

## تحلیل پایداری کرانه رود با استفاده از تکنیک‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک مطالعه موردی: رودخانه سیمره در محدوده شهرستان دره شهر استان ایلام

رضا اسماعیلی\* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.  
راضیه محمدیان - دانشجوی کارشناسی‌ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.  
قاسم لرستانی - استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۹      تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰

### چکیده

فرسایش کرانه رود اثرات ژئومورفیک متعددی بر کانال رود شامل تخریب کناره رودخانه، تغییر مسیر رود، افزایش ورود رسوبات به جریان، رسوب‌گذاری در رودخانه و غیره ایجاد نموده و می‌تواند به‌عنوان یک مخاطره برای فعالیت‌های انسانی محسوب گردد. در این مقاله پایداری و ناپایداری کرانه رود با استفاده از روش‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک (RGA) در قسمت‌هایی از رودخانه سیمره (در شهرستان دره شهر، استان ایلام) مورد بررسی قرار گرفت. رودخانه سیمره در محدوده مورد مطالعه به ۱۳ بازه تقسیم‌بندی شد و با نقشه‌برداری از مقاطع عرضی نمونه و عملیات میدانی شاخص‌های پایداری و ناپایداری کرانه رود ارزیابی شدند. روش شاخص پایداری کانال رود (CSI) و شاخص پتانسیل فرسایش کرانه رود اکلاهما - اوزاراک (OSEPI) برای مطالعه فرسایش کرانه رود مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس روش CSI همه بازه‌های مورد مطالعه دارای ناپایداری متوسط بوده‌اند و شاخص‌های فرسایشی بستر، فرسایش کناره، شواهد حرکات توده‌ای و مدل تکاملی رود مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تعیین میزان پایداری و ناپایداری کرانه رود ارزیابی شدند. در روش OSEPI، ۸۶ درصد بازه‌ها دارای ناپایداری متوسط و ۱۴ درصد بازه‌ها در حالت ناپایدار ارزیابی شدند. در این روش، شاخص‌های ارتفاع کرانه، رسوبات منفصل کرانه، شواهد فرسایش کرانه و پوشش گیاهی حاشیه رود به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در میزان ناپایداری کناره رود تعیین شدند. امتیازات به‌دست‌آمده از هر دو روش رابطه مثبت و نسبتاً خوبی ( $R^2 = 0.71$ ) داشته‌اند. نتایج امتیازدهی شاخص‌ها و امتیازات نسبی عوامل در ناپایداری کرانه رود نشان می‌دهد که روش OSEPI شاخص‌های مناسب‌تری را ارائه نموده و تقسیم‌بندی توصیفی آن بهتر از روش CSI قابلیت تفکیک دارد.

واژگان کلیدی: فرسایش کرانه رود، ارزیابی سریع ژئومورفیک، سیمره، ایلام.

## مقدمه

فرسایش کناره رود به‌عنوان یکی از انواع فرسایش آبی می‌تواند اثرات ژئومورفیک متعددی در رودخانه ایجاد نماید. در شرایط طبیعی فرسایش کناره رود یکی از مکانیسم‌های تحول و تکامل رودخانه محسوب می‌شود. اما دخالت انسان‌ها در سیستم رودخانه و یا قرار گرفتن انسان و دارایی‌ها او در مسیر رود می‌تواند به‌عنوان مخاطره قلمداد شود. فرسایش کناره رود علاوه بر تخریب کناره‌های رود، موجب افزایش رسوبات در جریان آب، تغییرات الگوی رودخانه مانند گسترش پیچان‌رودها، تغییر مسیر رودخانه و افزایش رسوب‌گذاری در کانال رود می‌شود. همچنین ورود بیش‌ازحد رسوب، کاهش کیفیت جریان آب و کاهش زیستگاه‌های آبی را به همراه دارد. این اثرات زمانی بیشتر قابل درک است که به‌طور مستقیم به انسان خسارت وارد شود. تخریب جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی، پل‌ها و سایر سازه‌های رودخانه‌ای از جمله این خسارات است. از این‌رو شناسایی کناره‌های ناپایدار رودخانه می‌تواند در مدیریت محیط‌های رودخانه‌ای مؤثر واقع شود.

میزان فرسایش کناره رود تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب رسوبات کناره، ویژگی‌های هندسی کناره، دبی، پوشش گیاهی و شعاع قوس رودخانه قرار دارد (جینز و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به ماهیت پیچیده شرایط هیدرولیکی کانال رود و ویژگی‌های فیزیکی کناره‌های رود میزان فرسایش بسیار متغیر است (پیگای و همکاران، ۲۰۰۵). تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری فرسایش کناره رود وجود دارد که برخی از آن‌ها با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های لیدار<sup>۱</sup> انجام شده است که می‌توان به مطالعات سارما و همکاران (۲۰۰۷) درز و باشر<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) تاکور و همکاران (۲۰۱۲)، یمانی و شرفی (۱۳۹۱) رضایی مقدم و پیروزی نژاد (۱۳۹۳) اشاره کرد. به‌کارگیری این داده‌ها به علت مشکلات در دسترسی و پوشش زمانی نامناسب با محدودیت مواجه است. تکنیک‌های میدانی متعددی مانند میله‌های فرسایشی، نقشه‌برداری از مقطع کانال و میله‌های فرسایشی فتوالکتریک<sup>۳</sup> (PEEP) برای ارزیابی فرسایش کناره رود مورد استفاده قرار می‌گیرد (لاولر ۱۹۹۳، اسماعیلی و همکاران ۱۳۹۰). این تکنیک‌ها دقت زیادی دارند اما وقت‌گیر بوده و در مقیاس زمانی ماه‌ها تا سال‌ها قابل به‌کارگیری هستند.

در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، مجموعه‌ای از شاخص‌های عینی برای اندازه‌گیری سریع ویژگی‌های ژئومورفولوژیک (مانند پایداری و ناپایداری کانال رود) مورد استفاده قرار می‌گیرند که تکنیک‌های ارزیابی سریع ژئومورفیک<sup>۴</sup> (RGA) نام دارند. با استفاده از این تکنیک‌ها، عوامل مؤثر در وقوع اشکال ژئومورفیک در روی زمین امتیازدهی می‌شوند و مجموع امتیازات همه عوامل، شرایط موردنظر را توصیف می‌نماید. تاکنون روش‌های متعددی از RGA برای بررسی فرسایش کناره رود به کار گرفته شده است که تعدادی از مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ارزیابی پایداری کانال<sup>۵</sup> (فنکوچ<sup>۶</sup>، ۱۹۷۸)، شاخص پایداری کانال<sup>۷</sup> (سیمون و دونز، ۱۹۹۵)، روش<sup>۸</sup> ACS (جانسون و همکاران، ۱۹۹۹)، شاخص خطر فرسایش کناره<sup>۹</sup> یا

<sup>۱</sup> - LIDAR

<sup>۲</sup> - De Rose and Basher

<sup>۳</sup> - Photo-electronic erosion pin

<sup>۴</sup> - Rapid Geomorphic Assessment (RGA)

<sup>۵</sup> - Channel Stability Assessment (CSA)

<sup>۶</sup> - Pfanchuch

<sup>۷</sup> - Channel Stability Index (CSI)

<sup>۸</sup> - Assessing Channel Stability (ACS)

<sup>۹</sup> - Bank Erosion Hazard Index (BEHI)

BEHI و روش تنش برشی نزدیک کرانه<sup>۱</sup> یا NBS (راسگن، ۲۰۰۱)، روش CSI<sup>۲</sup> (سیمون و کلیمتر، ۲۰۰۸)، روش OSEPI<sup>۳</sup> (هیرن و همکاران، ۲۰۱۲) و روش ROM<sup>۴</sup> (زینال عابدین و همکاران، ۲۰۱۷). اسپرویت<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل هیدرولیکی را برای ارزیابی سریع فرسایش کرانه رود در هلند ارائه دادند. در این مدل اثر امواج ناشی از حرکت کشتی و فرسایش در اثر جریان آب در چند سناریوی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و حجم بالقوه فرسایش تخمین زده شد. سیمپسون و همکاران (۲۰۱۴) روش شاخص خطر فرسایش کرانه را در برای زیستگاه‌های رودخانه‌ای و فراوانی جانوران بی‌مهره درون آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در نزدیکی کرانه‌های با خطر فرسایشی کمتر تنوع و فراوانی جانوران بی‌مهره بیشتر بوده و در کناره‌های با فرسایش بیشتر این تنوع و فراوانی کاهش یافته است. لذا این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت تحلیل اکولوژیکی و زیست‌شناختی در محیط رودخانه‌ای به کار رود.

حسین زاده و همکاران (۱۳۹۶ الف) با استفاده از روش BEHI فرسایش کرانه رود را در رودخانه قرائقچای (شهرستان هشتگرد) مورد ارزیابی قرار دادند نتایج نشان داد که میزان خطر فرسایش در کناره سمت راست رودخانه در همه بازه‌های مورد مطالعه در سطح متوسط تا خیلی زیاد است.

حسین زاده و همکاران (۱۳۹۶ ب) با روش تنش برشی نزدیک کرانه رودخانه (NBS) خطر فرسایش کرانه رود را در رودخانه گلالی قروه مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان داد که روش نسبت عمق نزدیک کرانه به عمق میانگین لبالی بیشترین مطابقت را با فرسایش کناره‌ای این رودخانه دارد. با استفاده از این روش میزان خطر فرسایش کناره‌ای در بازه‌های مورد مطالعه کم ارزیابی شده است.

این تحقیق با هدف ارزیابی پایداری و ناپایداری کرانه‌های رودخانه و شناسایی عوامل مؤثر در وقوع آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های RGA انجام شده است.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سیمره یکی از سرشاخه‌های رودخانه کرخه است که در جنوب غرب کشور در رشته‌کوه‌های زاگرس در دو استان ایلام و لرستان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه قسمتی از رودخانه سیمره به طول ۱۸ کیلومتر است که در پایین‌دست سد سیمره (شهرستان دره شهر در استان ایلام) و در طول‌های جغرافیایی ۱۴' و ۴۷' تا ۲۰' و ۴۷' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۳' و ۳۳' تا ۱۵' و ۳۳' شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). افزایش عرض دره در محدوده مورد مطالعه موجب تشکیل رسوبات آبرفتی در بستر فعلی و قدیمی رودخانه شده است. با توجه به سستی رسوبات منفصل آبرفتی و مجاورت آن با جریان رود، انواع اشکال فرسایشی شامل حرکات توده‌ای، گالی، فرسایش شیاری و فرسایش کناره رود در مجموع موجب ناپایداری کرانه رود شده‌اند (شکل ۲). در دامنه‌های متصل به این دره سازندهای گچساران و آهک‌های آسماری به ترتیب بیشترین پراکنش را دارند. میانگین بارش سالانه محدوده تقریباً ۴۰۰ میلی‌متر است. بستر رودخانه در این محدوده در ارتفاع متوسط ۵۸۰ متری از سطح دریا قرار دارد. میانگین دبی سالانه این رودخانه در ایستگاه نظرآباد ۱۰۷ مترمکعب در ثانیه بوده و حداکثر آن در فروردین و اسفند با دبی میانگین ۲۹۰ و ۲۱۴ مترمکعب در ثانیه است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۷).

<sup>1</sup> - Near-Bank Stress (NBS)

<sup>2</sup> - Channel Stability Index (CSI)

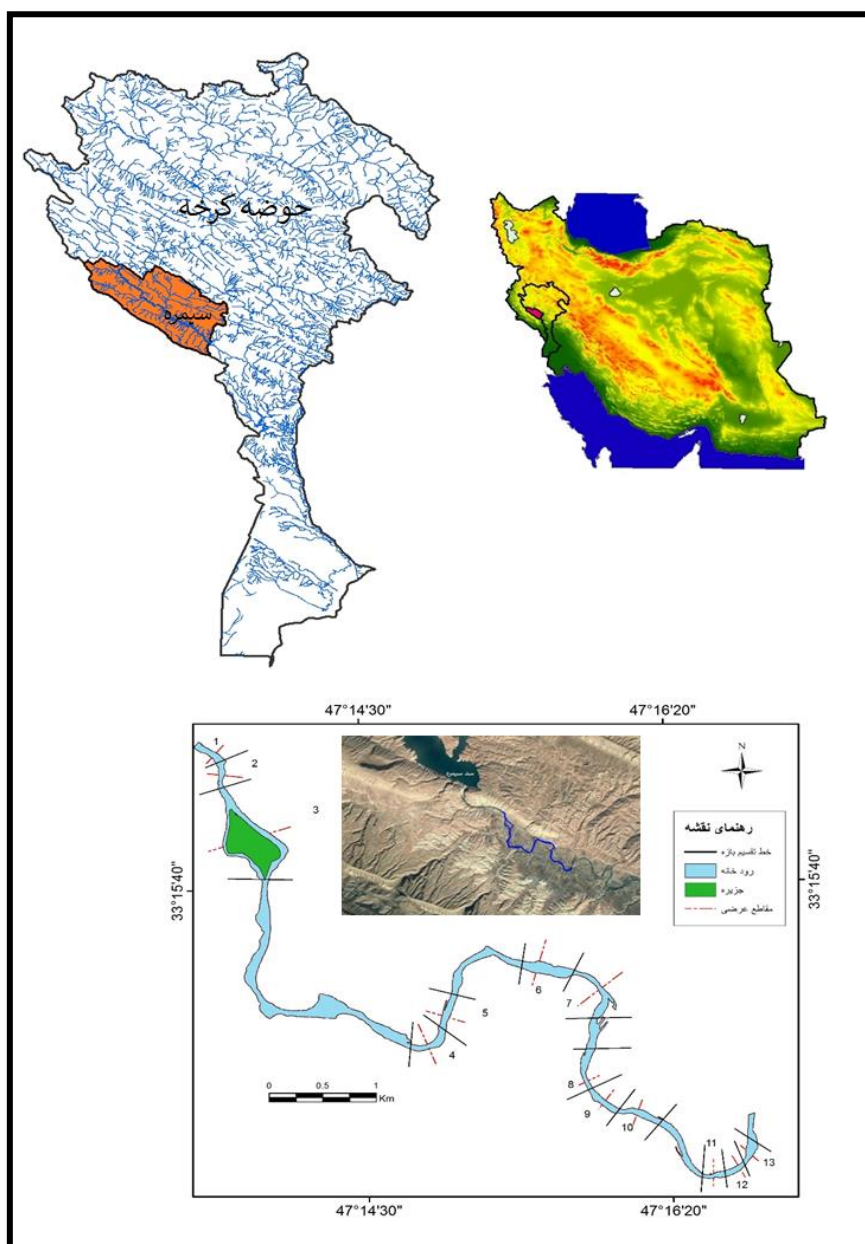
<sup>3</sup> - Oklahoma Ozark streambank erosion potential index (OSEPI)

<sup>4</sup> - Roslan and Mazidah (ROM)

<sup>5</sup> - Spruyt

## مواد و روش‌ها

جهت بررسی پایداری کناره رود ۱۳ بازه از رودخانه سیمره (در قسمت پایین دست سد سیمره در محدوده شهرستان دره شهر استان ایلام) مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱). برای اندازه‌گیری برخی پارامترهای هندسی کرانه رود مانند ارتفاع و شیب کرانه و عمق جریان از هر بازه حداقل یک مقطع عرضی نمونه با استفاده از دوربین نقشه‌برداری برداشت شد. عرض این مقاطع از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر متغیر بوده و دشت سیلابی و تراس آبرفتی هم نقشه‌برداری شدند. سپس بر اساس دو روش شاخص پایداری کانال (CSI) و شاخص فرسایش رود اکلاهما-اوزارک (OSEPI) متغیرهای مربوط به هر روش با بررسی‌های میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

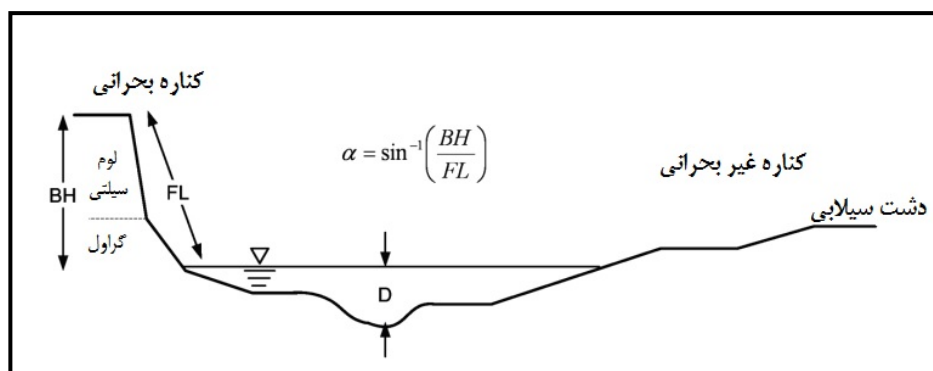


شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه و بازه‌های مورد بررسی در رودخانه سیمره



شکل ۲: تصاویری از فرسایش و حرکات توده‌ای در کرانه رودخانه سیمره

**شاخص پایداری کانال (CSI):** این روش در سال ۲۰۰۸ توسط سیمون و کلیمتز<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. این روش فقط برای کناره‌های بحرانی یعنی کناره‌هایی که ارتفاع داشته و در نزدیکی جریان آب قرار دارند قابل استفاده است. شکل ۳ پارامترهای هندسی برای کناره بحرانی رود را نشان می‌دهد. در این روش نه عامل در ارزیابی پایداری کانال رود مورد بررسی قرار می‌گیرند که عبارتند از رسوبات بستر رود، حفاظت از بستر یا کناره، در صد فرو سایی<sup>۲</sup> (حفر کانال)، درصد محدودیت، فرسایش کناره رود، ناپایداری کناره رود، درصد پوشش گیاهی درختی حاشیه رودخانه (ری پارین<sup>۳</sup>)، در صد رسوب گذاری در کناره رود و مرحله مدل تکاملی رود. جدول ۱ پارامترهای مورد ارزیابی و امتیازات مربوط به هر پارامتر نشان می‌دهد.



شکل ۳: پارامترهای هندسی مقاطع عرضی رود (هیرن و همکاران، ۲۰۱۲)

<sup>۱</sup>- Simon and Klimetz

<sup>۲</sup>- Incision

<sup>۳</sup>- Riparian

بر اساس جدول یک، رسوبات درشت‌تر امتیاز کمتر و رسوبات ریزتر امتیاز بیشتری می‌گیرند. درجه محدودیت از بالادست به پایین‌رود نسبتاً کاهش می‌یابد. برای تخمین قطر میانگین رسوبات بستر (گراولی، قطر سنگ و قلوه سنگ یا بستر سنگی) اندازه ذرات درروی زمین اندازه‌گیری می‌شود. حفاظت بستر رود میزان خطر فرسایش یا فرسایشی بستر را نشان می‌دهد. امتیاز صفر نشان‌دهنده‌ی حفاظت از بستر (به‌عنوان مثال سنگ‌بستر یا آرمورینگ<sup>۱</sup>) و کناره است. اگر رود حفاظت بستر نداشته باشد امتیاز ۱ ثبت می‌شود و اگر کناره و بستر هر دو حفاظت شده باشند امتیاز ۳ ثبت می‌شود. در این مورد امتیاز حفاظت از بستر و کناره باهم جمع می‌شوند.

جدول ۱: امتیازات متغیرها در روش ناپایداری کانال رود (CSI)

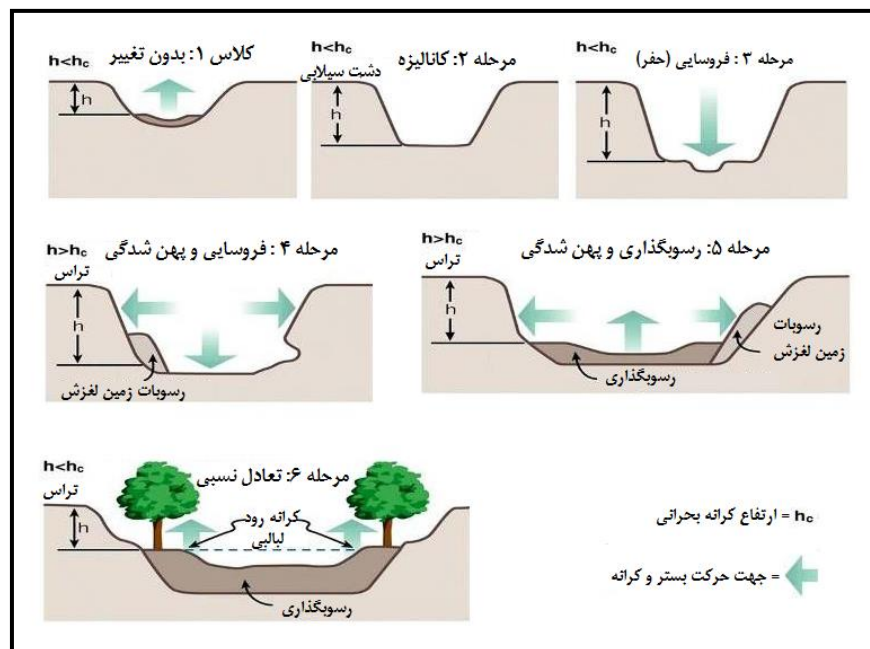
ردیف	سؤال	۱ امتیاز CSI
۱	اندازه رسوبات بستر تخته‌سنگ سنگ‌فرش گراول شن گل لای/خاک رس	۰ ۱ ۲ ۳ ۴
۲	حفاظت بستر یا کناره هر دو حفاظت‌شده بدون حفاظت + یک کناره حفاظت‌شده هر دو کناره حفاظت‌شده	۰ ۱ ۲ ۳
۳	درجه فرو سایی D/(BH+D)	۰-۱۰٪ ۱۱-۲۵٪ ۲۶-۵۰٪ ۵۱-۷۵٪ ۷۶-۱۰۰٪
۴	درجه محدودیت کانال W/W <sub>u</sub>	۰-۱۰۰٪ ۱۱-۲۵٪ ۲۶-۵۰٪ ۵۱-۷۵٪ ۷۶-۱۰۰٪
۵	فرسایش کناره رود بدون فرسایش کناره دارای فرسایش رودخانه‌ای کناره دارای حرکات توده‌ای	چپ راست ۰ ۱ ۲
۶	ناپایداری کناره رود (درصد حرکات توده‌ای در کناره)	۰-۱۰٪ ۱۱-۲۵٪ ۲۶-۵۰٪ ۵۱-۷۵٪ ۷۶-۱۰۰٪
۷	پوشش گیاهی درختی در ری پآرین	۰-۱۰٪ ۱۱-۲۵٪ ۲۶-۵۰٪ ۵۱-۷۵٪ ۷۶-۱۰۰٪
۸	وجود اشکال رسوبی در کناره رود	۰-۱۰٪ ۱۱-۲۵٪ ۲۶-۵۰٪ ۵۱-۷۵٪ ۷۶-۱۰۰٪
۹	مرحله مدل تکامل کانال	I II III IV V VI

<sup>۱</sup>- Armoring

درجه فروسایی به صورت  $D/(BH+D)$  یعنی نسبت عمق جریان پایه (D) به مجموع ارتفاع کناره (BH) و عمق جریان پایه (D) تعریف می‌شود. کانال‌های با فروسایی زیاد امتیاز بالاتری می‌گیرند. درجه محدودیت کانال از نسبت عرض کانال در مقطع نمونه (W) به عرض بالادست رود ( $W_u$ ) محاسبه می‌شود. شواهد فرسایش رودخانه‌ای و حرکات توده‌ای برای هر دو کناره محاسبه می‌شوند و وقتی که امتیازهای کناره چپ و راست به هم اضافه می‌شوند می‌تواند تا ۶ برسد. شواهد حرکات توده‌ای شامل زمین‌لغزش در کناره‌ها، ریزش سطحی خاک در پایین کناره و تشکیل لبه‌های دندانه‌دار در بالای کناره‌ها می‌شوند. در بازه‌های مستقیم، هر دو کناره ممکن است یک یا چند نوع فرسایش داشته باشند. در صد کناره‌هایی که دارای حرکات توده‌ای هستند بر اساس درصد کل بازه تخمین زده می‌شود (سیمون و کلیمتز، ۲۰۰۸).

در صد کناره‌هایی که به وسیله گیاهان حاشیه رودخانه تقویت می‌شوند برای هر دو کناره چپ و راست تخمین زده می‌شود و سپس امتیاز دو کناره با هم جمع می‌شوند. برای عامل رسوب‌گذاری در کناره رود، از اشکال رسوبی متصل به کناره رود مانند موانع رسوبی گراولی و پوینت بارها استفاده شده و در صد وجود این اشکال در پای کناره محاسبه شده است. مرحله تکامل رود از مدل ۶ مرحله‌ای سیمون و هوپ (۱۹۸۶) تعیین مرحله می‌شود. بدین صورت که با مشاهده اشکال فرسایشی و رسوب‌گذاری کانال با این مدل ۶ مرحله‌ای تطبیق داده می‌شود (شکل ۴) و امتیاز مربوط به هر مرحله، برای بازه مورد بررسی ثبت می‌شود.

مجموع امتیازهای عوامل فوق وضعیت پایداری و ناپایداری کرانه رود را نشان می‌دهد. امتیاز کمتر از ۱۰ حالت پایدار، بین ۱۰ تا ۲۰ ناپایداری متوسط و امتیاز بیش از ۲۰ نشان‌دهنده ناپایداری بسیار زیاد است (سیمون و کلیمتز، ۲۰۰۸).



شکل ۴: مدل تکاملی کانال رود (سیمون و هوپ، ۱۹۸۶ و سیمون و کلیمتز، ۲۰۰۸: ۱۲۷۵)

روش شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزاراک (OSEPI): این روش توسط هیرن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) جهت ارزیابی سریع ژئومورفیک از فرسایش کناره رود برای اندازه‌گیری رودهای بزرگ‌تر مطرح گردید. در این

<sup>۱</sup> Heeren

روش ۸ عامل ارتفاع کناره رود، زاویه کرانه، درصدی از کرانه رود که شیب بیش از ۸۰ درجه دارند، شواهد حرکات توده‌ای، رسوبات منفصل، حفاظت کناره رود، پوشش گیاهی حاشیه رود و انحنا رود بر اساس جدول ۲ امتیازدهی می‌شوند. در این روش، امتیازات ۰-۲۵ بسیار پایدار، ۲۶-۳۵ پایداری متوسط، ۳۶-۴۵ پایدار، ۴۶-۵۵ ناپایدار، ۵۶-۶۵ ناپایداری متوسط و ۶۶-۸۵ ناپایداری زیاد دارند.

جدول ۲: امتیازات روش شاخص فرسایش بالقوه کرانه رود اکلاهما اوزاراک (OSEPI)

۱- ارتفاع کرانه (m)					
۱-۰/۵	۱/۳-۵	۴-۳/۵	۴/۶-۵	۶+	
۰	۲/۵	۵	۷/۵	۱۰	
۲- زاویه کرانه (°) BH/FL					
۲۰-۰°	۰°-۲۱	۰°-۶۱	۰°-۸۱	۱°-۱۱۹	>۱۱۹°
۰	۲	۴	۶	۸	۱۰
۳- درصد ارتفاع کرانه با زاویه بیش از ۸۰°					
۰-۱۰%	۱۱-۲۵%	۲۶-۵۰%	۵۱-۷۵%	۷۶-۱۰۰%	
۰	۲/۵	۵	۷/۵	۱۰	
۴- شواهد حرکات توده‌ای جدید (درصد کرانه)					
۱۰-۰	۲۵-۱۱	۵۰-۲۶	۷۵-۵۱	۱۰۰-۷۶	
۵- رسوبات منفصل (درصد کرانه)					
۱۰-۰%	۱۱-۲۵%	۲۶-۵۰%	۵۱-۷۵%	۷۶-۱۰۰%	
۰	۲/۵	۵	۷/۵	۱۰	
۶- حفاظت کرانه رود (درصد کرانه رود پوشیده از ریشه گیاهان، گیاهان، شاخه‌ها، سنگ‌ها)					
۱۰-۰%	۱۱-۲۵%	۲۶-۵۰%	۵۱-۷۰%	۷۱-۹۰%	۹۱-۱۰۰%
۱۵	۱۲/۵	۱۰	۷/۵	۲/۵	۰
۷- پوشش گیاهی چوبی حاشیه رود					
۱۰-۰%	۱۱-۲۵%	۲۶-۵۰%	۵۱-۷۰%	۷۱-۹۰%	
۱۵	۱۲/۵	۱۰	۴/۵	۰	
۸- قوس رود					
مئاندر		انحنای کم		مستقیم	
۵		۲/۵		۰	

## نتایج

در محدوده مورد مطالعه امتیازدهی شاخص‌های مختلف روش CSI در جدول ۳ نشان داده شده است. رسوبات بستر در همه بازه‌ها در اندازه گراول (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) بوده و بستر و کناره رود فاقد هرگونه حفاظت مصنوعی توسط انسان بوده است از این رو، امتیاز این دو شاخص برای همه بازه‌ها یک‌سان و به ترتیب ۲ و ۱ ثبت شده است. ارتفاع کرانه‌های بحرانی به علت مجاورت با تراس آبرفتی زیاد بوده و بین ۶ تا ۳۴ متر برای بازه‌های ۹ و ۴ متغیر بوده است لذا این حالت موجب افزایش مقدار شاخص فرسایشی شده و امتیاز آن از ۲ تا ۴ تغییر کرده است. شاخص درجه محدودیت (تغییرات عرض رود از بالادست به پایین دست بازه) به جز در بازه‌های ۳-۱ و ۵ کم بوده و اغلب بازه‌ها امتیاز صفر داشته‌اند. از نظر فرسایش کناره رود در اغلب بازه‌ها حرکات توده‌ای مشاهده شده و در ۲۵ تا ۷۵ درصد موارد شواهدی حرکات توده‌ای وجود دارد. در حاشیه رودخانه بین ۲۵ تا ۷۵ درصد سطح کرانه دارای پوشش گیاهی درختی و درختچه‌ای بوده و بیشتر



بازه‌ها امتیاز ۰/۵ تا ۱ را کسب نموده‌اند. اشکال رسوبی متصل به کرانه رود در ۱۰ تا ۷۵ درصد کناره‌ها وجود داشته امتیاز این شاخص بین ۰/۵ تا ۱/۵ شده است.

جدول ۳: خلاصه امتیازات شاخص‌های ناپایداری کرانه رود با روش CSI

طبقه‌بندی	امتیاز	مدل تکاملی	اشکال رسوبی	پوشش گیاهی ری پارین	حرکات توده‌ای کرانه	فرسایش کرانه	درجه محدودیت	فروسایی بستر	کرانه حفاظت شده	جنس رسوبات بستر	متغیرها بازه‌ها
متوسط	۱۶	۳	۰/۵	۰/۵	۲	۳	۰	۴	۱	۲	بازه ۱
متوسط	۱۵	۴	۱/۵	۰/۵	۱	۲	۰	۳	۱	۲	بازه ۲
متوسط	۱۶/۵	۳	۱	۰/۵	۲	۲	۴	۳	۱	۲	بازه ۳-۱
متوسط	۱۷/۵	۳	۱/۵	۱	۱/۵	۳	۰	۳	۱	۲	بازه ۳-۲
متوسط	۱۸/۵	۳	۰/۵	۲	۱/۵	۳	۰	۴	۱	۲	بازه ۴
متوسط	۱۵/۵	۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۲	۴	۲	۱	۲	بازه ۵
متوسط	۱۶/۵	۳	۰/۵	۲/۵	۱/۵	۲	۱	۳	۱	۲	بازه ۶
متوسط	۱۴	۳	۰/۵	۰/۵	۱	۳	۰	۳	۱	۲	بازه ۷
متوسط	۱۶	۳	۰/۵	۰/۵	۱	۳	۱	۳	۱	۲	بازه ۸
متوسط	۱۵/۵	۳	۱	۱	۱/۵	۲	۱	۳	۱	۲	بازه ۹
متوسط	۱۵/۵	۳	۱/۵	۱	۱	۲	۰	۴	۱	۲	بازه ۱۰
متوسط	۱۵	۳	۰/۵	۱	۱/۵	۳	۰	۳	۱	۲	بازه ۱۱
متوسط	۱۶	۳	۱/۵	۰/۵	۱/۵	۲	۰	۳	۱	۲	بازه ۱۲
متوسط	۱۶	۳	۱/۵	۱	۲	۲	۰	۳	۱	۲	بازه ۱۳

از نظر مدل تکاملی رود، اغلب بازه‌ها در مرحله ۵ قرار داشته و فقط بازه ۲ در مرحله ۴ قرار گرفته است. مجموع امتیازات بازه‌های مورد مطالعه با روش CSI از ۱۴ تا ۱۸/۵ متغیر بوده است که طبق تقسیم‌بندی این روش، همه بازه‌ها در گروه ناپایداری متوسط قرار می‌گیرند.

در روش OSEPI هم مقادیر شاخص‌های مختلف امتیازدهی شدند که نتایج آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. مجموع امتیازات روش برای بازه‌های مورد مطالعه از ۴۷ تا ۶۰ متغیر بوده است که بر اساس این روش، ۸۶ درصد بازه‌ها در حالت ناپایداری متوسط و ۱۴ درصد بازه‌ها در حالت ناپایدار قرار گرفته‌اند.

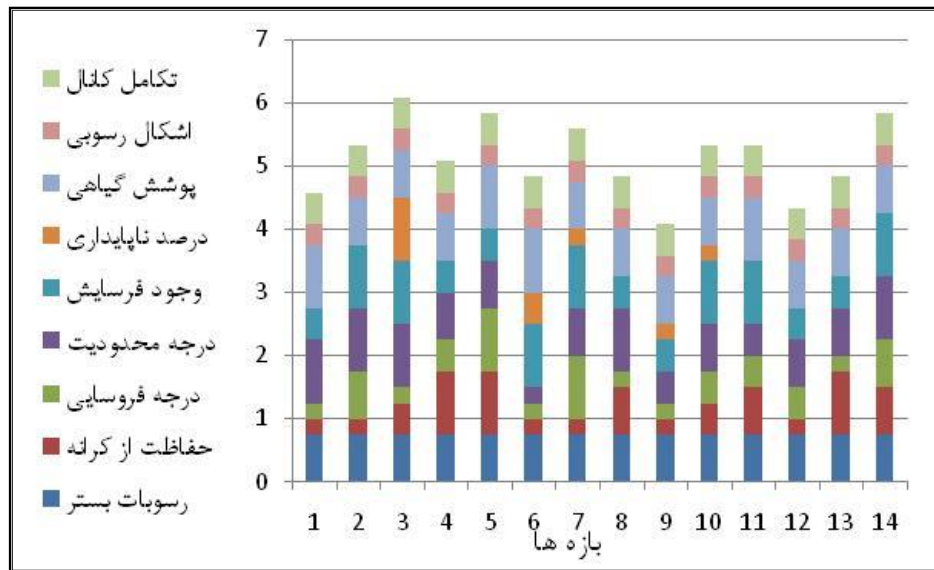
جدول ۴ : خلاصه امتیازات شاخص‌های ناپایداری کرانه رود با روش OSEPI

طبقه‌بندی	مجموع امتیازات	قوس رودخانه	پوشش گیاهی، ری یا رین	حفاظت از کرانه رودخانه	رسوبات منفصل کرانه	حرکات توده‌ای در کرانه	کرانه یا شیب بیش از ۸۰°	زاویه کرانه (BH/FL)	ارتفاع کرانه	امتیاز متغیرها بازوها	
										۱	۲
ناپایدار	۴۸	۲/۵	۰	۱۰	۵	۵	۷/۵	۸	۱۰	۱	
ناپایدار	۴۷	۲/۵	۷/۵	۱۰	۵	۷/۵	۲/۵	۲	۱۰	۲	
ناپایدار	۵۲/۵	۲/۵	۷/۵	۱۰	۱۰	۱۰	۲/۵	۰	۱۰	۱-۳	۳
ناپایداری متوسط	۵۹	۲/۵	۱۰	۱۰	۱۰	۷/۵	۵	۲	۱۰	۲-۳	
ناپایداری متوسط	۶۰	۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۷/۵	۷/۵	۵	۰	۱۰	۴	
ناپایدار	۵۰	۰	۷/۵	۱۲/۵	۱۰	۲/۵	۵	۰	۱۰	۵	
ناپایدار	۵۲	۰	۱۲/۵	۱۲/۵	۵	۲/۵	۲/۵	۲	۱۰	۶	
ناپایدار	۴۹/۵	۰	۲/۵	۱۲/۵	۵	۵	۵	۲	۱۰	۷	
ناپایدار	۵۱/۵	۵	۷/۵	۱۲/۵	۷/۵	۲/۵	۷/۵	۲	۱۰	۸	
ناپایدار	۵۲/۵	۰	۱۰	۱۲/۵	۵	۵	۷/۵	۰	۱۰	۹	
ناپایدار	۴۹/۵	۰	۱۰	۱۰	۵	۵	۷/۵	۲	۱۰	۱۰	
ناپایدار	۴۹/۵	۲/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۵	۲	۱۰	۱۱	
ناپایدار	۵۲	۲/۵	۷/۵	۷/۵	۵	۷/۵	۱۰	۲	۱۰	۱۲	
ناپایدار	۴۹/۵	۲/۵	۲/۵	۱۰	۲/۵	۱۰	۵	۲	۱۰	۱۳	

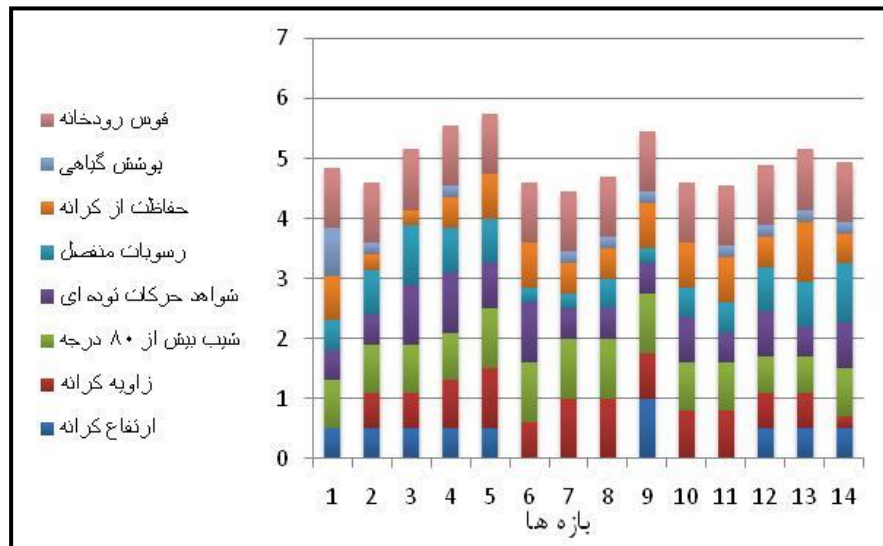
## عوامل مؤثر در ناپایداری کرانه رود

جهت بررسی عوامل مؤثر در ناپایداری کرانه رود، امتیاز هر یک از شاخص‌ها در هر دو روش به صورت نسبی محاسبه شدند. برای محاسبه امتیاز نسبی، امتیاز هر متغیر تقسیم بر حداکثر امتیاز آن متغیر شدند. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب امتیازات نسبی شاخص‌های CSI و OSPEI را در بازه‌های مختلف نشان می‌دهند. در این شکل‌ها بازه‌های شماره ۳ و ۴ نشان‌دهنده بازه‌های ۱-۳ و ۲-۳ هستند. بر اساس میانگین امتیازات نسبی هر شاخص در روش CSI، بیشترین عوامل تأثیرگذار بر ناپایداری کرانه رود شامل شاخص‌های فرسایشی بستر، شواهد حرکات توده‌ای کرانه، فرسایش کناره و مدل تکاملی رود بوده که با امتیازهای ۰/۸۲، ۰/۷۷، ۰/۷۵ و ۰/۷۵ به ترتیب از رتبه اول تا چهارم را کسب نمودند (جدول ۵). در روش OSEPI شاخص‌های ارتفاع کرانه، رسوبات منفصل در کرانه، شواهد حرکات توده‌ای و پوشش گیاهی با امتیازهای ۱، ۰/۶۴، ۰/۶ و ۰/۵۶ به ترتیب در رتبه‌های اول تا چهارم قرار گرفتند (جدول ۶). شاخص ارتفاع کرانه و فرسایشی بستر که در عمل شاخص مشابهی هستند در هر دو روش مهم‌ترین عامل ناپایداری بوده‌اند.

شکل ۵: امتیاز نسبی متغیرهای مختلف در روش CSI در بازه‌های مورد مطالعه



شکل ۶: امتیاز نسبی شاخص‌های مختلف در روش OSEPI در بازه‌های مورد مطالعه



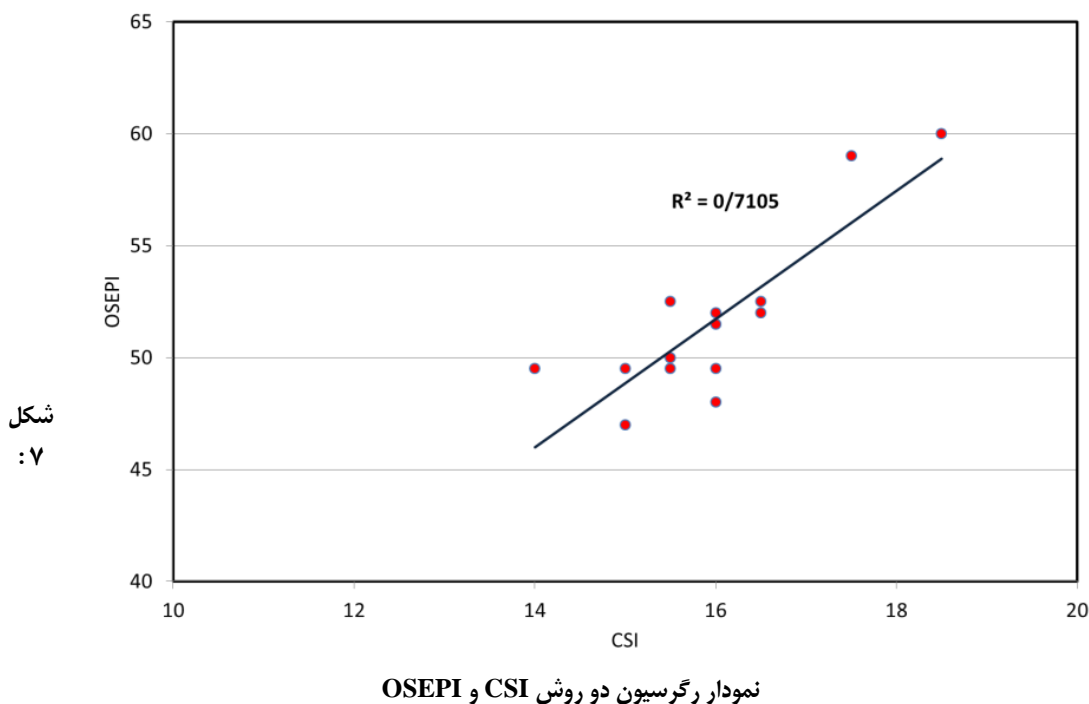
جدول ۵: میانگین نسبی امتیاز شاخص‌ها در روش CSI

رتبه	میانگین امتیازات نسبی	شاخص‌ها	ردیف
۷	۰/۵۰	جنس رسوبات بستر	۱
۸	۰/۳۳	کرانه حفاظت‌شده	۲
۱	۰/۸۲	فروسایی بستر	۳
۹	۰/۱۶	درجه محدودیت بستر	۴
۳	۰/۷۵	فرسایش کرانه	۵
۲	۰/۷۷	حرکات توده‌ای کرانه	۶
۶	۰/۵۰	پوشش گیاهی ری پا رین	۷
۵	۰/۵۵	وقوع اشکال رسوبی	۸
۴	۰/۷۵	مدل تکاملی رود	۹

جدول ۶: میانگین نسبی امتیاز شاخص‌ها در روش OSEPI

ردیف	شاخص‌های OSPEI	میانگین امتیازات نسبی	رتبه
۱	ارتفاع کرانه	۱	۱
۲	زاویه کرانه	۰/۲۵۷	۸
۳	زاویه پیش از ۸۰ درصد	۰/۵۳۲	۵
۴	شواهد حرکات توده‌ای	۰/۶۰۷	۳
۵	رسوبات منفصل	۰/۶۴۶	۲
۶	حفاظت از کرانه رودخانه	۰/۵۰۰	۶
۷	پوشش گیاهی ری پارین	۰/۵۶۴	۴
۸	قوس رودخانه	۰/۳۲۱	۷

برای بررسی همبستگی بین امتیازات به دست آمده بین دو روش CSI و OSEPI از روش رگرسیون خطی استفاده شده و ضریب تعیین آن ۰/۷۱ محاسبه گردید که نشان دهنده همبستگی مثبت بین این دو روش است (شکل ۷). هیرن و همکاران (۲۰۱۲) هم در مطالعه‌ای بر روی ۵ رودخانه در شمال شرقی اکلاهما ضریب تعیین این دو روش ۰/۶۴ محاسبه نمودند.



### نتیجه گیری

در این تحقیق دو روش ارزیابی سریع ژئومورفیک CSI و OSPEI جهت بررسی شرایط پایداری و ناپایداری کرانه رود در بخشی از رودخانه سیمره به کار رفتند. نتایج امتیازدهی شاخص‌ها و امتیازات نسبی عوامل در ناپایداری کرانه رود نشان می‌دهد که روش OSEPI شاخص‌های مناسب‌تری را ارائه نموده و تقسیم‌بندی توصیفی آن بهتر از روش CSI قابلیت تفکیک دارد.

با به‌کارگیری روش‌های RGA می‌توان وضعیت پایداری و ناپایداری کرانه رود را با سرعت بیشتری در بررسی‌های میدانی اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه در این مدل‌ها شواهد فرسایش کرانه رود و حرکات توده‌ای بررسی می‌شوند این روش‌ها شرایط فعلی بازه‌ها را از لحاظ پایداری و ناپایداری تقسیم‌بندی نموده و پیش‌بینی ناپایداری در آینده در این مدل‌ها صورت نمی‌گیرد. لذا برای احداث پروژه‌های عمرانی نیاز به مطالعات تفصیلی بیشتری از بازه رودخانه‌ای است و نیازمند تحلیل اثرات حوضه‌ای است.

استفاده از این شاخص‌ها مستلزم کنترل زمینی است. در این تحقیق به علت عدم دسترسی به عکس‌های هوایی با مقیاس بزرگ و با فاصله زمانی مناسب بررسی تغییرات کانال رود امکان‌پذیر نبوده است. از طرفی دیگر کنترل زمینی با روش‌های مرسوم مانند میله‌های فرسایشی و تکرار نقشه‌برداری از مقطع و غیره حداقل به ۳ تا ۵ سال وقت نیاز دارد که در این تحقیق میسر نبوده است.

عوامل ناپایداری کرانه در مناطق مختلف با توجه به شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی و هیدرولوژیکی متفاوت است از این رو می‌توان با تعدیل برخی از شاخص‌ها این مدل‌ها را به‌صورت منطقه‌ای تغییر داد تا تحلیل مناسب‌تری از وضعیت پایداری و ناپایداری کرانه رود به دست آورد.

## منابع

- اسماعیلی، رضا، حسین‌زاده، محمد مهدی و متولی، صدرالدین، ۱۳۹۰، تکنیک‌های میدانی در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، انتشارات لاهوت، چاپ اول، تهران، صص ۲۵۰.
- حسین‌زاده، محمد مهدی، خالقی، سمیه و واحدی فر، فراز، ۱۳۹۶ (الف)، ارزیابی تغییرات مورفولوژیک و پایداری رودخانه قرانقوچای هشتروند با استفاده از مدل BEHI، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۰، صص ۱۶۴-۱۴۵.
- حسین‌زاده، محمد مهدی، خالقی، سمیه، رستمی، میلاد، ۱۳۹۶ (ب)، مقایسه روش‌های برآورد خطر فرسایش کرانه‌ای با استفاده از مدل NBS (مطالعه موردی رودخانه گلالی قره‌ه)، مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۱۴، صص ۱۵۲-۱۴۱.
- رضایی مقدم، محمدحسین، پیروزی نژاد، نوشین، ۱۳۹۳، بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- وزارت جهاد کشاورزی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۷، مطالعات آبخیزداری سد سیمره.
- یمانی، مجتبی و شرفی، سیامک، ۱۳۹۱، ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، شماره ۴۵، صص ۳۲-۱۵.
- De Rose, R.C. and Basher, L.R., 2011. Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. *Geomorphology*, NO. 126, PP.132-147.
- 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. and 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.
- Janes, V. J. J., Nicholas, A.P., Collins, A.L. and 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.
- Johnson, P.A., Gleason, G.L. and 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.

- Lawler, D.M., 1993. *The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. Earth Surf Process Landf No.18, pp.777–821.*
- Pfankuch, D.J., 1975. *Stream reach inventory and channel stability evaluation. US Department of Agriculture Forest Service. Region 1. Missoula, Montana.*
- Piegay, H., Darby, S.E., Mosselman, E. and Surian, N., 2005. *A review of techniques available for determining the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion, River Research and Applications, 21: 773–789.*
- Rosgen, D.L., 2001. *A Practical Method for Computing Stream Bank Erosion Rate. In: Pages 9–15 in Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, Mar 25–29, U.S. Interagency Committee on Water Resources, Sub-committee on Sedimentation, Reno, Nevada, pp. 9–15.*
- Sarma, J.N., Borah, D. and Goswami, U., 2007. *Change of river channel and bank erosion of the Burhi Dihing river (ASSAM), assessed using remote sensing and GIS, Remote Sensing, Vol. 35, No. 1, pp. 93-100.*
- Simon, A. and Hupp, C.R., 1986. *Channel Evolution in Modified Tennessee Channels. Proceedings of the Fourth Interagency Sedimentation Conference, Vol. 2, Las Vegas. Nevada, pp. 5-71 to 5-82.*
- Simon, A., and P. W. Downs., 1995. *An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channels. Geomorphology, Vol. 12(3), pp.215-232.*
- Simon, A. and 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.*
- Simpson, A., Turner, I., Brantley, E. and Helms, B., 2014. *Bank erosion hazard index as an indicator of near-bank aquatic habitat and community structure in a southeastern Piedmont stream, Ecological Indicators, No.43, pp. 19-28.*
- Spruyt, A., van der Sligte, R.A.M., van der Mark, C.F., Sieben, A. and Mosselman, E., 2012. *Development of a rapid assessment tool for river bank erosion, River Flow, Murillo (Ed.). Taylor & Francis Group, London, pp. 799-804.*
- Thakur, P.K., Laha, C. and 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.*
- Zainal Abidin, R., Sulaiman, M.S. and Yusoff, N., 2017. *Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia, International Soil and Water*