

بررسی آزمایشگاهی فرسایش رسوب‌های چسبنده در حضور رسوب‌های درشت‌دانه بستر

Original Article

میلاذ خواستار بروجنی (دانشجوی دکتری)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

حسین صمدی بروجنی* (دانشیار)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

مرضیه قاسمی (کارشناس)

زهرا طاهری (کارشناس)

مرکز تحقیقات منابع آب، دانشگاه شهرکرد

در نوشتار حاضر، به بررسی فرسایش رسوب‌های چسبنده در حضور رسوب‌های بستر پرداخته شده است. آزمایش‌های فرسایش با استفاده از فلوم دایره‌ای و برای ۶ حالت بستر (بستر صاف و ۵ دانه‌بندی رسوب‌های درشت‌دانه از $D_{50} = 2/8\text{mm}$ تا $D_{50} = 48\text{mm}$)، پنج تنش برشی جریان و رسوبات ته‌نشین شده با دوره‌ی تحکیم ۲۴ ساعت انجام شد. پارامترهای هیدرولیکی جریان با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد با وجود افزایش تنش برشی در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه، میزان فرسایش رسوب‌های چسبنده نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. مقادیر غلظت رسوب‌های فرسایش‌یافته پس از پایان یافتن آزمایش‌ها برای بسترهای صاف و غیرصاف (با مواد بستر $D_{50} = 48/2\text{mm}$) به ترتیب ۴۷ و ۱۹ گرم بر لیتر به دست آمد، که نشان می‌دهد بستر درشت‌دانه توانسته است تا ۹۶٪ نسبت به بستر صاف، فرسایش رسوب‌های چسبنده را کاهش دهد. این در حالی است که به ازای یک نیروی ثابت، تنش برشی متوسط جریان در بستر درشت‌دانه، ۵/۵ برابر بستر صاف است. کاهش پدیده‌ی فرسایش و نرخ آن در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه ناشی از تله‌اندازی رسوب‌های ریزدانه در میان فضای خالی رسوب‌های درشت‌دانه‌ی بستر است که اجازه‌ی دوباره معلق شدن پیدا نمی‌کنند. در پژوهش حاضر، تنش برشی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌های چسبنده در بستر صاف، ۱۲/۰ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. این در حالی است که تنش برشی بحرانی فرسایش برای بستر زیر $D_{50} = 2/8\text{mm}$ تا $D_{50} = 48\text{mm}$ به ترتیب ۱۶/۰ و ۹۲/۰ نیوتن بر مترمربع به دست آمده است.

khastar1365@yahoo.com
samadi153@yahoo.com
marzie.ghasemi93@gmail.com
sahra_taheri65@yahoo.com

واژگان کلیدی: تله‌اندازی، ته‌نشینی، تنش برشی بحرانی، تحکیم، فلوم دایره‌ای.

۱. مقدمه و تاریخچه مطالعات

برای کنترل رفتار آن کافی است.^[۱] ذرات ریز رسی در سطح خود بار منفی دارند و امکان اینکه ذرات با کاتیون‌ها محاصره شوند، وجود دارد. این پدیده به علت جانشینی هم‌ریخت و همچنین به دلیل شکست پیوستگی ساختمان مولکول‌ها در لایه‌ی بین دو پولک رس است. ضخامت لایه‌ی ذکر شده با توجه به نوع مواد و غلظت یون‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد و معمولاً با تعادل بین نیروی جاذبه و دافعه بین ذرات مشخص می‌شود. از طرفی، اثر متقابل بین برخورد دو ذره، تابع اثر متقابل لایه‌ی دوگانه است. به گونه‌ی که در ابتدا نیروی الکترومغناطیسی دفع‌کننده تمایل به جدایی ذرات از یکدیگر دارد، اما با برخورد بین ذرات، نیروی جاذبه‌ی ذرات را به یکدیگر متصل می‌کند.^[۲] عامل چسبندگی رسوب‌های ریزدانه سبب می‌شود که ذرات مذکور به صورت انفرادی منتقل نشوند و تمایل بیشتری به انتقال به صورت

فرایندهای فرسایش و ته‌نشینی دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در تغییرات ریخت رودخانه‌ها هستند. فرسایش رسوب‌های چسبنده توسط جریان، مسئله‌ی مهم در سراسر جهان است، که در مواردی مانند: پایداری سواحل رودخانه، شکست سدهای خاکی، عمر مفید مجازن، مدیریت شبکه‌های آبیاری، توزیع آلودگی و مسائل کیفیتی به آنها توجه می‌شود.

انتقال رسوب‌های چسبنده کاملاً شناخته شده نیست، که دلیل عمده‌ی آن، پیچیدگی‌های رفتار رسوب‌های چسبنده است. وجود ۱۰٪ رس در ساختمان خاک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۸/۰۶/۲۵، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۲۲.

DOI:10.24200/J30.2019.52750.2505

Archive of SID

توده‌ی (فلوک) و جمعی داشته باشند. توده‌های اشاره شده، یک قالب پیچیده از اجتماع ریز (میکروسکوپی) هستند، که ذرات آلی و غیرآلی و فضای خالی بین آنها، اجازه‌ی نگهداری و یا عبور آب را در بین آنها می‌دهد. واکنش پذیری و حفره‌های نسبتاً زیاد بین توده‌ها در جذب و پراکنده کردن آلاینده‌های ستون آب تأثیرگذار است.^[۳]

بسیاری از آلاینده‌ها، همچون فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و کودها به طور سطحی جذب رسوب‌های چسبیده می‌شوند. رسوب‌ها در بعضی مواقع، خود در کیفیت آب تأثیرگذار هستند.^[۴]

رسوب‌های معلق به دلیل خاصیت چسبندگی و برخورد بین ذرات، توده‌های بزرگ‌تری به نام فلوک^۱ را تشکیل می‌دهند. توده‌های بزرگ‌تر نسبت به توده‌های کوچک، سریع‌تر ته‌نشین می‌شوند و نتیجه‌ی آن لایه‌ی شدن بستر است، که ذرات ریزتر بر روی لایه‌ی فوقانی قرار می‌گیرند. ذرات ته‌نشین شده‌ی زیرین به تدریج تحکیم می‌شوند و ذرات ته‌نشین شده در لایه‌های سطحی، با امکان فرسایش بیشتری رو به رو هستند.^[۵]

در مجاری حاوی رسوب‌های بستر، نظیر رودخانه‌های کوهستانی، ته‌نشینی رسوب‌های چسبیده موجب تشکیل یک لایه‌ی مسدودکننده بر روی رسوب‌های بستر می‌شود، که با اختلال در تبادل و گردش آب موجب تخریب زیست‌گاه آبزیان می‌شوند. پژوهشگران بر این باورند که تله‌اندازی رسوب‌ها در مواد بستر، تا زمان تشکیل لایه‌ی مسدودکننده ادامه می‌یابد و پس از آن افزایش تله‌اندازی رسوب‌های معلق را وابسته به حرکت ذرات بستر، که مانع تشکیل لایه‌ی مسدودشونده در بالای سطح بستر رودخانه می‌شود، می‌دانند. لایه‌ی مسدودکننده تحت شرایط ثابت از طریق داخل شدن ذرات رس به منافذ خالی بستر تشکیل می‌شود. لایه‌ی مسدودکننده، فرایند مکش و به همان نسبت نفوذ ذرات به بستر را کاهش می‌دهد.^[۶]

در حال حاضر، دو نگرش مختلف در مورد آستانه‌ی فرسایش رسوب‌های چسبیده وجود دارد. اولین مورد، عدم وجود آستانه‌ی فرسایش برای رسوب‌های چسبیده را بیان می‌کند، که بر این اساس می‌توان اظهار کرد که برخی از ذرات در هر مقدار از تنش برشی بستر دچار فرسایش می‌شوند.^[۱۴ و ۱۵]

لاول^۵ و همکاران (۱۹۸۴)،^[۱۵] میزان نرخ فرسایش (ϵ) را با استفاده از مفهوم عدم وجود آستانه‌ی فرسایش به صورت رابطه‌ی ۱ ارائه کردند:

$$\epsilon = \alpha \tau^\beta \quad (1)$$

که در آن، α و β ضرایب تجربی هستند.

اساس در نظریه‌ی دوم، وجود آستانه‌ی فرسایش رسوب‌های چسبیده است، که در این حالت رابطه‌ی میزان نرخ فرسایش را طوری در نظر گرفته‌اند که آستانه‌ی فرسایش وجود داشته باشد.^[۱۷]

$$\epsilon = \alpha \tau [\tau - \tau_c(z)]^{n_2} \quad (2)$$

که در آن، τ_c تنش برشی بحرانی فرسایش، z عمق فرسایش، α و n_2 ثابت‌های تجربی هستند.

مطالعات بسیاری به صورت آزمایشگاهی و میدانی در شناخت پدیده‌ی فرسایش رسوب‌های چسبیده و تنش برشی آستانه‌ی فرسایش با ویژگی‌های مختلف مکانیکی، فیزیکی، الکتروشمی و بیولوژیکی رسوب‌ها انجام شده است.

بونگ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۸] تأثیر ضخامت لایه‌ی رسوب‌های ته‌نشین شده در آستانه‌ی فرسایش را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضخامت لایه‌ی رسوب‌های ته‌نشین شده در تنش برشی بحرانی فرسایش یا همان آستانه‌ی حرکت ذرات بستر تأثیرگذار است و با افزایش ضخامت لایه‌ی رسوب‌ها، میزان تأثیر آن در تنش برشی بحرانی فرسایش نیز کاهش می‌یابد.

گلسبرگن^۶ (۲۰۱۴)،^[۱۹] خصوصیات انتقال رسوب‌های چسبیده‌ی حوضه‌ی رودخانه‌ی البو^۷ در کانادا را با استفاده از یک فلوم دوار به قطر ۵ متر و با بستر صاف بررسی کرد که در طی آزمایش‌های انجام شده، میزان تنش برشی بحرانی رسوب‌های چسبیده برای فرسایش و رسوب‌گذاری به ترتیب ۲۱۲/۰ و ۱۱۵/۰ پاسکال در طول دوره‌های تحکیم ۳۹ و ۱۱۳ ساعت به دست آمد. تنش برشی بحرانی برای فرسایش رسوب‌های رودخانه‌ی البو به طور تقریبی، ۲ برابر بیشتر از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی بود.

دروپو^۸ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۲۰] نیز در بررسی مشخصات فرسایش رسوب‌های چسبیده در فلوم دواری با قطر ۲ متر، آزمایش‌های فرسایش را برای دوره‌های تحکیم ۱، ۳ و ۷ روز انجام دادند و دریافتند که تنش برشی بحرانی کف برای وقوع فرسایش از ۵/۰ به ۱۹/۰ پاسکال (برای دوره‌ی زمانی ۱ تا ۷ روزه) افزایش یافته است.

در مباحث انتقال رسوب‌های ریزدانه علاوه بر فرایندهای فرسایش و ته‌نشینی، پدیده‌ی تله‌اندازی ذرات معلق در میان رسوب‌های بستر نیز مطرح است، که کمتر پژوهشگران به آن پرداخته‌اند. همان طور که بیان شد، توجه بیشتر پژوهشگران بر

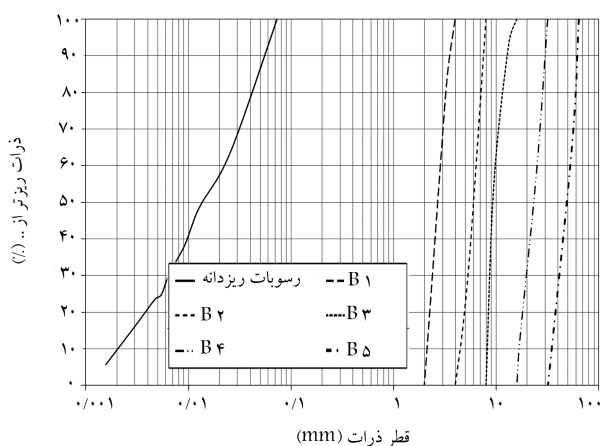
در مجاری حاوی رسوب‌های بستر، نظیر رودخانه‌های کوهستانی، ته‌نشینی رسوب‌های چسبیده موجب تشکیل یک لایه‌ی مسدودکننده بر روی رسوب‌های بستر می‌شود، که با اختلال در تبادل و گردش آب موجب تخریب زیست‌گاه آبزیان می‌شوند. پژوهشگران بر این باورند که تله‌اندازی رسوب‌ها در مواد بستر، تا زمان تشکیل لایه‌ی مسدودکننده ادامه می‌یابد و پس از آن افزایش تله‌اندازی رسوب‌های معلق را وابسته به حرکت ذرات بستر، که مانع تشکیل لایه‌ی مسدودشونده در بالای سطح بستر رودخانه می‌شود، می‌دانند. لایه‌ی مسدودکننده تحت شرایط ثابت از طریق داخل شدن ذرات رس به منافذ خالی بستر تشکیل می‌شود. لایه‌ی مسدودکننده، فرایند مکش و به همان نسبت نفوذ ذرات به بستر را کاهش می‌دهد.^[۶]

کریشناپان و انگل^۲ (۲۰۰۶)،^[۷] پتانسیل تله‌اندازی برای شن‌های بستر تحت شرایط تنش برشی کم و زیاد بررسی کردند و دریافتند که لایه‌ی مسدودکننده در پژوهش آنها تشکیل نمی‌شود. مشاهدات صورت گرفته نشان داد که نسبت منفذ بزرگ‌تر مرتبط با شن برای جلوگیری از تشکیل لایه‌ی مسدودکننده برای غلظت مورد استفاده در پژوهش مذکور کافی است. بر این اساس، شن با فضای خالی بزرگ، پتانسیل بالاتری در تله‌اندازی رسوب‌های ریزدانه حتی در شرایط جریان پایین دارد. خواستار بروجنی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۸] به بررسی تأثیر رسوب‌های بستر در ته‌نشینی و تله‌اندازی رسوب‌های معلق پرداختند و دریافتند که ضریب تله‌اندازی در بستر ماسه‌یی و شنی با افزایش تنش برشی و غلظت اولیه، نسبت به بستر صاف به ترتیب تا ۵/۷ و ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین ایشان افزایش ضریب تله‌اندازی در تنش‌های برشی بزرگ‌تر را ناشی از تأثیر رسوب‌های درشت‌دانه‌ی بستر در کاهش سرعت جریان و ایجاد پدیده‌های ترکیبی - رفت و برگشتی ناشی از آشفتگی جریان بیان کردند.

پس از ته‌نشینی رسوب‌های معلق در بستر، شرایط فرسایش برای رسوب‌های چسبیده فراهم است. فرسایش‌پذیری رسوب‌های چسبیده توسط پارامترهای بسیاری، نظیر: اندازه‌ی ذرات، ترکیب مواد معدنی، میزان مواد آلی، شوری، pH، فرایندهای بیولوژیکی و مقاومت بستر (تحکیم) و غیره کنترل می‌شود.^[۹-۱۱] ریونس^۳ (۱۹۹۹)،^[۱۲] فرسایش را تابعی از سرعت متوسط جریان، عمق جریان و نسبت تنش برشی جریان به تنش برشی آستانه‌ی فرسایش می‌داند. کرون^۴ (۱۹۹۹)،^[۱۳] نیز رابطه‌ی را برای نرخ فرسایش ارائه داده و فرسایش را تابعی از نسبت تنش برشی متوسط بستر به تنش برشی آستانه‌ی فرسایش در نظر گرفته است. روبرت (۱۹۹۸)،^[۱۴] آزمایش‌هایی به منظور بررسی تأثیر اندازه‌ی ذرات رسوبی و چگالی آنها در نرخ فرسایش انجام داد و نتیجه گرفت که نرخ فرسایش شدیداً تابع چگالی ذرات است، ضمن این‌که

جدول ۱. مشخصات فیزیکی بستر.

پارامتر	بستر اول (B _۱)	بستر دوم (B _۲)	بستر سوم (B _۳)	بستر چهارم (B _۴)	بستر پنجم (B _۵)
D _{۱۰} (mm)	۲٫۱	۴٫۵	۸٫۲	۱۶٫۹	۳۵٫۲
D _{۳۰} (mm)	۲٫۴	۵٫۳	۸٫۸	۲۰٫۹	۴۱٫۵
D _{۵۰} (mm)	۲٫۸	۶٫۰	۹٫۴	۲۴٫۱	۴۸٫۲
D _{۶۰} (mm)	۲٫۹	۶٫۵	۱۰٫۱	۲۷٫۱	۵۳٫۱
ضریب یکنواختی	۱٫۳	۱٫۴	۱٫۲	۱٫۶	۱٫۰۳
ضریب انحنای	۰٫۹۴	۰٫۹۶	۰٫۹	۰٫۹۵	۰٫۹۹



شکل ۱. دانه‌بندی رسوب‌های درشت‌دانه و ریزدانه‌ای استفاده شده در پژوهش حاضر.

روانی و شاخص خمیری به ترتیب ۲۹، ۲۰ و ۵۱ درصد به دست آمد. مشخصات رسوب‌های درشت‌دانه نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده

آزمایش‌های فرسایش با استفاده از فلوم دایره‌ای موجود در آزمایشگاه تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد با عرض ۳۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. قطرهای داخلی، خارجی و متوسط فلوم به ترتیب ۱٫۳، ۱٫۹ و ۱٫۶ متر بوده است. فلوم موجود از ورق گالوانیزه با پنجره‌های پلکسی‌گلس ساخته شده و یک درپوش از جنس پلکسی‌گلس با قطر ۱٫۶ متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده است، که از دیواره‌های فلوم ۲ سانتی‌متر فاصله دارد و قابلیت تنظیم برای قرارگیری بر روی سطح آب فلوم با عمق‌های مختلف را دارد. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا مجهز به اینورتر بود، که قادر به چرخش فلوم و درپوش با سرعت چرخش قابل تنظیم است. ضمن این‌که دستگاه اشاره شده، قابلیت چرخش فلوم و درپوش در هر جهت دلخواه را فراهم کرده است. بر روی دیواره‌ی فلوم ۳۲ عدد شیر نمونه‌گیری در ۴ موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵٫۳، ۱۰٫۵، ۱۵٫۲، ۱۸٫۳، ۲۲٫۲، ۲۶٫۸، ۳۰٫۵ و ۳۴ سانتی‌متر از کف جهت سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب تعبیه شده است. شکل ۲، نمای شماتیک و قسمت‌های مختلف فلوم دایره‌ای موجود را نشان می‌دهد.

آزمایش‌های مختلف انجام شده بر روی فلوم دوار اشاره شده نشان می‌دهد زمانی که درپوش و فلوم برعکس یکدیگر بچرخند و نسبت سرعت چرخش درپوش

تأثیر پارامترهای شیمیایی، بیولوژیکی، ویژگی فیزیکی رسوب‌ها، شرایط تحکیم، آشفتگی جریان و غیره بوده و در معادله‌های انتقال رسوب‌های چسبیده، پارامتر تله‌اندازی و تأثیر آن در فرایندهای فرسایش و نه‌نشینی رسوب‌های چسبیده در شرایط هیدرولیکی ثابت، کمتر بررسی شده است. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی پدیده‌ی فرسایش رسوب‌های چسبیده در حضور رسوب‌های بستر با استفاده از فلوم دایره‌ای پرداخته شده است؛ تا بر این اساس بتوان تأثیر تله‌اندازی رسوب‌ها را در پارامترهای مهم فرایند فرسایش، نظیر تنش برشی بحرانی و نرخ فرسایش ارزیابی کرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تهیه رسوب

برای رسیدن به اهداف پژوهش حاضر، احتیاج به رسوب‌های ریزدانه و درشت‌دانه است. رسوب‌های مورد نیاز پژوهش حاضر از بستر و کناره‌های رودخانه‌ی ارمند، که از حوضه‌ی کارون شمالی سرچشمه می‌گیرد و در نهایت به سد کارون ۴ می‌ریزد، جمع‌آوری و تهیه شده است. پس از جداسازی رسوب‌های درشت‌دانه به منظور تهیه رسوب‌های ریزدانه، باقی‌مانده‌ی رسوب‌ها در آب حل و سپس از الک شماره‌ی ۲۰۰ استاندارد ASTM عبور داده شدند. رسوب‌های عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ با قطر ۰٫۷۵ میلی‌متر بر اساس تعاریف در گروه رسوب‌های رس و سیلت قرار می‌گیرد، که خاصیت چسبندگی نیز دارند.

رسوب‌های درشت‌دانه نیز بر اساس تقسیم‌بندی اتحادیه‌ی ژئوفیزیک آمریکا، در محدوده‌ی شن و قلمه‌سنگ (اندازه‌ی بین ۲ تا ۶۴ میلی‌متر) و در ۵ محدوده‌ی بسیار ریز (B_۱) با قطر متوسط بین ۲ تا ۴ میلی‌متر، محدوده‌ی ریز (B_۲) با قطر متوسط بین ۴ تا ۸ میلی‌متر، محدوده‌ی متوسط (B_۳) با قطر متوسط ۸ تا ۱۶ میلی‌متر، محدوده‌ی درشت (B_۴) با قطر متوسط بین ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متر و محدوده‌ی خیلی درشت (B_۵) با قطر متوسط بین ۳۲ تا ۶۴ میلی‌متر جداسازی شدند. رسوب‌های درشت‌دانه به گونه‌ی انتخاب شدند که دانه‌بندی یکنواخت داشته باشند (ضریب یکنواختی کمتر از ۴ و ضریب انحنای کمتر از ۱٫۵). در شکل ۱، دانه‌بندی رسوب‌های استفاده شده ارائه شده است.

بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری، رسوب‌های ریزدانه با قطر متوسط ۰٫۱۴ میلی‌متر، حاوی ۶۳٪ رس و ۳۷٪ سیلت بودند. حدود اتربرگ برای رسوب‌ها بر اساس استاندارد ASTM-D۴۲۳ مشخص شد؛ که بر اساس آن، حد خمیری، حد

Archive of SID

در نظر گرفته شد و پس از گذشت زمان تحکیم، برای بررسی تنش برشی آستانه‌ی فرسایش و نرخ فرسایش، فلوم و درپوش با کمترین سرعت درخلاف جهت یکدیگر و بر اساس یافته‌های خواستار و همکاران (۲۰۱۸) [۲۱] با نسبت چرخش ۱/۱ به حرکت درآمدند.

اگر سرعت و تنش اعمال شده از تنش برشی آستانه‌ی فرسایش کمتر باشد، رسوب‌ها بدون تغییر و در بستر باقی می‌مانند؛ اما اگر بیشتر باشد، رسوب‌ها شروع به فرسایش و معلق شدن می‌کنند. در حالت دوم، زمان اعمال تنش برشی تا رسیدن به یک حالت تعادل به طول می‌انجامد پس از آن سرعت و تنش برشی دوم و به همین ترتیب تنش‌های بعدی اعمال می‌شوند. در آزمایش‌ها با بستر درشت‌دانه پس از پایان یافتن هر آزمایش، فلوم کاملاً تخلیه و پس از شست و شوی کامل رسوب‌های بستر، شرایط برای بسترهای دیگر فراهم می‌شد. زمان اعمال هر سرعت یک ساعت در نظر گرفته شد، که بر این اساس، برای انجام هر آزمایش ۵ ساعت زمان نیاز بود. جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی جریان در طول آزمایش فرسایش را نشان می‌دهد. به منظور سنجش غلظت رسوب‌های معلق، هر ۱۵ دقیقه یک‌بار نمونه‌گیری رسوب انجام شد. در هر زمان از عمق‌های ۵/۲، ۸/۳، ۱۲/۲ و ۱۶/۸ سانتی‌متری بستر و ۴ موقعیت فلوم نمونه‌گیری به عمل آمد. سپس با خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوب‌های معلق در هر زمان با توجه به فاصله‌ی قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

در ادامه، به منظور تعیین متوسط سرعت و تنش برشی جریان برای حالت‌های مختلف بستر از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) استفاده شد. به همین منظور نوسان‌های سرعت به ترتیب در ۵ مقطع عمودی و ۳ مقطع افقی با فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شدند. در نهایت بر اساس معادله‌ی تنش رینولدز برای سرعت‌های مختلف چرخش فلوم و حالت‌های گوناگون بستر، تنش برشی محاسبه شد. جدول ۲، شرایط هر یک از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. پارامترهای هیدرولیکی

در شکل ۳، تغییرات سرعت متوسط جریان برای حالت‌های مختلف بستر و در برابر مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش مشاهده می‌شود، که مطابق آن به ازاء اعمال یک نیروی ثابت به سیال (سرعت چرخش فلوم و درپوش)، حضور رسوب‌های بستر موجب کاهش سرعت متوسط جریان نسبت به بستر صاف شده است. همچنین مشاهده می‌شود که برای بستر حاوی رسوب‌های درشت‌دانه، افزایش قطر رسوب‌ها موجب کاهش سرعت متوسط جریان می‌شود. حضور رسوب‌های بستر موجب ایجاد تلاطم و آشفتگی در بالای ذرات بستر و تشکیل جریان آرام در بین آنها می‌شود. این آشفتگی و انتقال از حالت جریان آرام به آشفتگی، تغییر ساختار سرعت جریان را به همراه دارد، که در مقادیر آن نیز تأثیرگذار است؛ و نیز قابل مشاهده است که اختلاف مقادیر سرعت در بسترهای متفاوت با افزایش قطر ذرات کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند با افزایش نیروی وارده بر سیال، اختلاف سرعت جریان در بین بسترهای متفاوت، روند افزایشی دارد.

تغییرات تنش برشی جریان در حالت‌های مختلف بستر در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن تأثیر رسوب‌های بستر در تغییرات تنش برشی، جریان الگویی کاملاً متفاوت با مقادیر سرعت دارد. به گونه‌ی که نتایج نشان می‌دهند، افزایش اندازه‌ی ذرات بستر موجب افزایش تنش برشی جریان می‌شود. بر این اساس کمترین



شکل ۲. اجزاء فلوم دایره‌یی.

به فلوم ۱/۱ باشد، پروفیل سرعت در فلوم دایره‌یی مشابه کانال‌های باز و به صورت لگاریتمی است. [۲۱] رابطه‌ی سرعت متوسط و تنش برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش برای فلوم مذکور در حالت بستر صاف به صورت روابط ۳ و ۴ است:

$$V = 0.2085 \ln(\omega) - 0.0556 \quad R^2 = 0.998 \quad (3)$$

$$\tau = 0.0254 \omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.999 \quad (4)$$

که در آن، V سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، τ تنش برشی جریان (نیوتن بر مترمربع) و ω مجموع سرعت چرخشی رینگ و فلوم (دور بر دقیقه) هستند.

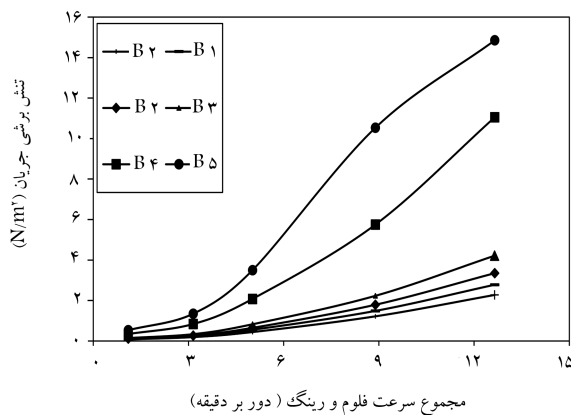
۳.۲. مراحل انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های فرسایش رسوب‌های ریزدانه برای غلظت اولیه‌ی ۵۰ گرم بر لیتر، ۵ سرعت جریان (اختلاف دور فلوم و درپوش) و در ۶ حالت بستر انجام شد. بسترهای مورد نظر، شامل: بستر صاف (B_0) و ۵ بستر حاوی رسوب‌های درشت‌دانه (B_1 الی B_5) بودند. در پژوهش حاضر، منظور از بستر صاف، بستر فلوم با جنس گالوانیزه و بدون رسوب‌های بستر است.

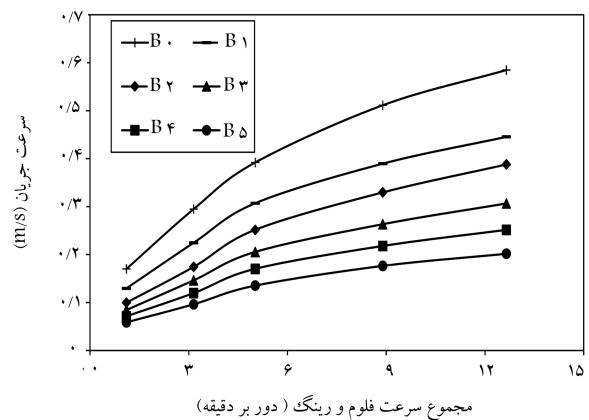
عمق رسوب‌های درشت‌دانه در کف فلوم با توجه به قطر ذرات ۱۰ سانتی‌متر ($SD > 2d_{50}$) در نظر گرفته شد. همچنین به منظور ثابت بودن شرایط هیدرولیکی و نمونه‌گیری از شیرهای مشابه در هر دو حالت از بستر، ورقه‌ی فلزی از جنس گالوانیزه در ۱۰ سانتی‌متری از کف فلوم برای آزمایش‌های بستر صاف نصب شد. غلظت اولیه‌ی رسوب‌ها با توجه به حجم سیال در فلوم متناظر با ۲۰ سانتی‌متر عمق تهیه و پس از مخلوط کردن با همزن الکتریکی وارد فلوم در حال حرکت شد. پس از ریختن رسوب‌ها در فلوم دایره‌یی، برای مخلوط شدن کامل رسوب‌ها و خرد شدن کامل فلوک‌ها، فلوم و درپوش به مدت ۳۰ دقیقه برخلاف جهت هم به چرخش درآمدند. پس از مخلوط شدن کامل رسوب‌ها، با توقف کامل فلوم و درپوش، اجازه‌ی ته‌نشینی به رسوب‌های معلق داده شد. زمان ته‌نشینی و تحکیم رسوب‌ها ۲۴ ساعت

جدول ۲. زمان و تنش برشی جریان در آزمایش‌های فرسایش.

تنش برشی (N/m ²)	سرعت جریان (m/s)	نام آزمایش	قطر متوسط (mm)	نام بستر	سرعت فلورم و درپوش
۰٫۰۸	۰٫۱۷	B _۰ V _۱	-	B _۰	
۰٫۱۰	۰٫۱۳	B _۱ V _۱	۲٫۷۵	B _۱	
۰٫۱۲	۰٫۱۰	B _۲ V _۱	۶٫۰۳	B _۲	سرعت فلورم: ۰٫۴ (m/s)
۰٫۱۴	۰٫۰۸	B _۳ V _۱	۹٫۴	B _۳	سرعت درپوش: ۰٫۵ (m/s)
۰٫۳۴	۰٫۰۷	B _۴ V _۱	۲۴٫۱	B _۴	
۰٫۵۳	۰٫۰۶	B _۵ V _۱	۴۸٫۲	B _۵	
۰٫۱۹	۰٫۲۹	B _۰ V _۲	-	B _۰	
۰٫۲۴	۰٫۲۲	B _۱ V _۲	۲٫۷۵	B _۱	
۰٫۲۷	۰٫۱۷	B _۲ V _۲	۶٫۰۳	B _۲	سرعت فلورم: ۰٫۱۳ (m/s)
۰٫۳۴	۰٫۱۵	B _۳ V _۲	۹٫۴	B _۳	سرعت درپوش: ۰٫۱۴ (m/s)
۰٫۸۴	۰٫۱۲	B _۴ V _۲	۲۴٫۱	B _۴	
۱٫۳۵	۰٫۱۰	B _۵ V _۲	۴۸٫۲	B _۵	
۰٫۴۴	۰٫۳۹	B _۰ V _۳	-	B _۰	
۰٫۵۶	۰٫۳۱	B _۱ V _۳	۲٫۷۵	B _۱	
۰٫۶۵	۰٫۲۵	B _۲ V _۳	۶٫۰۳	B _۲	سرعت فلورم: ۰٫۲ (m/s)
۰٫۸۳	۰٫۲۱	B _۳ V _۳	۹٫۴	B _۳	سرعت درپوش: ۰٫۳۹ (m/s)
۲٫۰۸	۰٫۱۷	B _۴ V _۳	۲۴٫۱	B _۴	
۳٫۵۰	۰٫۱۴	B _۵ V _۳	۴۸٫۲	B _۵	
۱٫۲۲	۰٫۵۱	B _۰ V _۴	-	B _۰	
۱٫۴۹	۰٫۳۹	B _۱ V _۴	۲٫۷۵	B _۱	
۱٫۷۹	۰٫۳۳	B _۲ V _۴	۶٫۰۳	B _۲	سرعت فلورم: ۰٫۳۵ (m/s)
۲٫۲۳	۰٫۲۶	B _۳ V _۴	۹٫۴	B _۳	سرعت درپوش: ۰٫۳۹ (m/s)
۵٫۷۵	۰٫۲۲	B _۴ V _۴	۲۴٫۱	B _۴	
۱۰٫۵۴	۰٫۱۸	B _۵ V _۴	۴۸٫۲	B _۵	
۲٫۲۸	۰٫۵۸	B _۰ V _۵	-	B _۰	
۲٫۷۸	۰٫۴۵	B _۱ V _۵	۲٫۷۵	B _۱	
۳٫۳۵	۰٫۳۹	B _۲ V _۵	۶٫۰۳	B _۲	سرعت فلورم: ۰٫۵ (m/s)
۴٫۲۲	۰٫۳۱	B _۳ V _۵	۹٫۴	B _۳	سرعت درپوش: ۰٫۵۶ (m/s)
۱۱٫۰۵	۰٫۲۵	B _۴ V _۵	۲۴٫۱	B _۴	
۱۴٫۸۵	۰٫۲۰	B _۵ V _۵	۴۸٫۲	B _۵	



شکل ۴. تغییرات تنش برشی جریان در بسترهای مختلف.



شکل ۳. تغییرات سرعت متوسط جریان در بسترهای مختلف.

Archive of SID

B_5 الی B_0 به ترتیب ۴۷، ۱۰۸، ۶۱، ۴۴، ۴۴، ۳۴ و ۱۹ گرم بر لیتر بوده است. با توجه به غلظت رسوب‌های معلق در پایان آزمایش، کاهش چشمگیر میزان فرسایش در بستر رسوب‌های درشت‌دانه نسبت به بستر صاف را می‌توان ناشی از تله‌اندازی رسوب‌های معلق در بین رسوب‌های درشت‌دانه در هنگام ته‌نشینی دانست، که فرصت دوباره معلق شدن پیدا نمی‌کنند. این در حالی است که به ازاء نیروی ثابت، تنش برشی در بسترهای حاوی رسوب بیشتر است.

در بررسی پدیده‌ی فرسایش در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه مشخص است با افزایش قطر ذرات بستر، مقدار فرسایش کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان ناشی از تخلخل بیشتر بستر در رسوب‌های درشت‌دانه جستجو کرد، که تله‌اندازی بیشتر رسوب‌ها را به همراه دارد.

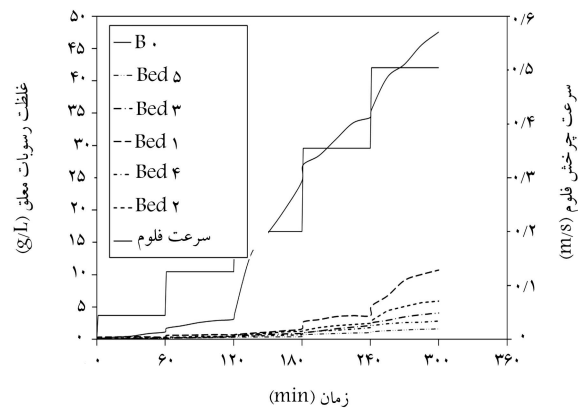
نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه، تا سرعت چهارم فلوم، مقدار فرسایش ناچیز و پس از آن به صورت ملایم، غلظت رسوب‌های معلق افزایش یافته است. به نظر می‌رسد فرسایش در این حالت از نوع سطحی بوده و فقط رسوب‌های ته‌نشین شده بر روی لایه سطحی رسوب‌های بستر فرسایش یافته‌اند.

در ادامه، به منظور بررسی بیشتر، تغییرات غلظت رسوب‌های فرسایش یافته در برابر تنش برشی جریان، به صورت مجزا برای هر یک از حالت‌های بستر تهیه شدند، که نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌شود، و مطابق آن برای بستر صاف و بستر اول ($D_{50} = 2/1 \text{mm}$)، اختلاف چندانی بین میزان تنش‌های برشی بستر وجود ندارد؛ اما قابل مشاهده است که تفاوت بسیار چشمگیری بین غلظت رسوب‌های فرسایش یافته ایجاد شده است. در جدول ۳، میزان افزایش تنش برشی بستر در سرعت آخر چرخش فلوم و همچنین میزان غلظت رسوب‌های فرسایش یافته در پایان آزمایش نسبت به بستر صاف ارائه شده است. قابل مشاهده است که در بستر اول، میزان تنش برشی حدود ۲۲٪ نسبت به بستر صاف افزایش یافته است؛ این در حالی است که غلظت رسوب‌های فرسایش یافته، ۷۸٪ کمتر از بستر صاف بوده است. برای بستر پنجم، میزان تنش برشی ۵/۵ برابر بیشتر از بستر صاف بوده است، با این حال میزان فرسایش رسوب‌ها حدود ۹۶٪ بستر صاف کاهش یافته است.

۳.۳. تنش برشی بحرانی فرسایش

برآورد تنش برشی آستانه‌ی فرسایش بر اساس افزایش غلظت رسوب‌های معلق صورت گرفته است. در حقیقت با توجه به فرصت کافی برای ته‌نشینی رسوب‌ها، در شروع آزمایش‌های فرسایش، غلظت رسوب‌های معلق بسیار نزدیک به صفر است. از این رو در پژوهش حاضر با اندازه‌گیری غلظت رسوب‌های معلق از شروع آزمایش‌های فرسایش، تنش برشی که غلظت رسوب‌ها را به ۱ گرم بر لیتر رسانده است، به عنوان تنش برشی آستانه‌ی فرسایش در نظر گرفته شد. بر همین اساس، مقدار متوسط غلظت رسوب‌های معلق در هر تنش برشی به دست آمد و رابطه‌ی بین مقادیر اخیر و تنش برشی جریان برای بسترهای مختلف برقرار شد، که نتایج آن در شکل ۷ و جدول ۴ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۴ مشخص است که رسوب‌های بستر موجب افزایش تنش برشی آستانه‌ی فرسایش نسبت به بستر صاف شده‌اند. بر این اساس می‌توان بیان داشت که در بستر با رسوب‌های درشت‌دانه، در جریان با آشفتگی بیشتر، همچنان شرایط برای ته‌نشینی رسوب‌ها فراهم است. نتایج نشان می‌دهند افزایش قطر رسوب‌های بستر، موجب افزایش تنش برشی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌ها شده است، به طوری که کمترین مقدار تنش مربوط به بستر اول و بیشترین آن مربوط به



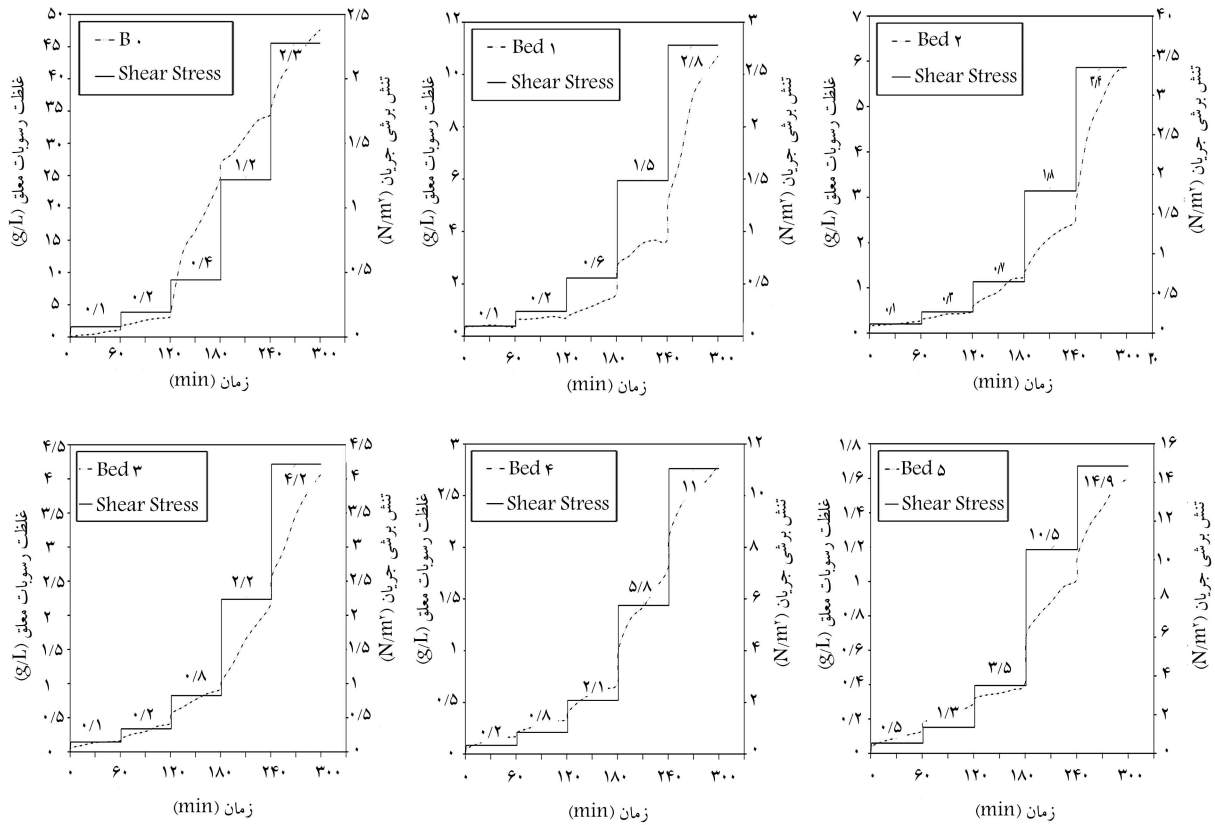
شکل ۵. تغییرات تنش برشی جریان در بسترهای مختلف.

تنش برشی مربوط به بستر صاف و پس از آن بستر (B_1) است و بیشترین تنش برشی در بستر (B_5) اتفاق می‌افتد. جریان آشفته ناشی از زبری بستر، مکش جریان سطحی به داخل رسوب‌ها را به همراه دارد، که موجب تشکیل گردابه‌های جریان می‌شود. در منطقه‌ی لایه‌ی مرزی ایجاد شده ناشی از ذرات بستر، که در اغلب مطالعات هیدرولیکی و مهندسی رودخانه مشاهده می‌شود، ساختارهای منسجم مختلفی تشکیل می‌شوند. مشهورترین نوع ساختارهای منسجم اشاره شده، جهش سریع جریان نزدیک بستر به سمت بالا و جاروب جریان با سرعت بالا به سمت بستر (مشهور به پدیده‌ی جهش و جاروب 1°) است. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که پدیده‌های جهش و جاروب در کنار یکدیگر، ناشی از وجود ساختار منسجم بزرگ‌تری است که به گردابه‌ی سنجاکی 11 مشهور است. ایجاد چنین پدیده‌هایی در بسترهای زبر، افزایش تنش برشی جریان را به همراه دارد. [۲۲]

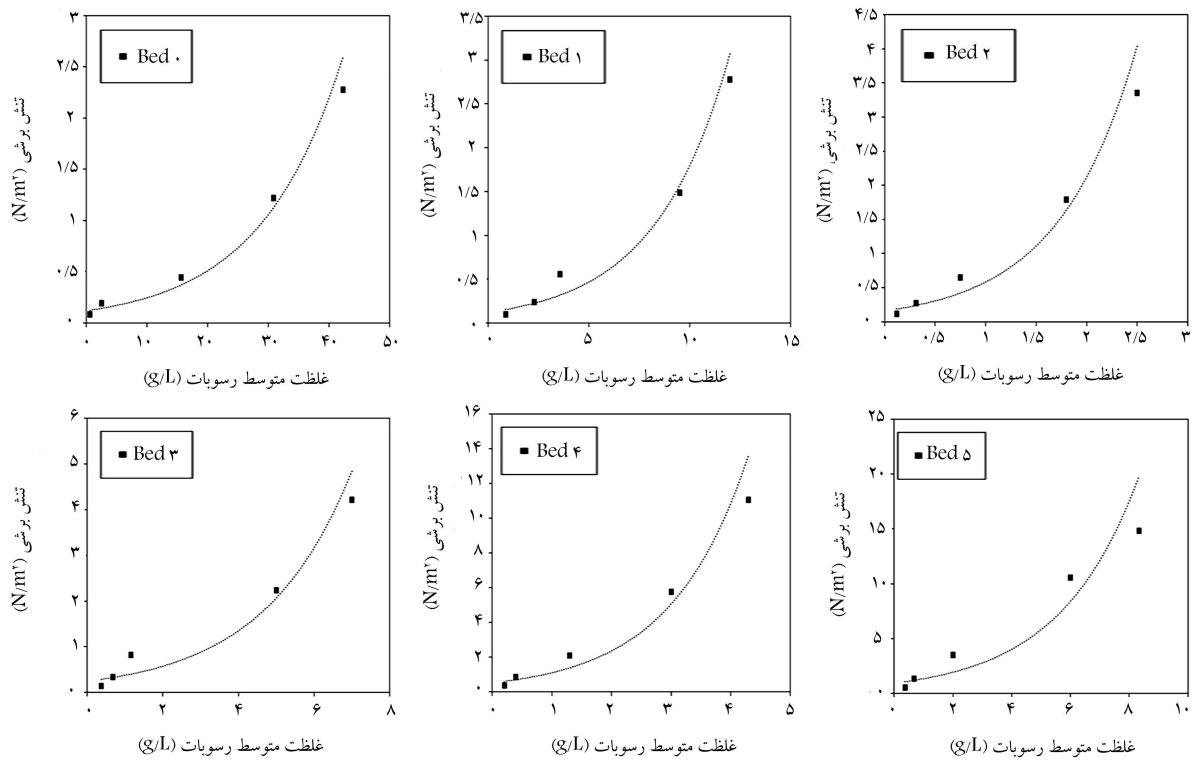
۲.۳. تغییرات غلظت رسوب‌های فرسایشی

به منظور بررسی تأثیر رسوب‌های بستر در نرخ و تنش برشی بحرانی فرسایش رسوب‌های چسبیده، تغییرات زمانی غلظت در برابر سرعت چرخش فلوم ترسیم شد، که نتایج آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن در تمام حالت‌های بستر، با افزایش سرعت چرخش فلوم، غلظت رسوب‌های معلق نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، افزایش نیروی وارد بر جریان، موجب افزایش فرسایش رسوب‌های ته‌نشین شده می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند در بستر صاف، غلظت رسوب‌های فرسایش یافته بسیار بیشتر از فرسایش در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه است. در بستر صاف، چرخش فلوم با کمترین سرعت (۹/۰ دور بر دقیقه)، افزایش غلظت رسوب‌های معلق را به همراه دارد. همچنین مشخص است پس از اعمال سرعت سوم، غلظت رسوب‌ها به صورت ناگهانی افزایش یافته و در سرعت‌های بیشتر نیز روند افزایشی ادامه داشته است. چرا که در تنش‌های بزرگ‌تر، مقاومت ذرات رسوب ته‌نشین شده کمتر از قدرت آشفتگی جریان است، که این امر موجب فرسایش توده‌ی و جرمی از سطح بستر می‌شود. فرسایش اخیر در مقادیر بزرگ از تنش برشی (سرعت) رخ می‌دهد و مشخصه‌ی آن جدا شدن توده‌های بزرگ رسوب از بستر است. وینترورپ 12 و همکاران (۲۰۱۲)، [۲۳] فرسایش سطحی و توده‌ی را تابعی از تنش برشی متوسط بستر می‌دانند. برخی دیگر از پژوهشگران، [۲۴-۲۷] انواع فرسایش را در مطالعات خود مشاهده کرده و روابطی نیز پیرامون این موضوع ارائه داده‌اند. [۲۳]



شکل ۶. تغییرات غلظت رسوب‌های فرسایش یافته در بسترهای مختلف.



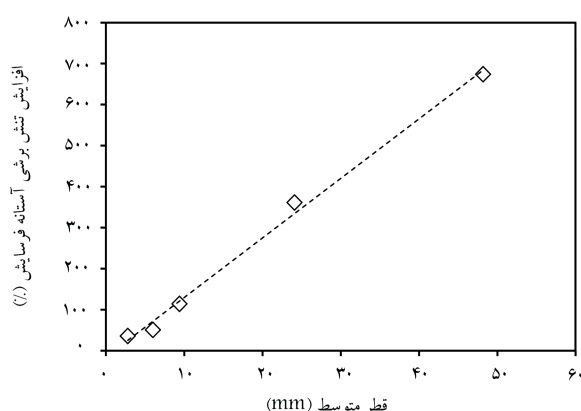
شکل ۷. رابطه‌ی تنش برشی و متوسط غلظت رسوب‌های فرسایش یافته در بسترهای مختلف.

جدول ۳. میزان تغییرات تنش برشی و غلظت رسوب‌های فرسایشی در بستر حاوی رسوب‌های درشت‌دانه نسبت به بستر صاف (درصد).

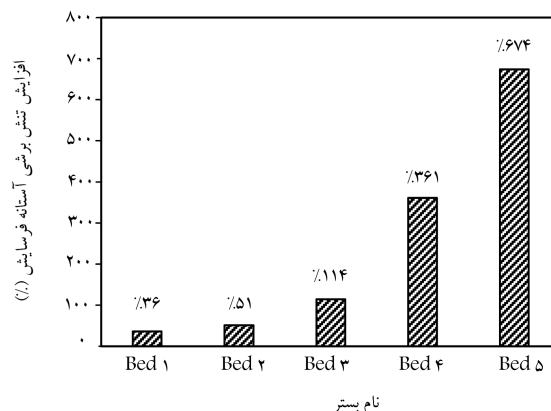
پارامتر	بستر ۱ $D_{50} = 2/8$	بستر ۲ $D_{50} = 6/0$	بستر ۳ $D_{50} = 9/4$	بستر ۴ $D_{50} = 24/1$	بستر ۵ $D_{50} = 48/2$
افزایش تنش برشی جریان (%)	۲۲	۴۷	۸۵	۳۸۴	۵۵۲
کاهش غلظت رسوب‌های فرسایشی (%)	-۷۸	-۸۷	-۹۱	-۹۴	-۹۶

جدول ۴. تنش برشی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌های مورد مطالعه.

پارامتر	بستر صاف	بستر ۱ $D_{50} = 2/8mm$	بستر ۲ $D_{50} = 6/0mm$	بستر ۳ $D_{50} = 9/4mm$	بستر ۴ $D_{50} = 24/1mm$	بستر ۵ $D_{50} = 48/2(mm)$
تنش برشی در آستانه‌ی فرسایش (N/m^2)	۰٫۱۲	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۲۶	۰٫۵۵	۰٫۹۲



ب) ارتباط درصد افزایش تنش برشی بحرانی آستانه‌ی فرسایش در برابر قطر متوسط رسوب‌های بستر.



الف) درصد افزایش تنش برشی بحرانی آستانه‌ی فرسایش در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه نسبت به بستر صاف؛

شکل ۸. تغییرات تنش برشی بحرانی آستانه فرسایش در برابر تغییرات بستر و قطر متوسط رسوبات.

تحکیم ۲۴ ساعت، معلق خواهند شد. این در حالی است که در بسترهای حاوی رسوب‌های درشت‌دانه، مقادیری برای تنش برشی آستانه‌ی فرسایش کامل نمی‌توان متصور بود؛ چرا که شرایط جریان در فضای بین رسوب‌های بستر، بسیار متفاوت از آشفتگی جریان در بالای آنهاست و این موضوع شرایط مناسبی برای ته‌نشینی رسوب‌های ریزدانه و مقاومت آنها در برابر دوباره معلق شدن فراهم کرده است.

۴.۳. نرخ فرسایش

برای محاسبه‌ی نرخ فرسایش از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است، که در آن از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب فرسایش مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوب‌ها بر فاصله‌ی زمانی دو نمونه‌گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط فرسایش در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم به دست می‌آید:

$$Q_E = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (6)$$

که در آن، Q_E نرخ فرسایش (gr/m^2min)، C غلظت رسوب‌های معلق (گرم بر لیتر)، V حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)، t_i زمان (دقیقه) و A مساحت بستر فلوم (m^2) است.

بر اساس نتایج به دست آمده، نرخ فرسایش برای بسترهای مختلف و در هر تنش برشی، محاسبه و در شکل ۹ مشاهده می‌شود. با توجه به مقادیر نرخ فرسایش

بستر پنجم بوده است. در پژوهش حاضر، تنش برشی آستانه‌ی فرسایش برای بستر صاف ۰٫۱۲ نیوتن بر مترمربع به دست آمده است.

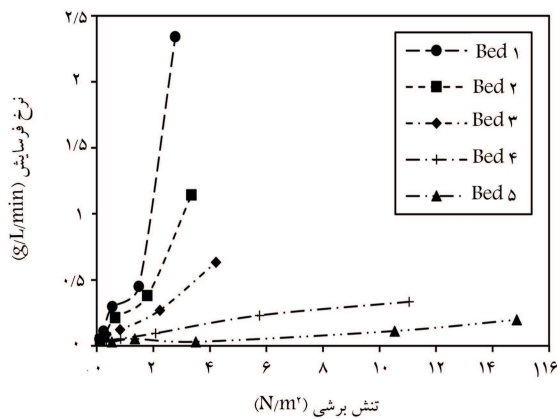
در شکل ۸ - الف، مقادیر افزایش تنش برشی بحرانی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌ها در بسترهای زیر نسبت به بستر صاف مشاهده می‌شود، که مطابق آن، تنش برشی بحرانی فرسایش برای بسترهای B_1 الی B_5 به ترتیب ۳۶، ۵۱، ۱۱۴، ۳۶۱ و ۶۷۴ درصد افزایش یافته است.

در ادامه، به بررسی ارتباط میزان افزایش تنش برشی بحرانی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌ها با قطر متوسط ذرات بستر پرداخته شده است، که نتایج در رابطه‌ی ۵ و شکل ۸ - ب ارائه شده است. در رابطه‌ی ۵، PCE درصد تغییرات تنش برشی بحرانی و D_{50} قطر متوسط ذرات رسوب بستر بر حسب میلی‌متر است. نتایج شکل ۸ - ب و پارامترهای آماری رابطه‌ی ۵، حاکی از دقت مناسب رابطه‌ی اخیر جهت تخمین میزان تغییرات تنش برشی بحرانی آستانه‌ی فرسایش رسوب‌ها نسبت به بستر صاف است.

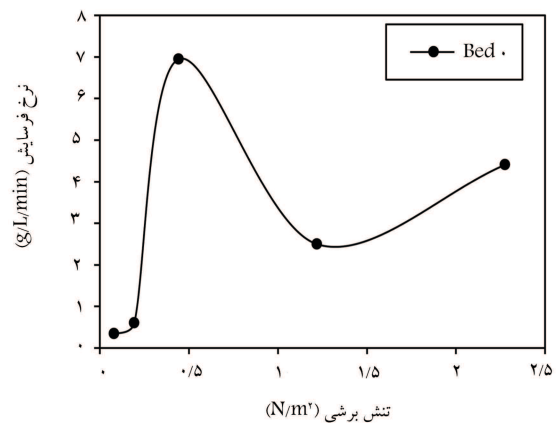
$$Pcs(\%) = 0.1452 D_{50} - 0.1538 R^2 = 0.99 \quad (5)$$

$$err = 15.4\% \quad RMSE = 0.28$$

با توجه به میزان غلظت رسوب‌ها در پایان آزمایش فرسایش بستر صاف، میزان تنش برشی فرسایش کامل رسوب‌ها در پژوهش حاضر، ۴٫۵۴ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. می‌توان انتظار داشت در تنش برشی اخیر، تمام رسوب‌های ته‌نشین شده با دوری



ب) تغییرات نرخ فرسایش در بسترهای حاوی رسوب های درشت دانه.



الف) تغییرات نرخ فرسایش در بستر صاف؛

شکل ۹. تغییرات نرخ فرسایش در بسترهای مختلف.

حتی در تنش های بزرگ تر از مقاومت ذرات رسوبی، اجازه ی فرسایش به آنها داده نمی شود.

۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر رسوب های درشت دانه ی بستر در فرایند فرسایش رسوب های چسبیده پرداخته شده است. نتایج نشان می دهند علی رغم این که رسوب های درشت دانه موجب افزایش تنش برشی جریان نسبت به بستر صاف می شوند، اما با وجود این، کاهش فرسایش رسوب های چسبیده را به همراه دارند. این موضوع را می توان با تله اندازی رسوب های ریزدانه در میان فضای خالی رسوب های بستر مرتبط دانست. به طوری که رسوب های بستر اجازه ی دوباره معلق شدن رسوب های چسبیده ی نه نشین شده در بستر را نمی دهند. در بستر اول، میزان تنش برشی حدود ۲۲٪ نسبت به بستر صاف افزایش یافته است؛ این در حالی است که غلظت رسوب های فرسایش یافته ۷۸٪ کمتر از بستر صاف بوده است. همچنین برای بستر پنجم، میزان تنش برشی ۵/۵ برابر بیشتر از بستر صاف بوده است، با این حال میزان فرسایش رسوب ها حدود ۹۶٪ بستر صاف کاهش یافته است.

در پژوهش حاضر، تنش برشی آستانه ی فرسایش برای بستر صاف ۱۲/۰ نیوتن بر مترمربع به دست آمد، که نتایج نشان می دهند حضور رسوب های بستر موجب افزایش تا ۷/۶ برابری تنش برشی آستانه ی فرسایش رسوب های چسبیده شده است. تله اندازی رسوب های چسبیده در فضای میان رسوب های درشت دانه ی بستر باعث می شود رسوب های ریزدانه ی در دسترس کاهش یابد. بر این اساس فرایند فرسایش و نرخ آن در بسترهای حاوی رسوب های درشت دانه نسبت به بستر صاف به صورت چشمگیری کاهش می یابد.

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان می دهند که رفتار فرسایش رسوب های چسبیده در شرایط رودخانه یی به ویژه رودخانه های کوهستانی که حاوی رسوب های درشت دانه ی بستر هستند، بسیار متفاوت با نتایج آزمایشگاهی است، که نقش رسوب های بستر در تله اندازی رسوب های ریزدانه را در نظر نگرفته اند. از این رو به منظور انجام مطالعات هیدرولیک رسوب در رودخانه های کوهستانی، باید در استفاده از نتایج و روابط تجربی که در فلوم های آزمایشگاهی بدون شبیه سازی شرایط رودخانه به دست آمده اند، احتیاط کرد.

در بستر صاف و به منظور مشاهده ی جزئیات بیشتر، نتایج نرخ فرسایش در بستر صاف به صورت مجزا از دیگر بسترها نمایش داده شده است. برای بستر صاف در شکل ۹ - الف مشاهده می شود که در سرعت سوم چرخش فلوم (۲/۰ متر بر ثانیه)، نرخ فرسایش به طور ناگهانی افزایش یافته است؛ این در حالی است که تفاوت چندانی بین مقادیر نرخ فرسایش در سرعت اول و دوم فلوم وجود ندارد. افزایش ناگهانی ایجاد شده حاکی از تغییر در نوع فرسایش است، به طوری که پس از فرسایش رسوب های سطحی، به دلیل استحکام پایین توده های رسوب، ادامه ی فرسایش به صورت جدایی توده های بزرگ رسوب اتفاق افتاده است. علت نزولی بودن نرخ فرسایش در سرعت چهارم را می توان این گونه توجیه کرد که توده های باقی مانده پس از فرسایش توده های رسوبی ضعیف تر در تنش برشی سوم، مقاومت بیشتری در برابر جریان دارند، که همین امر موجب روند نزولی نرخ فرسایش در بستر چهارم شده است؛ اما با افزایش سرعت چرخش فلوم، آشفتگی جریان بر مقاومت ذرات غلبه کرده و نرخ فرسایش در سرعت پنجم افزایش یافته است.

روند تغییرات نرخ فرسایش برای بسترهای حاوی رسوب های درشت دانه در شکل ۹ - ب مشاهده می شود. نتایج نشان می دهند که به طور کلی حضور رسوب های درشت دانه، نرخ فرسایش را نسبت به بستر صاف کاهش می دهد و همچنین با افزایش قطر رسوب های درشت دانه، علی رغم افزایش تنش برشی جریان، نرخ فرسایش کمتر است.

قابل مشاهده است بیشترین تغییرات نرخ فرسایش در بسترهای حاوی رسوب های درشت دانه مربوط به سرعت پنجم است، که روند اخیر در بسترهای ریز، صعودی تر بوده و با افزایش قطر ذرات بستر، روند مذکور شیب کمتری داشته است. بر این اساس در بسترهای اول تا سوم، افزایش تنش برشی می تواند نرخ فرسایش را نیز به دنبال داشته باشد. اما با توجه به افقی شدن نمودار نرخ فرسایش در بسترهای چهارم و پنجم، می توان بیان کرد که افزایش تنش برشی، تأثیری در نرخ فرسایش نخواهد داشت؛ چرا که به نظر می رسد کم بودن مقدار نرخ فرسایش در حالت های چهارم و پنجم از بستر، بیشتر از این که مربوط به آشفتگی جریان و مقاومت توده های رسوبی باشد، تابعی از وجود رسوب ها جهت فرسایش است. با توجه به مقادیر بزرگ تنش برشی در بسترهای حاوی رسوب های درشت دانه نسبت به بستر صاف می توان اظهار داشت تأثیر ذرات بستر در نرخ فرسایش رسوب های ریزدانه بیشتر به دلیل تله اندازی رسوب های چسبیده در میان ذرات بستر است، که

1. flocc
2. Krishnappan & Engel
3. Ravens
4. Krone
5. Lavelle
6. Glasbergen
7. Elbow River
8. Droppo
9. Armand River
10. sweep & ejection
11. hairpin vortex
12. Winterwerp

منابع (References)

1. Debnath, K. and Chaudhuri, S. "Cohesive sediment threshold: a review", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **16**(1), pp. 36 - 56 (2010).
2. Fedrico, M. "Flocculation dynamics of cohesive sediment", *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering of the Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology*, pp.136 (2005).
3. Milburn, D. and Krishnappan, B.G. "Modelling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River, Northwest Territories", *Canada, Paper presented at the 13th Northern Res., Basins/Workshop*, pp.19-24 (Aug., 2001).
4. Huang, J., Hilldate, R.C. and Greiman, B.P. "Erosion and sedimentation manual", *U.S. Department of the interior, United States Bureau of Reclamation* (2006).
5. Krestenitis, Y.N., Kombiadou, D.K. and Savvidis, Y.G. "Modelling the cohesive sediment transport in marine environment: the case of Theraikos Gulf", *Ocean Science*, **3**(1), pp. 91-104, (2007).
6. Huston, D. and Fox, J. "Clogging of fine sediment within gravel substrates: dimensional analysis and macro analysis of experiments in hydraulic flumes", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**, 04015015, pp.8 (2015).
7. Krishnappan, B.G. and Engel, P. "Entrapment of fines in coarse sediment beds. River Flow", *Ferreira, Alves, Leal and Cardoso (eds.), Taylor and Francis Group, London*, pp. 817-824 (2006).
8. Khastar Boroujeni, M., Khodashenas, S.R. and Samadi, H. "Experimental investigation of the effect of bed's coarse gravel on the deposition of cohesive sediment process", *Journal of Hydraulics*, **13**(3), pp. 83-93 (2018).
9. Amelia, V.C.M. and Teixeira, C.F.J. "Senhorinha. Teixeira, F.C.F.S. Physical characterization of estuarine sediments in the northern coast of Portugal", *Journal of Coastal Research*, **26**(2), pp. 301-311 (2010).
10. Giardino, A., Ibrahim, E., Adam, S. and et al. "Hydrodynamics and cohesive sediment transport in the Ijzer Estuary, Belgium: case steady", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ACSE)*, **135**(4), pp. 176-184 (2009).
11. Wang, Y.H. "The intertidal erosion rate of cohesive sediment: a case study from long island sound. estuarine", *Coastal and Shelf Science*, **56**(5-6), pp. 891-896 (2002).
12. Ravens, T.M. and Gschwend, P.M. "Flume measurement of sediment erodibility in boston harbor", *J. Hydraulic Eng., ACCE*, **125**(10), pp. 998-1005 (1999).
13. Krone, R.B. "Sedimentation revisited, in nearshore and estuarine cohesive sediment transport", *Coastal Estuarine Stud, edited by Mehta, A.J.*, **42**, pp. 108-125, AGU, Washington, D.C. (1999).
14. Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. and et al. "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles", *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**(12), pp. 1261-1267 (1998).
15. Lavelle, J.W., Mofjeld, H.O. and Baker, E.T. "An in situ erosion rate for a fine-grained marine sediment", *J. Geophys. Res.*, **89**(C4), pp. 6543-6552 (1984).
16. Parchure, T.M. and Mehta, A.J. "Erosion of soft cohesive sediment deposits", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **111**(10), pp. 1308-1326 (1985).
17. Ma, K.S. and Pierre, A.C. "Microstructure of kaolinite sediments made with unaged FeCl3", *Colloids Surfaces*, **4**(45), pp. 175-184 (1998).
18. Bong, C.H.J., Putuhena, F.J., Lau, T.L. and et l. "Effect of deposition thickness on critical shear Stress for incipient motion of sediments. conference paper", *The 3rd International Conference on Water Resources (ICWR2015), At Langkawi, Kedah, Malaysia* (Nov 2015).
19. Glasbergen, K. "The effect of coarse gravel on cohesive sediment entrapment in an annular flume", *presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the Degree of master of Science In Geography, Waterloo, Ontario, Canada*, pp.88 (2014).
20. Droppo, I.G., Andrea, L., Krishnappan, B.G. and et al. "Fine sediment dynamics: towards an improved understanding of sediment erosion and transport", *Journal of Soils and Sediments*, **15**, pp. 467-479 (2015).
21. Khastar-Boroujeni, M., Esmaili, K., Samadi-Boroujeni, H. and et al. "Wastewater effect on the deposition of cohesive sediment", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, pp.7 (2018).
22. Hutchins, N. and Marusic, I. "Evidence of very long meandering streamwise structures in the logarithmic region of turbulent boundary layers", *Journal of Fluid Mechanics*, **579**, pp. 1-28 (2007).
23. Winterwerp, J.C., Van Kestern, W.G.M., Van Prooijen, B. and et al. "A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds", *Journal of Geophysical Research*, **117**, pp.17 (2012).
24. Kron, R.B. *The Significance of Aggregate Properties to Transport Processes in Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, edited by Mehta, A.J. Springer, New York (1984).
25. Mehta A.J. *Review Notes on Cohesive Sediment Erosion*, In Coastal Sediments' 91. New York, ASCE, pp. 40-53 (1991).
26. Debnath, K. and Chaudhuri, S. "Cohesive sediment threshold: a review", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **16**(1), pp. 36-56 (2010).
27. Jacob, W. *Sand-mud Erosion from a Soil Mechanical Perspective*, PhD dissertation, Delft Univ of Technol, Delft, Netherlands, pp.241 (2011).