



## بررسی حساسیت کناره رودخانه در برابر فرسایش و راهکارهای حفاظت کناره‌های کانال در رودخانه واز چمستان - مازندران

میلااد رستمی<sup>۱</sup>، محمد مهدی حسین زاده<sup>۱\*</sup>، رضا اسماعیلی<sup>۲</sup>

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

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

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۴/۸

### چکیده

تغییرات مجرای رودخانه، فرسایش کناره‌ای و رسوبگذاری کناره‌ای، فرآیندهای طبیعی رودخانه‌های آبرفتی هستند که باعث تخریب زمین‌های کشاورزی اطراف و خسارت به تاسیسات انسانی اطراف رودخانه می‌شود. در این پژوهش با استفاده از مدل تنش برشی لین میزان ضریب ناپایداری کناره رودخانه واز در استان مازندران بررسی شده است. بدین منظور کلیه پارامترهای مورد نیاز با استفاده از مطالعات میدانی، تصاویر گوگل ارث و آزمایش دانه‌بندی اندازه‌گیری شد. براساس مدل فوق مقاطع ناپایدار شناسایی سپس برای هر یک از این مقاطع، اندازه پاره سنگ جهت سنگچینی کناره رودخانه به عنوان راهکار مدیریتی تعیین شده است. نتایج نشان داد که مقاطع ۶، ۲، ۸، ۳، ۵، ۷، ۱، ۴ به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین ضریب پایداری هستند. بر این اساس اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و پاره سنگ مناسب جهت سنگچینی کناره و حفاظت از کناره رودخانه متفاوت خواهد بود. همچنین با توجه به شرایط هر مقطع، شیب مناسب کناره جهت عملیات سنگچین کردن متفاوت می‌باشد. که در این بازه از رودخانه واز مقطع شماره ۱ بزرگترین پاره سنگ با اندازه ۱/۲۱ متر در شیب ۲۰ درجه و پاره سنگ با اندازه ۰/۶۹ متر در شیب ۳۰ درجه مورد نیاز است. مقطع شماره ۶ کوچکترین پاره سنگ با اندازه ۰/۲۴۸ متر در شیب ۲۰ درجه و پاره سنگ با اندازه ۰/۱۱۵ متر در شیب ۳۰ درجه مورد نیاز است.

**واژه‌های کلیدی:** رودخانه واز، سنگچین کناره، ضریب پایداری، فرسایش کناره‌ای، مدل لین.

## مقدمه

فرسایش کناره‌های نقش اساسی در دینامیک رودخانه‌های آبرفتی ایفا می‌کند (Jugie et al, 2018). فرسایش کناره‌های یکی از موضوعات مهم در بررسی رودخانه‌ها است زیرا می‌تواند باعث از بین رفتن زمین‌های مرغوب کناره رودخانه، خسارت به ساختارهای طبیعی و انسان ساز کناره رودخانه و تغییرات در بستر و دشت سیلابی گردد (Marteau et al, 2017). فرسایش کناره‌های باعث تشکیل، مهاجرت پیچ‌های پیچانرود، پسروری کناره‌ها و تامین رسوب می‌شود (Jugie et al, 2018). همچنین فرسایش کناره رودخانه تاثیر منفی بر روی شرایط اقتصادی و اجتماعی مردم داشته و با استرس روانی در طی زمان آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حفاظت کناره رودخانه در مقابل فرسایش از اهداف اصلی ساماندهی رودخانه‌ها در توسعه پایدار منابع آب به شمار می‌آید. از این رو طی چند دهه اخیر بار رسوب و ناپایداری کناره‌های رود، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهان ایجاد نموده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره‌های رودخانه صرف شده است (Bernhardt et al, 2005). یکی از ویژگی‌های مهم فرسایش کناره رود نسبت به دیگر شکل‌های 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 می‌شوند. در سراسر جهان از ابتدای مطالعات رودخانه‌ای تاکنون مطالعات فراوانی با روش‌های متفاوت برای پیش‌بینی، بررسی و برآورد فرسایش کناره‌های صورت گرفته است که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود: روش راسگن (Rosgen, 2001; Kwan and Swanson, 2014; Ghosh et al, 2016; Coryat, 2014; Bigham et al, 2016)، بررسی فرسایش کناره‌ای با استفاده از پین‌های فرسایشی

(Simon, ) BSTEM (Jugie et al, 2018)، روش (2010, 2011, 2012; Midgley et al, 2012; Klavon et al; McMillan and Hu, 2017; McMillan et al, 2017; Sass and Keane, 2012) تنش برشی (Bizzi and Lerner, 2015) دندروژئومورفولوژی (Malik and Matyja, 2008; Stoffel et al, 2013; Stotts et al, 2014). در داخل کشور نیز از روش‌های متفاوتی جهت بررسی فرسایش کناره‌ای استفاده شده است که می‌توان به مدل BSTEM (حسین زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۷) مدل راسگن، NBS و BEHE (لایقی و کرم، ۱۳۹۳؛ حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۶) تنش برشی (اطمینان و همکاران، ۱۳۹۹؛ حسین زاده و رستمی، ۱۳۹۶؛ حسین زاده و رستمی، ۱۳۹۷؛ خواستار بروجنی و همکاران، ۱۳۹۲؛ فولاد فر و همکاران، ۱۳۹۱؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱؛ قمشی وجدانی، ۱۳۸۴) اشاره کرد که به عنوان مثال حسین زاده و رستمی در مطالعه‌ای به بررسی فرسایش کناره‌ای در رودخانه گلالی کردستان پرداخته‌اند که با استفاده از این مدل میزان فرسایش را در مقاطع مختلف مشخص کرده‌اند و همچنین اندازه پاره سنگ موثر برای سنگچین کناره را برای مقاطع مختلف پیش‌بینی کرده‌اند همچنین اطمینان و همکاران در رودخانه طالقان از این مدل استفاده کرده‌اند و میزان فرسایش و اندازه پاره سنگ جهت سنگچین کناره را برای مقاطع مختلف به دست آورده‌اند. از معایب این روش در مطالعات مختلف می‌توان در نظر نگرفتن میزان پوشش گیاهی و ریشه درختان را در کناره‌ها نام برد. در این مطالعه رودخانه واز در استان مازندران که یکی از رودخانه‌های تحت تاثیر فرسایش کناره‌ای است مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا راه‌حل‌های مهندسی متعددی برای تقویت کناره در برابر فرسایش بوجود آمده

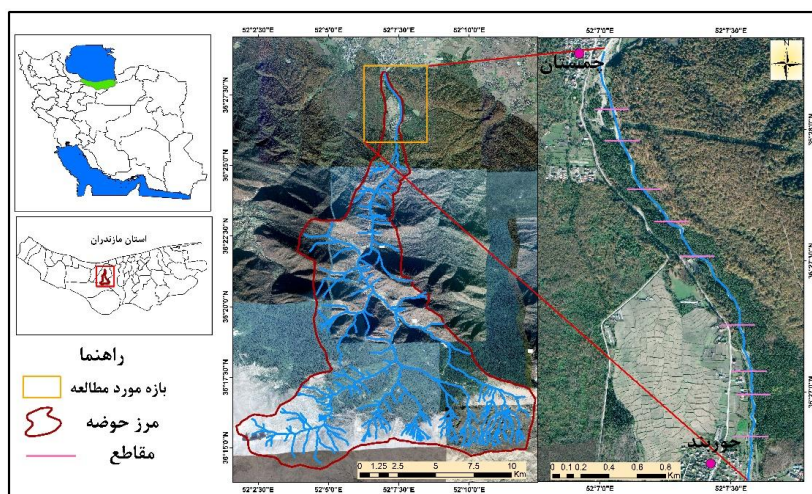
چمستان واقع شده که رواناب‌های آن با عنوان رود واز به دریای خزر می‌ریزد. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی، در شهرستان نور از استان مازندران قرار دارد. قسمت جنوبی حوضه (سرآب) پهن‌تر از قسمت شمالی حوضه (نقطه خروجی) می‌باشد (شکل ۱). قسمت جنوبی این حوضه در مختصات جغرافیایی بین  $52^{\circ} 1' 59''$  و  $12' 56''$  و  $52^{\circ}$  طول شرقی قرار گرفته است که هر چه به طرف شمال حوضه پیش برویم حوضه مذکور باریک‌تر شده و نقطه خروجی آن در  $52^{\circ} 7' 33''$  طول شرقی قرار گرفته است. هم‌چنین این حوضه در بین  $17' 25'' 36^{\circ}$  و  $17' 14' 37^{\circ}$  عرض شمالی قرار دارد. حوضه واز در شمال به آبادی جوربند، در شرق به حوضه‌های ناپلار رود و آلس رود، در جنوب به حوضه رود هزار و در غرب به حوضه لایچ رود منتهی می‌شود. پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوضه مورد مطالعه حدود ۳۰۰ متر و بلندترین نقطه آن بیش از ۳۵۰۰ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضه آبخیز مورد مطالعه معادل ۱۸۰۰ متر از سطح دریا برآورد گردیده است. از نظر زمین‌شناسی حوضه آبریز واز جزء البرز مرکزی بوده که با سایر واحدهای البرز اختصاصات یکنواختی ندارد. از نظر تکنیکی حوضه واز در منطقه فعال البرز قرار گرفته است، رودخانه واز نیز در جهتی موافق با شیب ارتفاعات و مخالف با روند گسل‌های منطقه جریان دارد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه نیز برابر  $6/694$  میلیمتر در سال می‌باشد. میانگین دمای سالانه حوضه از ۱۴ درجه سانتیگراد در ارتفاعات ۳۰۰ متر تا حدود ۵ درجه سانتیگراد در ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متر متغیر است. از کل مساحت این حوزه منطقه‌ای با وسعت  $86/7$

است. در روش‌های معمول از پوشش سنگریز و یا از پاره سنگ‌های بزرگی که در ساحل قرار دارند و به سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می‌شود. در صورتی که پوشش پاره سنگی<sup>۱</sup> با ابعاد و اندازه مناسب، مقرون به صرفه و در دسترس باشد، می‌تواند به صورت وسیعی جهت حفاظت کناره رود مورد استفاده قرار بگیرد. دو روش توسط لین به جهت تعیین اندازه قلوه سنگ پوشش پاره سنگی ارائه شده است؛ روش تنش برشی و روش سرعت جریان که در این پژوهش با توجه به شرایط فرسایش کناره‌ای در رودخانه واز که یک رودخانه کوهستانی بوده و در مسیر خود از مجاور مناطق مسکونی و جاده‌های زیادی می‌گذرد که فرسایش کناره‌ای باعث خسارت به جاده‌ها و مناطق مسکونی شده است، از روش تنش برشی استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه شناسایی مناطق با خطر بالای فرسایش و ارائه راهکار جلوگیری از آن می‌باشد. در این راستا در ابتدا پارامترهای موثر در فرسایش پذیری کناره رودخانه واز براساس مدل تنش برشی لین 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. 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 زاویه‌دار بودن قطعات است.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز واز با جهت شمالی- جنوبی و با وسعتی معادل  $140/9$  کیلومتر مربع در دامنه شمالی رشته کوه‌های البرز و در جنوب شهر

کیلومتر مربع را عرصه جنگل و ۵۴/۲۶ کیلومتر مربع را عرصه مرتع در بر گرفته است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش جهت مدل تنش برشی لین شامل مورفومتری کانال و اندازه رسوبات کناره رودخانه می‌باشد که از طریق برداشت میدانی و سپس در آزمایشگاه به دست آمده است. ابتدا یک بازه به طول ۲ کیلومتر که دارای فرسایش کناره‌ای بیشتر و مابین دشت و کوهستان قرار داشت انتخاب شد که از معیارهای انتخاب بازه قابل دسترس بودن، دارابودن فرسایش کناره‌ای، کناره‌های با پوشش و مواد تشکیل دهنده متفاوت بوده است تعداد ۸ مقطع عرضی در بازه مورد نظر در رودخانه واز مابین روستای واز و شهر چمستان انتخاب شد، سپس اقدام به تهیه مقاطع عرضی کانال با استفاده از دوربین و شاخص نقشه برداری گردید و پارامترهایی نظیر عرض دبی لبالبی، عمق متوسط دبی لبالبی، شیب کناره و بستر، اندازه ذرات بستر و کناره و شعاع انحنا اندازه‌گیری شد. بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده از مقاطع، پارامترهای مورد نیاز در اندازه-

گیری تنش برشی لین به شرح زیر می‌باشد (شکل ۲).

اندازه‌گیری مقطع دبی لبالبی: با توجه به آثار کناره رودخانه از جمله زیربری رودخانه، تغییرات جنس در کناره رودخانه، آثار خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها، تغییرات رنگ سنگ‌ها 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 اندازه‌گیری شد. برای مشخص نمودن متوسط عمق با استفاده از شاخص نقشه‌برداری در نقاط مختلف از تراز دبی لبالبی (عرض مقطع پر)، عمق اندازه‌گیری شده و میانگین عمق‌های هر مقطع به عنوان عمق متوسط در نظر گرفته شده است.

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

های به دست آمده از اندازه ذرات به صورت نمودار تجمعی ترسیم گردید تا  $D_{50}$  آنها (اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچکتر از آن هستند) محاسبه شود (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴).

زاویه قرار پاره سنگ  $\theta$  و پارامتر شیلدز: زاویه قرار پاره سنگ را با توجه به جدول ۱ متناسب با قطر ذرات کناره رودخانه که براساس مشاهدات میدانی اندازه‌گیری 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 ۱ محاسبه می‌شود. در واقع پارامتر شیلدز نسبت نیروی برشی به وزن ذره است.

شیب کرانه: در مطالعات میدانی در منطقه مورد مطالعه نیمرخ هرکدام از مقاطع با استفاده از نقشه‌برداری با دوربین نقشه‌برداری برداشت و داده‌ها در نرم‌افزار اتوکد وارد و نیمرخ رسم شد، سپس شیب کناره‌ها محاسبه گردید.

شیب کانال: شیب کانال با استفاده نقشه‌برداری طولی از بازه مورد مطالعه و سپس با تقسیم اختلاف ارتفاع بالادست و پایین دست بازه بر طول آن (۲۰ متر) به دست آمد.

اندازه قطر رسوبات: برای بررسی اندازه ذراتی که بیشترین فراوانی را دارند، از رسوبات هر کدام از کناره‌ها نمونه‌برداری می‌شود. و با استفاده از روش دانه سنجی با استفاده از الک و شیکر در آزمایشگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس داده-



شکل ۲: مراحل روش کار در مدل تنش برشی لین

جدول ۱: زاویه قرار پاره سنگ و پارامتر شیلدز برای اندازه‌های مختلف پاره سنگ

پارامتر شیلدز $t^*$	زاویه قرار پاره سنگ $\theta$	قطر ذره (میلیمتر)	طبقه‌بندی 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

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 ۳ به دست آمد.

رابطه ۳

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

گام سوم: محاسبه پارامتر ژئومورفیک (هندسی) شیب کرانه از طریق رابطه ۴:

رابطه ۴

$$\theta = \tan^{-1}\left(\sin\frac{\theta_0}{\sin\theta_1}\right)$$

گام چهارم: محاسبه پارامتر ژئومورفیک (هندسی) وزن مستغرق ذره از طریق رابطه ۵:

رابطه ۵

$$a_\theta = \sqrt{\cos^2\theta_1 - \sin^2\theta_0}$$

گام پنجم: محاسبه زاویه انحراف خطوط جریان از طریق رابطه ۶:

رابطه ۶

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

گام ششم: محاسبه ضریب پایداری ذرات تشکیل دهنده کرانه از طریق رابطه ۷:

رابطه ۱)

$$\tau_* = \theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)}$$

در این رابطه  $\tau$ : تنش برشی،  $\rho_s$ : چگالی رسوب،  $\rho$ : چگالی سیال،  $g$ : شتاب گرانش و  $D$ : قطر مشخصه ذرات رسوب است.

تنش برشی لین

ناپایداری کرانه با استفاده از روش‌های زیادی محاسبه می‌گردد. یکی از این روش‌ها، تنش برشی براساس رابطه لین است، که براساس اندازه مؤثر پاره سنگ برای پایداری کرانه تحت نیروی برشی  $\tau_0$  از طریق رابطه ۲ تخمین زده می‌شود. در این مدل بررسی میزان فرسایش کناره براساس هیدرولیک جریان و اندازه رسوبات کناره می‌باشد، و شرایط محیطی از جمله پوشش گیاهی کناره دخالت داده نمی‌شود و فرض بر این است که کناره فاقد پوشش گیاهی است.

رابطه ۲)

$$\tau_m = \frac{\tau_0}{\tau_{*c}\gamma(G-1)\left[\cos\theta_1\sqrt{1-\frac{\sin^2\theta_1}{\sin^2\theta_0}}\right]}$$

که  $\tau_0$  تنش برشی به کار رفته و  $\tau_{*c}$  عدد شیلدز بحرانی است.  $\gamma_s$  و  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ و آب،  $\theta_1$  زاویه شیب بدنه و  $\theta$  زاویه قرار پاره سنگ است

### نتایج

تغییرات کانال رودخانه، فرسایش کناره‌ای و رسوب‌گذاری کناره‌ای، فرایندهای طبیعی رودخانه‌های آبرفتی هستند که باعث تخریب زمین‌های کشاورزی اطراف و خسارت به تاسیسات انسانی کنار رودخانه می‌شود. راه‌حل‌های مهندسی متعددی برای تقویت کناره در برابر فرسایش وجود دارد. یکی از روش‌های ساده، کم هزینه و موثر استفاده از روش سنگچین کناره رودخانه می‌باشد که در این روش از پاره سنگ‌هایی که به سادگی قابل حمل توسط جریان آب نباشند استفاده می‌شود. با توجه به شرایط رودخانه واز و بالا بودن فرسایش کناره‌ای در این رودخانه و برآورد میزان ناپایداری کناره و راهکار مدیریتی جهت تثبیت کناره‌ها ضرورت دارد. در این مطالعه برای دست یافتن به این هدف از روش تنش برشی لین استفاده شد. و با توجه به ثابت بودن جریان مهم‌ترین عامل تاثیرگذار در میزان ناپایداری در مقاطع مختلف اندازه ذرات کناره کانال و شیب کناره کانال می‌باشد. بدین منظور پس از به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز (جدول ۲) میزان ضریب پایداری کناره، اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ موثر جهت سنگچین کناره در دو سناریو و هر بار با یک شیب (۲۰ درجه و ۳۰ درجه) به دست آمد. پس از مشخص شدن این پارامترها، می‌توان محاسبات مربوط به معادلات مدل لین را که شامل تنش برشی  $\tau_0$ ، زاویه شیب کناره  $\theta$ ، ضریب پایداری ذره  $a_\theta$ ، زاویه انحراف خطوط جریان  $\lambda$ ، عدد پایداری  $\eta_0$ ، زاویه حرکت ذره بستر  $\beta$  با فرض  $M=N$  را براساس رابطه‌های ۱ تا ۱۱ محاسبه کرد (جدول ۳).

رابطه ۷)

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

گام هفتم: محاسبه زاویه حرکت ذره بستر  $\beta$  از طریق رابطه ۸:

رابطه ۸)

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

گام هشتم: محاسبه ضریب پایداری شیب کناره از طریق رابطه ۹:

رابطه ۹)

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

گام نهم: محاسبه وضعیت پایداری کناره از طریق رابطه ۱۰:

رابطه ۱۰)

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

در صورتی که فاکتور ایمنی<sup>۲</sup> کوچکتر از ۱ باشد گویای ناپایداری ذرات تشکیل دهنده کرانه خواهد بود. همچنین می‌توان با فرض  $\theta_0 = 0$ ،  $\lambda = 0$  اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت را از طریق رابطه ۱۱ تخمین زد.

رابطه ۱۱)

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

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

جدول ۲: پارامترهای مؤثر در فرسایش کناره رودخانه واز بر طبق شاخص تنش برشی لین

پارامتر شیلدز		زاویه شیب کناره $\theta_1$ (درجه)		چگالی نسبی ذرات G	قطر ذرات (m)		زاویه قرار پاره سنگ درجه $\theta$		بالاترین عمق دبی لبالبی (متر)	شیب بستر S $\theta_0$ (درجه)	شعاع انحناء (متر)	مقطع عرضی
R	L	R	L		R	L	R	L				
۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۵۸	۵۹		۲/۶۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۳۱				
۰/۰۳۹	۰/۰۴۲	۸۰	۴۳	۲/۶۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۴	۳۳	۳۵	۰/۴۳	۰/۰۱۲	۱۲	۲
۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۵۳/۳	۳۸/۹	۲/۶۵	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۶	۳۳	۳۱	۱/۵	۰/۰۲۱	۲۶	۳
۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۸۱	۳۴	۲/۶۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۳۱	۳۱	۰/۷۹	۰/۰۴۴	۱۰	۴
۰/۰۳۷	۰/۰۴۲	۳۴/۵	۸۰	۲/۶۵	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۳۱	۳۵	۰/۷۳	۰/۰۳۴	۱۵	۵
۰/۰۴۲	۰/۰۳۷	۱۶	۸۲	۲/۶۵	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۷	۳۵	۳۱	۰/۵۴	۰/۰۱۷	۱۸	۶
۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۸۹	۲۹	۲/۶۵	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۳۱	۳۱	۰/۸۵	۰/۰۴۱	۱۴	۷
۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۱۰	۸۰	۲/۶۵	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۵	۳۵	۳۱	۰/۴۵	۰/۰۱۴	۱۲	۸

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

$\eta_1$	$\beta$	$\eta_0$	$\lambda$	$a_\theta$	$\theta$	$\tau_0$	کرانه	مقطع عرضی
۱۱۷۸/۰۵	۳۶/۸۶	۱۱۷۸/۰۵	۵۱/۱۱۵	۰/۵۱۵	۱/۹۴	۳۵۲/۷۷	چپ	۱
۱۱۷۸/۰۵	۳۷/۱۲۵	۱۱۷۸/۰۵	۵۱/۱۱۵	۰/۰۴۵۳	۱/۶۶۱	۳۵۲/۷۷	راست	
۱۸/۵۷	۶۲/۱۷	۱۸/۶۱۵	۲۱/۵۱	۰/۷۳۱	۱/۰۰۸	۵۰/۶۲	چپ	۲
۲۶/۶۶	۶۲/۰۴	۲۶/۷۳	۲۱/۵۱	۰/۱۷۴	۰/۶۹۸	۵۰/۶۲	راست	
۸۵۹/۹۵	۵۵/۵۷	۸۵۹/۹۵	۳۲/۴	۰/۷۷۸	۱/۹۱۵	۳۰۹/۰۲	چپ	۳
۲۱۲/۸۲	۵۵/۵۵	۲۱۲/۸۳	۳۲/۴	۰/۵۹۸	۱/۵	۳۰۹/۰۲	راست	
۵۶۹۳/۶۹	۴۴/۵	۵۶۹۳/۶۹۴	۴۰/۹۹	۰/۸۲۸	۴/۴۹۴	۳۴۱	چپ	۴
۵۶۹۳/۶۹	۴۶/۴۴	۵۶۹۳/۶۹۴	۴۰/۹۹	۰/۱۶۲	۲/۵۴۸	۳۴۱	راست	
۷۱/۶۱	۵۷/۹۵	۷۱/۶۳	۲۸/۱۶۲	۰/۱۷۷	۱/۹۸	۲۴۳/۴۸	چپ	۵
۸۱۳/۱	۵۸/۲۹	۸۱۳/۱	۱۸/۱۶۲	۰/۸۲۴	۳/۴۳	۲۴۳/۴۸	راست	
۲۱۴/۸	۶۹/۹۳	۲۱۴/۸۱	۱۸/۲۶۳	۰/۱۴	۰/۹۸	۹۰/۰۵۶	چپ	۶
۲۲/۰۷	۶۶/۳۳	۲۲/۰۷	۱۸/۲۶۳	۰/۹۶	۳/۵۳	۹۰/۰۵۶	راست	
۹۵۱/۴۰۶	۵۱/۳۵	۹۵۱/۴	۳۳/۷۴	۰/۸۷۴	۴/۸۲	۳۴۱/۸۸	چپ	۷
۹۵۱/۴۰۴	۵۳/۷۵	۹۵۱/۴	۳۳/۷۴	۰/۰۴۴	۲/۳۴	۳۴۱/۸۸	راست	
۲۰۶/۳۷	۶۵/۹۴	۲۰۶/۳۹	۲۲/۴۱	۰/۱۷۴	۰/۸	۶۱/۸	چپ	۸
۴۴/۵	۶۲/۳۶	۴۴/۵	۲۲/۴۱	۰/۹۸۴	۴/۶	۶۱/۸	راست	

بار با شیب ۲۰ درجه و یک بار با شیب ۳۰ درجه در رودخانه موردنظر برآورد گردید (جدول ۴) که برای به دست آمدن اندازه پاره سنگ مؤثر ابتدا زاویه قرار و پارامتر شیلدز را بالاترین عدد که برای

پس از محاسبه پارامترهای مؤثر در شاخص تنش برشی فرسایش کناره رودخانه واز میزان پایداری کناره، اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ مؤثر برای سنگچینی در دو سناریو یک



(جدول ۴). و در مورد نحوه حرکت ذرات می‌توان گفت: هنگامی که ذره ناپایدار می‌شود در راستای  $\beta$  نسبت به جهت تندترین شیب به راه می‌افتد. اگر  $\beta+\theta=90$  جهت حرکت به پایین دست است اگر  $\beta+\theta>90$  ذره بر شیب بدنه به بالا به طرف سطح آب حرکت می‌کند و اگر  $\beta+\theta<90$  باشد ذره به پایین شیب بدنه به سمت خط القعر به راه می‌افتد که در کلیه مقاطع رودخانه واز  $\beta+\theta<90$  است.

پارامتر شیلدز  $0.054$  و زاویه قرار  $42$  بود در نظر گرفته شد. سپس در دو مرحله با شیب کناره فرضی  $20$  درجه و  $30$  درجه اندازه پاره سنگ را در گام‌های ششم تا نهم برای اندازه‌های مختلف پاره سنگ آنقدر تکرار شد که  $SF=1$  به دست آمد، که در این حالت اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ مناسب سنگچینی کناره برای دو سناریو پیشنهادی برآورد شد

جدول ۴: میزان ضریب پایداری کناره و اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی رودخانه واز براساس شاخص تنش برشی لین

مقطع عرضی	کناره	ضریب پایداری وضع موجود SF	اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت (m) (شیب کناره ۳۰ درجه)	اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت (m) (شیب کناره ۲۰ درجه)	اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی (m) (شیب کناره ۲۰ درجه)
۱	چپ	۰/۰۰۰۴۴	۰/۶۱	۰/۴۷	۱/۲۱
	راست	۰/۰۰۰۰۳۸	۰/۶۱	۰/۴۷	۱/۲۱
۲	چپ	۰/۰۳۸۴۳	۰/۰۸۷	۰/۰۶۷	۱/۱۴۲
	راست	۰/۰۰۶۳۶	۰/۰۸۷	۰/۰۶۷	۰/۱۴۲
۳	چپ	۰/۰۰۰۰۹	۰/۵۳	۰/۴۱۱	۰/۹۵
	راست	۰/۰۰۰۲۸	۰/۵۳	۰/۴۱۱	۰/۹۵
۴	چپ	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۵۹	۰/۴۵۳	۱/۱۵
	راست	۰/۰۰۰۰۰۲۸	۰/۵۹	۰/۴۵۳	۱/۱۵
۵	چپ	۰/۰۰۰۲۴۴	۰/۴۲	۰/۳۲۴	۰/۷۳۵
	راست	۰/۰۰۰۱۰۱	۰/۴۲	۰/۳۲۴	۰/۷۳۵
۶	چپ	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۱۵۵	۰/۱۲	۰/۲۴۸
	راست	۰/۰۴۳۲۴	۰/۱۵۵	۰/۱۲	۰/۲۴۸
۷	چپ	۰/۰۰۰۰۹۲	۰/۵۹	۰/۴۵۵	۱/۰۸
	راست	۰/۰۰۰۰۰۴۷	۰/۵۹	۰/۴۵۵	۱/۰۸
۸	چپ	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۱۰۶	۰/۰۸۲	۰/۱۷۵
	راست	۰/۰۲۲۰۷	۰/۱۰۶	۰/۰۸۲	۰/۱۷۵

مدل اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت با توجه به رابطه ۱۱ و ویژگی رسوبات، سرعت جریان آب و هندسه کانال به دست می‌آید که با توجه به اندازه‌های به دست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت بزرگتر از اندازه رسوبات کناره می‌باشد که بیانگر ناپایداری

نتایج به دست آمده از مدل لین در جدول ۳ بیانگر آن است که هر هشت مقطع در هر دو کناره در دبی لبالبی دارای ضریب پایداری پایین می‌باشند (شکل ۳) که بیانگر آن است که در همه مقاطع فرسایش کناره‌ای وجود دارد. با توجه به مشاهدات میدانی نتایج به دست آمده بر در این

کوچکتر خواهد بود. هدف از انجام محاسبات در دو شیب مختلف نشان دادن شیب و اندازه سنگ-های جهت سنگ چینی در کناره‌های مختلف است که در کناره‌های با دیواره بلند ناچار باید از شیب کتر استفاده شود و به طبع آن از اندازه پاره سنگ‌های بزرگتر استفاده می‌شود. اما در کناره-های کوتاه‌تر و کناره‌های بدون دیواره که مستقیم به دشت سیلابی ختم می‌شوند می‌توان سنگچین کناره را با شیب کمتر و با اندازه پاره سنگ‌های کوچکتر انجام داد.

در کناره‌ها می‌باشد. همچنین در ادامه با توجه به تکرار گام ۶ تا ۹ در دو سناریو پیشنهاد شیب کناره ۳۰ و ۲۰ درجه و تغییر اندازه پاره سنگ تا زمانی که ضریب ایمنی مساوی با ۱ شود ادامه داده شد که اندازه پاره سنگ مناسب جهت سنگچینی برای هر کدام از کناره‌ها در هشت مقطع و در دو سناریو به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده هرچه زاویه کناره بیشتر باشد اندازه پاره سنگ‌های مورد نیاز بزرگتر و هرچه زاویه کناره کمتر باشد اندازه پاره سنگ‌های مورد نیاز



شکل ۳: تصویر از فرسایش کناره‌ای در مقاطع مختلف

راهکار مدیریتی ضرورت دارد، که از روش تنش برشی لین براساس اندازه مؤثر پاره سنگ برای برآورد شرایط پایداری کناره استفاده شد. با توجه به ثابت بودن جریان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار میزان ناپایداری در مقاطع مختلف اندازه ذرات کناره و میزان شیب کناره کانال است. بدین منظور پس از بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز، میزان ضریب پایداری کناره، اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره سنگ مؤثر جهت سنگ چینی کناره در دو زاویه فرضی ۲۰ درجه و ۳۰ درجه در رودخانه واز در استان مازندران

### نتیجه‌گیری

افزایش فرسایش کناره‌ای علاوه بر اینکه موجب افزایش بار رسوب شده بلکه موجب ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال می‌شود. راه حل‌های مهندسی متعددی برای تقویت کناره در برابر فرسایش وجود دارد. در روش‌های معمول از پوشش سنگریز و یا از پاره سنگ‌های بزرگی که در کناره قرار دارند و به سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می‌شود. در مورد رودخانه واز که در بیشتر مسیر از نوع سینوسی است و در کلیه مقاطع ناپایدار است

مورد نیاز است. مقطع شماره ۶ کوچکترین پاره سنگ با اندازه ۰/۲۴۸ در شیب ۲۰ درجه و پاره سنگ با اندازه ۰/۱۱۵ متر در شیب ۳۰ درجه مورد نیاز است. در پایان نتایج این پژوهش با نتایج پژوهشی که حسین زاده و همکاران در سال (۱۳۹۷) بر روی رودخانه گلالی قروه با استفاده از مدل لین انجام داده بودند. همچنین اطمینان و همکاران (۱۳۹۹) بر روی رودخانه طالقان انجام داده بودند مقایسه شد، نتایج به دست آمده در سه رودخانه واز، گلالی و طالقان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که نتایج در یک راستا بودند که نشانگر آن است مدل لین جهت بررسی میزان فرسایش کناره و راهکارهای مدیریتی در رودخانه-های با دبی کم و کوهستانی مناسب است. در مطالعات قبلی میزان شیب جهت عملیات سنگچینی از همان شیب طبیعی دیواره استفاده شده است در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن دو شیب ۲۰ و ۳۰ درجه راهکار منطقی تر و دقیق تر برای حفاظت از کناره‌های رودخانه ارائه گردد.

بدست آمد. نتایج به دست آمده از مدل تنش برشی لین در رودخانه واز بیانگر آن است که مقاطع ۶، ۲، ۸، ۳، ۵، ۷، ۱، ۴ به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین ضریب پایداری هستند. از دلایل موثر در اختلاف میزان فرسایش کناره در مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه میزان شیب کناره و اندازه رسوبات کناره می‌باشد. و بر این اساس اندازه پاره سنگ در آستانه حرکت و پاره سنگ مناسب جهت سنگچینی کناره و حفاظت از کناره رودخانه متفاوت خواهد بود، همچنین با توجه به شرایط هر مقطع، شیب مناسب کناره جهت عملیات سنگچین کردن متفاوت می‌باشد. اندازه پاره سنگ جهت سنگچین کردن کناره رابطه مستقیم با شیب کناره دارد، هرچه شیب کناره کمتر باشد اندازه پاره سنگ جهت سنگچینی کوچکتر و هرچه شیب کناره بیشتر باشد پاره سنگ‌های با اندازه بزرگتر مورد نیاز است. که در این بازه از رودخانه واز مقطع شماره ۱ بزرگترین پاره سنگ با اندازه ۱/۲۱ متر در شیب ۲۰ درجه و پاره سنگ با اندازه ۰/۶۹ متر در شیب ۳۰ درجه

## پانویس

### 1-Rock riprap

BSTEM، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۱، شماره ۴۵، ص ۵۳-۷۰.  
حسین‌زاده، م.، خالقی، س. و رستمی، م.، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری کرانه و مورفومتری رودخانه گلالی قروه به منظور پایدارسازی در برابر فرسایش، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۱۱، بهار ۱۳۹۷، شماره ۴، ص ۱۶۰-۱۷۱.  
حسین‌زاده، م.، خالقی، س. و رستمی، میلاد، ۱۳۹۶. مقایسه روش‌های برآورد خطر فرسایش

### 2-Safety Factor

## منابع

-اطمینان، ز.، رستمی، م. و نصرتی، ک.، ۱۳۹۹. بررسی پایداری کناره رودخانه طالقان در برابر فرسایش و راهکارهای مدیریتی آن با استفاده از روش تنش برشی لین، مجله اکو هیدرولوژی دانشگاه تهران، دوره ۷ شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، ص ۱۱۱-۱۱۹.  
حسین‌زاده، م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۷. برآورد فرسایش کناره‌های رودخانه با استفاده از مدل

-رضایی مقدم، م.، ثروتی، م. و اصغری سراسکانرود، ص.، ۱۳۹۱. تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی، مجله پژوهش‌های کمی، تابستان ۱۳۹۱، شماره ۱، ص ۳۳-۴۶.

-فولادفر، ح.، شفاعی بجستان، م. و فتحی مقدم، م.، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی و مدلسازی تنش برشی بحرانی برای فرسایش سطحی بستر چسبنده، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۲، شماره ۸، ص ۷۸-۹۴.

-خواستار بروجنی، م.، صمدی بروجنی، ح. و اسماعیلی، کاظم، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تنش برشی آستانه نهشته شدن رسوبات رسی - سیلتی در غلظت‌های مختلف، مجله پژوهشی آب ایران سال ۷، شماره ۱۳، ص ۱۳۱-۱۳۸.

کرانه‌ای با استفاده از مدل NBS (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه، مجله مخاطرات محیطی دوره ۶، شماره ۱۴، ص ۱۴۱-۱۵۲).

-حسین زاده، م. و رستمی، م.، ۱۳۹۶. تحلیل ناپایداری بستر کانال با استفاده از تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه، کردستان، فصلنامه اکوسیستم‌های طبیعی ایران، سال ۸، شماره ۲، تابستان ۹۶، ص ۱-۱۱).

-لایقی، ص. و کرم، ا.، ۱۳۹۳. طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با مدل روزگن، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۳، ص ۱۳۰-۱۴۳.

-قمشی، م. و وجدانی، ن.، ۱۳۸۴. تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده و نقش آن در طراحی کانال‌های رو باز، مجله بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، ص ۸۳-۹۳.

-Bizzi, S., Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J.D., Alexander, G., Barnas, K. and Brooks, S., 2005. Synthesizing U. S. river restoration efforts, *Science*, v. 308, p. 636-637.

-Bigham, K.A., 2016. Evaluation and application of the Bank Assessment for Non-Point Source Consequences of Sediment (BANCS) model developed to predict annual streambank erosion rates (Doctoral dissertation, Kansas State University).

-Bizzi, S. and Lerner, D.N., 2015. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes, *River research and application*, v. 31, p. 16-27.

-Coryat, M., 2014. Analysis of the bank assessment for non-point source consequences of sediment (BANCS) approach for the prediction of stream

bank stability and erosion along Stony Clove, v. 21, p. 18-24.

-Ghosh, K.G., Pal, S. and Mukhopadhyay, S., 2016. Validation of BANCS model for assessing stream bank erosion hazard potential (SBEHP) in Bakreshwar River of Rarh region, Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 2(2), p. 95-112.

-Hoseinzadeh, M.M., Matsh Beyranvand, S. and Esmaili, R., 2020. Analysis of channel bank erosion rate using exposed roots of trees: a case study of lavij stream, northern Alborz Mountains, Iran. *Journal of Mountain Science*, v. 17, p. 1096-1105.

-Jugie, M., Gob, F., Virmoux, C., Brunstein, D., Tamisier, V., Le Coeur, C. and Grancher, D., 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion

- pins, *Journal of hydrology*, v. 563, p. 418-434.
- Klavon, K., Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R. and Khanal, A., 2017. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM), *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42(1), p.191-213.
- Kwan, H. and Swanson, S., 2014. Prediction of annual streambank erosion for Sequoia National Forest, California, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 50(6), p. 1439-1447.
- Malik, I. and Matyja, M., 2008. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River—Czech Republic), *Geomorphology*, v. 98(1-2), p. 126-142.
- Marteau, B., Vericat, D., Gibbins, C., Batalla, R.J. and Green, D.R., 2017. Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42(3), p. 503-515.
- McMillan, M. and Hu, Z., 2017. A watershed scale spatially distributed model for streambank erosion rate driven by channel curvature, *Geomorphology*, v. 294, p. 146-161.
- McMillan, M., Liebens, J. and Metcalf, C., 2017. Evaluating the BANCS streambank erosion framework on the northern Gulf of Mexico Coastal Plain, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 53(6), p. 1393-1408.
- Midgley, T.L., Fox, G.A. and Heeren, D.M., 2012. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks, *Geomorphology*, v. 145, p.107-114.
- Rosgen, D.L., 2001. A practical method of computing streambank erosion rate. In *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, v. 1, p. 12-20.
- Sass, C.K. and Keane, T.D., 2012. Application of Rosgen's BANCS model for NE Kansas and the development of predictive streambank erosion curves. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 48(4), p. 774-787.
- Simon, A., Bankhead, N. and Thomas, R., 2010. Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting streambank loading rates and potential load reductions. USDA-ARS, National Sedimentation Laboratory, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, p. 145-156.
- Simon, A., Pollen-Bankhead, N. and Thomas, R.E., 2011. Development and application of a deterministic bank stability and toe erosion model for stream restoration. *Stream restoration in dynamic fluvial systems: Scientific approaches, analyses and tools*. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, p. 453-474.
- Simon, A., Pollen-Bankhead, N., Mahacek, V. and Langendoen, E., 2009. Quantifying reductions of mass-failure frequency and sediment loadings from streambanks using toe protection and other means: Lake Tahoe, United States 1. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 45(1), p. 170-186.
- Stoffel, M., Corona, C., Ballesteros-Cánovas, J.A. and Bodoque, J.M., 2013. Dating and quantification of erosion processes based on exposed

---

roots. Earth-Science Reviews, v. 123, p. 18-34.  
-Stotts, S., O'Neal, M., Pizzuto, J. and Hupp, C., 2014. Exposed tree root analysis as a dendrogeomorphic

approach to estimating bank retreat at the South River, Virginia. Geomorphology, v. 223, p. 10-18.