

پهنه‌بندی و تحلیل فرسایش‌پذیری کناره رود در بالادست رودخانه نکا، استان مازندران

رضا اسماعیلی*؛ سارا معلمی^۱

۱- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۵/۲۴ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۵

چکیده

فرسایش کرانه رود فرایند پیچیده‌ای است که از تأثیرگذاری عوامل مختلف به وجود می‌آید و بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی رودخانه تأثیر می‌گذارد. بسیاری از مطالعات فرسایش کرانه رود به صورت محدود و محلی انجام می‌شود اما در این مقاله فرسایش‌پذیری کرانه رود در بالادست رودخانه نکا در مقیاس بازه با استفاده از روش «پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کرانه‌ای» یا BEVZ مورد بررسی قرار گرفت. پس از ترسیم مسیر رود از گوگل ارث، محدوده‌ای به عرض ۲۰ متر از کناره رود به عنوان حریم در نظر گرفته شد و پارامترهای مؤثر در فرسایش کناره رود شامل شیب کانال، پوشش گیاهی، لیتولوژی، شیب کرانه، ارتفاع کرانه، شاخص مئاندر و عامل انسانی برای این حریم مورد بررسی قرار گرفتند و لایه‌های اطلاعاتی آنها در GIS تهیه گردید. با هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی فرسایش‌پذیری کرانه رود در پنج کلاس طبقه‌بندی شد. براساس این نقشه ۶۵ و ۲۰ درصد از طول کرانه رود در محدوده مورد مطالعه به ترتیب فرسایش‌پذیری متوسط و زیاد دارند. درصد کرانه‌های با فرسایش‌پذیری زیاد با میانگین جابجایی کانال طی دوره ۱۳۸۵-۱۳۹۸ در بازه‌های مختلف ضریب همبستگی نسبتاً بالایی (۰/۸۴) را نشان می‌دهند. از میان پارامترهای مورد بررسی لیتولوژی سست و منفصل، پوشش گیاهی کم تراکم و برداشت شن و ماسه بیشترین تأثیر را در فرسایش‌پذیری کرانه رودخانه داشته‌اند. مطالعات فرسایش کرانه رود در مقیاس بازه می‌تواند با ایجاد نگرش تحلیل فضایی در شناسایی مناطق با حساسیت بیشتر و ارتباط آن با بازه‌های بالادست و پایین دست در مدیریت کانال رود نقش مؤثری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه نکا، فرسایش کرانه رود، مازندران، BEVZ.

مقدمه

فرسایش کناره رود فرایند پیچیده‌ای است که عوامل مختلفی در ایجاد آن نقش دارند. از جنبه ژئومورفولوژیکی، وقوع فرسایش کناره رود و ورود رسوبات و واریزه‌های چوبی (تنه درختان) به درون کانال، موجب تغییر در مسیر رودخانه، توسعه دشت سیلابی و مورفولوژی کانال رود می‌شود. این اثرات بر ویژگی‌های اکولوژیکی محیط رودخانه‌ای مانند تنوع زیستگاه‌های آبی و گونه‌های گیاهی و جانوری حاشیه رود (ری‌پارین) تأثیرگذار خواهد بود. به علاوه اثرات اقتصادی-اجتماعی، تخریب زمین‌ها و زیرساخت‌ها و دارایی‌های انسان را به همراه دارند. بر این اساس فرسایش کناره رود یک مشکل مدیریتی مهم در امتداد رودخانه‌های آبرفتی است. برای اندازه‌گیری فرسایش کناره رود، تکنیک‌های متعددی براساس فرایندها و مکانیسم‌ها، مقیاس زمانی، تنوع محیط‌های رودخانه‌ای (اندازه کانال و رژیم جریان)، تغییرات تکنولوژیکی در طی زمان و محدودیت‌های زمانی و مالی به وجود آمده‌اند (Lawler, 1993). این تکنیک‌ها را از نظر مقیاس می‌توان به دو مقیاس محلی و بازه‌ای تفکیک نمود. روش‌هایی مانند شاخص خطر فرسایش کناره رود یا $BEHI^1$ (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶)، مدل پایداری کناره و فرسایش پای آن یا $BSTEM^2$ (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۷؛ Varouchakis et al, 2016) و میله‌های فرسایشی (Veihe et al, 2016) در مقیاس محلی (بازه‌های کوچک) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در مقیاس بازه، فرسایش کناره رود در چندین کیلومتر از طول رودخانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. استفاده از عکس‌های هوایی و بررسی تغییرات جابجایی مسیر رودخانه‌ها و مهاجرت مئاندرها در زمان‌های مختلف یکی از این روش‌های رایج در تخمین و اندازه‌گیری فرسایش کناره رود است (رضایی مقدم

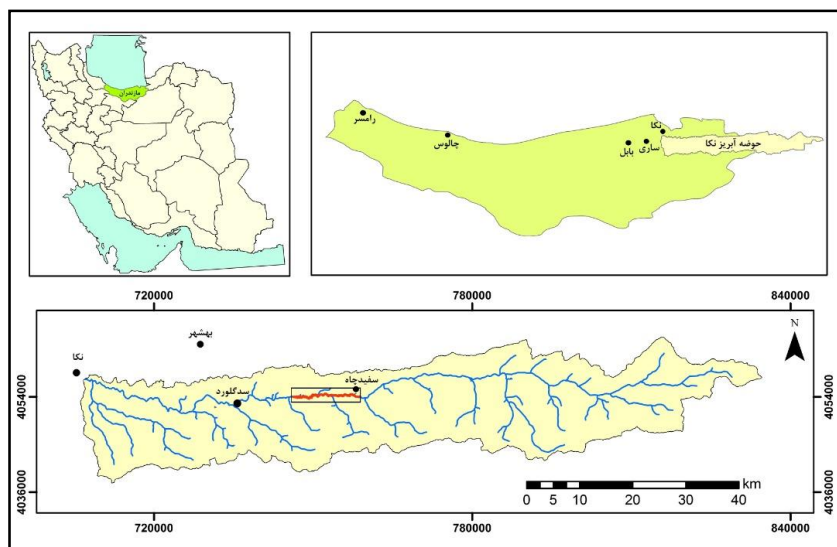
و همکاران، ۱۹۹۳؛ Piégay et al, 2005; Dragičević et al, 2017). مهم‌ترین مزیت به کارگیری عکس‌های هوایی، ارزیابی چندین ساله و محدوده پوششی نسبتاً وسیع است (Kessler et al, 2013). اگرچه، پوشش زمانی نامناسب و برخی از مشکلات در دسترسی به این عکس‌ها محدودیت محسوب می‌شوند. از دیگر منابع آنالیز فرسایش کناره رود در مقیاس بازه، تصاویر ماهواره‌ای (نوحه‌گر و همکاران، ۱۳۹۵؛ خیری‌زاده آروق و همکاران، ۱۳۹۶؛ Thakur et al, 2013; Mukherjee et al, 2017)، عکس‌های هوایی تهیه شده از پهپادها^۳ (Hamshaw et al, 2019) و داده‌های لیدار (Longoni et al, 2016; Biron et al, 2005; Thoma et al, 2013) هستند. در برخی از تحقیقات براساس مدل‌های عددی مانند مدل‌های هیدرودینامیکی و مدل‌های گسیختگی کناره، فرسایش کناره رود مورد ارزیابی قرار گرفتند (رستمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Jia et al, 2010; Nardi et al, 2016; Abderrezzak et al, 2016; Bosa et al, 2018; Biswas et al, 2016). به دلیل دشواری و هزینه تشخیص فرسایش کناره رود، محققین روش‌های تجربی ساده‌تری را برای تخمین فرسایش کناره در طول کل رودخانه مورد استفاده قرار داده‌اند (Kessler et al, 2013). برای نمونه می‌توان به کارهای هیرن و همکاران (Heeren et al, 2012) و باندیوپاده‌یای و همکاران (Bandyopadhyay et al, 2014) اشاره نمود. در مطالعاتی که با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای انجام می‌شود، مسیر و میزان تغییرات در دوره‌های مطالعاتی قابل ثبت است و بر این اساس می‌توان کریدورهای فرسایشی را شناسایی نمود. اما با کمی کردن عوامل فرسایش‌پذیری و میزان مقاومت کناره می‌توان شرایط بالقوه هر کناره را نسبت به فرسایش ارزیابی نمود. روش‌های زمینی و با مقیاس بزرگ قطعاً با

شمالی و طول جغرافیایی $53^{\circ}17'51''$ تا $54^{\circ}44'28''$ شرقی بین دو استان مازندران و گلستان واقع گردیده است (شکل ۱). مساحت این حوضه 1902 کیلومتر مربع طول رودخانه اصلی 78 کیلومتر و با جهت جریان شرقی - غربی است. زمین شناسی منطقه از سنگ های فیلیت خاکستری اردویسین (پالئوزوئیک) تا رسوبات آبرفتی کواترن را شامل می شود. مارن، سنگ آهک، دولومیت و کنگلومرا بیشترین پراکنش را در حوضه دارند. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه مورد مطالعه 670 و 3580 متر است. میانگین بارش سالانه در قسمت غرب حوضه (سد گلورد) 820 میلی متر بوده و در منتهی الیه حوضه در سمت شرق به 200 میلی متر کاهش می یابد. میانگین دبی سالانه رودخانه نکا در ایستگاه سفید چاه $0/62$ مترمکعب و در ایستگاه گلورد $2/39$ مترمکعب است که بیشترین مقدار میانگین مربوط به ماه های اسفند و فروردین می باشد. جهت بررسی فرسایش کرانه رود بازه های از رودخانه نکا به طول 17 کیلومتر از روستای سفیدچاه تا نزدیکی سد گلورد مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).

دقت بیشتری فرسایش کناره رود را به صورت نقطه ای محلی نشان می دهند و تکنیک های اندازه گیری آنها پرهزینه بوده و زمان بر هستند. روش های بازه ای اگرچه در سطح وسیع تری انجام می شوند، اما می توانند پتانسیل فرسایش کناره رود را در مطالعات منطقه ای، مکان یابی اولیه فعالیت های انسانی و ارتباط بازه های در بیان رسوب فراهم نمایند. با تحلیل بازه های مختلف از نظر فرسایش کناره رود، امکان شناسایی مناطق حساس برای مطالعات دقیق تر امکان پذیر خواهد بود. لذا به کارگیری روش هایی که بتواند با خطای کمتری فرسایش پذیری کناره رود را مورد ارزیابی قرار دهد می تواند برای مدیریت رودخانه مطلوب باشد. از این رو، هدف اصلی از این تحقیق، تهیه نقشه و طبقه بندی فرسایش پذیری کرانه رود و تحلیل آسیب پذیری آن در مقیاس بازه است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این مقاله در بالادست حوضه آبریز رودخانه نکا قرار دارد. این حوضه در عرض جغرافیایی $36^{\circ}42'58''$ تا $36^{\circ}25'38''$

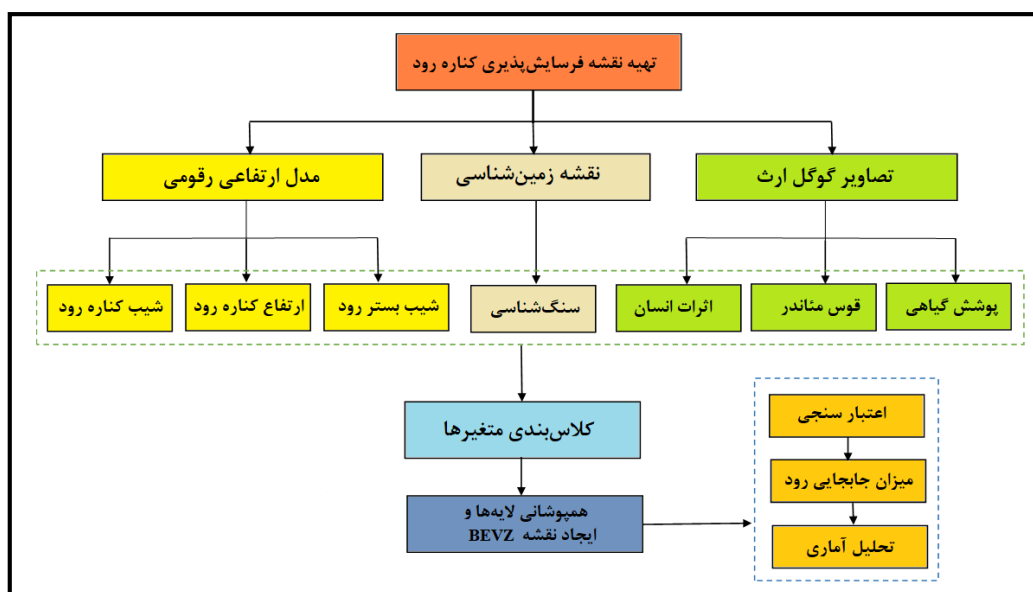


شکل ۱: نقشه موقعیت حوضه آبریز نکا و بازه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

کرانه رود، شاخص مئاندر، گرادیان طولی رود، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و عامل انسانی مورد استفاده قرار گرفت. در اینجا پارامترهای فوق با اندکی تغییرات شامل تفکیک دو پارامتر ارتفاع و شیب کرانه و اضافه شدن عامل لیتولوژی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ مراحل کلی انجام کار را در بازه‌های مورد مطالعه از رودخانه نکا نشان می‌دهد.

در این مقاله برای بررسی فرسایش کرانه رودخانه از روش پهنه‌بندی آسیب‌پذیری فرسایش کرانه‌ای^۴ (BEVZ) استفاده شده است. این روش اولین بار توسط باندیوپادهیای و همکاران (Bandyopadhyay et al, 2014) برای پهنه‌بندی خطر فرسایش کرانه‌ای رود در رودخانه ه‌آرای هند پیشنهاد گردید. در این روش شش پارامتر شیب



شکل ۲: مراحل انجام کار برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری کناره رود در محدوده مورد مطالعه

اختیاری بوده و با توجه به محدوده فرسایش‌پذیری کرانه در نظر گرفته شده است.

جهت تسهیل در اندازه‌گیری‌ها و محاسبات محدوده مورد مطالعه به ۴ بازه تقسیم‌بندی شد. روش‌های محاسبه پارامترها و طبقه‌بندی آنها به صورت زیر بوده است.

ارتفاع کرانه رود: برای محاسبه شیب کرانه رودخانه از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر (دانلود شده از سایت <https://search.asf.alaska.edu/>) استفاده شد. در امتداد مسیر رودخانه تعداد ۱۰۰ مقطع عرضی از کانال رود ترسیم شد و با وارد کردن مقادیر ارتفاعی

برای انجام این کار بخشی از رود به طول ۱۷ کیلومتر در بالادست رودخانه نکا از روستای سفید چاه تا قبل از سد گلورد در نظر گرفته شد. محدوده مورد مطالعه به علت امکان دسترسی برای بررسی‌های میدانی انتخاب گردید، سایر قسمت‌های حوضه به علت گسترش طولی حوضه، دوری از مناطق مسکونی و فقدان جاده دسترسی عملاً برای مطالعات میدانی مناسب نبود. مسیر رودخانه با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث ترسیم شد و در نرم افزار Arc GIS از هر دو طرف کرانه رود، بافوری به عرض ۲۰ متر جهت بررسی فرسایش‌پذیری کرانه رود مشخص گردید. عرض ۲۰ متری از کناره رود

آنها، شاخص مئاندری رود محاسبه گردید. برای کرانه‌های محدب که رسوبگذاری در آن صورت می‌گیرد ضریب ۰/۵ داده شد و سایر کرانه‌ها با ضریب تقعر قوس‌ها امتیازدهی شدند (جدول ۱). پوشش گیاهی: ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، شاخص NDVI در حوضه مورد مطالعه به دست آمد، اما نوع و ارتفاع گیاهان در نقشه حاصله قابل تفکیک نبود. لذا برای تهیه لایه پوشش گیاهی حاشیه رود از تصاویر گوگل‌ارث به صورت بصری استفاده شد. زمین‌های اطراف رودخانه در محدوده بافر براساس تراکم و ارتفاع گیاهان به شش گروه تقسیم‌بندی و امتیازدهی شدند (جدول ۱). این شش طبقه عبارتند از مناطق فاقد پوشش، مناطق با پوشش بسیارکم (زمین‌های کشاورزی و علفزارهای کم ارتفاع)، مناطق کم تراکم (علفزارهای متراکم و درختچه‌ها)، تراکم متوسط (درخت‌های پراکنده)، تراکم زیاد (درخت‌های متراکم با کمی فضای خالی در بین آنها)، تراکم بسیار زیاد (درختان بسیار متراکم و بدون فضای خالی).

کرانه‌های راست و چپ در نقشه بافر رود و درونیایی داده‌ها، لایه ارتفاع کرانه رود تهیه گردید. این لایه ارتفاعی در پنج گروه طبقه‌بندی شدند (جدول ۱). شیب کرانه رود: با استفاده از مقادیر اختلاف ارتفاع کرانه که در مرحله قبل محاسبه گردید و اندازه‌گیری فاصله افقی از لبه رودخانه تا کرانه و محاسبه نسبت اختلاف ارتفاع کرانه به فاصله افقی، شیب کرانه رود محاسبه گردید (شکل ۳). با درونیایی داده‌های به دست آمده در نقشه بافر رود، لایه شیب کرانه تهیه و در پنج طبقه تقسیم‌بندی شد (جدول ۱).

شیب طولی رودخانه: برای محاسبه گرادیان طولی رود، مسیر رودخانه به فواصل ۵۰۰ متری تقسیم شدند و از نسبت اختلاف ارتفاع دو نقطه به فاصله آنها، شیب کانال رود بر حسب متر بر متر به دست آمد. سپس لایه شیب برحسب مقادیر به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱).

شاخص مئاندر: با ترسیم مسیر رودخانه از گوگل ارث، نسبت طول قوس‌های رود به فاصله مستقیم

جدول ۱: طبقه‌بندی مقادیر پارامترهای مورد استفاده در فرسایش‌پذیری کرانه رود (Bandyopadhyay et al, 2014) با کمی تغییر)

پارامترها	امتیاز		۱	۲	۳	۴	۵	۶
	گروه	طبقات						
گرادیان طولی رود	بسیار کم	گروه	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد	-	-
	۰/۰۰۱	مقدار (متر بر متر)	۰/۰-۰۰۱/۰۱	۰/۰-۰۴/۰۱	۰/۰-۱/۰۴	۰/۰	-	-
شاخص مئاندر	محدب	گروه	مستقیم	متوسط	مئاندری	شدیداً مئاندری	-	-
	۰/۵	مقدار	۱/۱-۵	۱/۱-۷/۵	۲/۱-۳/۷	۲/۳۰	-	-
ارتفاع کرانه	بسیار کم	گروه	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد	-	-
	۰-۱/۱	مقدار (متر)	۱-۲	۲-۴	۴-۶	۷	-	-
شیب کرانه	بسیار کم	گروه	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد	-	-
	۱۰	مقدار (درجه)	۱۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۶۰	۶۰	-	-
پوشش گیاهی	تراکم بسیار زیاد	گروه	تراکم زیاد	تراکم متوسط	کم تراکم	تراکم بسیار کم	فاقد پوشش	-
	>۸۰	مقدار به درصد	۸۰-۶۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۱۰-۲۰	<۱۰	-



شکل ۳: روش اندازه‌گیری شیب کناره بر روی زمین، A-B فاصله افقی از لبه رود تا کناره، B-C ارتفاع کناره است. زاویه تشکیل شده بین قاعده و وتر مثلث، شیب کناره رود است.

جابجایی کانال رود، مسیر وسط رودخانه در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۸ از گوگل‌ارت ترسیم گردید و با فاصله ثابت ۲۵۰ متر میزان جابجایی کانال اندازه‌گیری شد و میانگین جابجایی محاسبه گردید. برای محاسبات آماری مانند آنالیز واریانس و ضریب همبستگی از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

بحث و نتایج

پارامترهای مؤثر بر فرسایش کرانه رود در محدوده مورد مطالعه محاسبه شدند و به صورت لایه‌های اطلاعاتی مورد بررسی قرار گرفتند. هرکدام از پارامترها به کلاس‌های مختلفی طبقه‌بندی شدند که مقدار آنها در طول رودخانه در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس جدول ۲ بیش از ۶۶ درصد مسیر رودخانه در شیب بین ۰/۰۱ - ۰/۰۰۱ متر بر متر قرار گرفته‌اند. از نظر لیتولوژی، ۷۹/۵ درصد مسیر رود از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است (شکل ۴الف). شیب کرانه رود در ۹۶/۶ درصد از مسیر رود کمتر از ۱۰ درجه بوده است. ارتفاع کرانه در ۵۹ درصد از مسیر رودخانه بین ۱ تا ۲ متر متغیر بوده است (شکل ۴ب). ۶۳ درصد پوشش گیاهی

لیتولوژی: برای تهیه لایه لیتولوژی در محدوده حاشیه رودخانه از نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و بازدید میدانی استفاده شد و براساس مقاومت سنگ‌ها در سه گروه طبقه‌بندی شدند.

عامل انسانی: لایه فعالیت‌های انسانی در محدوده مورد مطالعه با استفاده از تصاویر گوگل‌ارت و بررسی‌های میدانی تهیه شدند. مهم‌ترین عامل انسانی در رودخانه مورد مطالعه برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه است که محدوده‌ای به شعاع ۵۰۰ متر از بالادست و پایین دست محدوده برداشت به عنوان حریم در نظر گرفته شد. از آنجایی که برداشت به صورت محدود و محلی انجام شده است در گروه متوسط قرار گرفتند. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی فوق و طبقه‌بندی آنها در نرم‌افزار ARC GIS با استفاده از جمع هم‌پوشانی نقشه نهایی به دست آمد و براساس حداقل و حداکثر امتیازات، فرسایش‌پذیری کرانه رود در پنج گروه طبقه‌بندی شد. برای تحلیل میزان فرسایش‌پذیری کرانه رود، مقدار جابجایی کانال در یک دوره ۱۳ ساله مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای اندازه‌گیری

کرانه رودخانه به صورت بسیار کم تراکم و شامل ده درصد کرانه‌های رودخانه از درختان متراکم و علفزارها و درختان پراکنده است (شکل ۳). تقریباً بسیار پرتراکم تشکیل شده است.

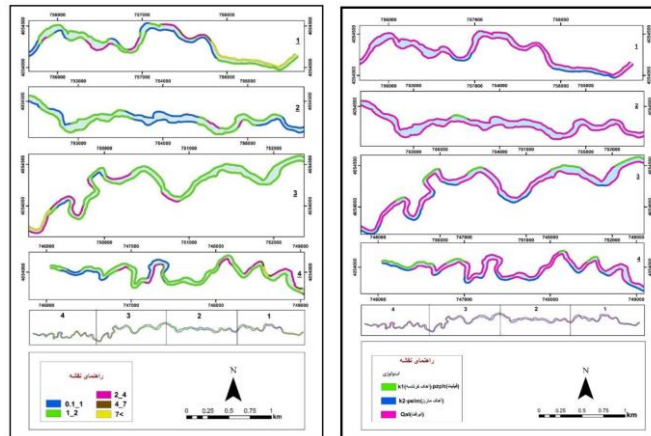
جدول ۲: طبقه‌بندی پارامترهای مؤثر در فرسایش کرانه رودخانه نکا (نگارندگان)

پارامتر	امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶
گرادین طولی رودخانه	کلاس شیب رود	<۰/۰۰۱	۰-۰/۰۱	۰/۰-۰/۰۰۱	۰/۰-۰/۰۰۴	۰/۰-۰/۰۴/۱	۰/۱<
	طول(متر)	۴۹۵/۹	۱۱۴۹۵/۷	۴۵۲۶/۲	۸۵۶/۸	-	-
	طول(درصد)	۲/۸۵	۶۶/۱۶	۲۶/۵	۴/۹۳	-	-
پوشش گیاهی	کلاس	بسیار متراکم	متراکم	تراکم متوسط	کم تراکم	بسیار کم تراکم	بدون پوشش
	طول(متر)	۵۰۳	۱۲۷۲	۷۲۰	۳۰۵۲	۱۰۹۰۸/۷۵	۶۹۴
	طول(درصد)	۲/۹۲	۷/۴	۴/۲	۱۷/۸	۶۳/۶	۴/۰۴
شیب کرانه	کلاس شیب(درجه)	<۱۰	۲۰-۱۰	۳۵-۲۰	۶۰-۳۵	۶۰ <	-
	طول(متر)	۱۶۳۴۳/۷	۱۷۵	۲۸۵	۱۲۱/۲	-	-
	طول(درصد)	۹۶/۵	۱/۰۲	۱/۶۶	۰/۷	-	-
ارتفاع کرانه	کلاس ارتفاع(متر)	۰-۱/۱	۱-۲	۲-۴	۴-۷	۷<	-
	طول(متر)	۳۵۳۰/۷	۱۰۱۳۱/۲	۲۳۱۵/۷	۲۶۲/۹	۹۰۶	-
	طول(درصد)	۲۰/۵۵	۵۹	۱۱	۱/۵۶	۷/۸۹	-
مئاندر	کلاس ضریب مئاندر	۰/۵	۱/۱-۵	۱/۱-۷۰/۵۱	۱-۷۱	۲/۳۰<	-
	طول (متر)	۴۵۳۷/۵	۱۰۴۰۹/۵	۱۰۰۶/۲	۱۱۹۲/۵	-	-
	طول(درصد)	۲۶/۴	۶۰/۷۳	۵/۸۶	۶/۹۵	-	-
لیتولوژی	کلاس سنگ‌شناسی	آهک و فیلیت	مارن	-	-	آبرفت	-
	طول(متر)	۱۳۸۸	-	۱۲۲۲/۵	-	۱۳۶۳۷/۵	-
	طول(درصد)	۸/۰۷	-	۱۲/۴۲	-	۷۹/۵۵	-
دخالت انسانی	کلاس دخالت انسانی	بدون دخالت	-	برداشت شن و ماسه	-	-	-
	طول(متر)	۱۱۴۹۷/۷	-	۵۸۷۷	-	-	-
	طول(درصد)	۶۶/۱۷	-	۳۳/۸۲	-	-	-

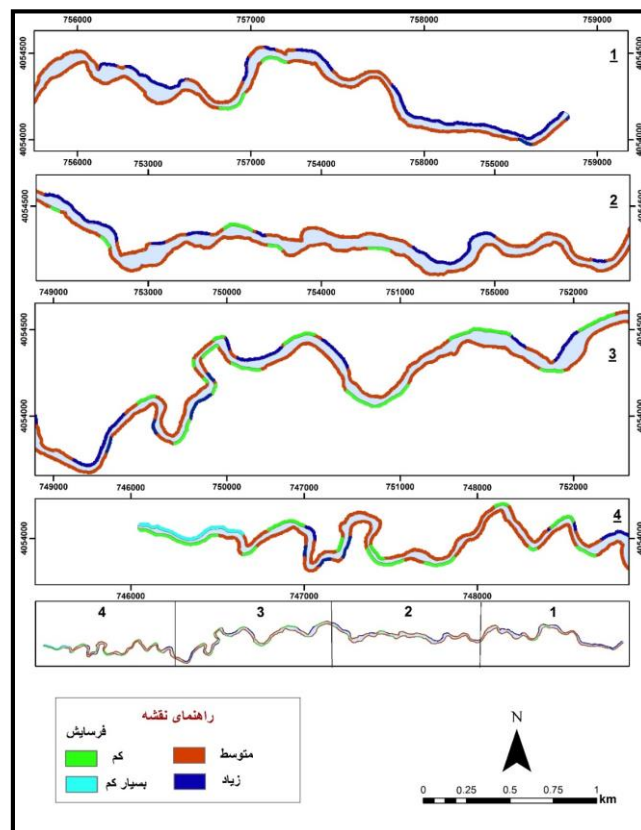
ضریب پیچان رودی در ۶۰/۷ درصد طول رودخانه بین ۱/۵ - ۱ قرار دارد و ۲۶/۴ درصد از مسیر رود در قسمت محدب رودخانه قرار گرفته‌اند. عامل انسانی که در محدوده مورد مطالعه به صورت برداشت شن و ماسه است نزدیک به ۳۴ درصد از مسیر رود شامل می‌شود. فرسایش‌پذیری کرانه رود در بازه‌های مختلف هم متفاوت بوده‌اند. بازه یک با ۲۹/۷ درصد، بیشترین کرانه‌های با فرسایش‌پذیری

۲۱)، متوسط (۲۱-۲۸)، زیاد (۲۸-۳۵) و بسیار زیاد (۳۵-۴۲) طبقه‌بندی شدند (شکل ۵). از کل محدوده مورد مطالعه، ۶۵ و ۲۰ درصد کرانه‌های رود به ترتیب قابلیت فرسایش‌پذیری متوسط و زیاد دارند.

زیاد را نسبت به سایر بازه‌ها داشته است و بازه چهار با ۸/۹ درصد کمترین میزان کرانه‌های فرسایش‌پذیر را شامل شده است (جدول ۳). با هم-پوشانی لایه‌های مختلف اطلاعاتی، نقشه نهایی فرسایش‌پذیری کناره رود در کلاس‌های مختلف شامل فرسایش‌پذیری بسیار کم (۷-۱۴)، کم (۱۴-۱۴)



شکل ۴: الف) لایه لیتولوژی کناره رودخانه و ب) لایه ارتفاع کرانه (به متر) رودخانه نکا در محدوده مورد مطالعه



شکل ۵: نقشه فرسایش‌پذیری کرانه رودخانه نکا در محدوده مورد مطالعه

جدول ۳: طول فرسایش کرانه رود در رودخانه نکا به تفکیک بازه

بازه‌ها	اندازه‌ها	فرسایش بسیار کم	فرسایش کم	فرسایش متوسط	فرسایش زیاد
بازه ۱	طول (متر)	-	۳۶۰	۵۲۸۵	۲۳۸۰
	طول (درصد) در بازه	-	۴/۵	۶۵/۸	۲۹/۷
بازه ۲	طول (متر)	-	۵۵۵	۵۸۵۰	۱۵۱۰
	طول (درصد) در بازه	-	۷	۷۴	۱۹
بازه ۳	طول (متر)	-	۲۲۵۰	۵۲۵۵	۱۷۵۵
	طول (درصد) در بازه	-	۲۴/۳	۵۶/۷	۱۹
بازه ۴	طول (متر)	۶۵۵	۱۹۷۰	۵۷۳۵	۸۱۵
	طول (درصد) در بازه	۷/۱	۲۱/۴	۶۲/۶	۸/۹

نتایج و بحث

با مقایسه خط مرکزی کانال رود در دوره ۱۳ ساله ۱۳۹۸-۱۳۸۵ میزان جابه‌جایی کانال و پسروی کناره رود در بازه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۵، ۰/۸۳، ۰/۴۲ متر در سال اندازه‌گیری شد (جدول ۴). تحلیل آماری آنالیز واریانس (Anova) نشان می‌دهد که بین مقادیر جابه‌جایی کانال رود در بازه‌های مختلف تفاوت معناداری (Sig: 0.131) وجود ندارد. با این وجود، بین درصد فرسایش‌پذیری

کرانه در طبقه زیاد و میزان جابه‌جایی سالانه کانال ضریب همبستگی ۰/۸۴ وجود دارد که نشان دهنده ارتباط نسبتاً بالای بین این دو متغیر است. به عبارت دیگر در بازه‌های با فرسایش‌پذیری بیشتر میزان جابه‌جایی جانبی رودخانه بیشتر بوده است. باندیوپادهیای و همکاران (۲۰۱۴) برای اعتبارسنجی روش BEVZ با بررسی‌های میدانی از روش BEHI استفاده نمودند که ضریب همبستگی ۰/۷۵ رابطه بین این دو روش را تأیید نموده است.

جدول ۴: مقادیر جابجایی رودخانه نکا طی سالهای ۱۳۹۸-۱۳۸۵

بازه	حداقل (متر)	میانگین (متر)	حداکثر (متر)	انحراف معیار	میانگین جابجایی سالانه (متر در سال)
۱	۰/۵	۱۱/۲۷	۳۸/۶	۸/۵۵	۰/۸۷
۲	۱/۲	۱۱/۰۶	۳۶/۲	۸/۰۶	۰/۸۵
۳	۰	۱۰/۸	۳۱/۶	۱۰/۱	۰/۸۳
۴	۰	۵/۵	۱۴/۷۰	۴/۳۵	۰/۴۲

جهت بررسی نقش عوامل مؤثر در فرسایش کرانه‌ای رود مجموع درصد امتیاز بیشتر از متوسط هر پارامتر محاسبه شد. سپس هرکدام از این اعداد تقسیم بر مجموع نهایی پارامترها شده و عدد بی‌بعد آن به دست آمده است و پارامترها براساس عدد بی‌بعد رتبه‌بندی شدند (جدول ۵). از میان پارامترهای مؤثر در فرسایش کرانه رود، لیتولوژی با ۳۳ درصد تأثیر، رتبه اول را دارد که به علت عبور

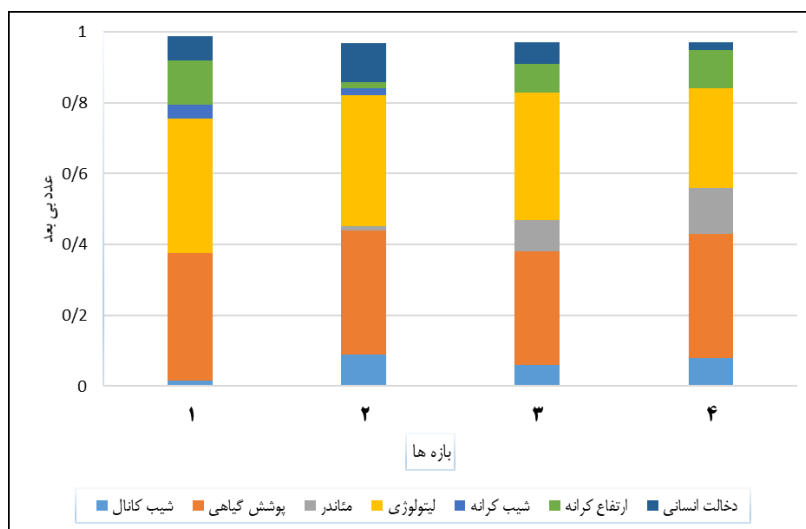
رودخانه از رسوبات آبرفتی سست است. عامل دیگر، پوشش گیاهی است که به علت تراکم کم نمی‌تواند در برابر فرسایش مقاومت ایجاد نماید، لذا با ۳۱ درصد تأثیر در رتبه دوم فرسایش‌پذیری کرانه رود قرار دارد. برداشت شن و ماسه از بستر رود با ۱۱/۸ درصد سومین عامل مؤثر در فرسایش کرانه رود بوده است.

جدول ۵: رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر در فرسایش‌پذیری کرانه رودخانه نکا

رتبه	عدد بی‌بعد	طول به درصد	پارامتر
۴	۰/۱۱	۳۱/۴۳	شیب رود
۲	۰/۳۱	۸۶/۳۳	پوشش گیاهی
۶	۰/۰۴	۱۲/۸۲	ضریب مئاندر
۱	۰/۳۳	۹۱/۹۴	لیتولوژی
۷	۰/۰۰۸	۲/۳۶	شیب کرانه
۵	۰/۰۷	۲۰/۳۶	ارتفاع کرانه
۳	۰/۱۱	۳۲/۸۲	عامل انسانی

دیگری که از نقشه نهایی فرسایش‌پذیری کناره رود و طبقه‌بندی پارامترها حاصل شد نقش کم قوس مئاندر در فرسایش‌پذیری کناره بوده است که در رتبه ششم تأثیر قرار گرفته است. در رودخانه‌های آبرفتی، با افزایش سرعت جریان در قسمت مقعر قوس رود، میزان فرسایش کناره هم افزایش می‌یابد. در برخی از بازه‌های محدوده مورد مطالعه خصوصاً در کرانه‌های جنوبی رود نکا به علت همجواری قوس‌های مقعر رود با سنگ‌های آهکی میزان فرسایش کاهش یافته و این مناطق در طبقه با آسیب‌پذیری کمتر قرار گرفته‌اند.

شکل ۶ رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر در فرسایش‌پذیری را در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد. در بازه یک، پارامترهای لیتولوژی، پوشش گیاهی و ارتفاع کرانه به ترتیب بیشترین تأثیر را داشته‌اند (شکل ۶). در بازه ۲ عوامل لیتولوژی، پوشش گیاهی و عامل انسانی تأثیر بیشتری در فرسایش‌پذیری کرانه رود دارند. در بازه ۳ پارامترهای لیتولوژی، پوشش گیاهی و ضریب مئاندری به ترتیب رتبه اول تا سوم را در فرسایش‌پذیری کرانه داشته‌اند. در بازه ۴، عوامل پوشش گیاهی، لیتولوژی و ضریب مئاندری نقش مهم‌تری را در فرسایش‌پذیری کرانه داشته‌اند. نکته



شکل ۶: پارامترهای مؤثر در فرسایش‌پذیری کرانه رودخانه نکا در بازه‌های مختلف به صورت بی بعد

نتیجه‌گیری

تحلیل فرسایش‌پذیری کرانه رود و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش کرانه رود در مقیاس بازه مهم‌ترین هدف این تحقیق بوده است. براین اساس نقشه نهایی فرسایش‌پذیری کرانه رودخانه نکا در محدوده مورد مطالعه تهیه گردید نتایج این نقشه نشان می‌دهد که ۲۰ درصد کرانه‌های رود پتانسیل فرسایش‌پذیری بالایی دارند. این نقشه جهت شناسایی مقدماتی کاربرد داشته و برای مطالعات تفصیلی نیاز به داده‌های دقیق‌تری است. با این وجود، تهیه این نقشه دید فضایی ایجاد کرده و جهت مکان‌یابی و برنامه‌ریزی هرگونه فعالیت انسانی مرتبط با رودخانه مانند احداث جاده، پل، سد، استخراج شن و ماسه و غیره مناسب است. اگرچه دسترسی به انواع داده‌ها و دقت آنها بر صحت و دقت نقشه اثرگذار است. با تهیه این نقشه، فقط ویژگی‌های فرسایش‌پذیری کرانه رود مورد بررسی قرار می‌گیرد و نیروهای فرساینده مانند ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جریان آب مورد توجه قرار نمی‌گیرند لذا تهیه آن لزوماً به معنی وقوع فرسایش در کناره رود نیست. با این وجود، میان

جابه‌جایی کانال رود و میزان فرسایش‌پذیری کرانه رود رابطه معناداری وجود دارد که با احتمال بالایی صحت و دقت این نقشه را تأیید می‌نماید. با تهیه لایه‌های اطلاعاتی و نقشه نهایی فرسایش کرانه رود، عواملی که نقش بیشتری در فرسایش‌پذیری داشته‌اند شناسایی شدند. این عوامل به طور کلی شامل لیتولوژی و تراکم کم پوشش گیاهی بوده است اما در بازه‌های مختلف شاخص‌های مئاندری، فعالیت انسانی و ارتفاع کرانه رود هم به عنوان عوامل مهم در فرسایش‌پذیری کرانه بوده‌اند. از این رو با شناسایی و تحلیل عوامل تأثیرگذار در فرسایش کرانه‌ای در هر بازه، با دقت بیشتری اولویت‌بندی فعالیت‌های انسانی و جلوگیری از خطرهای بالقوه امکان‌پذیر خواهد بود. با توجه به مباحث فوق ملاحظه می‌شود که مهم‌ترین کاربرد نقشه فرسایش‌پذیری کرانه رود، کمک به فرایند مدیریت رودخانه و کاهش خطرات رودخانه‌ای است. لذا پیشنهاد می‌شود با دسترسی به منابع اطلاعاتی بیشتر و دقیق‌تر، به کارگیری شاخص‌های دیگر و عملیات میدانی چارچوبی برای تهیه این نوع نقشه‌ها فراهم گردد.

پانویس

1-Bank Erosion Hazard Index (BEHI)
2-Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)

3-Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
4-Bank Erosion Vulnerability Zonation (BEVZ)

منابع

-حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۷. برآورد فرسایش کناره‌ای رودخانه با استفاده از مدل BSTEM، زمین‌شناسی ایران، سال یازدهم، شماره ۴۵، ص ۵۳-۷۰.
-حسین‌زاده، م.م.، خالقی، س. و واحدی‌فر، ف.، ۱۳۹۶. ارزیابی تغییرات مورفولوژیک و پایداری رودخانه قرانقوچای هشتروند با استفاده از مدل

-اسماعیلی، ر.، یارمحمدیان، ر. و لرستانی، ق.، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری کرانه رود با استفاده از تکنیک‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک مطالعه موردی: رودخانه سیمره در محدوده شهرستان دره شهر استان ایلام، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم، شماره ۳، ص ۵۷-۷۰.

رودخانه واز چمستان-مازندران، دوره ۱۱، شماره ۴، ص ۱-۱۴.

-رضایی مقدم، م.ح. و پیروزی‌نژاد، ن.، ۱۹۹۳. بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌های رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۴۷، ص ۱۰۹-۱۳۲.

-نوحه‌گر، ا.، خزایی، م.، مهدوی نجف آبادی، ر. و تلوری، ع.، ۱۳۹۵. بررسی الگوهای پیشروی و پسروی رودخانه بشار براساس تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و مطالعات زمینی، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۸، ص ۱۶۱-۱۸۱.

-Abderrezzak, K.E.K., Moran, A.D., Tassi, P., Ata, R. and Hervouet, J.M., 2016. Modelling river bank erosion using a 2D depth-averaged numerical model of flow and non-cohesive, non-uniform sediment transport. *Advances in Water Resources*, v. 93, p. 75-88.

-Bandyopadhyay, S., Ghosh, K. and De, S.K., 2014. A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India. *Geomorphology*, v. 224, p. 111-121.

-Biron, P.M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S. and Olsen, T., 2013. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth surface processes and landforms*, v. 38(15), p. 1808-1821.

-Biswas, R.K., Yorozuya, A. and Egashira, S., 2016. Numerical Model for Bank Erosion in the Brahmaputra River. *Journal of Disaster Research*, v. 11(6), p. 1073-1081.

-Bosa, S., Petti, M. and Pascolo, S., 2018. Numerical modelling of cohesive bank migration. *Water*, v. 10(7), 961. doi:10.3390/w10070961

-Dragičević, S., Pripuzić, M., Živković, N., Novković, I., Kostadinov, S., Langović, M., and Čvorović, Z., 2017. Spatial and temporal variability of bank

BEHI, هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۰، ص ۱۴۵-۱۶۴.

-خیری‌زاده آروق، م.، رضایی مقدم، م.ح.، رجیبی، م. و دانشفراز، ر.، ۱۳۹۶. تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زربینه رود با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریکی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۴، ص ۷۶-۱۰۲.

-رستمی، م.، حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۹. بررسی حساسیت کناره رودخانه در برابر فرسایش و راهکارهای حفاظت کناره‌های کانال در

erosion during the period 1930–2016: Case Study—Kolubara River Basin (Serbia). *Water*, v. 9(10), 748 p. doi:10.3390/w9100748.

-Hamshaw, S.D., Engel, T., Rizzo, D.M., O'Neil-Dunne, J. and Dewoolkar, M.M., 2019. Application of unmanned aircraft system (UAS) for monitoring bank erosion along river corridors. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 10(1), p. 1285-1305.

-Heeren, D.M., Mittelstet, A.R., Fox, G.A., Storm, D.E., Al-Madhhachi, A.T., Midgley, T. L., and Tejral, R.D., 2012. Using rapid geomorphic assessments to assess streambank stability in Oklahoma Ozark streams. *Transactions of the ASABE*, v. 55(3), p. 957-968.

-Jia, D., Shao, X., Wang, H. and Zhou, G., 2010. Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River. *Advances in Water Resources*, v. 33(3), p. 348-360.

Kessler, A.C., Gupta, S.C. and Brown, M.K., 2013. Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement. *Geomorphology*, v. 201, p. 312-322.

-Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth surface*

- processes and landforms, v. 18(9), p. 777-821.
- Longoni, L., Papini, M., Brambilla, D., Barazzetti, L., Roncoroni, F., Scaioni, M. and Ivanov, V.I., 2016. Monitoring riverbank erosion in mountain catchments using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing*, v. 8(3), 241 p.
- Martin, D.J., Ely, C. and Wemple, B.C., 2019. Bank erosion in an Andean páramo river system: Implications for hydro-development and carbon dynamics in the neotropical Andes. *Journal of Mountain Science*, v. 16(2), p. 243-255.
- Mukherjee, R., Bilas, R., Biswas, S.S. and Pal, R., 2017. Bank erosion and accretion dynamics explored by GIS techniques in lower Ramganga river, Western Uttar Pradesh, India. *Spatial Information Research*, v. 25(1), p. 23-38.
- Nardi, L., Campo, L. and Rinaldi, M., 2013. Quantification of riverbank erosion and application in risk analysis. *Natural hazards*, v. 69(1), p. 869-887.
- Piégay, H., Darby, S., Mosselman, E. and Surian, N., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River research and applications*, v. 21(7), p. 773-789.
- Thakur, P.K., Laha, C. and Aggarwal, S., 2012. River bank erosion hazard study of river Ganga, upstream of Farakka barrage using remote sensing and GIS. *Natural hazards*, v. 61(3), p. 967-987.
- Thoma, D.P., Gupta, S.C., Bauer, M.E. and Kirchoff, C., 2005. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote sensing of Environment*, v. 95(4), p. 493-501.
- Varouchakis, E., Giannakis, G., Lilli, M., Ioannidou, E., Nikolaidis, N. and Karatzas, G., 2016. Development of a statistical tool for the estimation of riverbank erosion probability. *Soil*, v. 2(1), doi:10.5194/soil-2-1.
- Veihe, A., Jensen, N.H., Schiøtz, I.G. and Nielsen, S.L., 2011. Magnitude and processes of bank erosion at a small stream in Denmark. *Hydrological Processes*, v. 25(10), p. 1597-1613.