

## حساسیت کرانه‌ای رودخانه حاجی‌عرب بوبین‌زهره به فرسایش و افزایش مخاطرات آن

فاطمه نجف‌زاده\*

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد مهدی حسین‌زاده

دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سیاوش شایان

دانشیار دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۷ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۲)

### چکیده

عوامل انسانی و طبیعی سبب خروج رودخانه از حالت تعادل می‌شود. این موضوع، تغییرات فرسایش و رسوبگذاری را در پی دارد. یکی از شکل‌های فرسایش در رودخانه‌ها فرسایش کناره‌ای است که می‌تواند پلان و مورفومتری رودخانه را تغییر دهد و به واسطه این تغییرات، مخاطرات مختلفی از جمله تغییر مورفومتری کانال و تولید رسوب را در پی داشته باشد. هدف پژوهش حاضر، بررسی پایداری کرانه‌های رودخانه حاجی‌عرب در شهرستان بوبین‌زهره در استان قزوین است. بدین منظور از شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزارک (OSEPI) استفاده شده که یکی از شاخص‌های روش ارزیابی سریع ژئومورفیک (RGA) است. با توجه به مورفومتری مجرا و شرایط محیط رودخانه هشت بازه انتخاب شد. پارامترهای مؤثر در پایداری کرانه‌ها با توجه به شاخص OSEPI امتیازدهی شدند. بازه‌ها از نظر حساسیت به فرسایش طبقه‌بندی شدند. به منظور بررسی پراکندگی داده‌ها و میزان همبستگی آنها از تحلیل‌های آماری استفاده شد. این شاخص اولین بار در ایران روی رودخانه حاجی‌عرب به کار رفت و نتایج تحقیق نشان داد که ناپایداری‌ترین بازه‌ها تحت تأثیر پارامتر درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه و قوس رود بوده‌اند. همچنین پایداری بسیار زیاد برخی بازه‌ها تحت تأثیر پارامتر پوشش گیاهی و قوس رود است. با توجه به امتیاز نسبی، پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود در هر دو کرانه، مؤثرترین عامل در پایداری کرانه‌هاست و سپس قوس رود در کرانه چپ و درصد ارتفاع کرانه، قوس رود و رسوبات منفصل به یک اندازه در کرانه راست تأثیرگذار بوده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت در کرانه‌های رودخانه حاجی‌عرب وضعیت پایداری متوسط غالب است.

**واژه‌های کلیدی:** بوبین‌زهره، پایداری کرانه، حساسیت کانال، رودخانه حاجی‌عرب، فرسایش رودخانه‌ای.

## مقدمه

رودخانه‌ها می‌توانند زندگی جوامع انسانی را با دامنه گسترده‌ای از فرایندها مانند سیل، آلودگی و فرسایش تحت تأثیر قرار دهند [۳]. رود سیستمی پویا با تاریخچه‌ای معین است. در سیر تکاملی فرسایشی رود در طول مراحل مختلف، زمان عامل مهمی است. متغیرهایی از ناهمواری، سنگ‌شناسی، ساختمان، آب‌وهوا و هیدرولوژی در سیر تکاملی آن اثر دارند [۱۰]. از منظر ژئومورفولوژیکی رودخانه پایدار، رودخانه‌ای است که عرض، عمق و شیب خود را تعدیل می‌کند، به این ترتیب که در دوره کمتر از ۵۰ سال، هیچ رسوبگذاری یا فرسایش مشخصی در بستر رود انجام نپذیرد و تغییری در الگوی رود صورت نگیرد [۱۵]. شدت فرسایش کرانه رود تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب رسوبات کرانه، ویژگی‌های هندسی کرانه، دبی، پوشش گیاهی و شعاع قوس رودخانه قرار دارد [۲۲]. بررسی و پایش متغیرهای مؤثر بر پایداری و ناپایداری کرانه‌ها و ویژگی‌های جریان می‌تواند در حفاظت از رودخانه‌ها به‌عنوان منبعی طبیعی، تأمین امنیت جان و مال انسان‌ها و از همه مهم‌تر مدیریت محیط‌های طبیعی و بهره‌مندی از محیط‌های رودخانه‌ای به ما کمک کند تا در کنار تأمین نیازهای بشر، خللی به روند طبیعی محیط‌های رودخانه‌ای وارد نشود. سیلاب‌ها موجب لایروبی بستر و شکل دادن مجدد به کانال رودخانه می‌شوند [۱۰].

فرسایش کرانه‌ای و اهمیت آن، محققان بسیاری را در سراسر جهان به پژوهش در این حوزه واداشته است که می‌توان به تحقیقات برتولدی و همکاران [۱۵] درباره پاسخ کانال به سیل با ظرفیت حمل‌ونقل رسوبات متغیر (نشان داده شده توسط تنش برشی بستر) اشاره کرد که با استفاده از مدلی ساده تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان داد که مهاجرت قوسی با سیلاب‌های متوسط در ارتباط است، درحالی که سیلاب‌های اصلی مسئول توسعه کانال‌های میانگذر هستند که برای سرکوب رشد قوس و حفظ پیکربندی سینوزیت پایین رودخانه عمل می‌کنند. جورج و همکاران [۲۳] یک جعبه ابزار برای مدل‌سازی فرایندهای ترمیم و طبیعی‌سازی در رودخانه‌ها ایجاد کردند. این مدل شامل برنامه‌های مبتنی بر ویندوز و مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی مهاجرت کانال است. وجود پوشش گیاهی، با توجه به اثر آن در حفاظت و تثبیت دیواره و سواحل رودخانه، عامل مؤثری در بروز تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه است. گری و لیسر [۱۸] و پترسن [۲۶] تأثیرات مهم پوشش گیاهی را در حفاظت از سواحل و رودخانه‌ها گزارش داده‌اند.

در تحقیقی به تأثیر الگوی فرسایشی رودخانه جامونا بر مهاجرت جمعیت و استراتژی سازگاری مهاجران پرداخته شده و اجرای سیاست جامع مدیریت فرسایش کرانه رودخانه، راه حلی برای به حداقل رساندن مشکلات مربوط به سکونت و مهاجرت جمعیت ساکن در حوالی

این رودخانه فعال از نظر فرسایشی ذکر شده است [۱۳].

محققینی چون درز و باشر [۱۷] با ابزارهایی چون تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و داده‌های لیدار به تحقیق در این زمینه پرداخته‌اند. کوان و سوانسن [۲۵] با استفاده از شاخص خطر فرسایش کرانه (BEHI)<sup>۱</sup> و روش تنش برشی نزدیک کرانه، فرسایش سالانه در جنگل ملی سکویا در کالیفرنیا را پیش‌بینی کردند. کوریت [۱۸] با استفاده از روش پیامدهای منبع غیرنقطه‌ای رسوب (BANCS)<sup>۲</sup> به پیش‌بینی فرسایش و پایداری کرانه در رودخانه استونی کلووکریک پرداخته است.

جلیوند و همکاران [۴] به مهندسی رودخانه سیستان براساس شاخص‌های ژئومورفیک از محل سد کهک تا دریاچه هامون هیرمند پرداخته‌اند. رضایی مقدم و پیروزی‌نژاد [۹] با هدف بررسی جابه‌جایی منادر و تغییرات الگوی رودخانه و تأثیر آن بر وضعیت فرسایش و رسوبگذاری رودخانه گاماسیاب در استان کرمانشاه با استفاده از تصاویر ماهواره و عکس‌های هوایی به مطالعه پرداختند که نتایج نشان داد سطوح فرسایش‌یافته در رودخانه گاماسیاب بیشتر از سطوح رسوبگذاری شده است و این به دلیل جابه‌جایی و تغییر مسیر رودخانه است، به‌طوری که بعضی از قسمت‌های رودخانه بیش از ۴۰۰ متر جابه‌جایی داشته است.

روش‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک در بحث فرسایش کرانه توسط محققان بسیاری استفاده شده است. از جمله شاخص پایداری کانال سیمون و دونز [۲۸] که در این روش برای ارزیابی میزان، توزیع و پتانسیل بی‌ثباتی کانال از روشی که براساس معیارهای بین‌رشته‌ای از مورفولوژی کانال آبرفتی و پوشش گیاهی کناره‌ای ارائه شده، استفاده شده است. همچنین فرم‌های ارزیابی مهم‌ترین ابزار در این روش هستند. فرم‌های ارزیابی سایت با توجه به محیط خاص مورد مطالعه و اهداف مطالعه قابل تغییر است. نمونه دیگر، روش ACS جانسون و همکاران [۲۲] است که براساس ۱۳ شاخص کمی و کیفی فرایندهای ریخت‌شناسی است. شاخص‌ها درجه‌بندی، وزن و جمع‌بندی می‌شوند تا یک درجه پایداری برای کانال‌های بستر شن ایجاد کنند. این روش از طریق کاربرد در چند جریان در پنسیلوانیا و مریلند نشان داده شده است. همچنین در پژوهشی از یک روش ردیابی رسوب مبتنی بر رادیونوکلید<sup>۳</sup> برای تعیین سهم نسبی رسوب مشتق‌شده از کرانه‌ها و دامنه‌ها در سه حوضه آبریز در جزیره شمالی فوقانی نیوزیلند استفاده شده است که نتایج آن نشان می‌دهد فرسایش بانک جریان می‌تواند در تولید بخش‌های زیادی از رسوب در حوضه‌های آبریز نیوزیلند نقش داشته باشد [۲۰]. روش CSI

1. Bank erosion hazard index
2. Bank assessment for non-point source consequences
3. Radionuclide

سیمون و کلیمتر [۲۷] براساس شاخص‌های ژئومورفیک به ارزیابی شرایط کرانه‌ها از نظر پایداری پرداخته است. روش OSEPI<sup>۱</sup> هیرن و همکاران به منظور اولویت‌بندی بازه‌های رودخانه اکلاهما اوزارک در پروژه‌های تثبیت انجام گرفته است [۱۵]. نمونه دیگر مقیاس ROM<sup>۲</sup> زین‌العابدین و همکاران [۳۰] است که با توجه به آگاهی از اینکه ترکیب خاک بر مقاومت در برابر فرسایش تأثیر دارد، در این مقاله سعی می‌کنند شاخص ارزیابی ریسک فرسایش ساحل رودخانه را به‌طور خاص به ترکیب خاک مرتبط کنند. در ایران نیز تحقیقات بسیاری در خصوص فرسایش کناره‌ای با تکنیک‌های مختلفی انجام گرفته است.

اسماعیلی و همکاران [۳] به ارزیابی و بررسی تغییرات بابل‌رود در محدوده شهر بابل پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بین کاربری اراضی و تغییرات عرض رود رابطه معناداری وجود دارد. نصرتی و همکاران [۱۱] ضریب ناپایداری رودخانه طالقان و راهکار مهندسی برای پایدارسازی کناره آن با استفاده از مدل لین را بررسی کردند. حسین‌زاده و اسماعیلی [۶] به برآورد فرسایش کرانه‌ای با مدل BSTEM پرداختند که در این پژوهش، هدف تشخیص و تعیین کارایی این مدل برای ارزیابی شرایط حاکم بر کرانه رودخانه در راستای حفاظت از رود و مدیریت بحث فرسایش رودخانه‌ای، فشار آب منفذی و پوشش گیاهی نزدیک کرانه است.

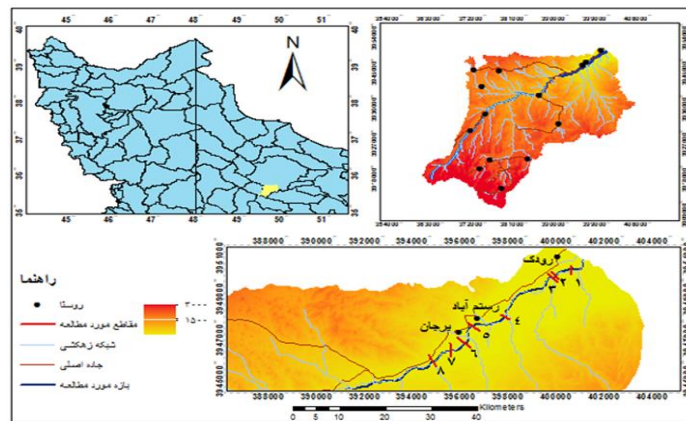
در پژوهشی دیگر، حسین‌زاده و غلامی [۵] به ارزیابی میزان پایداری و ناپایداری کناره و بستر رودخانه مسیل‌موچان پرداختند. این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی و ارزیابی میزان پایداری کناره و بستر و شناسایی مناطقی با ریسک زیاد آسیب‌پذیری کانال در رودخانه مسیل‌موچان انجام گرفت. با استفاده از داده‌های برداشت‌شده، پارامترهای لازم از جمله کلاس‌های خطر فرسایش کناره‌ای و فرسایش کانال در مدل رودخانه‌ای شوم، محاسبه و در نتیجه آسیب‌پذیری کانال در هشت مقطع رودخانه مسیل‌موچان بررسی شد. طبقه‌بندی مورفولوژیک و ناپایداری مجرای رودخانه کلیبرچای توسط حسین‌زاده و همکاران [۸] بررسی شد. در این پژوهش برای ارزیابی طبقه‌بندی الگوی جریان در رودخانه کلیبرچای از مدل راسگن در سطح ۱،۲،۳ استفاده شده است.

### منطقه تحقیق

حوضه آبخیز رودخانه حاجی‌عرب با مساحت کل ۱۳۰/۶ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵۸ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۸ ثانیه عرض جغرافیایی

1. Oklahoma Ozark streambank erosion potential index
2. Rolan and Mazidah scale

در جنوب دشت قزوین در محدوده شهرستان بویین‌زهره واقع شده است (شکل ۱). رودخانه حاجی‌عرب در بخش جنوبی دشت قزوین قرار دارد که از ارتفاعات کوه زیارت بلغی به ارتفاع ۲۶۰۰ متر سرچشمه گرفته و طول آن در محدوده استان قزوین در حدود ۱۴۲ کیلومتر است.



شکل ۱. نقشه منطقه تحقیق

### روش تحقیق و تحلیل

با هدف بررسی فرسایش کناره‌ای رودخانه حاجی‌عرب، ۷/۵ کیلومتر از طول رودخانه انتخاب و محدوده تحقیق از نظر تفاوت الگو و مورفومتری به هشت بازه تقسیم شد. سپس نقشه‌برداری از مقاطع (با استفاده از دوربین نقشه‌برداری)، مورفومتری کانال، دانه‌سنجی رسوبات کرانه و وضعیت تراکم چسبندگی رسوبات و بررسی ویژگی‌های پوشش گیاهی کرانه و دشت سیلابی برای هر بازه انجام گرفت. به‌منظور تهیه نیمرخ طولی و عرضی رودخانه نقشه‌برداری از مقاطع و طول بازه با استفاده از دوربین نقشه‌برداری به عمل آمد (شکل ۲) و در ادامه در محیط نرم‌افزاری فری‌هند نیمرخ عرضی مقاطع تهیه شد همچنین براساس مقاطع ترسیم‌شده ارتفاع کرانه و زاویه کرانه محاسبه شد.



شکل ۲. نقشه‌برداری از بازه‌های تحت مطالعه

به منظور بررسی پوشش گیاهی از پروتکل <sup>۱</sup>RHS استفاده شد. همچنین براساس پلان ترسیم شده از روی تصاویر گوگل ارث الگوی رودخانه مشخص شد. براساس اطلاعات و داده‌های به دست آمده، حساسیت کناره‌ها به ناپایداری و فرسایش کناره‌ای با استفاده از روش شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزارک (OSEPI) تحلیل و بررسی شد. برای تعیین مؤثرترین پارامتر در شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود از امتیاز نسبی استفاده شد. برای محاسبه امتیاز نسبی، امتیاز هر متغیر بر حداکثر امتیاز آن متغیر تقسیم شد. به منظور بررسی پراکندگی داده‌ها و میزان همبستگی آنها از تحلیل‌های آماری (ضریب همبستگی و نمودار (BOX & PLOT) در محیط نرم افزار SPSS استفاده شد.

### روش استفاده در رود اکلاهما اوزارک

در این روش، امتیازات ۰-۲۵ بیانگر پایداری بسیار، امتیازات ۲۶-۳۵ بیانگر پایداری متوسط، امتیازات ۳۶-۴۵ بیانگر پایداری، امتیازات ۴۶-۵۵ بیانگر ناپایداری، امتیازات ۵۶-۶۵ بیانگر ناپایداری متوسط و امتیازات ۶۶-۸۵ بیانگر ناپایداری زیاد است. ارتفاع کرانه: ارتفاع کرانه ممکن است نرخ فرسایش کرانه را از طریق تغییر در عملکرد تنش برشی روی سطح کرانه تحت تأثیر قرار دهد. ارتفاع کرانه و شیب، اطلاعاتی درباره فرسایش و پایداری کرانه‌ها ارائه می‌کنند. در زمینه پایداری کرانه‌ها باید شرایط خود کرانه از جمله شرایط رسوبگذاری، منطقه نواری دارای پوشش گیاهی (ریپارین) و مناطق نزدیک در نظر گرفته شود [۷].

جدول ۱. امتیازات روش شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزارک [۱۹]

۱	ارتفاع کرانه (متر)	مقادیر	5/1-0	3-5/1	5/4-3	6-5/4	+6	
		امتیاز	0	5/2	5	5/7	10	
۲	زاویه کرانه BH/FL(°)	مقادیر	20-0	60-21	80-61	90-81	91-119	119<
		امتیاز	0	2	4	6	8	10
۳	درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه (نزدیک به قائم)	مقادیر	10-0	25-11	50-26	75-51	76-100%	
		امتیاز	0	5/2	5	5/7	10	
۴	شواهد حرکات توده‌ای جدید ( بر حسب درصد در طول کرانه)	مقادیر	10-0	25-11	50-26	75-51	76-100	
		امتیاز	0	5/2	5	5/7	10	
۵	رسوبات منفصل (درصد کرانه)	مقادیر	10-0	25-11	50-26	75-51	100-76	
		امتیاز	0	5/2	5	5/7	10	

100-91	90-71	70-51	50-26	25-11	10-0	مقادیر	حفاظت کرانه رود (درصد کرانه رود پوشیده از ریشه گیاهان، گیاهان، شاخه‌ها، سنگ‌ها)	۶
۰	5/2	5/7	10	5/12	15	امتیاز		
	90-71	70-51	50-26	25-11	10-0	مقادیر	پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود (درصد)	۷
	0	5/4	10	5/12	15	امتیاز		
			مستقیم	انحنای کم	ماندر	مقادیر	قوس رود	۸
			0	5/2	5	امتیاز		

شواهد حرکات توده‌ای جدید: لغزش‌ها زمانی رخ می‌دهند که نیروهای محرکه بر نیروی مقاومت در طول سیلاب یا مدت کوتاهی بعد از فروکشی جریان‌های توفانی غلبه کنند [۷]. فرایندهای فرسایشی کناره به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل فرسایش ناشی از عمل هیدرولیک (فرسایش دانه به دانه) و حرکات توده‌ای است [۱۰].

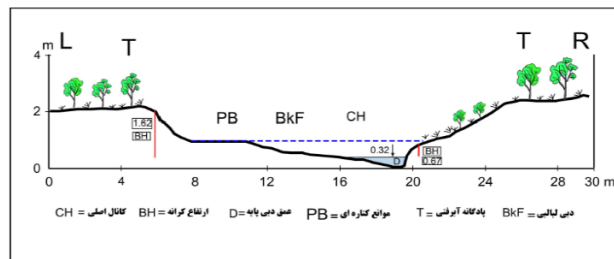
**رسوبات منفصل:** به‌طور معمول در سواحل رودخانه رسوبات ریزی مانند ماسه‌های ریز سیلت و رس وجود دارد، درحالی که در بستر همین رودخانه‌ها ترکیبی از ماسه و ریگ وجود دارد که فضای بین آنها را رس و سیلت فرا گرفته است [۱۰]. رسوباتی مانند ماسه و سیلت اگر بدون چسبندگی باشند نمی‌توانند به‌طور پیوسته کنار هم باقی بمانند، مگر اینکه متراکم شوند؛ در این نوع کرانه‌ها شرایط زهکشی کرانه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر نوع فرسایش کرانه است [۷]. پوشش گیاهی و درختی حاشیه کانال مهم‌ترین عامل زبری و مقاومت کرانه رود در مقابل فرایندهای فرسایش رودخانه است. با حذف پوشش گیاهی عناصر زبری ناشی از پوشش گیاهی کاهش و به‌دنبال آن پایداری بستر و ارتفاع بحرانی کرانه رود نیز کاهش می‌یابد و کانال به تغییر بسیار حساس می‌شود [۷].

### داده‌ها و بحث

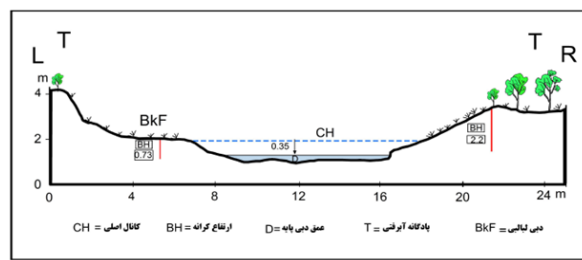
**مقطع اول:** بازه اول در پایین‌دست رودخانه حاجی عرب و در ابتدای روستای رودک قرار دارد که بیشتر از رسوبات گراولی در کرانه راست و رسوبات سیلت و رسی در کرانه چپ تشکیل شده است و در مقیاس بازه کانال رودخانه تقریباً مستقیم است و انحنای کمی دارد. هر دو کرانه شکل پرتگاهی دارند که در کرانه راست می‌توان شیب بیشتری نسبت به کرانه چپ مشاهده کرد. کاربری اراضی محدوده باغ و زمین‌های کشاورزی بوده و دیواره کرانه‌ها عریان است. رسوبات منفصل در کرانه چپ به‌صورت موانع نقطه‌ای قابل مشاهده است و هیچ‌گونه پوشش

گیاهی روی این موانع رسوبی دیده نمی‌شود (شکل ۳).

**مقطع دوم:** بازه دوم در بخش انتهایی روستای رودک قرار دارد. رسوبات تشکیل‌دهنده این رودخانه سیلت و رس است همچنین در این مقطع بیشترین تأثیر را نیروی جریان بر فرسایش کرانه‌ها دارد. هر دو کرانه شیبی ملایم دارند، با این تفاوت که در کرانه راست می‌توان پرتگاه را به‌صورت خیلی محدود مشاهده کرد. این بازه دارای کاربری باغ و زمین‌های کشاورزی بوده و کانال رودخانه به‌صورت مستقیم است (شکل ۴).



شکل ۳. نیمرخ عرضی مقطع یک از بازه یک در رودخانه حاجی عرب

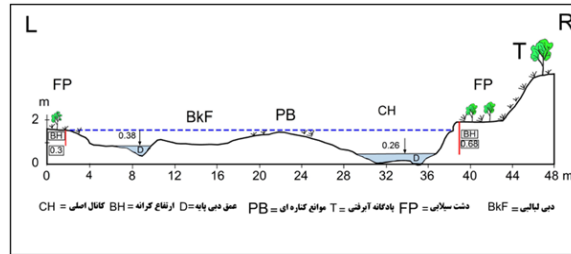


شکل ۴. نیمرخ عرضی مقطع دوم از بازه دو در رودخانه حاجی عرب

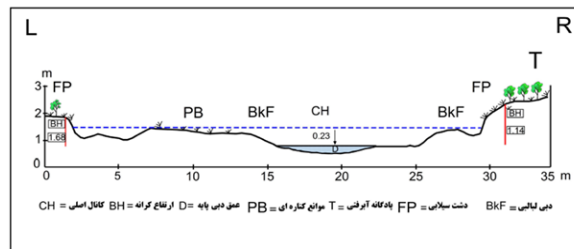
**مقطع سوم:** کانال این مقطع از نوع شریانی است و بیشتر رسوبات بستر از نوع گراول هستند. فاصله این مقطع از مقطع دوم ۱۹۴ متر است. پوشش گیاهی منطقه بیشتر باغ و مزرعه است. شیب کرانه راست بیشتر از کرانه چپ است. پوشش کناره‌های رودخانه در کرانه راست درختچه و بوته است و کرانه چپ برهنه است (شکل ۵).

**مقطع چهارم:** بازه چهارم در ابتدای روستای رستم‌آباد قرار دارد. در این بازه بیشتر رسوبات بستر از نوع گراول است. جنس رسوبات در کرانه راست گراولی و در کرانه چپ سیلت و رسی است. کانال رودخانه انحنای زیادی دارد و پیچانرودی است و پوشش گیاهی منطقه بوته و درختچه، علفزارهای بلند با زمین‌های باتلاقی است (شکل ۶).





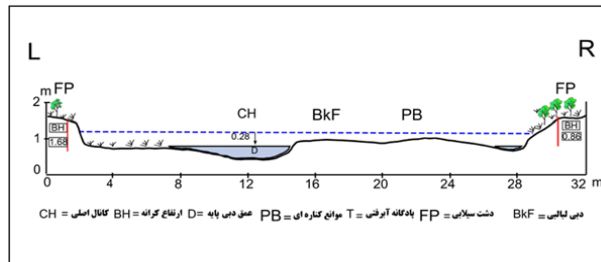
شکل ۵. نیمرخ عرضی مقطع سوم از بازه سه در رودخانه حاجی عرب



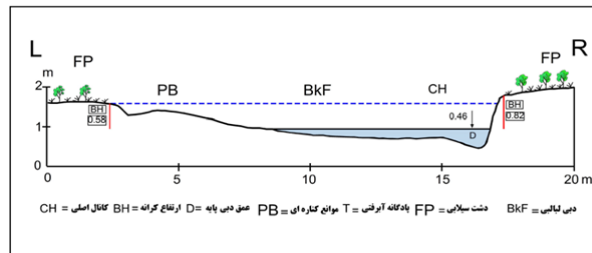
شکل ۶. نیمرخ عرضی مقطع چهارم از بازه چهار در رودخانه حاجی عرب

**مقطع پنجم:** این بازه در انتهای روستای رستم‌آباد واقع شده است. بازه پنجم یک مقطع دوکاناله است و رسوبات بستر آن گراولی است، اما می‌توان رسوباتی در ابعاد تخته‌سنگ و قلوه‌سنگ نیز مشاهده کرد. جنس رسوبات در کرانه راست سیلت و رس و در کرانه چپ گراولی است. کاربری این بازه باغ است. کانال رودخانه از نوع پیچانرودی است و شیب کرانه چپ بیشتر از کرانه راست است (شکل ۷).

**مقطع ششم:** این بازه در نزدیکی روستای یرجان قرار دارد و کانالی با انحنای کم است که پوشش گیاهی آن بیشتر شامل بوته و درختچه و رسوبات بستر اغلب گراولی است. رسوبات کرانه راست گراولی و کرانه چپ از نوع سیلت و رس است. شیب کرانه راست بیشتر از کرانه چپ است. در کناره راست رودخانه پوشش گیاهی علفی وجود دارد، اما کرانه چپ برهنه است (شکل ۸).



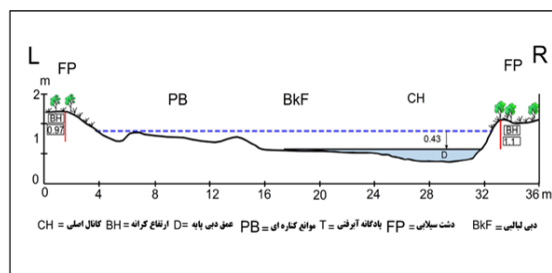
شکل ۷. نیمرخ عرضی مقطع پنجم از بازه پنج در رودخانه حاجی عرب



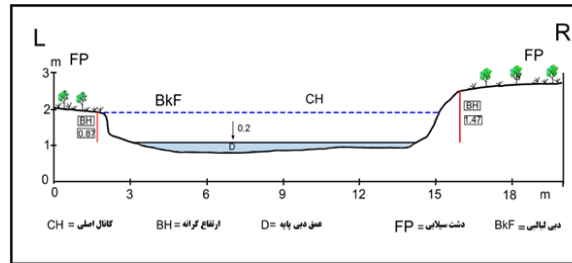
شکل ۸. نیمرخ عرضی مقطع ششم از بازه شش در رودخانه حاجی عرب

**مقطع هفتم:** این بازه در انتهای روستای یرجان قرار دارد و رسوبات بستر این مقطع اغلب گراولی است. رسوبات کرانه راست گراولی و رسوبات کرانه چپ سیلت و رسی است. ارتفاع و شیب کرانه راست بیشتر از کرانه چپ است. در سمت چپ پوشش گیاهی از نوع علفزارهای بلند و خشن مانند درختان گز است و سمت راست باغ و مزرعه است. کناره‌های رودخانه برهنه بوده و نوع کانال رودخانه پیچانرودی است (شکل ۹).

**مقطع هشتم:** این مقطع خارج از روستای یرجان قرار دارد. بیشتر رسوبات بستر از نوع گراولی است. رسوبات کرانه راست گراولی و کرانه چپ از نوع سیلت و رس است. کانال رودخانه الگوی مستقیم دارد و پوشش گیاهی منطقه بوته و درختچه و علفزارهای بلند است. کناره‌های رودخانه پوششی ندارد و برهنه است. کرانه‌ها از نظر شیب و ارتفاع، مقادیر نزدیک به یکدیگر دارند و اختلاف زیادی در آنها مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۹. نیمرخ عرضی مقطع هفتم از بازه هفت در رودخانه حاجی عرب



شکل ۱۰. نیم‌رخ عرضی مقطع هشتم از بازه هشت در رودخانه حاجی عرب

متغیرها در شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزارک برای همه بازه‌ها در هر دو کرانه بر پایه برداشت‌های میدانی، بررسی مقادیر و امتیازهای هر یک محاسبه شد و در نهایت وضعیت پایداری کانال ارزیابی شد (جدول‌های ۲ و ۳). مقاطع تحت مطالعه از نظر پایداری شرایط متفاوتی دارند و با توجه به نقش متغیرهای هر مدل، در چهار گروه ناپایدار، بسیار پایدار، پایدار و با پایداری متوسط قرار گرفته‌اند. بازه‌های ۲ و ۳ با توجه به درصد زیاد پوشش گیاهی چوبی و حفاظت کرانه رود در گروه بسیار پایدار قرار گرفته‌اند. بازه اول به دلیل نقش کرانه با ارتفاع بیش از ۸۰ درجه و زاویه کرانه در گروه ناپایدار قرار گرفته است (جدول ۲).

جدول ۲. خلاصه امتیازات شاخص‌های ناپایداری کرانه رود با روش OSEPI (کرانه چپ)

بازه متغیر	ارتفاع کرانه	زاویه کرانه	درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه	شواهد حرکت توده‌های	رسوبات منفصل	حفاظت کرانه رود	چوبی حاشیه رود پوشش گیاهی	قوس رود	امتیازها	طبقه‌بندی کرانه چپ
بازه ۱	۲/۵	۲	۱۰	۰	۲/۵	۱۲/۵	۱۵	۲/۵	۴۷	ناپایدار
بازه ۲	۰	۰	۲/۵	۰	۲/۵	۷/۵	۱۲/۵	۰	۲۵	بسیار پایدار
بازه ۳	۰	۰	۰	۰	۲/۵	۲/۵	۷/۵	۲/۵	۱۵	بسیار پایدار
بازه ۴	۲/۵	۲	۲/۵	۰	۷/۵	۷/۵	۱۲/۵	۵	۳۹/۵	پایدار

بازه / متغیر	ارتفاع کرانه	زاویه کرانه	درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه	شواهد حرکات توده‌ای	رسوبات منفصل	حفاظت کرانه رود	چوبی حاشیه رود پوش گیاهی	فوس رود	امتیازها	طبقه‌بندی کرانه چپ
بازه ۵	۰	۲	۱۰	۱/۵	۷/۵	۷/۵	۲/۵	۵	۳۶	پایدار
بازه ۶	۰	۲	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱۰	۷/۵	۲/۵	۲۹/۵	پایداری متوسط
بازه ۷	۰	۰	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱۰	۱۰	۵	۳۲/۵	پایداری متوسط
بازه ۸	۰	۲	۷/۵	۷/۵	۵/۰	۲/۵	۷/۵	۰	۳۲	پایداری متوسط

جدول ۳. خلاصه امتیازات شاخص‌های ناپایداری کرانه رود با روش OSEPI (کرانه راست)

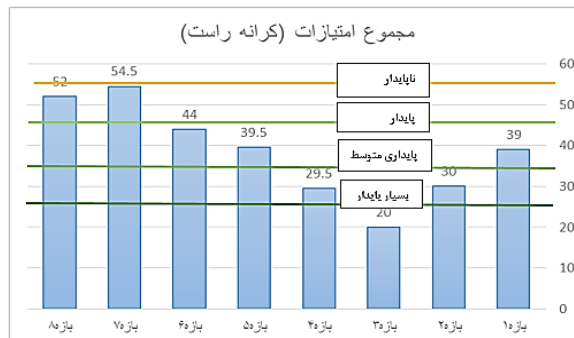
بازه / متغیر	ارتفاع کرانه	زاویه کرانه	بیش از ۸۰ درجه	شواهد حرکات توده‌ای	رسوبات منفصل	حفاظت کرانه رود	چوبی حاشیه رود پوش گیاهی	فوس رود	امتیازات راست	طبقه‌بندی پایداری کرانه راست
بازه ۱	۰	۴	۲/۵	۵	۵	۷/۵	۱۲/۵	۲/۵	۳۹	پایدار
بازه ۲	۲/۵	۰	۲/۵	۰	۵	۷/۵	۱۲/۵	۰	۳۰	پایداری متوسط
بازه ۳	۰	۰	۲/۵	۰	۵	۲/۵	۷/۵	۲/۵	۲۰	بسیار پایدار
بازه ۴	۲/۵	۲	۷/۵	۰	۲/۵	۷/۵	۲/۵	۵	۲۹/۵	پایداری متوسط
بازه ۵	۰	۲	۷/۵	۰	۵	۱۰	۱۰	۵	۳۹/۵	پایدار
بازه ۶	۰	۴	۵	۲/۵	۷/۵	۷/۵	۱۵	۲/۵	۴۴	پایدار

پایداری کرانه طبقه‌بندی راست	امتیازات	فوس رود	پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود	حفاظت کرانه رود	رسوبات منفصل	شواهد حرکات توده‌ای	درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه	زاویه کرانه	ارتفاع کرانه	بازه متغیر
ناپایدار	۵۴/۵	۵	۱۲/۵	۷/۵	۷/۵	۱۰	۷/۵	۲	۲/۵	بازه ۷
ناپایدار	۵۲	۰	۱۲/۵	۷/۵	۷/۵	۱۰	۱۰	۲	۲/۵	بازه ۸

کرانه راست در مدل پتانسیل فرسایش کانال وضعیت پایداری متفاوتی را نسبت به کرانه چپ نشان می‌دهد. با توجه به امتیاز زیاد درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه و شواهد حرکات توده‌ای، بازه‌های ۷ و ۸ در وضعیت ناپایداری هستند. بازه‌هایی که در گروه پایدار و بسیار پایدار قرار دارند، تحت تأثیر پارامترهایی چون پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود، مستقیم بودن کانال، حفاظت کرانه رود و رسوبات منفصل هستند (جدول ۳).



شکل ۱۱. وضعیت پایداری کانال در بازه‌های تحت مطالعه در رودخانه حاجی عرب با استفاده از شاخص پتانسیل فرسایش کانال در کرانه چپ



شکل ۱۲. وضعیت پایداری کانال در بازه‌های تحت مطالعه در رودخانه حاجی عرب با استفاده از شاخص پتانسیل فرسایش کانال در کرانه راست

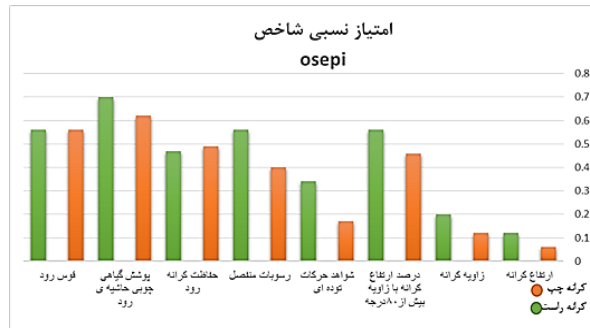
مجموع امتیازات شاخص پتانسیل فرسایش کانال در کناره چپ بین ۱۵ تا ۴۷ است و با توجه به این شاخص بازه‌های ۱ و ۴ با توجه به طبقه‌بندی مجموع امتیازات به ترتیب در گروه بسیار ناپایدار و پایدار قرار می‌گیرند و مقادیر بیشتر از ۴۷ نیز ناپایداری بیشتری دارند که در کرانه چپ ناپایدارترین بازه، بازه ۱ است. مجموع امتیازات کرانه راست در شاخص پتانسیل فرسایش کانال بین ۲۰ تا ۵۴/۵ متغیر است و ناپایدارترین کرانه در بازه‌های ۷ و ۸ است و بازه ۳ بسیار پایدار است.

### عوامل مؤثر در ناپایداری کناره در رودخانه حاجی عرب

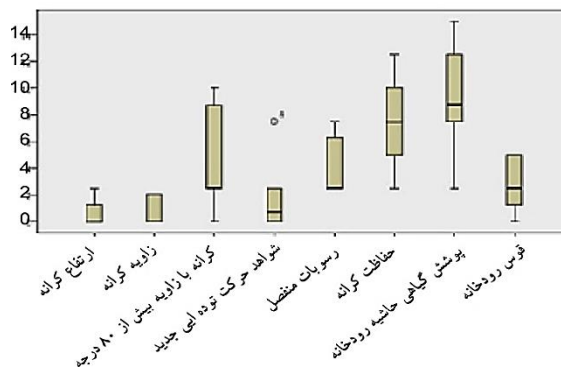
الف) امتیاز نسبی: در شاخص پتانسیل فرسایش کانال در کرانه راست با توجه به امتیاز نسبی به دست آمده از طریق تقسیم امتیاز هر متغیر بر حداکثر امتیاز آن، متغیر پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود رتبه اول در بین عوامل مؤثر در پایداری را به خود اختصاص داده است و پارامترهای قوس رود، رسوبات منفصل و درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در کرانه چپ پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود رتبه اول، قوس رود رتبه دوم و حفاظت کرانه رود رتبه سوم را به خود اختصاص داده است (شکل ۱۳).

ب) نمودار باکس پلات: نمودار نشان می‌دهد که مقادیر برخی پارامترها در بازه‌های مختلف تغییری نکرده است، مانند ارتفاع کرانه و زاویه کرانه. در حالی که پارامترهایی چون درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه، حفاظت کرانه و پوشش گیاهی حاشیه رود، بیشترین تغییرات را در بین پارامترها داشته‌اند، بنابراین این عوامل می‌توانند در تفاوت ناپایداری کرانه‌ها تأثیر داشته باشند. در صورتی که پارامترهایی که در همه بازه‌ها یکنواخت هستند نقش آنها در ناپایداری هم یکنواخت خواهد بود که یافته‌های میدانی هم گویای این حالت است (شکل ۱۴).

ج) ضریب همبستگی: ضریب همبستگی به دست آمده بین کناره راست و چپ در مدل فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزارک نشان‌دهنده همبستگی ضعیف ۰/۴۵ است. یعنی تغییر در مقادیر پارامتر در یک کرانه مشابه مقادیر اندازه‌گیری شده در کرانه مقابل نیست. بنابراین ناپایداری در یک کرانه همراه با ناپایداری در کرانه مقابل نیست ویژگی‌های مؤثر در ناپایداری به دلیل مورفومتری کانال و شرایط محیطی تغییر می‌کند. برای مثال مورفومتری کانال در قوس پیچان‌رودی در دو کرانه کاملاً متفاوت‌اند. بررسی مقادیر در هشت بازه تحت مطالعه نشان داد که مقادیر به دست آمده و حساسیت به فرسایش در طول محدوده تحت مطالعه در کرانه‌های مقابل متفاوت است.



شکل ۱۳. نمودار امتیاز نسبی نتایج امتیاز شاخص پتانسیل فرسایش کناره رودخانه حاجی عرب



شکل ۱۴. نمودار باکس و ویسکر پلات؛ امتیازهای هر یک از متغیرها به صورت مجزا در ارزیابی سریع ژئومورفیک در کرانه‌های چپ و راست مدل شاخص پتانسیل فرسایش کناره رود اکلاهما اوزارک

### نتیجه‌گیری

شاخص پتانسیل فرسایش رود اکلاهما اوزارک یکی از شاخص‌های تکنیک ارزیابی سریع ژئومورفیک است که با امتیازدهی به پارامترهای موجود در کرانه‌های چپ و راست بازه‌های تحت مطالعه به تعیین وضعیت پایداری آنها می‌پردازد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص پتانسیل فرسایش رود نشان می‌دهد که در کرانه چپ بازه‌های ۲ و ۳ بسیار پایدارند و بازه‌های ۴ و ۵ پایدارند و بازه‌های ۶، ۷ و ۸ پایداری متوسط دارند؛ این در حالی است که بازه اول ناپایدار است. اما کرانه راست وضعیت متفاوتی نسبت به کرانه چپ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی مؤید این مسئله است. کرانه راست بازه‌های ۱، ۵ و ۶ پایدارند و بازه‌های ۳ و ۴ پایداری متوسطی دارند. بازه‌های ۷ و ۸ بسیار ناپایدارند و بازه ۳ در وضعیت بسیار پایدار قرار دارد. از این‌رو

ناپایدارترین بازه‌ها تحت تأثیر پارامتر درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰ درجه و قوس رود بوده‌اند. همچنین پایداری بسیار زیاد برخی بازه‌ها تحت تأثیر پارامتر پوشش گیاهی و قوس رود است.

با توجه به امتیاز نسبی پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود در هر دو کرانه، مؤثرترین عامل در پایداری کرانه‌هاست و سپس قوس رود در کرانه چپ و درصد ارتفاع کرانه، قوس رود و رسوبات منفصل به یک اندازه در کرانه راست تأثیرگذار بوده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت در کرانه‌های رودخانه حاجی‌عرب وضعیت پایداری متوسط غالب است که این مسئله ناشی از دخالت نداشتن انسان در این بخش از رودخانه است. طبق یافته‌های هیرن و همکاران (۲۰۱۲) به‌منظور تحلیل وضعیت کنونی رودخانه‌ها می‌توان از مدل به‌کار گرفته‌شده در پژوهش حاضر بهره‌جست که بر پایه شاخص‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک هستند. این شاخص اگر همزمان با تکنیک و روش‌های دیگر تعیین پایداری به کار گرفته شود نتایج قابل اطمینان‌تری به‌دست می‌دهند. این روش ارزیابی سریع، ارزان‌قیمت و به‌نسبت ساده‌ای را به‌منظور تحلیل پایداری کرانه‌های رودخانه حاجی‌عرب امکان‌پذیر می‌سازد. در زمینه مدیریت رودخانه می‌توان مناطق حساس به فرسایش را شناسایی کرد و براساس این شناخت اقدامات اجرایی و عملیاتی به‌منظور جلوگیری از فرسایش کرانه‌های انجام داد؛ از مهم‌ترین این اقدامات در قوس‌های پیچانرودی (بازه‌های ۴، ۵ و ۷) اقدامات حفاظتی در دیواره‌های کانال است. همچنین در بازه‌های مستقیم (بازه‌های ۲ و ۸) نیز باید در کرانه‌های فرسایش‌پذیر اقدامات یادشده صورت پذیرد. براساس شرایط بازه‌ها می‌توان از روش‌های تلفیقی متعددی در جهت تثبیت و حفاظت دیواره رودخانه استفاده کرد.

### تقدیر و تشکر

از حمایت گروه جغرافیای دانشکده علوم انسانی دانشگاه تربیت مدرس در تدوین این مقاله تشکر می‌شود.

### منابع

- [۱] اطمینان، زهرا؛ رستمی، میلاد؛ و نصرتی، کاظم (۱۳۹۹). «بررسی پایداری کناره رودخانه طالقان در برابر فرسایش و راهکارهای مدیریتی آن با استفاده از روش تنش برشی لین»، *اكوهیدرولوژی، دوره ۷، شماره ۱، ص ۱۱۹-۱۱۱*.
- [۲] آقا نباتی، علی (۱۳۸۳). *زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور*.
- [۳] اسماعیلی، رضا؛ لرستانی، قاسم؛ و رجب‌پور، مریم (۱۳۹۵). «تغییرات بابل‌رود در محدوده



شهر بابل، مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره نهم.

[۴] جلیوند، رضا؛ حافظی مقدس، ناصر؛ و سلوکی، حمیدرضا (۱۳۹۰). مهندسی رودخانه سیستم براساس شاخص‌های ژئومورفیک از محل سد کهک تا دریاچه هامون هیرمند، دومین همایش علوم زمین و نکوداشت استاد پیشگام علم زمین‌شناسی ایران دکتر عبدالکریم قریب، آشتیان.

[۵] حسین‌زاده، محمدمهدی؛ و غلامی، پروین (۱۳۹۷). «تحلیل هیدرولوژیک پایداری بستر رودخانه مسیل‌موچان آستانه- استان مرکزی»، *کوهیدرولوژی*، شماره ۲، تابستان، ص ۵۳۳-۵۲۵.

[۶] حسین‌زاده، محمدمهدی؛ و اسماعیلی، رضا (۱۳۹۷). «برآورد فرسایش کرانه‌ای رودخانه با استفاده از مدل BSTEM»، *زمین‌شناسی/ایران*، سال ۱۱، شماره ۴۵، ص ۷۰-۵۳.

[۷] حسین‌زاده، محمدمهدی؛ و اسماعیلی، رضا (۱۳۹۴). *ژئومورفولوژی رودخانه‌ای: مفاهیم، فرم‌ها و فرایندها*، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.

[۸] خالقی، سمیه؛ حسین‌زاده، محمدمهدی؛ آتی‌کندی، فتح‌الله (۱۳۹۸). «طبقه‌بندی مورفولوژیکی و ناپایداری مجرای رودخانه کلیبرچای»، *هیدروژئومورفولوژی*، دوره ۶، شماره ۲۱، شماره پیاپی ۲۱، ص ۶۴-۴۳.

[۹] رضائی مقدم، محمدحسین؛ و پیروزی‌نژاد، نوشین (۱۳۹۳). «بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کرانه‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹»، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۸، شماره ۴۷، بهار، ص ۱۳۲-۱۰۹.

[۱۰] مقیمی، ابراهیم (۱۴۰۰). *اکوزئومورفولوژی و حقوق رودخانه*، چ دوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۱] ولی‌پور، طاهر؛ حسین‌زاده، محمدمهدی؛ اسماعیلی، رضا؛ و متش بیرانوند، سعیده؛ (۱۳۹۹). «مطالعه فرسایش‌پذیری کرانه و عوامل مؤثر بر آن در رودخانه لایوچ (استان مازندران، چمستان)»، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، دوره ۲۰، شماره ۵۹، ص ۱۳۶-۱۱۹.

[۱۲] یمانی مجتبی؛ و ابراهیم‌خانی نرگس (۱۳۸۹). «ارزیابی فرسایش‌پذیری سازندها از طریق رسوب‌شناسی آبرفت‌های معرف (مطالعه موردی: حوضه حاجی‌عرب در استان قزوین)»، *جغرافیا*، دوره ۸، شماره ۲۴، ص ۸۶-۶۹.

- [13] Ali, M. R.; Ahmed, Z.; Islam, A. H.; & Rahman, M. M. (2021). "River Bank Erosion, Induced Population Migration and Adaptation Strategies in the Sirajganj Sadar Upazila, Bangladesh", *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 2(2),pp: 39-47. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.2.131>
- [14] Bledsoe, B.P.; Stein, E.D.; Hawley, R.J.; & Booth, D. (2012). "Framework and Tool for Rapid Assessment of Stream Susceptibility to Hydromodification", *Journal of the American Water Resources Association*, pp: 1-21, DOI: 10.1111 / j.1752-1688.2012.00653
- [15] Bartholdy, J.; & Billi, P. (2002). *Morphodynamics of pseudomeandering gravel bar reach*
- [16] Coryat, M. (2014). Analysis of the Bank Assessment for Non-point Source Consequences of Sediment (BANCS) Approach for the Prediction of Streambank Stability and Erosion along Stony Clove Creek in the Catskills. Master of Science Thesis, Syracuse University.
- [17] De Rose, R.C.; & Basher, L.R. (2011). "Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography", *Geomorphology*, NO. 126, PP:132-147.
- [18] Gray , D.H.; & Leiser, A.T. (1982). "Bio-Technical slope Protection and Erosion Control", *Van Nostrand Reinhold Company inc.*, New York
- [19] Heeren, D.M.; Mittelstet, A.R.; Fox, G.A.; Storm, D .E.; Al - Madhhachi, A.T.; Midgley, T.L.; Stringer, A.F; Stunkel, K.B.; & Tejral, R.D. (2012). "Using rapid geomorphic assessments to assess stream bank stability in Okkahnoma Ozarak streams", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol.55(3), pp: 957-968.
- [20] Hughes, A.O.; Huirama, M. K.; Owens, P. N.; & Petticrew, E. L. (2021). "Stream bank erosion as a source of sediment within New Zealand catchments", *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, doi.org/10.1080/00288330.2021.1929352
- [21] Janes, V.J.J.; Nicholas, A.P.; Collins, A.L.; & Quine, T.A. (2017). "Analysis of fundamental physical factors influencing channel bank erosion: results for contrasting catchments in England and Wales", *Environ Earth Sci* . No. 76:307, DOI 10.1007/s12665-017-6593-x.
- [22] Johnson, P.A.; Gleason, G.L. & Hey, R.D. (1999). "Rapid assessment of channel stability in Vivtyny of road crossing", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 6, pp: 645-651
- [23] Jorge, D. Abad; Macelo H. Garcia (2006). "RVR Meander: A Toolbox

for Re-meandering of Channelized Streams”, *Computers & Geosciences*, 32 pp: 92-101

- [24] Knighton, D. (2014). *Fluvial forms and processes: a new perspective*, Routledge, New York, NY, pp: 400.
- [25] Kwan, H; & Swanson, S. (2014). “Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest”, *California. JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(6), pp: 1439–1447.
- [26] Petersen M.S. (1986). *River Engineering*, Prentice-Hall.
- [27] Simon, A.; & Klimetz, L.(2008). “Magnitude, frequency and duration relations for suspended sediment in stable (reference) southeastern streams”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5.
- [28] Simon, A.; & Downs, P. W. ( 1995). “An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channels”, *Geomorphology*, Vol. 12(3), pp:215-23.
- [29] Thakur, P.K.; Laha, C. & Aggarwal, S.P. (2012). “River bank erosion hazard study of river Ganga. upstream of Farakka barrage using remote sensing and GIS”, *Nat Hazards*, No. 61, pp: 967–987.
- [30] Zainal Abidin, R; Sulaiman, M.S. & Yusoff, N. (2017). “Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia”, *International Soil and Water*.