

Research Paper



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



Abazar Esmali Ouri^{1*}, Arezoo Eshaghzadeh², Shokrollah Asghari³, Raoof Mostafazadeh⁴

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. abazar.esmali@gmail.com
2. M. Sc in Watershed Management Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture and natural Resources University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. 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
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

Keywords

**River morphology,
River bank erosion,
Multivariate
regression,
Balikhlochai River,
Ardabil province.**

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 Balikhlochai 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.

Received: 2024/04/22

Accepted: 2024/07/12

Published: 2024/10/21

* Corresponding Author: Abazar Esmali Ouri E-mail: esmailouri@uma.ac.ir

How cite to this article: Esmali Ouri, Abazar; Eshaghzadeh, Arezoo; Asghari, Shokrollah; Mostafazadeh, Raoof. (2024). Estimation of riverbank erosion and effective factors in Polealmas-Gilande reach, Balkhlochai River in Ardabil.

Hydrogeomorphology, 11(40): 87 – 101.

DOI:10.22034/hyd.2024.61311.1735



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.

مقاله پژوهشی



برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای و تعیین عوامل موثر در بازه پل‌الماس-گیلانده رودخانه بالخلوچای اردبیل



ابذر اسماعلی عوری^{۱*}، آرزو اسحق‌زاده^۲، شکرالله اصغری^۳، رؤوف مصطفی‌زاده^۴

- ۱- استاد گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. esmaliouri@uma.ac.ir
- ۲- کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. arezoo.eshaghzadeh@gmail.com
- ۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. shasghari@uma.ac.ir
- ۴- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

کلیدواژه‌ها	چکیده
مورفولوژی رودخانه، فرسایش کناری رودخانه، رگرسیون چندمتغیره، حوضه بالخلوچای استان اردبیل.	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 به عنوان متغیر وابسته، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS انجام و مدل‌های مناسب برآورد مقدار فرسایش کنار رودخانه‌ای مختلف به دست 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.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰	

ارجاع به این مقاله: اسماعلی عوری، ابذر؛ اسحق‌زاده، آرزو؛ اصغری، شکرالله؛ مصطفی‌زاده، رؤوف. (۱۴۰۳).

برآورد فرسایش کنار رودخانه‌ای و تعیین عوامل موثر در بازه پل‌الماس-گیلانده رودخانه بالخلوچای اردبیل.
هیدروژئومورفولوژی، ۱۱ (۴۰): ۸۷- ۱۰۱.

* نویسنده مسئول: ابذر اسماعلی عوری

رایانامه: esmaliouri@uma.ac.ir

DOI:10.22034/hyd.2024.61311.1735



Copyright: ©2024 by the authors.

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

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 (Das و همکاران^۱: ۲۰۱۴). یکی از مهم‌ترین اشکال فرسایش خاک، فرسایش کنار رودخانه‌ای است که سالانه بخش قابل توجهی از اراضی مجاور را کاهش می‌دهد (مالیک و همکاران^۲: ۲۰۲۳). رودخانه‌ها و آبراهه‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و یا دخالت‌های انسان دچار فرسایش بسته، فرسایش کناره‌ها و جابه‌جایی عرضی و تغییر مورفولوژی می‌شوند (مصطفی‌زاده و همکاران^۳: ۹۸). فرسایش کناره رودخانه‌ها عامل ناپایداری، جابه‌جایی و انتقال ذرات یا توده‌های خاک کناره است (اصغری سراسکانرود و همکاران^۴: ۲۰۱۵؛ اسفندیاری درآباد و همکاران^۵: ۲۰۲۱). اگرچه فرسایش در رودخانه‌ها به صورت فرسایش بسته و کناره‌ها توأمًا دیده می‌شود، ولی رخداد فرسایش در کناره‌ها به صورت عمومی تر موجب بروز مشکلات بیش‌تری نسبت به فرسایش کف می‌شود (Rowland و همکاران^۶: ۲۰۲۳). فرسایش کنار رودخانه‌ای، موجب ایجاد مشکلات فراوانی در حاشیه رودخانه‌های آبرفتی می‌شود. تعریض بسته رودخانه‌ها، تخریب اراضی کشاورزی، تخریب راه‌های مجاور ساحل رودخانه‌ها، افزایش شدید غلظت رسوب و آلوگی آب رودخانه و تهدید پایداری سازه‌های احداث شده، بخشی از مشکلات ناشی از فرسایش کنار رودخانه‌ای است (Ahmed و همکاران^۷: ۲۰۲۴؛ Koutalakis و همکاران^۸: ۲۰۲۴؛ ۲۰۲۲). 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 تنہ درختان، ریشه‌ها و سایر اجسام با دیواره‌ها و تغییر جریان به سمت دیواره‌ها، و رواناب تولیدی از زمین‌های اطراف و آبشنستگی تشدید می‌شوند (اصغری سراسکانرود^۹: ۲۰۱۵؛ Kopper^{۱۰}: 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^{۱۱}: ۲۰۱۹). فرسایش کنار رودخانه‌ای رودخانه‌های کشور، هر ساله زیان‌های جبران ناپذیری را وارد می‌کند و عموماً به صورت‌های گوناگون و با شدت و ضعف متفاوتی در رودخانه‌های آبرفتی به‌طور طبیعی دیده می‌شود. در هنگام وقوع سیلاب و پرآبی 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 (Kiem و همکاران^{۱۲}: ۲۰۲۳؛ ۵۵۴). دلایل عمدۀ 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 نشت آب به سمت رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زه‌آبهای کشاورزی و عوامل متعدد دیگر برشمرد (گوش و ساه^{۱۳}: ۸۲؛ ۲۰۲۴). رسوبات ناشی از فرسایش حوضه‌های آبریز معمولاً پس از بارندگی‌ها به رودخانه رسیده و با رسوبات ناشی از فرسایش دیواره بستر رودخانه همراه می‌شوند (Koutalakis و همکاران^{۱۴}: ۲۹۲۴؛ ۲۰۰۷). این رسوبات تاسیسات آبی در مسیر رودخانه‌ها را تحت تاثیر قرار داده و عمر مفید مخازن را کاهش می‌دهند. در ایران همه ساله پهنه‌های وسیعی از اراضی مرغوب و حاصل خیز سواحل رودخانه و مسیل‌ها بر اثر عبور جریان‌های سیلانی فرسایش یافته و تخریب می‌شوند (Shrififi و همکاران^{۱۵}: 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^{۱۶}: ۲۰۲۱؛ ونگ و همکاران^{۱۷}: ۲۰۰۷).

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 (بیان و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۸۴). به طور 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 (هنشاو 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، به عنوان مثال، کومو و همکاران^۵ (۲۰۰۸: ۱۰۰) با هدف آشکارسازی تغییرات کناری رودخانه میکونگ با استفاده از سنجش از دور، میزان متوسط فرسایش کنار رودخانه‌ای در دو دوره ۱۹۹۲-۱۹۹۶ و ۱۹۹۲-۲۰۰۵ را به ترتیب ۰/۸ و ۱ متر بر سال و میزان انباست را ۰/۴ و ۰/۷ متر بر سال برآورد کردند. شارما و همکاران^۶ (۲۰۱۰) با استفاده ازداده‌های ماهواره‌ای به بررسی خطر فرسایش کنار رودخانه‌ای در حوضه رودخانه براهمپوترا پرداختند و بر کاهش اکوسیستم‌های حاشیه رودخانه و اراضی کشاورزی و آلودگی آب تاکید 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 هر رود دریافتند که ساختمان زمین‌شناسی و لیتو洛ژی بستر و کناره رودخانه، مهم‌ترین عوامل تغییر پایداری بستر رودخانه به شمار می‌روند. ناث و همکاران^۷ (۲۰۱۳: ۴۵۴) به تجزیه و تحلیل روند فرسایش کنار رودخانه‌ای در سنگاپور بنگلاش 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 لاویج بر اساس نتایج شبیه‌سازی رودخانه با استفاده از مدل BSTEM در دبی‌های مقطع پر و حداقل رحظه‌ای 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 حداقل لحظه‌ای باشند. محمدزاده و همکاران (۲۰۲۳: ۱۸۹۰) با هدف کمی نمودن فرسایش کناری رودخانه آمو در افغانستان دریافتند که متوسط فرسایش کناری در سال ۵/۴ کیلومترمربع در سال بوده است و یک رابطه خطی بین محدوده فرسایش کناری با شدت دبی و توان جریان رودخانه به دست آمد. حسن‌الزمان و همکاران^۸ (۲۰۲۳: ۱۱۶۳) با ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه گنگ در هندوستان دریافتند که مدل‌سازی فرسایش و تشدید آن می‌تواند تصمیم گیران 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^۹ (۲۰۲۴: ۲۰۴۱) با هدف مدل‌سازی هیدرودینامیکی دو بعدی به منظور پیش‌بینی فرسایش کنار رودخانه‌ای در رودخانه سند به شواهدی از مداخلات انسانی و جنبه‌های هیدرودینامیکی در موقع دوره‌های سیلابی ای سیلاب دست یافتند و فرسایش کناری را با دقت بالا و ضریب تبیین معادل ۰/۸۳ با تلفیق عواملی مانند ضریب فرسایش پذیری و تکنیک تنش برشی محاسبه نمودند. نتایج مطالعه ایشان در کمک به اجرای اقدامات حفاظتی رودخانه به عنوان چارچوبی برای سایر رودخانه‌های مشابه پیشنهاد شد. همچنین، هوانگ (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
- 1 - Huang

0

تکنیک‌های هوش مصنوعی استفاده نمود و نتیجه گرفتند که تلفیق و استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و دقت مناسبی (ضریب تبیین برابر 0.963 ± 0.018) پیش‌بینی نماید. بررسی فرسایش کنار رودخانه‌ای بهمنظور 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 رسوب گذاری 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

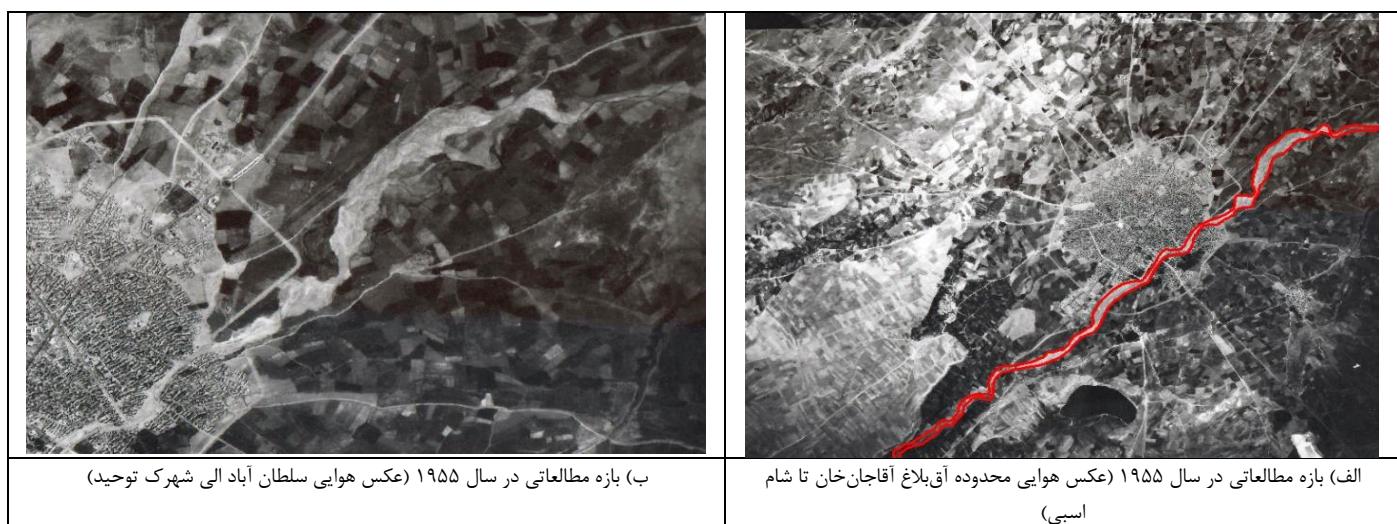
رودخانه بالخلوچای از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو است که از دامنه کوه‌های بزقوش و سبلان سرچشمۀ می‌گیرند تشکیل شده است و در ادامه مسیر خود از محدوده کناری دشت اردبیل می‌گذرد و در نهایت به ارس می‌ریزد. بر روی رودخانه مذکور در سال ۱۳۸۴ سد ذخیره‌ای یامچی احداث شده است که ضمن تامین نیاز شرب شهر اردبیل و تامین حقایق دریاچه شورابیل، برای آبیاری شبکه آبیاری یامچی هم استفاده می‌شود. در مخروط افکنه رودخانه بالخلوچای، روستاهای پر جمعیت و آبادی استقرار یافته‌اند. در محدوده پایین دست سد، روستای الماس قرار گرفته است که پس از عبور از روستاهای قاسم‌قشلاقی و شام اسبی، وارد شهر اردبیل می‌شود و سپس با گذر از محدوده روستای آقبلاع از گیلاندۀ 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 گیلاندۀ بهترتب ۱۰۷۰ و ۱۶۳۸ کیلومترمربع می‌باشد و مقادیر دبی متوسط رودخانه بالخلوچای در محل ایستگاه‌های هیدرومتری پل الماس و گیلاندۀ بهترتب ۳۰۴ و ۲۴۰ مترمکعب در ثانیه است.

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده

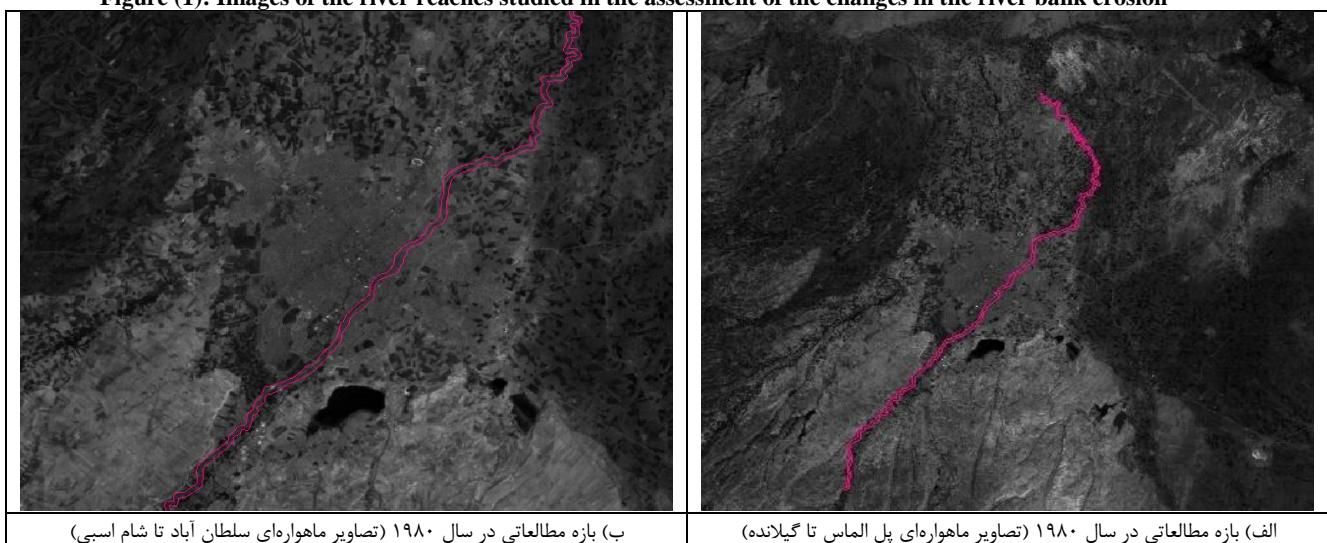
در این پژوهش عوامل توپوگرافی (شیب، جهت، ارتفاع) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع محاسبه شدند. مدل رقومی ارتفاع بر اساس نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه و با قدرت تفکیک ۲۰ متری تهیه شد. در ادامه استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، نوع سازندها 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 $1/5$ 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^۱، قطر دایره همسطح، ضریب گراولیوس^۲، ارتفاع متوسط، شبیه 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 طولانی مدت ایستگاه پل الماس و گیلاند (در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۴۸) استفاده شد. علاوه براین، 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 گیلاند در دوره آماری مذکور استفاده شده است.



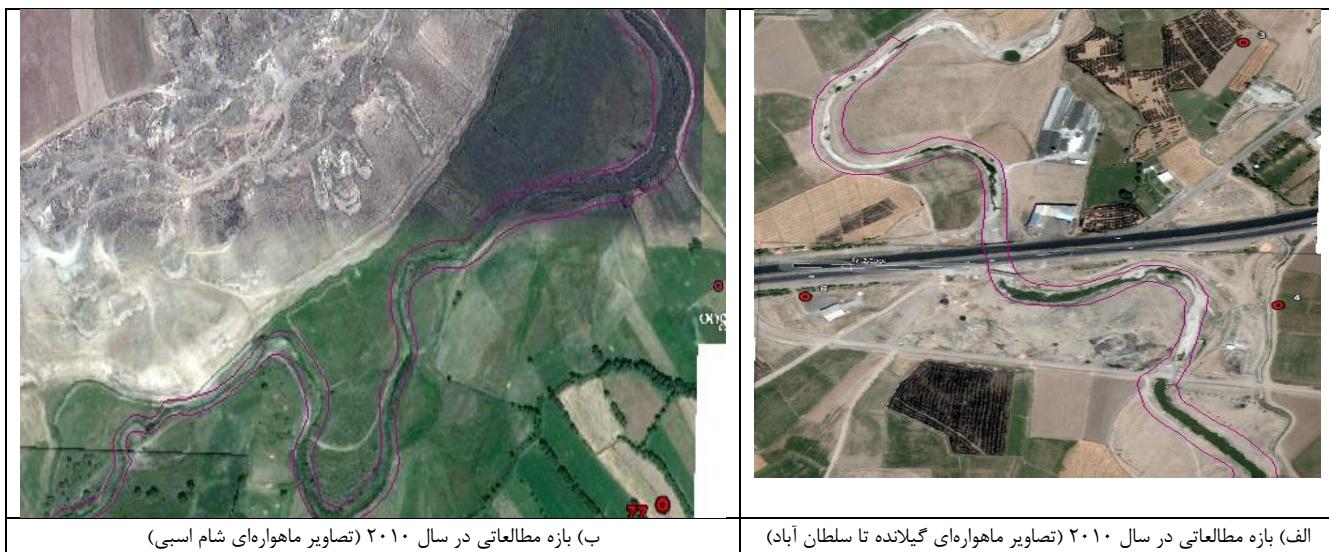
شکل (۱): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه

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



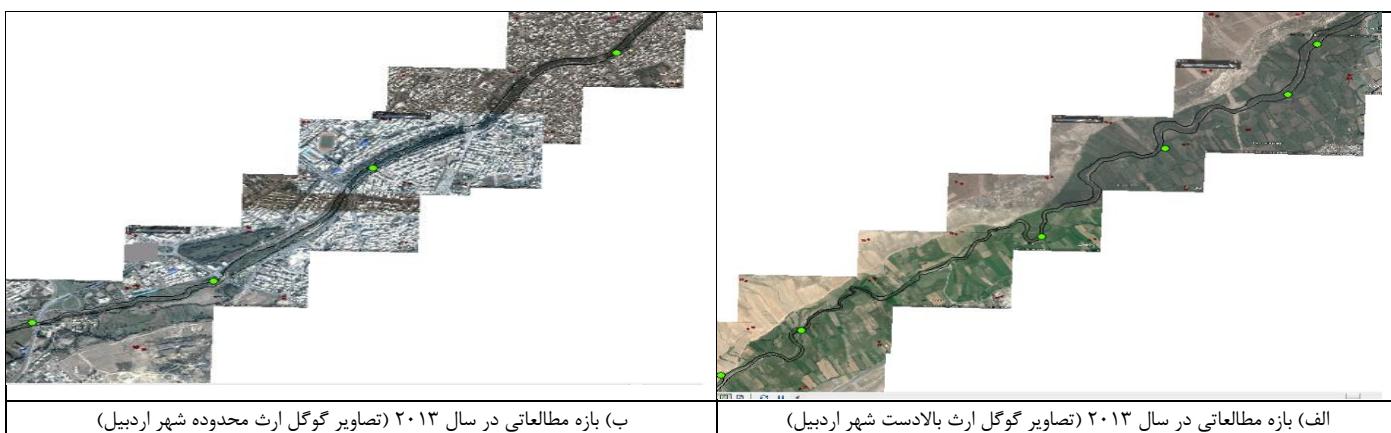
شکل (۲): تصاویری از بازه‌های رودخانه مورد مطالعه در ارزیابی تغییرات فرسایش کناری رودخانه

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



شکل (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 کارائی 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

ردیف	رابطه	توضیحات	منبع
(۱)	$BE_X = 0.016(Q_{1.58})^{0.6}$	BEx، میزان فرسایش کناری به متر در سال، $Q_{1.58}$ دبی سیالاب (متر مکعب بر ثانیه) با دوره بازگشت ۱/۵۸ سال با فرض جریان مقطع پر	(اسماعلی و عبدالله‌ی، ۲۰۱۰)
(۲)	$BE_X = 0.008(1 - PR_X)(Q_{1.58})^{0.6}$	BEx، میزان فرسایش کناری به متر در سال، PR_X نسبت کناره با پوشش گیاهی طبیعی دست نخورده	(هوگز و پروس، ۲۰۰۳)
(۳)	$BC_X = 18(1 - PR_X)(Q_{1.58})^{0.6}L_X$	BCX، 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 $1/5$ (تن بر متر مکعب)	(اسماعلی و عبدالله‌ی، ۲۰۱۰)
(۴)	$BE_X = 0.00002\rho g Q_X S_X (1 - PR_X)(1 - e^{-0.008f_X})$	QX، متوسط جریان سالانه به میلیون لیتر در سال، f_X عرض دشت سیالابی (متر)، ρ وزن مخصوص آب، S_X شتاب نقل، g شتاب نقل، S_X شب	(اسماعلی و عبدالله‌ی، ۲۰۱۰)

در ادامه، متغیرهای مستقل (در ۴ دسته کلی شامل عوامل توبوگرافی، 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 توبوگرافی، متغیرهای شبیب زمین، و عامل طول به منظور ارزیابی خطر فرسایش کناری انتخاب شدند. در بخش عوامل مربوط به خاک و زمین، مواردی مانند نوع خاک، وضعیت زمین‌شناسی، ژئومرفولوژی 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^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰۴۹۱۷).

نتائج و بحث

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

جدول (٢): مشخصات فیزیوگرافی محدوده بالادست حوضه‌های موردمطالعه

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

Table (2). Hydrographic characteristics of the upstream area of the studied River Reaches		
ویژگی	پل الماس	گیلانده
مساحت (کیلومترمربع)	۱۰۱۲/۰۶	۱۵۴/۳۳
قطر دایره هم سطح (کیلومتر)	۳۵/۹۱	۱۴/۰۲
تراکم زهکشی (کیلومتردر 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 (%)	۰/۹	۰/۴۴
دبی اوج	۱۰۱/۵۶	۲۷/۲۳
محیط (کیلومتر)	۱۵۶/۳۳	۶۶/۴۸

ویژگی های زمین شناسی و مقاومت به فرسایش منطقه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات نقشه های زمین شناسی، حوضه آبریز بالخلوچای دارای انواع رخساره های سنگی و رسوبی متعلق به دوران سنوزئنیک است که تحت تأثیر خدادادها و ف آبند ها، می ساخته، به وقوع بیوسسه و د. گسته حوضه با کنده اند (جدوا ۳).

حوزه (۳) پوشش چاه و مقالع تبریز تندخا و زنجباره فرساد شهرستان خوی و هزار آباد

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

Table (3): Characteristics and resistance of geological formations and rocks to erosion in the study area			
بازه	علامت	خصوصیات سنگ شناسی	ضریب مقاومت به فرسایش
۱	Ng ml 2	توف، مارن و آهک آب شیرین	۱
۲	Ng t 2	تناوب توف، لایپلی توف، توف برش، پومیس، لاهار و آهک آب شیرین	۱
۳	Ng c 2	کنگلومرا همراه با لایه هایی از ماسه سنگ مارن و آهک آب شیرین	۴
۴	Qt2	رسوبات دشت، پادگان های ابرفتی جوان و مخروط افکنه ها	۷

ویژگی‌های خاک و تیپ اراضی بازه‌های مورد مطالعه

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

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

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 فائق	پوشش گیاهی	محدودیت‌های اساسی اراضی	قابلیت استفاده
کوهها	تپه‌های مرتفع سنگی با قلل تیز و فرسایش بسیار زیاد	۵۵	خاک خلی کم عمق تا کم عمق غیریکنواخت/برون‌زدگی سنگی	بدون پوشش گیاهی اراضی باز	شیب بسیار تندر/فرسایش بسیار زیاد/محدودیت عمق خاک	اراضی باز/تناسب بسیار کم برای چراغاه
فلات‌ها و تراس‌های فوکانی	فلاتها و تراس‌های مرتفع و سطوح فرسایش یافته قدیمی	۱	خاک کم عمق تا نیمه عمیق با بافت متوسط تا سنگین	پوشش کم تا متوسط گیاهان مرتعی/دیم	پستی و بلندی/ فرسایش/سنگریزه	نسبتمناسب برای چراغاه/تناسب کم تا متوسط برای دیم
دشت‌های رسوبی	دشت‌های رسوبی مسطح با شیب بسیار ملایم	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	۱	خاک عمیق با بافت سنگین و شوری زیاد/سطح استانی بالا	گیاهان مقاوم به شوری با پراکندگی زیاد/اراضی باز	شوری بسیار زیاد/سلیکری/زهکشی نامناسب	اراضی باز/تناسب کم برای چراغاه
دشت‌های رسوبی	دشت‌های رسوبی مسطح با شوری زیاد	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 طولانی‌مدت ایستگاه پل الماس و گیلاند (در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۴۸) استفاده شد و برابر ۲/۸۹ محاسبه شد. نتایج برآورد مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای بر اساس روابط تجربی ارائه شده نشان داد که مقادیر برآورده دارای بیش‌برآورده و یا کم‌برآورده 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

متغیر	بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
سطح موثر رودخانه (هکتار)	۵/۹۳	۲۱/۶۰	۱۹/۴۲	۵/۳۱	۹/۶۹	۷/۰۸	۴/۴۵
مساحت زیرحوضه (کیلومترمربع)	۱۶/۹۷	۴۴/۹۴	۶۷/۶۲	۱۰/۰۳	۹/۹۸	۹/۶۹	۱۴/۵۵
محیط زیرحوضه (کیلومتر)	۲۴/۵۷	۳۹/۴۲	۴۲/۵۶	۳۰/۶۰	۱۹/۶۴	۱۰/۰۳	۱۰/۲۶/۴۸
مساحت بالادست (کیلومترمربع)	۱۰۲۹/۰۲	۱۰۳۷/۹۵	۱۰۷۹/۶۷	۱۰۹۰/۲۰	۱۰۲۲/۰۳	۱۰/۰۳	۱۰/۰۸
قطر دایره هم‌سطح (کیلومتر)	۴/۶۵	۷/۵۷	۹/۲۸	۳/۶۶	۳/۵۷	۳/۵۷	۲/۳۸
محیط بازه (کیلومتر)	۵/۹۹	۱۹/۲۷	۱۶/۰۶	۳/۷۱	۹/۹۲	۹/۹۲	۶/۷۲

۰.
۱.
۲.
۳.
۴.
۵.
۶.
۷.
۸.
۹.

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

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

جدول (۶): نتایج مدل سازی رگرسیونی فرسایش کنار رودخانه‌ای بر اساس متغیرهای هیدرولوژی در بازه‌های مورد مطالعه

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

پارامترها/روش	ضریب تعیین	ضریب اصلاح شده	خطای استاندارد برآورد	ضرایب	B	استاندارد خطای	ضریب بتا	t آماره	معنی داری	سطح
فیزیوگرافی/گام به گام	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶	۰/۵۸۳	ضریب ثابت	-۳۵/۷۵	-۹/۲۶	-۳/۸۵	-۰/۰۳۱		
				Pr	۱/۰۹۸	۰/۹۴۱	۰/۴۶۴	۰/۰۰۰		
				Au	۰/۰۳۴	۰/۱۴۷	۳/۸۲	۰/۰۳۱		
				ضریب ثابت	۳۸/۴۱	۲۸/۷۳	-	۱/۳۱۳		
هیدرولوژی/اینتر	۰/۴۲۸	۰/۷۷۱	۰/۱۹۹	Q	-۷۲/۸۶	۳۰/۵۳	-۱/۵۳	-۰/۱۳۷		
				Qp	-۱/۸۹	۱/۰/۰۱	-۰/۰/۱۸۹	۰/۸۶۷		
				Tc	۴/۸۸	۲/۶۱	۱/۱۷	۱/۸۷۱		
				ضریب ثابت	۵/۹۸	-۰/۴۷۱	-۰/۴۳۶	۰/۰۰۱		
زمینی/گام به گام	۰/۹۸۸	۰/۹۹۳	۰/۷۷۳	Rt	۰/۱۴۱	۰/۰۰۹	۰/۷۲۹	۰/۰۰۱		
				Ra	۰/۳۰	۰/۰۲۴	۰/۶۱۲	۱۲/۶۳		
				ضریب ثابت	-۵۱/۱۷	۱۳/۲۶	-۳/۸۵	-۰/۰۳۱		
				Pr	۱/۰۹	۰/۰۴۵	۰/۹۴۰	۲۴/۴۹		
همه متغیرها/گام به گام	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶	۰/۵۸۲	Qp	۰/۴۹۲	۰/۱۲۸	۰/۱۴۷	۳/۸۳		

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 Z، همکشی.

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 modelis in river bank erosion estimation in the study area

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

بر اساس تحلیل روابط رگرسیونی، می‌توان گفت که مهم‌ترین عوامل مؤثر در رخداد فرسایش کنار رودخانه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر اولویت‌بندی نمود. در دسته عوامل فیزیوگرافی، عامل محیط بازه و نیز مساحت محدوده بالا دست با ضرایب به ترتیب $1/0.98$ و $0/0.34$ جزو عوامل مهم معرفی شده اند و مقدار ضریب تبیین معادله رگرسیونی برابر $0/0.993$ به دست آمده است. قابل ذکر است که در رویکرد به کارگیری متغیرهای هیدرولوژی، هیچ‌کدام از متغیرها رابطه معنی‌داری با مقادیر فرسایش کنار رودخانه‌ای ارائه ندادند، در این خصوص سطح معنی‌داری مدل استخراج شده برابر $0/313$ بود که از نظر اماری معنی‌دار نبود. در دسته عوامل زمینی، متغیر مساحت محدوده مسکونی و مساحت محدوده مرتعی با ضرایب مدل برابر $0/141$ و $0/30$ به عنوان متغیرهای مهم مدل رگرسیونی ارائه شده معرفی شده است و ضریب تبیین معادله ارائه شده برابر $0/988$ 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 $1/0.9$ و $0/0.492$)، بیشترین تاثیر را بر مقدار فرسایش کنار رودخانه‌ای داشته‌اند و مقدار ضریب تبیین مدل ارائه شده معادل $0/993$ 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 موثر بر فرسایش کناری رودخانه در سال‌های مورد مطالعه

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

سطح موثر 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 موثر فرسایش کناره‌ای در طول زمان افزایش یافته است که در تولید رسوبات معلق موثر 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 آبدی 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 بالیخلوچای در استان اردبیل، پس از تعیین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (مساحت تحت تأثیر 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 ضربی 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، پیش‌ترين تاثير 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.

References

- 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 Germi 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.
- Esfandiari 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
- Esfandyari-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., ... & Zaimes, 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-Odoux, 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., Hamzeei, M., & Alaei, N. (2024). Temporal variations landscape metrics of vegetation riparian areas in Qharesou River, Ardabil Province. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 24(72), 65-79.
- Mostafazadeh, R., Esfandyari 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., & Esfandiyari 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.