

بررسی اثر غلظت پساب تصفیه‌شده شهری بر سرعت ته‌نشینی ذرات چسبنده در سامانه‌های انتقال آب

میلاذ خواستار بروجنی^۱، کاظم اسماعیلی*^۲، حسین صمدی بروجنی^۳ و علی‌نقی ضیائی^۲

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۱۳۹۵/۶/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۱۳۹۶/۳/۱)

چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی‌های مکرر و کمبود منابع آبی ناشی از این شرایط، رویکرد به استفاده از منابع آب تجدیدپذیر همچون کاربرد پساب تصفیه شده شهری در جهت تأمین بخشی از منابع آبی مورد نیاز افزایش یافته است. استفاده از پساب شهری در بخش کشاورزی تاکنون به طور معمول صورت می‌گرفته، اما استفاده برنامه‌ریزی شده و انتقال آن از طریق شبکه‌های آبیاری و اختلاط آن با آب حاوی رسوب چسبنده که از طریق انحراف از رودخانه‌ها صورت می‌گیرد، مشکلات متعددی همچون رسوب‌گذاری ذرات چسبنده در سازه‌های انتقال را افزایش داده است. مواد آلی موجود در پساب تصفیه شده شهری و تمایل رسوبات چسبنده به واکنش‌پذیری، باعث تأثیر در رفتار رسوبات چسبنده شده است. در این تحقیق اصول ته‌نشینی ذرات رسوبی و سرعت سقوط رسوبات چسبنده در تنش‌های برشی متفاوت و غلظت‌های مختلف پساب و رسوب با استفاده از کانال دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش میزان پساب سبب افزایش سرعت سقوط در غلظت‌های مختلف رسوب می‌شود. همچنین مقایسه نتایج این پژوهش با معادلات تجربی ارائه شده در این زمینه حاکی از آنست که سرعت سقوط ذرات وابسته به مقدار تنش برشی و غلظت رسوبات معلق می‌باشد و بر این اساس روابطی برای سرعت سقوط رسوبات مورد استفاده ارائه شد.

کلیدواژه‌ها: نرخ ته‌نشینی، تنش برشی بحرانی، فلوم دوار، سرعت‌سنج صوتی.

۱- مقدمه

اثرات زیست‌محیطی بسیاری نیز به همراه دارد (معاذ و همکاران، ۱۳۸۵؛ حسن‌لی و جوان، ۱۳۸۴). رسوبات چسبنده دارای نیروهای قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات می‌باشد. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح آن‌ها در واحد حجم (سطح ویژه) می‌شود و نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (Huang و همکاران، ۲۰۰۶). این نیروی بین ذره‌ای سبب فلوکوله‌شدن ذرات می‌شود که عامل تغییر خصوصیات فیزیکی در فلوک‌ها، از قبیل قطر ذرات، دانسیته و سرعت ته‌نشینی نسبت به ذرات اولیه، می‌باشد. به طوری که ته‌نشینی رسوبات ریزدانه چسبنده حتی در کانال-هایی که براساس معیار سرعت غیر رسوب‌گذار طراحی می‌شوند،

قرارگیری سرزمین ایران در کمربند خشک و توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش موجب کمبود آب در کشور شده است. این موضوع باعث اهمیت یافتن منابع تجدیدپذیر همچون پساب تصفیه شده شهری به عنوان یک منبع غنی از عناصر مغذی که به طور مستقیم با آب آبیاری مخلوط شده و یا این که به طور غیرمستقیم مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، شده است. معمولاً پساب‌های شهری ترکیبی از مواد آلی (هیدروکربن‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها)، نمک‌های محلول، عناصر غذایی گیاهان (K, N, P) و گاهی نیز مواد سمی همانند برخی از فلزات سنگین را دارد. از این رو مواد موجود در پساب در رفتار رسوبات چسبنده همراه آب آبیاری و بسیار تأثیرگذار می‌باشد و

* کاظم اسماعیلی؛ شماره تماس: ۰۵۱-۳۸۸۰۵۸۱۳

Krone (۱۹۶۲)، با مطالعاتی پیرامون رسوبات چسبنده دریافت که سرعت ته‌نشینی با غلیظسازی رسوبات افزایش می‌یابد و فرمول زیر را پیشنهاد کرد (Huang و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\omega = KC_s^{\frac{3}{4}} \quad (۴)$$

در این رابطه، ω سرعت سقوط (متر بر ثانیه)، C_s غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر) و K ضریب تجربی که تقریباً برابر با ۰/۰۰۰۱ مربوط به نوع رسوبات می‌باشد. Thorn (۱۹۸۱)، رابطه زیر را براساس غلظت رسوبات ارائه داد.

$$\begin{cases} C_s \leq 3 \left(\frac{gr}{T}\right) \\ 3 < C_s < 10 \left(\frac{gr}{T}\right) \end{cases} \begin{cases} \omega_s = 0.513C_s^{1.3} \\ (2.6 \times 10^{-3}(1 - 0.008C_s))^{4.65} \end{cases} \quad (۵)$$

Nicholson و O'Connor (۱۹۸۶)، رابطه را زیر برای تعیین سرعت ته‌نشینی با ترکیب عوامل به‌دست آوردند.

$$\omega = A_1 C_s^{B_1} \quad C_s \leq C_H \quad (۶)$$

$$\omega = A_1 C_H^{B_1} [1.0 - A_2 (C_s - C_H)^{B_2}] \quad C_s \leq C_H \quad (۷)$$

C_H ۲۵ گرم بر لیتر که غلظت اولیه برای جلوگیری از ته‌نشینی است. دیگر پارامترها نیز به شرح زیر می‌باشد.

$$A_1 = 6.0 \times 10^{-4} \frac{m^4}{kg/s}, \quad A_2 = 1.0 \times 10^{-2} \frac{m^3}{kg}, \quad B_1 = 1.0, \quad B_2 = 5.0$$

Burban و همکاران (۱۹۹۰)، میزان سرعت ته‌نشینی را با قطر متوسط توده‌ای (d_m) در ارتباط دانسته و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه زیر را ارائه دادند:

$$\omega = ad_m^b \quad (۸)$$

$$a = B_1 (C_s \tau)^{0.85} \quad (۹)$$

$$b = -[0.8 + 0.5 \log(C_s \tau - B_2)] \quad (۱۰)$$

$$d_m = \left(\frac{\alpha_0}{C_s \tau}\right) \quad (۱۱)$$

C_s : غلظت رسوبات چسبنده (gr/cm^3)، τ تنش برشی سیال (N/m^2)، d_m متوسط قطر ذره توده‌ای (cm)، B_1 و B_2 ضرایب آزمایشگاهی هستند که به ترتیب $7/5 \times 10^{-6}$ و $9/6 \times 10^{-6}$ می‌باشد. α ضریب آزمایشگاهی در آب شیرین برابر با 10^{-8} می‌باشد (Huang و همکاران، ۲۰۰۶).

Lau و Krishnappan (۱۹۹۱)، سرعت ته‌نشینی (سقوط) ذرات چسبنده را با زمان متغیر دانسته و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

مشاهده شده است (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰). این فاز از ته‌نشینی رسوبات را می‌توان با توجه به پدیده هم‌آوری (فلوکوله شدن) و اندرکنش رسوبات ریزدانه با ترکیبات معدنی سیال توضیح و مورد بررسی قرار داد.

یکی از عوامل مهم در حرکت و جابه‌جایی رسوبات چسبنده در مجاری انتقال، تعیین سرعت سقوط توده‌های رسوبی می‌باشد. برای ذرات رسوبی غیر چسبنده سرعت سقوط براساس برابری نیروی گرانش و نیروی کشش قابل محاسبه است، اما در مطالعه رسوبات ریزدانه به دلیل خاصیت فیزیکی شیمیایی و چسبندگی این ذرات، تعیین این پارامتر مشکل‌تر است (Baldock و همکاران، ۲۰۰۴). به دلیل پیچیدگی در رفتار رسوبات ریزدانه بسیاری از خصوصیات آن‌ها نامشخص است و قوانین محکمی برای تبیین و تفسیر رفتار آن‌ها موجود نمی‌باشد. از این رو محاسبه مستقیم سرعت سقوط ذرات بسیار مشکل و یا حتی غیر قابل انجام است. در اکثر معادله‌ها و روابط موجود برای تعیین سرعت سقوط، قطر توده‌های رسوبی به عنوان یکی از پارامترهای اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. اما واقعیت این است که در فرآیند ته‌نشینی رسوبات چسبنده، قطر توده‌های رسوبی در اعماق و زمان‌های مختلف متغیر است (آرمان و همکاران، ۲۰۰۹). علی‌رغم چنین رفتاری از رسوبات چسبنده، تعیین مقادیر واقعی برخی پارامترها در محل امکان‌پذیر است و یا می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی استفاده کرد (Madsen و Jose، ۲۰۰۳).

رابطه (۱) حالت اصلاح شده نرخ ته‌نشینی کرون^۱ (۱۹۶۲) می‌باشد که برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است (Huang و همکاران، ۲۰۰۶).

$$Q_d = P_d \omega (c - c_{eq}) \text{ for } \tau_{d,Full} < \tau < \tau_{d,Part} \quad (۱)$$

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,Part}} \text{ for } \tau_{d,Full} < \tau < \tau_{d,Part} \quad (۲)$$

برای ته‌نشینی جزئی، زمانی که تنش برشی کف بزرگ‌تر از تنش برشی بحرانی باشد ته‌نشینی وجود ندارد و دبی ته‌نشینی برابر صفر خواهد بود:

$$P_d = 0 \text{ for } \tau \geq \tau_{d,Part} \quad (۳)$$

در روابط فوق، Q_d نرخ ته‌نشینی، P_d احتمال ته‌نشینی، ω سرعت سقوط توده‌های رسوبی، C و C_{eq} به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی رسوبات، τ تنش برشی بستر، $\tau_{d,Part}$ تنش برشی بحرانی ته‌نشینی جزئی و $\tau_{d,Full}$ تنش برشی بحرانی ته‌نشینی کامل می‌باشد.

۲- روش تحقیق

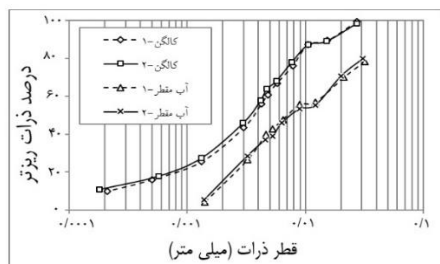
به منظور سنجش سرعت سقوط توده‌های رسوبی، آزمایش‌های تهنشینی در غلظت‌های اولیه رسوب ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و در پنج تنش‌برشی ۰/۱۲، ۰/۲۰، ۰/۳۲، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ نیوتن بر متر مربع و برای غلظت‌های صفر (W0)، ۳۰ (W30) و ۶۰ (W60) درصد پساب انجام شد. مدت هر آزمایش براساس آزمایش‌های اولیه و رسیدن به غلظت تعادلی، چهار ساعت انتخاب شد و براساس تغییرات غلظت نسبت به زمان، میزان تهنشینی رسوبات مورد بررسی قرار گرفت. به منظور استفاده از سه شیر نمونه‌گیری عمق مورد نظر آزمایش‌ها ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد.

رسوبات ریزدانه مورد استفاده شامل ۶۳/۲ درصد رس، ۳۶/۸ درصد سیلت و با قطر متوسط ۰/۰۰۳۵ میلی‌متر بود. همچنین به منظور مشخص کردن خاصیت چسبندگی رسوبات، آزمایش هیدرومتری بدون ماده جداکننده (کالگن) نیز انجام شد که در شکل (۱) منحنی دانه‌بندی در دو حالت با و بدون کالگن نشان داده شده است. اختلاف دو منحنی نشانگر وجود خاصیت فلوکوله شدن ذرات می‌باشد. براساس تحلیل تنش‌های برشی و معادله‌های مربوط، مقدار تنش‌برشی آستانه تهنشینی رسوبات مورد استفاده و تنش‌برشی بحرانی تهنشینی کامل (تنش‌برشی که ۹۹ درصد رسوبات در آن تهنشین شوند) برای غلظت‌های مختلف پساب در جدول (۱) ارائه شده است (خواستار بروجنی، ۱۳۹۰).

جدول ۱- مقادیر تنش برشی آستانه تهنشینی و تهنشینی کامل برای غلظت‌های مختلف پساب (N/m²)

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

پساب تصفیه‌شده نیز از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه شد که برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی پساب به شرح جدول (۲) است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی

$$\omega = \frac{h}{t_2 - t_1} \ln \frac{C_{t_1}}{C_{t_2}} \quad (12)$$

که در آن C_{t1} و C_{t2} غلظت مواد معلق در زمان‌های t_1 ، t_2 و h عمق جریان می‌باشد (اردلان، ۱۳۸۵).

روش دیگری که برای تعیین سرعت سقوط مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام آزمایش‌های تهنشینی است. در این موارد سیال ساکن نبوده و عمل فلوکوله‌شدن و تهنشینی رسوبات چسبیده تحت تأثیر تنش‌برشی و آشفتگی جریان اندازه‌گیری می‌شود. شبیه‌سازی جریان آشفته با تنش‌برشی مشخص ممکن است در کانال مستقیم و یا کانال‌های دایره‌ای انجام گیرد. اما فرآیند انتقال رسوبات ریزدانه فرآیندی زمان‌بر است که از یک ساعت تا روزها به طول می‌انجامد و رسیدن به این زمان با استفاده از فلوم مستقیم عملی نیست، مگر این که از یک کانال بسیار بلند استفاده شود که با توجه به فضای آزمایشگاهی این امر امکان‌پذیر نیست. از طرفی در این نوع کانال‌ها چرخش جریان توسط پمپ می‌باشد که تخریب ساختار فلوکوله‌ها توسط انرژی بالای پمپ، سبب ایجاد خطا در نتایج بررسی رفتار رسوبات چسبیده می‌شود (Huang و همکاران، ۲۰۰۶؛ Winterwerp، ۲۰۰۶).

در مطالعه رسوبات چسبیده بیشتر محققین از طرح کانال‌های دایره‌ای استفاده کرده‌اند، از این‌رو نتایج ارائه شده در مورد رسوبات چسبیده عمدتاً مربوط به کانال دایره‌ای است. استفاده از فلوم‌های دایره‌ای برای مطالعات رسوبات چسبیده به دلیل مزایای آن نسبت به فلوم‌های مستقیم از سال ۱۹۹۶ توسط Partheniades متداول شده است. این جایگزینی تضمین خواهد کرد که ذرات به هم چسبیده رسوبات ریزدانه، به وسیله عامل خارجی یعنی پمپ از هم جدا نخواهند شد و تنها تنش-برشی جریان بر آن اثر خواهد گذاشت. مزیت دیگر این فلوم-ها این است که از لحظه شروع حرکت، جریان به شکل کامل در تمام فلوم توسعه یافته و باعث توزیع یکنواخت تنش‌برشی در جهت جریان خواهد شد (Partheniades، ۲۰۰۹).

با توجه به فاصله بین تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و محل مصرف آن، استفاده از کانال‌های انتقال امری ضروری است. از طرفی رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبیاری علاوه بر کاهش حجم انتقال، موجب ایجاد هزینه‌های لایروبی می‌شود. لذا هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پساب بر رفتار رسوبات چسبیده نظیر سرعت سقوط می‌باشد تا بر اساس آن بتوان کانال‌های حاوی پساب را در بازه غیر رسوب‌گذار طراحی کرد.

دارد. 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 و درپوش مجهز به دو الکتروموتور مجزا هستند که قابلیت چرخش در خلاف یکدیگر را فراهم می‌نماید. الکتروموتورها به دستگاه متناوب‌ساز مجهز هستند که با تغییر در فرکانس برق شبکه، امکان تنظیم دور موتور در سرعت‌های مختلف را فراهم می‌نماید. نمایی از اجزای این فلوم در شکل (۲) قابل مشاهده است.

در ابتدای کار برای چگونگی توزیع پروفیل سرعت و تنش-برشی در عرض فلوم دایره‌ای از سرعت‌سنج صوتی (ADV) استفاده شد. بر این اساس روابطی بین مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش با مشخصات هیدرولیکی جریان (سرعت و تنش-برشی) به دست آمد و از این روابط برای آزمایش‌های مختلف استفاده شد. در این آزمایش‌ها توزیع سرعت و تنش‌برشی برای پنج اختلاف سرعت فلوم و درپوش و چهار نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم (۲/۳، ۱/۱، ۱/۱، ۱) با استفاده از دستگاه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. اولین مقطع در پنج سانتی‌متری دیواره داخلی قرار دارد و مقاطع بعدی با همان فاصله به سمت دیواره خارجی حرکت داده شد. در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه‌گیری و سرعت متوسط جریان با توجه به تأثیر منطقه اندازه‌گیری، به صورت وزنی محاسبه می‌شود. به منظور کار با این دستگاه از پایه‌ای سوار بر فلوم استفاده شد که علاوه بر حرکت سرعت‌سنج در عرض کانال، امکان جا-به‌جایی عمودی و یا زاویه‌دار قرار گرفتن سرعت‌سنج را در فلوم فراهم می‌کند.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی شیمیایی پساب

| پارامتر | واحد | پساب | استاندارد |
|------------------------------|-------------------|-------|-----------|
| هدایت الکتریکی | ds/m | ۰/۷۷۵ | - |
| واکنش (PH) | — | ۷/۸۹ | ۶/۵ - ۹/۰ |
| چگالی | Kg/m ³ | ۹۸۹/۵ | - |
| غلظت کل جامدات حل شده | mg/l | ۴۴۱/۸ | ۲۵۰۰ |
| پتاسیم | mg/l | ۲/۶۴ | بدون حد |
| سدیم | mg/l | ۲/۵۲ | بدون حد |
| کلسیم | mg/l | ۶۵/۴۴ | - |
| منیزیم | mg/l | ۱۶/۶۶ | ۱۰۰ |
| نیترات | mg/l | ۱۵/۴۸ | ۲۰-۸۵ |
| اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD) | mg/l | ۱۸/۴۵ | بدون حد |
| اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) | mg/l | ۳۰ | ۲۰۰-۵۰۰ |
| کلراید | mg/l | ۸۵ | ۶۰۰ |

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم دوار با قطر داخلی، خارجی و متوسط به ترتیب ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر، واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. این مدل از دو قسمت مجزای فلوم و درپوش تشکیل شده است. فلوم از جنس گالوانیزه و مجهز به پنجره‌های پلکسی‌گلس جهت مشاهده جریان 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



شکل ۲- نمایی از اجزای فلوم دایره‌ای مورد استفاده

نیوتن بر متر مربع) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است.

برای محاسبه نرخ ته نشینی از رابطه (۱۳) استفاده شد. از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب ته نشینی مشخص می شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط ته نشینی در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم به دست می آید:

$$Q_d = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (14)$$

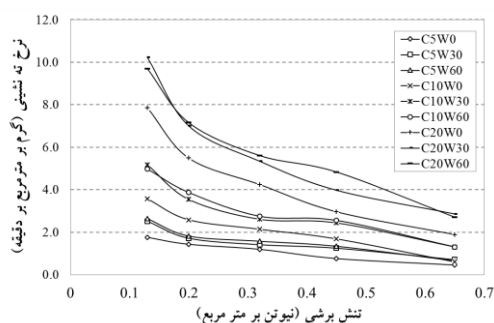
در رابطه فوق، Q_d نرخ ته نشینی (گرم بر متر مربع بر دقیقه)، C_i غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)، V_{flume} حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)، t_i زمان (دقیقه) و A مساحت بستر فلوم (متر مربع) می باشد.

قابل ذکر است که در محاسبه نرخ ته نشینی در طول آزمایش، از غلظت متوسط که به صورت وزنی محاسبه شد، استفاده گردید. در این روش محاسبه، تأثیر هر غلظت در بازه زمانی در نظر گرفته شد که زمان اندازه گیری غلظت مورد نظر مرکز ثقل بازه زمانی مذکور باشد. به بیان دیگر بازه زمانی بین دو نمونه گیری به دو بخش مساوی تقسیم و هر کدام از این دو بخش به یکی از غلظت های موجود در ابتدا و انتهای بازه مذکور مرتبط شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نرخ ته نشینی نرخ ته نشینی

با استفاده از رابطه (۱۴) نرخ ته نشینی برای تمامی آزمایش ها در بازه (۰-۲۴۰) دقیقه به دست آمد که در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۳- تغییرات نرخ ته نشینی در برابر تنش برشی و سطوح مختلف پساب (۰-۲۴۰ دقیقه)

پروفیل سرعت و تنش برشی در فلوم دوار با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) اندازه گیری، و مشخص شد زمانی که درپوش و فلوم در خلاف یکدیگر به حرکت درآیند و نسبت سرعت چرخش درپوش به سرعت چرخش فلوم $(\frac{N_r}{N_f})$ ۱/۱ 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. Engel و Krishnappan (۲۰۰۴)، این نسبت را برای عمق ۱۲ سانتی متر فلوم دواری در کانادا ۱/۱۷ به دست آوردند.

رابطه سرعت چرخش فلوم و تنش برشی، کالیبره و معادله ای به صورت زیر تعیین شد:

$$\tau = 0.0256\omega^{1.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad (15)$$

در این رابطه τ تنش برشی متوسط جریان (N/m^2) و ω مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه) است. Ha و Maa (۲۰۰۹)، نیز در تحقیقات خود، رابطه بین تنش برشی و سرعت چرخش فلوم دوار را به صورت نمایی به دست آوردند.

۲-۲- طراحی آزمایش ها

ترتیب آزمایش ها بدین گونه طرح ریزی شد که ابتدا کم ترین غلظت رسوب (۵ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش ها برای پنج تنش برشی انجام گردید. در این پژوهش روند اعمال تنش برشی از مقدار تنش کمتر به سمت تنش برشی بزرگ تر بود. در ادامه آزمایش ها با افزودن رسوب غلظت های بعدی (۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش ها به همین ترتیب ادامه یافت. نمونه گیری در یک ساعت اولیه هر ۱۵ دقیقه یکبار و در ادامه با فواصل ۳۰ دقیقه ای انجام شد. در هر زمان از چهار موقعیت مختلف و سه عمق، نمونه گیری به عمل آمد که در نهایت غلظت رسوبات معلق با توجه به منطقه تأثیر هر شیر به صورت وزنی و از روش توزین محاسبه شد. لازم به ذکر است که قبل از شروع آزمایش ها فلوم به منظور خرد شدن و مخلوط کامل توده های رسوبی به مدت ۳۰ دقیقه با بیش ترین سرعت به چرخش در می آید که تنش برشی معادل، ۱۱/۲ نیوتن بر متر مربع ایجاد می کند. Krishnappan (۲۰۰۶)، Haralampides و همکاران (۲۰۰۳)، Skafel و Krishnappan (۱۹۹۸)، در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیش ترین سرعت (حداکثر تنش برشی، ۰/۶

ثابت است، با افزایش تنش برشی نرخ ته نشینی کاهش یافته و این کاهش در غلظت‌های بزرگ‌تر مشهودتر است. در تنش‌های بزرگ گرچه افزایش غلظت سبب افزایش برخورد بین ذره‌های رسوبی شده، اما تأثیر تنش برشی در شکستن توده‌های رسوبی بیشتر است.

۲-۲- احتمال ته نشینی

با توجه به مشخص بودن مقادیر تنش برشی آستانه ته نشینی و تنش برشی بستر و نظر به آزمایش‌های ته نشینی این تحقیق که از نوع ته نشینی جزئی می‌باشد، احتمال ته نشینی را می‌توان به شکلی که در رابطه (۲) بیان شد، محاسبه نمود. از آنجایی که تنش برشی بستر در آزمایش‌ها کوچک‌تر از مقدار تنش برشی آستانه ته نشینی می‌باشد، احتمال ته نشینی همواره بزرگ‌تر از صفر خواهد بود که در جدول (۱) قابل مشاهده است.

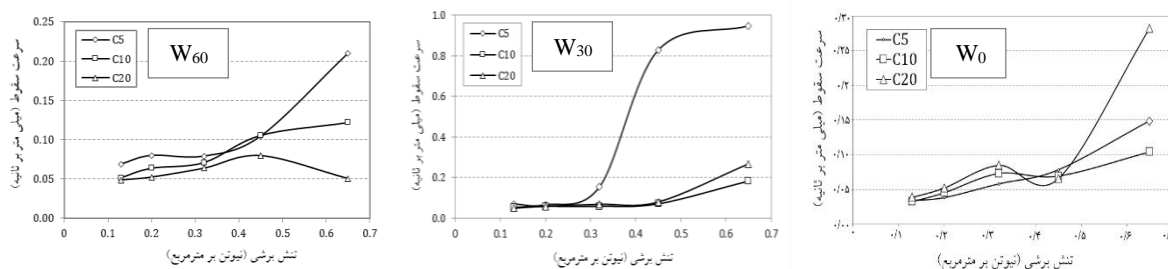
جدول ۲- احتمال ته نشینی توده‌های رسوبی در سطوح مختلف پساب، غلظت اولیه و تنش برشی بستر

| تنش برشی (نیوتن بر متر مربع) | | | | | غلظت (گرم بر لیتر) | آب خالص |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|--------------|
| ۰/۱۳ | ۰/۲۰ | ۰/۳۲ | ۰/۴۵ | ۰/۶۵ | | |
| ۰/۳۸۱ | ۰/۵۰۱ | ۰/۶۱۳ | ۰/۷۶۰ | ۰/۸۶۳ | ۵ | آب خالص |
| ۰/۳۶۰ | ۰/۵۶۹ | ۰/۶۶۹ | ۰/۷۲۲ | ۰/۸۹۸ | ۱۰ | |
| ۰/۳۲۹ | ۰/۵۵۸ | ۰/۶۸۱ | ۰/۷۵۰ | ۰/۸۶۸ | ۲۰ | |
| ۰/۲۵۳ | ۰/۴۷۷ | ۰/۶۱۵ | ۰/۶۹۰ | ۰/۸۲۲ | ۵ | ۳۰ درصد پساب |
| ۰/۱۸۸ | ۰/۴۴۵ | ۰/۵۷۵ | ۰/۶۰۲ | ۰/۸۰۸ | ۱۰ | |
| ۰/۱۸۳ | ۰/۴۵۳ | ۰/۵۸۲ | ۰/۶۸۵ | ۰/۸۰۲ | ۲۰ | |
| ۰/۲۱۹ | ۰/۴۶۹ | ۰/۵۲۷ | ۰/۶۰۷ | ۰/۸۵۴ | ۵ | ۶۰ درصد پساب |
| ۰/۲۱۸ | ۰/۴۱۱ | ۰/۵۸۰ | ۰/۶۲۷ | ۰/۸۰۳ | ۱۰ | |
| ۰/۲۳۱ | ۰/۴۳۵ | ۰/۵۶۷ | ۰/۶۳۴ | ۰/۷۵۳ | ۲۰ | |

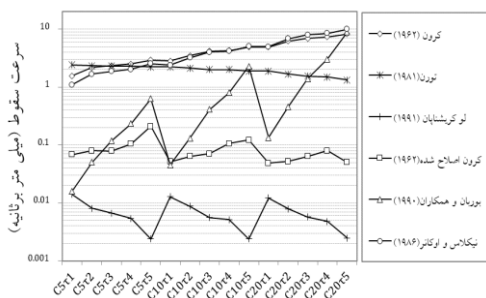
غلظت‌ها، سرعت سقوط دارای یک افزایش ناگهانی در تنش‌های برشی بزرگ می‌باشد. این رخداد به دلیل اختلاف کم بین غلظت رسوبات معلق و غلظت تعادلی می‌باشد. با توجه به معادله (۱) بدیهی است که مقدار کم ($C-C_{eq}$) باعث افزایش سرعت سقوط می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که محاسبه سرعت سقوط از رابطه اصلاح شده کرون در حالتی که تفاوت اندکی بین غلظت اولیه و غلظت تعادلی باشد، از دقت کافی برخوردار نیست.

۲-۳- سرعت سقوط توده‌های رسوبی

با مشخص بودن نرخ ته نشینی، احتمال ته نشینی توده‌های رسوبی، غلظت متوسط در طول بازه زمانی ته نشینی و غلظت تعادلی رسوبات چسبنده و سرعت سقوط توده‌ها را می‌توان با استفاده از معادله اصلاح شده کرون (معادله (۱)) محاسبه نمود. شکل (۴) سرعت ته نشینی را برای سطوح مختلف پساب و تنش برشی نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در برخی از



شکل ۴- تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی در برابر تنش برشی برای غلظت‌های مختلف پساب



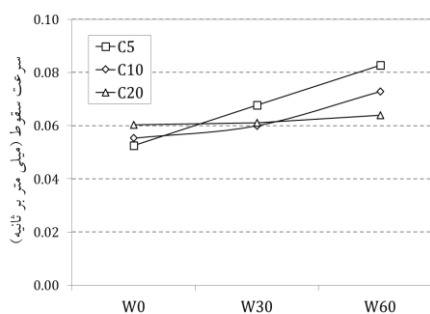
شکل ۸- مقادیر سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس روابط مختلف - ۶۰ درصد پساب

نتایج نشان می‌دهد، در تحقیق حاضر برای سطوح مختلف پساب، مقادیر سرعت سقوط بر اساس روابط اصلاح شده Krone و Burban و همکاران، دارای یک الگوی نوسان می‌باشند. بدین ترتیب که در یک غلظت معین با افزایش تنش برشی، سرعت سقوط نیز افزایش می‌یابد. الگوی تغییرات سرعت سقوط در رابطه Lau و Krishnappan (۱۹۹۱)، کاملاً برعکس مقادیر به دست آمده از رابطه اصلاح شده Krone می‌باشد. در رابطه Burban و همکاران (۱۹۹۰)، از دو پارامتر تنش برشی جریان و غلظت رسوبات برای محاسبه سرعت سقوط استفاده شده است در صورتی که در رابطه Lau و Krishnappan، سرعت سقوط ذرات فقط وابسته به غلظت ذرات می‌باشد.

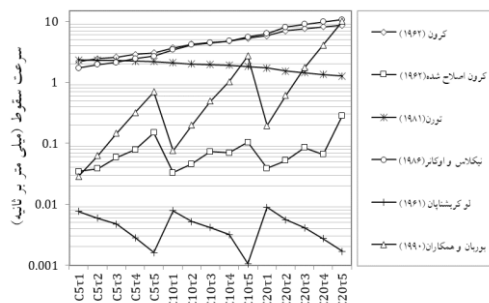
به منظور بررسی بیشتر وابستگی سرعت سقوط، براساس روابط مختلف، نسبت به تغییرات غلظت و تنش برشی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل‌های (۸) تا (۱۰) برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر، $\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}$ و سطوح مختلف پساب قابل مشاهده است. در تمام روابط فوق به جز Lau و Krishnappan و Thorn (۱۹۸۱)، مشاهده می‌شود که افزایش تنش برشی و غلظت اولیه سبب افزایش سرعت سقوط توده‌های رسوبی می‌شود. همچنین هماهنگی مقادیر سرعت سقوط بر اساس معادلات Krone و Nicholson و O'Connor (۱۹۸۶)، در غلظت‌ها و تنش برشی مختلف، قابل توجه و بررسی بیشتر می‌باشد.

با توجه به شکل‌های (۹) تا (۱۱) مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده سرعت سقوط برای سطوح مختلف پساب، وابسته به تغییرات دو پارامتر تنش برشی و غلظت رسوبات می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر سرعت سقوط براساس معادله Lau و Krishnappan (۱۹۹۱)، نسبت به تغییرات تنش برشی حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. این در حالی است که این معادله فقط بر اساس غلظت اولیه رسوبات برقرار گردیده است.

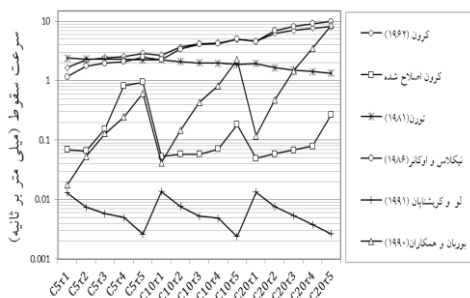
با استناد به شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت سقوط در آزمایش‌های مختلف از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. به همین منظور مقادیر غیرمنطقی حذف و میانگین سرعت سقوط برای غلظت‌های متفاوت محاسبه شد. با توجه به شکل (۵) می‌توان استنباط کرد که افزایش میزان پساب سبب افزایش سرعت سقوط در غلظت‌های مختلف می‌شود. افزایش سرعت سقوط با غلظت اولیه رسوبات رابطه معکوس دارد و غلظت ۵ گرم بر لیتر، بیش‌ترین افزایش سرعت سقوط را به خود اختصاص داده است. برآورد سرعت سقوط رسوبات چسبیده، با استفاده از روابط ذکر شده قبلی نشان دهنده نتایج قابل توجهی است که در شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است.



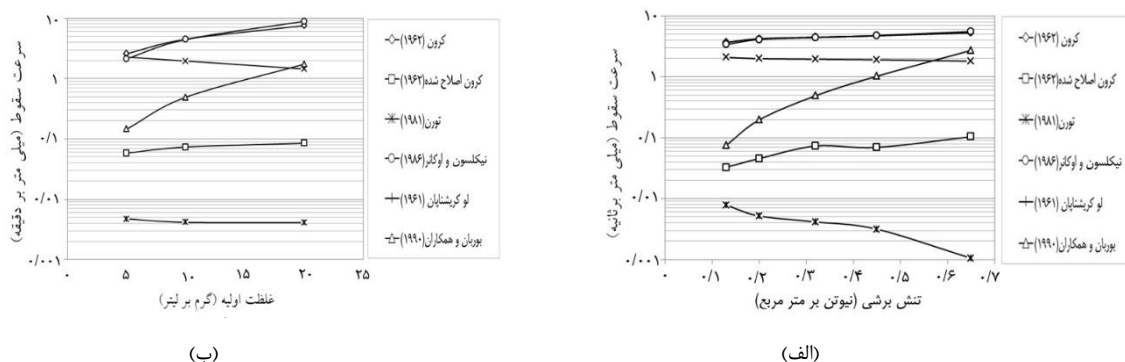
شکل ۵- متوسط سرعت سقوط در غلظت‌های متفاوت و سطوح مختلف پساب



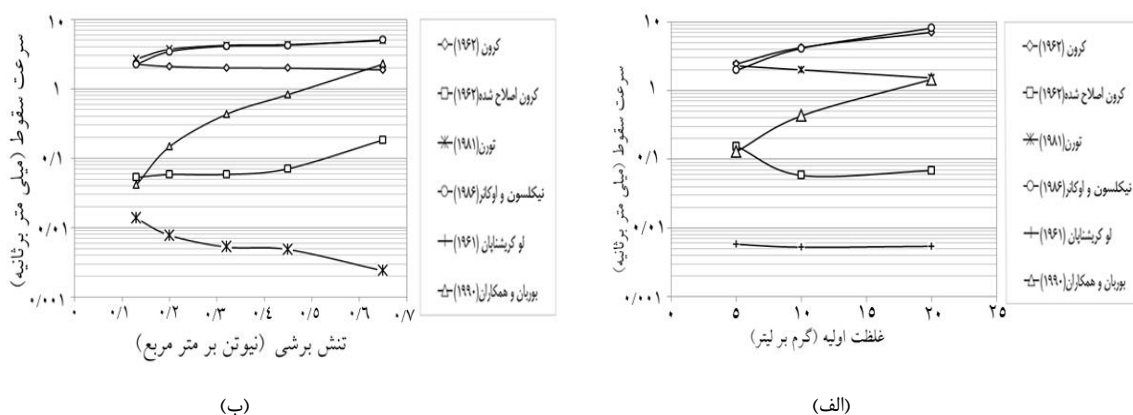
شکل ۶- مقادیر سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس روابط مختلف - آب خالص



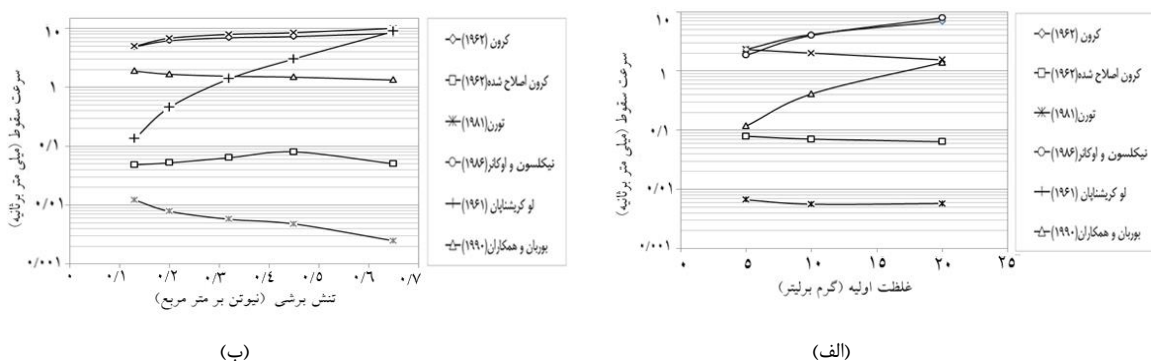
شکل ۷- مقادیر سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس روابط مختلف - ۳۰ درصد پساب



شکل ۹- الف) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ب) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت‌های مختلف (تنش برشی $\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}$)



شکل ۱۰- الف) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ب) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت‌های مختلف (تنش برشی $\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}$) - ۳۰ درصد پساب



شکل ۱۱- الف) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ب) تغییرات سرعت سقوط توده‌های رسوبی برای غلظت‌های مختلف (تنش برشی $\tau = 0.32 \frac{N}{m^2}$) - ۶۰ درصد پساب

$$W_s = 0.085 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{1.02} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{1.056} \quad R^2 = 0.87, \quad RMSE = 0.0001 \quad (15)$$

$$W_c = 0.048 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.34} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{0.013} \quad R^2 = 0.60, \quad RMSE = 0.0002 \quad (16)$$

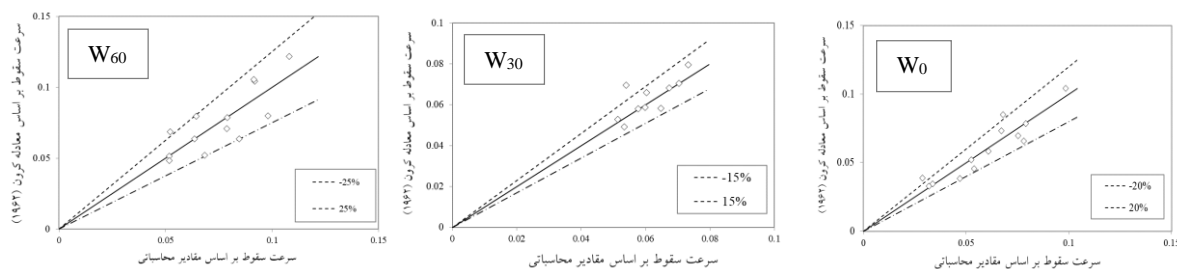
$$W_s = 0.041 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.427} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{0.037} \quad R^2 = 0.60, \quad RMSE = 0.0002 \quad (17)$$

با توجه به یافته‌های فوق، با استفاده از ۷۰٪ نتایج با کمک نرم‌افزار SPSS، تحلیلی در خصوص رابطه سرعت سقوط با تنش- برشی جریان و غلظت تعادلی رسوبات به صورت بی‌بعد انجام گرفت که نهایتاً روابط زیر به ترتیب برای سطوح مختلف پساب برقرار گردید.

برای صحت‌سنجی روابط به دست آمده از ۳۰ درصد باقی مانده داده‌ها استفاده شد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با پذیرش ۲۰، ۱۵ و ۲۵ درصد خطا به ترتیب برای سطوح صفر، ۳۰ و ۶۰ پساب، ۸۵٪ داده‌های واسنجی شده در این محدوده قرار می‌گیرد.

W_s سرعت سقوط (میلی‌متر بر ثانیه)

با توجه به مشخصات آماری محاسبه شده برای روابط به دست آمده می‌توان استنباط نمود که روابط فوق از همبستگی قابل قبولی برای تعیین سرعت سقوط برخوردار هستند. متوسط خطای مقادیر سرعت سقوط، حاصل از معادله اصلاح شده Krone و روابط فوق، به ترتیب ۱۴/۲۵، ۱۰/۵۶، ۷/۴۳ می‌باشد.



شکل ۱۲- مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای سرعت سقوط توده‌های رسوبی

طرح موفق کمک خواهد کرد زیرا معادله‌های تجربی موجود هر یک در شرایط خاصی برقرار گردیده است.

۵- مراجع

اردلان، "شبیه‌سازی جریان رسوبات ریزدانه معلق در مخازن سدهای تنظیمی با استفاده از مدل MIKE11 (مطالعه موردی سد تنظیمی دزفول)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد، ۱۳۸۵.

حسن لی ع، جوان م، "ارزیابی پساب تصفیه‌شده شهری و کاربرد آن در آبیاری فضای سبز"، مجله محیط‌شناسی، شماره ۳۸، ۱۳۸۴، ۲۳-۳۰.

خواستار بروجنی م، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب در فلوکوله شدن رسوبات چسبنده در کانال‌های انتقال آب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۰.

معاضد ه جعفرزاده حقیقی ن، شامحمدی حیدری ز، "حذف کادمیوم از آب و پساب کشاورزی با استفاده از پوسته شلتوک"، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز، اردیبهشت ۱۳۸۵، ۱۲-۱۴.

Arman A, Fathi-moghadam M, Samadi-Boroujeni, Emamgholozadeh S, "Fall velocity of cohesive sediment in Dez dam reservoir", Research Journal of Environmental Sciences, 2009, 3(1), 71-79.

Baldock TE, Tomkins MR, Nielsen P, Hughes, MG, "Settling velocity of sediments at high concentrations. Coastal Engineering", 2004, 51, 91-100.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد، احتمال ته‌نشینی و سرعت سقوط توده‌های رسوبی ریزدانه بسیار متأثر از مقادیر تنش‌برشی جریان و غلظت رسوبات می‌باشد. همچنین مشخص شد، محاسبه سرعت سقوط از رابطه اصلاح شده Krone (۱۹۶۲)، در حالتی که تفاوت اندکی بین غلظت اولیه و غلظت تعادلی باشد، از دقت کافی برخوردار نیست. مشخص شد که افزایش میزان پساب سبب افزایش سرعت سقوط در غلظت‌های مختلف می‌شود. افزایش سرعت سقوط با غلظت اولیه رسوبات رابطه معکوس دارد و غلظت ۵ گرم بر لیتر، بیشترین افزایش سرعت سقوط را به خود اختصاص داده است.

در تحقیق حاضر برای سطوح مختلف پساب، مقادیر سرعت سقوط براساس روابط اصلاح شده Krone (۱۹۶۲) و Burban و همکاران (۱۹۹۰)، دارای یک الگوی نوسان می‌باشند اما الگوی تغییرات سرعت سقوط در رابطه Lau و Krishnappan (۱۹۹۱)، کاملاً برعکس مقادیر به دست آمده از رابطه اصلاح شده Krone (۱۹۶۲)، می‌باشد. نتایج نشان داد که سرعت سقوط توده‌های رسوبی بر اساس معادله‌های مختلف، نسبت به تغییرات غلظت و تنش‌برشی واکنش نشان می‌دهند و حتی برای معادله Lau و Krishnappan (۱۹۹۱)، که فقط براساس غلظت رسوبات برقرار شده است، تنش‌برشی جریان نقش بیشتری بر سرعت سقوط دارد. با توجه به نقش اساسی سرعت سقوط در مطالعات رسوبی و یافته‌های این تحقیق، مسلماً انجام آزمایش‌های ته‌نشینی به اجرای یک

- Burban PY, Xu YU, McNeil J, Lick, W, "Settling Speeds of Floccs in Fresh Water and Seawater", Journal of Geophysics Research, 1990, 95(10), 213-220
- Ha HK, Maa P, "Evaluation of two conflicting paradigms for cohesive sediment deposition", Marine Geology, 2009, 265,120-129.
- Haralampides K, Corquodale A, Krishnappan BG, "Deposition properties of fine sediment", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 2003, 129,230-234.
- Huang J, Hilldate RC, Greiman BP, "Erosion and sedimentation manual", U.S. Department of the Interior, United States Bureau of Reclamation, 2006.
- Jose AO, "A Simple formula to estimate settling velocity of natural sediments", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, 2003, 129 (2), 70-78.
- Krishnappan BG, "Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume", The 7th International Conference on Hydro science and Engineering (ICHE), Philadelphia, USA, 2006.
- Krishnappan BG, Engel P, "Distribution of bed shear stress in rotating circular flume", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130, 324-331.
- Krone RB, "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes", Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley California, 1962.
- Lau YL, Krishnappan BG, Does reentrainment occur during cohesive sediment settling. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Water Reserch 1994, Vol 120 (2), 236-244.
- Nicholson J, O'Connor BA, "Cohesive Sediment Transport Model", Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(7), 621-640.
- Partheniades E, "Cohesive sediments in open channels", Elsevier Inc, Burligton USA, 2009.
- Skafel MG, Krishnappan BG, "A laboratory investing of depositional characteristics of mud from an inland harbour using a rotating circular flume", 1998, Journal of Water, Air and Soil Pollution, 1998, 112, 1-19.
- Thorn MFC, "Physical Processes of Siltation in Tidal Channels", Proceeclings of the Conference on Hydraulic Modelling Applied to Maritime Engineering Problems, Institution of Civil Engineers, London, England, 1981.
- Winterwerp JC, "On the sedimentation rate of cohesive sediment", Estuarine and coastal fine sediment dynamics Elsevier, 2006, 209-226.

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Effect of Wastewater Concentration on the Fall Velocity of Cohesive Sediments in Water Transfer Systems

Milad Khastar-Boroujeni^a, Kazem Esmaili^{a,*}, Hossin Samadi-Boroujeni^b, AliNaghi Ziaei^a

^a Water Science and Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

^b Water Engineering Department, Shahrekord University, +98 38-34424401, Iran

Received: 06 September 2016; Accepted: 21 May 2017

Keywords:

Deposition Rate, Critical Shear Stress, Annular Flume, Acoustic Velocimeter Doppler

1. Introduction

Cohesive sediments are composed primarily of clay-sized material, which have strong interparticle forces due to their surface ionic charges. As particle size decreases, the interparticle forces dominate the gravitational force, and the settling velocity is no longer a function of only particle size. When, under certain conditions, the attractive forces exceed the repulsive ones, colliding particles stick together, forming agglomerations known as "flocs" with size and settling velocities much higher than those of the individual particles. This phenomenon is known as "flocculation" (Baldock et.al, 2004). In a flocculated cohesive sediment suspension, the settling unit is the floc rather than the individual particle. The settling velocity of cohesive sediment particles, also is called the fall velocity, is one of the key variables in the study of sediment transport and is important in understanding suspension, deposition, mixing and exchange processes (Partheniades, 2009). Adding a chemical solution in a mixture of water and sediment changes the physicochemical of the sediments and the flocculation of the clay particles may increase or decrease. Today, in many countries the wastewater is used for irrigation as an additional water resource. Wastewater in combination with other water resources change the physicochemical characteristics of the water and it causes changing in hydrodynamic behaviors which one of them is the effect of wastewater concentration on the fall velocity of cohesive sediments in channels and water transfer Systems (khastar-Boroujeni, 2018). Therefore this study focuses on the effect of urban wastewater on cohesive sediments transport to improve water quality and manage the irrigation systems. For this purpose, some experiments were carried out in an annular flume using a mixture of cohesive sediment and water with combination of three levels of wastewater for evaluating their effects on the fall velocity of cohesive sediments.

2. Methodology

In this work, all experiments were conducted in an annular flume located at the Hydraulics Laboratory of Shahrekord University, Iran. The flume is circular and is made of galvanized steel sheet with a Plexiglas window. The flume has a mean diameter of 1.6 m, is 0.30 m wide and 0.47 m deep, and rests on a rotating platform which is 1.9 m in diameter. Fine sediments used in the experiments were taken from sediment deposited in Pribalut dam reservoir. The dam is located in northern Karun Basin, in Iran. These fine sediments contain 63.2% silt and 36.8% clay with mean diameter of 0.0035 mm. Wastewater used in the experiments was taken from Shahrekord wastewater treatment plant outlet which is located south of Shahrekord city, Iran. The tests were carried out for five bed-shear stress conditions, three different initial sediment concentrations and three levels of wastewater concentrations. The shear stresses were chosen in a way that at minimum and maximum shear stresses which was defined depositing eighty and twenty percent of suspended sediments,

* Corresponding Author

E-mail addresses: khastar1365@yahoo.com (Milad Khastar- Boroujeni), esmaili@um.ac.ir (Kazem Esmaili), samadi153@yahoo.com (Hossin Samadi-Boroujeni), an_ziaei@yahoo.com (Alinagh Ziaei).

respectively. Also in the experiments levels of wastewater was 0%, 30% and 60% of water used and initial sediment concentrations was 5, 10 and 20 g/l, respectively.

Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) was used to measure velocity and shear stress distributions, and based on these measurements, the relationship between hydraulic parameters and the flume rotational speed was obtained. Then, sediment and water mixture with a given initial concentration was prepared and was transferred to the flume. In order to mix water and sediment completely, the flume and its ring were oppositely rotated at their maximum speeds of 14.8 and 16.2 rpm, respectively, for thirty minutes. Then, the speed of the flume and its ring was lowered to reach a rotation speed providing the desired bed shear stress. The time duration for all experiments was considered 240 minutes, and in the meanwhile, the test samples were collected in a sampling interval of 15 min during the first hour, and 30 minutes thereafter. The samples were taken from depths 5.5, 10.3 and 18.3 cm from the bottom and then, sample concentrations were measured by the drying and weighting method.

3. Results and discussion

The results showed that wastewater causes deposition rate of the sediments to be increased at a constant shear stress. This rate also increases much more by increasing initial sediment concentration. It was also found that the fall velocity of suspended sediment was increased with increasing of the concentration of wastewater. The fall velocity of the sediments was calculated by using the Krone (1962), Krone modify (1962), thorn (1981), Nicholson and O'Connor (1986), Burban et al (1990) and Lau and Krishnappan (1991) equations (Huange et al, 2006).

Based on the obtained results and using multiple regression technique, the following relationships were derived:

$$W_s(w_0) = 0.085 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.102} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{1.056} \quad R^2 = 0.87, \quad RMSE = 0.0001$$

$$W_s(w_{30}) = 0.048 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.24} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{0.013} \quad R^2 = 0.60, \quad RMSE = 0.0002$$

$$W_s(w_{60}) = 0.041 \left(\frac{\tau}{\tau_{cd}} \right)^{0.427} \left(\frac{C_{eq}}{C_0} \right)^{0.037} \quad R^2 = 0.65, \quad RMSE = 0.00004$$

Where, W_s : fall velocity, w_i : concentration of wastewater, τ : flow shear stress, τ_{cd} : critical shear stress for full deposition, C_0 : initial concentration, C_{eq} : equilibrium concentration.

4. Conclusions

The result showed fall velocity of sediment particles depends on the amount of shear stress and suspended sediments concentration. It was also observed the wastewater increase sediment mass fall velocity. The Multiple regression analysis showed that by increasing concentration of wastewater, the effect of shear stress on the fall velocity of the cohesive sediment is strongly increased and the effect of initial sediment concentration is decreased.

5. References

- Huang J, Hilldate RC, Greiman BP, "Erosion and sedimentation manual", U.S. Department of The Interior, United States Bureau of Reclamation, 2006.
- Baldock TE, Tomkins MR, Nielsen P, Hughes, MG, "Settling velocity of sediments at high concentrations. Coastal Engineering", 2004, 51, 91-100.
- Partheniades E, "Cohesive sediments in open channels", Elsevier Inc, Burlington USA, 2009.
- Khastar Boroujeni M, Esmaili K, Samadi-Boroujeni H, Ziaei AN, "Experimental Study of Wastewater Effect on the Deposition of Cohesive Sediment", 2018, Journal of Environmental Engineering (ASCE), 144(1).