

تحلیل پایداری کرانه و مورفومتری رودخانه گلالی قروه به منظور پایدار سازی در برابر فرسایش

محمد مهدی حسین زاده - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی.
سمیه خالقی - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی.
میلاذ رستمی* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹

چکیده

مدیریت و حفاظت از کرانه رودخانه‌ها از اهداف اساسی توسعه منابع آب بشمار می‌رود. در این میان مطالعه ناپایداری کرانه رودخانه جهت فعالیت مهندسی به منظور پایدارسازی کرانه در مقابل فرسایش از اقدامات لازم و ضروری است. لذا در این مقاله، ضریب ناپایداری رودخانه گلالی قروه و راهکار مهندسی جهت پایدار سازی کرانه آن با استفاده از روش تنش برشی لین مورد تحقیق قرار گرفت. بدین منظور کلیه پارامترهای مورد نیاز با استفاده از بررسی میدانی و تصاویر گوگل ارث اندازه گیری و در نهایت شیب، تنش برشی، زاویه شیب بدنه، ضریب پایداری ذره، زاویه انحراف خطوط جریان، عدد پایداری شیب بدنه ذره، زاویه حرکت ذره بستر، ضریب پایداری و سپس اندازه پاره سنگ موثر جهت سنگ چینی بدست آمد. بر این اساس مقاطع ۱ و ۵ دارای بیشترین و مقاطع ۲، ۴ و ۳ به ترتیب دارای کمترین ضریب ناپایداری هستند و اندازه پاره سنگ موثر برای پایدارسازی مقاطع ۱ تا ۵ به ترتیب برابر با ۴۲، ۳۶، ۲۰، ۲۲ و ۶۰ سانتی متر تخمین زده شد.

واژگان کلیدی: پایداری کرانه، تنش برشی، اندازه پاره سنگ، رابطه لین، رودخانه گلالی.

مقدمه

حفاظت ساحل رودخانه در مقابل فرسایش از اهداف اصلی ساماندهی رودخانه ها در توسعه پایدار منابع آب به شمار می آید. چرا که فرسایش سواحل رودخانه ها، باعث خسارت به اراضی کشاورزی، آسیب دیدن سازه های مجاور مانند پل ها و جاده ها، عریض شدن آبراهه جریان و مسائل زیست محیطی قابل توجه می شود (استادی و همکاران ۱۳۹۳، ۵۵). فرسایش کرانه رود یکی از علل عمده آلودگی غیرنقطه ای منابع آب و افزایش بار رسوب در بسیاری از رودخانه ها است (Rosgen, 2001; Simon and Darby, 1999; ekely et al., 2002; Evans et al., 2006; Wilson et al., 2008). افزایش فرسایش کناره ای نه تنها موجب افزایش بار رسوب می شود بلکه موجب ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال هم می شود. از این رو طی چند دهه ی اخیر بار رسوب و ناپایداری کناره ای رود، نگرانی های عمده ای را در سطح جهان ایجاد نموده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره های رود صرف شده است (Lavendel, 2002; Bernhardt et al., 2005). یکی از ویژگی های مهم فرسایش کرانه رود نسبت به دیگر شکل های فرسایش، دائمی و همواره فعال بودن آن است، در حالی که انواع دیگر فرسایش فقط در حین بارندگی و یا کمی پس از شروع آن فعال می شوند.

اندر کنش نیروهای فعال حاصل از جریان آب و نیروهای مقاوم به جریان ناشی از مواد بستر و کرانه، باعث فرسایش کرانه کانال می شود. در نتیجه راه حل های مهندسی متعددی برای تقویت کرانه در برابر فرسایش بوجود آمده است. در روش های معمول از پوشش سنگریز و یا از پاره سنگ های بزرگی که در ساحل قرار دارند و به سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می شود. در صورتی که پوشش پاره سنگی^۱ با ابعاد و اندازه مناسب، مقرون به صرفه و در دسترس باشد، می تواند به صورت وسیعی جهت حفاظت کرانه رود مورد استفاده قرار بگیرد. روراندگی موج آبر شیبهای با پوشش پاره سنگی معمولاً کمتر از انواع دیگر سازه ها می باشد. دو روش به جهت تعیین اندازه قله سنگ پوشش پاره سنگی ارائه شده است روش تنش برشی و روش سرعت جریان که در این پژوهش از روش تنش برشی استفاده می شود. در روش تنش برشی، پایداری پوشش سنگریزه بر شیب جانبی، تابع مقدار و سرعت جریان یا تنش برشی واقع در کناره، زاویه شیب و خواص پاره سنگ از قبیل اندازه، دانسیته و زاویه دار بودن قطعات است.

تاکنون تحقیقات زیادی توسط محققان داخلی و خارجی در زمینه ناپایداری و فرسایش کرانه رودخانه و مدیریت حفاظت از کرانه ها انجام گرفته است از جمله: کوان و سوانسن^۳ (۲۰۱۴) به پیش بینی فرسایش سالانه کرانه رودخانه با استفاده از شاخص خطر فرسایش کرانه (BEHI) و روش تنش برشی نزدیک کرانه (NBS) برای جنگل ملی سکواپا در کالیفرنیا پرداخته اند. نتایج بدست آمده از طریق روش های BEHI و NBS با فرسایش واقعی کرانه در سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ مقایسه شد.

کوریت^۴ (۲۰۱۴) به تحلیل و ارزیابی کانال با روش پیامدهای منبع غیر نقطه ای رسوب (BANCS) برای پیش بینی فرسایش و پایداری کرانه رودخانه در استونی کلوو کریک^۵ در کت اسکیلز^۶ پرداخته است. این مطالعه نشان داد که نتایج بدست آمده از طریق روش BANCS ممکن است منجر به بهبود مدیریت آینده حوضه استونی کلوو شود.

امیری تکلدانی و همکاران (۱۳۸۴) در پژوهشی اثرات موقعیت و عمق ترک های کششی در پایداری ساحل رودخانه را مورد بررسی قرار داده اند. بر اساس مشاهدات صحرایی و تعیین نوع ذرات تشکیل دهنده سواحل تخریب یافته مشخص شد که

^۱- Rock riprap

^۲- Wave runup

^۳- Kwan and Swanson

^۴- Coryat

^۵- Stony Clove Creek

^۶- Catskills

توسعه ترک کششی در خاک‌های در بر دارنده ۱۰ تا ۲۰ درصد رس در صورت تغییر شرایط رطوبتی خاک محتمل است و در خاک‌های با چسبندگی بالا یا خاک‌های درشت دانه امکان توسعه ترک کششی وجود ندارد.

پرتانی و همکاران (۱۳۸۶) در مطالعه خود، روش‌های مهار فرسایش و حفاظت خاک کناره‌ها در رودخانه صفارود را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که دو عامل مؤثر در نابسامانی رودخانه را یکی جریان تالوگ و دیگری حرکت حلزونی آب در سر قوس‌های خارجی تشخیص داده‌اند. با بررسی این دو جریان، روش‌های اصلاح و تثبیت دیواره‌های رودخانه و مراحل مختلف حفاظت در مقابل عوامل درونی و بیرونی مورد بررسی قرار گرفته است.

امین نژاد و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی اثر طول آب شکن در محافظت از سواحل رودخانه در فرسایش کناره‌ای دشت‌های سیلابی را به روش مدل فیزیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. برای بررسی مطالعات مربوط به آب‌سستگی، با مدل سازی فیزیکی، از سه آب متوالی با سه طول مختلف و به صورت یک طرفه و با سه دبی، طراحی و آزمایش کرده‌اند و الگوی کلی آب‌سستگی اطراف آب شکن‌ها را ارائه و با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

منصوری هفشجانی و شفاعی (۱۳۹۰) در پژوهشی طراحی قطر سنگچین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه را بررسی کرده‌اند که با استفاده از داده‌های به دست آمده، فرمول‌های قطر سنگ چین برای کنترل آب‌سستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه ارائه گردید. همچنین فرمول‌های ارائه شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارائه شده از مطالعات پیشین بر روی سنگ چین اطراف تکیه‌گاه واقع در مسیر مستقیم مقایسه شد و ضریب تصحیح مناسب برای استفاده از این روابط در قوس ارائه شده است.

کریمی پاشاکی و همکاران (۱۳۹۱) هیدرولیک جریان در رودخانه خرسان از سرشاخه‌های اصلی کارون در محدوده ورودی به مخزن سد خرسان ۳ با استفاده از مدل عددی HEC-RAS شبیه‌سازی و مقاطع عرضی و پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله سرعت و تنش برشی جریان و شاخص فرسایش پذیری کناره رودخانه را محاسبه کردند. در این تحقیق با استفاده از معیار راسگن و شاخص فرسایش پذیری کناره با توجه به مقدار پارامترهای گرادیان سرعت جریان و نسبت تنش برشی، مقدار عددی شاخص فرسایش پذیری کناره‌های رودخانه را در سطح از خیلی کم تا خیلی شدید تفکیک کرده‌اند.

استادی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی مدل بهینه‌سازی طراحی آبشکن‌های رودخانه‌ای و نقش آن در تعیین و هزینه‌های ساخت سازه را بررسی کرده و از بین معادله‌های مختلف، به این نتیجه رسیده‌اند که معادله‌های بار بستر و آب‌سستگی، نقش بسزایی در تعیین و هزینه‌های ساخت سازه دارد و از بین معادله‌های بار بستر استفاده شده، معادله Englund and Fredsoe بیشترین ظرفیت انتقال رسوب و کمترین هزینه و معادله بار بستر Van Rijn کمترین ظرفیت انتقال رسوب و بیشترین هزینه را به دنبال دارد.

خالقی و ملکانی (۱۳۹۳) در پژوهشی برآورد فرسایش کرانه رودخانه ليقوان چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن پرداخته‌اند که نتایج نشان داد که در روش (R_c/W_{bkf}) ، میزان فرسایش پذیری کرانه در اکثر مقاطع به جز مقطع ۱۰، کم تا خیلی کم بوده و در روش (d_{nb}/d_{bkf}) در اکثر مقاطع فرسایش پذیری کرانه‌ها در حد کم تا متوسط است. لایقی و کرم (۱۳۹۳) در طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی ۲۳ کیلومتر از رودخانه جاجرود به منظور احیاء رود و اقدامات مدیریتی از سیستم طبقه‌بندی مورفولوژیکی راسگن بهره گرفتند. نتایج نشان داد بخش اعظم این بازه مطالعاتی دارای الگوی DA است و بخش کمی از رودخانه دارای الگوی B با وضعیت بسیار نامطلوبی است. با انجام اقدامات کنترلی در بالادست رودخانه و عملیات آبخیزداری در کناره‌ها مانند احداث گابیون، کنترل پوشش کناره‌ها و اصلاح خاک تا حد زیادی می‌توان میزان تخریب را کاهش داد.

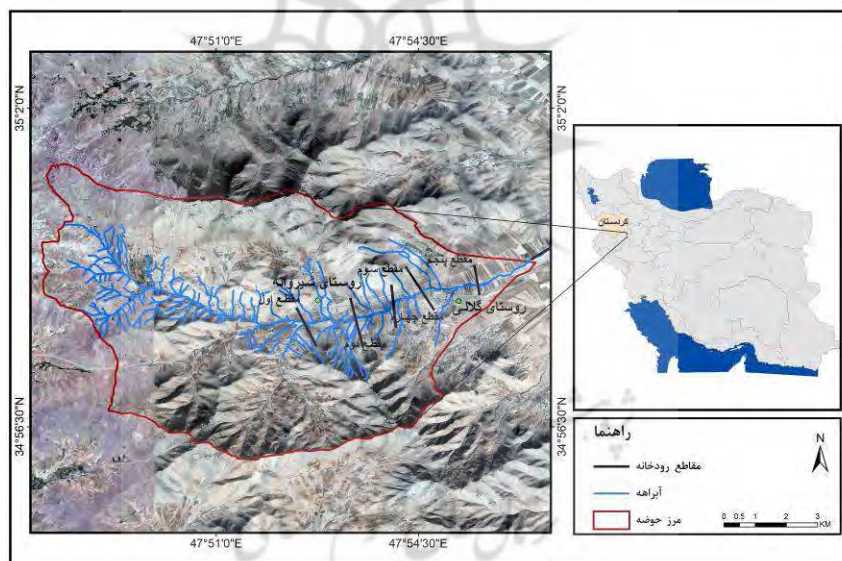
بدین منظور هدف این مطالعه، بررسی میزان خطر فرسایش کرانه‌ای و مدیریت و پایدارسازی رودخانه در برابر فرسایش کرانه‌ای در رودخانه گلالی قروه است. در ابتدا پارامترهای مؤثر در فرسایش پذیری کرانه رودخانه گلالی بر اساس مدل تنش برشی

استخراج و سپس اندازه پاره سنگ مناسب برای سنگچینی هر بازه مشخص گردید و در نهایت میزان انطباق مقادیر اندازه گیری شده با مشاهدات میدانی بررسی شده است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گلالی در فاصله ۴۳ کیلومتری شهرستان قروه، در جنوب شرقی استان کردستان و در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه طول جغرافیایی، ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه ۸۳/۹ کیلو متر مربع، مرتفع ترین قله آن ۳۱۲۴ متر و کمترین ارتفاع آن ۱۸۲۷ متر است. شش منطقه مسکونی به نام های گلالی، شیروانه، تکیه علیا، تکیه سفلی، درمه و قورمه دره به اضافه یک معدن آهن و یک کارخانه ماسه شویی و آسفالت در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. دمای متوسط سالانه منطقه ۶/۳ درجه سانتیگراد، متوسط حداکثر دمای ماهانه در مرداد ماه برابر ۲۸/۸ درجه سانتیگراد و متوسط حداقل دمای ماهانه ۱۱/۶ درجه سانتیگراد است. مقدار میانگین بارش سالانه منطقه ۴۱۸/۴ میلیمتر در سال می باشد. اقلیم منطقه مورد مطالعه در روش آمبرژه، اقلیم نیمه خشک سرد است. بازه مورد مطالعه در این مقاله به طول ۳ کیلومتر و از پل کنار روستای شیروانه تا پل بعدی که در روستای گلالی قرار دارد.



شکل ۱: حوضه گلالی و بازه مورد مطالعه

تعداد ۵ مقطع عرضی در بازه مورد نظر از پل روستای شیروانه تا پل روستای گلالی بر اساس تغییرات مورفومتری، در دست رس بودن محل اندازه گیری و محل های دارای استعداد فرسایش با توجه به مشاهدات میدانی انتخاب شد (شکل ۱) و اقدام به تهیه مقاطع عرضی کانال با استفاده از متر پارچه ای و شاخص نقشه برداری گردید و پارامترهایی نظیر عرض دبی لبالی، عمق متوسط دبی لبالی، شیب کرانه و بستر، اندازه ذرات بستر و کرانه، شعاع انحنا و سرعت جریان اندازه گیری شد. برپایه داده های اندازه گیری شده از مقاطع، پارامترهای مورد نیاز در اندازه گیری تنش برشی شامل قطر ذره، زاویه قرار پاره سنگ، پارامتر شیلدز، شیب طولی رودخانه، چگالی ذره، چگالی آب و داده های مورفومتری کانال جهت اندازه گیری دبی به شرح ذیل محاسبه گردید.

اندازه گیری مقطع دبی لبالبی

با توجه به آثار کناره رودخانه از جمله زیربری رودخانه، تغییرات جنس در کرانه رودخانه، آثار خزه ها و گل‌سنگ ها، تغییرات رنگ سنگ ها و همچنین سطح دشت سیلابی (در صورت وجود دشت سیلابی) مقطع دبی لبالبی مشخص و عرض و عمق دبی لبالبی با استفاده از متر و شاخص اندازه گیری شد (شکل ۲). برای مشخص نمودن متوسط عمق با استفاده از شاخص نقشه برداری در نقاط مختلف از تراز دبی لبالبی (عرض مقطع پر)، عمق اندازه گیری شده و میانگین عمق‌های هر مقطع به عنوان عمق متوسط در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: نمایی از اندازه گیری دبی لبالبی (Lawlor, 2004)

شعاع انحنا^۱

برای اندازه گیری شعاع انحنا، مسیر رودخانه بر پایه تصاویر بدست آمده از گوگل ارث در محیط اتوکد ترسیم گردید. در ادامه دایره مماس بر هر قوس ترسیم و شعاع دایره ترسیم شده، نماینده شعاع انحنا هر قوس رودخانه خواهد شد.

سرعت جریان

برای تعیین سرعت آب در این روش، دو نقطه را در مسیر آب به طول ۱۰ متر که نسبتاً مستقیم و عاری از علف و گیاهان آبی باشد انتخاب گردید و جسمی را که حتی المقدور اثر باد در آن کمتر باشد در ابتدای مسیر انتخاب شده (نقطه A) انداخته و فاصله زمانی را که جسم شناور به انتهای مسیر (نقطه B) برسد را با کرنومتر اندازه گیری شد. در ادامه بر اساس رابطه ۱ سرعت سطحی جریان محاسبه گردید.

$$V = L / t \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه t فاصله زمانی بر حسب ثانیه و L فاصله بین دو نقطه (A,B) بر حسب متر است. سپس عدد به دست آمده را در ضریب ۰/۸ ضرب کرده تا سرعت متوسط به دست آید.

شیب کرانه

در مطالعات میدانی در منطقه مورد مطالعه شیب کرانه با استفاده از شیب سنج دیجیتال برای هر یک از مقاطع به دست آمد.

^۱ - Radius of Curvature

شیب کانال

شیب کانال با استفاده نقشه برداری طولی از بازه مورد مطالعه و سپس با تقسیم اختلاف ارتفاع بالادست و پایین دست بازه بر طول آن (۱۰ متر) به دست آمد.

اندازه قطر رسوبات

برای بررسی اندازه ذراتی که بیشترین فراوانی را دارند از روش شمارش پیل^۲ (ریگ) که به وسیله ولمن در سال ۱۹۵۲ ارائه شده است، استفاده شد. در این روش ۱۰۰ ذره به صورت اتفاقی انتخاب شده و محور متوسط (d) آن ها اندازه گیری شد. سپس داده های به دست آمده از اندازه ذرات به صورت نمودار تجمعی ترسیم می شود تا ۵۰ D (اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچکتر از آن هستند) آن ها محاسبه شود (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴، ۳۳۸).

زاویه قرار پاره سنگ Ø و پارامتر شیلدز :

زاویه قرار پاره سنگ را با توجه به جدول (۱) متناسب با قطر ذرات کرانه رودخانه که بر اساس مشاهدات میدانی اندازه گیری شده، محاسبه گردید. پارامتر شیلدز عدد بی بعدی است که برای محاسبه شروع ایجاد و حرکت رسوب در یک جریان سیال استفاده شده و از طریق رابطه ۲ محاسبه می شود. در واقع پارامتر شیلدز نسبت نیروی برشی به وزن ذره است

$$\tau_* = \theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه τ : تنش برشی، ρ_s : چگالی رسوب، ρ : چگالی سیال، g : شتاب گرانش و D : قطر مشخصه ذرات رسوب است.

جدول ۱: زاویه قرار پاره سنگ و پارامتر شیلدز برای اندازه های مختلف پاره سنگ (ژولین، ۱۳۸۸، ۵۴۰)

پارامتر شیلدز t^*	زاویه قرار پاره سنگ Ø	قطر ذره (میلیمتر)	طبقه بندی اندازه پاره سنگ
۰/۰۵۴	۴۲	> ۲/۰۴۸	تخته سنگ بسیار بزرگ
۰/۰۵۴	۴۲	۱/۰۲۴ - ۲/۰۴۸	تخته سنگ بزرگ
۰/۰۵۴	۴۲	۵۱۲ - ۱/۰۲۴	تخته سنگ متوسط
۰/۰۵۴	۴۲	۲۵۶ - ۵۱۲	تخته سنگ کوچک
۰/۰۵۴	۴۲	۱۲۸ - ۲۵۶	قلوه سنگ بزرگ
۰/۰۵۲	۴۱	۶۴ - ۱۲۸	قلوه سنگ کوچک
۰/۰۵۰	۴۰	۳۲ - ۶۴	گراول خیلی بزرگ
۰/۰۴۷	۳۸	۱۶ - ۳۲	گراول بزرگ
۰/۰۴۴	۳۶	۸ - ۱۶	گراول متوسط
۰/۰۴۲	۳۵	۴ - ۸	گراول ریز

۰/۰۳۹	۳۳	۲ - ۴	گراول خیلی ریز
-------	----	-------	----------------

ضریب مانینگ:

روش‌های مختلفی برای به دست آوردن n مانینگ وجود دارد از جمله استریکلر، سازمان زمین‌شناسی آمریکا و ... اما در این پژوهش n مانینگ از طریق جدول کوان محاسبه شده است. مقدار n مانینگ به شدت متغیر است و به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که عبارتند از: ناهمواری‌های سطحی، پوشش گیاهی، ناهمواری کانال، مسیر کانال، فرسایش و رسوبگذاری، موانع رسوبی، اندازه و شکل کانال، تغییرات سطح آب و دبی، تغییرات فصلی و بار رسوبی معلق و بستری که این موارد در جدول کوان لحاظ شده است (حسین زاده و همکاران ۱۳۹۴، ۳۳۹).

ضریب خمیدگی: همچنین اندازه ضریب خمیدگی بر اساس مقادیر ذیل یعنی برای رودخانه‌های مستقیم کمتر از $۱/۰۵$ ، برای رودخانه‌های سینوسی بین $۱/۰۵$ تا $۱/۵$ و برای رودخانه‌های پیچانرودی بیشتر از $۱/۵$ مشخص گردید (مورت به نقل از مونت، ۱۹۹۵).

تنش برشی

ناپایداری کرانه با استفاده از روش‌های زیادی محاسبه می‌گردد. یکی از این روش‌ها، تنش برشی بر اساس رابطه لین است، که بر اساس اندازه مؤثر پاره سنگ برای پایداری کرانه تحت نیروی برشی τ_0 از طریق رابطه ۳ تخمین زده می‌شود. رابطه ۳

$$d_m = \frac{\tau_0}{\tau_{*c} \gamma (G-1) \left[\cos \theta_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta}} \right]} \quad \text{رابطه ۳}$$

که τ_0 تنش برشی به کار رفته و τ_{*c} عدد شیلدز بحرانی است. γ_s و γ وزن مخصوص سنگ و آب، θ_1 زاویه شیب بدنه و θ زاویه قرار پاره سنگ است و برای محاسبه رابطه لین باید مراحل زیر انجام پذیرد.

گام اول: شیب طولی رودخانه، که با مطالعات میدانی به دست می‌آید.

گام دوم: تنش برشی از طریق رابطه ۴ به دست آمد.

$$\tau_0 = \gamma h s \quad \text{رابطه ۴}$$

گام سوم: محاسبه پارامتر ژئومورفیک (هندسی) شیب کرانه از طریق رابطه ۵:

$$\theta = \tan^{-1}(\sin \theta_0 / \sin \theta_1) \quad \text{رابطه ۵}$$

گام چهارم: محاسبه پارامتر ژئومورفیک (هندسی) وزن مستغرق ذره از طریق رابطه ۶:

$$a_\theta = \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0} \quad \text{رابطه ۶}$$

گام پنجم: r : محاسبه زاویه انحراف خطوط جریان از طریق رابطه ۷:

$$\lambda \cong \tan^{-1} \left(\frac{11h}{R} \right) \quad \text{رابطه ۷}$$

گام ششم: محاسبه ضریب پایداری ذرات تشکیل دهنده کرانه از طریق رابطه ۸:

$$\eta_0 = \frac{21\tau_0}{(G-1)\gamma d_s} \quad \text{رابطه ۸}$$

گام هفتم: محاسبه زاویه حرکت ذره بستر β از طریق رابطه ۹:

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\lambda + \theta)}{\frac{2\sqrt{1-a_\theta^2}}{\eta_0 \tan \phi} + \sin(\lambda + \phi)} \right\} \quad \text{رابطه ۹}$$

گام هشتم: محاسبه ضریب پایداری شیب کرانه از طریق رابطه ۱۰:

$$\eta_1 = \eta_0 \left[\frac{1 + \sin(\lambda + \beta + \theta)}{2} \right] \quad \text{رابطه ۱۰}$$

گام نهم: محاسبه وضعیت پایداری کرانه از طریق رابطه ۱۱:

$$SF = \frac{a_\theta \tan \phi}{\eta_1 \tan \phi + \sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در صورتی که فاکتور ایمنی^۳ کوچکتر از ۱ باشد گویای ناپایداری ذرات تشکیل دهنده کرانه خواهد بود. همچنین می توان با فرض $\lambda = 0$, $\theta_0 = 0$ اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت را از طریق رابطه ۱۲ تخمین زد.

$$d_m \cong \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta} 0.047(\gamma_s - \gamma)}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

به منظور محاسبه اندازه ذرات پایدار در کرانه مورد نظر، لازم است گامهای ششم تا نهم برای اندازه های مختلف پاره سنگ ها آنقدر تکرار شود تا $SF=1$ به دست آید، که اندازه پاره سنگ پایدار جهت سنگ چینی خواهد بود.

داده های مورد نیاز این بخش از طریق برداشت میدانی و محیط نرم افزار اتوکد جمع آوری گردید. به این منظور با استفاده از شاخص نقشه برداری و متر پارچه ای داده های هندسی و هیدرولیک مقاطع شامل سرعت آب، عرض دبی لبالی، متوسط عمق دبی لبالی، شیب کناره، شیب بستر و شعاع هیدرولیک اندازه گیری شده است.

نتایج و بحث

افزایش فرسایش کناره ای علاوه بر اینکه موجب افزایش بار رسوب شده بلکه موجب ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال می شود. راه حل های مهندسی متعددی برای تقویت کرانه در برابر فرسایش وجود دارد. در روش های معمول از پوشش سنگریز و یا از پاره سنگهای بزرگی که در ساحل قرار دارند و به سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می شود. در مورد رودخانه گلالی قروه که در بیشتر مسیر از نوع سینوسی است و در کلیه مقاطع ناپایدار است راهکار مدیریتی ضرورت دارد که از روش تنش برشی لین بر اساس اندازه مؤثر پاره سنگ برای برآورد شرایط پایداری کرانه استفاده شد. و با توجه به ثابت بودن جریان مهمترین عامل تأثیر گذار میزان ناپایداری در مقاطع مختلف اندازه ذرات کناره کانال است. بدین منظور پس از بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز، میزان ضریب پایداری کرانه، اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی کرانه رودخانه گلالی قروه بدست آمد. متغیرهای مؤثر در فرسایش کرانه رودخانه گلالی قروه شامل شعاع انحناء، عرض دبی لبالی، شیب کرانه، شیب بستر، زاویه قرار پاره سنگ، قطر ذرات، چگالی نسبی ذرات، سرعت متوسط و متوسط عمق دبی لبالی از طریق اندازه گیری ها و مشاهدات میدانی و نقشه های توپوگرافی بدست آمد. (جدول ۲).

جدول ۲: پارامترهای مؤثر در فرسایش کرانه رودخانه گلالی قروه بر طبق شاخص تنش برشی

مقطع عرضی	ضریب خمیدگی	شعاع انحناء (متر)	شیب S (درجه)	عرض دبی لبالی (متر)	متوسط عمق دبی لبالی (متر)	زاویه قرار پاره سنگ θ	ضریب مائینگ	قطر ذرات (mm)	چگالی نسبی ذرات G	زاویه شیب θ_1 (درجه)	سرعت متوسط جریان (m/s)
۱	۱/۵۰	۱۴/۶۸	۰/۰۲۲	۶/۸	۰/۶۸	۳۸	۰/۰۹۵۴	۱۶	۲/۶۵	۲۸	۱/۱۰
۲	۱/۵۰	۱۶	۰/۰۱۹	۹/۸	۰/۷۱۸۵	۴۲	۰/۰۹۵۴	۱۳۰	۲/۶۵	۲۱	۱
۳	۱/۴۳	۵۳/۷۱	۰/۰۲۳	۷/۵	۰/۴۹۷۵	۴۲	۰/۰۹۷۷	۱۳۰	۲/۶۵	۱۷	۱/۲۹
۴	۱/۵۴	۴۹/۹۳	۰/۰۲۴	۹/۴	۰/۴۹۸۴	۴۱	۰/۰۹۴۹	۱۲۸	۲/۶۵	۲۰	۱
۵	۱/۷۷	۱۱/۹۲	۰/۰۱۷	۵/۹	۰/۴۰۶	۴۰	۰/۰۹۱	۳۲	۲/۶۵	۳۸	۱/۱۹

پس از مشخص شدن این پارامترها، می توان تنش برشی τ_0 ، زاویه شیب کرانه θ ، ضریب پایداری ذره a_θ ، زاویه انحراف خطوط جریان λ ، عدد پایداری η_0 ، زاویه حرکت ذره بستر β با فرض $M=N$ و η_1 را محاسبه کرد (جدول ۲). همچنین الگوی رودخانه بر پایه ضریب خمیدگی در مقاطع ۱، ۲ و ۳ از نوع سینوسی و در مقاطع ۴ و ۵ از نوع پیچانرودی بوده است. نحوه محاسبه گامهای چهارم تا یازدهم، برای مقطع شماره ۲ به قرار زیر است:

$$\tau_0 = 1000 * 9.81 * 0.7185 * 0.019$$

$$\theta = 0.052$$

$$a_\theta = \sqrt{0.8497} = 0.93$$

$$\lambda = \tan^{-1} 0.4939 = 26.28$$

$$\eta_0 = \frac{21 * 133.92}{1.65 * 9810 * 0.13} = 1.3664$$

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{0/8962}{\left[\frac{0/7351}{1/2027} + 0/4435 \right]} \right\} = 40.355$$

$$\eta_1 = 1/355 \left[\frac{1 + \sin(26.28 + 40.355 + 0.052)}{2} \right] = 1.2818$$

$$SF = \frac{0/93 \tan 40}{1.335 \tan 40 + \sqrt{1 - 0/93^2} \cos 40/355} = 0.584$$

$$d_m \cong \frac{\frac{133}{92}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 21}{\sin^2 41}}} 0.047 * 1.65 * 9810 = 20.84$$

جدول ۳: پارامترهای مؤثر در شاخص تنش برشی فرسایش کناره رودخانه گلالی

مقطع عرضی	τ_0	θ	a_θ	λ	η_0	β	η_1
۱	۱۴۵/۶۸	۰/۰۵	۰/۸۸	۲۶/۷۹	۱۱/۸۱	۵۸/۲۰	۱۱/۷۹
۲	۱۳۳/۹۲	۰/۰۵	۰/۹۳	۲۶/۲۸	۱/۳۴	۴۰/۳۶	۱/۲۸

۱/۰۴	۵۴/۰۲	۱/۱۲	۵/۸۲	۰/۹۵	۰/۰۷	۱۱۲/۲۵	۳
۱/۱۰	۵۲/۱۳	۱/۱۹	۶/۲۶	۰/۹۴	۰/۰۷	۱۱۷/۳۴	۴
۲/۶۴	۴۶/۵۸	۲/۷۴	۲۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۰۳	۶۷/۷	۵

پس از محاسبه پارامترهای مؤثر در شاخص تنش برشی فرسایش کناره رودخانه گلالی میزان پایداری کرانه، اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ مؤثر برای سنگچینی رودخانه مورد نظر برآورد گردید (جدول ۴) که برای به دست آمدن گامهای ششم تا نهم برای اندازه های مختلف پاره سنگ آنقدر تکرار شد که $SF = 1$ به دست آمد (جدول ۳). و در مورد نحوه حرکت ذرات میتوان گفت: هنگامی که ذره ناپایدار می شود در راستای β نسبت به جهت تندترین شیب

به راه می افتد. اگر $\theta = \beta_+$ جهت حرکت به پایین دست است اگر $\theta > \beta_+$ ذره بر شیب بدنه به بالا به طرف سطح

آب حرکت می کند و اگر $\theta < \beta_+$ باشد ذره به پایین شیب بدنه به سمت خط القعر به راه می افتد که در کلیه مقاطع

رودخانه گلالی $\theta < \beta_+$ است. مراحل محاسبه پاره سنگ مؤثر برای سنگچینی برای مقطع شماره ۲ به قرار زیر است.

$$\eta_0 = \frac{21 \cdot 133.92}{1.65 \cdot 9810 \cdot 0.26} = 0.6682$$

$$41.103 = \tan^{-1} \left\{ \frac{0/8962}{\left[\frac{0/351}{06013} + 0/4435 \right]} \right\} = \beta$$

$$\eta_1 = 0.6682 \left[\frac{1 + \sin(26.28 + 41.1036 + 0.052)}{2} \right] = 0.6428$$

$$SF = \frac{0/93 \tan 42}{0.6428 \tan 40 + \sqrt{1 - 0/93^2} \cos 41.1036}$$

جدول ۴: میزان ضریب پایداری کرانه و اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی رودخانه گلالی قروه بر اساس شاخص تنش برشی

مقطع عرضی	ضریب پایداری SF	اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت (cm)	اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی (Cm)
۱	۰/۰۷	۲۹/۶	۴۲
۲	۰/۵۸	۲۰/۸۴	۲۶
۳	۰/۷۷	۱۶/۴	۲۰
۴	۰/۷	۱۸	۲۲
۵	۰/۲۵	۳۹/۷	۶۰

نتیجه گیری

در این پژوهش فرسایش کناره ای رودخانه گلالی قروه با استفاده از روش لین جهت شناسایی کناره های نا پایدار و تعیین اندازه سنگ جهت سنگ چین کردن کناره های نا پایدار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاطع ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین ضریب ناپایداری هستند و بر این اساس اندازه پاره سنگ موثر جهت سنگ چینی و حفاظت از فرسایش ساحلی متفاوت خواهد بود. به طوری که بیشترین قطر پاره سنگ جهت سنگچینی در مقطع ۵ به میزان

۶۰ سانتیمتر و کمترین آن در مقطع ۳ به میزان ۲۰ سانتیمتر تخمین زده شد. و با توجه به اینکه در کلیه مقاطع $\beta_+ \theta < 90$ است جهت حرکت ذرات به طرف پایین شیب بدنه و به سمت خط القعر است. با توجه به جدول (۱) و با توجه به اندازه پاره سنگ و زاویه قرار پاره سنگ در مقاطع مختلف متفاوت است که در مقطع ۱، ۵ از نوع گراول بزرگ و در مقاطع ۲، ۳، ۴ از نوع قلوه سنگ بزرگ است. و با توجه به اندازه پاره سنگ های به دست آمده جهت سنگ چینی در مقاطع ۳، ۴ از نوع قلوه سنگ خیلی بزرگ و در مقطع ۲، ۱ از نوع تخته سنگ کوچک و در مقطع ۵ تخته سنگ متوسط پیشبینی شده است. نقطه قوت این پژوهش نسبت به مطالعات رودخانه ای پیشین در این رودخانه علاوه بر بررسی و پیشبینی فرسایش در رودخانه گلالی قروه راهکار جلوگیری از فرسایش با استفاده از سنگچین و تعیین اندازه قطعه سنگ های بکار رفت برای این عملیات بوده است.

منابع

- استادی، فریبا؛ مجد زاده طباطبایی، محمد رضا؛ علی محمدی، علی. ۱۳۹۳. مدل بهینه سازی آبشکن های رودخانه ای و نقش آن در پایدار سازی مورفولوژیکی رودخانه، نشریه هیدرولیک، دوره ۹، ش ۴ ص ۵۵-۷۲
- امیری تکلدانی، ابراهیم؛ صمدی، امیر؛ رحیمی، حسن. ۱۳۸۴. اثرات موقعیت و عمق ترک کششی در پایداری ساحل رودخانه، مجله تحقیقات کشاورزی، جلد ۶، شماره ۲۵، ص ۷۸-۹۴
- امین نژاد، بابک؛ صانعی، مجتبی؛ کمالزاده، مهدی. ۱۳۸۸. اثر طول آب شکن در محافظت از سواحل رودخانه در فرسایش، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران دانشگاه شیراز.
- پرتانی، صادق؛ مهدوی نیا، جعفر؛ جلال، مصطفی. ۱۳۸۶. روش های مهار فرسایش و حفاظت خاک کناره ها در رودخانه صفا رود، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهر کرد.
- -حسین زاده، محمد مهدی. و اسماعیلی، رضا. ۱۳۹۴. ژئومورفولوژی رودخانه ای. مفاهیم، اشکال و فرآیندها، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۳۳۸ ص.
- ژولین، پی یر. ۱۳۸۸. مکانیک رودخانه، ترجمه محمد رضا جعفر زاده، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۵۴۰ ص.
- خالقی، سمیه؛ ملکانی، لیلا. ۱۳۹۴. برآورد فرسایش کرانه رودخانه ليقوان چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن. کنگره بین المللی جغرافیا و توسعه پایدار، تهران.
- خمایی پامساری، حسن؛ کریمی پاشاکی؛ محمد حسین؛ کاویان فر، آزاده. ۱۳۹۰. برآورد شاخص فرسایش کناری راسگن با استفاده از مدل *HEC-RAS* (مطالعه موردی رودخانه خرسان). دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
- سازمان معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی. ۱۳۹۱. راهنمای مطالعات ریخت شناسی رودخانه ها. ۵۹۲: ۱-۱۶۶.
- فزونی، سعید. ۱۳۸۵. بررسی مقایسه ای پروفیل سطح آب و پهنة سیل با مدل های با بستر ثابت و بستر متحرک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده عمران. دانشگاه تبریز.
- لایقی، صدیقه؛ کرم، امیر. ۱۳۹۳. طبقه بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با مدل روزگن. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ش ۳ ص ۱۴۳-۱۳۰.

- کریمی پاشاکی، محمدحسین؛ اطمینان، حامد؛ صارمی، علی. ۱۳۹۱. طراحی پوشش ریپ رپ رودخانه با توجه به شاخص فرسایش کناری راسگن مطالعه موردی رودخانه خرسان، نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- منصوری هفشجانی، مهنوش؛ شفاعی بجستان، محمود. ۱۳۹۰. طراحی قطر سنگ چین در اطراف تکیه گاه پل واقع در قوس رودخانه، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری. ش ۴، ص ۱۰.
- وزارت نیرو. ۱۳۸۳. راههای مهار فرسایش و حفاظت از رودخانه ها، ۱۴۹-ن: ۱-۱۱۵.
- -Bernhardt, E. S., Palmer, M. A., Allan, J. D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad-Shah, J., Galat, D., Gloss, S., Oodwin, P., Hart, D., Hassett, B., Jenkinson, R., Katz, S., Kondolf, G. M., Lake, P. S., Lave, R., Meyer, J. L., O'Donnell, T. K., Pagano, L., Powell, B. and Sudduth, E. 2005. Synthesizing U. S. river restoration efforts, *Science*, 308, 636–637.
- -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.
- -Kang, R.S. 2007. *Effects of urbanization on channel morphology of three streams in the Central Redbed Plains of Oklahoma*. ProQuest. Ph.D thesis. Faculty of the Graduate College. Oklahoma State University.
- -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): 1439–1447.
- Lawlor, S. M. 2004. *Determination of Channel-Morphology Characteristics, Bankfull Discharge, and Various Design-Peak Discharges in Western Montana*. Scientific Investigations Report 2004-5263: 1-19.
- -Moret, S.L. 2001. *Predicting Channel Stability in Colorado Mountain Streams Using Hydrobiogeomorphic and Land Use Data: A Cost-Sensitive Machine Learning Approach to Modeling Rapid Assessment Protocols*. Doctor of Philosophy, Oregon State University.
- Mount, J. F. 1995. *California Rivers and Streams- The Conflict between Fluvial Process and Land Use*, University of California Press, Berkeley, California.
- -Rosgen, D.L. 2011. *Watershed assessment of river stability and sediment supply (WARSSS)*. Wildland Hydrology, Fort Collins, Colorado.
- -Rosgen, D. 2001. *A practical method of computing streambank erosion rate*. p. 9–15. In Proc. 7th Federal Interagency Sedimentation Conf., Reno, NV. 25–29 Mar. 2001. Vol. 2. USGS, Reston, VA.
- -Simon, A. and Darby, S. E., 1999. *The nature and significance of incised river channels*. In: Darby, S. E., Simon, A. (eds.), *Incised river channels*, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 452 p.
- Starr, R. 2008. *Maryland Trust Fund Geomorphic Monitoring, Stream Habitat Assessment and Restoration Program Chesapeake Bay Field Office U.S. Fish and Wildlife Service*, (410): 573-4583.
- -Wilson, C. G., Kuhnle, R. A., Bosch, D. D., Steiner, J. L., Starks, P. J., Tomer, M. D. and Wilson, G. V. 2008. *Quantifying relative contributions from sediment sources in Conservation Effects Assessment Project watersheds*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63: 523–531.