با ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه گنگ در هندوستان دریافتند که مدل‌سازی فرسایش و تشدید آن می‌تواند تصمیم‌گیران را در مدیریت مکانی و درک روندهای آتی مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای برای مدیریت بهتر کاربری زمین و استراتژی‌های محافظت از سواحل رودخانه کمک کند. بوت‌ا و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۲۴: ۲۰۴۱) با هدف مدل‌سازی هیدرودینامیکی دوبعدی به‌منظور پیش‌بینی فرسایش کنار رودخانه‌ای در رودخانه سند به شواهدی از مداخلات انسانی و جنبه‌های هیدرودینامیکی در وقوع دوره‌های سیلابی ای سیلاب دست یافتند و فرسایش کناری را با دقت بالا و ضریب تبیین معادل ۰/۸۳ با تلفیق عواملی مانند ضریب فرسایش‌پذیری و تکنیک تنش برشی محاسبه نمودند. نتایج مطالعه ایشان در کمک به اجرای اقدامات حفاظتی رودخانه به‌عنوان چارچوبی برای سایر رودخانه‌های مشابه پیشنهاد شد. هم‌چنین، هوانگ<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۴) با هدف برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای از ترکیب مدل‌های مورفولوژیکی کانال با

1 -Julian and Torres  
2 -Bhuiyan et al  
3 -Henshaw et al  
4 -Spiekermann et al  
5 -Kummu et al

6 -Sharma et al  
7 -Nath et al  
8 -Hasanuzzaman et al  
9 -Boota et al  
10 -Huang

تکنیک‌های هوش مصنوعی استفاده نمود و نتیجه گرفتند که تلفیق و استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و ویژگی‌های خاک می‌تواند به تغییرات هندسه کانال، جابجایی عمودی بستر رودخانه، جابجایی افقی ساحل رودخانه، و عرض کانال را با دقت مناسبی (ضریب تبیین برابر ۰/۹۶۳) پیش‌بینی نماید. بررسی فرسایش کنار رودخانه‌ای به منظور جلوگیری از کاهش ظرفیت رودخانه و اصلاح و بهبود مسیر و هندسه مقطع رودخانه و کاهش تراز سیل و جلوگیری از ورود خاک‌های آلوده اراضی اطراف به محیط آبی رودخانه و مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها ضروری است. حوضه آبخیز بالخلوچای در استان اردبیل یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز قره‌سو است که در نهایت به رودخانه ارس می‌ریزد. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک منطقه، تنوع کاربری‌های اراضی و عوامل موثر بر فرسایش کنار رودخانه‌ای و نیز اهمیت رودخانه بالخلوچای از نظر تامین آب شرب و نیز احتمال ایجاد خسارت به تاسیسات و دارایی‌های اطراف رودخانه برای این پژوهش انتخاب شده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر تعیین محدوده فرسایش رودخانه‌ای از روی عکس‌های هوایی، مدل‌سازی رگرسیونی و تعیین عوامل موثر بر توسعه فرسایش کنار رودخانه‌ای با استفاده از داده‌های مکانی مختلف فیزیوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و محیطی است.

## مواد و روش پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

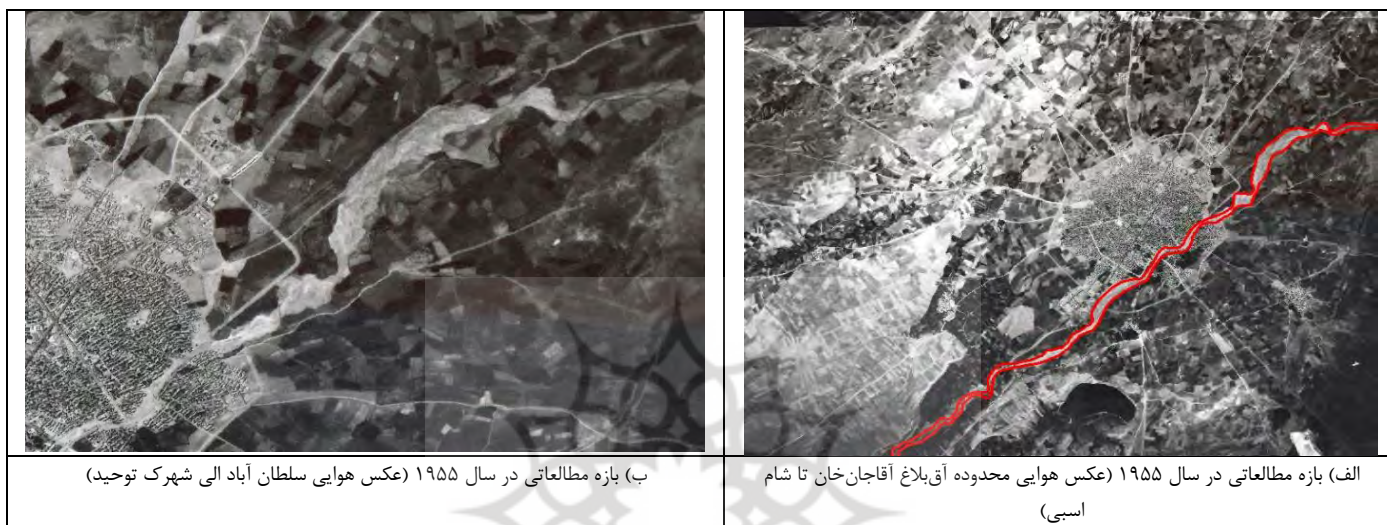
رودخانه بالخلوچای از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو است که از پیوستن رودخانه‌های متعدد که از دامنه کوه‌های بزقوش و سبلان سرچشمه می‌گیرند تشکیل شده است و در ادامه مسیر خود از محدوده کناری دشت اردبیل می‌گذرد و در نهایت به ارس می‌ریزد. بر روی رودخانه مذکور در سال ۱۳۸۴ سد ذخیره‌ای یامچی احداث شده است که ضمن تامین نیاز شرب شهر اردبیل و تامین حقابه دریاچه شورابیل، برای آبیاری شبکه آبیاری یامچی هم استفاده می‌شود. در مخروط افکنه رودخانه بالخلوچای، روستاهای پر جمعیت و آبادی استقرار یافته‌اند. در محدوده پایین‌دست سد، روستای الماس قرار گرفته است که پس از عبور از روستاهای قاسم‌قشلاقی و شام‌اسبی، وارد شهر اردبیل می‌شود و سپس با گذر از محدوده روستای آق‌بلاغ از گیلانده می‌گذرد و در نهایت وارد رودخانه قره‌سو می‌شود. رودخانه مذکور در حین عبور از محدوده شهری اردبیل، دست‌خوش تغییرات متعدد ناشی از فعالیت‌های انسانی و ساماندهی رودخانه شده است. در مسیر عبور رودخانه، اراضی دارای کاربری‌های کشاورزی، باغ، و مناطق مسکونی هستند و در برخی بازه‌ها هم اراضی طبیعی اطراف رودخانه را فرا گرفته‌اند (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳: ۶۸). مساحت بالادست دو ایستگاه هیدرومتری پل الماس و گیلانده به ترتیب ۱۰۷۰ و ۱۶۳۸ کیلومترمربع می‌باشد و مقادیر دبی متوسط رودخانه بالخلوچای در محل ایستگاه‌های هیدرومتری پل الماس و گیلانده به ترتیب برابر ۳/۰۴ و ۲/۴۰ مترمکعب در ثانیه است.

## روش پژوهش

### داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش عوامل توپوگرافی (شیب، جهت، ارتفاع) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع محاسبه شدند. مدل رقومی ارتفاع بر اساس نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه و با قدرت تفکیک ۲۰ متری تهیه شد. در ادامه با استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، نوع سازندها مشخص شد و حساسیت آنها به فرسایش مشخص شدند (فیض‌نیا و زارع خوش اقبال، ۲۰۰۴). برای تعیین نوع استفاده از اراضی از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنجنده TM ماهواره لندست و تصاویر گوگل ارث مربوط به سال‌های ۱۹۵۵، ۱۹۸۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ استفاده شده است (شکل ۱ تا ۴). برای انجام پژوهش حاضر، در عملیات میدانی از ۲۱ نقطه از بازه مورد مطالعه رودخانه با فواصل تقریبی ۱/۵ کیلومتری در نظر گرفته شد با استفاده از دوربین نقشه‌برداری تئودولیت پروفیل برداری شدند و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه، با استفاده از تصاویر فوق سطح موثر فرسایش رودخانه‌ای (دشت سیلابی)، مجموع طول آبراهه، تراکم زهکشی، نسبت پوشش کناره و درصد هریک از پوشش‌های اراضی

مربوطه در هر بازه محاسبه شدند. همچنین، مشخصات فیزیوگرافی محدوده بالادست حوضه‌های مورد مطالعه شامل (شامل مساحت، محیط، زمان تمرکز<sup>۱</sup>، قطر دایره هم‌سطح، ضریب گراولیوس<sup>۲</sup>، ارتفاع متوسط، شیب متوسط در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، با استفاده از آمار دبی دو ایستگاه هیدرومتری مربوطه دبی‌های سیلابی تعیین شدند. قابل ذکر است که برای روابط تجربی نیاز به دبی نرمال با دوره بازگشت ۱/۵۸ ساله و موثر در فرسایش کنار رودخانه‌ای بوده است که از داده‌های دبی طولانی‌مدت ایستگاه پل الماس و گیلانده (در بازه زمانی ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۲) استفاده شد. علاوه بر این، مقادیر دبی متوسط و دبی سیلابی (با دوره بازگشت ۲۵ ساله) نیز در روابط رگرسیونی مورد نیاز بود که از داده‌های موجود در ایستگاه‌های هیدرومتری پل الماس و گیلانده در دوره آماری مذکور استفاده شده است.

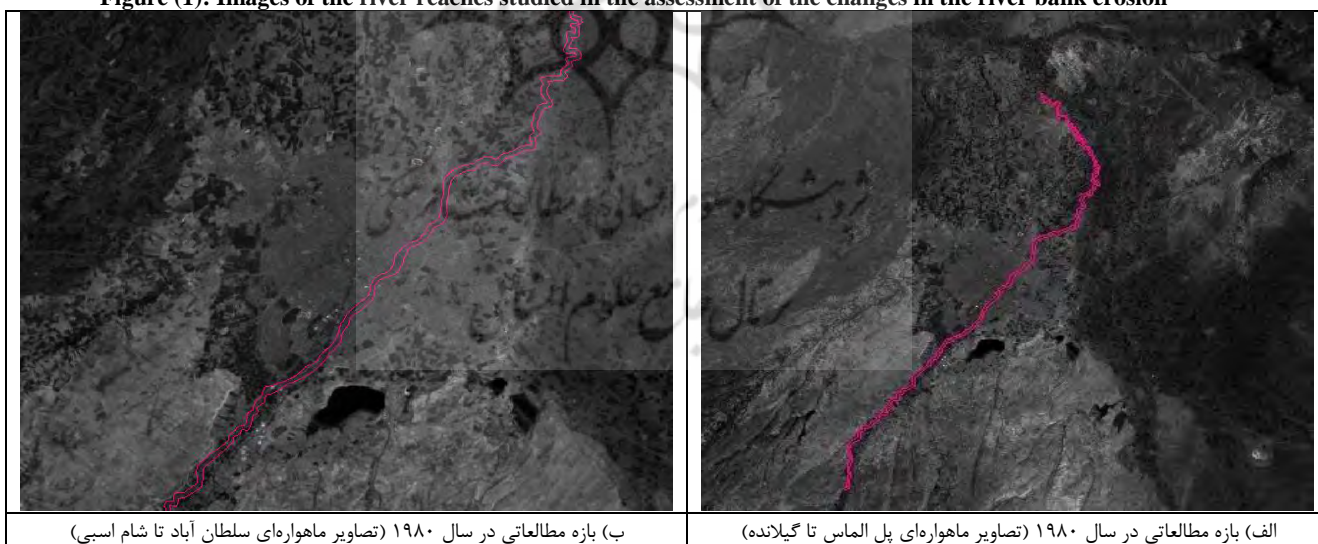


ب) بازه مطالعاتی در سال ۱۹۵۵ (عکس هوایی سلطان آباد الی شهرک توحید)

الف) بازه مطالعاتی در سال ۱۹۵۵ (عکس هوایی محدوده آق‌بلاغ آقاخان تا شام اسبی)

شکل (۱): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه

Figure (1): Images of the river reaches studied in the assessment of the changes in the river bank erosion



ب) بازه مطالعاتی در سال ۱۹۸۰ (تصاویر ماهواره‌ای سلطان آباد تا شام اسبی)

الف) بازه مطالعاتی در سال ۱۹۸۰ (تصاویر ماهواره‌ای پل الماس تا گیلانده)

شکل (۲): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه

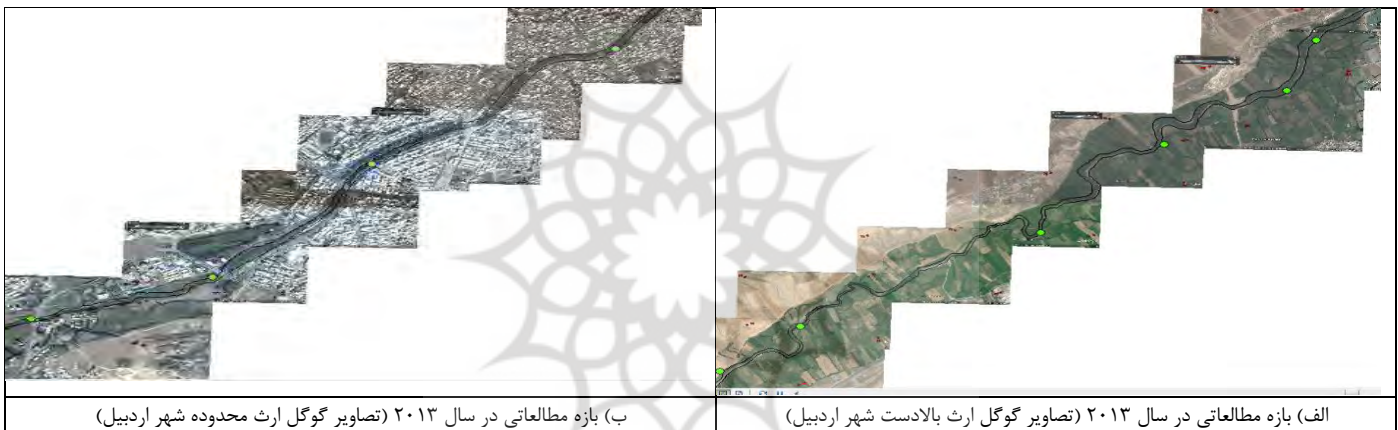
Figure (2): Images of the river reaches studied in the assessment of the changes in the river bank erosion

1- Time of concentration

2 -Compactness Coefficient



شکل (۳): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه  
**Figure (1): Images of the river reaches studied in the assessment of the changes in the river bank erosion**



شکل (۴): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه  
**Figure (1): Images of the river reaches studied in the assessment of the changes in the river bank erosion**

محاسبه فرسایش کنار رودخانه‌ای با روابط تجربی در این پژوهش، با روابط تجربی برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای در سال‌های مختلف و نیز در بازه‌های مطالعاتی با روش‌های مندرج در جدول ۱ محاسبه شدند. قابل ذکر است در مرحله اول پژوهش، ارزیابی کرائی و مقایسه نتایج روابط تجربی موجود در برآورد فرسایش کناری رودخانه، بر اساس داده‌ها و شرایط منطقه مورد مطالعه مدنظر بوده است.

جدول (۱): روابط تجربی مورد استفاده در برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای در بازه‌های مورد مطالعه

**Table (1): Empirical equations used in the estimation of river bank erosion in the studied reaches**

منبع	توضیحات	رابطه	ردیف
(اسمعلی و عبداللهی، ۲۰۱۰)	میزان فرسایش کناری به متر در سال، $Q_{1.58}$ دبی سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) با دوره بازگشت ۱/۵۸ سال با فرض جریان مقطع پر	$BE_X = 0.016(Q_{1.58})^{0.6}$	(۱)
(هوگژ و پروسر، ۲۰۰۳)	میزان فرسایش کناری به متر در سال، $PR_X$ ، نسبت کناره با پوشش گیاهی طبیعی دست نخورده	$BE_X = 0.008(1 - PR_X)(Q_{1.58})^{0.6}$	(۲)
(اسمعلی و عبداللهی، ۲۰۱۰)	فرسایش کناری در هر انشعاب رود بر حسب تن در سال، $L_X$ ، طول رودخانه (متر)، ارتفاع متوسط کناره ۳ متر و وزن مخصوص رسوب ۱/۵ (تن بر متر مکعب)	$BC_X = 18(1 - PR_X)(Q_{1.58})^{0.6}L_X$	(۳)
(اسمعلی و عبداللهی، ۲۰۱۰)	میانگین جریان سالانه به میلیون لیتر در سال، $Q_X$ عرض دشت سیلابی (متر)، $\rho$ وزن مخصوص آب، $g$ شتاب ثقل، $S_X$ شیب	$BE_X = 0.00002\rho g Q_X S_X (1 - PR_X)(1 - e^{-0.008fx})$	(۴)



تحلیل رگرسیونی مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای

در ادامه، متغیرهای مستقل (در ۴ دسته کلی شامل عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، فرسایش‌پذیری خاک و عوامل زمینی) و متغیر وابسته (مساحت تحت تأثیر فرسایش کناری) برای برآورد فرسایش کناری رودخانه با استفاده از نقشه‌های مکانی محاسبه شدند. در بخش عوامل توپوگرافی، متغیرهای شیب زمین، و عامل طول به‌منظور ارزیابی خطر فرسایش کناری انتخاب شدند. در بخش عوامل مربوط به خاک و زمین، مواردی مانند نوع خاک، وضعیت زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و استفاده از اراضی انتخاب شدند. در تجزیه و تحلیل آماری از آزمون رگرسیون چندمتغیره و روش گام به گام، برای مدل‌سازی عوامل موثر بر فرسایش کناره‌ای از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد (سعدون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰۴۹۱۷).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیوگرافی بالادست محدوده‌های مورد مطالعه

مشخصات فیزیوگرافی محدوده بالادست حوضه‌های مورد مطالعه شامل مساحت، محیط، زمان تمرکز، قطر دایره هم‌سطح، ضریب گراولیوس، ارتفاع متوسط، شیب متوسط و سایر متغیرهای موثر بر فرسایش کناری رودخانه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات فیزیوگرافی محدوده بالادست حوضه‌های مورد مطالعه

Table (2): Physiographic characteristics of the upstream area of the studied river reaches

ویژگی	پل الماس	گیلانده
مساحت (کیلومترمربع)	۱۰۱۲/۰۶	۱۵۴/۳۳
قطر دایره هم‌سطح (کیلومتر)	۳۵/۹۱	۱۴/۰۲
تراکم زهکشی (کیلومتر در کیلومترمربع)	۳/۴۹	۳/۱۶
زمان تمرکز (ساعت)	۱۷/۴۴	۱۱/۲۹
ضریب گراولیوس	۱/۳۸	۱/۵
طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	۵۷/۷۷	۲۶/۸۶
ضریب فشردگی (عکس ضریب هورتون)	۱/۳۹	۱/۵۱
شیب خالص (٪)	۰/۰۹	۰/۴۴
دبی اوج	۱۰۱/۵۶	۲۷/۲۳
محیط (کیلومتر)	۱۵۶/۳۳	۶۶/۴۸

ویژگی‌های زمین‌شناسی و مقاومت به فرسایش منطقه مورد مطالعه

بر اساس اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی، حوضه آبریز بالخلوچای دارای انواع رخساره‌های سنگی و رسوبی متعلق به دوران سنوزوئیک است که تحت تأثیر رخدادهای و فرآیندهای زمین‌ساختی به وقوع پیوسته و در گستره حوضه پراکنده‌اند (جدول ۳).

جدول (۳): ویژگی‌ها و مقاومت سازندها و سنگ‌ها به فرسایش در منطقه مورد مطالعه

Table (3): Characteristics and resistance of geological formations and rocks to erosion in the study area

بازه	علامت	خصوصیات سنگ‌شناسی	ضریب مقاومت به فرسایش
۱	Ng ml 2	توف، مارن و آهک آب شیرین	۱
۲	Ng t 2	تناوب توف، لاپیلی توف، توف برش، پومیس، لاهار و آهک آب شیرین	۱
۳	Ng c 2	کنگومرا همراه با لایه‌هایی از ماسه سنگ مارن و آهک آب شیرین	۴
۴	Qt2	رسوبات دشت، پادگانه‌های آبرفتی جوان و مخروط افکنه‌ها	۷

1 -Saadon

## ویژگی‌های خاک و تیپ اراضی بازه‌های مورد مطالعه

خصوصیات خاک‌های مربوط به بازه‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس روش فائو در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۴): مشخصات واحد اراضی، شیب، مشخصات خاک‌های بازه‌های مورد مطالعه و تقسیم بندی آن‌ها به روش فائو

Table (4): Characteristics of the land units, slope, soil characteristics of the study areas according to the FAO method

تیپ اراضی	مشخصات واحد اراضی	شیب (%)	مشخصات خاک‌ها و تقسیم بندی آن‌ها به روش فائو	پوشش گیاهی	محدودیت‌های اساسی اراضی	قابلیت استفاده
کوهها	تپه‌های مرتفع سنگی با قلل تیز و فرسایش بسیار زیاد	۲۵ تا ۵۵	خاک خیلی کم عمق تا کم عمق غیریکنواخت/برون زدگی سنگی	بدون پوشش گیاهی/اراضی بایر	شیب بسیار تند/فرسایش بسیار زیاد/محدودیت عمق خاک	اراضی بایر/تناسب بسیار کم برای چراگاه
فلات‌ها و تراس‌های فوقانی	فلاتها و تراس‌های مرتفع و سطوح فرسایش یافته قدیمی	۱ تا ۸	خاک کم عمق تا نیمه عمیق با بافت متوسط تا سنگین	پوشش کم تا متوسط گیاهان مرتعی/دیم	پستی و بلندی/ فرسایش/سنگریزه	نسبتاً مناسب برای چراگاه/تناسب کم تا متوسط برای دیم
دشت‌های رسوبی	دشت‌های رسوبی مسطح با شیب بسیار ملایم	کمتر از ۰/۵	خاک نسبتاً عمیق با بافت متوسط و مطبق سنگین	کشت آبی/باغات میوه	سنگریزه در طبقات زیرین	مناسب برای زراعت آبی و باغات
دشت‌های سیلابی	دشت‌های سیلابی نسبتاً مسطح با شوری زیاد	کمتر از ۱	خاک عمیق با بافت سنگین و شوری زیاد/سطح ایستایی بالا	گیاهان مقاوم به شوری با پراکندگی زیاد/اراضی بایر	شوری بسیار زیاد/اسیله‌گیری/زهکشی نامناسب	اراضی بایر/تناسب کم برای چراگاه
دشت‌های رسوبی	دشت‌های رسوبی مسطح/شیب بسیار ملایم	کمتر از ۰/۵	خاک نسبتاً عمیق با بافت متوسط و مطبق سنگین	کشت آبی/باغات میوه	سنگریزه در طبقات زیرین	مناسب برای زراعت آبی و باغات

## نتایج برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای با استفاده از روابط تجربی

به منظور برآورد میزان فرسایش کناری، ابتدا محاسبه دبی سیلابی انجام شد و جهت برآورد دبی نرمال با دوره بازگشت ۱/۵۸ ساله، از داده‌های دبی طولانی مدت ایستگاه پل الماس و گیلانده (در بازه زمانی ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۲) استفاده شد و برابر ۲/۸۹ محاسبه شد. نتایج برآورد مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای بر اساس روابط تجربی ارائه شده نشان داد که مقادیر برآوردی دارای بیش برآوردی و یا کم برآوردی هستند و نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهند. در این خصوص می‌توان گفت که روابط ارائه شده برای مناطقی متفاوت ارائه شده اند که شرایط و خواستگاه توسعه مدل‌ها با منطقه مورد مطالعه متفاوت است. در مجموع می‌توان گفت که با توجه به تفاوت در رژیم رودخانه، خصوصیات فیزیوگرافی و سازند در مناطق مختلف، برآورد فرسایش باید در هر بازه از رودخانه به صورت مستقل ارائه شود.

## نتایج تحلیل رگرسیونی مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای

نتایج متغیرهای وارد شده به مدل‌های رگرسیونی برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول (۵): نتایج پارامترهای مختلف بازه‌های مورد مطالعه در برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای

Table (5): The results of different parameters of the study river reaches in the estimation of river bank erosion

ویژگی	متغیر	بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
نتایج رگرسیونی	سطح موثر رودخانه (هکتار)	۵/۹۳	۲۱/۶۰	۱۹/۴۲	۵/۳۱	۹/۶۹	۷/۰۸	
	مساحت زیرحوضه (کیلومتر مربع)	۱۶/۹۷	۴۴/۹۴	۶۷/۶۲	۱۰/۵۳	۹/۹۸	۴/۴۵	
	محیط زیرحوضه (کیلومتر)	۲۴/۵۷	۳۹/۴۲	۴۲/۵۶	۳۰/۶۰	۱۹/۶۴	۱۴/۵۵	
	مساحت بالادست (کیلومتر مربع)	۱۰۲۹/۰۲	۱۰۳۷/۹۵	۱۰۷۹/۶۷	۱۰۹۰/۲۰	۱۰۲۲/۰۳	۱۰۲۶/۴۸	
	قطر دایره هم سطح (کیلومتر)	۴/۶۵	۷/۵۷	۹/۲۸	۳/۶۶	۳/۵۷	۲/۳۸	
	محیط بازه (کیلومتر)	۵/۹۹	۱۹/۲۷	۱۶/۰۶	۳/۷۱	۹/۹۲	۶/۷۲	

۸۴/۸۲	۸۲/۴۰	۷۸/۳۴	۷۶/۵۳	۶۸/۷	۵۹/۶۲	طول بازه بالادست (کیلومتر)	هیدروژئومورفولوژی
۱۵/۶۹	۱۶/۸	۲۰/۸۵	۱۷/۸۳	۲۲/۹۱	۸/۱۷	عرض متوسط بازه (متر)	
۱/۹۳	۱/۷۴	۲/۶۴	۱/۴۵	۱/۶۵	۱/۶۷	ضریب گراولوس (-)	
۰/۱۰	۰/۳۳	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۷۱	شیب (%)	
۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۹	شیب بالادست (%)	
۲۰/۲۵	۳۷/۲۶	۱۶/۱۳	۲۳/۹۷	۱۸/۰۵	۲۴/۳۶	سطح مقطع متوسط (مترمربع)	
۱/۲۹	۱/۲۸	۱/۱۳	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۲	ضریب پیچانرود (-)	
۷/۰۸	۹/۶۹	۵/۳۱	۱۹/۴۲	۲۱/۶۰	۵/۹۳	سطح موثر رودخانه (هکتار)	
۲۶/۷۴	۲۵/۸۶	۲۴/۲۹	۲۳/۶۵	۲۱/۰۲	۱۸/۰۰	زمان تمرکز (ساعت)	
۱۰۲/۵۷	۱۰۲/۲۶	۱۰۶/۹۹	۱۰۶/۲۷	۱۰۵/۸۷	۱۰۲/۷۵	دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)	
۳/۵۴	۳/۵۲	۳/۵۱	۳/۵۰	۳/۴۷	۳/۴۲	متوسط دبی (مترمکعب در ثانیه)	هیدروژئومورفولوژی
۲۵/۲۰	۲۴/۶۱	۲۳/۶۳	۲۳/۱۹	۲۱/۳۰	۱۹/۱۰	دبی سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ ساله (مترمکعب در ثانیه)	
۱/۰۰۲	۱/۰۰۴	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲	۱/۰۰۳	۱/۰۰۱	وزن مخصوص آب (گرم در سانتی‌متر مکعب)	
۷/۰۸	۹/۶۹	۵/۳۱	۱۹/۴۲	۲۱/۶۰	۵/۹۳	سطح موثر رودخانه (هکتار)	
۷	۷	۷	۷	۶	۳/۲۵	ضریب فرسایش‌پذیری سازند (-)	
۱	۷۳	۱	۵	۳۰	۰	کشت آبی (%)	
۰	۰	۰	۰	۳۶	۱	مرتع (%)	زمین‌محیطی
۰	۲۷	۰	۹۵	۳۴	۰	مسکونی (%)	
۰/۷۸	۰/۶۳	۰/۷۰	۰/۵۳	۰/۷۴	۱	نسبت پوشش کناره (کیلومتر)	

نتایج مدل‌سازی برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای به همراه ویژگی‌های آماری مدل‌های استفاده شده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول (۶): نتایج مدل‌سازی رگرسیونی فرسایش کنار رودخانه‌ای بر اساس متغیرهای هیدروژئومورفولوژی در بازه‌های مورد مطالعه

Table (6): Results of river bank erosion regression modeling based on hydrological variables in the studied intervals

سطح معنی‌داری	آماره t	ضریب بتا	خطای استاندارد استاندارد	B	ضرایب	خطای استاندارد برآورد	ضریب تعیین اصلاح شده	ضریب تعیین	پارامترها/روش
۰/۰۳۱	-۳/۸۵	-	۹/۲۶	-۳۵/۷۵	ضریب ثابت	۰/۵۸۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶	فیزیوگرافی/گام‌به‌گام
۰/۰۰۰	۲۴/۴۶	۰/۹۴۱	۰/۰۴۵	۱/۰۹۸	Pr				
۰/۰۳۱	۳/۸۲	۰/۱۴۷	۰/۰۰۹	۰/۰۳۴	Au				
۰/۳۱۳	۱/۳۳۷	-	۲۸/۷۳	۳۸/۴۱	ضریب ثابت	۰/۱۹۹	۰/۴۲۸	۰/۷۷۱	هیدروژئولوژی/اینتر
۰/۱۳۷	-۲/۴۱	-۱/۵۳	۳۰/۵۳	-۷۳/۸۶	Q				
۰/۸۶۷	-۰/۱۸۹	-۰/۰۷۱	۱/۰۰۱	-۱/۸۹	Qp				
۰/۲۰۲	۱/۸۷۱	۱/۱۷	۲/۶۱	۴/۸۸	Tc				
۰/۰۰۱	۱۴/۳۶	-	۰/۴۷۱	۵/۹۸	ضریب ثابت	۰/۷۷۳	۰/۹۸۸	۰/۹۹۳	زمینی/گام‌به‌گام
۰/۰۰۱	۱۵/۰۴	۰/۷۲۹	۰/۰۰۹	۰/۱۴۱	Rt				
۰/۰۰۱	۱۲/۶۳	۰/۶۱۲	۰/۰۲۴	۰/۳۰	Ra				
۰/۰۳۱	-۳/۸۵	-	۱۳/۲۶	-۵۱/۱۷	ضریب ثابت	۰/۵۸۲	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶	همه متغیرها/گام‌به‌گام
۰/۰۰۰	۲۴/۴۹	۰/۹۴۰	۰/۰۴۵	۱/۰۹	Pr				
۰/۰۳۱	۳/۸۳	۰/۱۴۷	۰/۱۲۸	۰/۴۹۲	Qp				

علائم اختصاری مورد استفاده به صورت زیر هستند، Re، فرسایش کنار رودخانه‌ای، Ra، مساحت محدوده مرتع، Ag، مساحت محدوده کشت آبی، Pr، محیط بازه، Qp، دبی اوج، Au، مساحت بالادست، Q، دبی، Tc، زمان تمرکز، Rt، مساحت محدوده مسکونی، Dd، تراکم زهکشی.

## روابط برتر رگرسیونی برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای

بدین ترتیب پس از کسب نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیونی، بر اساس مقادیر ثابت و ضرایب هر یک از پارامترهای مؤثر در فرسایش کنار رودخانه‌ای، مدل رگرسیونی برتر بر اساس رویکردهای مختلف و ترکیب پارامترها در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول (۷): روابط رگرسیونی برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه

Table (7): Regression models in river bank erosion estimation in the study area

رابطه	ضریب تعیین اصلاح شده	دسته متغیر مورد استفاده
$Re = 1.09 Pr + 0.034 Au - 35.75$	۰/۹۹۳	فیزیوگرافی
$Re = 0.141 Rt + 0.31 Ra + 5.98$	۰/۹۸۸	زمینی
$Re = 1.09 Pr + 0.492 Qp - 51.17$	۰/۹۹۳	همه متغیرها

بر اساس تحلیل روابط رگرسیونی، می‌توان گفت که مهم‌ترین عوامل مؤثر در رخداد فرسایش کنار رودخانه‌ای در بازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر اولویت بندی نمود. در دسته عوامل فیزیوگرافی، عامل محیط بازه و نیز مساحت محدوده بالادست با ضرایب به ترتیب ۱/۰۹۸ و ۰/۰۳۴ جزء عوامل مهم معرفی شده اند و مقدار ضریب تبیین معادله رگرسیونی برابر ۰/۹۹۳ به دست آمده است. قابل ذکر است که در رویکرد به کارگیری متغیرهای هیدرولوژی، هیچ کدام از متغیرها رابطه معنی داری با مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای ارائه ندادند، در این خصوص سطح معنی داری مدل استخراج شده برابر ۰/۳۱۳ بود که از نظر آماری معنی دار نبود. در دسته عوامل زمینی، متغیر مساحت محدوده مسکونی و مساحت محدوده مرتعی با ضرایب مدل برابر ۰/۱۴۱ و ۰/۳۰ به عنوان متغیرهای مهم مدل رگرسیونی ارائه شده معرفی شده است و ضریب تبیین معادله ارائه شده برابر ۰/۹۸۸ حاصل شد. در مجموع می‌توان گفت که با در نظر گرفتن همه متغیرها در مدل سازی، دو عامل محیط بازه و دبی اوج (به ترتیب با ضرایب مدل ۱/۰۹ و ۰/۴۹۲)، بیشترین تاثیر را بر مقدار فرسایش کنار رودخانه‌ای داشته‌اند و مقدار ضریب تبیین مدل ارائه شده معادل ۰/۹۹۳ به دست آمده است. استفاده از روابط مذکور، امکان برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه را بر اساس داده‌های موجود فراهم نموده است.

تغییرات متغیرهای مؤثر بر فرسایش کناری رودخانه در سال‌های مورد مطالعه

مقادیر تغییرات در ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه مؤثر بر فرسایش کنار رودخانه‌ای در طی بازه زمانی مورد مطالعه (۵۸ سال) در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول (۸): نتایج تغییرات متغیرهای مربوط به سری زمانی سال‌های مطالعاتی در فرسایش کنار رودخانه‌ای

Table (8): The results of the changes of the time series variables of the study years in river bank erosion in the study area

سال	۱۳۳۴	۱۳۵۹	۱۳۸۹	۱۳۹۲
سطح مؤثر فرسایش رودخانه‌ای (هکتار)	۷۲/۸۲	۸۳/۸۲	۱۰۴/۸۲	۱۰۷/۴۸
تراکم زهکشی (کیلومتر در کیلومتر مربع)	۳/۱۵	۳/۱۵۷	۳/۱۶۴	۳/۱۶۵
متوسط دبی (مترمکعب در ثانیه)	۴/۵	۴/۵۷	۳/۲۳	۰/۵۳
نسبت پوشش کناره (کیلومتر)	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۶۶	۰/۵۸
کشت آبی (%)	۶۵	۶۲	۵۵	۵۱
اراضی مرتعی (%)	۱۵	۱۷	۲۱	۲۲
اراضی مسکونی (%)	۱۹	۲۱	۲۳	۲۷

سطح مؤثر فرسایش کنار رودخانه‌ای متفاوت از دشت سیلابی است و سطح حساس به وقوع فرسایش رودخانه‌ای است که در هر بازه بر اساس تصاویر و نیز بازدیدهای میدانی مشخص شده است. بر اساس نتایج، می‌توان گفت که سطح مؤثر فرسایش کناره‌ای در طول زمان افزایش یافته است که در تولید رسوبات معلق مؤثر است. در سال‌های مختلف به دلیل تغییرات بستر، کناره‌ها و محدوده اطراف رودخانه

تغییر کرده است. دبی متوسط در طی دوره مورد ارزیابی کاهش یافته است، در خصوص روند کاهشی دبی جریان، می‌توان گفت که این کاهش جریان به دلیل کاهش آبدهی رودخانه و نیز احداث سد یامچی در بالادست رودخانه مورد مطالعه بوده است. بر اساس نتایج، محدوده اراضی مسکونی واقع در محدوده بازه‌های مطالعاتی و در خارج از محدوده دشت سیلابی در دوره مطالعاتی افزایش یافته است. بر اساس رابطه رگرسیونی استخراج شده، مشخص شد که در رویکرد استفاده از همه متغیرها در مدل‌سازی فرسایش کنار رودخانه‌ای، متغیر دبی سیلابی بیش‌ترین تاثیر را در ایجاد فرسایش کنار رودخانه‌ای دارد. لذا هر چند دبی متوسط جریان در دوره‌های مورد مطالعه کاهش یافته است، اما افزایش سطح موثر فرسایش رودخانه‌ای، می‌تواند زمینه ایجاد فرسایش کنار رودخانه‌ای در اثر وقوع دبی‌های سیلابی را فراهم نماید.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش تحقیق حاضر محدوده فرسایش رودخانه‌ای از روی عکس‌های هوایی تعیین شد و در ادامه عوامل موثر بر توسعه فرسایش کنار رودخانه‌ای تعیین شدند و در ادامه سعی شد با استفاده از داده‌های مکانی مختلف فیزیوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و محیطی، فرسایش کنار رودخانه‌ای مدل‌سازی شود. به‌منظور بررسی اثر عوامل مختلف در رخداد فرسایش کنار رودخانه‌ای در بازه‌های مختلف رودخانه بالیخوچای در استان اردبیل، پس از تعیین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (مساحت تحت تاثیر فرسایش)، رابطه عوامل مؤثر و محدوده فرسایش کنار رودخانه‌ای از طریق رگرسیون چندمتغیره ارزیابی شد. بر اساس نتایج معادلات رگرسیونی، مشخص شد که از میان عوامل فیزیوگرافی، مواردی مانند محیط بازه و مساحت محدوده بالادست مهم‌ترین عوامل مؤثر در رخداد و تشدید فرسایش کنار رودخانه‌ای در بازه‌های مورد مطالعه هستند. قابل ذکر است که از میان متغیرهای مرتبط با هیدرولوژی، متغیر دبی اوج سیلابی در کنار سایر عوامل محیطی نیز در تشدید فرسایش نقش دارند. در همین راستا، محمدزاده و همکاران (۲۰۲۳) در مدل‌سازی فرسایش کناری در رودخانه آمو در افغانستان رابطه خطی میان فرسایش کناری و شدت دبی و توان جریان رودخانه را گزارش نمودند. این در حالی است که، بوت‌ا و همکاران (۲۰۲۴) به تاثیر عواملی مانند ضریب فرسایش در مدل‌سازی هیدرودینامیکی و پیش‌بینی فرسایش کنار رودخانه‌ای در رودخانه سند اشاره نمودند. علاوه بر این، هوانگ (۲۰۲۴) با تلفیق داده‌های هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و ویژگی‌های خاک به مدل‌های مناسبی در پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال استفاده نمودند. همچنین مشخص شد که متغیرهای محیط بازه و دبی اوج، بیش‌ترین تاثیر را بر مقدار فرسایش کنار رودخانه‌ای دارند. بررسی وضعیت تغییرات سیمای فرسایش کنار رودخانه‌ای و تغییرات متغیرهای موثر حاکی از افزایش مساحت تحت تاثیر فرسایش کنار رودخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه است. این در حالی است که تغییر عواملی مانند سطح موثر فرسایش رودخانه‌ای، تراکم زهکشی، متوسط دبی، پوشش کناره رودخانه و نیز درصد کاربری‌های مختلف اراضی در دوره‌های مختلف متفاوت است. بر اساس نتایج، می‌توان گفت که در بازه‌های مختلف یک رودخانه عوامل مختلفی بر وسعت فرسایش کنار رودخانه‌ای موثر است که ارتباط و تاثیر متفاوتی بر شدت فرسایش کنار رودخانه‌ای می‌گذارند. در راستای رفع محدودیت تحقیق در خصوص استفاده از تصاویر جدیدتر، می‌توان تغییرات فرسایش کناری را در دوره‌های اخیر نیز مطالعه نمود و در تحلیل‌های تکمیلی استفاده نمود. در مجموع، پیشنهاد می‌شود که در راستای کنترل فرسایش کنار رودخانه‌ای، عوامل موثر بر تشدید آن کنترل شود. در این راستا می‌توان به حفظ پوشش گیاهی حاشیه رودخانه اشاره نمود. قابل ذکر است که در اطراف بازه‌های رودخانه مورد مطالعه محدوده‌های اراضی زراعی وجود دارد که در برخی موارد تا نزدیک حریم رودخانه گسترش پیدا کرده‌اند که باعث افزایش امکان فرسایش کنار رودخانه‌ای می‌شود. از دیگر پیشنهادات رعایت حریم بستر رودخانه و دشت سیلابی است که می‌تواند جلوگیری از ساخت و ساز و توسعه در اطراف رودخانه باشد که از بروز خسارت‌های ناشی از سیلاب نیز موثر خواهد بود. همچنین پیشنهاد می‌شود که میزان خسارت‌های ناشی از فرسایش کناری در پژوهش‌های آتی برآورد شود.

- Ahmad, D., Afzal, M., & Ishaq, M. (2024). Impacts of riverbank erosion and flooding on communities along the Indus River, Pakistan. *Natural Hazards*, 120(1), 131-152.
- Asghari Sarskanroon, S., Zeinali, B., & Poornariman, N. (2015). Pattern Analysis and Erodibility of Gerמי Chai River Route. *Hydrogeomorphology*, 2(3), 1-20.
- Asghari Sereskanrood, S. (2015). Analyzing the effects of gravel and sand mining on the morphology of Grango River (between Sahand Dam to Khorasanak village. *Hydrogeomorphology*, 1, 21-39 (in Persian).
- Bhuiyan, F., Hey, R. D., & Wormleaton, P. R. (2010). Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(9), 583-596
- Boota, M. W., Yan, C., Soomro, S. E. H., Zafar, M. A., Li, Z., Xu, J., & Yousaf, A. (2024). Two-dimensional hydrodynamic modeling for prediction of bank erosion and bed incision in the Indus River. *Acta Geophysica*, 72(3), 2041-2058.
- Couper, P. R. (2004). Space and time in river bank erosion research: A review. *Area*, 36(4), 387-403.
- Das, T. K., Haldar, S. K., Gupta, I. D., & Sen, S. (2014). River bank erosion induced human displacement and its consequences. *Living Reviews in Landscape Research*, 8(3), 1-35.
- Esfandiyari Darabad, F., Bakhshandeh, R., Rahimi, M., Haji, K., & Mostafazadeh, R. (2021). Geomorphological classification and analysis of Hamzekhanloo River using the Rosgen classification model. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 59-39. doi: 10.22034/hyd.2021.39301.1527
- Esfandiyari-darabad, F., Mostafazadeh, R., Abyat, A., & Naseri, A. (2021). Determination of Meander Pattern in Gharehsou River Using Sinuosity Coefficients and Central Angle in Anzab-Samian Bridge reach. *Journal of Applied researches in Geographical sciences*, 21(61), 119-131.
- Esmali, A., Abdollahi, Kh. (2010). *Watershed Management and Soil Conservation*. University of Mohaghegh Ardabili Press, 574p.
- Feyznia, S., and Zare Khosheghbal, M. (2004). Sensitivity of rocks and formations to erosion and sediment yield in Latian drainage basin Area. *Natural Resources of Iran*, 365-381.
- Ghosh, D., & Saha, S. (2024). Identifying river bank erosion potential zones through geo-spatial and binary logistic regression modeling approach: a case study of river Ganga in Malda district (India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1), 81-98.
- Hasanuzzaman, M., Bera, B., Islam, A., & Shit, P. K. (2023). Estimation and prediction of riverbank erosion and accretion rate using DSAS, BEHI, and REBVI models: evidence from the lower Ganga River in India. *Natural Hazards*, 118(2), 1163-1190.
- Henshaw, A. J., Thorne, C. R., & Clifford, N. J. (2013). Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena*, 100, 107-119.
- Hosein Zadeh, M. M., Sadogh, S. H., Matesh Beyranvand, S., & Esmaili, R. (2019). Predict the rate of bank erosion in Lavij river during a particular flow by using BSTEM. *Geographical Planning of Space*, 9(33), 265-278.
- Huang, P. C. (2024). Estimation of riverbank erosion by combining channel morphological models with AI techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2359983.
- Hughes, A. O., & Prosser, I. P. (2003). *Gully and riverbank erosion mapping for the Murray-Darling Basin* (p. 97). Canberra: CSIRO Land and Water.
- Julian, J. P., & Torres, R. (2006). Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*, 76(1-2), 193-206.
- Kim, T. T., Ngoc, P., Nga, T. N. Q., Nguyet, N. T. T., Truong, H. N., Diem, P. T. M., ... & Bay, N. T. (2023). Modifying BEHI (Bank Erosion Hazard Index) to map and assess the levels of potential riverbank erosion of highly human impacted rivers: a case study for Vietnamese Mekong River system. *Environmental Earth Sciences*, 82(23), 554.
- Koutalakis, P., Gkiatas, G., Xinogalos, M., Iakovoglou, V., Kasapidis, I., Pagonis, G., ... & Zaimis, G. N. (2024). Estimating Stream Bank and Bed Erosion and Deposition with Innovative and Traditional Methods. *Land*, 13(2), 232.

- Kummu, M., Lu, X., Rasphone, A., Sarkkula, J., & Koponen, J. (2008). Riverbank changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vientiane–Nong Khai area. *Quaternary International*, 186(1), 100-112.
- Lefrançois, J., Grimaldi, C., Gascuel Oux, C., & Gilliet, N. (2007). Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(21), 2923-2933.
- Mahmoodzada, A. B., Varade, D., Shimada, S., Okazawa, H., Aryan, S., Gulab, G., ... & Elansary, H. O. (2023). Quantification of Amu River Riverbank Erosion in Balkh Province of Afghanistan during 2004–2020. *Land*, 12(10), 1890.
- Mallick, R. H., Bandyopadhyay, J., & Halder, B. (2023). Impact assessment of river bank erosion in the lower part of Mahanadi River using geospatial sciences. *Sustainable Horizons*, 8, 100075.
- Mostafazadeh, R., Esfandiary, F., Hamzei, M., & Alaei, N. (2024). Temporal variations landscape metrics of vegetation riparian areas in Gharesou River, Ardabil Province. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 24(72), 65-79.
- Mostafazadeh, R., Esfandiary Darabad, F., Naseri, A., Abyat, A., & Adhami, M. (2023). Determining the fractal pattern in a reach of Qharesou river, Ardabil province, Northwest of Iran. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 97-81. doi: 10.22034/hyd.2023.57428.1700
- Mozaffari, H., Asghari Saraskanrood, S., & Esfandiary Darabad, F. (2022). Modeling erosion and sedimentation changes of Sojasrood River before and after construction of Glaber Dam by GCD method. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(3), 57-87.
- Nath, B., Naznin, S. N., & Alak, P. (2013). Trends analysis of river bank erosion at Chandpur, Bangladesh: a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 3(3), 454-463.
- Parchami, N., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., & Imani, R. (2023). Spatial variations of hydrological drought in different time scales in rivers of Ardabil province. *Hydrogeomorphology*, 9(33), 36-21. doi: 10.22034/hyd.2022.51550.1637
- Rezaei Moghadam, M., Mohammadfar, A., & Valizadeh Kamran, K. (2013). Changes Detection and identification of erosion risk areas of Aji Chay River between Khaje to Vanyar. *Geography and Environmental Planning*, 23(4), 1-14.
- Rowland, J. C., Schwenk, J. P., Shelef, E., Muss, J., Ahrens, D., Stauffer, S., ... & Vulis, L. (2023). Scale dependent influence of permafrost on riverbank erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(7), e2023JF007101.
- Saadon, A., Abdullah, J., Muhammad, N. S., Ariffin, J., & Julien, P. Y. (2021). Predictive models for the estimation of riverbank erosion rates. *Catena*, 196, 104917.
- Sharafi, S., Kamangir, H., King, S. A., & Safaierad, R. (2021). Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(12), 1140.
- Sharma, N., Amoako Johnson, F., W Hutton, C., & Clark, M. (2010). Hazard, vulnerability and risk on the Brahmaputra basin: a case study of river bank erosion. *The Open Hydrology Journal*, 4(1): 211-226.
- Spiekermann, R., Betts, H., Dymond, J., & Basher, L. (2017). Volumetric measurement of river bank erosion from sequential historical aerial photography. *Geomorphology*, 296, 193-208.
- Wang, Z., Tian, S., Yi, Y., & Yu, G. (2007). Principles of river training and management. *International Journal of sediment research*, 22(4), 247.
- Yamani, M., & Sharafi, S. (2012). Geomorphology and effective factors on lateral erosion in Hor Rood River, Lorestan province. *Geography and Environmental Planning*, 23(1), 15-32.