

## تحلیل هیدرولوژیک پایداری بستر رودخانه مسیل موچان آستانه - استان مرکزی

محمد مهدی حسین زاده<sup>۱\*</sup>، پروین غلامی<sup>۲</sup>

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

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۶/۲۰)

## چکیده

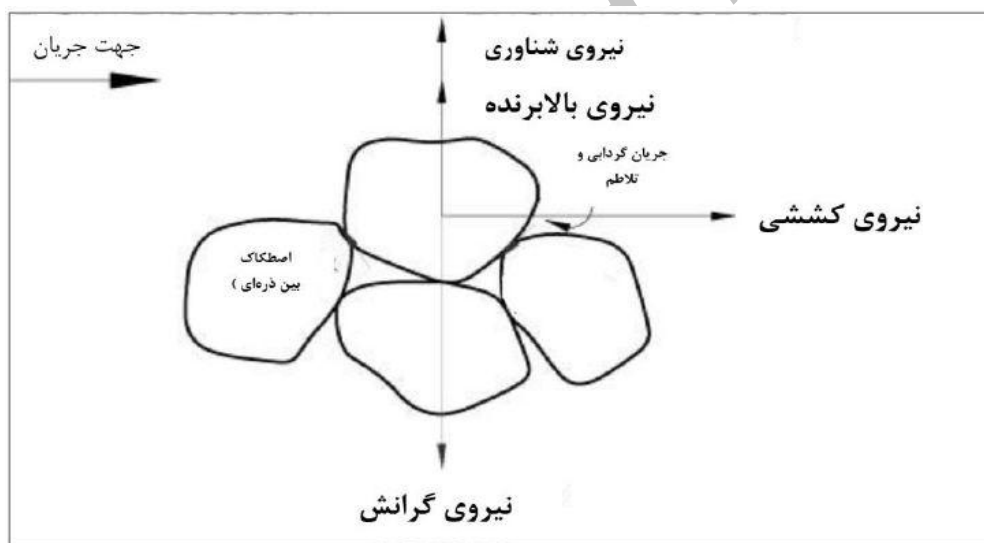
رودخانه یک پدیدهٔ دینامیک است که مدام تغییر می‌کند. برآورد مقاومت ذرات رسوبی در مقابل فرسایش سبب شناسایی نقاط پایدار و ناپایدار در مناطق مختلف بستر رود خواهد شد. منطقهٔ مطالعه شده رودخانهٔ مسیل موچان در شهرستان آستانه است. این تحقیق با هدف بررسی آستانهٔ حرکت فرسایش و رسوب‌گذاری ذرات و پایداری رسوبات در چهار مقطع از بستر این رودخانه بررسی شد. در ادامه، به منظور بررسی تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی، چهار اندازهٔ ذره با قطر  $D_{16}$ ،  $D_{50}$ ،  $D_{84}$  و  $D_{95}$  در همهٔ مقاطع محاسبه شد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد در زمان دبی لبالی مقاطع عرضی شماره ۲ و ۴، همهٔ ذرات با اندازه‌های  $D_{16}$ ،  $D_{50}$ ،  $D_{84}$  و  $D_{95}$  شروع به حرکت می‌کنند و بنابراین در دبی لبالی شرایط رسوبی بستر رودخانه تغییر خواهد کرد. در مقاطع عرضی شماره ۱ و ۳ ذرات با قطر  $D_{84}$ ،  $D_{95}$  و بیشتر از آنها در بستر رودخانه پایدار خواهند ماند و سایر ذرات کوچک‌تر از این اندازه شروع به حرکت می‌کنند. وجود شیب بیشتر بستر در مقاطع عرضی شماره ۲ و ۴ نسبت به بالادست سبب شده که همهٔ ذرات بررسی شده ناپایدار باشند. در نهایت، نتایج به دست آمده از هر دو روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی همبستگی زیادی با یکدیگر دارند و این خود تأییدی بر صحت استفاده از این روش‌ها (تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی) برای مطالعات پایداری سایر رودخانه‌هاست.

**کلیدواژگان:** آستانهٔ حرکت ذرات رسوبی، پایداری بستر، تنش برشی واحد، دبی واحد بحرانی، رودخانهٔ مسیل موچان.

## مقدمه

رودخانه یک پدیده دینامیک است که مدام در حال تغییر و جابه‌جایی است. فرسایش و رسوب‌گذاری از پدیده‌های رایج در رودخانه‌هاست. برای بررسی رفتار رودخانه و پیش‌بینی تغییرات احتمالی آینده، شناخت این پدیده اهمیت دارد. درک درست از انتقال رسوب و حساسیت کانال به فرسایش یا رسوب در مدیریت فرایندهای رودخانه‌ای ضروری است [۱]. یکی از مسائل و مشکلاتی که در زمینه بهره‌برداری از منابع آبی اهمیت خاصی دارد، مسئله حرکت رسوب است. تولید رسوب رودخانه سبب کدورت آب، مشکلات مواد مغذی و آلودگی‌های آب، انحراف آب و همچنین پرشدن دریاچه‌های ذخیره آب می‌شود. بررسی و برآورد مقاومت ذرات رسوبی در مقابل فرسایش سبب شناسایی نقاط پایدار و ناپایدار در مناطق مختلف بستر رود خواهد شد. ناپایداری مجرا و سواحل

رودخانه نه تنها موجب خسارت به اراضی مستعد کشاورزی و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه می‌شود، بلکه رسوبات حاصل از فرسایش در برخی مواقع درخور توجهی از مجموع کل رسوبات انتقالی توسط جریان رودخانه را شامل می‌شوند. ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه به دلیل تأثیرگذاری بر میزان فرسایش و خصوصیات مجاری رودخانه‌ها در توسعه پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب نیز اهمیت دارد [۲]. یک ذره، در بستر یک جریان زمانی شروع به حرکت می‌کند که نیروی کششی و نیروی هیدرولیکی بالابرنده ایجاد شده توسط جریان بیشتر از نیروهای مقاومت ذره شوند. طرح‌های مدیریتی اخیر برای ارزیابی فرایندهای ژئومورفولوژیک با هدف طراحی مناسب و پیشنهاد راه‌حل‌های مؤثر ارائه می‌شود [۳ و ۴]. نیروهای مقاومت شامل نیروی گرانش، نیروی وزن مستغرق ذره و نیروی اصطکاک بین ذره‌ای است (شکل ۱).



شکل ۱. کنش بین نیروهای کششی و بالابرنده، نیروی شناورسازی و نیروهای مقاومت ذره (اصطکاک بین ذره‌ای، نیروی گرانش) طرح اصلاح‌شده توسط کینگتون [۵]

حمل رسوب مهم است. منحنی اولیه میانگین سرعت بحرانی که توسط ژولستروم<sup>۳</sup>، جغرافی‌دان سوئدی (۱۹۳۵)، مطرح شده است، نشان می‌دهد ذرات ماسه‌ای با قطر ۰/۲ تا ۰/۷ میلی‌متر سرعت اولیه کمتری را برای حمل نیاز دارند و ذرات بزرگ‌تر از این اندازه، سرعت آستانه بیشتری برای حرکت اولیه نیاز دارند، اما ذرات کوچک‌تر از این اندازه مانند

آستانه حرکت اولیه ذرات رسوبی را می‌توان با دو تئوری میانگین سرعت بحرانی جریان<sup>۱</sup> و تئوری تنش برشی بحرانی<sup>۲</sup> بستر مشخص کرد [۶]، روش میانگین سرعت جریان یک روش غیرمستقیم است، زیرا در این روش میانگین سرعت در مقطع عرضی در نظر گرفته شده است، در حالی که شرایط هیدرولیک نزدیک بستر کانال برای

1. critical mean flow velocity  
2. critical shear stress

3. Hjultstrom

شیلدز وجود داشت، پژوهشی را در زمینه آستانه حرکت ذرات رسوب بر اساس سرعت سقوط ذرات انجام دادند. در پژوهش ایشان، عملکرد روش‌های مختلف پیش‌بینی شروع حرکت ذرات در بسترهای هموار، ارزیابی شد. در پژوهش یادشده با ارائه رابطه‌ای ساده بر مبنای عدد حرکت‌پذیری و قطر بی‌بعد ذره سعی در تشریح سرعت برشی بحرانی برای آغاز حرکت رسوب شد. یمانی و همکارانش [۱۴] با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat سنجنده OLI و TM به بررسی تغییرات زمانی و مکانی بستر رودخانه ارس در بازه زمانی ۱۳۶۶-۱۳۹۲ و از تصاویر ماهواره TRS سنجنده P5 هم برای تفسیر دقیق‌تر عوارض کناره‌های رودخانه استفاده کردند. نتیجه به‌دست‌آمده از پژوهش نشان داد در جابه‌جایی عرضی رودخانه ارس بیشتر در قسمت پایین دست بازه انتخابی اتفاق افتاده است، که پایین بودن شیب رودخانه و همچنین جریان رودخانه روی بستر آبرفتی جوان فرسایش‌پذیر از مهم‌ترین عوامل تغییرات عرضی این رودخانه بوده است. فولادفر و همکارانش [۱۵] در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی تنش برشی بحرانی برای فرسایش سطحی بستر چسبنده پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تنش برشی حساسیت زیادی نسبت به متغیر بعد فرکتالی دارد و نیز هر چه بعد فرکتالی کمتر باشد، تغییرات تنش برشی بحرانی برای فرسایش نسبت به تغییرات غلظت حجمی کمتر خواهد بود. رضایی مقدم و همکارانش [۱۶] در پژوهشی وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل‌اوزن را با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی تحلیل کرده‌اند. پژوهش آنها نشان داده است روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، تنها در مجراهای آبرفتی اهمیت دارد و به نتایج آنها می‌توان استناد کرد.

در مطالعه حاضر با هدف بررسی حرکت ذرات در بستر رودخانه مسیل‌موچان، علاوه بر استفاده از روش تنش برشی اصلاح‌شده، از روش دبی واحد بحرانی نیز استفاده می‌شود. علت استفاده از روش دبی واحد بحرانی این است که در بازه مطالعه‌شده در همه مقاطع عرضی برداشت‌شده شیب بستر بیشتر از ۱ درصد (۰/۰۱ متر بر متر) است. پس از بررسی پایداری ذرات بستر رودخانه در هر دو روش، نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش با هم مقایسه می‌شوند.

ماسه ریز، سیلت و رس نیز سرعت بیشتری نسبت به ماسه برای حمل نیاز دارند. علت آن چسبندگی بین ذرات در این اندازه و همچنین قرارگرفتن این اندازه ذرات در زیر لایه خطی جریان است. در این لایه نیروی کششی ذرات کمتر است و ذرات در معرض نیروهای بلندکننده جریان آشفته قرار نمی‌گیرند [۷]. روش تنش برشی که توسط آلبرت شیلدز در سال ۱۹۳۶ ارائه شده است، تنش برشی بستر را به صورت یک عدد بی‌بعد با عنوان پارامتر بی‌بعد شیلدز<sup>۱</sup> بیان می‌شود. تنش برشی بحرانی بستر با اندازه ذرات افزایش می‌یابد و به ناهمواری نیز بستگی دارد. معادله شیلدز برای کانال‌های با بستر غیریکنواخت توسط کومار [۸] کومار و کارلینگ [۹] اصلاح شد. معادله اصلاح‌شده براساس رابطه بین اندازه ذره تحلیل‌شده و  $D_{50}$  بیان می‌شود. باترست [۱۰] برای کانال‌های با گرادبان بیشتر از یک درصد، جایی که نسبت عمق جریان به اندازه ذرات کمتر است (غوطه‌وری نسبی:  $R/D_{50}$  کمتر از ۱۰) پیشنهاد استفاده از دبی در واحد عرض به جای تنش برشی مرزی را برای تعیین حرکت ذرات می‌دهد.

در پژوهش‌های مختلف انجام‌شده در زمینه حرکت رسوب، از روش تنش برشی مرزی برای جریان‌های درون کانال فعال استفاده شده است. بیزی و لرنر [۱] فرایند فرسایش و رسوب با استفاده از شاخص قدرت رود به عنوان شاخص حساسیت کانال را بررسی کرده‌اند که در پایان منطقه مطالعه‌شده را بر اساس تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی<sup>۲</sup> به چهار کلاس فرسایشی طبقه‌بندی کرده‌اند.

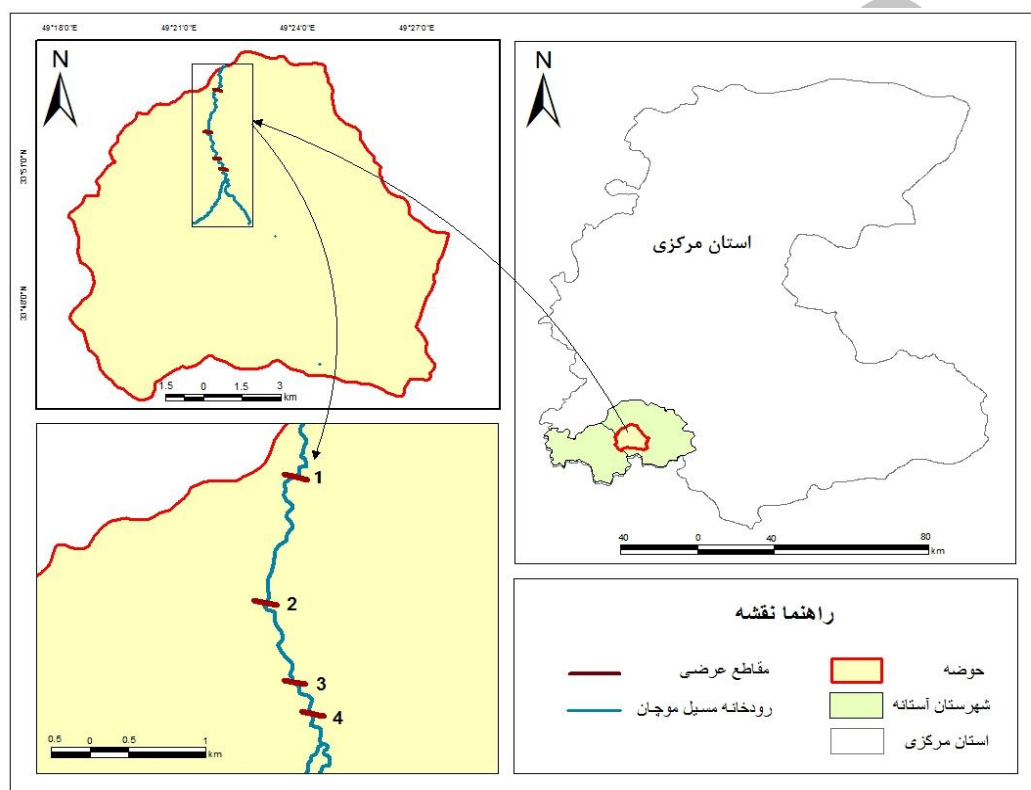
کورت [۱۱] برای پیش‌بینی فرسایش و پایداری کرانه رودخانه در استونی کلوو کریک در کت اسکیلز پرداخته است. این مطالعه نشان داد نتایج به‌دست‌آمده از طریق روش BANCS ممکن است به بهبود مدیریت آینده حوضه استونی کلوو منجر شود. نظری و حیدری [۱۲] با استفاده از مدل آزمایشگاهی، آستانه حرکت ذرات رسوبی یکنواخت را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد شروع حرکت ذرات رسوبی نه تنها به اندازه ذرات رسوب وابسته است بلکه به نسبت عمق جریان به قطر ذرات نیز بستگی دارد. جهانشاهی و همکارانش [۱۳] به دلیل ایرادی که در نمودار

1. Shields parameter  
2. critical unit discharge

## مواد و روش‌ها

**منطقه مطالعه شده:** منطقه مطالعه شده بازه‌ای از رودخانه مسیل موچان به طول ۵/۶۵ کیلومتر است. این رودخانه با دبی متوسط ۰/۲۳ مترمکعب بر ثانیه و با دبی رسوب ۰/۷۶ مترمکعب در روز است. رودخانه مسیل موچان یکی از سرچشمه‌های رودخانه شرا است که خود شاخه اصلی رودخانه قره‌چای به حساب می‌آید. رودخانه مسیل موچان از ارتفاعات شمال و شرق روستای عمارت سرچشمه می‌گیرد و سرانجام به دریاچه نمک منتهی می‌شود. از آب

این رودخانه برای آبیاری زمین‌های کشاورزی روستاهای عمارت، بازنه، قلعه و هفته استفاده می‌شود. رودخانه مسیل موچان با موقعیت جغرافیایی  $33^{\circ}52'53''$  و  $49^{\circ}22'05''$  طول شرقی در شمالی در محدوده سیاسی شهرستان آستانه در استان مرکزی واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه، براساس داده‌های ایستگاه عمارت (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مطالعه شده)،  $511/2$  میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن  $14/34$  درجه سانتی‌گراد است (شکل ۲).



شکل ۲. محدوده مطالعه شده در استان مرکزی

## روش کار

در این پژوهش از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی برای بررسی تحرک و پایداری ذرات بستر رودخانه مسیل موچان استفاده شد. به این منظور، ۴ مقطع عرضی در بازه مد نظر انتخاب شد و با استفاده از متر لیزری، اقدام به نقشه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترهای هندسی مقاطع شد و براساس داده‌های یادشده نیمرخ مقاطع ترسیم شد. برای بررسی اندازه رسوباتی که بیشترین فراوانی را دارند از روش شمارش پبل (ریگ) استفاده شد که به‌وسیله

ولمن در سال ۱۹۵۲ ارائه شده است [۶]. در این روش ۱۲۵ ذره به صورت اتفاقی انتخاب شده و قطر متوسط (d) آنها اندازه‌گیری شد. سپس، داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه ذرات به صورت نمودار تجمعی ترسیم شد و براساس نمودار ترسیمی، اندازه ذرات  $D_{50}$  (اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند)، اندازه ذرات  $D_{95}$  (اندازه ذراتی که ۹۵ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند)،  $D_{84}$  (اندازه ذراتی که ۸۴ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند) و  $D_{16}$  (اندازه

استفاده از رابطه ۳ دبی واحد بحرانی برای ذرات  $D_{50}$  محاسبه می‌شود:

$$q_{cD_{50}} = \frac{0.15g^{-0.5}D^{1.5}}{S^{1/2}} \quad (3)$$

که در آن  $q_{cD_{50}}$  دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات  $D_{50}$  ( $m^2/s$ )،  $D_{50}$  معادل قطر میانه ذرات (m)،  $g$  شتاب ثقل ( $9.8m/s^2$ ) و  $s$  شیب بستر (m/m) هستند. باترست [۹] برای محاسبه دبی واحد بحرانی برای آغاز حرکت ذرات در اندازه‌های مختلف رابطه ۴ را ارائه کرد:

$$q_{ci} = q_{cD_{50}} \left( D_i / D_{50} \right)^b \quad (4)$$

که در آن  $q_{ci}$  دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات در اندازه مد نظر ( $m^2/s$ )،  $q_{cD_{50}}$  دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات  $D_{50}$  ( $m^2/s$ )،  $D_i$  اندازه ذره مد نظر و  $D_{50}$  معادل قطر میانه ذرات (m) است. توان  $b$  دامنه‌ای از اندازه ذراتی است که ترکیب بستر کانال را تشکیل می‌دهند. با وارد کردن توان  $b$  در محاسبات، تأثیر اندازه ذرات کوچک‌تر مخفی در پناه ذرات بزرگ‌تر نیز در محاسبات وارد می‌شود. توان  $b$  از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$b = 1/5 \left( D_{84} / D_{16} \right) \quad (5)$$

که در آن  $D_{84}$  اندازه ۸۴ درصد اندازه ذرات و  $D_{16}$  اندازه ۱۶ درصد ذرات است.

برای بازه مطالعه شده پس از اینکه مشخص شد نسبت  $R/D_{50}$  کمتر از ۱۰ است، برای محاسبه دبی واحد بحرانی از روش، باترست [۹]، مراحل زیر اجرا شده است:

۱. ابتدا با استفاده از رابطه ۳ دبی واحد بحرانی با استفاده از قطر ذرات  $D_{50}$  و شیب بستر محاسبه شد.
۲. و  $D_{95}$  محاسبه شود.

در نهایت، دبی واحد درون کانال در هر مقطع با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد و برای تعیین کردن اینکه آیا ذرات مد نظر در دبی واحد درون کانال حرکت خواهند کرد یا نه، دبی واحد بحرانی ذره مد نظر با دبی واحد درون کانال فعال ( $q$ ) مقایسه شد. در صورتی که دبی واحد بحرانی ذره ( $q_{ci}$ ) کمتر از دبی واحد درون کانال فعال ( $q$ ) باشد، ذره ناپایدار می‌شود و حرکت خواهد کرد. اگر دبی واحد بحرانی ذره ( $q_{ci}$ ) بیش از دبی واحد ( $q$ ) اعمال شده روی ذره باشد، ذره حرکت نخواهد کرد.

$$q = Q/w \quad (6)$$

در این رابطه  $q$  دبی واحد درون کانال (دبی در واحد

ذراتی که ۱۶ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند) رسوبات در مقاطع انتخاب شده به دست آمد.

به منظور تحلیل داده‌ها، با استفاده از معادله اصلاح شده تنش برشی بحرانی، تنش برشی بحرانی برای ذرات  $D_{50}$ ،  $D_{16}$ ،  $D_{95}$ ،  $D_{84}$  محاسبه شد. علت انتخاب این ذرات برای آنالیز یادشده است که  $D_{95}$ ،  $D_{84}$  ذرات تعیین کننده هستند، زیرا زمانی که شروع به حرکت می‌کنند این حرکت نشان دهنده حرکت بیشتر اجزاء بستر است و در واقع شروع تغییر در ساختار بستر را نشان می‌دهند.  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات است و متوسط تنش برشی را نشان می‌دهد و همچنین اندازه این ذرات برای بیشتر محاسبات لازم است. اندازه  $D_{16}$  نیز در بسترهای نسبتاً پایدار اهمیت دارد.

معادله تنش برشی بحرانی اصلاح شده، کومار و کارلینگ [۸] و کومار [۷] براساس رابطه بین اندازه ذره آنالیز شده و  $D_{50}$  رسوبات بستر به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\tau_{ci} = \tau_{D_{50}} (\gamma_s - \gamma) D_i^{1/2} D_{50}^{-1/2} \quad (1)$$

که در آن  $\tau_{ci}$  تنش برشی بحرانی برای ذره مد نظر  $D_{50}$  ( $N/m^2$ )، پارامتر بی بعد شیلدز برای ذرات  $D_{50}$  (از جدول شیلدز به دست می‌آید)،  $\gamma_s$  وزن مخصوص رسوب،  $\gamma$  وزن مخصوص آب،  $D_i$  اندازه ذره آنالیز شده (m)،  $D_{50}$  معادل قطر میانه ذرات (m) است.

بعد از محاسبه تنش برشی بحرانی برای هر چهار اندازه ذرات، تنش برشی بحرانی در دبی لبالی ( $\tau_{bf}$ ) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\tau_{bf} = gRS \quad (2)$$

$\tau_{bf}$  تنش برشی بحرانی در عرض دبی لبالی ( $N/m^2$ )،  $R$  شعاع هیدرولیک (m)،  $S$  شیب بستر رودخانه (m/m) و  $g$  وزن مخصوص آب است. بر اساس نتایج در صورتی که تنش برشی بحرانی برای ذره مد نظر بیشتر از تنش برشی در دبی لبالی باشد، ذره مد نظر پایدار خواهد بود و در صورتی که کوچک‌تر باشد، ذره در دبی لبالی در داخل کانال جابه‌جا می‌شود و ناپایداری بستر را به دنبال دارد.

برای کانال‌هایی می‌توان از روش پیش‌بینی دبی واحد بحرانی مورد نیاز برای آغاز حرکت ذرات استفاده کرد که شیب بستر آنها بیشتر از یک درصد (۰/۰۱ متر بر متر) و نسبت عمق جریان به اندازه ذرات کمتر ۱۰ است (غوطه‌وری نسبی:  $R/D_{50}$  کمتر از ۱۰). بر این اساس با

نیز محاسبه شد. برای این مطالعه متغیرهای مورد نیاز برای تعیین دبی واحد بحرانی و تنش برشی بحرانی در دو مقطع عرضی در این بازه برداشت شد (جدول ۱).

#### تنش برشی بحرانی

با استفاده از رابطه ۱ تنش برشی بحرانی برای سه اندازه ذره کلیدی محاسبه شد (جدول ۲). مقدار تنش برشی ذرات با قطر  $D_{50}$  که برای محاسبات اولیه لازم بود از جدول پارامتر شیلدز محاسبه شد. همچنین، تنش برشی کانال در حالت دبی لبالبی نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است.

عرض ( $m^2/s$ )،  $Q$  دبی حداکثر لحظه‌ای رودخانه ( $m^2/s$ ) و  $W$  عرض کانال فعال ( $m$ ) در مقطع عرضی مد نظر است. دبی حداکثر لحظه‌ای رودخانه با استفاده از آمار ایستگاه هیدرومتری عمارت تهیه شد.

#### نتایج و بحث

پس از تعیین نسبت  $R/D_{50}$ ، مشخص شد مناسب‌ترین روش برای آنالیز تحرک و پایداری ذرات بستر رودخانه مسیل موجان در بازه مد نظر روش دبی واحد بحرانی است. علاوه بر این روش، با استفاده از معادله تنش برشی بحرانی، میزان تنش برشی بحرانی برای ذرات در چهار اندازه مختلف

جدول ۱. پارامترهای اندازه‌گیری شده در مقاطع عرضی رودخانه مسیل موجان

شماره مقطع	شیب بستر (m/m)	عمق جریان (m)	عرض کانال فعال (m)	$D_{16}(m)$	$D_{50}(m)$	$D_{86}(m)$	$D_{95}(m)$	$R/D_{50}$
۱	۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۹۷	۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۶۴	۹/۵۴
۲	۰/۰۱	۰/۲۲	۱/۳۴	۰/۰۱۴	۰/۰۳۲	۰/۰۴۵	۰/۰۹	۹/۵۶
۳	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۶۴	۰/۰۹	۶/۴
۴	۰/۰۶	۰/۴۷	۱/۳۷	۰/۰۱۲	۰/۰۴۹	۰/۰۶۴	۰/۱۸	۹/۵۹

جدول ۲. تنش برشی محاسبه شده برای اندازه‌های مختلف ذرات در مقاطع عرضی رودخانه مسیل موجان

شماره مقطع	$\tau_{D16}(N/m^2)$	$\tau_{D84}(N/m^2)$	$\tau_{D95}(N/m^2)$	$\tau_{bf}(N/m^2)$
۱	۱۴/۹	۱۸/۸۸	۲۳/۰۳	۳۳/۹۲
۲	۱۵/۰۶	۲۱/۷۳	۲۶/۳۲	۲۰/۳۱
۳	۱۷/۲۱	۲۵/۱۸	۲۷/۹	۱۹/۱۲
۴	۲۴/۴۱	۴۰/۳۴	۵۵/۰۲	۴۴/۷۳

$D_{84}$  است، بنابراین در وضعیت دبی لبالبی، ذرات یادشده حرکت خواهند کرد. تنش برشی ایجادشده توسط دبی لبالبی این مقطع عرضی از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه  $D_{95}$  کمتر است، بنابراین در وضعیت دبی لبالبی، ذرات با اندازه  $D_{95}$  و بزرگ‌تر از آن پایدار خواهند بود.

#### دبی واحد بحرانی

در ادامه، به منظور محاسبه دبی واحد بحرانی با استفاده از روابط ۳ تا ۶، مقادیر  $q_{cd50}$ ،  $q_{cd16}$ ،  $q_{cd84}$ ،  $q_{cd95}$  و  $q$  محاسبه شد (جدول ۳).

همان طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، در مقطع عرضی ۱ تنش برشی بحرانی ایجادشده توسط دبی لبالبی از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با قطر  $D_{16}$ ،  $D_{84}$  و  $D_{95}$  بیشتر است. بنابراین، همه ذرات دارای این اندازه‌ها یا کوچک‌تر از آن در دبی لبالبی این مقطع حرکت خواهند کرد. در مقاطع عرضی ۲ و ۳ تنش برشی ایجادشده توسط دبی لبالبی این مقطع‌های عرضی از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه  $D_{84}$ ،  $D_{95}$  کمتر است، بنابراین در دبی لبالبی ذرات با اندازه  $D_{95}$  و  $D_{84}$  بزرگ‌تر از آن پایدار خواهند بود. در مقطع عرضی ۴ تنش برشی ایجادشده توسط دبی لبالبی رودخانه بیشتر از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با قطر  $D_{16}$  و

جدول ۳. دبی واحد بحرانی محاسبه‌شده برای اندازه‌های مختلف ذرات در مقاطع عرضی رودخانه مسیل‌موچان

شماره مقطع	$Q(m^3/s)$	$q_{cd16}(m^3/s)$	$q_{cd50}(m^3/s)$	$q_{cd84}(m^3/s)$	$q_{cd95}(m^3/s)$
۱	۰/۰۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵
۲	۰/۲۴	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۳۱	۰/۰۴۳
۳	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳
۴	۰/۰۲۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱۳

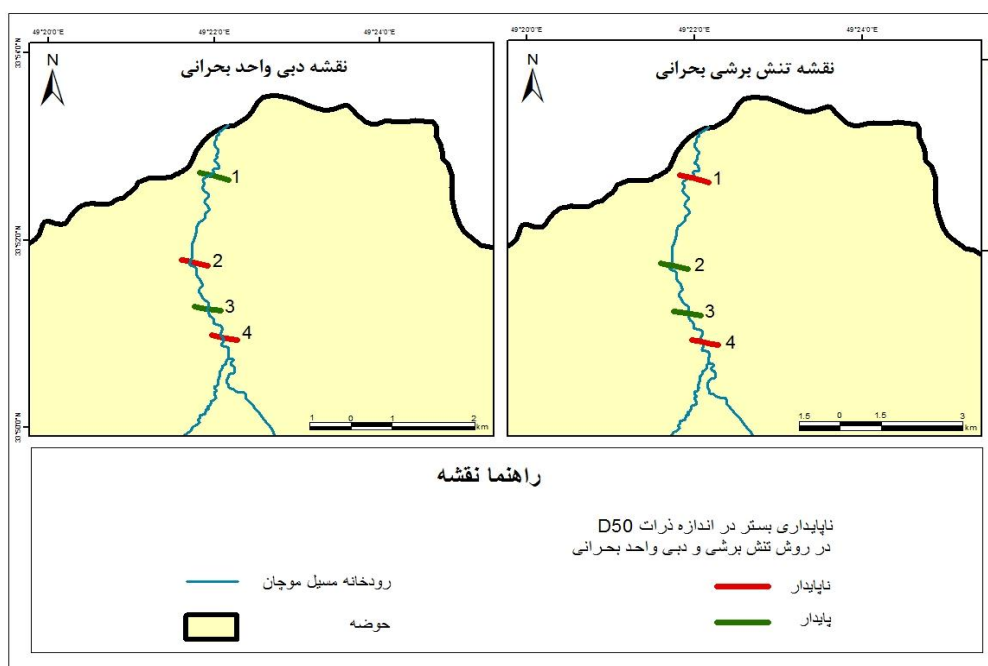
توسط ذرات با اندازه بزرگ‌تر شکل می‌گیرد و رسوبات با اندازه کوچک‌تر را در برابر شروع حرکت و انتقال رسوب محافظت می‌کند [۱۷]. تفاوت مقاطع ۲ و ۴ (مقاطع ناپایدار) و مقاطع ۱ و ۳ (مقاطع پایدار) در عرض کانال است که عرض کانال روی قدرت مخصوص و همچنین با وجود ثابت‌بودن جریان، براساس اصل پیوستگی جریان در این مقاطع (مقاطع ۲ و ۴) به دلیل کاهش عرض جریان در این مقاطع (مقاطع ۲ و ۴) سبب شده است که افزایش سرعت جریان را در این مقاطع داشته باشیم. بنابراین، یکی از علل تفاوت پایداری و ناپایداری در حرکت ذرات در این چهار مقطع می‌تواند ناشی از مورفومتری کانال باشد که در مقاطع ۲ و ۴ با کم‌تر شدن عرض کانال، سرعت جریان افزایش یافته است و ناپایداری همه ذرات را در پی داشته است. همچنین، براساس رابطه برنولی با کاهش عرض کانال، سرعت جریان افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت، فشار آب روی ذرات بستر کاهش می‌یابد، که همین عامل سبب می‌شود که ذرات حالت شناوری پیدا کنند و در نتیجه ذرات راحت‌تر انتقال می‌یابند.

#### نتیجه‌گیری

درک حرکت رسوب و حساسیت کانال نسبت به فرسایش یا رسوب‌گذاری، ضرورتی مهم برای مدیریت رودخانه است. روش‌های متفاوتی برای تعیین آستانه حرکت ذرات رسوبی بستر رودخانه توسط محققان ارائه شده است از جمله این روش‌ها روش تنش برشی بحرانی و روش واحد بحرانی است که در این مقاله به این دو روش پرداخته شده است. متأسفانه، تلاش برای محاسبه یا اندازه‌گیری مقادیر تنش برشی در رودخانه‌ها، به صورت پیچیده‌ای توسط زبری بستر کانال و نوسانات سرعت و آشفتگی جریان تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۸]. با این حال، هنوز هم یکی از روش‌های دقیق برآورد آستانه

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در مقاطع ۱ و ۳ دبی واحد بحرانی در حالت لبالی در عرض رودخانه در مقایسه با دبی واحد بحرانی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه‌های  $D_{16}$  و  $D_{50}$  بیشتر است. در این مقطع عرضی، دبی بحرانی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه  $D_{84}$ ،  $D_{95}$  و بزرگ‌تر از آنها، بیشتر از دبی واحد بحرانی در عرض مقطع است و در شرایط دبی لبالی این ذرات پایدار خواهند ماند و حرکت نمی‌کنند. در مقاطع عرضی ۲ و ۴، دبی واحد بحرانی لبالی در عرض رودخانه در مقایسه با دبی واحد بحرانی لازم برای حرکت همه ذرات بررسی‌شده (اندازه‌های  $D_{16}$ ،  $D_{50}$ ،  $D_{84}$  و  $D_{95}$ ) بیشتر است. بنابراین، ذراتی که اندازه آنها مساوی یا کمتر از این اندازه‌ها باشد، در بستر رودخانه پایدار نخواهند ماند و در دبی واحد بحرانی لبالی رودخانه حرکت می‌کنند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مقطع‌های ۱ و ۳ نسبت به سایر مقاطع پایداری بیشتری دارند. پارامتر شیب یکی از پارامترهای مهم در پایداری ذرات است. همان‌طور که خزیمه‌نژاد و همکارانش [۱۷] مشخص کردند، با افزایش شیب بستر کانال و پارامتر اندازه ذره، پارامتر پایداری ذره کاهش می‌یابد. به بیانی، رسوبات با سرعت کمتری از جریان در آستانه حرکت قرار می‌گیرند، به گونه‌ای که با افزایش شیب کانال از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۰۲ برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به طور متوسط ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. در مقاطع ۲ و ۴ با توجه به افزایش شیب بستر کانال نسبت به بالادست، پایداری ذرات به میزان درخور توجهی کاهش یافته است، که این خود عاملی است برای حرکت ذرات در این مقاطع با سرعت جریان کمتر نسبت به مقاطع ۱ و ۳ است. در حقیقت، هرچه توزیع اندازه ذرات غیریکنواخت‌تر شود، رسوبات در سرعت جریان بیشتری در آستانه حرکت قرار می‌گیرند که یکی از دلایل اصلی، لایه آرمورینگ (لایه سپری) است که



شکل ۳. نقشه تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی رودخانه مسیل موچان

ذرات غیریکنواخت تر شود، رسوبات در سرعت جریان بیشتری در آستانه حرکت قرار می گیرند که یکی از دلایل اصلی، لایه آرمرینگ (لایه سپری) است که توسط ذرات با اندازه بزرگ تر شکل گرفته و رسوبات با اندازه کوچک تر را در برابر شروع حرکت و انتقال رسوب محافظت می کند [۱۷]. در نتیجه، همین پارامتر سبب می شود که در حالت دبی لبالی مقدار کمی از رسوبات جابه جا شوند. می توان بیان کرد که توزیع اندازه رسوبات بستر، عامل اصلی ناپایداری و تغییر کانال رودخانه مسیل موچان نیست. پوشش گیاهی کناره ای رودخانه ها در مناطق نیمه خشک از نوع گیاهان فصلی و علفزار است، که این نوع پوشش گیاهی تأثیر بسزایی در پایداری و یا ناپایداری کانال رودخانه ها ندارند. در رودخانه مطالعه شده نیز همه مقاطع دارای پوشش گیاهی فصلی و در برخی از مقاطع دارای نیزار هستند که این پوشش نمی تواند تأثیر بسزایی در تفاوت ناپایداری در مقاطع مختلف داشته باشد. از مهم ترین فاکتورهای ایجادکننده ناپایداری در رودخانه مسیل موچان می توان به شیب بستر، عمق جریان و عرض کانال و شیب کناره اشاره کرد. این پارامترها روی سایر عوامل تعیین کننده فرساینده رودخانه از جمله شعاع هیدرولیک، محیط خیس، تنش برشی بحرانی، تنش برشی مرزی، سرعت جریان و... تأثیر گذاشته و سبب شده اند که

حرکت ذرات رسوبی بستر رودخانه است [۱۹]. برای بررسی تحرک ذرات بستر رودخانه مسیل موچان چهار مقطع عرضی در بازه مد نظر انتخاب شد و پارامترهای مورد نیاز برای برآورد تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی در هر چهار مقطع استخراج شد. در این مقاطع تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی برای شروع حرکت چهار اندازه کلیدی از ذرات محاسبه شد و با تنش برشی ایجاد شده توسط دبی لبالی و دبی بحرانی در شرایط دبی لبالی در واحد عرض کانال مقایسه شد. نتایج نشان داد در مقاطع عرضی ۲ و ۴ همه ذرات ناپایدارند و در حالت دبی لبالی حرکت خواهند کرد، که یکی از دلایل اصلی این ناپایداری ذرات در این مقاطع، افزایش شیب بستر کانال نسبت به بالادست خود است. در مقطع های ۱ و ۳ ذرات فقط  $D_{50}$  و  $D_{16}$  در حالت دبی لبالی ناپایدارند و حرکت می کنند و این دو مقطع نسبت به سایر مقاطع پایداری بیشتری دارد زیرا رودخانه های مناطق خشک و نیمه خشک مانند رودخانه مسیل موچان تحت تأثیر سیلاب های ناگهانی (سیلاب های نادر) هستند. ذرات درشت تر در زمان وقوع این سیلاب ها جابه جا می شوند. در حالی که در دبی لبالی رودخانه ها، رسوبات ریزتر جابه جا می شوند و رسوبات درشت تر باقی می ماند. همه مقاطع، توزیع غیریکنواخت ذرات دارند. در حقیقت، هرچه توزیع اندازه



- [11]. Coryat, M. Analysis of the Bank Assessment for Non-point Source consequences of Sediment (BANCS) Approach for the Prediction of Stream bank Stability and Erosion along and deformation models to predict equilibrium bad topography in river bends. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014; 133(10): 1167-1170.
- [12]. Nazari A, Heidari, M.M. The threshold of uniform sediment movement. Eighth Hydraulic Conference of Iran, Tehran. Faculty of Engineering, University of Tehran. 2009. [Persian].
- [13]. Jahanshahi M, Stability I, Qamshi M. Investigate the threshold of motion of particle particles based on the particle velocity. Second National Conference on Integrated Water Resources Management. Shahid Bahonar University. Kerman. 2011. [Persian].
- [14]. Yamani M, Rahimi M, Visi A. The morphometry and comparison of the transitions of the Arus river during the last three decades. *Quantitative geomorphological research*. 2015; 3(4): 74-89. [Persian].
- [15]. Fouladfar H, Shafae Bajestan M, Fathi Moghaddam Manouchehr.. Experimental Investigation and Modeling of Critical Shear Stress for Surface Erosion of Sticky Bed. *Journal of Irrigation & Water Engineering*. 2012; 2(8): 78-94. [Persian].
- [16]. Rezaei Moghadam M.H, Servati M.R, Asghari Sarasankarood S. Analysis of the stability of the duct of Ghezel Ozan River using shear stresses Indices of relative strength of bed and field studies. *Journal of Irrigation & Water Engineering*. 2014; 1(1): 33-46. [Persian].
- [17]. Khoshmehnejad H, Maslom Shshaki R, Najafimood M.H, Shahidi A. Laboratory investigation of incipient motion of non-cohesive and non-uniform sediments sediment in irrigation and drainage channels. *Water and soil conservation conservation*. 2015; 22(4): 217-229. [Persian].
- [18]. Wohl E.E. *Mountain Rivers*. 1 nd ed. Washington. American Geophysical Union; 2000.
- [19]. Julien p. Translation by Jafarzadeh M.R. *River Mechanics*. 3 nd ed. Mashhad. Mashhad Ferdowsi University; 2015.
- مقاطع مختلف رودخانه مسیل‌موچان از نظر میزان ناپایداری و آسیب‌پذیری تفاوت‌های زیادی داشته باشند.
- منابع**
- [1]. Bizzi S, Lerner D.N. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River research and application River Res*. 2015; 31(1): 16-27.
- [2]. Minghui Y.U, Hongyan W, Yanjie L, Chunyan H.U. Study on the stability of non-cohesive river bank. *International Journal of Sediment Research*. 2010; 25(4): 391-398.
- [3]. Rinaldi M, Simoncini C, Piegay H. Scientific design strategy for promoting sustainable sediment management the case of the magra river (central northern Italy). *river research and application*. 2009; 25(5): 607-625.
- [4]. Wallerstein N.P, Soar P.J, Thorne C.R. River energy auditing scheme (REAS) for catchment flood management planning. *International conference on fluvial hydraulics*. 2006; 4(2): 1923-1932.
- [5]. Knighton D. *Fluvial Forms and Processes a new perspective*. 2 nd ed. New York: Hodder Arnold Publication; 1998.
- [6]. Hoseinzadeh M.M, Matash Beyranvand S, Sadogh H, Esmaili R. Stability analysis of bed sediments by using critical bed shear stress & critical unit discharge methods (case study: lavij river). *Earth science research*. 2016; 8(29): 86-75.
- [7]. Hoseinzadeh M.M, Esmaili R. *Fluvial concepts, forms and processes Geomorphology*. 1 nd ed. Tehran: Shahid Beheshti University; 2015. [Persian].
- [8]. Komar P.D. Selective gravel entrainment and the empirical evaluation of flow competence. *Sedimentology*. 1987; 34(6): 1165-1176.
- [9]. Komar P.D, Carling P. Grain sorting in gravel bed streams and the choice of particle sizes for flow competence evaluations. *Sedimentology*. 1991; 38(3): 489-502.
- [10]. Bathurst J. C. *Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials, in river channels: Environment and Process*. 1 nd ed. Blackwell. Malden Mass; 1987.