بررسی پایداری رسوبات بستر رودخانه لاویج با استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی

محمد مهدی حسین زاده*[۱]، سید حسن صدوق[۲]، سعیده متش بیرانوند [۳] ، رضا اسماعیلی[۴]

۱-دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳-دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۴-دانشیار دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۱۷
تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۸/۱۱

چکیده

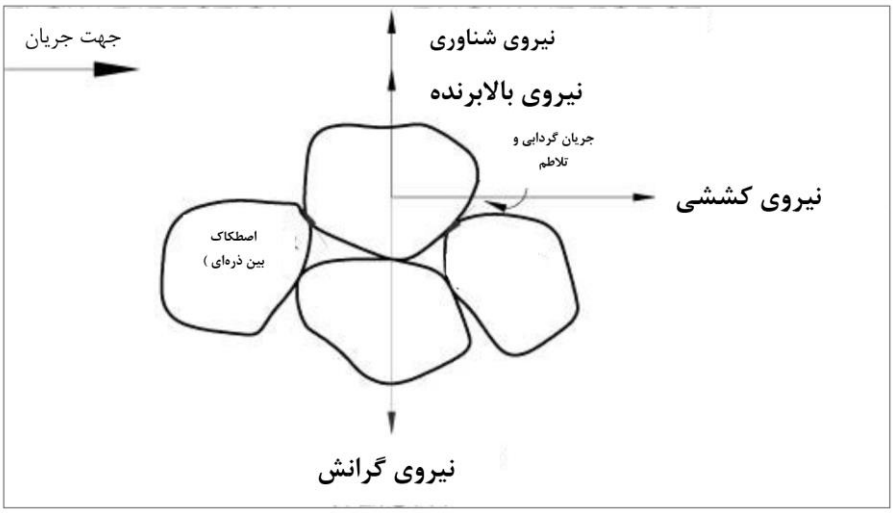
از مسائل مهم و کلیدی در بررسی فرسایش و پایداری رودخانه‌ها مسئله آغاز حرکت ذرات رسوبی می‌باشد. تولید رسوب رودخانه سبب کدورت آب، مشکلات مواد مغذی و آلودگی‌های آب، مدفون نمودن تأسیسات انحراف آب و همچنین پر شدن دریاچه‌های ذخیره آب می‌گردد. جریانی که سبب شروع حرکت ذره خواهد شد، جریان بحرانی نامیده می‌شود. آستانه حرکت اولیه ذرات رسوبی با چند روش مختلف بررسی می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از میانگین سرعت بحرانی جریان، روش تنش برشی بحرانی و روش دبی واحد جریان. برای بررسی پایداری رسوبات بستر رودخانه لاویج در شهرستان نور با توجه به شرایط رودخانه از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی استفاده گردید. با هدف بررسی آستانه حرکت ذرات در بستر این رودخانه شرایط دو مقطع عرضی از این رودخانه بررسی شد. در ادامه تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی برای چهار اندازه ذره D_{16}، D_{50}، D_{84} و D_{95} در هر دو مقطع محاسبه شد و مشخص گردید که در مقطع عرضی شماره ۱ در دبی لبالبی مقطع تمامی ذرات با اندازه‌های D_{16}، D_{50}، D_{84} و D_{95} شروع به حرکت می‌کنند و بنابراین در دبی لبالبی شرایط رسوبی بستر رودخانه تغییر کلی خواهد کرد. در مقطع شماره ۲ ذرات با قطر D_{95} و بیشتر از آن در بستر رودخانه پایدار خواهند ماند و سایر ذرات کوچک‌تر از این اندازه شروع به حرکت می‌کنند. وجود شیب بیشتر بستر و عرض کمتر کانال فعال در مقطع عرضی شماره ۱ سبب شده که تمامی ذرات مورد بررسی ناپایدار باشند. درنهایت نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش همخوانی بالایی داشتند و این خود تأییدی بر استفاده از این روش‌ها برای مطالعات پایدارسازی و تولید رسوب رودخانه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آستانه حرکت ذرات رسوبی، تنش برشی بحرانی، دبی واحد بحرانی، رودخانه لاویج.

*- نویسنده مسئول: ۰۲۱۲۹۹۰۲۶۰۲
Email: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

مقدمه

یکی از مسائل و مشکلاتی که در رابطه با بهره‌برداری از منابع آبی اهمیت خاصی دارد مسئله حرکت رسوب می‌باشد. تولید رسوب رودخانه سبب کدورت آب، مشکلات مواد مغذی و آلودگی‌های آب، مدفون نمودن تأسیسات انحراف آب و همچنین پر شدن دریاچه‌های ذخیره آب می‌گردد. بررسی و برآورد مقاومت ذرات رسوبی در مقابل فرسایش باعث شناسایی نقاط پایدار و ناپایدار در مناطق مختلف بستر رود خواهد شد. ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه نه‌تنها موجب خسارت به اراضی مستعد کشاورزی و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه شده بلکه رسوبات حاصل از فرسایش در برخی مواقع درصد قابل 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 (مینگهویی و همکاران، ۲۰۱۰). درک حرکت رسوب و حساسیت کانال نسبت به فرسایش یا رسوب‌گذاری، ضرورتی مهم برای مدیریت رودخانه است. برای مثال غلبه فرآیند رسوب‌گذاری در یک بازه از رودخانه می‌تواند انتقال رسوب را کاهش دهد و درنتیجه افزایش قدرت رود و غلبه فرسایش در بازه پایین‌دست شود و این فرسایش سبب ناپایداری و خسارت به زیرساخت‌ها می‌گردد. طرح‌های مدیریتی اخیر جهت ارزیابی فرآیندهای ژئومورفولوژیکی با هدف طراحی مناسب و پیشنهاد راه‌حل‌های مؤثر ارائه می‌شود (والستاین و همکاران، ۲۰۰۹؛ رینالدی و همکاران، ۲۰۰۶). یک ذره در بستر یک جریان زمانی شروع به حرکت می‌کند که نیروی کششی و نیروی هیدرولیکی بالابرنده ایجادشده توسط جریان بیشتر از نیروهای مقاومت ذره شوند. نیروهای مقاومت شامل نیروی گرانش، نیروی وزن مستغرق ذره و نیروی اصطکاک بین‌ذره‌ای می‌باشد (شکل ۱).



شکل۱: کنش بین نیروهای کششی و بالابرنده، نیروی شناورسازی و نیروهای مقاومت ذره (اصطکاک بین‌ذره‌ای، نیروی گرانش). طرح اصلاح‌شده توسط کارلین،۱۹۹۲؛ ژولین، ۱۹۹۵ و نایتون ۱۹۹۸.

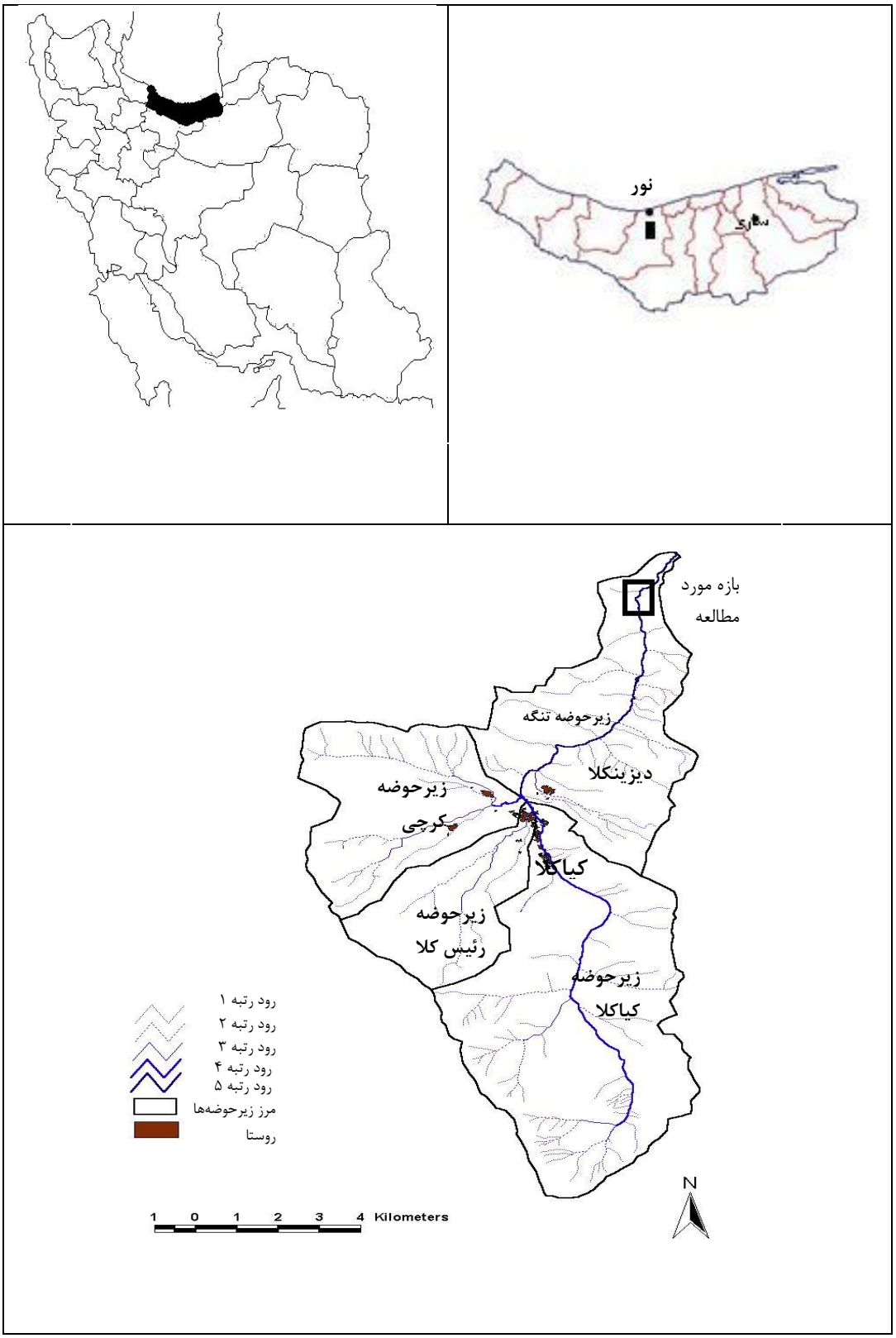
جریانی که سبب شروع حرکت ذره خواهد شد، جریان بحرانی[۲] نامیده می‌شود. آستانه حرکت اولیه ذرات رسوبی را می‌توان با دو تئوری میانگین سرعت بحرانی جریان[۳] و تئوری تنش برشی بحرانی بستر[۴] مشخص نمود. روش میانگین سرعت جریان یک روش غیرمستقیم است زیرا در این روش میانگین سرعت در مقطع عرضی در نظر گرفته‌شده است، درحالی‌که شرایط هیدرولیک نزدیک بستر کانال برای حمل رسوب مهم است (حسین زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴). منحنی اولیه میانگین سرعت بحرانی که توسط ژولستروم (۱۹۳۵) ارائه‌شده 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 اندازه مانند این ماسه ریز، سیلت و رس نیز سرعت بیشتری از ماسه برای حمل نیاز دارند. علت آن چسبندگی بین ذرات در این اندازه و همچنین قرار گرفتن این اندازه ذرات در زیر لایه خطی جریان است. در این لایه نیروی کششی ذرات کمتر بوده و ذرات در معرض نیروهای بلند کننده جریان آشفته قرار نمی‌گیرند. روش تنش برشی که توسط آلبرت شیلدز در سال ۱۹۳۶ ارائه‌شده است تنش برشی بستر را به‌صورت یک عدد بی‌بعد تحت عنوان پارامتر شیلدز بیان می‌کند. تنش برشی بحرانی بستر با اندازه ذرات افزایش می‌یابد و به ناهمواری نیز بستگی دارد. معادله شیلدز برای بسترهایی مناسب است که رسوبات در آن به‌خوبی طبقه‌بندی شده و یکنواخت هستند. معادله شیلدز برای کانال‌های با بستر غیریکنواخت توسط کومار و کارلین، ۱۹۹۱ و کومار، ۱۹۹۷ اصلاح شد. معادله اصلاح‌شده بر اساس رابطه بین اندازه ذره مورد تحلیل و D_{50} بیان می‌شود. بئاترس (۱۹۹۷) برای کانال‌های با گرادیان بیشتر از ۱ 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 به‌جای تنش برشی مرزی را برای تعیین تحرک ذرات می‌دهد. در پژوهش‌های مختلف انجام‌گرفته در زمینه تحرک رسوب از روش تنش برشی مرزی برای جریان‌های درون کانال فعال استفاده می‌شود. رسولیان‌فر و افضلی مهر (۲۰۰۷) اثر مؤلفه‌های آشفتگی بر شروع حرکت ذرات رسوب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه داده‌های سرعت آب توسط یک فلوم سرعت‌سنج آزمایشگاهی با بستر شنی برداشت گردید. نتایج نشان داد که تنش برشی مهم‌ترین پارامتر در بررسی آستانه حرکت ذرات درشت‌دانه بستر می‌باشد. نظری و حیدری (۲۰۱۰) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، آستانه حرکت ذرات رسوبی یکنواخت را مورد بررسی قراردادند، نتایج ایشان نشان داد، شروع حرکت ذرات رسوبی نه تنها به اندازه ذرات رسوب وابسته بوده بلکه به نسبت عمق جریان به قطر ذرات نیز بستگی دارد. جهانشاهی و همکاران (۲۰۱۱) در راستای ایرادی که در نمودار 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، مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش مذکور با ارائه رابطه‌ای ساده بر مبنای عدد حرکت‌پذیری و قطر بی‌بعد ذره سعی در تشریح سرعت برشی بحرانی جهت آغاز حرکت رسوب گردید. منصوری هفشجانی و شفاعی (۱۳۹۰) در پژوهشی طراحی قطر سنگچین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس

2- critical flow or the critical entrainment flow.
3- critical mean flow velocity
4- critical bed shear stress

رودخانه را بررسی کرده‌اند که با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده، فرمول‌های قطر سنگ‌چین برای کنترل آب شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه ارائه گردید. همچنین فرمول‌های ارائه‌شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارائه‌شده از مطالعات پیشین بر روی سنگ‌چین 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 فرسایش‌پذیری کناره رودخانه را محاسبه کردند. در این تحقیق با استفاده از معیار راسگن و شاخص فرسایش‌پذیری کناره با توجه به مقدار پارامترهای گرادیان سرعت جریان و نسبت تنش برشی، مقدار عددی شاخص فرسایش‌پذیری کناره‌های رودخانه را در ۶ 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 آب شستگی، نقش بسزایی در تعیین و هزینه‌های ساخت سازه دارد و از بین معادله‌های بار بستر استفاده‌شده، معادله انگلند و فردسو بیشترین ظرفیت انتقال رسوب و کمترین هزینه و معادله بار بستر ون‌رین کمترین ظرفیت انتقال رسوب و بیشترین هزینه را به دنبال دارد. خالقی و ملکانی (۱۳۹۳) در پژوهشی برآورد فرسایش کرانه رودخانه لیقوان‌چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن پرداخته‌اند که نتایج نشان داد که در این رودخانه، میزان فرسایش‌پذیری کرانه در اکثر مقاطع به‌جز مقطع ۱۰، کم تا خیلی کم بوده و در اکثر مقاطع فرسایش‌پذیری کرانه‌ها در حد کم تا متوسط است. در مطالعه حاضر با هدف بررسی تحرک ذرات در بستر رودخانه لاویج، 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 مورد مطالعه در تمامی مقاطع عرضی برداشت‌شده شیب بستر بیشتر از ۱ درصد (۰/۰۱ متر بر متر) می‌باشد و همچنین مورفولوژی بستر شامل سکو- چالاب بوده و نسبت عمق جریان به‌اندازه ذرات کم است. پس از بررسی پایداری ذرات بستر رودخانه در هر دو روش، نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش باهم مقایسه می‌شوند.

محدوده مورد مطالعه

بازه مورد مطالعه به طول ۲ کیلومتر در حوضه آبریز لاویج‌رود و در محدوده پارک جنگلی کشپل قرار دارد. این پارک جنگلی در قسمت جنوبی شهر چمستان (شهرستان نور) و در استان مازندران واقع شده است (شکل ۲). مقدار بارش سالانه حوضه در پارک جنگلی کشپل طبق داده‌های ایستگاه هواشناسی چمستان ۸۶۵ میلی‌متر است که به سمت بالادست حوضه (قسمت جنوبی) به ۳۰۰ میلی‌متر هم تغییر می‌کند. بیش از ۷۵ درصد مساحت حوضه تحت پوشش جنگل‌های انبوه دامنه‌های شمالی البرز قرار دارد. میانگین دبی سالانه حوضه ۱/۷ مترمکعب در ثانیه می‌باشد و حداکثر دبی ثبت‌شده در طی دوره آماری (۱۳۳۷-۱۳۹۰) ۱۷۵ مترمکعب در ثانیه بوده است.



شکل ۲: محدوده منطقه مورد مطالعه در استان مازندران

مواد و روش‌ها

جهت بررسی تحرک ذرات بستر رودخانه لاویج دو مقطع عرضی در بازه موردنظر انتخاب‌شده و با استفاده از دوربین نقشه‌برداری اقدام به نقشه‌برداری شد و مقطع تهیه گردید (شکل ۳). مورفولوژی بستر در هر دو مقطع عرضی شامل سکو-چالاب‌های بوده و در بستر واریزه‌های چوبی بزرگ مشاهده می‌شود. داخل بستر موانع طولی با رسوبات گراولی است.

شکل ۳: تصویر مقطع عرضی شماره ۱(سمت راست) و مقطع عرضی شماره ۲ (سمت چپ)

برای بررسی اندازه رسوباتی که بیشترین فراوانی را دارند از روش شمارش پبل (ریگ) که به وسیله ولمن در سال ۱۹۵۲ ارائه شده است، استفاده شد. در این روش ۱۰۰ ذره به‌صورت اتفاقی انتخاب‌شده و محور متوسط (d) آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس داده‌های به دست‌آمده از اندازه ذرات به صورت نمودار تجمعی ترسیم شد و D۵۰ (اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند) محاسبه می‌شود (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین 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 ذراتی که ۱۶ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند) رسوبات در هر دو مقطع عرضی تعیین شد. بعد از بررسی اولیه مشخصات استخراج شده از مقاطع عرضی (جدول ۱)، مشخص شده که در بازه مورد مطالعه شیب بستر بیش از یک درصد است، غوطه‌وری نسبی کمتر از ۱۰، و بستر کانال دارای ریفل و واریزه‌های چوبی می‌باشد، بنابراین یکی از روش‌های مناسب برای آنالیز تحرک و پایداری ذرات بستر روش دبی واحد بحرانی (بئاترس و همکاران، ۱۹۸۷) می‌باشد. علاوه بر این روش، با استفاده از معادله اصلاح‌شده تنش برشی بحرانی، تنش برشی بحرانی برای ذرات D_{16}، D_{50}، D_{84}، D_{95} نیز محاسبه گردید. علت انتخاب این ذرات برای آنالیز این است که D_{84}، D_{95} ذرات کلیدی می‌باشند که زمانی که شروع به حرکت می‌کنند نشان دهنده

حرکت بیشتر اجزاء بستر بوده و درواقع شروع تغییر در ساختار بستر را نشان می‌دهند. D_{50} میانه ذرات بوده و متوسط تنش برشی را نشان می‌دهد و همچنین اندازه این ذرات برای اکثر محاسبات لازم است. اندازه D_{16} در بسترهای نسبتاً پایدار اهمیت دارد. معادله تنش برشی بحرانی اصلاح شده (کومار و کارلین، ۱۹۹۱؛ کومار، ۱۹۹۷) بر اساس رابطه بین اندازه ذره مورد آنالیز و D_{50} رسوبات بستر در رابطه ۱ بیان می‌شود:

رابطه ۱)

$$\tau_{ci}= \tau_{D50}(\gamma_s-\gamma)\ D_i^{0.3}D_{50}^{0.7}$$

که در آن τ_{ci} تنش برشی بحرانی برای ذره موردنظر (N/m^2)، τ_{D50} پارامتر بی‌بعد شیلدز برای ذرات D_{50} (جدول ۱)، γ_s وزن مخصوص رسوب، γ وزن مخصوص آب، D_i اندازه ذره مورد آنالیز $m(D_{50})$ اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن هستند (m) می‌باشد.

جدول ۱: زاویه قرار پاره سنگ و پارامتر شیلدز برای اندازه‌های مختلف پاره سنگ (اصلاح شده توسط ژولین، ۱۹۵۵)

طبقه‌بندی اندازه پاره سنگ	قطر ذره (میلیمتر)	زاویه قرار پاره سنگ Ø	پارامتر شیلدز t^*
تخته سنگ بسیار بزرگ	>۲/۰۴۸	۴۲	۰/۰۵۴
تخته سنگ بزرگ	۱/۰۲۴ - ۲/۰۴۸	۴۲	۰/۰۵۴
تخته سنگ متوسط	۵۱۲ - ۱/۰۲۴	۴۲	۰/۰۵۴
تخته سنگ کوچک	۲۵۶ - ۵۱۲	۴۲	۰/۰۵۴
قلوه سنگ بزرگ	۱۲۸ – ۲۵۶	۴۲	۰/۰۵۴
قلوه سنگ کوچک	۶۴ – ۱۲۸	۴۱	۰/۰۵۲
گراول خیلی بزرگ	۳۲ – ۶۴	۴۰	۰/۰۵۰
گراول بزرگ	۱۶ – ۳۲	۳۸	۰/۰۴۷
گراول متوسط	۸ – ۱۶	۳۶	۰/۰۴۴
گراول ریز	۴ – ۸	۳۵	۰/۰۴۲
گراول خیلی ریز	۲ - ۴	۳۳	۰/۰۳۹

پس از محاسبه تنش برشی بحرانی برای چهار اندازه مختلف، تنش برشی بحرانی در دبی لبالبی (τ_{bf}) با استفاده از رابطه شماره ۲ محاسبه شد. درصورتی‌که تنش برشی بحرانی برای ذره موردنظر بیشتر از تنش برشی در دبی لبالبی باشد، ذره موردنظر پایدار خواهد بود و درصورتی‌که کوچک‌تر باشد ذره در دبی لبالبی حرکت خواهد نمود.

رابطه ۲)

$$\tau_{bf} = gRS$$

τ_{bf} تنش برشی بحرانی در عرض دبی لبالبی (N/m^2)، R عرض کانال در حالت دبی لبالبی (m)، S شیب بستر رودخانه (m/m) و g وزن مخصوص آب است.

برای کانال‌های با شیب بیشتر از ۱ درصد (۰/۰۱ متر بر متر)، جایی که نسبت عمق جریان به اندازه ذرات کمتر است (غوطه‌وری نسبی: R/D_{50} کمتر از ۱۰)، عمق آب کاملاً متغیر است، زیرا سنگ‌های بزرگ یا واریزه‌های چوبی نزدیک سطح، عمق آب

را کاملاً تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. برای چنین شرایطی بئاترس و همکاران (۱۹۸۷) با استفاده از داده‌های فلوم معادله‌ای برای پیش‌بینی دبی واحد بحرانی موردنیاز برای آغاز حرکت ذرات D_{50} ارائه نمودند (رابطه ۳):

رابطه ۳)

$$q_{cD50} = \frac{0.15\, g^{0.5} {D_{50}}^{1.5}}{s^{1.12}}$$

که در آن q_{cD50} دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات $(m^2/s)D_{50}$، D_{50} معادل قطر میانه ذرات (m)، g شتاب ثقل (۹/۸m/s) و s شیب بستر (m/m) می‌باشند.

بئاترس و همکاران (۱۹۸۷) برای محاسبه دبی واحد بحرانی برای آغاز حرکت ذرات در اندازه‌های مختلف رابطه ۴ را ارائه نمودند:

رابطه ۴)

$$q_{ci} = q_{cD50}(D_i / D_{50})^b$$

که در آن q_{ci} دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات در اندازه موردنظر (m^2/s)، q_{cD50} دبی واحد بحرانی برای حمل ذرات $(m^2/s)D_{50}$، D_i اندازه ذره موردنظر و D_{50} اندازه ذراتی که ۵۰ درصد نمونه مساوی یا کوچک‌تر از آن است.

توان b دامنه‌ای از اندازه ذراتی است که ترکیب بستر کانال را تشکیل می‌دهند. با واردکردن 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:

رابطه ۵)

$$b = 1.5(D_{84}/D_{16})$$

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

برای بازه موردمطالعه پس از اینکه مشخص شد نسبت R/D_{50} کمتر از ۱۰ می‌باشد (جدول ۱) برای محاسبه دبی واحد بحرانی از روش بئاترس و همکاران (۱۹۸۷) مراحل زیرا اجرا شده است:

۱-ابتدا با استفاده از رابطه ۱ دبی واحد بحرانی با استفاده از قطر ذرات D_{50} و شیب بستر محاسبه می‌شود.

۲-با استفاده از رابطه ۵ مقدار توان b را محاسبه نموده و سپس با استفاده از رابطه ۴ دبی واحد بحرانی برای اندازه ذرات D_{16}، D_{85} و D_{95} محاسبه می‌گردد.

۳-در ادامه دبی واحد درون کانال در هر مقطع با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود و در نهایت برای تعیین اینکه اندازه ذرات داده‌شده در دبی واحد درون کانال حرکت خواهد کرد یا خیر؟ دبی واحد بحرانی ذره موردنظر با دبی واحد درون کانال فعال (q) مقایسه می‌شود. در صورتی‌که دبی واحد بحرانی ذره (q_{ci}) کمتر از دبی واحد درون کانال فعال (q) باشد، ذره کشیده شده و حرکت خواهد شد. اگر دبی واحد بحرانی ذره (q_{ci}) بیش از دبی واحد (q) اعمال‌شده بر روی ذره باشد، ذره حرکت نخواهد کرد.

رابطه ۶)

$$q = Q/w$$

در این رابطه q دبی واحد درون کانال (دبی در واحد عرض) (m^2/s)، Q دبی حداکثر لحظه‌ای رودخانه (m^2/s) و W عرض کانال فعال (m) در مقطع عرضی موردنظر می‌باشد. دبی حداکثر لحظه‌ای رودخانه با استفاده از آمار ایستگاه هیدرومتری لاویج در بازه زمانی سال‌های ۱۳۳۸ تا ۱۳۹۰ استخراج شد.

بحث و نتایج

پس از تعیین نسبت R/D_{50}، مشخص شد مناسب‌ترین روش برای آنالیز تحرک و پایداری ذرات بستر رودخانه لاویج در بازه موردنظر روش دبی واحد بحرانی (بئاترس و همکاران، ۱۹۸۷) می‌باشد. علاوه بر این روش با استفاده از معادله تنش برشی بحرانی، میزان تنش برشی بحرانی برای

ذرات در چهار اندازه مختلف نیز محاسبه گردید. بدین منظور متغیرهای مورد نیاز برای تعیین دبی واحد بحرانی و تنش برشی بحرانی در دو مقطع عرضی در این بازه برداشت شد (جدول ۲).

جدول ۲: مشخصات مقاطع عرضی رودخانه لاویج

شماره مقطع	شیب بستر (S)	عمق جریان (R)	عرض کانال فعال (W)	D_{16}(mm)	D_{50}(mm)	D_{86}(mm)	D_{95}(mm)	R/ D_{50}
۱	۰/۰۵۱	۰/۴۹	۱۱/۴۰	۱۴	۴۰	۸۱	۱۷۰	۹/۶۰
۲	۰/۰۴۰	۰/۳۷	۱۱/۷۶	۱۵	۴۰	۸۰	۱۵۰	۹/۲۵

با استفاده از رابطه ۱ تنش برشی بحرانی برای سه اندازه ذره کلیدی محاسبه شد (جدول ۳). 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 محاسبه‌شده است.

جدول ۳: تنش برشی محاسبه‌شده برای اندازه‌های مختلف ذرات در مقاطع عرضی رودخانه لاویج

شماره مقطع	$\tau_{D16}(N/m^2)$	$\tau_{D84}(N/m^2)$	$\tau_{D95}(N/m^2)$	$\tau_{bf}(N/m^2)$
۱	۲۳/۵۳	۳۹/۹۴	۴۹/۲۸	۵۷/۰۳
۲	۲۳/۷۹	۳۹/۰۹	۴۷/۵۸	۴۶/۱۴

همان‌طور که از جدول ۳ قابل ملاحظه است در مقطع عرضی شماره ۱ تنش برشی بحرانی ایجاد شده توسط دبی لبالبی از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با قطر D_{16}، D_{84} و D_{95} بیشتر است؛ بنابراین تمامی ذرات دارای این اندازه‌ها یا کوچک‌تر از آن در دبی لبالبی این مقطع حرکت خواهند کرد. در مقطع عرضی شماره ۲ تنش برشی بحرانی ایجاد شده توسط دبی لبالبی رودخانه بیشتر از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با قطر D_{16} و D_{84} می‌باشد، بنابراین در دبی لبالبی ذرات ذکر شده حرکت خواهند کرد. تنش برشی ایجاد شده توسط دبی لبالبی این مقطع عرضی از تنش برشی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه D_{95} کمتر است، بنابراین در دبی لبالبی ذرات با اندازه D_{95} و بزرگ‌تر از آن پایدار خواهند بود. در ادامه کار با استفاده از روابط شماره ۳ تا ۶ مقادیر q_{cd50}، q_{cD16}، q_{cD84}، q_{cD95} و q محاسبه شد (جدول ۴).

جدول ۴: دبی واحد بحرانی محاسبه شده برای اندازه‌های مختلف ذرات در مقاطع عرضی رودخانه لاویج

شماره مقطع	$Q(m^{2/s})$	$q_{cD16}(m^{2/s})$	$q_{cd50}(m^{2/s})$	$q_{cD84}(m^{2/s})$	$q_{cD95}(m^{2/s})$
۱	۱/۴۰	۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۷۸	۱/۰۴
۲	۱/۳۵	۰/۷۰	۰/۹۳	۱/۱۲	۱/۳۴

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در مقطع عرضی شماره ۱ دبی واحد بحرانی لبالبی در عرض رودخانه در مقایسه با دبی واحد بحرانی لازم برای حرکت تمامی ذرات مورد بررسی (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 لبالبی رودخانه حرکت می‌کنند. در مقطع شماره ۲ دبی واحد بحرانی لبالبی در عرض رودخانه در مقایسه با دبی واحد بحرانی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه‌های D_{16}، D_{50} و D_{84} بیشتر است. در این مقطع عرضی فقط دبی بحرانی لازم برای شروع حرکت ذرات با اندازه D_{95} و بزرگ‌تر از آن بیشتر از دبی واحد بحرانی در عرض مقطع می‌باشد و در شرایط دبی لبالبی این ذرات پایدار خواهند ماند و حرکت نمی‌کنند. همان‌گونه که قابل مشاهده است در مقطع عرضی شماره ۱ ذرات نسبت به مقطع عرضی شماره ۲ ناپایدارترند و در شرایط دبی لبالبی تمامی ذرات مورد بررسی شروع به حرکت خواهند کرد، بنابراین در دبی لبالبی شرایط کلی بستر رودخانه در این مقطع تغییر خواهد کرد. با توجه به شرایط مقطع شماره ۱ انتظار می‌رود که به علت شیب بیشتر بستر و عرض کمتر کانال فعال در این مقطع ذرات در اندازه‌های کوچک‌تر نسبت به مقطع عرضی شماره ۲ شروع به حرکت کنند. در مقطع شماره ۲ نیز در دبی لبالبی اکثر ذرات حرکت خواهند کرد و فقط ذرات بزرگ‌تر از D_{95} ثابت خواهند ماند.

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 محققین ارائه شده است از جمله این روش‌ها روش تنش برشی بحرانی و روش دبی واحد بحرانی است که در این مقاله به این دو روش پرداخته‌شده 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 تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (هوول، ۲۰۰۰). با این حال هنوز هم یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای پیش‌بینی حساسیت کانال به فرسایش، برآورد آستانه حرکت ذرات رسوبی بستر رودخانه است. در مطالعه حاضر با توجه به شرایط بستر رودخانه لاویج در بازه مورد مطالعه، جهت بررسی تحرک ذرات بستر، از روش دبی واحد استفاده می‌شود. این روش برای رودخانه‌هایی مناسب است که شیب بستر بیشتر از ۱ درصد (۰/۰۱ متر بر متر) باشد و همچنین مورفولوژی بستر شامل سکو- چالاب بوده و نسبت عمق جریان به اندازه ذرات کم باشد. جهت بررسی تحرک ذرات بستر رودخانه لاویج ۲ مقطع عرضی در بازه موردنظر انتخاب شد و پارامترهای موردنیاز برای برآورد تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی در هر دو 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 ایجادشده توسط دبی لبالبی و دبی بحرانی در شرایط دبی لبالبی در واحد عرض کانال مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در مقطع عرضی شماره ۱ در دبی لبالبی رودخانه تمامی ذرات مورد بررسی ناپایدار می‌باشند و حرکت خواهند کرد. درحالی‌که در مقطع عرضی شماره ۲ فقط ذرات با اندازه D_{95} پایدار هستند و سایر ذرات در دبی لبالبی در واحد عرض رودخانه حرکت خواهند کرد. این امر به شیب بیشتر بستر و عرض کمتر کانال رودخانه در مقطع شماره ۱ بر می‌گردد. این پژوهش

نشان داد که استفاده از هر دو روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی نتایج مشابهی در ارتباط با آستانه حرکت ذرات به دست می‌دهد و این خود تأییدی بر استفاده از این روش‌ها برای مطالعات پایداری رودخانه است. استفاده از روش تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی برای بررسی آغاز حرکت ذرات رسوبی کانال رودخانه‌ها روش مناسب، مقرون به صرفه و ساده‌ای است که به راحتی می‌توان از نتایج آن برای برنامه‌ریزی های پایدارسازی کانال و پیشگیری از فرسایش کناری استفاده نمود.

منابع

-استادی، ف.، مجد زاده طباطبایی، م. و علی محمدی، ع.، ۱۳۹۳. مدل بهینه‌سازی آب‌شکن‌های رودخانه‌ای و نقش آن در پایدارسازی مورفولوژیکی رودخانه، نشریه هیدرولیک، دوره ۴، شماره ۹، ص ۷۲-۵۵.

-جهانشاهی، م.، ثابتی، ا. و قمشی، م.، ۱۳۸۹. بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب بر اساس سرعت سقوط ذرات، دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

-حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۴. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، مفاهیم، اشکال و فرآیندها، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۳۳۸ ص.

-خالقی، س. و ملکانی، ل.، ۱۳۹۴. برآورد فرسایش کرانه رودخانه لیقوان‌چای با استفاده از شاخص تنش برشی نزدیک کرانه راسگن، کنگره بین‌المللی جغرافیا و توسعه پایدار، تهران.

-رسولیان‌فر، پ. و افضلی‌مهر، ح.، ۱۳۸۵. اثر مؤلفه‌های آشفتگی جریان در شروع حرکت ذرات رسوب، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

-ژولین، پ.، ۱۳۸۸. مکانیک رودخانه، ترجمه محمدرضا جعفرزاده، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۵۳۹ ص.

-کریمی پاشاکی، م.، اطمینان، ح. و صارمی، ع.، ۱۳۹۱. طراحی پوشش ریپ‌رپ رودخانه با توجه به شاخص فرسایش کناری راسگن مطالعه موردی رودخانه خرسان، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

-منصوری هفشجانی، م. و شفاعی بجستان، م.، ۱۳۹۰. طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه، مجله پژوهش آب ایران، شماره ۹، ص۷۳-۸۲.

-نظری، ا. و حیدری، م.، ۱۳۸۸. آستانه حرکت رسوبات یکنواخت، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

-Bagnold, RA., 1973. The nature of saltation and "bed load" transport in water, Proceedings of the Royal Society London, England, series A 332, p. 473-504.

-Bathurst, J. C., 1987. Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials, in *River Channels: Environment and Process*, edited by K. Richards, Blackwell, Malden, Mass, p. 272-294.

-Bathurst, J. C., Graf, W. H. and Cao, H. H., 1987. Bed load discharge equations for steep mountain rivers, in *Sediment Transport in Gravel- Bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, John Wiley, New York, p. 453-477.

-Knighton, D., 1998. Fluvial Forms and Processes A New Perspective, Oxford University Press Inc, New York, 383 p.
-Minghui, Y.U., Hongyan, W., Yanjie, L. and Chunyan, H.U., 2010. Study on the stability of non-cohesive river bank, International Journal of Sediment Research, v. 25(4), p. 391-398.
-Palmer, M., Menninger, H. L. and Bernhardt, E., 2010. River restoration habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of teory or practice? Freshwater biology55, p. 205-222.
-Rinaldi, M., Simoncini, C. and Piegay, H., 2009. Scientific design strategy for promoting sustainable sediment management: the case of the magra river (central northern Italy) river research and application, v. 25, p. 607-625
-U.S. Department of Agriculture, USA., 2008. Stream Simulation: An Ecological Approach to Providing Passage for Aquatic Organisms at Road-Stream Crossings.
-Yang, CT., 1996. Sediment Transport: Theory and Practice, McGraw-Hill, New York, NY, 396 p.
-Wallerstein, N.P., Soar, P.J. and Thorne, C.R., 2006. River energy auditing scheme (REAS) for catchment flood management planning, International conference on fluvial hydraulics, Lisbon Portugal, p. 1923-1932,
-Wohl, E., 2000. Mountain Rivers, American Geophysical Union, Washington, D.C, 320 p.