

بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب بر تنش برشی بحرانی ته‌نشینی رسوبات چسبنده

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۲۸)

چکیده

با توجه به خاصیت چسبندگی رسوبات ریزدانه، عوامل فیزیک شیمیایی سیال موجب تغییر در رفتار این رسوبات می‌شود. در این پژوهش خصوصیات ته‌نشینی رسوبات در سه سطح پساب و برای تنش برشی و غلظت‌های اولیه متفاوت، در فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. پروفیل سرعت و توزیع تنش برشی در فلوم دوار با استفاده از دستگاه ADV اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد غلظت رسوبات معلق با گذشت زمان کاهش یافته و این کاهش تا رسیدن به یک مقدار یکنواخت ادامه دارد. نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه (c_{eq}/c_0) در یک تنش برشی معین، برای غلظت‌ها و سطوح مختلف پساب، تقریباً یکسان است و مشخص شد غلظت تعادلی وابسته به غلظت اولیه رسوبات می‌باشد. پساب موجب افزایش تنش برشی آستانه و ته‌نشینی کامل می‌شود. مقادیر تنش برشی ته‌نشینی کامل برای سطوح صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب به ترتیب ۰/۰۵۳، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۰ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. هم‌چنین برای سطوح مشخص شده پساب، مقادیر نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی بحرانی ته‌نشینی (τ_b/τ_{cd}) برابر ۱۰، ۱۵ و ۱۷ به دست آمد که در این مقادیر تمام رسوبات به صورت معلق باقی می‌مانند.

کلمات کلیدی: ته‌نشینی، غلظت تعادلی، فلوم دوار، سرعت سنج صوتی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khastar1365@yahoo.com

مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در مدیریت شبکه‌های انتقال آب، مسئله رسوب‌گذاری است که علاوه بر کاهش ظرفیت انتقال کانال، موجب ایجاد هزینه‌های لایروبی و قطع آب کانال در این زمان می‌شود (۳). از طرفی بخش اعظم رسوبات در مجاری انتقال (حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد) شامل ذرات ریزدانه رسی است. این ذرات دارای نیروی قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی می‌باشند و امکان اینکه ذرات با کاتیون‌ها محاصره شوند، وجود دارد. این نیرو بین ذره‌ای کنترل کننده رفتار رسوبات است و سبب می‌شود که ذرات رسوب‌ها به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگ‌تری دهند (۶). این توده‌ها شبیه یک اکوسیستم کوچک ویژه است که دارای رفتار و فعل و انفعالات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی مختص به خود می‌باشند. واکنش‌پذیری و حفره‌های نسبتاً زیاد بین آنها برجذب و پراکنده کردن آلاینده‌های ستون آب تأثیر گذار است (۹). این خصوصیات باعث پیچیدگی رفتار و دینامیک انتقال رسوبات چسبنده شده است.

با توجه به مقدار تنش برشی بستر، دو نوع ته‌نشینی کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می‌شود. وقتی که تنش برشی کف کوچک‌تر از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی است، ته‌نشینی کامل صورت می‌گیرد و تمام ذرات رسوبی و توده‌ها ته‌نشین می‌شوند. رابطه زیر موسوم به رابطه ته‌نشینی کرون است که به‌عنوان یکی از روابط پایه برای محاسبه نرخ ته‌نشینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Q_d = P_d \omega c \quad \text{for} \quad \tau < \tau_{d,full} \quad [1]$$

متغیر (P_d) احتمالی چسبیدن ذرات به بستر هستند که همراه با جریان جابه‌جا نمی‌شوند. بخشی از این رسوبات چسبنده در ناحیه نزدیک بستر نمی‌تواند در برابر تنش برشی بزرگ در ناحیه مشترک آب و بستر مقاومت کند و به سمت بالا حرکت کرده و به‌صورت معلق در می‌آیند. احتمال ته‌نشینی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_d = \frac{1-\tau}{\tau_{d,full}}, \quad \text{for} \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad [2]$$

ته‌نشینی جزئی زمانی که تنش برشی کف بزرگ‌تر از تنش برشی ته‌نشینی کامل و کوچک‌تر از تنش برشی آستانه ته‌نشینی باشد، اتفاق می‌افتد. در محدوده تنش برشی بستر، توده‌های نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های ضعیف به‌طور معلق باقی می‌مانند. ته‌نشینی جزئی از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$Q_d = P_d \omega (c - c_{eq}) \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad [3]$$

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}}, \quad \text{for} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad [4]$$

در روابط فوق، Q_d : نرخ ته‌نشینی، P_d : احتمال ته‌نشینی، τ : تنش برشی کف، $\tau_{d,full}$ و $\tau_{d,part}$: به ترتیب تنش برشی ته‌نشینی کامل و جزئی، ω : سرعت سقوط توده‌ها، c_{eq} : غلظت تعادلی c : غلظت رسوبات چسبنده معلق می‌باشد (۶). در حال حاضر، تعیین تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل و جزئی قابل پیش‌بینی و مسلم نمی‌باشد. اما باید خاطر نشان کرد که دقت در مدل‌های ته‌نشینی کاملاً وابسته به مقدار صحیح آنها است. آزمایش‌های بسیاری برای تعیین مقدار تنش برشی بحرانی رسوبات چسبنده انجام شده است. تنش برشی بحرانی دارای مقدار کوچکی است و به‌طور کلی مقدار $\frac{N}{m^2}$ تا ۰/۰۵ تا ۰/۱ در آزمایش‌ها تعیین شده است (۹).

یکی از محققین آزمایش‌هایی در کانال مستقیم انجام داد و مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته‌نشینی کامل، تعیین نمود. این محقق برای رسوبات خلیج سان فرانسیسکو مقادیر زیر را به دست آورد.

$$\tau_{d,full} = 0.06 \frac{N}{m^2} \quad \text{for} \quad c < 0.3 \frac{g}{l}; \quad \tau_{d,full} = 0.078 \frac{N}{m^2} \quad \text{for} \quad 0.3 < c < 1.0 \frac{g}{l} \quad [5]$$

بعد از کرون، یک آزمایش مشابه در کانال مستقیم توسط مهتا و پارتندیس انجام گرفت. این محققین دریافتند که ته‌نشینی کامل وابسته به طول کانال است و نتایج حاصل از کانال‌های کوتاه مورد تایید نمی‌باشد (۱۳). پارتندیس (۱۰) مقدار تنش برشی ۰/۱۵ نیوتن بر مترمربع، برای رس کائولونیت در آب مقطر



شکل ۱. نمای کلی فلوم دوار مورد استفاده

خاکی پیر بلوط واقع در حوضه کارون شمالی با مختصات جغرافیایی $x=4713116$, $y=3586402$ تهیه شد. رسوبات اصلاح شده مورد استفاده شامل ۶۳/۲ درصد رس و ۳۶/۸ درصد سیلت بود.

فلوم آزمایشگاهی

فلوم دایره‌ای مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها از ورق گالوانیزه با پنجره‌های پلکسی‌گلس ساخته شده است. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر می‌باشد. درپوشی از جنس پلکسی‌گلس با قطر متوسط ۱/۶ متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. به منظور 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 سانتی‌متر از کف تعبیه شده است. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا یکی برای چرخش فلوم و دیگری درپوش می‌باشد که قابلیت حرکت در جهت‌های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم نموده است. شکل ۱ نمای کلی فلوم دوار را نشان می‌دهد. جریان در این فلوم‌ها با گردش فلوم به دور خودش ایجاد می‌شود و احتیاجی به پمپ نیست. این مزیت باعث برتری این فلوم‌ها نسبت به کانال‌های مستقیم می‌باشد زیرا در این فلوم‌ها تنها تنش برشی جریان است که بر رفتار رسوبات تأثیر گذار است و عامل خارجی ناشی از نیروی پمپ حذف شده است. از برتری دیگر فلوم دوار نسبت

به دست آوردند. هم‌چنین در آزمایش‌های کریشناپان و استفان (۸) برای رسوبات رودخانه آتاباسکا مقدار تنش برشی بحرانی ته‌نشینی، ۱/۸ نیوتن بر مترمربع به دست آمد.

از سوی دیگر، در مناطق خشک و نیمه‌خشک دسترسی به منابع آب باکیفیت با محدودیت همراه است، لذا بهره‌برداری از پساب برای آبیاری بسیار با اهمیت است. بهره‌برداری و تصفیه فاضلاب شهری، مشکل آلودگی آب‌های سطحی را برطرف می‌کند و نه تنها باعث حفظ منابع آب می‌گردد بلکه به علت وجود مواد و عناصر غذایی هم‌چون نیتروژن و فسفر، برای رشد گیاهان بسیار سودمند است و باعث حذف یا کاهش کودهای تجاری مورد نیاز محصولات کشاورزی می‌شود (۲). معمولاً پساب فاضلاب‌های شهری ترکیبی از مواد آلی (هیدروکربن‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها)، نمک‌های محلول، عناصر غذایی گیاهان (K, N, P) و گاهی نیز مواد سمی مانند برخی از فلزات سنگین را دارد.

با توجه به تبادل یونی و تمایل رسوبات چسبنده به واکنش‌پذیری، مسلم است که پساب بر رفتار رسوبات ریزدانه تأثیر گذار خواهد بود. از اینرو تحقیقات در این زمینه، برای بهبود کیفیت آب و مدیریت شبکه‌های آبیاری ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

جهت انجام تحقیق حاضر، رسوبات از بستر خشک مخزن سد

شوند. در ابتدای کار با استفاده از سرعت سنج صوتی (ADV) پروفیل عمودی سرعت و توزیع تنش برشی اندازه گیری شد و براین اساس روابط بین پارامترهای هیدرولیکی و سرعت چرخش فلوم به دست آمد. برای کامل مخلوط شدن آب رسوب فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش ۳۱ دور بر دقیقه)، که تنش برشی برابر با $\frac{N}{m^2}$ ایجاد می کند، در جهت مخالف به 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 و هر آزمایش ۲۴۰ دقیقه به طول انجامید. در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یک بار و بعد از آن با فواصل ۳۰ دقیقه ای نمونه گیری انجام شد. در هر زمان از سه عمق ۵/۵، ۱۰/۳ و ۱۸/۳ نمونه گیری بعمل آمد و بعد از خشک کردن نمونه ها در آون، غلظت به روش وزنی محاسبه شد.

نتایج و بحث

پارامترهای هیدرولیکی

بر اساس داده های اندازه گیری شده توسط دستگاه ADV رابطه بین سرعت متوسط جریان و مجموع سرعت چرخش درپوش فلوم به صورت زیر به دست آمد.

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

مطالعات تجربی کریشناپان و تئوری کریشناپان و پترسن نشان می دهد که جریان در فلوم دوبعدی است (۹)، از اینرو در تعیین تنش برشی از کواریانس سرعت های لحظه ای در صفحه xz استفاده شد و رابطه بین دور فلوم و تنش برشی کف به دست آمد (۱).

$$\tau = 0.0256 \omega^{0.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad [A]$$

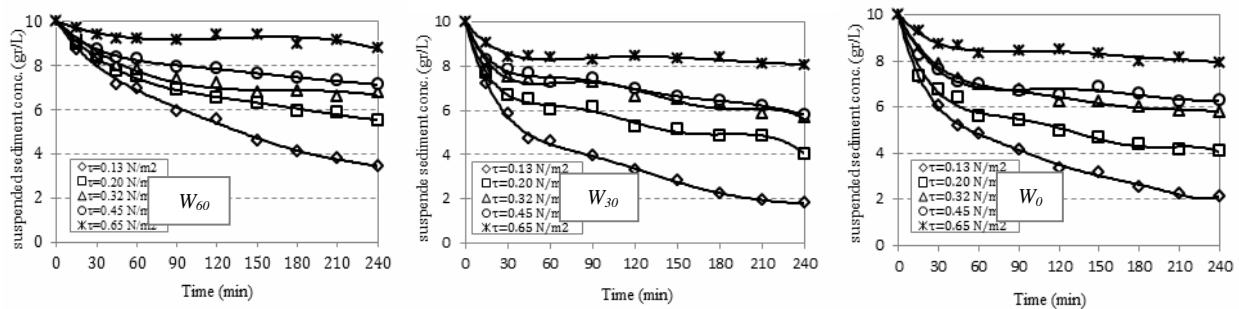
در روابط فوق، V: سرعت متوسط جریان (m/s)، τ : تنش برشی متوسط جریان ($\frac{N}{m^2}$)، ω : مجموع سرعت فلوم و درپوش (rpm). هوکیانگ ها و ما (۵) نیز در تحقیقات خود با استفاده فلوم دوار، رابطه نمایی بین تنش برشی و سرعت چرخش فلوم

به کانال های مستقیم این است که به فضای کمتری احتیاج دارند و این فلوم ها را با توجه به دایره ای بودن، می توان دارای طول بینهایت دانست (۱). هم چنین برای محلول کردن کامل رسوبات می توان فلوم و درپوش را با سرعت بالا به چرخش در آورد. کریشناپان (۷) و اسکافیل و کریشناپان (۱۲) و در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (۰/۶ نیوتن بر مترمربع) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است.

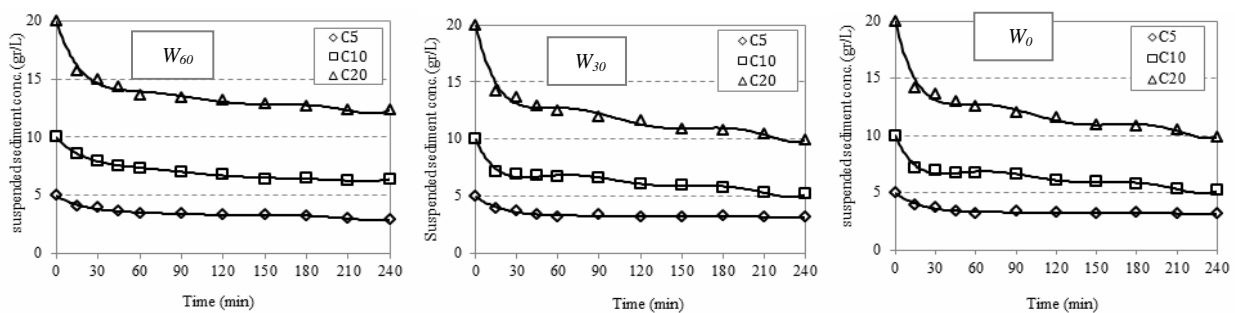
به منظور کاهش جریان های ثانویه و توزیع یکنواخت تنش برشی در عرض فلوم، درپوش در خلاف فلوم به چرخش در می آید. بر اساس یافته های پارتندیس (۱۰) در شرایط که دور فلوم و درپوش مناسب انتخاب شود، پروفیل سرعت در فلوم های دوار مشابه کانال های باز است. به همین منظور پروفیل سرعت و تنش برشی در فلوم دوار با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) اندازه گیری و مشخص شد زمانی که نسبت سرعت چرخش درپوش به سرعت چرخش فلوم $(\frac{N_f}{N_f} = 1/1)$ باشد، از چرخش های ثانویه کاسته شده و نتایج تنش برشی در عرض فلوم یکنواخت است. در این حالت پروفیل سرعت در فلوم های دوار به صورت قابل قبولی مشابه کانال های باز می باشد و نتایج حاصل از فلوم دوار را می توان به کانال های باز تعمیم داد (۱). کریشناپان و انجل (۸) این نسبت را برای عمق ۱۲ سانتی متر فلوم دواری در کانادا ۱/۱۷ به دست آوردند.

طراحی آزمایش ها

آزمایش ها 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 مترمربع و برای سه سطح صفر، ۳۰ و ۶۰ (W_0, W_{30}, W_{60}) درصد پساب انجام پذیرفت. تنش های برشی به گونه ای انتخاب شد که برای سطوح مختلف پساب و غلظت، در تنش برشی حداکثر و حداقل به ترتیب ۲۰ و ۸۰ درصد رسوبات ته نشین



شکل ۲. تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق برای سطوح مختلف پساب - غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر



شکل ۳. تاثیر غلظت اولیه رسوبات بر غلظت تعادلی برای سطوح مختلف پساب - $(\tau = 0.32 \frac{N}{m^2})$

غلظت تعادلی

به دست آوردند.

در ادامه مشخص شد که نسبت غلظت در حالت تعادل به غلظت اولیه رسوبات، در یک تنش برشی مشخص تقریباً یکسان می باشد. هم چنین مشاهده شد مقدار غلظت تعادلی کاملاً وابسته به غلظت اولیه رسوبات است. با توجه به شکل ۳ که وابستگی غلظت تعادلی به غلظت اولیه را نشان می دهد، می توان نتیجه گرفت که فقط برخی از رسوبات می توانند به صورت توده های مقاوم باشند، از اینرو مقدار باقی مانده تابعی از مقدار رسوبات در ابتدای آزمایش است. در نمونه با غلظت اولیه زیاد مقدار مواد توده ای سست تر است، در نتیجه در نتیجه مقدار غلظت تعادلی نیز بیشتر می باشد.

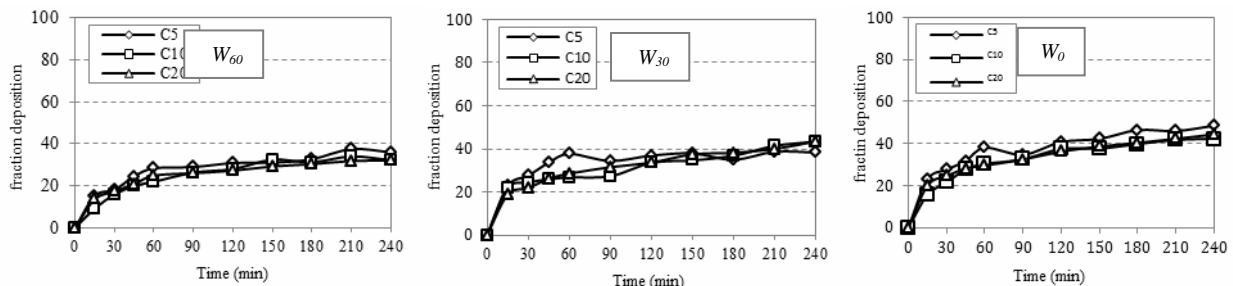
با توجه به مقادیر جدول ۱ مشاهده می شود که نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه (C_{eq}/C_0) برای سطوح مختلف پساب و غلظت در یک تنش برشی مشخص، تقریباً یکسان است. این به این معنی است که میزان ته نشینی برای غلظت های

تغییرات غلظت رسوبات معلق نسبت به زمان

با توجه به نتایج مشخص شد ته نشینی رسوبات در این تحقیق از نوع ته نشینی جزئی است. زیرا در تمامی تنش های برشی و سطوح پساب و رسوب، غلظت رسوبات بعد از یک کاهش سریع در ۱۵ دقیقه ابتدایی تا رسیدن به یک حالت تعادلی ادامه یافت. این حالت تعادلی وابسته به غلظت اولیه رسوبات و مقادیر تنش برشی جریان است. نتایج به طور نمونه برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر و محلول ۳۰ درصد پساب در شکل ۲ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود برای تمامی سطوح پساب، افزایش تنش برشی علاوه بر کاهش زمان رسیدن به زمان تعادلی، موجب افزایش غلظت تعادلی می شود. این موضوع نشان می دهد که افزایش بیش از حد تنش برشی باعث شکسته شدن توده های رسوبی و کاهش ته نشینی می شود.

جدول ۱. نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه برای تنش برشی متفاوت

تنش برشی (نیوتن بر مترمربع)					
۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۳۲	۰/۲۰	۰/۱۳	غلظت (گرم بر لیتر)
۰/۸۶۳	۰/۷۶۰	۰/۶۱۳	۰/۵۰۱	۰/۳۸۱	۵
۰/۸۹۸	۰/۷۲۲	۰/۶۶۹	۰/۵۶۹	۰/۳۶۰	۱۰
۰/۸۶۸	۰/۷۵۰	۰/۶۸۱	۰/۵۵۸	۰/۳۲۹	۲۰
۰/۸۲۲	۰/۶۹۰	۰/۶۱۵	۰/۴۷۷	۰/۲۵۳	۵
۰/۸۰۸	۰/۶۰۲	۰/۵۷۵	۰/۴۴۵	۰/۱۸۸	۱۰
۰/۸۰۲	۰/۶۸۵	۰/۵۸۲	۰/۴۵۳	۰/۱۸۳	۲۰
۰/۸۵۴	۰/۶۰۷	۰/۵۲۷	۰/۴۶۹	۰/۲۱۹	۵
۰/۸۰۳	۰/۶۲۷	۰/۵۸۰	۰/۴۱۱	۰/۲۱۸	۱۰
۰/۷۵۳	۰/۶۳۴	۰/۵۶۷	۰/۴۳۵	۰/۲۳۱	۲۰



شکل ۴. میزان ته نشینی رسوبات معلق در سطوح مختلف پساب- تنش برشی $\tau = 0.22 \frac{N}{m^2}$

شده است که نتایج در شکل ۶ قابل مشاهده است.

$$\frac{C_{eq}}{C_s}(W_{60}) = 0.3082 \ln(\tau) + 1.0058 \quad R^2 = 0.97 \quad [8]$$

$$\frac{C_{eq}}{C_s}(W_{30}) = 0.3504 \ln(\tau) + 0.9672 \quad R^2 = 0.95 \quad [9]$$

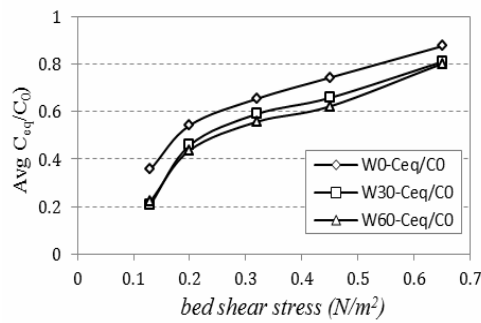
$$\frac{C_{eq}}{C_s}(W_{0}) = 0.3343 \ln(\tau) + 0.9314 \quad R^2 = 0.96 \quad [10]$$

تنش برشی آستانه و بحرانی ته نشینی

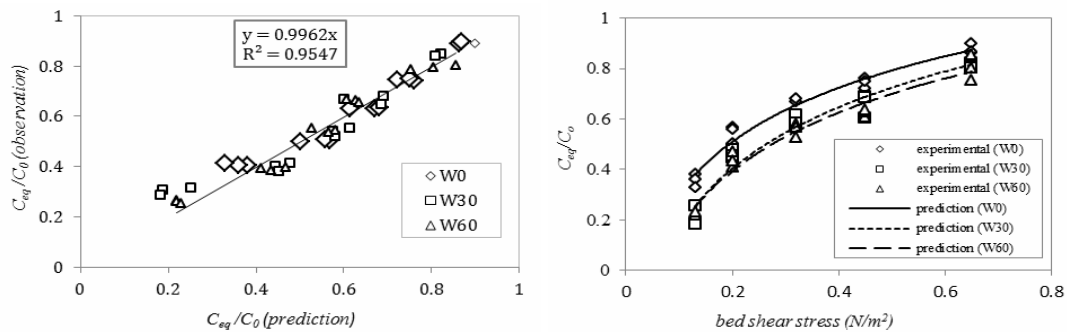
همان طور که در قسمت مقدمه بیان شد در فرآیند ته نشینی رسوبات چسبیده دو تنش برشی آستانه و کامل ته نشینی مدنظر قرار می گیرد. در تنش برشی آستانه ته نشینی نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات نزدیک به یک ($C_{eq} / C_s \approx 1$)

مختلف در یک تنش برشی مشخص یکسان است. این موضوع به خوبی در شکل ۴ قابل مشاهده است. در تنش های برشی دیگر نیز نتایج یکسان به دست آمد. با توجه به شکل ۵ و مقادیر جدول ۱ می توان نتیجه گرفت که پساب با کاهش غلظت تعادلی، ته نشینی رسوبات را افزایش می دهد. قابل مشاهده است که تفاوت اندکی بین درصد ته نشینی رسوبات معلق در غلظت ۳۰ و ۶۰ درصد پساب می باشد.

بر اساس نتایج غلظت تعادلی، روابط زیر، نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه را بر اساس تنش برشی به ترتیب برای آب خالص، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب نشان می دهد. در این روابط، نقش غلظت اولیه رسوبات در مقادیر C_{eq} / C_s تأثیر داده



شکل ۵. مقایسه تغییرات متوسط (C_{eq}/C_0) برای درصدهای مختلف پساب



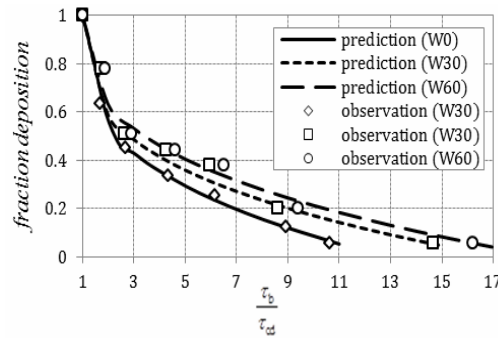
شکل ۶. الف) رابطه بین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه در برابر تنش برشی بستر، ب) رابطه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی برای سطوح مختلف پساب

جدول ۲. تنش برشی آستانه و ته‌نشینی کامل رسوبات مورد مطالعه

شرح	بدون پساب	۳۰٪ پساب	۶۰٪ پساب
آستانه ته‌نشینی	۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۱۲
ته‌نشینی کامل	۰/۰۵۳	۰/۰۷۵	۰/۰۷۰

ته‌نشینی شده است. به عبارت دیگر رسوبات در محلول حاوی پساب نسبت به آب خالص، در تنش‌های بزرگ‌تر نیز می‌توانند شروع به ته‌نشینی کنند و در تنش‌های بحرانی بزرگ‌تری به صورت کامل ته‌نشین شوند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش قطر توده‌های رسوبی و یا استحکام ساختمان توده‌ها در برابر تنش برشی جریان در این محلول باشد. از اینرو مدنظر قرار دادن تنش برشی آستانه ته‌نشینی در طراحی کانال‌های انتقال پساب برای شرایط غیر رسوب‌گذار ضروری به نظر می‌رسد.

خواهد بود. تنش برشی بحرانی (ته‌نشینی کامل) مقدار تنش برشی است که تقریباً کل رسوبات معلق بتوانند به طور کامل ته‌نشین شوند. در این حالت نسبت C_{eq}/C_0 بسیار نزدیک به صفر خواهد بود. با توجه به مقدار تنش برشی جریان، ته‌نشینی جزئی و کامل اتفاق می‌افتد. با استناد به روابط ۶ تا ۸ مقادیر تنش برشی آستانه و بحرانی ته‌نشینی در این پژوهش در جدول ۲ قابل مشاهده است. قابل استنباط است که پساب سبب افزایش در مقدار تنش برشی آستانه و تنش برشی بحرانی



شکل ۷. رابطه درصد ته‌نشینی و نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی بحرانی برای سطوح مختلف پساب

$$f_d(w_s) = 1 - 0.369 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.245}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 16/2 \quad [13]$$

f_d : درصد ته‌نشینی، τ_b : تنش برشی بستر و τ_{cd} : تنش برشی بحرانی ته‌نشینی می‌باشد.

با توجه به روابط فوق ملاحظه می‌شود که با افزایش پساب نسبت (τ_b/τ_{cd}) نیز افزایش می‌یابد. بنابراین میزان ته‌نشینی رسوبات معلق در محلول‌های حاوی پساب نسبت به آب خالص، در تنش‌های برشی بزرگ‌تری نیز اتفاق می‌افتد. میلپورن و کریشناپان (۹) با انجام یک سری آزمایش در فلوم دوار، مقدار تنش بحرانی ته‌نشینی برای رسوبات رودخانه *Hay River* را برابر با $0.08 \frac{N}{m^2}$ به دست آوردند. این محققین رابطه درصد ته‌نشینی را به صورت زیر ارائه دادند.

$$f_d = 1 - 0.455 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.57}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 5 \quad [14]$$

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در یک تنش برشی مشخص، هرچه غلظت اولیه رسوبات معلق بیشتر باشد، غلظت تعادلی مشاهده شده نیز بزرگ‌تر بوده و پساب موجب کاهش غلظت تعادلی رسوبات می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل تأثیر خصوصیات شیمیایی پساب در استحکام توده‌های رسوبی باشد. مقادیر تنش برشی ته‌نشینی کامل برای سطوح مختلف به ترتیب ۰/۰۵۳، ۰/۰۷۰ و ۰/۰۷۵ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. در نهایت روابطی بین نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی

قابل مشاهده است که تفاوت چندانی بین تنش برشی آستانه و ته‌نشینی رسوبات برای درصدهای مختلف پساب نمی‌باشد.

مقدار ته‌نشینی رسوبات

شکل ۷ نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی بحرانی ته‌نشینی را بر حسب درصد ته‌نشینی برای سطوح مختلف پساب نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که زمانی که تنش برشی بستر به اندازه یا کمتر از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی $(\tau_b/\tau_{cd} \leq 1)$ باشد، رسوبات می‌توانند ته‌نشین شوند و از طرفی دیگر مقدار ته‌نشینی با افزایش نسبت بالا، کاهش می‌یابد. زمانی که تنش برشی بستر برای درصدهای مختلف پساب (صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد) به ترتیب حدود ۱۱، ۱۵ و ۱۷ برابر تنش برشی بحرانی ته‌نشینی باشد، مقدار ته‌نشینی برابر صفر است و تمام رسوبات معلق در ابتدای آزمایش به صورت معلق باقی می‌مانند.

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 روابط زیر به ترتیب برای آب خالص، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب قابل محاسبه است. این مقادیر در شکل (۷) به صورت خط پر نشان داده شده‌اند.

$$f_d(w_s) = 1 - 0.47 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.319}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 9/7 \quad [11]$$

$$f_d(w_s) = 1 - 0.413 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{0.318}, \quad 1 < \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} < 14/7 \quad [12]$$

ته‌نشینی کامل (τ_b / τ_{cd}) و مقدار ته‌نشینی برقرار شد و مشخص شد به‌ازای مقادیر ۱۱، ۱۵ و ۱۷ برای نسبت (τ_b / τ_{cd}) به‌ترتیب برای سطوح مختلف پساب، تمام ذرات به‌صورت معلق باقی می‌مانند. مدنظر قرار دادن نتایج حاصل در اجرای طراحی کانال‌های حاوی پساب در شرایط غیر رسوب‌گذار ضروری به‌نظر می‌رسد.

منابع مورد استفاده

۱. خواستار بروجنی، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبنده در کانال‌های انتقال آب. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲. عابدی، م. پ. نجفی، ۱۳۸۰. استفاده از پساب تصفیه شده در کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
۳. وجدانی، ن. م. قمشی و م. شفاعی بجستان. ۱۳۸۱. بررسی آزمایشگاهی تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده شش کانال آبیاری در استان خوزستان. ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
4. Haralampides, K., A. Mc Corquodale and B. G. Krishnappan. 2003. Deposition properties of fine sediment. J. Hydraul. Eng. (ASCE). 129: 230-234.
5. Ha, K. H. and J. P. Y. Maa. 2009. Evaluation of two conflicting paradigms for cohesive sediment deposition. Marine Geol. 265:120-129.
6. Huang, J., R. C. Hilldate, B. P. Greiman. 2006. Erosion and sedimentation manual. U.S. Department of the Interior. United States Bureau of Reclamation.
7. Krishnappan, B. G. 2006. Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume. The 7th Intl. Conf. on Hydrol. Sci. and Eng. (ICHE), Sep10-13, Philadelphia, USA.
8. Krishnappan, B. G. and P. Engel. 2004. Distribution of bed shear stress in rotating circular flume. J. Hydraul. Eng. (ASCE), 130: 324-331.
9. Milburn, D. and B. G. Krishnappan. 2001. Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River, Northwest Territories, Canada. Paper presented at the 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. 19-24.
10. Partheniades, E. 2009. Cohesive Sediments in Open Channels. 1st ed., Elsevier Inc., USA.
11. Samadi-Boroujeni H. 2004. Modeling of deposition and self weight consolidation of cohesive sediments. PhD. Thesis, College of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran Univ. of Ahvaz.
12. Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan. 1998. A laboratory investing of depositional characteristics of mud from an Inland Harbour using a rotating circular flume. Water, Air and Soil Pollut. 112:1-19.
13. Winterwerp, J. C. 2007. On the sedimentation rate of cohesive sediment. Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics, 209-225.