

## بررسی پایداری کناره رودخانه طالقان در برابر فرسایش و راهکارهای مدیریتی آن با استفاده از روش تنش برشی لین

زهرا اطمینان<sup>۱</sup>، میلاد رستمی<sup>۲</sup>، کاظم نصرتی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۷/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۱/۲۲)

### چکیده

پدیده فرسایش و انتقال رسوب از جمله فرایندهای هیدرودینامیکی مهمی است که بسیاری از سیستم‌های هیدرولیکی نظیر حوضه‌های آبریز، رودخانه، سواحل، بنادر، سدها، پل‌ها، جاده‌ها، کشتزارها و تأسیسات عمرانی را متأثر می‌سازد. در این میان، مطالعه ناپایداری کناره رودخانه برای فعالیت مهندسی به منظور پایداری کناره در برابر فرسایش از اقدامات ضروری است. بنابراین، در پژوهش حاضر ضریب ناپایداری رودخانه طالقان و راهکار مهندسی برای پایداری کناره آن با استفاده از مدل لین بررسی شد. به این منظور، کلیه پارامترهای مورد نیاز با استفاده از بررسی میدانی و تصاویر گوگل ارث اندازه‌گیری شد و در نهایت شیب، تنش برشی، زاویه شیب، ضریب پایداری ذره، ضریب پایداری و سپس اندازه پاره‌سنگ مؤثر برای سنگ‌چینی کناره‌های مقاطع مد نظر در رودخانه طالقان به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین میزان فرسایش و در نتیجه آن، کمترین ضریب پایداری (۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۱) و بزرگ‌ترین پاره‌سنگ در آستانه حرکت (۰/۳۳ و ۰/۴۸ متر) و مؤثر برای سنگ‌چینی مربوط به مقطع ۴ در هر دو کناره است که به محدوده روستای گوران مربوط می‌شود و کمترین میزان فرسایش و در نتیجه آن، بیشترین ضریب پایداری (۰/۰۰۲ و ۰/۰۱۷) و کوچک‌ترین پاره‌سنگ در آستانه حرکت (۰/۷۵ و ۰/۹۵ متر) برای سنگ‌چینی مربوط به مقطع یک در محدوده روستای مهران است. از دلایل آن می‌توان اندازه ذرات کناره‌ها، شیب بستر، شیب کناره و عرض دبی لبالی را بیان کرد. با توجه به موقعیت منطقه بهترین راه برای جلوگیری از فرسایش کناره‌ای ایجاد سنگ‌چین در کناره‌های با فرسایش زیاد است.

**کلیدواژگان:** اندازه پاره‌سنگ، رودخانه طالقان، ضریب پایداری، فرسایش کناره‌ای، مدل لین.

## مقدمه

پایداری و ناپایداری رودخانه تحت تأثیر مؤلفه‌های درونی و خارجی سیستم رودخانه‌ای است. مؤلفه‌های خارجی شامل اقلیم، پوشش گیاهی، فعالیت انسانی و شیوه یخ زدن و ذوب شدن می‌شود [۱]. مؤلفه‌های داخلی نیز شامل مورفولوژی رودخانه، مانند انواع الگوهای رودخانه (مئاندری، شریانی و مستقیم) ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هندسی قوس‌های رودخانه‌ای، مواد بستر و کناره رودخانه، متغیرهای هیدرولیکی جریان و عامل تنش برشی است [۲]. حفاظت ساحل رودخانه در مقابل فرسایش از اهداف اصلی ساماندهی رودخانه‌ها در توسعه پایدار منابع آب به شمار می‌آید، چرا که فرسایش سواحل رودخانه‌ها، سبب خسارت به اراضی کشاورزی، آسیب دیدن سازه‌های مجاور مانند پل‌ها و جاده‌ها، عریض شدن آبراهه جریان و مسائل زیست‌محیطی درخور توجه می‌شود [۳]. افزایش فرسایش کناره‌ای نه تنها موجب افزایش بار رسوب می‌شود بلکه ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال را هم به وجود می‌آورد. از این رو، طی چند دهه اخیر بار رسوب و ناپایداری کناره‌ای رود، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطح جهان ایجاد کرده و مبالغ زیادی برای پایداری کناره‌های رود صرف شده است [۴]. 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 هنگام بارندگی و یا کمی پس از شروع آن فعال می‌شوند.

اندرکنش نیروهای فعال حاصل از جریان آب و نیروهای مقاوم به جریان ناشی از مواد بستر و کناره، سبب فرسایش کناره کانال می‌شود. در نتیجه، راه حل‌های مهندسی متعددی برای تقویت کناره در برابر فرسایش به وجود آمده است. در روش‌های معمول از پوشش سنگ‌ریزه و یا از پاره‌سنگ‌های بزرگی که در ساحل قرار دارند و به‌سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می‌شود. در صورتی که پوشش پاره‌سنگی<sup>۱</sup> با ابعاد و اندازه مناسب، به‌صرفه و در دسترس باشد، می‌تواند به صورت وسیعی برای حفاظت کناره رود استفاده شود. روراندگی موج<sup>۲</sup> بر شیب‌های با پوشش پاره‌سنگی معمولاً کمتر از انواع دیگر سازه‌هاست. دو روش به منظور تعیین اندازه قلوه‌سنگ پوشش پاره‌سنگی

ارائه شده است که عبارت‌اند از: روش تنش برشی و روش سرعت جریان. در پژوهش حاضر از روش تنش برشی استفاده می‌شود. 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 پاره‌سنگ مانند اندازه، دانسیته و زاویه دار بودن قطعات است.

## پیشینه تحقیق

تا کنون تحقیقات زیادی توسط محققان داخلی و خارجی در زمینه ناپایداری و فرسایش کناره رودخانه و مدیریت حفاظت از کناره‌ها انجام گرفته است؛ از جمله: کوان و سوانسن<sup>۳</sup> به پیش‌بینی فرسایش سالانه کناره رودخانه با استفاده از شاخص خطر فرسایش کناره (BEHI) و روش تنش برشی نزدیک کناره (NBS) برای جنگل ملی سکواپا در کالیفرنیا پرداخته‌اند [۵]. نتایج به‌دست‌آمده از طریق روش‌های BEHI و NBS با فرسایش واقعی کرانه طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ مقایسه شد. کوریت<sup>۴</sup> به تحلیل و ارزیابی کانال با روش پیامدهای منع غیر نقطه‌ای رسوب (BANCS) برای پیش‌بینی فرسایش و پایداری کناره رودخانه در استونی کلوو کریک<sup>۵</sup> در کت اسکیلز<sup>۶</sup> پرداخته است [۶]. پژوهش یادشده نشان داد نتایج به‌دست‌آمده از طریق روش BANCS ممکن است به بهبود مدیریت آینده حوضه استونی کلوو منجر شود. روپرو و همکارانش از سیستم طبقه‌بندی رزگن برای بررسی دوازده رودخانه در حوضه جای دی بهره گرفتند و نشان دادند روش رزگن می‌تواند برای بررسی رودخانه‌های چندکاناله مناسب باشد [۷]. حسین‌زاده و همکارانش طی پژوهشی ضریب ناپایداری رودخانه گلالی قروه و راهکار مهندسی برای پایداری سازی کرانه آن را با استفاده از روش تنش برشی لین بررسی کردند و نشان دادند کدام مقاطع در منطقه مطالعه شده ضریب ناپایداری بیشتری داشته است [۸]. امیری تکلدانی و همکارانش طی پژوهشی تأثیرات موقعیت و عمق ترک‌های کشتی در پایداری ساحل رودخانه را بررسی کرده‌اند [۹]. بر اساس مشاهدات صحرائی و تعیین نوع ذرات تشکیل‌دهنده سواحل تخریب‌یافته مشخص شد که توسعه

3. Kwan and Swanson

4. Coryat

5. Stony Clove Creek

6. Catskills

1. Rock riprap

2. Wave runup

از مطالعه حاضر، بررسی میزان خطر فرسایش کناره‌های و مدیریت و پایدارسازی رودخانه در برابر فرسایش کناره‌های در رودخانه طالقان استان البرز است. ابتدا پارامترهای مؤثر در فرسایش پذیری کناره رودخانه طالقان بر اساس مدل تنش برشی لین استخراج و سپس اندازه پاره‌سنگ مناسب برای سنگ چینی هر بازه مشخص شده و در نهایت، میزان انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با مشاهدات میدانی بررسی شده است.

### مواد و روش

#### منطقه مطالعه شده

رودخانه طالقان از کوه‌های کندوان و کهار بزرگ سرچشمه می‌گیرد. این رود با دریافت بیش از ۱۵ رود بزرگ و کوچک از جمله دیزان و کرکبود، در دره طالقان به سمت غرب جریان می‌یابد و پس از عبور از حاشیه جنوبی شهر طالقان و ۱۱ کیلومتری غرب روستای شهرک، به رودخانه اندج و الموت می‌پیوندد که در نتیجه آن رودخانه پرآب شاهرود تشکیل می‌شود. رودخانه طالقان حدود ۱۸۰ کیلومتر طول دارد و در سال ۱۳۸۵ سد مخزنی چندمنظوره طالقان روی این رود احداث شده است. در پژوهش حاضر بالادست سد طالقان از روستای مرجان تا شهر طالقان به طول ۱۲ کیلومتر مطالعه می‌شود که موقعیت این حوضه و مقاطع عرضی اندازه‌گیری شده در شکل ۱ آمده است.

تعداد ۶ مقطع عرضی در بازه مد نظر در بالادست سد طالقان انتخاب شد (شکل ۱) و اقدام به تهیه مقاطع عرضی کانال با استفاده از دوربین و شاخص نقشه‌برداری شده و پارامترهایی نظیر عرض دبی لبالی، عمق متوسط دبی لبالی، شیب کناره و بستر، اندازه ذرات بستر و کناره، شعاع انحنا و سرعت جریان اندازه‌گیری شد. برپایه داده‌های اندازه‌گیری شده از مقاطع، پارامترهای مورد نیاز در اندازه‌گیری تنش برشی لین به شرح زیر است.

#### اندازه‌گیری مقطع دبی لبالی

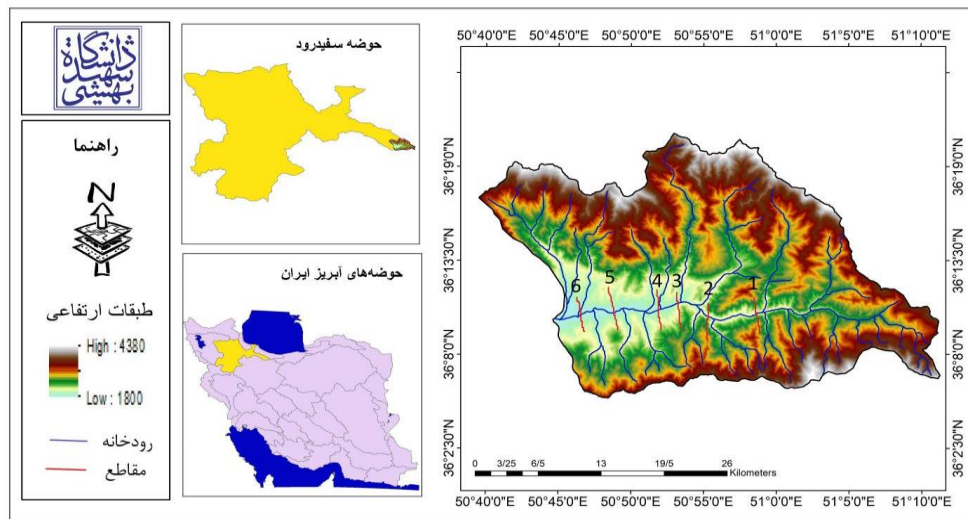
با توجه به آثار کناره رودخانه از جمله زیربری رودخانه، تغییرات جنس در کناره رودخانه، آثار خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها، تغییرات رنگ سنگ‌ها و همچنین سطح دشت سیلابی (در صورت وجود دشت سیلابی) مقطع دبی لبالی مشخص و عرض و عمق دبی لبالی با استفاده از متر و شاخص اندازه‌گیری شد (شکل ۲). برای مشخص کردن

ترک کشتی در خاک‌های دربردارنده ۱۰ تا ۲۰ درصد رس در صورت تغییر شرایط رطوبتی خاک محتمل است و در خاک‌های با چسبندگی زیاد یا خاک‌های درشت‌دانه امکان توسعه ترک کشتی وجود ندارد. منصوری هفشجانی و شفاعی طی پژوهشی طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه را بررسی کردند که با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده، فرمول‌های قطر سنگ‌چین برای کنترل آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه ارائه شد [۱۰]. همچنین، فرمول‌های ارائه‌شده توسط تحقیق یادشده با روابط ارائه‌شده از مطالعات پیشین روی سنگ‌چین اطراف تکیه‌گاه واقع در مسیر مستقیم مقایسه شده و ضریب تصحیح مناسب برای استفاده از این روابط در قوس ارائه شد. استادی و همکارانش در پژوهشی مدل بهینه‌سازی طراحی آبشکن‌های رودخانه‌ای و تأثیر آن در تعیین و هزینه‌های ساخت سازه را بررسی کردند و از بین معادله‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که معادله‌های بار بستر و آب‌شستگی، تأثیر زیادی در تعیین و هزینه‌های ساخت سازه دارند و از بین معادله‌های بار بستر استفاده‌شده، معادله Englund and Fredsoe بیشترین ظرفیت انتقال رسوب و کمترین هزینه و معادله Van Rijn کمترین ظرفیت انتقال رسوب و بیشترین هزینه را به دنبال دارد [۳]. لایقی و کرم در طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی ۲۳ کیلومتر از رودخانه جاجرود به منظور احیای رود و اقدامات مدیریتی از سیستم طبقه‌بندی مورفولوژیکی راسگن بهره گرفتند [۱۱]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بخش بزرگ این بازه مطالعاتی دارای الگوی DA است و بخش کمی از رودخانه الگوی B با وضعیت بسیار نامطلوبی دارد. 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. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) طی پژوهشی روی رودخانه گلالی قروه با استفاده از مدل لین میزان فرسایش کناره‌های را تخمین زدند و قطر پاره‌سنگ برای سنگ‌چینی را در منطقه قروه بیان کردند.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، بهترین روش برای مطالعه رودخانه طالقان، استفاده از مدلی بود که بتوان علاوه بر بررسی فرسایش کناره‌ای، راهکار قابل اجرا برای جلوگیری از فرسایش را هم ارائه داد. به این منظور، هدف

اندازه‌گیری شده و میانگین عمق‌های هر مقطع به عنوان عمق متوسط در نظر گرفته شده است.

متوسط عمق با استفاده از شاخص نقشه‌برداری در نقاط مختلف از تراز دبی لبالبی (عرض مقطع پر)، عمق



شکل ۱. نقشه منطقه مطالعه شده



شکل ۲. نمایی از روش اندازه‌گیری دبی لبالبی (به روش Lawlor) [۱۲]

**شیب کرانه**

در مطالعات میدانی در منطقه مطالعه شده پروفیل هریک از مقاطع با استفاده از نقشه‌برداری با دوربین نقشه‌برداری برداشت و داده‌ها در نرم‌افزار اتوکد وارد شده و پروفیل رسم شد و سپس شیب کناره‌ها در این نرم‌افزار به دست آمد.

**شیب کانال**

شیب کانال با استفاده از نقشه‌برداری طولی از بازه مطالعه شده 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 یک از کناره‌ها نمونه‌برداری شد. سپس، با استفاده از روش دانه‌سنجی و به کار بردن الک و شیکر، اندازه‌گیری ذرات در آزمایشگاه انجام شد. پس از آن، داده‌های

**شعاع انحنا<sup>۱</sup>**

برای اندازه‌گیری شعاع انحنا، مسیر رودخانه بر پایه تصاویر به دست آمده از گوگل ارث در محیط اتوکد ترسیم شد. در ادامه، دوایر 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 هر یک از بازه‌ها از مولینه استفاده شد. در این روش نیاز به اندازه‌گیری سطح مقطع کانال و سرعت جریان طی هر رویداد بارش باران است. با استفاده از رابطه ۱ [۱۳]:

$$Q = V * S \tag{1}$$

که در رابطه یاد شده، Q برابر است با دبی، V همان سرعت جریان و S سطح مقطع آب است.

1. Radius of Curvature

جریان سیال استفاده شده و از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در واقع، پارامتر شیلدز نسبت نیروی برشی به وزن ذره است.

$$\tau_* = \theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (2)$$

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

به‌دست‌آمده از اندازه ذرات به صورت نمودار تجمعی ترسیم شد تا  $D_{50}$  (اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند) آنها محاسبه شود [۱۴].

### زاویه قرار پاره‌سنگ $\theta$ و پارامتر شیلدز

زاویه قرار پاره‌سنگ را با توجه به جدول ۱ متناسب با قطر ذرات کناره رودخانه که بر اساس مشاهدات میدانی اندازه‌گیری شده، محاسبه شد. پارامتر شیلدز عدد بی‌بعدی است که برای محاسبه شروع ایجاد و حرکت رسوب در یک

جدول ۱. زاویه قرار پاره‌سنگ و پارامتر شیلدز برای اندازه‌های مختلف پاره‌سنگ [۸]

پارامتر شیلدز $t^*$	زاویه قرار پاره‌سنگ $\phi$	قطر ذره (میلی‌متر)	طبقه‌بندی اندازه پاره‌سنگ
۰/۰۵۴	۴۲	>۲/۰۴۸	تخته‌سنگ بسیار بزرگ
۰/۰۵۴	۴۲	۲/۰۴۸ - ۱/۰۲۴	تخته‌سنگ بزرگ
۰/۰۵۴	۴۲	۵۱۲ - ۱/۰۲۴	تخته‌سنگ متوسط
۰/۰۵۴	۴۲	۵۱۲ - ۲۵۶	تخته‌سنگ کوچک
۰/۰۵۴	۴۲	۲۵۶ - ۱۲۸	قلوه‌سنگ بزرگ
۰/۰۵۲	۴۱	۱۲۸ - ۶۴	قلوه‌سنگ کوچک
۰/۰۵۰	۴۰	۶۴ - ۳۲	گراول بسیار بزرگ
۰/۰۴۷	۳۸	۳۲ - ۱۶	گراول بزرگ
۰/۰۴۴	۳۶	۱۶ - ۸	گراول متوسط
۰/۰۴۲	۳۵	۸ - ۴	گراول ریز
۰/۰۳۹	۳۳	۴ - ۲	گراول بسیار ریز
۰/۰۳۸	۳۲	۲ - ۱	ماسه درشت
۰/۰۳۷	۳۱	۱ - ۰	ماسه ریز

رودخانه‌های سینوسی بین ۱/۵ تا ۱/۵ و برای رودخانه‌های پیچان‌رودی بیشتر از ۱/۵ مشخص شد [۱۵].

### تنش برشی لین

ناپایداری کرانه با استفاده از روش‌های زیادی محاسبه می‌شود. یکی از این روش‌ها، تنش برشی بر اساس رابطه لین است، که بر اساس اندازه مؤثر پاره‌سنگ برای پایداری کرانه تحت نیروی برشی  $T_0$  از طریق رابطه ۳ تخمین زده می‌شود.

$$d_m = \frac{\tau_0}{\tau_{*c} \gamma (G-1) \left[ \cos \theta_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta}} \right]} \quad (3)$$

که  $T_0$  تنش برشی به‌کاررفته و  $\tau_{*c}$  عدد شیلدز بحرانی است.  $\gamma$  و  $\gamma_s$  وزن مخصوص سنگ و آب،  $\theta_1$  زاویه شیب بدنه و  $\theta$  زاویه قرار پاره‌سنگ است و برای محاسبه رابطه لین باید مراحل زیر انجام پذیرد.

### 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 به‌شدت متغیر است و به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که عبارت‌اند 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 [۱۳].

### ضریب خمیدگی

همچنین، اندازه ضریب خمیدگی بر اساس مقادیر ذیل یعنی برای رودخانه‌های مستقیم کمتر از ۱/۰۵، برای

در صورتی که فاکتور ایمنی<sup>۱</sup> 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.

$$\cong \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta} 0.047(\gamma_s - \gamma)}} \quad (12)$$

به منظور محاسبه اندازه ذرات پایدار در کرانه مد نظر، باید گام های ششم تا نهم برای اندازه های مختلف پاره سنگ ها آن قدر تکرار شود تا  $SF=1$  به دست آید، که اندازه پاره سنگ پایدار برای سنگ چینی خواهد بود. داده های مورد نیاز این بخش از طریق برداشت میدانی و محیط نرم افزار اتو کد جمع آوری شد. به این منظور، با استفاده از شاخص نقشه برداری و دوربین تئودولیت داده های هندسی و هیدرولیک مقاطع شامل عرض دبی لبالی، متوسط عمق دبی لبالی، شیب کناره، شیب بستر و شعاع هیدرولیک اندازه گیری شده است.

#### یافته ها

متغیرهای مؤثر در فرسایش کرانه رودخانه طالقان شامل شعاع انحنا، عرض دبی لبالی، شیب کناره، 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 به دست آمد (جدول ۲).

پس از مشخص شدن این پارامترها، می توان محاسبات مربوط به معادلات مدل لین را که شامل تنش برشی  $\tau_0$ ، زاویه شیب کناره  $\theta$ ، ضریب پایداری ذره  $\alpha_\theta$ ، زاویه انحراف خطوط جریان  $\lambda$ ، عدد پایداری ذره  $\eta_0$ ، زاویه حرکت ذره بستر  $\beta$  با فرض  $M=N$  و  $\eta_1$  را محاسبه کرد (جدول ۳). همچنین، الگوی رودخانه بر پایه ضریب خمیدگی در مقاطع ۱-۳ از نوع سینوسی و در مقاطع ۴ و ۵ از نوع بیچان رودی بوده است.

گام نخست: شیب طولی رودخانه، که با مطالعات میدانی به دست می آید.

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

$$\tau_0 = \gamma h s \quad (4)$$

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

$$\theta = \tan^{-1}(\sin \theta_0 / \sin \theta_1) \quad (5)$$

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

$$\alpha_\theta = \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0} \quad (6)$$

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

$$\lambda \cong \tan^{-1}\left(\frac{11h}{R}\right) \quad (7)$$

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

$$\eta_0 = \frac{21\tau_0}{(G-1)\gamma d_s} \quad (8)$$

گام هفتم: محاسبه زاویه حرکت ذره بستر  $\beta$  از طریق رابطه ۹:

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\lambda + \theta)}{\left[ \frac{2\sqrt{1 - \alpha_\theta^2}}{\eta_0 \tan \phi} + \sin(\lambda + \phi) \right]} \right\} \quad (9)$$

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

$$\eta_1 = \eta_0 \left[ \frac{1 + \sin(\lambda + \beta + \theta)}{2} \right] \quad (10)$$

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

$$SF = \frac{\alpha_\theta \tan \phi}{\eta_1 \tan \phi + \sqrt{1 - \alpha_\theta^2} \cos \beta} \quad (11)$$

جدول ۲. پارامترهای مؤثر در فرسایش کناره رودخانه طالقان طبق شاخص تنش برشی

پارامتر شیلدز	دبی		زاویه شیب کناره (درجه)		چگالی نسبی ذرات G	قطر ذرات (mm)		ضریب مانینگ	زاویه قرار پاره‌سنگ		متوسط عمق دبی لبالی (متر)	عرض دبی لبالی (متر)	شیب S (درجه)	شعاع انحنا (متر)	ضریب خمیدگی	مقطع عرضی
	R	L	R	L		R	L		R	L						
۰/۰۳۸	۰/۰۳۷	۷/۳۶	۲۳	۱۴	۲/۶۵	۱/۲	۰/۴۸	۰/۱۳	۳۲	۳۱	۱/۲۵	۱۳/۸۵	۰/۰۲۸	۳۰/۵	۱/۲۱	۱
۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۱۴/۶۶	۱۰	۱۳	۲/۶۵	۰/۱۲۰	۰/۱۲۳	۰/۰۹۵	۳۱	۳۱	۱/۲۸	۲۶/۵	۰/۰۲۴	۶۵	۱/۰۹	۲
۰/۰۳۷	۰/۰۳۸	۱۱/۵۸	۱۸	۱۹	۲/۶۵	۰/۴	۱/۳	۰/۱۰۱	۳۱	۳۲	۱/۱۸	۲۴	۰/۰۲۱	۵۴/۳۲	۱/۱۱	۳
۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۱۳/۵	۱۷	۲۵	۲/۶۵	۰/۴۲	۰/۷	۰/۰۷۹	۳۱	۳۱	۰/۶۲	۳۰	۰/۰۱۹	۴۲/۲۸	۱/۰۵	۴
۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۱۷/۳۹	۱۷	۱۶	۲/۶۵	۱/۲۸	۱/۲۹	۰/۰۷۳	۳۲	۳۲	۱/۴۰	۲۹	۰/۰۱۷	۴۴/۳۰	۱/۱۲	۵
۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۱۶/۱۷	۱۹	۱۸	۲/۶۵	۱/۲۶	۱/۲۷	۰/۰۷	۳۲	۳۲	۱/۰۳	۲۴	۰/۰۱۶	۳۸/۲۹	۱/۰۷	۶

جدول ۳. پارامترهای مؤثر در شاخص تنش برشی فرسایش کناره رودخانه طالقان

$\eta_1$	$\beta$	$\eta_0$	$\lambda$	$a_0$	$\theta$	$\tau_0$	کرانه	مقطع عرضی
۱۳۸۵/۴۷	۵۵/۷۶	۱۳۸۵/۴۷	۲۷/۶۰	۰/۹۶	۶/۵۹	۳۹۸/۲۸	چپ	۱
۵۳۹/۶۰	۵۸/۱۸	۵۳۹/۶۰	۲۷/۶۰	۰/۹۲	۴/۰۹	۳۹۸/۲۸	راست	
۴۸۵۸/۰۷	۶۹/۴۷	۴۸۵۸/۰۷	۱۴/۴۲	۰/۹۷	۶/۰۸	۳۵۷/۸۶	چپ	۲
۴۶۴۰/۱۸۶	۶۷/۷۰	۴۶۴۰/۱۸۶	۱۴/۴۲	۰/۹۸	۷/۸۶	۳۵۷/۸۶	راست	
۳۴۷/۸۱	۷۰/۸۵	۳۴۷/۸۱	۱۵/۲۸	۰/۹۴	۳/۶۸	۲۷۸/۱۱	چپ	۳
۱۱۶۰/۹۳	۷۰/۷۷	۱۱۶۰/۹۳	۱۵/۲۸	۰/۹۵	۳/۸۸	۲۷۸/۱۱	راست	
۳۹۵/۶۹	۷۴/۱۹	۳۹۵/۶۹	۱۳/۰۳	۰/۹۰	۲/۵۷	۱۶۵/۸۸	چپ	۴
۶۵۹/۴۹	۷۳/۱۶	۶۵۹/۴۹	۱۳/۰۳	۰/۹۵	۳/۷۱	۱۶۵/۸۸	راست	
۳۴۸/۸۹	۶۳/۹۳	۳۴۸/۸۹	۲۲/۴۰	۰/۹۶	۳/۵۲	۲۷۶/۸۳	چپ	۵
۳۵۱/۶۲	۶۴/۱۳	۳۵۱/۶۲	۲۲/۴۰	۰/۹۵	۳/۳۲	۲۷۶/۸۳	راست	
۲۴۹/۱۵	۶۷/۲۱	۲۴۹/۱۵	۱۹/۶۰	۰/۹۵	۲/۹۶	۱۹۴/۶۳	چپ	۶
۲۵۱/۱۳	۶۷/۳۵	۲۵۱/۱۳	۱۹/۶۰	۰/۹۴	۲/۸۱	۱۹۴/۶۳	راست	

گفت که وقتی ذره ناپایدار می‌شود، در راستای  $\beta$  نسبت به جهت تندترین شیب به راه می‌افتد. اگر  $\beta + \theta = 90$  برای 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 خط‌القعر به راه می‌افتد که در کلیه مقاطع رودخانه طالقان  $\beta + \theta < 90$  است.

پس از محاسبه پارامترهای مؤثر در شاخص تنش برشی فرسایش کناره رودخانه طالقان میزان پایداری کناره، اندازه پاره‌سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره‌سنگ مؤثر برای سنگ‌چینی رودخانه مد نظر برآورد شد (جدول ۴) که برای به دست آمدن اندازه پاره‌سنگ مؤثر، اندازه پاره‌سنگ را در گام‌های ششم تا نهم برای اندازه‌های مختلف پاره‌سنگ آن قدر تکرار شد که  $SF = 1$  به دست آمد (جدول ۴). در مورد چگونگی حرکت ذرات می‌توان

جدول ۴. میزان ضریب پایداری کناره و اندازه پاره‌سنگ مؤثر برای سنگ‌چینی رودخانه طالقان بر اساس شاخص تنش برشی

مقطع عرضی	کناره	ضریب پایداری SF	اندازه پاره‌سنگ در آستانه حرکت (m)	اندازه پاره‌سنگ مؤثر برای سنگ‌چینی (m)
۱	چپ	۰/۰۰۲	۰/۷۵	۱/۰۵
	راست	۰/۰۱۷	۰/۹۵	۱/۸
۲	چپ	۰/۰۰۰۲	۰/۶۶	۰/۹
	راست	۰/۰۰۰۰۱	۰/۵۹	۰/۷
۳	چپ	۰/۰۰۲	۰/۵۷	۰/۸۸
	راست	۰/۰۰۰۰۲	۰/۵۸	۰/۹۴
۴	چپ	۰/۰۰۰۲	۰/۴۸	۰/۹۴
	راست	۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۳	۰/۵
۵	چپ	۰/۰۰۲	۰/۵۲	۰/۸
	راست	۰/۰۰۲	۰/۵۳	۰/۹
۶	چپ	۰/۰۰۳	۰/۳۸	۰/۵۷
	راست	۰/۰۰۳	۰/۴۰	۰/۶

در ساحل قرار دارند و به‌سادگی قابل برداشت نیستند، استفاده می‌شود. در مورد رودخانه طالقان 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 پاره‌سنگ برای برآورد شرایط پایداری کناره استفاده شد. با توجه به ثابت بودن جریان، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار میزان ناپایداری در مقاطع مختلف اندازه ذرات کناره کانال است. به این منظور، پس از به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز، میزان ضریب پایداری کناره، اندازه پاره‌سنگ در آستانه حرکت و اندازه پاره‌سنگ مؤثر برای سنگ‌چینی کناره رودخانه طالقان استان البرز به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که کناره چپ در مقطع ۱، کناره راست در مقطع ۲ و ۳ دارای ضریب پایداری نزدیک به صفر و کناره راست و چپ در مقطع ۵، کرانه چپ در مقطع ۳ دارای ضریب پایداری ۰/۰۰۲ هستند. همچنین، کناره چپ در مقطع ۴ دارای ضریب پایداری ۰/۰۰۰۲ و کناره راست در مقطع ۱ ضریب پایداری ۰/۰۱۷ و کناره چپ در مقطع ۲، ۰/۰۰۰۲ و کناره راست در مقطع ۴ دارای ضریب پایداری ۰/۰۰۱ است. اندازه بزرگ‌ترین سنگی که در آستانه حرکت در مقطع ۱ که در کناره چپ قرار دارد، ۰/۷۵ متر و در کناره راست ۰/۹۵ متر است و کوچک‌ترین آن در مقطع ۴ در کناره چپ قرار دارد، ۰/۴۸ متر و در کناره راست ۰/۳۳ متر است. با توجه به جدول ۴، اندازه پاره‌سنگ

نتایج به‌دست‌آمده از مدل لین در جدول ۴ بیانگر آن است که هر شش مقطع در هر دو کناره در دبی لبالبی ضریب پایداری کمی دارند که نتایج نشان می‌دهد در همه مقاطع فرسایش کناره‌های وجود دارد. در این مدل اندازه پاره‌سنگ 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 به‌دست‌آمده در جدول ۴ نشان می‌دهد اندازه پاره‌سنگ در آستانه حرکت بزرگ‌تر از اندازه رسوبات کناره است که بیانگر ناپایداری در کناره‌هاست. همچنین، در ادامه با توجه به تکرار گام ۶ تا ۹ و تغییر اندازه پاره‌سنگ تا زمانی که ضریب ایمنی مساوی با یک شود، ادامه داده شد که اندازه پاره‌سنگ مناسب برای سنگ‌چینی برای هر یک از کناره به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بزرگ‌ترین سنگ برای سنگ‌چین کناره در مقطع ۱ باید استفاده شود و در مقاطع ۴ و ۶ اندازه‌های کوچک‌تر باید به کار برده شود.

#### نتیجه‌گیری

افزایش فرسایش کناره‌های علاوه بر اینکه موجب افزایش بار رسوب می‌شود، ناپایداری رودخانه و تغییر نوع جریان و الگوی کانال را در پی دارد. راه حل‌های مهندسی متعددی برای تقویت کناره در برابر فرسایش وجود دارد. در روش‌های معمول از پوشش سنگ‌ریزه و یا از پاره‌سنگ‌های بزرگی که



- river restoration efforts, Science.2005:( 308): 636-637.
- [5]. Kwan H, Swanson S. Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California. JAWRA Journal of the American Water Resources Association.2014; 50(6): 1439-1447.
- [6]. Coryat M. 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.2014.
- [7]. Roper B, Buffington J, Archer E, Moyer Ch, Ward M. The role of observer variation in determining rosgen stream types in northeastern Oregon Mountain streams, JAWRA Journal of the American Water resources association. 2008:417-427
- [8]. Hosseinzadeh M, khaleghi S, rostami M. Analysis river bank stability against erosion and management practices. Case Study: Galali River, Kurdistan. Quantitative Geomorphological Research. 2018;6(4):160-171. {persian}
- [9]. Amiri takeldani E, Samadi A, Rahimi H. Effects of position and depth of tensile cracking on river bank stability. Journal of Agricultural Engineering Research. 2005;6(25):78-94. {persian}
- [10]. Mansouri hafshajani M, Shafae bajestan M. Design of Riprap Size at Bridge Abutment in a River Bend. 2011;(4):10. {persian}
- [11]. Layeghi S, karam A. Hydrogeomorphological Classification of Jajrood River with Rosgen Model. Quantitative Geomorphological Research. 2014;3(3):130-143. {persian}
- [12]. 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.
- [13]. Gordon N.D, McMahon T.A, Finlayson BL, Gippel CJ, Nathan R.J. An introduction for ecologists. Stream hydrology. 2004;2.
- [14]. Hosseinzade M, esmaeeli R. River geomorphology (Concepts, Forms and Processes). Tehran: Shahid Beheshti University publication; 2015:338. {persian}
- [15]. Mount J F. California Rivers and Streams-The Conflict between Fluvial Process and Land Use, University of California Press, Berkeley, California. 1995:218-241
- مؤثر در هر یک از ۶ مقطع به دست آمده است که بزرگترین اندازه پاره‌سنگ به مقطع ۱ مربوط می‌شود که در کناره چپ ۱/۰۵ متر و در کناره راست ۱/۸ متر است. همچنین، کوچکترین اندازه پاره‌سنگ مربوط به مقطع ۴ است که در کناره چپ ۰/۵ و در کناره راست ۰/۸ متر است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بیشترین میزان فرسایش در نتیجه آن، کمترین ضریب پایداری، بزرگترین پاره‌سنگ در آستانه حرکت و مؤثر برای سنگ‌چینی مربوط به مقطع ۴ است و کمترین فرسایش کناره‌ای و در نتیجه آن، بیشترین ضریب پایداری و کوچکترین پاره‌سنگ آستانه حرکت و مؤثر برای سنگ‌چینی مربوط به مقطع ۱ است. از دلایل آن می‌توان اندازه ذرات کناره‌ها، شیب بستر و کناره و دلیل اصلی را می‌توان میزان عرض دبی لبالی بیان کرد که در مقطع ۱ کمترین عرض و در مقطع ۴ عریض‌ترین مقطع در دبی لبالی را شاهد هستیم. نتایج تحقیق حاضر نه تنها نشان‌دهنده میزان فرسایش کناره‌ای در مقاطع مختلف است، بلکه اندازه پاره‌سنگ مناسب برای سنگ‌چینی و جلوگیری از فرسایش کناره‌ای را نیز نشان می‌دهد. در پایان، نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهشی که حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) روی رودخانه گلالی قروه با استفاده از مدل لین انجام داده بودند، مقایسه شد. نتایج به دست آمده در یک راستا بودند که نشان می‌دهد مدل لین برای بررسی میزان فرسایش کناره و راهکارهای مدیریتی در رودخانه‌های با دبی کم و کوهستانی مناسب است.

## منابع

- [1]. Bertrand F, and Papanicolaou AN. Effects of Freezing and Thawing Process on Bank Stability, World Environmental and Water Resources Congress, Great Rivers, New Mexico. 2009; 42: 63-74.
- [2]. Tokaldany E A, Darby SE, Tossell P. Coupling Bank Stability and Bed Deformation Models to Predict Equilibrium Bed Topography in River Bends, Journal of Hydraulic Engineering. 2007; 133(10): 1167-1170.
- [3]. Ostadi F, Majdzade tabatabaee M, Alimohamadi A. Optimization Modeling of Spurdikes Dimensions by considering its Role on River Morphological Stabilization. 2014;9(4):55-72. {persian}
- [4]. Bernhardt ES, Palmer MA, Allan JD, Alexander G, Barnas K, Brooks S, et al. Synthesizing U. S.