

بررسی آزمایشگاهی تنش برشی آستانه نهشته شدن رسوبات رسی - سیلتی در غلظت‌های مختلف

میلاد خواستار بروجنی^{۱*}، حسین صمدی بروجنی^۲ و کاظم اسماعیلی^۳

چکیده

بررسی چگونگی انتقال و نهشته شدن رسوبات چسبنده، به علت دخالت ماهیت شیمیایی و الکترومغناطیسی ذرات، پیچیدگی بسیاری دارد. یکی از پارامترهای مهم در انتقال این رسوبات، تعیین مقدار تنش برشی بحرانی نهشته شدن رسوبات معلق است. در این پژوهش از رسوبات رسی - سیلتی موجود در مخزن یک سد خاکی در حوالی شهرکرد استفاده شده است. آزمایش‌ها در مدل فلوم دایره‌ای انجام گرفت و برای این منظور سرعت و تنش برشی جریان در این فلوم با استفاده از سرعت‌سنج صوتی (ADV) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تنش برشی آستانه نهشته شدن رسوبات معلق ریزدانه مورد آزمایش برابر ۱/۰۱ نیوتن بر متر مربع و تنش برشی آستانه برای نهشته شدن کامل این رسوبات ۰/۰۳۸ نیوتن بر متر مربع به دست آمد و در نهایت معادلاتی برای محاسبه تنش برشی آستانه، غلظت تعادلی و درصد نهشته شدن ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی بحرانی، غلظت تعادلی، فلوم دایره‌ای، نرخ نهشتگی.

ارجاع: خواستار بروجنی م.، صمدی بروجنی ح. و اسماعیلی ک. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تنش برشی آستانه نهشته شدن رسوبات رسی - سیلتی در غلظت‌های مختلف. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳):۱۳۱-۱۳۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: Khastar1365@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۵/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۰۸

مقدمه

در این حالت توده‌ها به دلیل برخورد شدید ناشی از تنش برشی خرد می‌شوند.

نگرش کلاسیک نهشته شدن رسوبات چسبنده توسط کرون (۱۹۶۲)؛ مهتا (۱۹۷۳) و پارتندیس (۱۹۷۵) آغاز شد. مهتا و پارتندیس (۱۹۷۳) مطالعات آزمایشگاهی روی رفتار رسوبات چسبنده انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تنش برشی بستر، سرعت نهشته شدن، نوع رسوبات، عمق جریان، غلظت ذرات معلق و یون‌های الکتریکی تعیین کننده مقدار نهشته شدن ذرات است. نهشته شدن زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی کف کمتر از تنش برشی بحرانی باشد. توده‌هایی که دارای نیروی کافی برای مقابله در برابر تنش‌های برشی قوی جریان را دارند، در ناحیه نزدیک بستر نهشته خواهند شد. معمولاً تنش برشی که کل رسوبات معلق نهشته شوند، به عنوان تنش برشی بحرانی برای نهشته شدن تعریف می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ کریشناپان و میلیورن، ۲۰۰۱).

به طور کلی دو نوع نهشته شدن کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می‌شود. وقتی که تنش برشی کف کوچک‌تر از تنش برشی بحرانی است، نهشته شدن کامل انجام می‌شود و تمام ذرات رسوبی و توده‌ها نهشته می‌شوند. نهشته شدن جزئی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی کف بزرگتر از تنش برشی بحرانی برای نهشته شدن کامل و کوچک‌تر از تنش برشی آستانه نهشته شدن باشد. در این محدوده تنش برشی بستر، توده‌های نسبتاً قوی نهشته می‌شوند و توده‌های ضعیف به طور معلق باقی می‌مانند. در حال حاضر، تعیین تنش برشی بحرانی برای نهشته شدن کامل و جزئی قابل پیش‌بینی و مسلم نیست، اما دقت در مدل نهشته شدن کاملاً وابسته به مقدار صحیح آن است. آزمایش‌های بسیاری برای تعیین مقدار تنش برشی بحرانی برای نهشته شدن کامل رسوبات چسبنده انجام شده است. تنش برشی بحرانی دارای مقدار کوچکی است و به طور کلی مقدار $\frac{N}{m^2}$ ۰/۱ - ۰/۰۵ در آزمایش‌ها تعیین شده است (میلیورن و کریشناپان، ۲۰۰۳). صمدی و همکاران (۱۳۹۰) تنش برشی آستانه نهشته شدن در آزمایش‌ها با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، برای رسوبات با قطر متوسط ۰/۰۰۶ میلی‌متر به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۰/۹۴ و ۰/۹۸ نیوتن بر متر مربع به دست آوردند.

مطالعه دینامیک رسوبات چسبنده در سال‌های اخیر به دلیل نهشته شدن رسوبات در کانال‌های انتقال آب، دهانه‌های آبگیر رودخانه‌ها و ایجاد مشکلات زیادی از جمله هزینه زیاد لایروبی و تشکیل لجن در بندرگاه‌ها و همچنین مسایل زیست محیطی، مورد توجه قرار گرفته است. به طور کلی رسوبات به دو گروه، رسوبات چسبنده و غیرچسبنده تقسیم می‌شوند. رسوبات غیرچسبنده شامل شن و ماسه و رسوبات چسبنده شامل سیلت و رس است. رسوبات چسبنده از مواد آلی و کانی‌های غیرآلی تشکیل شده‌اند. کانی‌های غیرآلی شامل کانی‌های رسی است و مواد آلی از تجزیه گیاهان و حیوانات و باکتری‌ها به وجود می‌آیند. ذرات چسبنده با اندازه رس، دارای نیروهای قوی بین ذره‌های ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات هستند. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح ویژه (سطح در واحد حجم) شده و نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). نیروی بین ذره‌ای سبب می‌شود که ذرات به یکدیگر برخورد کرده و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر بدهند. این عمل را در اصطلاح فلوکوله شدن می‌گویند. این فرآیند باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی توده‌های رسوبی، از قبیل قطر ذرات، چگالی و سرعت نهشته شدن می‌شود. رفتار رسوبات چسبنده از پارامترها و فرآیندهای بسیاری تأثیر می‌پذیرد، که پیشگویی و تشریح این رسوبات را بسیار مشکل کرده است (صمدی، ۲۰۰۴).

کریشناپان (۲۰۰۶) با انجام آزمایش‌هایی در فلووم دایره‌ای و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری لیزری ذرات، برای رسوبات رودخانه‌ای^۱ مشاهده کرد که در کم‌ترین تنش برشی (۰/۰۸۸ پاسکال) اندازه متوسط ذرات با زمان کاهش یافته است. این بدان معنی است که توزیع ذرات در طول زمان ریزتر می‌شود و ذرات درشت‌تر نهشته می‌شوند. با افزایش تنش برشی بستر شکل متفاوت دیگری به وجود می‌آید و روند افزایشی اندازه ذرات با زمان بیانگر فلوکوله شدن رسوبات است. در این حالت اندازه متوسط ذرات در ابتدا با زمان افزایش یافته و سپس در این مرحله به مقدار یکنواخت می‌رسد. با افزایش مجدد تنش برشی (۰/۲۱ پاسکال)، اندازه متوسط توده‌های رسوبی کاهش می‌یابد.

جنس پلکسی گلاس با قطر ۱/۶ متر در داخل فلوم طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی متر فاصله دارد. برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، ۱۶ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی متر از کف تعبیه شده است. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش است که قابلیت حرکت در جهت‌های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم کرده است. شکل ۳ نمایی از فلوم دایره‌ای را نشان می‌دهد.

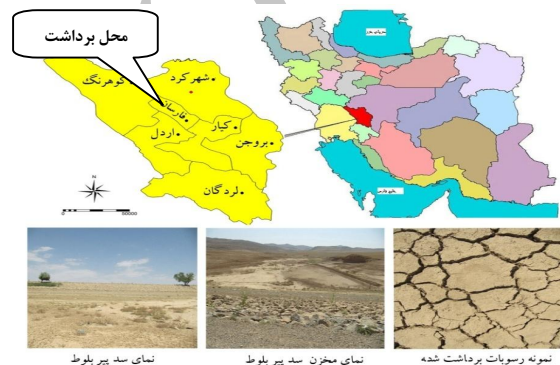
برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، نظیر سرعت و تنش برشی در فلوم دایره‌ای از دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV) مدل *Victorino*⁺ ساخت شرکت Nortek⁺ نروژ استفاده شد. غلظت رسوب معلق نیز با روش خشک کردن و توزین اندازه‌گیری شد.

قبل از انجام آزمایش‌های اصلی لازم است خصوصیات هیدرولیکی جریان در فلوم دایره‌ای بررسی شود. بر این اساس فلوم و درپوش در سرعت‌های مختلف و در خلاف جهت یکدیگر چرخانده شده و اندازه‌گیری‌های مربوط به سرعت و تنش برشی با استفاده از سرعت‌سنج صوتی در هر سرعت چرخش، انجام شد. لازم به ذکر است سرعت چرخش درپوش کمی بیشتر از سرعت چرخش فلوم در نظر گرفته شد تا از چرخش‌های ثانویه کاسته شده و توزیع تنش برشی در عرض فلوم یکنواخت و مشابه کانال‌های باز شود (پارتندیس، ۲۰۰۹). کریشناپان و انجل (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌هایی در یک فلوم دایره‌ای در کانادا به ازای عمق جریان ۱۲ سانتی متر، نشان دادند که برای توزیع یکنواخت پروفیل سرعت و تنش برشی، سرعت درپوش باید ۱/۱۷ برابر سرعت فلوم باشد. لذا در این پژوهش نیز سرعت‌های مختلف چرخش آزمایش شد و در نهایت در حالتی که سرعت چرخش درپوش ۱/۱ برابر سرعت چرخش فلوم ($\alpha=1/1$) انتخاب شد، بهترین شرایط جریان ایجاد شد (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰). ضمناً اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۲۰۰ Hz انجام شد و هر اندازه‌گیری برای مدت یک دقیقه ادامه یافت. بدین منظور سرعت متوسط نقطه‌ای (u,v,w) از میانگین $12000 = 60 \times 200$ سرعت لحظه‌ای برای هر نقطه به دست آمد. نقاط اندازه‌گیری در مقطع عرضی فلوم مطابق شکل ۴ انتخاب شد و سرعت متوسط به صورت وزنی محاسبه شد.

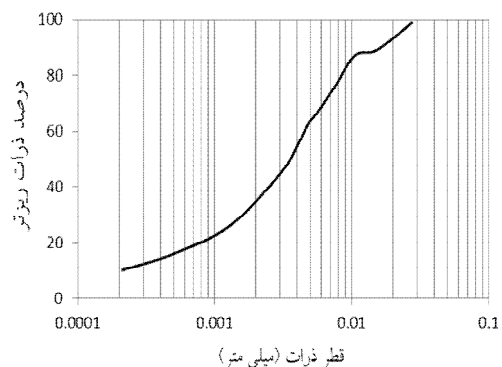
هدف از این پژوهش بررسی رفتار نهشته شدن رسوبات چسبنده و تعیین مقدار تنش برشی آستانه و نهشته شدن کامل این رسوبات است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه رسوبات از بستر خشک مخزن سد خاکی پیربلوط واقع در حوضه کارون شمالی با UTM $x=4713116$ m و $y=3586402$ m تهیه شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محل برداشت رسوبات و نمایی از سد خاکی پیر بلوط را نشان می‌دهد. رسوبات بعد از عبور از الک شماره ۲۰۰ مورد آزمایش هیدرومتری قرار گرفت که نتیجه نشان داد رسوبات شامل ۶۳/۲ درصد رس و ۳۶/۸ درصد سیلت با قطر متوسط ۰/۰۰۳۵ میلی‌متر است (شکل ۲).

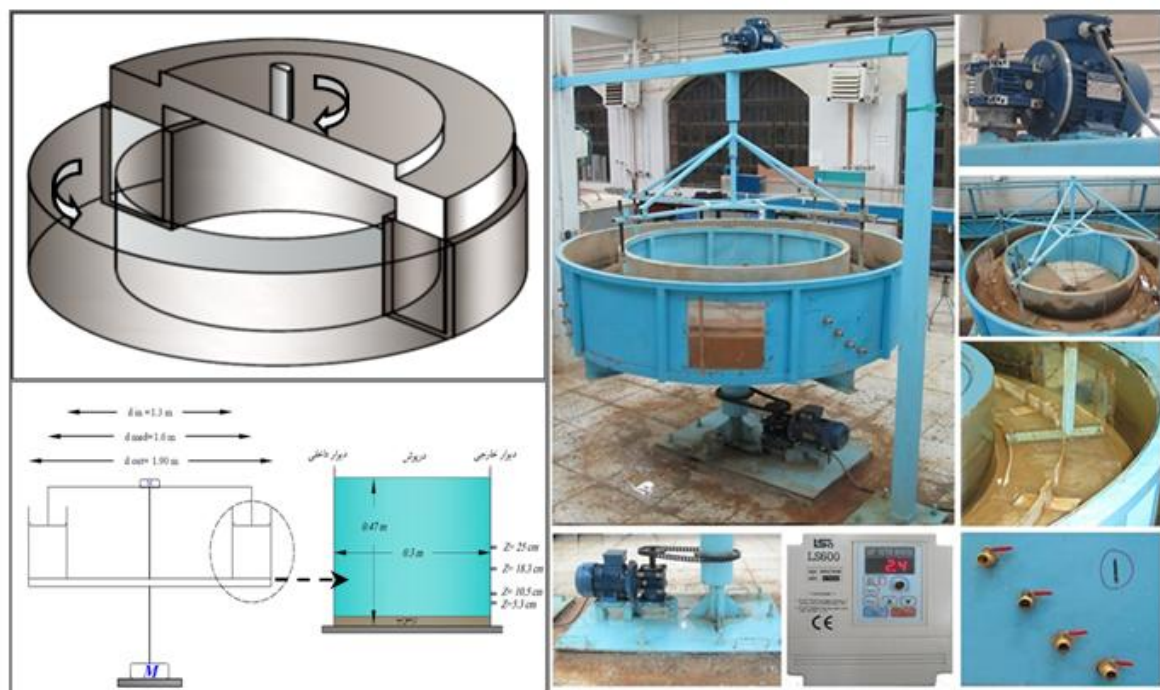


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل برداشت رسوبات و نمایی از سد خاکی پیر بلوط



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده

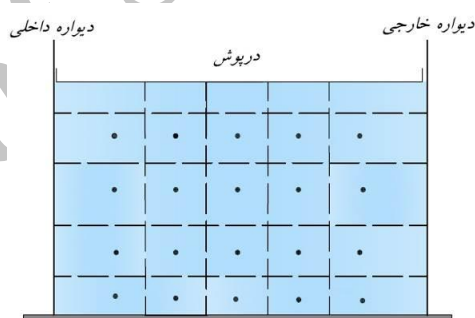
در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز از فلوم آزمایشگاهی دوار مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، استفاده شد. این فلوم از جنس گالوانیزه و مجهز به پنجره‌های پلکسی‌گلس و به ترتیب با قطر داخلی، خارجی و متوسط ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر است. درپوش از



شکل ۳- نمای از اجزای فلوم دایره‌ای

مدت ۳۰ دقیقه به گردش درآمد. پس از اتمام این زمان سرعت چرخش فلوم و درپوش تا رسیدن به سرعت مورد نظر آزمایش کاهش یافت. کریشناپان (۲۰۰۶)، هارلامپدس و همکاران (۲۰۰۳)، اسکافیل و کریشناپان (۱۹۹۸) در پژوهش‌های خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دایره‌ای دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (۰/۶ نیوتن بر متر مربع) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است. بر اساس کارهای کرون (۱۹۶۳)، در تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ۲/۲، هیچ فلوکی در مقابل تنش برشی جریان مقاومت نکرده و تمام ذرات از یکدیگر مجزا خواهند شد (صمدی و همکاران، ۱۳۹۰).

بر اساس آزمایش‌های اولیه برای رسیدن به غلظت تعادلی، زمان آزمایش‌ها ۲۴۰ دقیقه انتخاب شد. در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یکبار و بعد از آن هر ۳۰ دقیقه نمونه‌گیری انجام شد. در هر زمان از سه عمق ۵/۵، ۱۰/۳ و ۱۸/۳ نمونه‌گیری به عمل آمد و بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت به روش توزین محاسبه شد. جدول ۱ نام و شرایط هر آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴- موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع عرضی فلوم دایره‌ای

در این پژوهش آزمایش‌ها در سه غلظت ۵، ۱۰، و ۲۰ گرم بر لیتر و تحت پنج تنش برشی ۰/۱۳، ۰/۲۰، ۰/۳۲، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ نیوتن بر متر مربع (مجموع دور فلوم و درپوش به ترتیب ۳/۴، ۳/۲، ۴/۲، ۴/۹، و ۶/۲ دور بر دقیقه) انجام شد. در ابتدای کار مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و در فلوم ریخته شد. برای کامل مخلوط شدن آب و رسوب و خرد شدن فلوک‌ها، فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش ۳۱ دور بر دقیقه) که تنش برشی معادل $\frac{N}{m^2}$ ۱۱/۲ ایجاد می‌کند، در جهت خلاف یکدیگر به

جدول ۱- نام و مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

آزمایش‌ها با غلظت اولیه ۲۰ گرم بر لیتر			آزمایش‌ها با غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر			آزمایش‌ها با غلظت اولیه ۵ گرم بر لیتر		
τ (N/m ²)	ω (ppm)	نام آزمایش	τ (N/m ²)	ω (ppm)	نام آزمایش	τ (N/m ²)	ω^* (ppm)	نام آزمایش
۰/۱۳	۲/۳	C20-V1	۰/۱۳	۲/۳	C10-V1	۰/۱۳	۲/۳	C5-V1
۰/۲۰	۳/۲	C20-V2	۰/۲۰	۳/۲	C10-V2	۰/۲۰	۳/۲	C5-V2
۰/۳۲	۴/۰	C20-V3	۰/۳۲	۴/۰	C10-V3	۰/۳۲	۴/۰	C5-V3
۰/۴۵	۴/۷	C20-V4	۰/۴۵	۴/۷	C10-V4	۰/۴۵	۴/۷	C5-V4
۰/۶۵	۵/۹	C20-V5	۰/۶۵	۵/۹	C10-V5	۰/۶۵	۵/۹	C5-V5

* ω : مجموع دور فلوم و درپوش با نسبت ۱/۱

نتایج و بحث

پارامترهای هیدرولیکی

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از دستگاه ADV مشخص شد در حالتی که سرعت چرخش درپوش کمی بزرگتر از سرعت فلوم باشد ($\alpha=1/1$) پروفیل سرعت در فلوم دایره‌ای به طور معقولانه‌ای مشابه کانال‌های باز، به صورت لگاریتمی است. پارتندیس (۲۰۰۹) نیز در پژوهش‌های خود در فلوم دایره‌ای به این نکته اشاره کرده است. معادله زیر بین سرعت متوسط جریان و مجموع دور فلوم و درپوش به دست آمد.

$$V=19.024\ln(\omega)-5.3 \quad R^2=0.98 \quad (1)$$

مطالعات تجربی کریشنپان (۱۹۹۳) و توری کریشنپان و پترسن (۱۹۹۴) نشان می‌دهد که جریان در فلوم دوبعدی است، از این رو در تعیین تنش برشی از کواریانس سرعت‌های لحظه‌ای (تنش رینولدز) اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV در صفحه X-Z استفاده شد و معادله بین تنش برشی و دور فلوم به دست آمد.

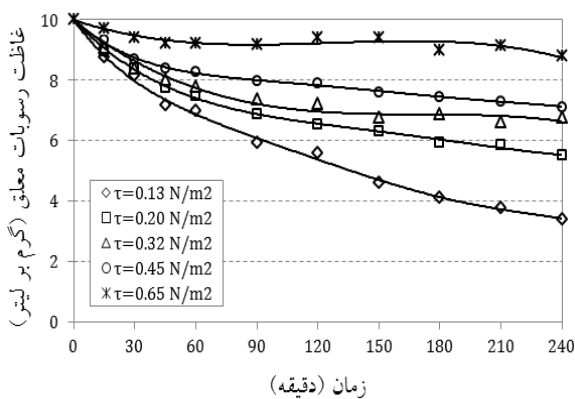
$$\tau=0.0228\omega^{1.8554} \quad R^2=0.99 \quad (2)$$

در معادله فوق V سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، τ تنش برشی متوسط جریان ($\frac{N}{m^2}$)، ω مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه). هوکویانگ‌ها و ما (۲۰۰۹) نیز در پژوهش‌های خود با استفاده از فلوم دایره‌ای، از معادله نمایی بین تنش برشی و سرعت چرخش فلوم استفاده کردند.

نهشته شدن رسوبات چسبنده

شکل ۵ روند نهشته شدن رسوبات را به طور نمونه برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. می‌توان دید که در ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش، غلظت رسوبات معلق دارای یک افت ناگهانی و سپس به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. کاهش غلظت رسوبات معلق تا رسیدن به یک حالت یکنواخت ادامه می‌یابد.

با توجه به شکل ۵ می‌توان استنباط کرد که برای هر غلظت، در تنش‌های بزرگتر رسیدن به حالت تعادلی، در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. غلظت رسوبات در حالت تعادلی تابعی از تنش برشی بستر است. این موضوع نشان دهنده این امر است که تنش برشی جریان (آشفته‌گی جریان) ظاهراً نقش مضاعف در فرآیند فلوکولاسیون دارد. وجود تنش برشی کوچک در ابتدا سبب افزایش احتمال برخورد بین ذرات و به دنبال آن سبب آرایش فلوک‌ها و افزایش فرآیند فلوکولاسیون شده و نهشته شدن را افزایش می‌دهد. اما شدت بیش از حد تنش برشی، باعث افزایش نرخ برشی شده که سبب خرد شدن توده‌های رسوبی و به دنبال آن کاهش نرخ نهشته‌گی می‌شود. مسلم است که مقدار مناسب آشفته‌گی سبب تشکیل فلوک‌ها با بزرگترین اندازه و پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود.



شکل ۵- تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر

در ادامه بررسی‌ها مشخص شد که علاوه بر تنش برشی بستر، غلظت اولیه رسوبات نیز بر مقدار نهشته شدن تأثیرگذار است. به بیان دیگر نرخ نهشته شدن ذرات ریزدانه، برای یک تنش برشی خاص تابعی از میزان رسوبات در ابتدای آزمایش است. شکل ۶ این موضوع را به

نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که درصد نهشته شدن با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد.

$$f_d = \left(1 - \frac{C_{eq}}{C_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

در معادله فوق f_d درصد نهشتگی، C_{eq} غلظت تعادلی و C_0 غلظت اولیه رسوبات می‌باشد.

جدول ۲- نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه برای غلظت و سطوح مختلف تنش برشی

تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)					غلظت (g/L)	ته‌نشینی (%)
۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۶۵		
۰/۳۵۶	۰/۵۰۱	۰/۶۴۰	۰/۷۱۳	۰/۸۶۱	۵	
۰/۳۴۳	۰/۵۵۱	۰/۶۷۸	۰/۷۱۳	۰/۸۸۰	۱۰	
۰/۳۱۳	۰/۵۴۶	۰/۶۸۰	۰/۷۵۱	۰/۸۵۸	۲۰	
۶۴	۴۶	۳۴	۲۶	۱۲		

پس از بررسی داده‌های آزمایشگاهی معادله زیر برای تعیین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه تهیه شد. این نسبت بر اساس دو متغیر تنش برشی و غلظت اولیه رسوبات برقرار شد.

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = 0.3082 \ln(\tau) + 1.0058 \quad R^2 = 0.95 \quad (4)$$

در معادله ۴، τ تنش برشی (نیوتن بر مترمربع) و C_0 غلظت اولیه رسوبات معلق (گرم بر لیتر) است.

با توجه به مقادیر مشاهداتی این معادله در محاسبه پارامتر $\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)$ دارای درصد خطای ۴/۳٪ است که نشان دهنده

کارایی بالای مدل فوق در محدوده $0.13 < \tau < 0.65 \frac{N}{m^2}$ است. بر اساس تحلیل تنش‌های برشی و معادلات فوق

مقدار تنش برشی آستانه نهشته شدن $\left(\frac{C_{eq}}{C_0} = 1\right)$ ، ۱/۰۱ نیوتن بر مترمربع و تنش برشی بحرانی نهشته شدن (تنش

برشی که ۹۹ درصد رسوبات در آن نهشته می‌شوند) ۰/۰۳۸ نیوتن بر متر مربع به دست آمد.

شکل ۸ نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی بحرانی

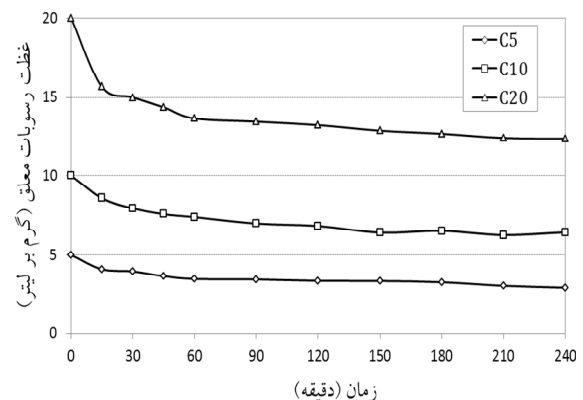
نهشته شدن را بر حسب مقدار ته‌نشینی نشان می‌دهد. با توجه به مشخص بودن مقدار تنش برشی ته‌نشینی کامل و

محاسبه درصد ته‌نشینی رسوبات معلق در هر سرعت، درصد ته‌نشینی به صورت تحلیلی با استفاده از معادله ۵

محاسبه می‌شود.

$$f_d = 1 - 0.288 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1\right)^{0.399}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 25, \quad R^2 = 0.98 \quad (5)$$

طور نمونه برای تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ۰/۳۲ نشان می‌دهد.

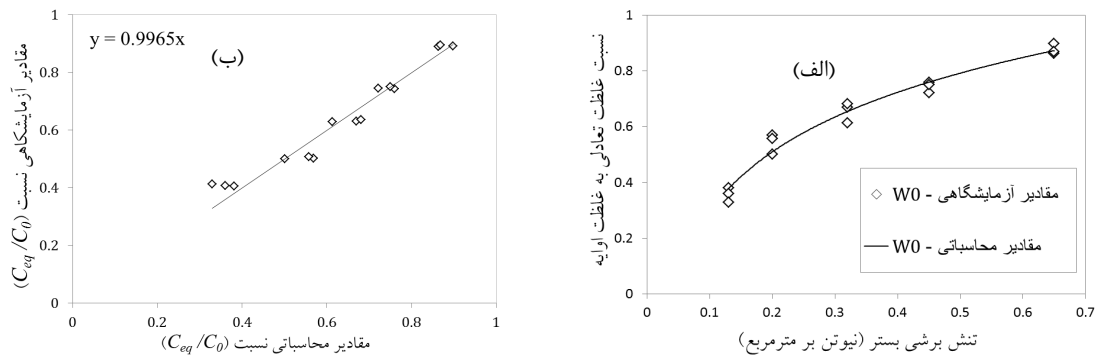


شکل ۶- تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق در غلظت‌های

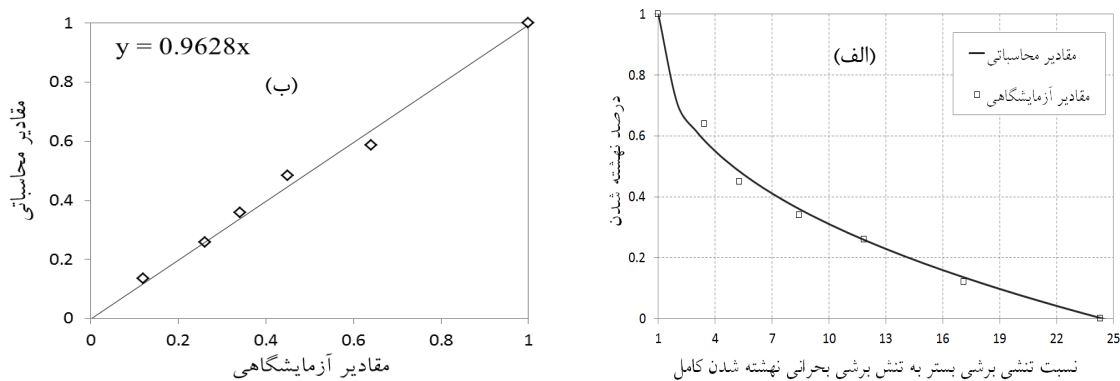
مختلف $\left(\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}\right)$

وابسته بودن غلظت تعادلی رسوبات چسبنده به غلظت اولیه، یکی از تفاوت‌های بارز در رفتار این رسوبات نسبت به رسوبات غیرچسبنده است. در رسوبات غیرچسبنده، غلظت تعادلی فقط تابعی از تنش برشی بستر است و غلظت اولیه رسوبات بی‌تأثیر است. نظریه وابسته بودن غلظت یکنواخت به غلظت اولیه در رسوبات چسبنده را پارتندیس و کندی (۱۹۹۶) ارائه دادند. پارتندیس و همکاران (۱۹۶۸) استدلال کردند که در فرآیند نهشته شدن رسوبات چسبنده، فقط فلوکوله‌هایی که مقاومت کافی در برابر تنش برشی بزرگ در نزدیکی بستر را دارند، می‌توانند نهشته شوند و فلوک‌های ضعیف‌تر در ناحیه تنش برشی بستر شکسته شده و به صورت معلق باقی می‌مانند (میلبورن و کریشناپان، ۲۰۰۱). با توجه به استدلال فوق می‌توان نتیجه گرفت که فقط برخی از رسوبات می‌توانند به صورت توده‌های مقاوم باشند، از این رو مقدار باقی مانده تابعی از مقدار رسوبات در ابتدای آزمایش است. در نمونه با غلظت اولیه زیاد مقدار ماده توده‌ای سست بیشتر است، در نتیجه مقدار غلظت تعادلی نیز بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که در تنش‌های برشی دیگر نیز نتایج یکسان به دست آمد.

در این آزمایش‌ها مشخص شد که نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات $\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)$ ، در یک تنش برشی مشخص تقریباً برابر است. جدول ۲ مقادیر این نسبت و متوسط درصد نهشته شدن در هر تنش برشی را برای غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر در سطوح مختلف تنش برشی



شکل ۷- الف) رابطه بین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه در برابر تنش برشی بستر، ب) رابطه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه



شکل ۸- الف) رابطه درصد نهشته شدن و نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی بحرانی نهشته شدن کامل، ب) رابطه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی

نتیجه گیری

به طور کلی براساس پژوهش انجام شده نتایج زیر را می توان بیان کرد:

در بررسی روند نهشته شدن رسوبات چسبنده مشخص شد که در ۱۵ دقیقه ابتدایی (۱/۳ زمان کل آزمایش) غلظت رسوبات معلق دارای یک افت ناگهانی است و سپس به صورت تدریجی تا رسیدن به یک حالت تعادلی کاهش می یابد.

تنش برشی جریان (آشفتگی جریان) نقش مضاعف در نهشته شدن رسوبات دارد، به طوری که در تنش های برشی کوچک نرخ نهشته شدن افزایش یافته و افزایش شدت تنش برشی سبب شکسته شدن ساختمان فلوکوله ها شده و نرخ نهشتگی کاهش می یابد.

در این پژوهش مشخص شد که نسبت غلظت تعادلی رسوبات به غلظت اولیه برای هر تنش برشی، ثابت است. به بیان دیگر مقدار نهشته شدن برای غلظت های مختلف در یک تنش برشی یکسان، برابر است.

با توجه به شکل (۸- الف) و معادله ۵، مشاهده می شود که زمانی که تنش برشی بستر برابر یا کمتر از تنش برشی بحرانی نهشته شدن باشد، رسوبات می توانند به طور کامل نهشته شوند و از طرفی دیگر مقدار نهشته شدن با افزایش تنش برشی بستر، کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود زمانی که تنش برشی بستر حدود ۲۵ برابر تنش برشی بحرانی نهشته شدن باشد مقدار ته نشینی تقریباً صفر است و تمام رسوبات معلق در ابتدای آزمایش به صورت معلق باقی می ماندند.

میلبورن و کریشناپان (۲۰۰۱) با انجام یک سری آزمایش در فلوم دایره ای، مقدار تنش بحرانی نهشته شدن برای رسوبات رودخانه های را برابر با $0.08 \frac{N}{m^2}$ به دست آوردند. این پژوهشگران معادله درصد نهشته شدن را به صورت زیر ارائه دادند.

$$f_d = 1 - 0.455 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.57}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 5 \quad (6)$$

در معادله فوق f_d مقدار نهشته شدن، τ_b تنش برشی بستر، τ_{cd} تنش برشی نهشته شدن کامل است.

4. Haralampides K. Corquodale A. and Krishnappan B. G. 2003. Deposition properties of fine sediment. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*. 129(3):230-234.
5. Huang J. Hilldate R. C. and Greiman B. P. 2006. *Erosion and Sedimentation Manual*. U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation. pp. 4-44.
6. Krishnappan B. G. 2006. Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume. *The 7th Int. Conf. on Hydro science and Engineering (ICHE)*, Sep10-13, Philadelphia, USA.
7. Krishnappan B. G. 2000. Modeling cohesive sediment transport in rivers. *The Role of Erosion and Sediment in Nutrient and Contaminant Transfer*. Jul, Canada. 263:269-276.
8. Krishnappan B. G. 2000. In-Situ size distribution of suspended particles in the Fraser river. *Journal of Hydraulic Engineering*. 126(8):561-569.
9. Krishnappan B. G. and Engel P. 2004. Distribution of bed shear stress in rotating circular flume. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*. 130(4):324-331.
10. Milburn D. and Krishnappan B. G. 2001. Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River, Northwest Territories, Canada. Paper presented at the 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. pp. 19-24.
11. Partheniades E. 2009. *Cohesive Sediments in Open Channels*. (1st Ed), Elsevier Inc, Burlington, USA. 358 p.
12. Skafel M. G. and Krishnappan B. G. 1998. A Laboratory investing of depositional characteristics of mud from an Inland Harbour using a rotating circular flume. *Water, Air, and Soil Pollution*. 112(1-2):1-19.

تنش برشی آستانه و بحرانی نهشته شدن برای رسوبات ریزدانه با قطر متوسط 0.0035 میلی متر به ترتیب، $1/0.1$ و $0.38/0$ نیوتن بر متر مربع به دست آمد. برای تنش برشی بزرگتر از $1/0.1 \frac{N}{m^2}$ تمام ذرات به صورت معلق باقی می ماندند.

مشخص شد که مقدار ته نشینی رسوبات وابسته به تنش برشی جریان و تنش برشی بحرانی ته نشینی است و معادله $f_d = 1 - 0.288 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.399}$ برای مقدار ته نشینی به دست آمد.

سپاس گزاری

بدین وسیله از گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد که زمینه انجام این پژوهش را فراهم کردند سپاس گزاری می شود.

منابع

۱. خواستار بروجنی م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبنده در کانال های انتقال آب. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۰۲ ص.
۲. صمدی بروجنی ح. نادری م. و فتاحی ر. ۱۳۹۰. بررسی آستانه ته نشینی رسوبات چسبنده معلق با استفاده از مدل آزمایشگاهی فلوم دایره ای. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷):۷۵-۸۲.
3. Ha K. H. and Maa J. P. Y. 2009. Evaluation of two conflicting paradigms for cohesive sediment deposition. *Marine Geology*. 265(3-4):120-129.